

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention

Du Diplôme de MASTER

En énergétique

Option

ENERGIES RENOUVELABLES

Présenté par :

M^{elle} SEBBAGH Khadidja

M^{elle} CHERFAOUI Imane

Thème

**Etude du séchage des produits agricoles dans
un séchoir solaire-cas de poivron rouge**

Soutenu le 18 Juin 2017, devant le jury composé de :

Mme BELARBI

UMBB

Examineur

Mme ABDALLAHOUM

UMBB/USTHB

Président

M BOUHDJAR Amor

CDER

Encadreur

M^{elle} KADDOURI Fareh

UMBB

Co-encadreur

2016/2017

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant pour la santé, la volonté, le courage et la patience qu'il nous a donnés durant ces années d'étude.

Nos vifs remerciements sont à adresser à notre encadreur M.A.BOUHDJAR, Directeur de Recherche au CDER pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations, son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également notre Co-encadreur M^{elle} F. KADDOURI, Université UMBB pour son soutien.

Nos vifs remerciements s'adressent également à Mme BELARBI et Mme ABDALLAHOUM d'avoir accepté de participer au jury de soutenance.

Nous tenons à remercier vivement les chercheurs du CDER à savoir M. H. SEMAI, M.S. EL MOKRETAR, M. M. KOUSSA, Mme D. KOUSSA, pour leurs aides et leurs soutiens durant notre stage au CDER.

Nous remercions la direction du CDER pour nous avoir permis d'accomplir notre stage dans de bonnes conditions.

Nos profondes gratitudes s'adressent à Monsieur Kadi, Chef de Département et à l'ensemble des enseignants du département du physique pour toutes les connaissances qu'ils nous ont transmises sans oublier tout le personnel du département durant notre cursus.

Merci

Je dédie ce modeste travail à

Aux plus chers de ma vie, la source et la raison de mon existence : mon père et ma mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes cotés et leur soutien auxquels je dois tous. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.

Mes chers parents que dieu vous protège,

A mes très chères sœurs, les sources de mes sourires,



Ma vie Mafía



Ma belle Nora

A mes très chères beaux-frères *Amine* et *Hamza*,

A mon petit ange *Hibaterahmane* ; que Dieu te protège,

A mon fiancé *Lounes*,

A toutes mes familles,

A tous mes enseignants d'énergétique,

A tous mes amis et amies plus précisément à *Zakia*, *Fahima*, *Fatima zahra*, *Imane* et *Sara*.

Ainsi que tous mes collègues d'énergétique et tous ceux et celles qui aiment *Khadidja*.

Khadidja

Je dédie ce modeste travail à

Aux plus chers de ma vie, la source et la raison de mon existence : mon père et ma mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes cotés et leur soutien, auxquels je dois tous. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.

Mes chers parents que Dieu vous protège,

A mes très chères sœurs,

- Naima
- ouahiba
- Samira
- safia

A mes très chers frères,

- Mohamed
- Marouane
- Mourade

A mon petite mignon mohamed,

A mon cousin Smail,

A toutes mes familles,

A mes proches amis et amies Hamza, Khadidja, Amina, Asma, Fatma,

A tous mes enseignants d'énergétique,

Ainsi que tous mes collègues d'énergétique. Et tous ceux et celles qui aiment Imane

Imane

Résumé

ملخص

يتمثل هذا العمل في مساهمة لدراسة نظرية وتجريبية لحصيلة الطاقة والكتلة لمجفف شمسي. نهتم في هذا العمل بالمظاهر الطاقوية لجهاز شمسي للتجفيف المباشري للفلفل الأحمر مع استعمال خزان للطاقة متمثلاً في سرير الحجارة ودراسة إمكانيات تقدير سعة الهواء لامتناس الرطوبة الصادرة من المنتج أثناء عملية التجفيف للفلفل الأحمر وهذا عن طريق التبادل الحراري الحمل الحر. باستعمال طريقة الحصيلة الإجمالية يتم تقييم درجات الحرارة للهواء الداخلي ولمكونات المجفف الشمسي مع حصر مختلف التبادلات الحرارية الحصيلة منها (المنقولة) والإشعاعية الحاصلة داخل المجفف وهذا انطلاقاً من ميزات المناخ الخارجي والمميزات الفيزيائية للمجفف. تتعلق الدراسة النظرية من جهة بتحديد مختلف المركبات للاشعاع الشمسي وبحل مجموعة معادلات رياضية بتصنع نموذج المؤسس على الحصيلة الإجمالية أخذاً بعين الاعتبار نتائج التجربة الشروط الأولية.

Résumé

Le travail porte sur une contribution sur une étude théorique et expérimentale du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir serre. A cet effet, nous nous intéressons aux aspects énergétiques d'un système solaire de séchage de type direct de poivron rouge, muni d'un stockage d'énergie (lit de galets) et à l'étude au cours d'une journée, les possibilités d'estimation de la capacité de l'air intérieur à absorber l'humidité se dégageant du produit par échange thermique convectif libre au cours du processus de séchage. Les températures de l'air intérieur et des différents éléments constituant le système séchoir solaire ainsi que les différents échanges convectif et radiatif qui y s'effectuent sont évalués par les méthodes des bilans globaux et ce à partir des caractéristiques du climat extérieur et des caractéristiques de la serre elle-même.

L'étude théorique a consisté d'une part à déterminer les différents composants du rayonnement solaire et à résoudre un système d'équations mathématiques, simulant notre modèle basé sur la méthode des bilans globaux en tenant compte des résultats expérimentaux comme conditions initiales.

Abstract:

The study carried out is related to the theoretical and experimental contribution of the energy assessment of a greenhouse drier. In this work, we were interested in the energy aspects of a direct solar drier with an energy storage system (rock bed), and to the study through one day, possibilities to evaluate the capacity of air to absorb humidity emanating from the product (red pepper) by a free convective heat exchange. Using the global assessment method and taking into consideration characteristics of the outside climate and the physical characteristics of the greenhouse herself, we evaluate the inside air temperatures and those of different elements that constitute the solar drying system and we estimate the heat convected and radiated into the drier.

The theoretical study consisted on the one hand in determining the different components of the solar radiance and to solve a mathematical equation system, simulating our model based on the global assessments while considering the experimental results as initial conditions.

Sommaire

Introduction générale.....	(1)
----------------------------	-----

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES ENERGIES.

Introduction.....	(4)
1.1. Les énergies non renouvelables.....	(4)
1.1.1 Les énergies conventionnelles.....	(4)
1.1.1.1 L'énergie nucléaire.....	(4)
1.1.1.2 L'énergie fossile.....	(5)
1.2 Les énergies renouvelables.....	(7)
1.2.1 L'énergie hydraulique.....	(7)
1.2.2 L'énergie éolienne.....	(7)
1.2.3 L'énergie de la géothermie.....	(8)
1.2.4 L'énergie de la biomasse.....	(8)
1.2.5 Les énergies marines.....	(8)
1.2.6 L'énergie solaire.....	(9)
1.2.6.1 Présentation du soleil.....	(10)
1.2.6.2 La constante solaire.....	(11)
1.2.6.3 Mouvement de la terre autour du soleil.....	(11)
1.2.6.4 Trajectoire apparente du soleil.....	(12)
1.2.6.5 Coordonnées du soleil.....	(13)
1.2.6.6 Cordonnées terrestres.....	(15)
1.2.6.7 les différents instruments de mesure du rayonnement.....	(16)
1.2.6.8 Les temps solaires.....	(18)
1.2.6.9 Le rayonnement solaire.....	(19)

CHAPITRE 2: SECHAGE

Introduction.....	(26)
2.1 Définition du séchage.....	(22)
2.2 Terminologie de séchage.....	(27)
2.2.1 Humidité.....	(27)
2.2.2 Taux d'humidité.....	(27)
2.2.3 États de siccité.....	(27)
2.2.4 Taux d'humidité à l'équilibre.....	(27)

Sommaire

2.2.5 Corps hygroscopique.....	(27)
2.2.6 Les différents modes de liaison de l'eau.....	(28)
2.2.7 Energie de liaison – chaleur de vaporisation.....	(28)
2.3 Mode de séchage.....	(29)
2.3.1 Séchage par conduction.....	(29)
2.3.2 Séchage par convection.....	(29)
2.3.3 Séchage par rayonnement.....	(32)
2.4 Transfert de masse.....	(32)
2.4.1 Loi de Fick.....	(32)
2.4.2 Loi de Darcy.....	(32)
2.5 Le séchage à l'air libre.....	(33)
2.6 Les types de séchoirs.....	(34)
2-6-1-Les séchoirs solaires indirects	(34)
2-6-2-Les séchoirs solaires directs	(34)
2-6-3-Les séchoirs solaires mixtes.....	(34)

CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction.....	(37)
3.1 Dispositif Expérimental	(37)
3.2 Caractéristiques géométriques du séchoir.....	(39)
3.3 Préparation du séchoir... ..	(40)
3.4 Appareils de mesure	(40)
3.4 Période d'expérimentation... ..	(44)
3.4.1 Courbe de séchage.....	(44)
3.4.2 Cinétique de séchage.....	(45)
3.4.2.1 Teneur en eau de poivron (X)	(45)
3.4.2.2 Vitesse de séchage.....	(46)
3.4.3 Produit séché (le poivron)	(46)
3.5.4 Protocole expérimental (Séchage de poivron)	(47)
3.6.4.1 Préparation du produit.....	(47)
3.6.4.1.1 Séchage par convection régulée.....	(48)
3.6.4.1.2 Séchage par séchoir solaire (serre).....	(49)

Sommaire

CHAPITRE 4 : MODILISATION

Introduction.....	(52)
4.1 Calcul des composantes du rayonnement solaire.....	(52)
4.1.1 Rayonnement solaire direct.....	(52)
4.1.2 Rayonnement solaire diffus.....	(53)
4.1.3 Rayonnement solaire global.....	(53)
4.2.4 Les bilans d'énergie du système.....	(53)
4.3 Equations du modèle.....	(57)
4.4 Détermination des coefficients d'échange.....	(57)
4.5 Méthode de résolution.....	(59)
4.6 Présentation des résultats	(60)
4.6.1 Intensité du rayonnement solaire.....	(60)
4-6.2 variation de la température du différents éléments de séchoir.....	(61)
4.6.3 Humidité relative dans le séchoir.....	(65)
4.6.4 Vitesse d'écoulement de l'air dans le séchoir....	(65)
4.6.5 Mesures expérimentales de la vitesse d'écoulement de l'air.....	(66)
4.6.6 Evolution de la masse.....	(67)
4.6.7 Evolution de la vitesse de séchage.....	(69)
4.6.8 La teneur en eau.....	(71)
Conclusion générale	(72)
Bibliographie.....	(74)



Liste des figures

Chapitre 1

1.1 Le mouvement de la terre autour du soleil	12
1.2 Trajectoire de la position du soleil	12
1.3 Variation de l'angle horaire en fonction du temps solaire vrai	14
1.4 Cordonnées terrestres	16
1.5 Pyrradiomètre	17
1.6 Pyranomètre	17
1.7 Pyrhéliomètre	17
1.8 Pyrradiomètre différentiel	18
1.9 Héliographe	18
1.10 Rayonnement solaire et masse d'air	20
1.12 Trois composantes du rayonnement solaire globale sur un plan incliné	22
1.11 Impact d'un rayonnement à la surface d'un corps noir	23
1.13 Composante normale	24

Chapitre 2

Figure2.1 Différents types de séchoirs solaires	35
---	----

Chapitre 3

3.1 Séchoir solaire direct (serre) avant modification	38
3.2 Séchoir solaire directe (serre) avec tubes d'évacuation supplémentaires	38
3.3 Humidité-température mètre type CHY722	41
3.4 Pyranomètre MS-410	42
3.5 Appareil d'enregistrement digital type AGILENT 34970A à voies	43
3.6 Anémomètre AVM-03	43
3.7 Balance électronique à affichage numérique	44
3.8 Poivron rouge	46
3.9 Préparation de poivron	47
3.10 Séchage par convection naturel	48
3.11 Mesure de l'humidité et de la température	48

Liste des figures

3.12 Mesure de la vitesse de l'air asséchant	49
3.13 Séchage par séchoir solaire (Serre)	50
3.14 Séchage à l'air libre	50
3.15 Mesure de la masse de poivron	50
Chapitre 4	
4.1 Représentation les différents échanges dans le séchoir	52
4.2 Schéma du séchoir après simplification	57
4.3 Variation de rayonnement solaire théorique sur plan horizontal	60
4.4 Rayonnement solaire global mesuré sur plan horizontal (7 juin)	60
4.5 Evolution des températures expérimentale des différents éléments de séchoir	61
4.6 Evolution des températures des différents éléments obtenues numériquement	62
4.7 Températures de l'air intérieur et extérieur (7 juin)	62
4.8 Moyenne des températures, de l'air intérieur et lit de galets, (7 juin)	63
4.9 Températures de l'air intérieur et des galets (7 juin)	63
4.10 Températures du toit (vitre 15°), de la vitre (55°) et l'air intérieur	64
4.11 Températures des parois Est, Ouest et de l'air intérieur	64
4.12 Courbes d'humidité à l'entrée et à la sortie du séchoir	65
4.13 Courbe de vitesse en fonction de $\frac{\Delta T}{T_a}$	66
4.14 Evolution de la masse de poivron durant séchage par convection naturelle régulée	67
4.15 Evolution de la masse de poivron lavé à l'eau	68
4.16 Evolution de la masse de poivron à l'état naturel	68
4.17 Evolution de la masse de produit à l'air libre	69
4.18 Courbe de variation de rapport de masse sur le temps (vitesse de séchage)	70
4.19 Variation de vitesse de séchage par l'air libre et par séchoir solaire	70
4.20 Variation de la teneur en eau après séchage à l'air libre et dans le séchoir solaire	71
4.21 Teneur en eau après séchage par convection naturelle régulée	71

Liste des tableaux

1.2 Information sur le soleil	11
1.2 Quelques valeurs de l'albédo	21
2.3 Avantages et inconvénients du séchage à l'air libre et du séchage par séchoir solaire.....	33
3.1 Dimensions du séchoir solaire.....	39
3.2 Caractéristiques thermo-physiques des éléments du séchoir	40
3.3 Positions des thermocouples	41
3.4 Caractéristiques du poivron rouge.....	47



NOMENCLATURE

a, b : coefficient d'albédo	
Q_i : flux incident.	[W/m ²]
Q_r : flux réfléchi.	[W/m ²]
Q_a : flux absorbé.	[W/m ²]
Q_t : flux transmis.	[W/m ²]
ρ_r : le facteur de réflexion	
α_a : le facteur d'absorption	
τ_t : le facteur de transmission	
a_v : coefficient d'absorption global de la vitre.	
a_s : coefficient d'absorption global du sol	
a_n : coefficient d'absorption global de la paroi Nord.	
C_i : la capacité calorifique du milieu matériel i	[J/K]
C_p : chaleur spécifique	[kJ/kg.K]
V_s : volume intérieur de séchoir	[m ³]
ΔT : écart de température moyen entre la paroi considérée et l'air intérieur.	[K]
E_t : équation du temps	
F_{ij} : facteur de forme géométrique entre la surface (i) et la surface (j)	
g : accélération de la pesanteur.	[m ² /s]
HSI : rayonnement solaire direct	[W/m ²]
Φ_1 : le rayonnement émis par la voûte céleste	[W/m ²]
Φ_2 : le rayonnement émis par le sol.	[W/m ²]
HSD : rayonnement solaire diffus.	[W/m ²]
i : angle incidence.	[Degré]
HSG : rayonnement solaire global	[W/m ²]
HS (i) : le flux solaire global incident sur la surface i	[W/m ²]
h : hauteur du soleil.	[Degré]
ϵ_i : Emissivité de produit	
ϵ_j : Emissivité de la surface j	
S_{pe} : Surface de la paroi est	[m ²]
S_{po} : surface de la paroi ouest	[m ²]
S_5 : Surface de la paroi nord	[m ²]
V_f : vitesse de fluide	[m ² /s]

NOMENCLATURE

Ut : le coefficient global d'échange thermique de la vitre avec le milieu extérieur.	
[W/m ² .K].	
U _{bn} : Coefficient d'échange global de la paroi Nord.	
R _{s5} : Les rayons incidents sur la paroi nord.	
R _{s1} : Les rayons incidents sur le sol.	
Qu : l'énergie utile.	
h _{ij} : coefficient d'échange par convection entre l'élément i et j	[W/m ² .K]
h _{rij} : coefficient d'échange par rayonnement entre l'élément i et j	[W/m ² .K ⁴]
I ₀ : Irradiation solaire globale reçue sur un plan horizontal.	[W/m ²]
I _h : éclairement solaire global reçu sur un plan horizontal.	[W/m ²]
I _{bh} : rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal.	[W/m ²]
I _{dh} : rayonnement solaire diffus reçu sur un plan horizontal.	[W/m ²]
I _{bc} , I _c , I _{dc} , I _{rc} : irradiances solaires directe, diffuse, réfléchie et globale reçues sur un plan Incliné (couverture vitrée).	[W/m ²]
I _N , I _{bN} , I _{dN} : rayonnements global, direct, diffuse sur un surface normal.	[W/m ²]
Cn, C : constantes.	
R _r : facteur d'inclinaison pour le rayonnement réfléchi	
R _b : facteur d'inclinaison pour le rayonnement direct	
R _d : facteur d'inclinaison pour le rayonnement diffus	
k : constante de séchage	[1/s]
λ _a : conductivité thermique du mélange air-vapeur d'eau.	[W/m.K]
k _T : indice de clarté du ciel	
l : longueur caractéristique.	[m]
L _v : chaleur latente de vaporisation	[j/Kg]
La : chaleur de liaison de l'eau.	
L : chaleur de vapeur de l'eau dite libre.	
H : angle horaire	[Degré]
Φ : flux thermique.	[W]
S : la surface d'échange.	[m ²]
$\frac{dT}{dt}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.	
h : coefficient de transfert de chaleur par convection.	[W/m ² .K]
$\frac{1}{h s}$: Résistance thermique.	[K/W]

NOMENCLATURE

D_h : diamètre hydraulique	[m]
A_w : activité de l'eau dans un corps humide	
P_{vp} : pression de vapeur	[Pa]
P_{vs} : pression de vapeur saturante.	
Q_{ir} : pertes par rayonnement infrarouge entre la vitre et l'atmosphère extérieure	
[W/m ²]	
Q_f : pertes par les fuites.	[W]
Q_{ij} : flux de chaleur reçu par le milieu matériel j et parvenant du milieu matériel i par convection naturelle.	[W]
Q_{rij} : flux de chaleur par rayonnement infrarouge du milieu i et reçu par le milieu j	
[W]	
R_s : taux de renouvellement de l'air dans le séchoir-serre.	[1/h]
S_2 : surface de la vitre verticale	[m ²]
S_3 : surface de la vitre inclinée de 55°	[m ²]
S_4 : surface de la vitre inclinée de 15°	[m ²]
t : le temps	[s]
TSV : temps solaire vrai	
TU : temps universel	
TC : temps civil	
TL : temps local	
TSM : temps solaire moyen	
GMT : Greenwich Mean Time	
ΔH : l'avance de l'heure locale sur l'heure normale du fuseau	
$\Delta \theta$: décalage local du à l'écart de longitude méridien local et de méridien central du fuseau	
Δt : correction de l'équation de temps	
ΔU : décalage horaire par rapport au méridien local	
T_i : la température moyenne du milieu matériel i.	[K]
Avec :	
$i = 1$: surface supérieure du sol (lit de galets).	
$i = 2,3, 4$: vitres verticale, inclinée de 55°, inclinée de 15°	
$i = 5$: paroi nord ;	
$i = 6$: lit de séchage ;	

NOMENCLATURE

$i = f$: fluide intérieur.

$i = a$: l'extérieur du séchoir.

V_s : volume intérieur du séchoir-serre [m³]

U (vent) : débit d'air de ventilation [m³/h]

X_s : teneur en eau du produit en base sèche [kgeau / kg ms]

$X(t)$: teneur en eau à l'instant t [kgeau / kg ms]

$X(0)$: la teneur en eau initial du produit [kgeau / kg ms]

X_{eq} : la teneur en eau d'équilibre [kgeau / kg ms]

M_s : la masse de la matière sèche [kg]

$M(t)$: masse de produit humide [kg]

M_i : masse initial de produit [kg]

M_f : masse finale de produit [kg]

dX/dt : vitesse de séchage [kgeau / kgms.h]

Lettres grecques

β_j : angle formé par la vitre d'indice j et le plan horizontal ($j = 2,3,4$) [Degré]

β_d : coefficient de dilatation volumique. [1/K]

n_j : nombre de jours.

δ : déclinaison du soleil [Degré]

α : azimut. [Degré]

β : l'angle d'inclinaison [degré]

ϵ_c : coefficient d'émission du ciel à basse température

ϵ_v : émissivité de la vitre ordinaire.

σ : Constante de STHEFAN BOLTZMAN [W/m².K⁴]

ν : viscosité cinématique. [m²/s]

μ : Viscosité dynamique. [kg/m.s]

ρ : masse volumique. [kg/m³]

λ : coefficient de conductivité thermique. [W/m. K]

Φ : latitude du lieu

L : longitude

λ : altitude

τ : le coefficient de transmission du vitrage.

NOMENCLATURE

Nombres adimensionnels

Nu : Nombre de NUSSELT.

Pr : Nombre de PRANDTL.

Gr : Nombre de GRASSHOF.

Ra : Nombre de RAYLEIGH.

Re : Nombre de RAYNOLDS.

Introduction général

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours de saison. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à ce handicap : colature sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits.

Notre travail concerne justement le séchage et se compose de quatre chapitres :

- ✚ Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les différents types d'énergies c-à-dire les énergies renouvelables et non renouvelables. Dans la dernière section, On traite l'énergie solaire et les différentes lois fondamentales liées sur cette énergie.
- ✚ Dans la deuxième chapitre, on étudie le phénomène de séchage particulièrement le séchage solaire ; dans la première partie on présente le séchage solaire et les différentes lois liées à ce dernier et la deuxième partie présente les types de séchoir.
- ✚ Le troisième chapitre présente la partie expérimentale, la représentation de séchoir solaire direct (serre) et le produit à sécher.
- ✚ Le quatrième chapitre traitera des résultats de séchage de produit agroalimentaire.

Introduction

Dans le monde, il existe différentes sources d'énergies utilisables afin de pouvoir répondre aux nombreuses demandes de la population mondiale, qui elle, augmente de jours en jours. Dans le monde, il existe différentes sources d'énergies utilisables afin de pouvoir répondre aux nombreuses demandes de la population mondiale, qui elle, augmente de jours en jours.

Nous pouvons donc nous demander quelles sont les conséquences ainsi que les problèmes et les bienfaits dus aux consommations énergétiques mondiales.

En premier lieu, nous allons présenter les différentes sources d'énergies utilisées (renouvelable et non renouvelable)

Dans ces différentes sources d'énergies, deux sortes se distinguent : les énergies dites non renouvelables et les énergies dites renouvelables. Ces énergies existent sous différentes formes.

1.1 Les énergies non renouvelables :**1.1.1 Les énergies conventionnelles**

Les énergies conventionnelles (par opposition aux énergies alternatives qui visent à remplacer les sources énergies déjà existantes) sont des formes d'énergies massivement employées pour répondre aux besoins de production et de consommation des êtres humains. Parmi celles-ci, les plus utilisées au niveau mondial sont l'énergie nucléaire et l'énergie tirée des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel). Cependant, une prise de conscience semble s'opérer au niveau international depuis les dernières décennies : les sources d'énergie conventionnelles desquelles notre mode de vie est devenu dépendant sont non renouvelables, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent se régénérer par elles-mêmes à un rythme aussi rapide que la consommation qui en est faite par les sociétés humaines. De plus, les impacts de l'utilisation de ces sources d'énergies sont souvent néfastes pour l'homme et l'environnement.

1.1.1.1 L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire utilise l'uranium, un métal radioactif, comme combustible pour produire de l'électricité. Cette énergie utilise le fait que les noyaux des atomes d'uranium sont instables. Ils se désintègrent sans cesse tout en produisant de l'énergie. C'est pourquoi cette énergie est aussi appelée Energie Atomique.

➤ Avantage :

- grande puissance.
- pas d'émission de CO₂.

- disponible toute l'année.
- installation de durée de vie moyenne (40 ans).

➤ **Inconvénients :**

- rendement faible (30%).
- risques nucléaires en cas d'accident.
- problème de stockage des déchets nucléaires.
- coûts importants d'installation et d'entretien.
- ressources en uranium limitées.

1.1.1.2 Les énergies fossiles

Les énergies fossiles sont produites à partir de matières premières riches en carbone issues de la fossilisation de matières organiques. Ce sont le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Ces matières du sous-sol sont présentes en quantités limitées. Leurs réserves s'épuisent donc au fur et à mesure de leur exploitation contrairement aux énergies renouvelables. Elles représentent aujourd'hui plus des trois quarts de la consommation mondiale d'énergie et sont essentielles pour répondre à un certain nombre des besoins de l'homme.

Les combustibles fossiles, à l'aide desquels on obtient l'énergie d'origine fossile, sont produits à dans des roches. Ils se sont formés par le biais de la fossilisation de végétaux vivants en se transformant en pétrole, en charbon (houille) et en gaz naturel. Ces sources d'énergies sont non renouvelables et ont initialement mis des millions d'années. Au rythme de consommation actuel, l'homme devra trouver d'autres moyens pour s'approvisionner en énergie...

a. Charbon

Le charbon est une roche noire stratifiée à partir de restes de végétation. C'est une roche organique noire ou brune très foncée, déposée principalement à la période carbonifère. Les divers charbons ont des teneurs en carbone comprises entre 60 et 95%. Ces teneurs dépendent du degré de houillification du charbon. Il contient principalement du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène, combinés chimiquement comme dans les produits de la photosynthèse.

On y trouve aussi une faible proportion d'azote, de chlore, de soufre et des traces de plusieurs métaux. Les proportions de carbone, d'hydrogène et d'oxygène varient en fonction du degré de houillification. Pendant cette houillification, l'eau et le dioxyde de carbone ont été éliminés et le méthane est généré.

➤ **Avantage**

- C'est la seule forme d'énergie fossile qui est solide.
- Il permet de produire du gaz de houille et un grand nombre de produits chimiques carbonés ou hydrogénés.

➤ **Inconvénients**

C'est une énergie non-renouvelable et très coûteuse à extraire, C'est une énergie fossile très polluante surtout à cause de ses impuretés qui se dispersent dans l'atmosphère lors de sa combustion. De plus, lors de sa combustion, c'est une énergie fossile qui libère beaucoup de dioxydes de carbone. Ce phénomène est à l'origine de l'accroissement de l'effet de serre

b. Pétrole

C'est une huile minérale de couleur noire ou très foncée, onctueuse au toucher, douée d'une odeur âcre caractéristique. Il est essentiellement composé d'hydrocarbures. Le pétrole est aussi appelé à l'état brut, crude oil ou huile naphtée.

Le pétrole brut est un liquide d'origine fossile qui est composé d'un mélange d'hydrocarbures présents dans certaines roches. Il peut être extrait et raffiné pour produire des combustibles comme l'essence, le kérosène, le diesel, etc.

Le pétrole est utilisé comme carburant. Grâce à sa combustion (après raffinage), il permet de faire fonctionner les voitures, les avions...

Le pétrole est également consommé en tant que combustible; il alimente les chaudières et permet de chauffer les maisons.

Enfin, il est exploité dans les centrales thermiques pour produire de l'électricité. [14]

c. Gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile extrait de gisements naturels et est essentiellement composé de méthane. Issue de la dégradation d'anciens organismes vivants, il subit le même processus de formation que le pétrole. Aussi on le trouve souvent dans les mêmes zones de production que ce dernier. Il est la troisième source d'énergie la plus utilisée dans le monde (après le pétrole et le charbon). [14]

1.2 Les énergies renouvelables :

1.2.1 L'énergie hydraulique

Les rivières et les fleuves sont une source illimitée d'énergie propre. L'énergie hydraulique utilise la force de l'eau en mouvement pour faire tourner des moulins.

Elle est plus respectueuse de l'environnement que les combustibles fossiles, comme le charbon ou le gaz, parce qu'elle ne cause aucune pollution. L'eau est une source d'énergie renouvelable et gratuite.

➤ **Avantages**

- C'est une énergie propre, renouvelable sans émission de fumées et pollution.
- Disponible toute l'année.
- Installation de très longue durée.
- Technologie bien maîtrisée.
- Très bon rendement (90 %).

➤ **Inconvénients**

- Coût important des aménagements.
- Risques de rupture du barrage.
- Perturbation de l'écosystème.
- Modification de l'aspect naturel du site.

1.2.2 L'énergie éolienne

La conversion de La force des vents en énergie mécanique, énergie électrique ou énergie cinétique. C'est une énergie renouvelable car sa source est illimité mais intermittente(le vent ne souffle pas toujours). Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.

➤ **Avantage :**

- Augmente l'autonomie par rapport le charbon et le pétrole.
- Pas d'émission de CO₂ (gaz).
- Créateur d'emplois.
- Cout du kWh éolien compétitif par rapport aux moyens de production conventionnels.

➤ **Inconvénients :**

- Bruit.
- Perturbation visuelle.

- Capacité de prévision réduite.
- fourniture aléatoire.

1.2.3 L'énergie de la géothermie

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique.

1.2.4 L'énergie de la biomasse

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments. C'est l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. Il existe de nombreuses technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies transforment l'énergie de la biomasse en une forme utilisable directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.

➤ **Avantage**

- La biomasse participe au traitement des déchets organiques.
- Peu de modifications dans les chaudières fioul. Quelques changements peuvent intervenir dans quelques parties comme les brûleurs.
- La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie.

➤ **Inconvénients**

- La production de biocarburant n'est pas encore très développée.
- il faut utiliser des terres agricoles pour produire de la biomasse.
- La biomasse peut être polluante si elle est mal utilisée.
- la combustion du bois rejette des éléments nocifs dans l'atmosphère.

1.2.5 L'énergie marine

C'est une énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans qui couvrent presque 70 % de la surface du globe pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur.

Avantages

- Énergie renouvelable
- Production régulière et prévisible quelle que soit la météo
- Énergie naturelle peu d'impact sur le paysage

➤ Inconvénients:

- Coût actuellement élevé
- Techniques encore souvent expérimentales
- Rendement moyen (40-50 %)
- Durée de vie des installations encore inconnue (car trop récentes)

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) mais non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter et rentables. Cependant, pour diverses raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées à ce rythme. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossile commencent à s'amoinrir.

De nombreuses sources d'énergies non polluantes, renouvelables, abondantes partout sur la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface.

L'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire.

L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages. L'énergie solaire, elle, est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale durant toute l'année, et a un rendement en amélioration continue grâce aux nouvelles technologies. Elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir. De part l'utilisation que nous comptons faire dans notre projet, nous allons présenter plus de détails sur cette forme d'énergie.

1.2.6 L'énergie solaire

Le Soleil produit de l'énergie grâce aux réactions de fusion nucléaire qui se produisent en son noyau, à cause de la chaleur et de la pression très élevées. Les atomes d'hydrogène et leurs isotopes se heurtent violemment pour former de l'hélium, libérant en même temps une énorme quantité d'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Ainsi, chaque seconde, le Soleil transforme 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium et perd 4 millions de tonnes, expulsées dans l'espace sous forme de particule ou de rayonnement. Tous les atomes présents au cœur du Soleil peuvent fusionner. C'est ainsi que tous les éléments présents dans l'Univers ont été formés.

1.2.6.1 Présentation du soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 km de la terre. Le soleil est composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K.

Le noyau: il s'étend du centre à environ 0,2 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à 150 000 kg/m³. C'est là qu'est produite l'énergie solaire.

- **La zone radiative:** elle s'étend de 0,2 à 0,7 rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil.
- **La zone de convection:** elle s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du Soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection. Les gaz chauds remontent à la surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite.
- **La photosphère:** elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile. Une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil.

Tableau 1.1 Information sur le soleil

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	2.10^{30}
Surface (km ²)	$6.09.10^{12}$
Volume (km ³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{17}$

1.2.6.2 La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire I_c , reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre - Soleil. Sa valeur moyenne I_0 appelée constante solaire est de l'ordre de 1367 W.m^{-2} . En première approximation, on peut calculer la valeur de I_c en fonction du numéro du jour de l'année n_j par la relation suivante [3] :

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times n_j)] \quad (1.1)$$

Vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe. Le soleil ne tourne pas comme un corps solide. La rotation de l'équateur s'effectue environ dans 27 jours et celle des régions polaires durant 30 jours.

1.2.6.3 Mouvement de la terre autour du soleil

Le mouvement de la terre autour du soleil s'effectue dans un plan dénommé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers (Figure 1.1).

La terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles et le plan équatorial qui est perpendiculaire à cet axe. Ainsi la rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie

disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. La terre tourne autour du soleil en 365 jours 5h 48 mn 40s $\approx 365,25$ jours.

La terre se déplace à une vitesse moyenne 29,785km/s (vitesse maximale en hiver 31,145km/s et minimale en été 28,851km/s). Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons.

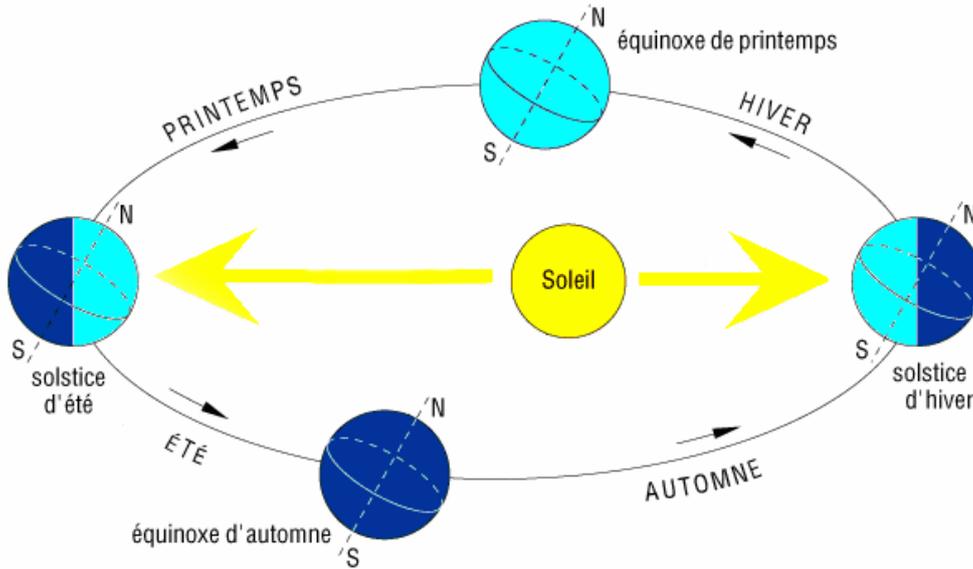


Figure1.1 Mouvement de la terre autour du soleil.

1.2.6.4 Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et de la longitude du lieu où il se trouve (figure 1.2).

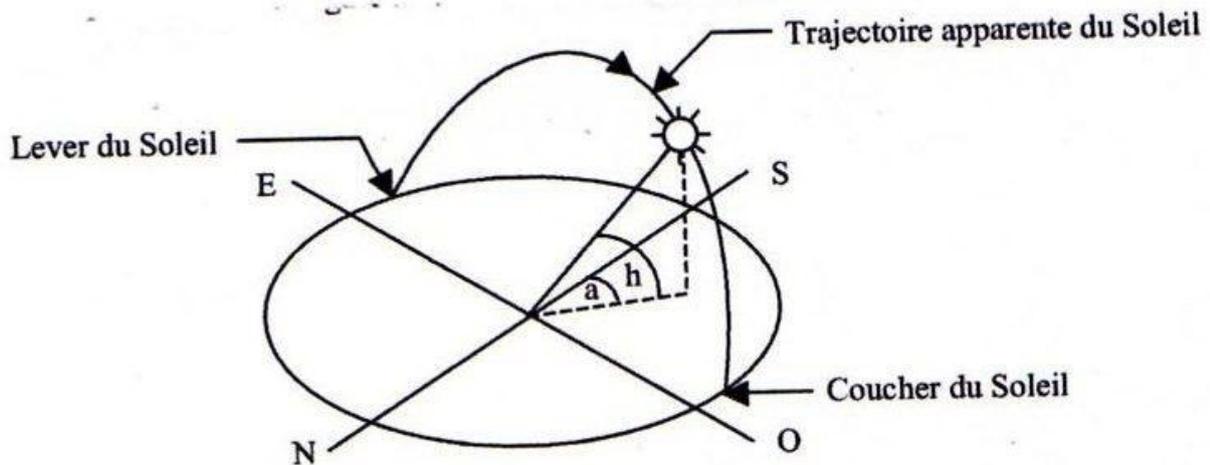


Figure 1.2 Trajectoire de la position du soleil.[12]

1.2.6.5 Cordonnées du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents.

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

❖ Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles:

- Déclinaison solaire (δ):

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la relation suivante :

$$\delta = 23,45 \times \sin \left[\frac{360}{365} (n-80) \right] \quad (1.2)$$

δ : déclinaison (en degré)

n : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c.-à-d. varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

- Angle horaire du soleil H :

C'est l'angle que fait la position actuelle du plan méridien local et la position de ce même méridien à midi solaire. L'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [11].

$$H = 15(TSV - 12) \quad (1.3)$$

Avec :

$$TSV = TL - TU + \left(\frac{\Delta\lambda + \Delta t}{60} \right) = \left(TU + \frac{\lambda}{15} \right) + \frac{\Delta t}{60}$$

$$\Delta t = 9,87 \times \sin^2 \left[\frac{360}{365} (J-81) \right] - 7,35 \times \cos \left[\frac{360}{365} (J-81) \right] - 1,5 \times \sin \left[\frac{360}{365} (J-81) \right]$$

TU : est le décalage horaire par rapport au méridien local.

Pour l'Algérie, TU= +1.

TL : Temps local (administratif)

Δt : correction de l'équation du temps.

$\Delta \lambda$: décalage local du à l'écart de longitude entre le méridien local et le méridien central du fuseau

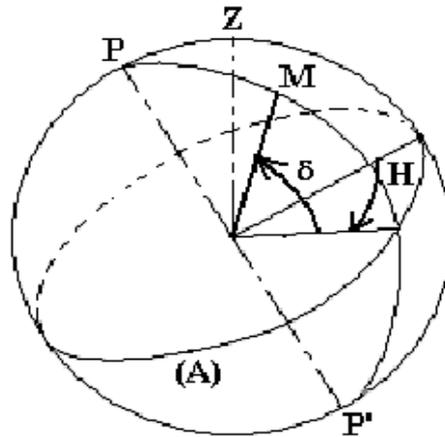


Figure 1.3 Variation de l'angle horaire en fonction du temps solaire vrai.

$H > 0$: après midi.

$H < 0$: le matin.

$H = 0$: midi TSV

❖ Coordonnées horizontales du soleil

La position du soleil à un instant considéré est donnée par l'azimut du soleil a et son élévation h (voir figure 1.5).

✓ Azimut (a) :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction du Sud.

L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [11] :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \times \sin H}{\cos h} \quad (1.4)$$

(a), l'azimut, varie entre -180° et 180° .

On prend :

- $a > 0$: vers l'ouest.
- $a < 0$: vers l'est.
- $a = 0$: direction du sud.

✓ Hauteur (h):

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan d'horizontal.

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [11]:

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos H + \sin \varphi \times \sin \delta \quad (1.5)$$

Avec δ : la déclinaison

φ : la latitude du lieu

H: angle horaire

- $h = 0$ aux lever et coucher,
- $h > 0$ le jour

1.2.6.6 Cordonnées terrestres

Tout point sur la surface terrestre peut être repéré par ses coordonnées géographiques qui sont la longitude, la latitude ainsi que par son altitude (voir figure 1.4).

➤ Longitude

La longitude (L) d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé [11].

➤ Altitude

L'altitude (λ) d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [11].

➤ Latitude

La latitude (φ) est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de 0° , le pôle nord par la latitude 90° et le pôle sud par la latitude -90° . Par convention, le signe (-) est affecté à tous les

lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre -90° et $+90^\circ$.

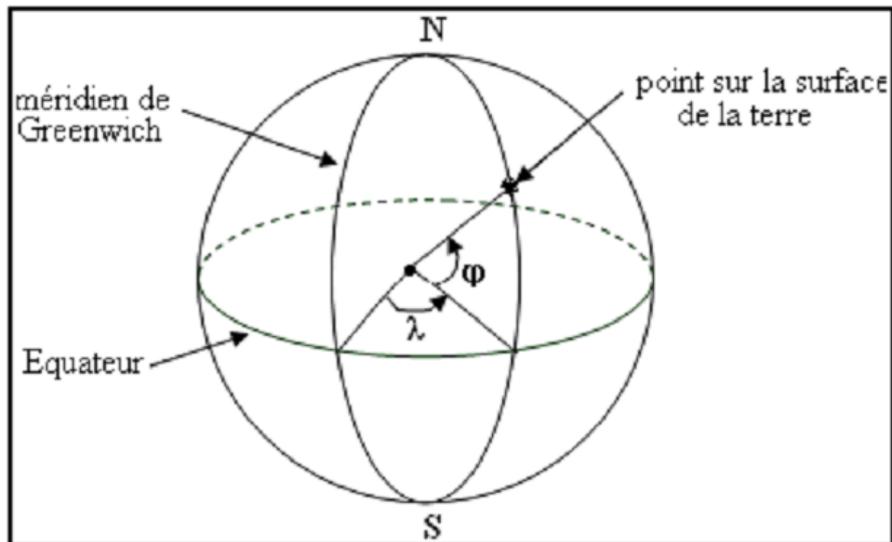


Figure 1.4 Cordonnée terrestre [11].

1.2.6.7 Différents instruments de mesure du rayonnement

Pyrradiomètre

Instrument de mesure du rayonnement total parvenant sur une surface à partir d'un angle solide 2π stéradians. Il sert principalement à la mesure du rayonnement total descendant, somme des rayonnements solaire et atmosphérique dirigés vers le sol.



Figure 1.5 Pyrradiomètre.

 Pyranomètre

Instrument destiné à mesurer le rayonnement global G parvenant à une surface plane à partir d'un angle solide 2π stéradians. Lorsque l'appareil est muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement diffus D .



Figure 1.6 Pyranomètre

 Pyrhéliomètre

Instrument mesurant le rayonnement solaire direct I_b , l'appareil est orientable de sorte que sa surface réceptrice soit toujours normale aux rayons solaires.



Figure 1.7 Pyrhéliomètre.

 Pyrradiomètre différentiel ou bilanmètre

Mesure le bilan du rayonnement total, différence entre le rayonnement total descendant et le rayonnement total ascendant (rayonnement solaire et atmosphérique renvoyés vers l'espace).



Figure 1.8 Pyrradiomètre différentiel



Héliographe

Instrument de mesure et d'enregistrement de la durée de l'insolation.



Figure 1.9 Héliographe

1.2.6.8 Les temps solaires

a. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V) :

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil w . Il est donné sous la forme suivante [10] :

$$TSV = 12 + \frac{H}{15} \quad (1.6)$$

H: angle horaire en degré.

Si $H = 0$, $TSV=12h.00$

Si $H < 0$, la matinée.

Si $H > 0$, l'après-midi.

b. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [10] :

$$Et = TSV - TSM \quad (1.7)$$

Avec :

Et: l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \quad (\text{en min})$$

Avec $N' = (n_j - 81) * 360/365$ et n_j , le numéro du jour dans l'année.

c. Le Temps Universel (T.U) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé aussi GMT (Greenwich Mean Time) [10]:

$$TU = TSM - (L/15) \quad (1.8)$$

Où L est la longitude.

L > 0 pour les sites situés à l'Est du méridien de Greenwich.

L < 0 pour les sites situés à l'Ouest du méridien de Greenwich.

TU = TSM pour le méridien de Greenwich.

d. Le Temps Légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état. Il est donné par [10] :

$$TL = TF + \Delta H \quad (1.9)$$

Où :

ΔH est l'avance de l'heure locale sur l'heure normale du fuseau. Pour le cas de l'Algérie, l'heure normale du fuseau correspond au temps universel (TU). $\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

e. Temps Civil (TC)

Représente le temps qui a pour origine minuit [10].

1.2.6.9 Le rayonnement solaire

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1367 w/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

a. Masse d'air

On appelle masse d'air ou Air Mass, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphérique traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.

A l'aide des points O, A et M et l'angle h (figure 1.10), la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère:

$$OM = \frac{OA}{\sin h}$$

$$\text{Donc, l'Air Mass : } \frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (1.10)$$

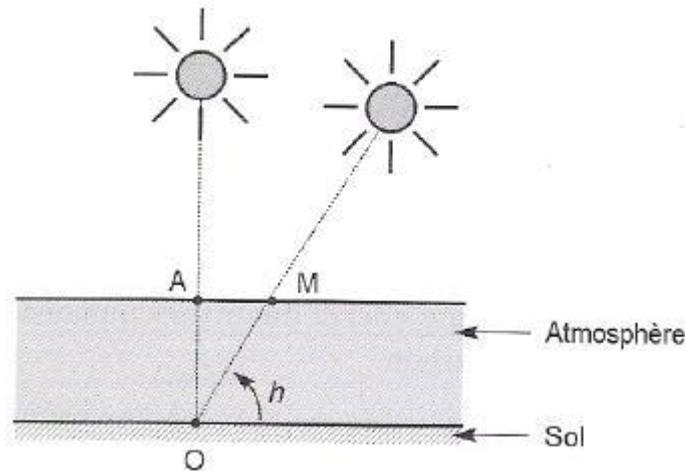


Figure 1.10 Rayonnement solaire et la masse d'air [11].

b. Composition du rayonnement solaire

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit:

+ Rayonnement direct

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol avec un trajet « linéaire » et unique à un instant donné [13].

Si I est le rayonnement direct dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement s'écrit :

$$I_{bh} = I \times \sin h \quad (1.11)$$

h : la hauteur du soleil.

+ Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Ainsi, par ciel clair, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol [11].

+ Rayonnement réfléchi (L'albédo)

Le rayonnement solaire réfléchi est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$ALB = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie reçue}} \quad (1.12)$$

Tableau1.2 Quelques valeurs de l'albédo [11].

Surface du sol	Albédo
Plan d'eau	0,01 à 0,1
Forêt	0,05 à 0,2
Sol cultivé	0,07 à 0,14
Pierres et rochers	0,15 à 0,25
Champs et prairies	0,1 à 0,3
Sol nul	0,15 à 0,4
Neige ancienne	0,5 à 0,7
Neige fraîche	0,8 à 0,95

➤ **Facteurs de réflexion, d'absorption et de transmission :**

Lorsque un corps noir reçoit un flux incident Q_i sous un angle d'incidence quelconque (figure 1.12), sa surface en réfléchit une fraction Q_r , en absorbe une fraction Q_a et en transmet une fraction Q_t de sorte que :

$$Q_i = Q_r + Q_a + Q_t \quad (1.13)$$

On définit l'aptitude du corps à ces trois phénomènes à l'aide des facteurs suivants :

$$\frac{Q_r}{Q_i} = \rho_r, \quad \text{le facteur de réflexion.}$$

$$\frac{Q_a}{Q_i} = \alpha_a, \quad \text{le facteur d'absorption.}$$

$$\frac{Q_t}{Q_i} = \tau_t, \quad \text{le facteur de transmission.}$$

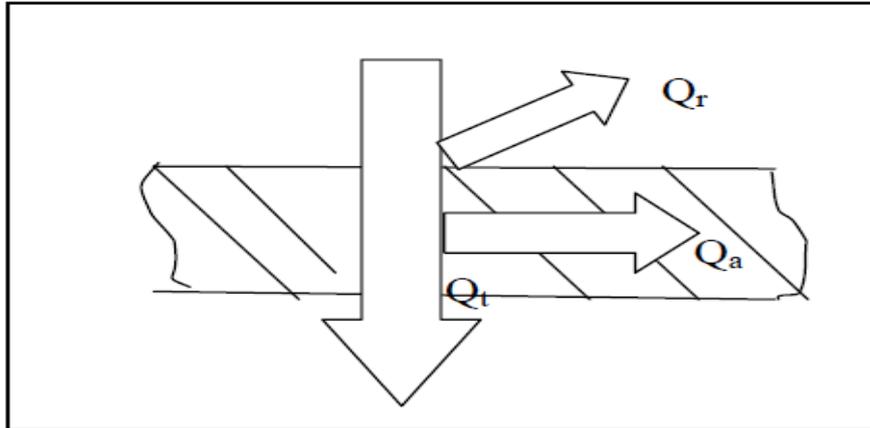


Figure 1.11 Impact d'un rayonnement à la surface d'un corps noir.

Ces facteurs sont liés par la relation : $\rho_r + \alpha_a + \tau_t = 1$

- Un corps parfaitement opaque ($\tau_t = 0$) : $\rho_r + \alpha_a = 1$
- Un corps totalement transparent ($\tau_t = 1$) : $\rho_r + \alpha_a = 0$
- Les corps de surface lisse ($\rho_r = 1$) : $\alpha_a + \tau_t = 0$
- Les corps rugueux: la réflexion du rayon incident se fait dans toutes les directions.

✚ Rayonnement global

- Surface horizontale

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus [13].

Donc le rayonnement global sur une surface horizontale est :

$$I_h = I_{bh} + I_{dh} \quad (1.14)$$

- Direct horizontal: $I_{bh} = I_{bN} \times \sin(h)$ (1.15)

- Diffuse horizontal: $I_{dh} = c I_{dN} \times \sin(h)$ (1.16)

- **Surface inclinée**

Le rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements direct, diffus et réfléchi.

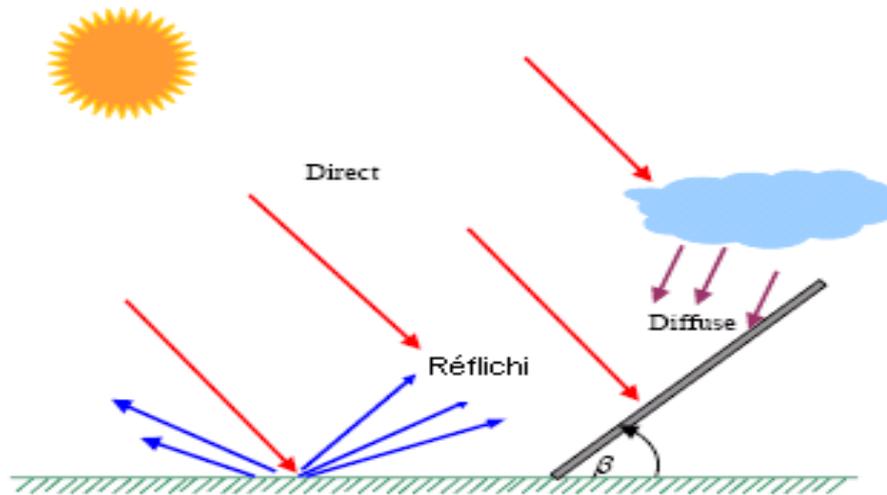


Figure 1.12 Trois composantes du rayonnement solaire globale sur un plan incliné [11]

- **Rayonnement normal sur une surface inclinée:**

Le rayonnement global est:

$$I_c = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (1.17)$$

- Direct

$$I_{bc} = I_{bh} \times \cos(\theta) \quad (1.18)$$

- Diffus

$$I_{dc} = I_{dn} \times \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (1.19)$$

- Réfléchi

$$I_{rc} = I_{bn} \times (\sin(h) + c) \cdot R_r \quad (1.20)$$

- **Rayonnement sur surface inclinée à partir du rayonnement sur plan horizontal :**

Le rayonnement global est.

$$I_h = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (1.21)$$

- Direct $I_{bc} = I_{bh} \times R_b$ (1.22)

- Diffus $I_{dc} = I_{dh} \times R_d$ (1.23)

- Réfléchi $I_{rc} = I_{bh} \times R_r$ (1.24)

- **Surface normale**

Le rayonnement global est :

$$I_n = I_{bn} + I_{dn} \quad (1.25)$$

Lorsque:

$$I_{bn} = C_n \cdot I \cdot \exp\left(\frac{k}{\sin(h)}\right) \quad (1.26)$$

$$I_{dn} = I_{bn} \cdot \sin(h) \quad (1.27)$$

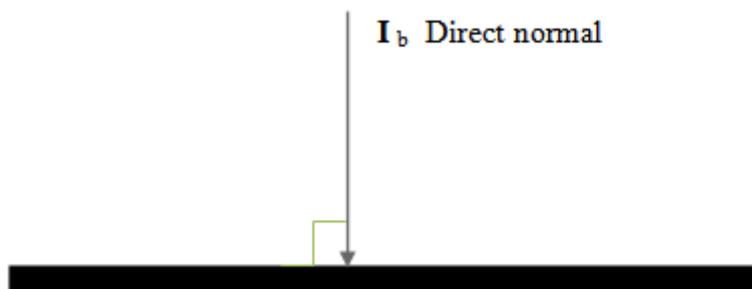


Figure1.13 Composante normale.

Conclusion

Une énergie renouvelable est une énergie exploitable par l'Homme. Ses réserves sont inépuisables. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Le Soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Son rayonnement constitue en lui-même une énergie exploitable.

Ce rayonnement donne aussi naissance à d'autres formes d'énergie.

Introduction :

Le séchage est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit).

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées d'utilisation.

Le séchage est modélisé par des différentes équations mathématiques, gouvernant le transfert de chaleur et de masse dans le produit telles que la variation de sa masse et sa température...etc.

Dans ce chapitre on va présenter les équations qui gouvernent le phénomène de séchage, les différents théoriques de séchage, les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide enfin une présentation des différents types de séchoir.

2.1 Définition du séchage

Nous appelons séchage, l'opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau.

Le corps humide en jeu peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide, ce qui distingue le séchage de la concentration d'un liquide par évaporation, cas dans lequel le produit final est un liquide concentré.

Au cours du séchage, l'eau contenue dans le matériau disparaît peu à peu dans l'air ambiant sous l'action de deux phénomènes : l'évaporation de l'eau et sa diffusion à l'intérieur du matériau.

Ces phénomènes sont sous la dépendance des caractéristiques du gaz (air ou vapeur surchauffée) environnant à savoir :

-  Sa température.
-  Son humidité relative.
-  Sa vitesse.
-  Sa pression.
-  Débit.

L'évaporation de l'eau est un phénomène qui nécessite de la chaleur et qui est d'autant plus intense que la température du matériau est élevée.

2.2 Terminologie de séchage

2.2.1 Humidité

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

2.2.2 Taux d'humidité

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

2.2.3 État de siccité

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul.

Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur.

Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

2.2.4 Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température.

2.2.5 Corps hygroscopique

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit [1], en d'autres termes à celle de la vapeur saturante.

Quand la pression de vapeur émise par le produit (P_{vp}) est inférieure à la pression de vapeur saturante (P_{vs}), le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité et une partie de son eau, "l'eau liée", est fixée par la matière.

Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la tension de vapeur qu'il émet est réduite et plus l'activité de l'eau (A_w) est basse. [15] [4]

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide A_w par la relation :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (2.1)$$

C'est un chiffre compris entre 0 et 1

$A_w=0$ → produit totalement sec.

$A_w=1$ → eau libre en surface du produit.

2.2.6 Les différents modes de liaison de l'eau

La liaison est très forte pour l'eau liée chimiquement par association moléculaire et encore plus forte pour l'eau insérée dans un réseau cristallin. Dans ces deux cas, le corps est dit hydraté.

Enlever cette eau d'hydratation revient à détruire le corps.

L'opération de séchage consiste à enlever toute l'eau du corps (l'humidité) autre que son eau d'hydratation [15].

2.2.7 Energie de liaison – chaleur de vaporisation

La chaleur ou l'énergie de vaporisation de l'eau libre ne dépend que de la température régnant à la surface du produit soumis au séchage. Cette chaleur n'est autre que la chaleur de vaporisation de l'eau, donnée par la formule :

$$L_v = 597 - 0,56 \theta \quad (2.3)$$

L_v est exprimé en Kcal/Kg.

θ en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Lorsque l'eau est absorbée dans le produit, les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie de liaison qui devient d'autant plus importante qu'il s'agit d'eau osmotique absorbée, combinée chimiquement. Pour évaporer cette eau, lors du séchage, il faut fournir un supplément d'énergie thermique. Dans ces conditions, la chaleur totale de vaporisation de l'eau du produit peut s'écrire :

$$L = L_a + L_v \quad (2.4)$$

Pour le séchage, la chaleur de liaison de l'eau (L_a) est négligée car la dessiccation s'arrête à un certain seuil dit d'équilibre et la chaleur de vaporisation est celle de l'eau dite "libre". [15]

2.3 Mode de séchage

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction - rayonnement : Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux. [4]

2.3.1 Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Le flux thermique dans ce mode de transfert est représenté par la loi de FOURIE : [4]

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Avec

Φ : flux thermique.

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m.K)

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit

2.3.2 Séchage par convection

Dans le séchage industriel, il s'agit probablement du monde de séchage le plus courant. Il consiste à mettre en contact, un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent, autour du corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibre ou de plaques. Pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité).

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection est un mode de transfert rapide.

Ce type de transfert est exprimé par la loi de NEWTON suivante :

$$\Phi = h S (T_a - T_s) \quad (2.6)$$

Φ : La quantité de chaleur transférée par unité du temps (W).

S: La surface d'échange (m^2).

$(T_a - T_s)$: l'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher (K).

h: Le coefficient d'échange par convection ($W/m^2.K$).

$\frac{1}{hS}$: Résistance thermique.

❖ **Convection forcée** : La convection est dit forcée si le fluide est mis en mouvement par une action extérieure (pompe, ventilateur, vent, etc.)

La valeur de coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature de fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide / fluide

A partir de théorème de VASCHY-Buckingham, h_c peut s'exprimer en fonction de 4 unités fondamentales (nombres adimensionnels)

- nombre de NUSSELT

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (2.7)$$

Le nombre de NUSSELT caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

- nombre de REYNOLDS

$$Re = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D}{\mu} \quad (2.8)$$

Re caractérise le régime d'écoulement.

- Nombre de PRANDTL

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (2.9)$$

❖ **Convection naturelle** : La convection est dit naturelle si le mouvement de fluide ne résulte que des différences de masses volumiques induites par des différences de températures.

L'écoulement se fait naturellement. Il est dû à la différence de densité des différentes zones du fluide. Ce phénomène est très courant et s'appelle convection naturelle.

- Nombre de GRASHOF

$$G_r = \frac{g \rho^2 L^3 \Delta T \beta_d}{\mu^2} \quad (2.10)$$

L: Dimension linéaire caractéristique de la surface d'échange (ex. Coté d'un carré, diamètre d'un tube) en (m).

β_d : Coefficient de dilatation volumique de fluide (K^{-1})

Exemple : Air : $\beta_d = \frac{1}{T}$

20°C $\beta_d = 0,00341297$

60°C $\beta_d = 0,003003$

90°C $\beta_d = 0,00275482$

ΔT Écart de température paroi fluide (en K)

g : accélération de pesanteur ($9,81 m/s^2$)

ρ : masse volumique de fluide en kg/m^3

μ : viscosité dynamique de fluide en Pa .s

Le nombre de GRASHOF est à la convection naturelle ce que le nombre de REYNOLDS l'est à la convection forcée.

- Expression du NUSSELT

Les relations du nombre de NUSSELT dans ce cas sont de la forme :

$$Nu = X \cdot (G_r \cdot Pr)^n \quad (2.11)$$

Avec $n = 1/4$ pour la convection laminaire

$n = 1/3$ pour la convection turbulent

Le coefficient X dépend du régime de convection et de la géométrie du dispositif.

En régime laminaire $0,2 < X < 0,6$

et en régime turbulent $0,07 < X < 0,15$

2.3.3 Séchage par rayonnement

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement) dont l'origine est l'élévation de température d'un émetteur infrarouge. La quantité de chaleur transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par : [3]

$$Q_r = \frac{\delta(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1-\epsilon_i}{S_i \epsilon_i} + \frac{1-\epsilon_j}{S_j \epsilon_j} + \frac{1}{S_i F_{ij}}} \cdot (T_i - T_j) \quad (2.12)$$

Avec:

T_i : Température de la source émettrice (K).

T_j : Température du produit (K).

S_j : Surface du corps recevant le rayonnement (m^2).

S_i : Surface de l'émetteur infrarouge (m^2).

F_{ij} : Facteur de complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.

ϵ_i : Emissivité du produit.

ϵ_j : Emissivité de l'émetteur.

2.4 Transfert de masse

2.4.1 Loi de Fick

La loi de Fick caractérise la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique ρ_f dans un milieu. Elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est D_f le coefficient de diffusion moléculaire :

$$J_c = -D_f \cdot \rho_f \cdot \frac{dc}{dx} \quad (2.13)$$

2.4.2 Loi de Darcy

La loi de Darcy caractérisée la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité dynamique μ_f dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, le paramètre pertinent du milieu est k la perméabilité intrinsèque.

$$J_s = -\rho_f \cdot \frac{k_f}{\mu_f} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (2.14)$$

2.4 Le séchage à l'air libre

Méthode ancienne utilisée jusqu'au jour d'aujourd'hui, consistant à étaler en plein air les produits à sécher. C'est une technique facile et pas coûteuse, pourtant elle peut causer des pertes importantes.

Un tableau comparatif a été dressé mettant en évidence les avantages et les inconvénients du séchage à l'air libre et sous séchoir. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

Tableau2.3 Avantages et les inconvénients de séchage de l'air libre et séchage par séchoir solaire

	Séchage sous séchoir solaire	Séchage à l'air libre
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Réduction du temps de séchage ➤ Maîtrise de la teneur en eau finale désirée. ➤ Protection du produit contre le rayonnement ultraviolet. ➤ A l'abri des intempéries, des insectes et des champignons. ➤ Maîtrise de l'opération de séchage. ➤ Energie gratuite 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Procédé simple et non coûteux ➤ N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée ➤ Source d'énergie solaire gratuite et non polluante ➤ Pas de dépense d'énergie ➤ Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit ➤ Peu de changement de couleur
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Consommation de l'énergie conventionnelle (électricité, gaz, bois...) si système hybride. ➤ Investissement relativement important. ➤ Main d'œuvre qualifiée. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure). ➤ Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire. ➤ l'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles au rayonnement ultraviolet, insectes, rongeurs, perte de vitamine... etc.).

2.5 Types des séchoirs

2.5.1 Les séchoirs solaires indirects :

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

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

➤ Principe de fonctionnement

Le séchoir solaire indirect se compose de différentes parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée. L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé et sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions météorologiques [5].

2.5.2 Séchoir solaire direct

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de larges possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités.

➤ Principe de fonctionnement

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption du rayonnement, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

2.5.3 Séchoir solaire mixte

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

Un séchoir mixte à circulation naturelle aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empîète directement sur le produit comme le séchoir intégral [6].

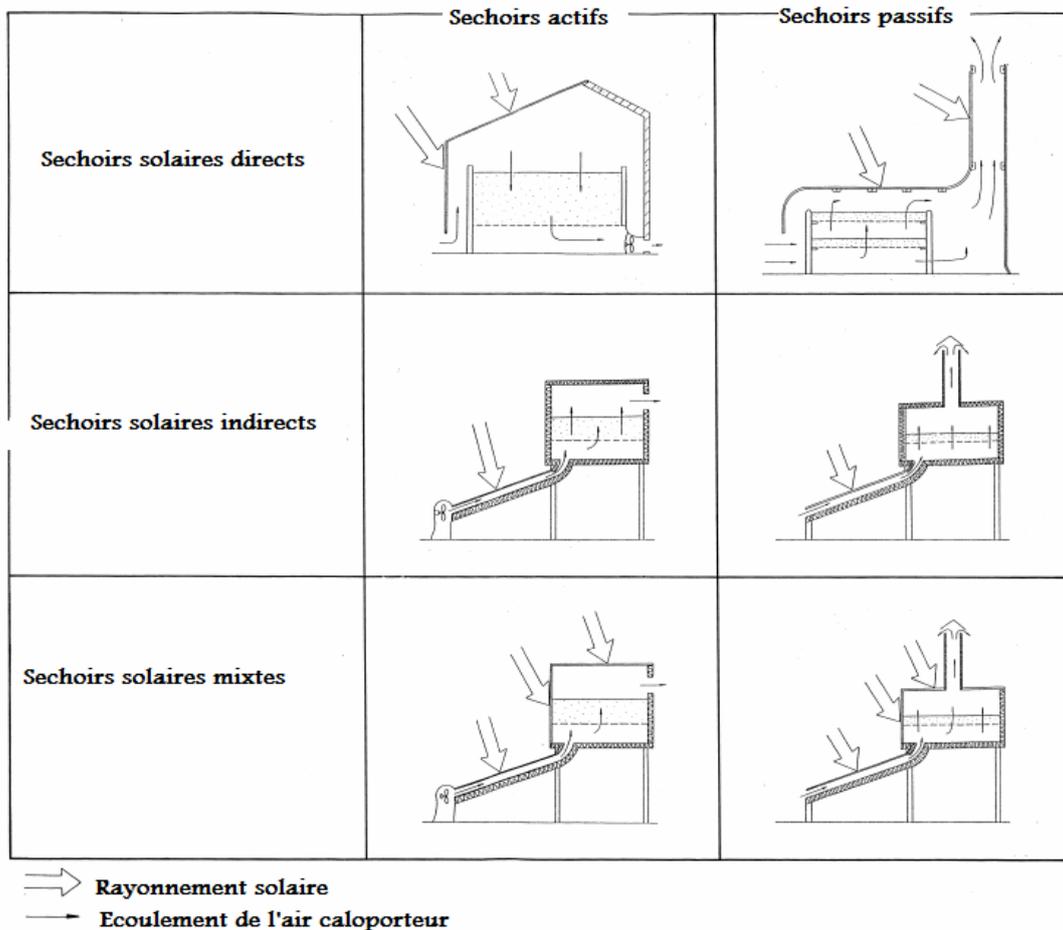


Figure2.10 Différents types de séchoirs solaires.

Conclusion

Le séchage est une opération unitaire mettant en jeu un transfert de matière (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans une phase gazeuse) et un transfert thermique (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide). La vaporisation pourra s'effectuer par ébullition ou par évaporation.

Introduction

Le séchage solaire dans les régions où le gisement solaire est important, est très utile d'un point de vue économique. Cette opération de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des produits agro-alimentaires et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage, constitue un moyen rentable pour le dessèchement de ces produits.

En agro-alimentaire d'une façon générale, l'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation réduite de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité aromatique du produit à sécher.

Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits agricoles. Les biologistes ont constaté qu'en ramenant la teneur en humidité de la nourriture entre 10 et 20 %, les bactéries, les champignons et les enzymes sont presque tous neutralisés.

3.1 Dispositif Expérimental

Le dispositif expérimental présenté sur la figure 3.1 comprend essentiellement un séchoir solaire de type direct dont nous nous proposons d'étudier les performances. Il a été conçu et réalisé au Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah (C.D.E.R) et utilisé pour le séchage des produits agricoles.

C'est un système qui transforme l'énergie solaire en énergie calorifique, puis transmis par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur qui est l'air asséchant. Il est conçu de manière à ce que ses composants et sa forme géométrique soient compatibles avec un modèle théorique simple. Le grand axe du dispositif est parallèle à la direction Est-Ouest. La couverture du modèle exposé, orientée au sud géographique et constitué de verre ordinaire d'épaisseur 4 mm, comprend deux parties, à savoir un vitrage fortement incliné (55°) et un vitrage incliné à 15° .

Les parois latérales et la paroi nord, toutes verticales, ainsi que le plancher sont isolées thermiquement. Il comprend, en outre, un système de stockage d'énergie constitué d'un lit de cailloux (granite) peints en noir. Aussi, une cheminée a été ajoutée pour améliorer l'écoulement de l'air intérieur. La section de sortie de la cheminée est de forme perpendiculaire de 2 mètres de longueur et 0,25 mètre de largeur (fig. 3.1).

Plus la section de sortie est grande, plus la vitesse de l'écoulement de l'air est petite. Néanmoins dans cette configuration, les vents extérieurs peuvent gêner l'écoulement ; aussi certaines modifications ont été apportées.

Dans ce travail, on a ajouté deux tubes de 0.125 mètre de diamètre et de 1 mètre de hauteur placés au niveau de la cheminée pour améliorer la vitesse d'écoulement de l'air dans le séchoir (fig. 3.2).



Fig. 3.1 Le séchoir solaire direct (serre) avant modification.

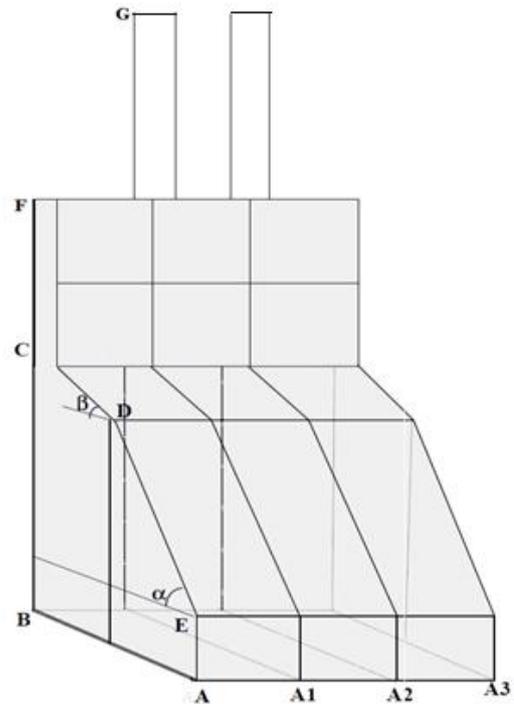


Fig. 3.2 Séchoir solaire directe (serre) avec tubes d'évacuation supplémentaires

3.2 Caractéristiques géométriques du séchoir

Tableau 3.1 Dimensions du séchoir solaire

AA1=A1A2=A2A3	600 mm
AB	2000 mm
BC	1980 mm
CF	1035 mm
AE	500 mm
ED	1500 mm
AG	4265 mm
BF	3015 mm



$$\beta = 15^\circ$$

$$\alpha = 55^\circ$$

En prenant en compte les dimensions du lit de galets, les dimensions du séchoir sont :

- Surface du sol (absorbant) = 3.6472 m^2 (1.88×1.94)
- Surface de la paroi nord = 3.564 m^2 (188×174)
- Surface de la paroi Est (Ouest) = 2.6584 m^2
- Surface globale de chaque panneau de vitrages :

$$S(90^\circ) = (0.44 - 0.2) \times 1.88 = 0.4512 \text{ m}^2$$

$$S(55^\circ) = 1.5 \times 1.88 = 2.82 \text{ m}^2$$

$$S(15^\circ) = 1.2 \times 1.88 = 2.256 \text{ m}^2$$

- Volume intérieur du séchoir $V_s = 5.2371 \text{ m}^3$

Tableau 3.2 Caractéristiques thermo-physiques des éléments du séchoir. [20]

Elément	Epaisseur (mm)	Chaleur spécifique (kJ/kg.°C)	Densité (Kg/m ³)	Conductivité thermique (w/m.°C)
Vitrage	4	0,84	2700	0,71-1,15
Isolation (polystyrène)	60	-	30-38	0,029-0,039
Parois	0,5	0,418-0,4598	4150-7850	45-52
Air extérieur	-	1	1	0,024
Lit de galets		0,9196	2550	2,2

3.3 Préparation du séchoir

On fait le nettoyage des vitrages transparents à l'intérieur et à l'extérieur afin d'améliorer la transmissivité du vitrage et on refait la peinture pour le lit de galets pour une meilleure absorptivité, après on teste le fonctionnement des thermocouples et des différents instruments de la vitesse et de l'humidité et la vitesse.

3.4 Appareil. de mesures

1. La mesure de la température est assurée par des thermocouples de type K.

On a placé plusieurs thermocouples dans le séchoir pour déterminer les différentes températures.

Ainsi on a :

- ✓ 9 thermocouples au niveau de galet,
- ✓ 6 thermocouples au niveau de trois vitres,
- ✓ 6 thermocouples au niveau de la première cheminée,
- ✓ Dans les parois latérales Est et Ouest, on a placé deux thermocouples,
- ✓ Au niveau de l'entrée du séchoir, on a placé 3 thermocouples,
- ✓ Deux thermocouples sont positionnés à l'extérieur,
- ✓ 2 Thermocouples sont placés à l'intérieur du séchoir à différentes hauteurs,
- ✓ Un thermocouple au niveau d'une étagère pour mesurer la température du produit à sécher.

Le tableau 3.3 présente les différentes positions des thermocouples placés dans le séchoir serre.

Tableau 3.3 Positions des thermocouples

N	POSITION		N	POSITION	
1	Rayonnement extérieur	RE	17	Galets Ouest nord prof	GO PN
2	Galets Ouest sud prof	G OPS	18	Galets milieu	G M
3	Galets Ouest nord surf	G OSN	19	Aire intérieur haut	A I H
4	Vitrage Ouest	V O	20	Cheminée centre haut	C C H
5	Toit Est	T E	21	Paroi latéral Est	P L E
6	Cheminée Est basse	C E B	22	Toit Ouest	T O
7	Entre Est	E E	23	Entre Ouest	E O
8	Vitrage centre	V C	24	Aire intérieur bas	A I B
9	Vitrage Est	V E	25	Galets Est sud prof	G E PS
10	Cheminée Ouest haut	C O H	26	Galets Est sud surf	GES S
11	Galets ouest sud surface	G OSS	27	Cheminée centre bas	CC B
12	Cheminée Est haut	C E H	28	Etagère (claires)	ET
13	Cheminée Ouest bas	C O B	29	Air extérieur 2	A E 2
14	Galets Est nord profondeur	G E PN	30	Toit centre	T C
15	Galets Est nord surface	G E SN	31	Entre centre	E C
16	Paroi latéral Ouest	P O	32	Air extérieur	A E

2. La mesure de l'humidité relative de l'air asséchant a été assurée à l'aide d'une sonde thermo-hygromètre à affiche numérique (figure 3.3).



Figure 3.3 Thermo-hygromètre type CHY722

Un Thermo-hygromètre désigne un instrument électronique mesurant à la fois la température (généralement en °C) de précision ($\pm 1^\circ\text{C}$) et l'humidité relative (en %) de précision ($\pm 2.5\%$).

3. On a utilisé un pyranomètre pour la mesure de l'irradiation solaire globale (figure 3.4).



Figure 3.4 Pyranomètre MS-410.

Les appareils de mesure du rayonnement et de la température sont reliés à un enregistreur automatique de données.

4. Le relevé des différentes mesures physiques (flux solaire global, température) se fait à travers une acquisition de données de type AGILENT 34970A (figure 3.5), laquelle est reliée à un microordinateur où sont affichées les mesures effectuées en temps réel.

Fonctionnalités principales

- Jusqu'à 250 voies/sec de cadence de scrutation
- Emplacement pour 3 modules (8 modules différents au choix, jusqu'à 40 voies par module)
- Multimètre intégré TRMS 6 digits 1/2, 11 possibilités de mesures intégrées (dont température par thermocouples, résistances ou thermistances, tension, courant, fréquence)
- Précision de base de 0,0035%
- Configuration indépendante pour chaque voie avec mise à l'échelle $Mx + B$
- Seuils d'alarmes programmables avec sorties 50 000 mesures en mémoire non volatile

- Interfaces GPIB en standard



Figure 3.5 Appareil d'enregistrement digital type AGILENT 34970A à voies.

5. On mesure manuellement la vitesse de l'air à l'aide d'un anémomètre à affichage numérique (type AVM-03). C'est un instrument qui mesure la vitesse avec une précision ($\pm 3.0\% \pm 0.1$).



Figure 3.6 Anémomètre AVM-03

6. Une balance électronique d'une précision de 0,01g est utilisée pour la mesure de la masse du produit à sécher (figure 3.7).

La stabilisation de la masse du produit indiquera la fin du processus de séchage. Ce qui signifie que le produit a atteint un état d'équilibre avec le milieu environnant (air de séchage).



Figure 3.7 Balance électronique à affichage numérique.

L'étude expérimentale, entreprise sur ce séchoir, consiste en la mesure systématique :

- du flux solaire global reçu par le séchoir,
- des températures des couvertures vitrées, des différentes parois, au niveau des étagères (produit), de l'air intérieur, du plancher (lit de cailloux) et du milieu ambiant extérieur au séchoir.
- de l'humidité relative.
- De la vitesse de l'air asséchant.

3.4 Période d'expérimentation

Notre étude expérimentale s'est déroulée du 2 avril au 08 Juin 2017 en milieu naturel par vent calme (période retenue). Quoique durant cette période, le temps (conditions météorologiques) était parfois perturbé (changements de temps soudain, brouillard, nuages et même pluie) ; ce qui a rendu les conditions de nos expériences assez délicates.

Les coordonnées du site expérimental (station de BOUZAREAH) sont :

- Altitude 385 m
- Latitude 36.8° Nord
- Longitude 3.04° Est

3.4.1 Courbes de séchage :

Les courbes de séchage sont représentées soit par la variation de la masse du produit en fonction du temps, soit par la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.

3.4.2 Cinétique de séchage

3.4.2.1 Teneur en eau du produit à sécher (X)

La teneur en eau d'un produit exprime le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à la masse de la matière sèche ou humide. L'évolution de l'humidité absolue du produit au cours du séchage s'exprimera donc par :

✓ **Base sèche :**

$$X(t) = \frac{M(t) - M_s}{M_s} \quad (3.1)$$

Avec :

X (t): teneur en eau à un instant t quelconque ($\text{kg}_{\text{eau}} / \text{kg}_{\text{ms}}$)

M(t): masse du produit humide (kg) à un instant t

M_s: masse de matière sèche (kg)

La teneur en eau initiale du produit s'exprime par :

$$X(t=0) = \frac{M_i - M_s}{M_s} \quad (3.2)$$

La teneur en eau d'équilibre qui représente l'humidité absolue du produit en fin de séchage s'exprime quant à elle par :

$$X_{\text{eq}} = \frac{M_f - M_s}{M_s} \quad (3.3)$$

Avec

M_i: la masse initiale de produit avant séchage (kg),

M_f: la masse finale de produit en fin de séchage (kg).

✓ **Base humide**

$$X(t) = \frac{M_t}{M_h} \quad (3.4)$$

Avec :

M_t: masse du produit humide à l'instant t (kg),

M_h: masse initiale de la matière humide (kg).

3.4.2.2 Vitesse de séchage

La vitesse de séchage désigne le taux d'évaporation de l'eau contenue dans le produit à sécher.

Son expression s'écrit comme suit :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X(t_{i+1}) - X(t_i)}{(t_{i+1}) - t_i} \quad (3.5)$$

3.4.3 Produit à sécher, le poivron

Le poivron est un groupe de cultivars de l'espèce. Ce sont les variétés douces issues de cette espèce par sélection. Ces cultivars doux produisent des fruits de différentes couleurs dont le rouge, le jaune et l'orange. Le fruit est également consommé sous sa forme verte immature. C'est une plante annuelle de la famille des Solanacées originaire du Mexique, d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. La plante est cultivée comme plante potagère pour ses fruits consommés, crus ou cuits, comme légumes. Le terme désigne à la fois le fruit et la plante.

Le poivron est l'ingrédient indispensable d'un certain nombre de plats, comme la piperade ou la ratatouille, mais il peut aussi bien servir d'accompagnement.

Le poivron a été retenu pour notre expérimentation. Le choix est motivé par sa relative abondance, la plus-value de sa transformation, le service rendu à l'économie et l'amélioration des revenus dans la filière agro-alimentaire (création d'emplois).



Figure 3.8 Poivron rouge.

Tableau 3.4 Caractéristiques du poivron rouge.

Poids/volume	Poivron rouge, cru, 79 g (125 ml)
Calories	20
Protéines	0.8
Glucides	4.8
Lipides	0.2
Fibres alimentaires	1.1

3.5 Protocole expérimental (Séchage de poivron)

3.5.1 Préparation du produit

Le poivron acheté, lavé puis coupée en tranches de 3mm à 5 mm d'épaisseur et d'environ 5 cm de longueur est étalé sur les claies.

La quantité de poivron préparé est partagée en trois lots. Deux lots dont un est lavé à l'eau du robinet sont destinés à être séchés dans le séchoir solaire. Le troisième va subir un séchage à l'air



libre.

Figure 3.9 Préparation de poivron

Une quantité réduite a été séchée dans un dispositif à température régulée c'est-à-dire une chaleur régulée permettant une vitesse de l'air relativement stable et une plage de température stable.

La perte de poids du produit au niveau de la claie est suivie du début de l'expérience jusqu'à la fin, en pesant le produit toutes les 20 mn à l'aide d'une balance électronique (incertitude $\pm 0.001g$); L'opération de séchage est considérée achevée lorsqu'on arrive à une stabilisation de la masse du

produit considérant qu'aucune eau ne peut être extraite du produit dans les conditions d'essai en cours. Les mesures de température, du rayonnement, de la vitesse et de l'humidité de l'air sont relevées toutes les 20 minutes.

On tracera le profil d'humidité ou la cinétique de séchage du produit en fonction du temps. A la fin de chaque journée, le produit est stocké dans des boîtes en plastique hermétiques et placé dans un réfrigérateur pour éviter toute réhydratation pendant la nuit et gardera ses états pour la continuité de l'opération le lendemain.

A la fin de l'opération de séchage, les échantillons secs sont laissés refroidir à la température ambiante puis cachetés dans des sacs en plastique.

3.5.2 Séchage par convection naturelle régulée

Afin de simuler un dispositif à convection naturelle semblable au séchoir mais à conditions d'essai stables, un système simple constitué d'une source de chaleur (résistance électrique), d'une cheminée et d'une grille pour contenir le poivron a été réalisé. Le système permet de générer une température dans une plage de 50 - 55°C et une vitesse de l'air en écoulement de 0.3 à 0.5 m/s en aval du produit. L'humidité relative de l'air peut atteindre 14% en amont du produit. Pendant la période de séchage, on mesure la masse du produit, la température de l'air en amont et en aval du produit, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température ambiante, chaque 20 min.



Figure 3.10 Séchage par convection naturelle régulée



Figure 3.11 Mesure de la température et de l'humidité



Figure 3.12 Mesure de la vitesse de l'air asséchant

3.6.4.3 Séchage par séchoir solaire (serre) :

Deux grilles contenant le poivron coupé en morceaux tels que mentionné précédemment sont placées sur des claies dans le séchoir. Il est à noter que les morceaux de poivron d'une des deux grilles ont été lavés à l'eau douce du robinet alors que les morceaux de l'autre grille ont été maintenus à leur état naturel.

Les morceaux de poivron ont été étalés sur les grilles constituant ainsi une couche. Une troisième grille contenant la même matière non lavée a été placée en séchage à l'air libre.

Le suivi se fait à travers un enregistrement des températures dans le séchoir et à l'extérieur et la mesure directe de la température, de l'humidité et de la vitesse à la sortie de la cheminée.

Chaque grille du séchoir et celle de l'extérieur sont pesées.

Tout le processus se fait chaque 20mn.



Figure 3.13 Séchage par séchoir solaire(Serre)



Figure 3.14 Séchage à l'air libre



Figure 3.15 Opération de pesage des échantillons

Introduction

Nous nous proposons d'étudier le bilan d'énergie d'un séchoir serre (type direct) expérimental. Le comportement de ce dernier est simulé par un modèle mathématique basé sur les bilans globaux.

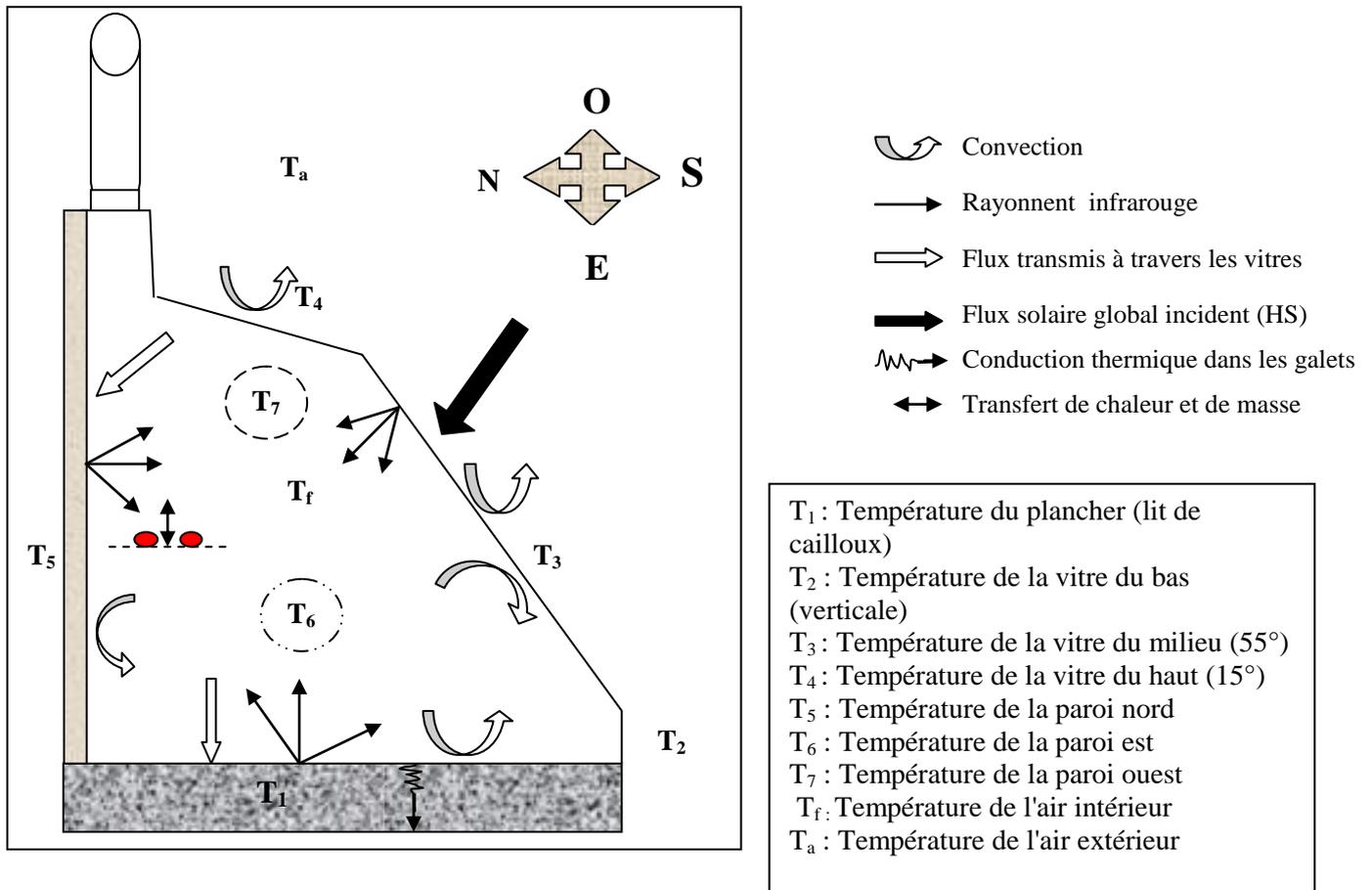


Figure 4.1 Représentation des différents échanges dans le séchoir.

4.1 Calcul des composantes du rayonnement solaire [21-22]

4.1.1 Rayonnement solaire direct

Il peut être calculé par la formule empirique suivante :

$$HSI = I_0 . C . A \text{Exp}(-B \sin h) . \cos (i) \tag{4.1}$$

avec

$$C = 1 + 1,0034 \cos[30 (m - 1) + d] .$$

4.1.2 Rayonnement solaire diffus

Le rayonnement solaire diffus HSD est la partie du rayonnement diffusée par l'atmosphère.

C'est la somme de deux composantes : la première est émise par la voûte céleste Φ_1 et la seconde est émise par le sol Φ_2 . Φ_1 et Φ_2 sont données par les formules empiriques suivantes:

$$\Phi_1 = \Phi_0 (1 + \cos \beta) \cdot \frac{S_v}{2} \quad (4.2)$$

$$\Phi_2 = A (I_0 \sin h + \Phi_0) \left[\frac{(1 - \cos \beta)}{2} \right] \cdot S_v \quad (4.3)$$

avec

$$\Phi_0 = I_0 C \sin h \left(0.271 - 0.2939 \exp\left(-\frac{B}{\sin h}\right) \right) \quad (4.4)$$

$$\text{d'où:} \quad \text{HSD} = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (4.5)$$

4.1.3 Rayonnement solaire global

Le rayonnement solaire global HS reçu par le sol est la somme des deux flux lumineux, direct et diffus.

$$\text{HS} = \text{HSI} + \text{HSD} \quad (4.6)$$

4.1.4 Les bilans d'énergie du système :

➤ **Bilan d'énergie au niveau de sol :**

$$\tau \alpha_s S_s \text{HS}(1) = Q_{\text{cnd}} - Q_{f1} + Q_{r12} + Q_{r13} + Q_{r14} + Q_{r15} + Q_{r16} + Q_{r17} \quad (4.7)$$

➤ **Bilan d'énergie au niveau des vitres :**

$$Q_{2a} - Q_{2f} + Q_{r21} + Q_{r23} + Q_{r24} + Q_{215} + Q_{r26} + Q_{r27} = 0 \quad (4.8)$$

$$Q_{3a} - Q_{3f} + Q_{r31} + Q_{r32} + Q_{r34} + Q_{r35} + Q_{r36} + Q_{r37} = 0$$

$$Q_{4a} - Q_{4f} + Q_{r41} + Q_{r42} + Q_{r43} + Q_{r45} + Q_{r46} + Q_{r47} = 0$$

➤ **Bilan d'énergie au niveau de la paroi est:**

$$\tau\alpha_{pe}S_{pe} HS(6) = Q_{6f} + Q_{r61} + Q_{r62} + Q_{r63} + Q_{r64} + Q_{r65} + Q_{r67} \quad (4.9)$$

➤ **Bilan d'énergie au niveau de la paroi ouest :**

$$\tau\alpha_{po}S_{po} HS(7) = Q_{7f} + Q_{r71} + Q_{r72} + Q_{r73} + Q_{r74} + Q_{r75} + Q_{r76} \quad (4.10)$$

➤ **Bilan d'énergie au niveau de la paroi nord :**

$$\tau\alpha_{pn}S_{pn} HS(5) = Q_{cndn} - Q_f + Q_{r51} + Q_{r52} + Q_{r53} + Q_{r54} + Q_{r56} + Q_{r57} \quad (4.11)$$

➤ **Bilan au niveau de l'air intérieur :**

$$Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3} + Q_{f4} + Q_{f5} + Q_{f6} + Q_{f7} + Q_{fa} = 0 \quad (4.12)$$

$$Q_{fa} = (\rho C_p)_f \cdot V_f \cdot R_s (T_f - T_a)$$

Avec:

$$1. \quad Q_{cnd} = \lambda S_s \frac{dT}{dt} \quad (4.13)$$

$$2. \quad Q_{ij} = h_{ij} S_i \cdot \Delta T_{ij} \quad (4.14)$$

$$3. \quad Q_{r_{ij}} = h_{r_{ij}} \Delta T_{ij} \quad (4.15)$$

$$4. \quad h_{r_{ij}} = \frac{\delta(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1-\epsilon_i}{S_i \epsilon_i} + \frac{1-\epsilon_j}{S_j \epsilon_j} + \frac{1}{S_i F_{ij}}} \quad (4.16)$$

$$5. \quad C_i = (\rho C_p)_i V_i \quad (4.17)$$

$$Q_{cndn} = U_5 S_5 (T_5 - T_a)$$

$$Q_{r45} = h_{r45} (T_5 - T_4)$$

$$Q_{1f} = h_{1f} S_1 (T_1 - T_f)$$

$$Q_{r46} = h_{r46} (T_6 - T_4)$$

$$\begin{aligned}
Q_{2f} &= h_{2f} S_2(T_2-T_f) & Q_{r12} &= h_{r12} (T_2-T_1) \\
Q_{3f} &= h_{3f} S_3(T_3-T_f) & Q_{r13} &= h_{r13} (T_3-T_1) \\
Q_{4f} &= h_{4f} S_4(T_4-T_f) & Q_{r14} &= h_{r14} (T_4-T_1) \\
Q_{5f} &= h_{5f} S_5(T_5-T_f) & Q_{r15} &= h_{r15} (T_5-T_1) \\
Q_{6f} &= h_{6f} S_6(T_6-T_f) & Q_{r16} &= h_{r16} (T_6-T_1) \\
Q_{7f} &= h_{7f} S_7(T_7-T_f) & Q_{r17} &= h_{r17} (T_7-T_1) \\
Q_{2a} &= h_{2a} S_1(T_1-T_a) & Q_{r23} &= h_{r23} (T_3-T_2) \\
Q_{r27} &= h_{r27} (T_7-T_2) & Q_{r24} &= h_{r24} (T_4-T_2) \\
Q_{r35} &= h_{r35} (T_5-T_3) & Q_{r25} &= h_{r25} (T_5-T_2) \\
Q_{r36} &= h_{r36} (T_6-T_3) & Q_{r47} &= h_{r47} (T_7-T_4) \\
Q_{r37} &= h_{r37} (T_7-T_3) & Q_{r26} &= h_{r26} (T_6-T_2) \\
Q_{r57} &= h_{r57} (T_7-T_5) & Q_{r56} &= h_{r56} (T_6-T_5) \\
Q_{r67} &= h_{r67} (T_7-T_6) & Q_{cnd} &= U_1 S_1 (T_1-T_a)
\end{aligned}$$

Q_{cndn} : flux de chaleur par conduction entre la paroi nord et l'ambient.

Q_{cnd} : flux de chaleur par conduction entre le lit de galets et le sol.

Q_{1f} : flux de chaleur par convection entre le sol et le fluide.

Q_{2f} : flux de chaleur par convection entre le fluide et le vitre 1.

Q_{3f} : flux de chaleur par convection entre le fluide et la deuxième vitre (55°).

Q_{4f} : flux de chaleur par convection entre le fluide et la troisième vitre (15°).

Q_{5f} : flux de chaleur par convection entre paroi nord et le fluide.

Q_{6f} : flux de chaleur par convection entre le fluide et la paroi latérale est.

Q_{7f} : flux de chaleur par convection entre le fluide et la paroi latérale ouest.

Q_{2a} : flux de chaleur par convection entre le vitre (55°) et milieu ambient.

Q_{r27} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (55°) et la paroi latéral ouest.

Q_{r35} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (15°) et la paroi nord.

Q_{r36} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (15°) et la paroi latérale est.

Q_{r37} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (15°) et la paroi latérale ouest.

Q_{r45} : flux de chaleur par irradiation solaire entre la vitre (15°) et paroi nord.

Q_{r46} : flux de chaleur par irradiation solaire entre la vitre (15°) et la paroi latéral est.

Q_{r12} : flux de chaleur par rayonnement entre le sol et la vitre (90°).

Q_{r13} : flux de chaleur par rayonnement entre le sol et la vitre (55°).

Q_{r14} : flux de chaleur par rayonnement entre le sol et la vitre (15°).

Q_{r15} : flux de chaleur par rayonnement entre le sol et la paroi nord.

Q_{r16} : flux de chaleur par rayonnement entre le sol et la paroi latéral est.

Q_{r17} : flux de chaleur par rayonnement entre le sol et la paroi latéral ouest.

Q_{r23} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (90°) et la vitre (90°).

Q_{r24} : flux de chaleur par rayonnement entre les vitres (90°) et (15°).

Q_{r25} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (90°) et la paroi nord.

Q_{r47} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (15°) et paroi latéral ouest.

Q_{r26} : flux de chaleur par rayonnement entre la vitre (90°) et la paroi latéral est.

Q_{r56} : flux de chaleur par rayonnement entre la paroi nord et la paroi latéral est.

Q_{r57} : flux de chaleur par rayonnement entre la paroi nord et la paroi latéral ouest.

Q_{r67} : flux de chaleur par rayonnement entre la paroi latéral est et ouest.

❖ Hypothèses simplificatrices :

- Pour les deux couvertures on suppose qu'on a une seule couverture.
- Les températures de la surface du sol, de la paroi nord, des vitrages et de l'air intérieur sont supposées uniformes.
- L'angle entre la couverture et le capteur (galet) égale à 38.29° .

4.2 Equations du modèle :

$$\text{➤ } S_v \cdot h_1 \cdot (T_v - T_f) + S_1 \cdot h_2 \cdot (T_1 - T_f) + S_5 \cdot h_3 \cdot (T_5 - T_f) = Q_u \quad (4.18)$$

$$\text{➤ } U_t \cdot (T_v - T_a) = S_1 \cdot h_{r1-v} \cdot (T_1 - T_v) + S_v \cdot h_1 \cdot (T_f - T_v) + S_5 \cdot h_{r5-v} \cdot (T_5 - T_v) \quad (4.19)$$

$$\text{➤ } S_1 \cdot R_{s1} = S_1 \cdot U_{bs} \cdot (T_1 - T_a) + S_1 \cdot h_2 \cdot (T_1 - T_f) + S_1 \cdot h_{r1-v} \cdot (T_1 - T_v) + S_1 \cdot h_{r1-5} \cdot (T_1 - T_5) \quad (4.20)$$

$$\text{➤ } S_5 \cdot R_{s5} = S_5 \cdot U_{bn} \cdot (T_5 - T_a) + S_5 \cdot h_3 \cdot (T_5 - T_f) + S_5 \cdot h_{r5-v} \cdot (T_5 - T_v) + S_5 \cdot h_{r5-1} \quad (4.21)$$

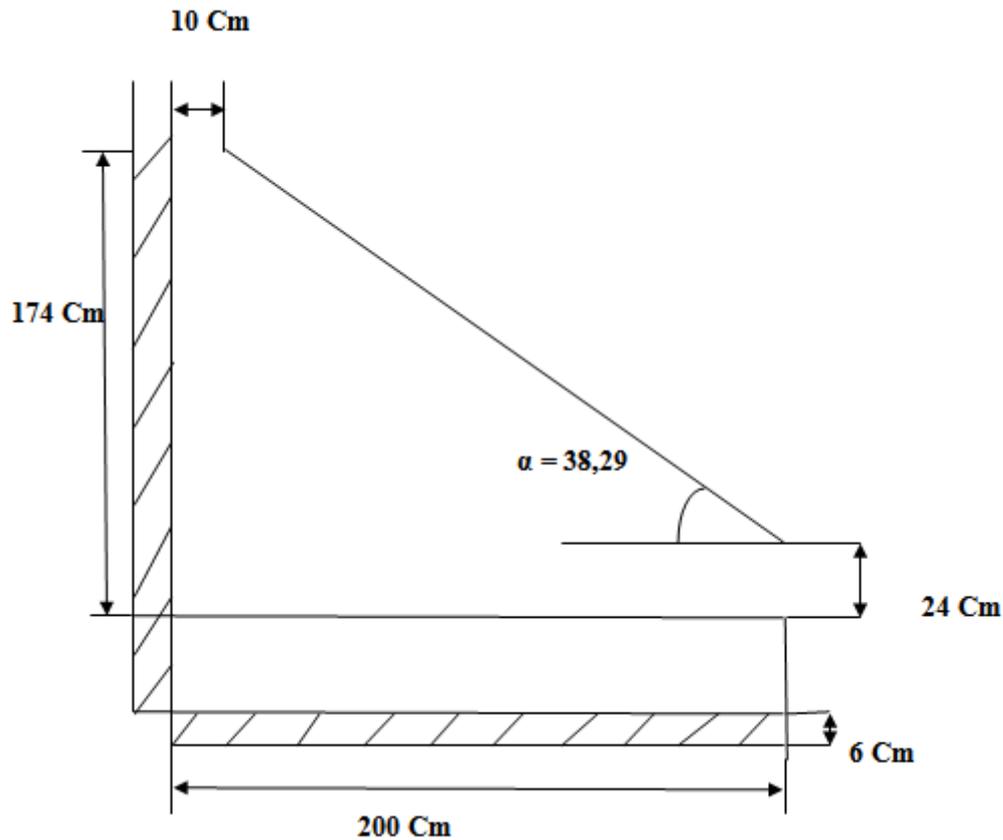


Figure 4.2 Schéma du séchoir après simplification.

4.3 Détermination des coefficients d'échange

a) Par rayonnement

$$hr_{ij} = \frac{\delta(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1-\epsilon_i}{S_i \epsilon_i} + \frac{1-\epsilon_j}{S_j \epsilon_j} + \frac{1}{S_i F_{ij}}} \quad (4.22)$$

Avec

σ : la constante de Stefan Boltzmann

ϵ_i, ϵ_j : émissivités.

T_c : température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de SWINBANK(1963) [20] :

$$T_c = 0.0552 \cdot T_{ab}^{1,5} \quad (4.23)$$

b) Par convection

$$h_{ce} = 5,67 + 3,86Vv \quad (4.24)$$

➤ Les coefficients d'échange convectif à l'intérieur de la serre sont déterminés par le nombre de NUSSELT :

$$h_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{H} \quad (4.25)$$

h : coefficient d'échange convectif (W/m²k).

H : longueur caractéristique (m).

λ : Conductivité thermique de fluide (W/m.k)

Calcul du nombre de Rayleigh :

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} \quad (4.26)$$

β = coefficient de dilatation thermique.

g : Accélération de pesanteur.

ΔT : Différence de température entre la paroi et l'air intérieur.

ν : viscosité cinématique.

λ : Conductivité thermique.

C_p : chaleur spécifique.

Par corrélation on a pour plaque plane

$$h_c = 5.7 + 3.8 U \quad (4.27)$$

U : la vitesse de vent.

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_f - T_a)$$

$$U_{bn} = 10,7 + 3,8 U$$

$$U_t = h_c + h_r$$

Avec

$$h_r = \sigma (T_v + T_c) (T_c^2 + T_v^2) (T_v - T_c) / (T_v - T_a)$$

$$U_{bs} = \frac{\lambda}{e}$$

4.4 Méthode de résolution

Pour déterminer les différentes températures (des parois du séchoir, de l'air asséchant, de vitre et de la paroi nord), nous devons discrétiser les équations (4.18),(4.19),(4.20) et (4.21). Ceci conduit à un système de quatre équations à quatre inconnues que l'on peut mettre sous forme condensée suivante:

$$[A] X_n = B_n \quad (4.28)$$

La solution de ce système fait par un programme MATLAB.

$$[A] = \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{matrix}$$

$$B_n = \begin{matrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{matrix} ; \quad X_n = \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{matrix}$$

avec :

[A]: matrice des coefficients.

X : vecteur des inconnues.

B: vecteur connu lié aux coefficients de l'équation initiale et aux conditions initiales.

Pour la résolution numérique des systèmes d'équations, nous adoptons la méthode directe par le programme de MATLAB.

$$X_n = \frac{B_n}{[A]} \quad (4.29)$$

4.5 Présentation de résultat

4.5.1 Intensité du rayonnement solaire

Nous traçons l'évolution de rayonnement solaire global, en fonction du temps pour une journée (7 juin).

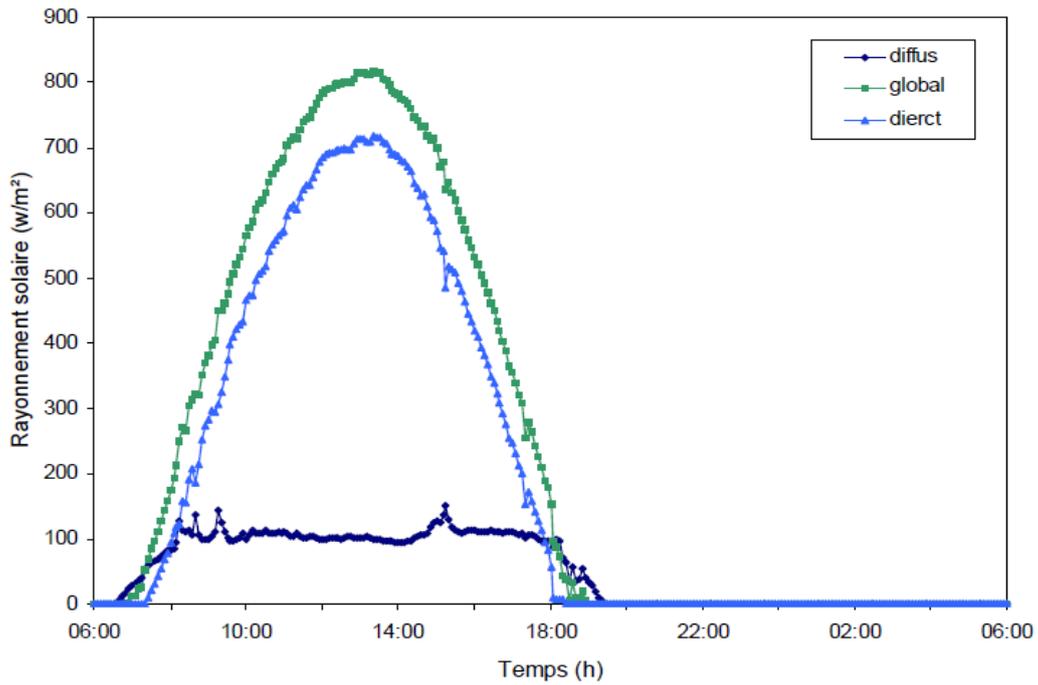


Figure 4.3 Variation de rayonnement solaire théorique sur plan horizontal

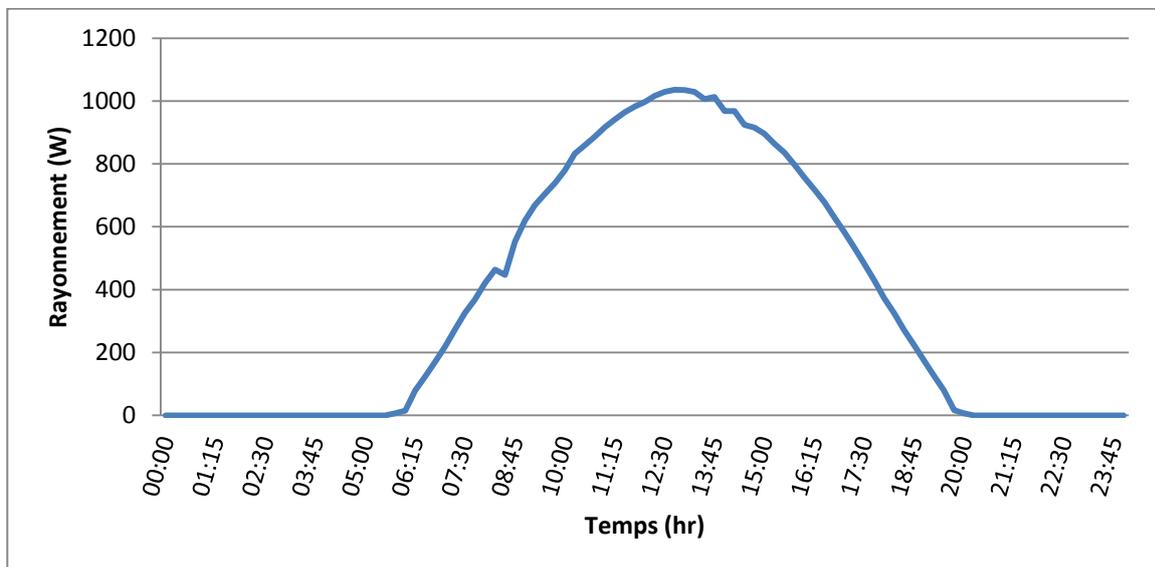


Figure 4.4 Rayonnement solaire global mesuré sur plan horizontal (7 juin).

L'intensité du rayonnement direct augmente depuis le lever du soleil jusqu'à la valeur maximale de 1050 W/m^2 à 13h 30 min après elle diminue.

Cette courbe est qualitativement comparable à celle de la courbe théorique pour un ciel clair.

4.5.2 Variation de la température de différents éléments du séchoir

La figure 4.5 représente l'évolution des températures des différents éléments de séchoir. La température augmente avec l'irradiation solaire jusqu'à atteindre la valeur maximale de 52°C après elle diminue jusqu'à les valeurs environ de 29°C.

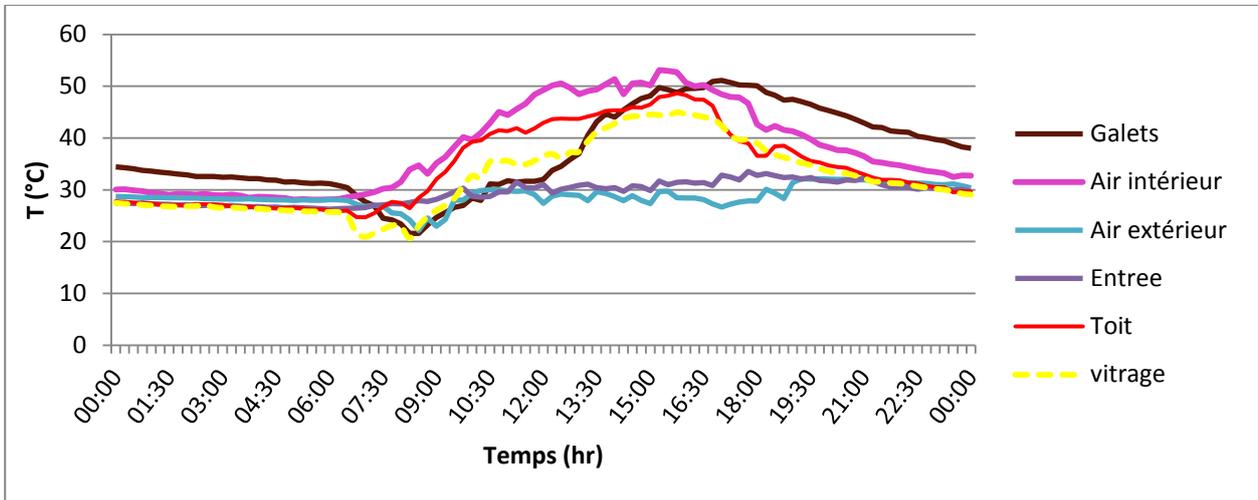


Figure 4.5 Evolution des températures expérimentale des différents éléments de séchoir.

On note un décalage dans la progression de la température des galets par rapport à celle de l'air intérieur. De même qu'on note l'impact du stockage puisqu'il permet à l'air intérieur d'accumuler une certaine quantité de chaleur.

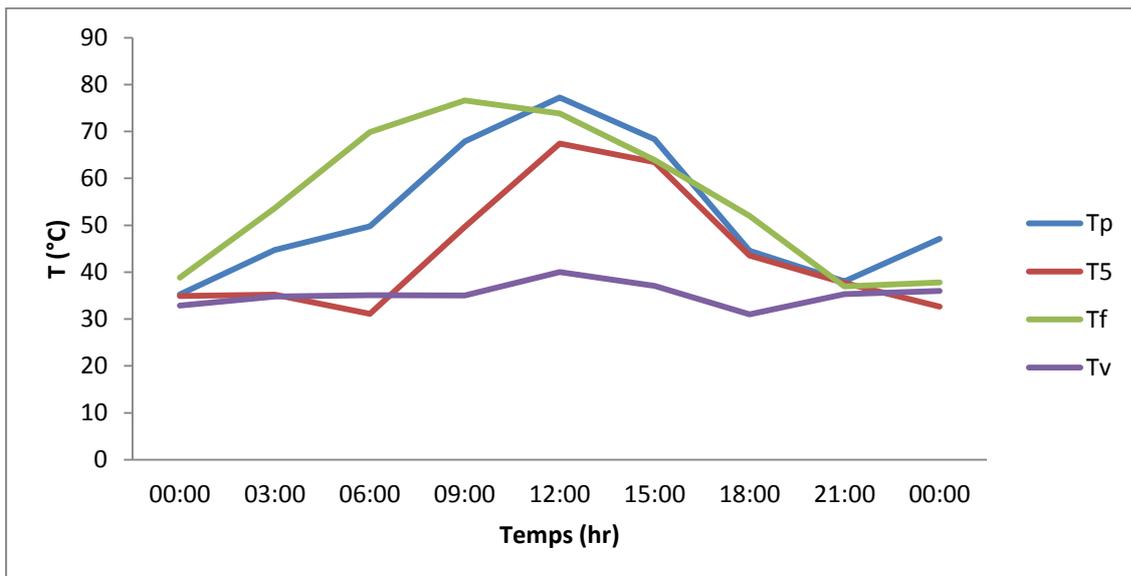


Figure 4.6 Evolution des températures obtenues numériquement des différents éléments.

✚ Température de l'air intérieur et extérieur.

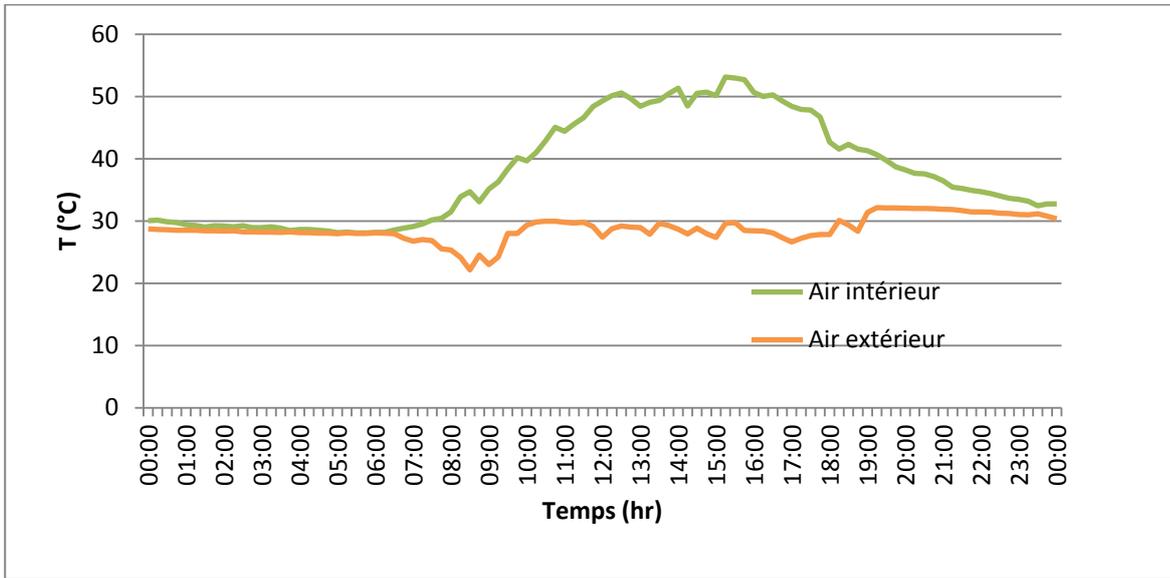


Figure 4.7 Température de l'air intérieur et extérieur (7 juin).

✚ Température dans le lit de galets et l'air intérieur :

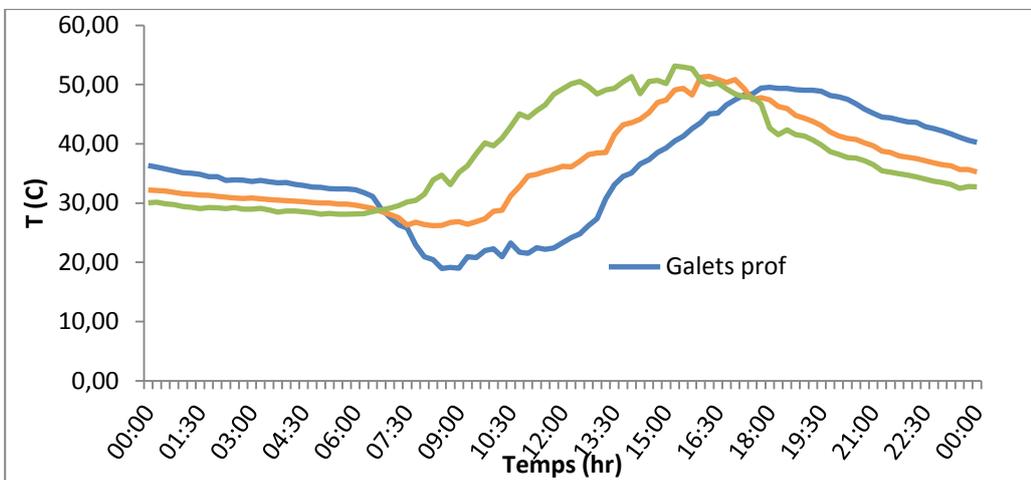


Figure 4.8 Moyenne des températures de l'air intérieur et lit de galets profondeur et en surface, (7 juin).

☛ Températures dans le lit de galets et de l'air intérieur :

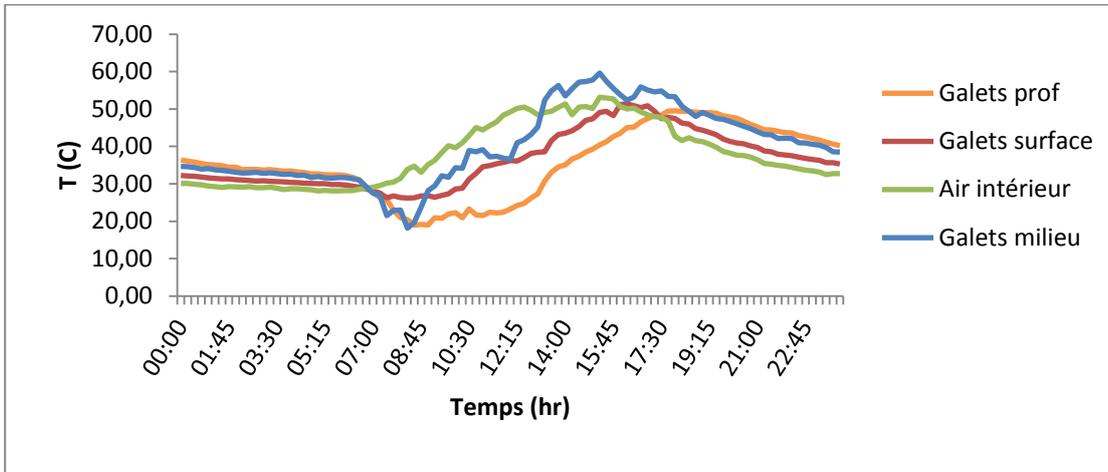


Figure 4.9 Températures de l'air intérieur et des galets (7 juin)

Les courbes de la figure (4.9) représentent l'évolution des températures des galets et de l'air intérieur. On remarque une augmentation de la température pendant la journée et l'après-midi elle commence à diminuer.

Les galets au milieu prennent une valeur maximale de température plus grande que les températures des autres points des galets et de l'air intérieur, soit environ de 58°C à 14h30min.

☛ Températures des vitrages et l'air intérieur :

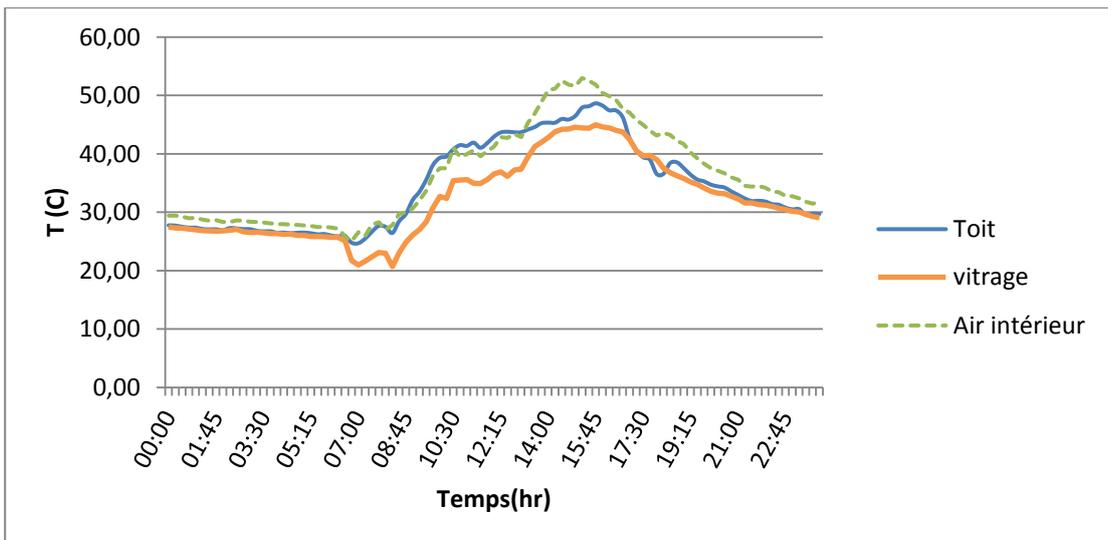


Figure 4.10 Températures du toit (vitre 15°), de la vitre (55°) et de l'air intérieur.

Températures des parois latérales :

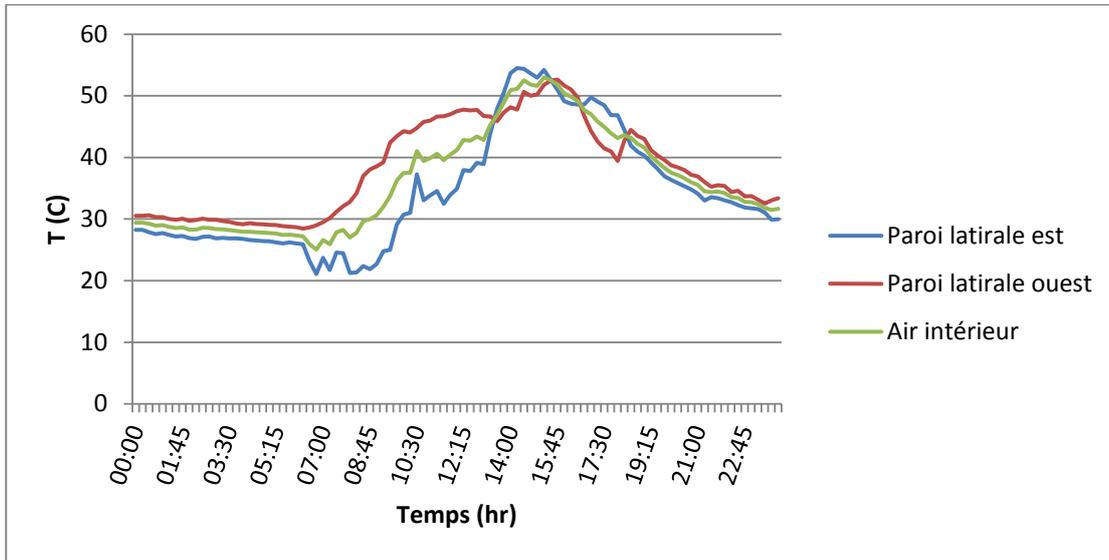


Figure 4.11 Températures des parois Est, Ouest et de l’air intérieur.

Les températures des parois (est, ouest), air intérieur, toit et du vitrage augmentent jusqu'à prendre la valeur maximale à 14h environ 54°C pour paroi latéral est, 52°C paroi latéral ouest et l’air intérieur, 49C toit et 45C pour le vitrage.

4.5.3 Humidité relative dans le séchoir

L’humidité relative à l’intérieur du séchoir atteint un minimum (17%) à partir de 13h30 locales, heure où la température atteint sa plus grande valeur qui correspond à un flux solaire maximum.

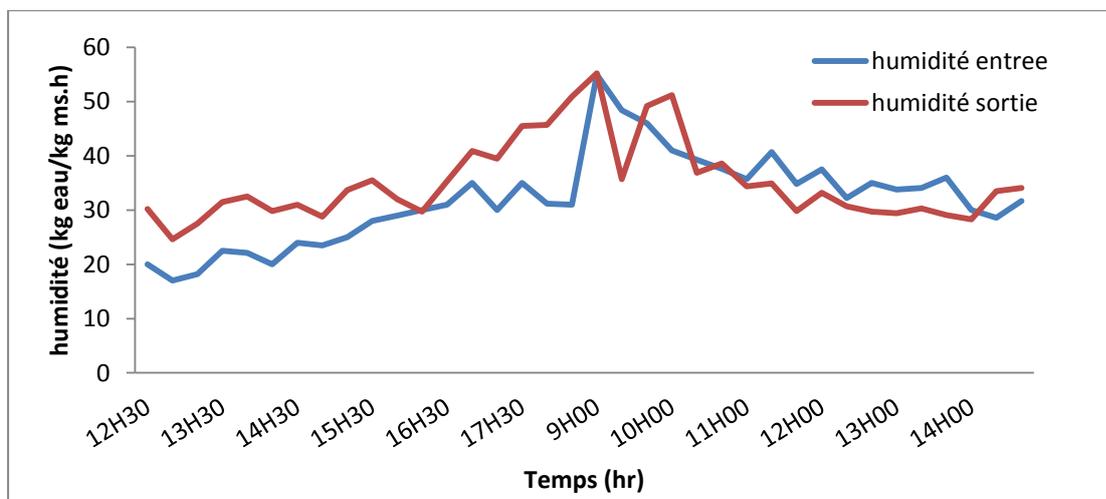


Figure 4.12 Courbes d’humidité à l’entrée et à la sortie du séchoir.

L'évolution de l'humidité relative de l'air varie d'une façon opposée à l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du séchoir. En effet, l'augmentation de la température de l'air engendre une diminution de son humidité relative.

4.5.4 Vitesse d'écoulement de l'air à la sortie du séchoir

La détermination du bilan d'énergie du séchoir nécessite la connaissance du débit d'air en écoulement dans le séchoir. En considérant certaines hypothèses simplificatrices, l'équation de la quantité de mouvement sur une section différentielle d'un conduit vertical donne :

$$\frac{d}{dz}(\rho w^2) = - \frac{dp}{dz} - (\rho - \rho_0) \quad (4.30)$$

La vitesse est alors donnée par :

$$W = \sqrt{\frac{2}{\rho} [\int_0^H (\rho - \rho_0) * g \cdot dz - \Delta p_{\text{frottement}}]} \quad (4.31)$$

Si on néglige les frottements alors l'expression (4.31) devient :

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} [\int_0^H (\rho - \rho_0) g dz]} \quad (4.32)$$

On peut déduire une expression pratique pour la vitesse maximale en appliquant l'hypothèse de BOUSSINESQ :

$$w = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{cond}} \cdot \frac{\Delta T}{T_a}} \quad (4.33)$$

H_{cond} : hauteur du conduit d'évacuation.

ΔT : différence entre la température intérieure et la température extérieure ($T_i - T_e$).

T_a : température ambiante extérieure.

4.5.5 Mesure expérimentale de la vitesse d'écoulement de l'air

Sachant que la vitesse est fonction du rapport de la différence de température et de la température ambiante ($\frac{\Delta T}{T_a}$), nous avons tracé la courbe représentant les valeurs mesurées de la vitesse en fonction de ($\frac{\Delta T}{T_a}$) (figure 4.13).

Ceci nous permet d'estimer le débit massique pratique de l'air à travers le séchoir connaissant la température intérieure et la température extérieure de l'air.

A partir de la courbe expérimentale, on constate que la vitesse varie, en moyenne, entre 1 et 1,5 m/s de par les températures en présence.

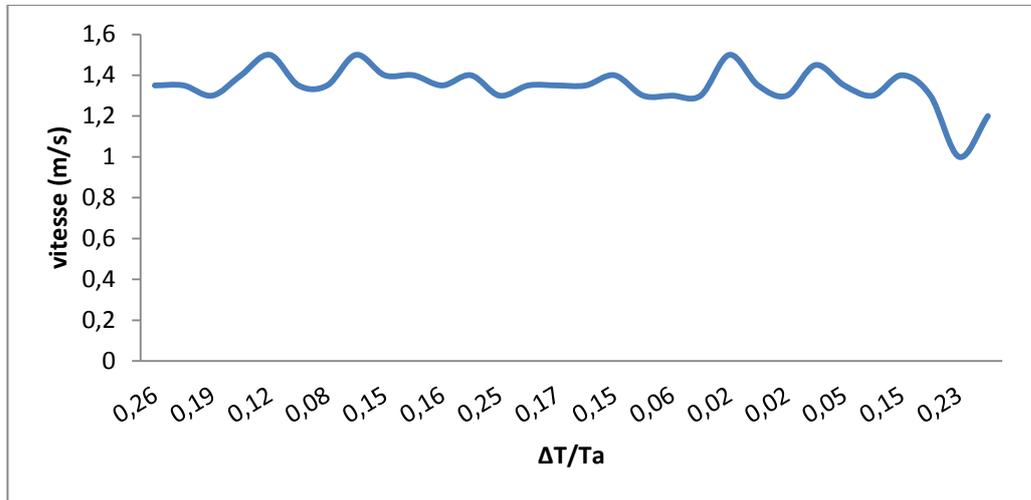


Figure 4.13 Courbe de vitesse en fonction de $\frac{\Delta T}{T_a}$.

4.5.6 Evolution de la masse :

✓ Séchage par convection naturelle régulée

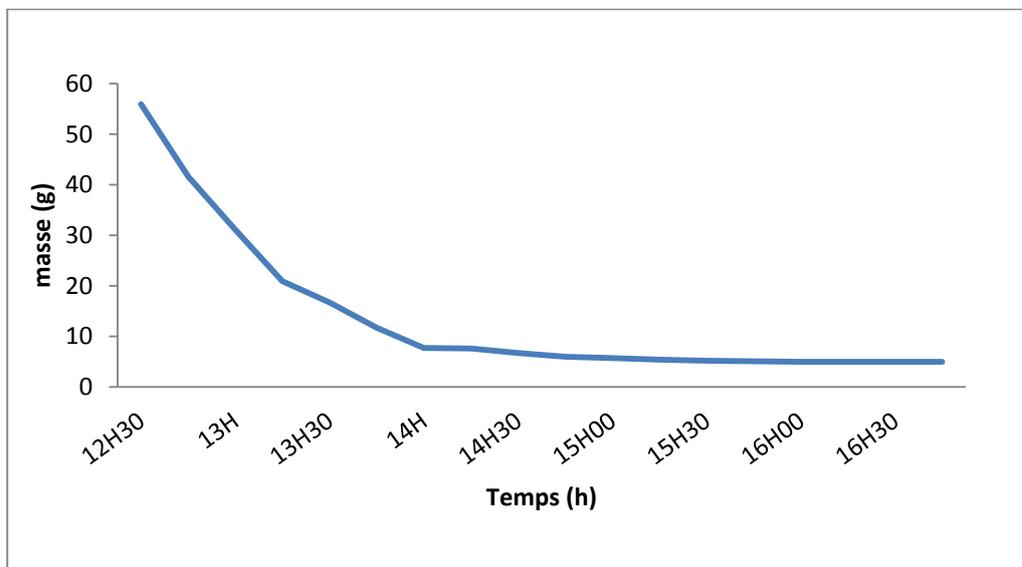


Figure 4.14 Evolution de la masse de poivron durant séchage par convection naturelle régulée.

La figure 4.14 représente la variation de la masse de produit en fonction de temps. On observe une diminution rapide de la teneur en l'eau (l'humidité)

✓ **Séchage par séchoir solaire**

- Produit lavé à l'eau

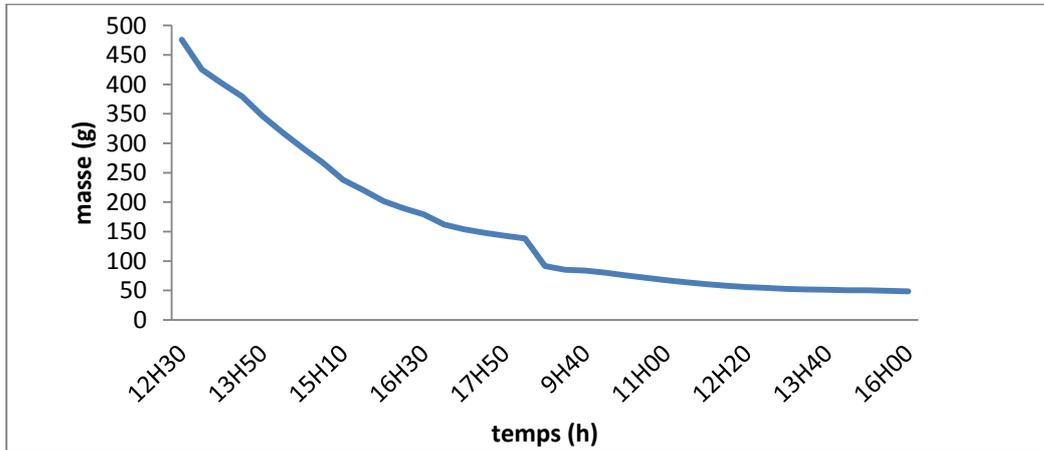


Figure 4.15 Evolution de la masse de poivron lavé à l'eau.

- Produit à l'état naturel.

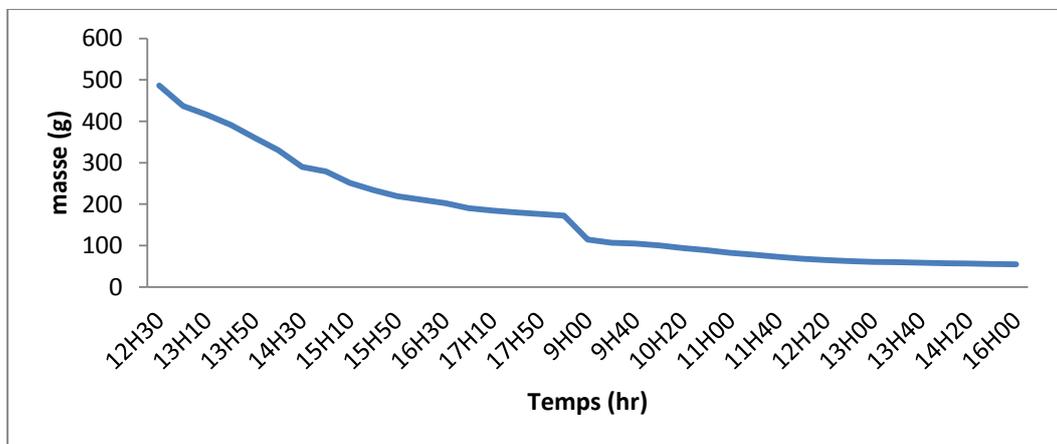


Figure 4.16 Evolution de la masse de poivron à l'état naturel.

La courbe représente l'évolution de la masse de poivron au cours de séchage où on observe une diminution de la masse donc diminution de la teneur en eau.

-La vitesse d'écoulement est environ 1 m/s

-L'humidité est aux environs 20 %.

-La température est environ 50°C.

✓ Séchage par l'air libre

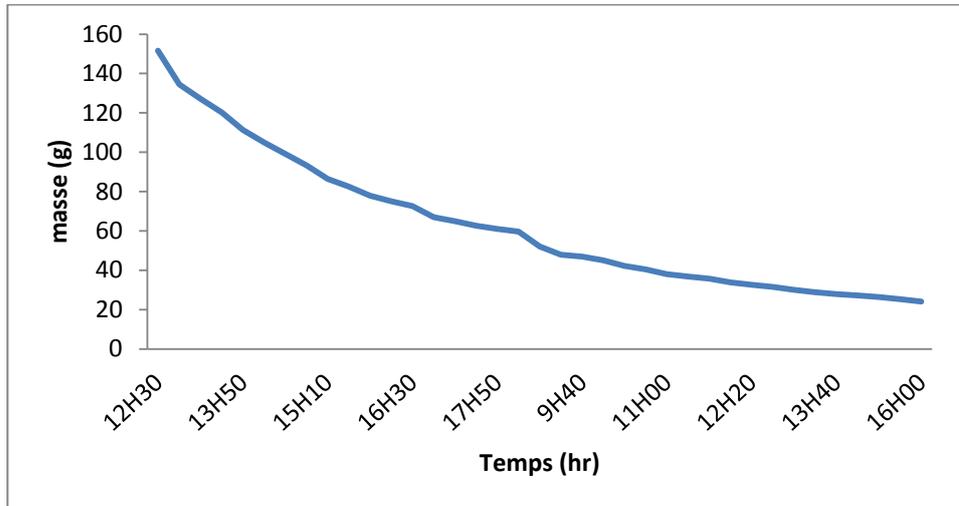


Figure 4.17 Evolution de la masse de produit à l'air libre.

La courbe représente l'évolution de la masse de poivron au cours de séchage à l'air libre où on observe une diminution faible de la masse donc diminution de la teneur en eau faible.

-La vitesse d'écoulement d'air libre est environ 0.5 m/s durant la journée de vent calme.

-L'humidité est aux environs 50 %.

-La température est environ 27°C.

Les deux courbes d'évolution de masse à l'intérieur de séchoir distinguent deux phases, décroissante rapide et décroissante lente jusqu'à stabilisation.

La première phase décrit un mouvement rapide de la migration de l'eau de l'intérieur du poivron vers sa surface extérieure.

La seconde phase qui est décroissante est propre au produit biologique. C'est la plus lente décrivant l'évaporation de l'eau des capillaires.

4.5.7 Evolution de la vitesse de séchage

Nous avons tracé l'évolution de la vitesse de séchage à partir de la relation suivante :

$$V = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (4.35)$$

✓ **Séchage par convection naturelle régulée**

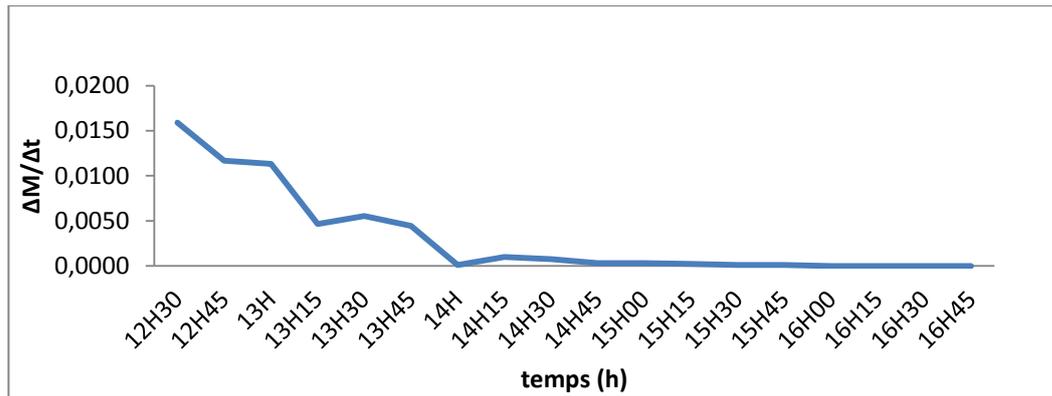


Figure 4.18 Courbe de variation de rapport de masse sur le temps (vitesse de séchage).

✓ **Séchage par séchoir solaire et par l'air libre**

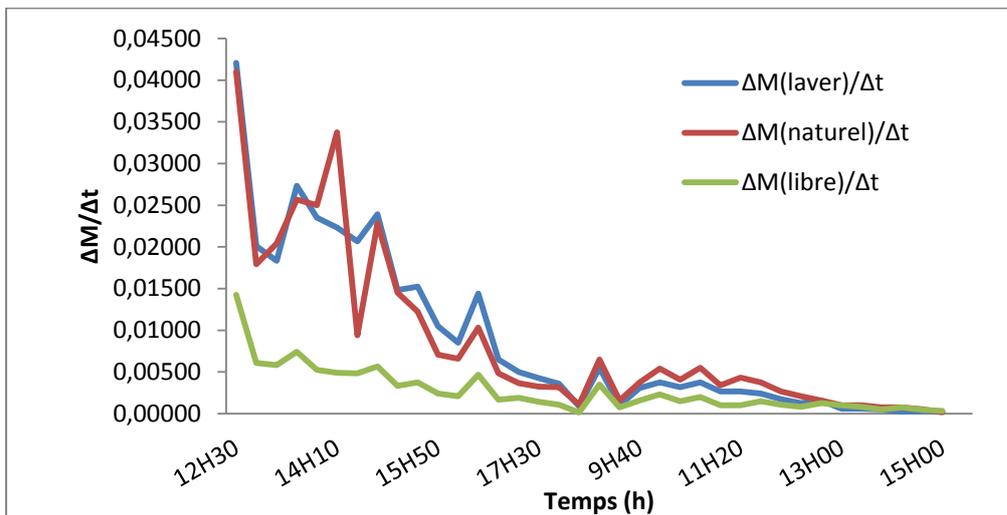


Figure 4.19 Variation de vitesse de séchage par l'air libre et par séchoir solaire (lavé à l'eau et l'état naturel)

On note :

La vitesse de séchage diminue, le produit commence à sécher jusqu'à atteindre une valeur de la vitesse presque constante proche de zéro (14h) à cause de la diffusion de l'eau qu'il y a l'intérieur du produit. On observe dans le cas où la vitesse de séchage de poivron rouge par convection naturel est plus rapide que le séchage par les autres méthodes.

4.5.8 Teneur en eau

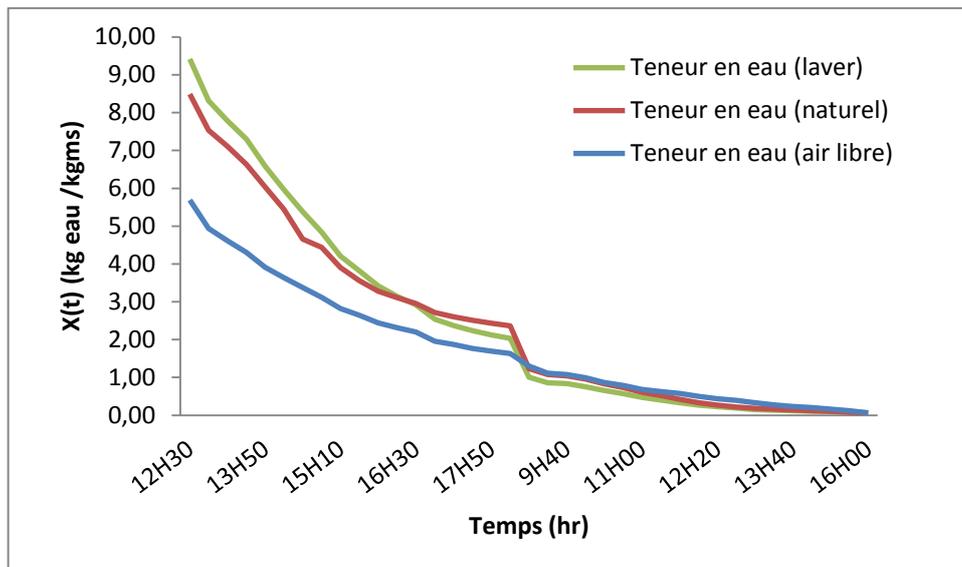


Figure 4.20 Variation de la teneur en eau de séchage à l'air libre et séchage par séchoir solaire (produit lavé et non lavé).

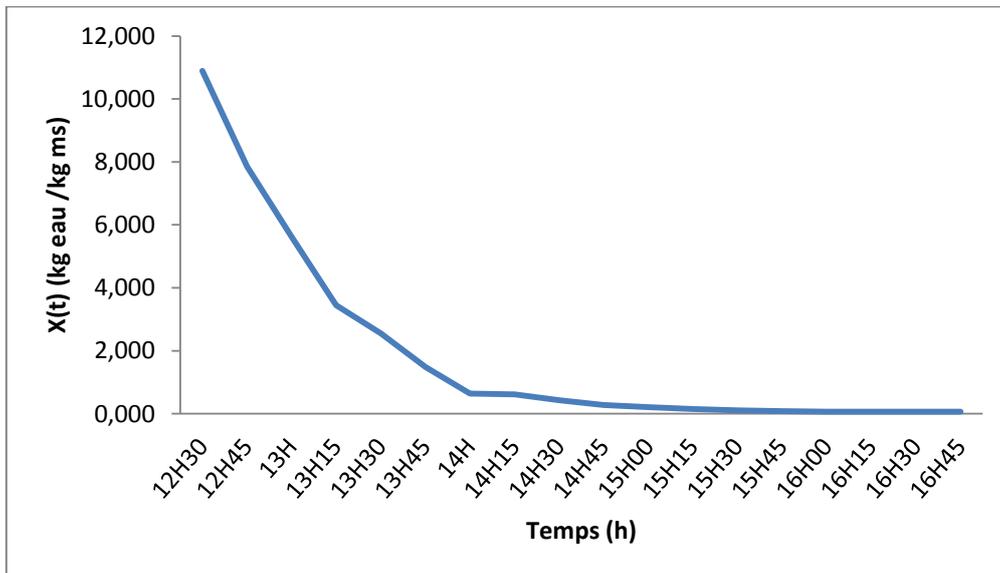


Figure 4.21 Teneur en eau de séchage par convection naturelle régulée.

La teneur en eau diminue progressivement jusqu'à atteindre une petite nulle qu'on va considérer comme fin de séchage.

Conclusion général

Le séchage solaire est un moyen rentable pour la valorisation des produits agroalimentaires et les plantes médicinales. Il permet de sauvegarder les éléments nutritionnels, les vitamines et la qualité du produit.

On peut conclure à partir des quatre chapitres que,

- ✓ du chapitre 1, l'énergie solaire semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.
- ✓ du chapitre 2, le séchage solaire a une processus permettant la conservation des produits agro alimentaire à une température ordinaire sur de longues durées.
- ✓ du chapitre 3, à l'issue de l'étude expérimentale nous avons comparé la durée de séchage de poivron rouge à l'air libre et le séchage solaire (type direct). Nous avons constaté que le séchage par le séchoir solaire est plus rapide que le séchage à l'air libre et que les produits obtenus sont de meilleure qualité.
- ✓ du chapitre 4, Les résultats expérimentaux nous amènent aux conclusions suivantes :
 - L'étude cinétique de séchage solaire de poivron rouge montre la présence unique de la phase de ralentissement, et l'absence de la phase de mise en température du produit et la phase à allure constante.
 - La durée de séchage dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer, la masse du produit, la vitesse de l'air asséchant, ainsi que sa température.
 - Pour le flux globale atteignant 1050W/m^2 , une température ambiante de $33\text{ }^\circ\text{C}$ on mesure à l'intérieur du séchoir solaire des températures 52°C et une humidité relative qui est autour de 17% . En période nocturne le stockage permet de restituer la chaleur et garantit ainsi la continuité du processus de séchage jusqu'au jour suivant.
 - Le rôle de la 2^{ème} cheminée permet une meilleure circulation d'air dans le séchoir solaire direct.

En vue de conserver leur cycle naturel de production, et en vue de leur impact économique, une industrialisation des procédures de séchage solaire serait nécessaire; ce qui va permettre une plus-value à l'économie nationale et un développement d'autres secteurs.

Bibliographie

- [1] A.Madhlope, S.A.Jones and J.D. KalengaSaka “A Solar air heated with composite absorber systems for food dehydration “, Renewable Energy 27 (27-37)-(2001).
- [2] S. Lahsasni, M. Kouhika, M. Mahrouz, A. Idlimam and A.Jamal,” Thinlayer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel” Energy 29 (211-244)-(2004).
- [3] Charreau. A, Cavaille R. (1991) Séchage théorique et pratique, technique de l’ingénieur, génie des procédés, 2480-1 ; 2480-23.
- [4] Technique de l’ingénieur-génie des procédésSéchage, Théorique et calcul.
- [5] P.Duder," le séchage solaire à petite échelle des fruits : expérience et procédés " Edition du Dret, France (1999).
- [6] O.V.Ekecjukwn,B.norton, “ Review of solar energy II ”.
- [7] Businger.J.AThe glaze house climate, physic of plant environment. Ed. W.R. VAN WIJK. Nord ho land publishing company AmsterdamNederland. Pp 277-318, 1969.
- [8] Serres Solaire de production,P.Y.C /EDISUD 1985.
- [9] Tables de composition des aliments, Institut scientifique d’hygiène alimentaire, édition Jacques Lanore, 1985, (ISBN2-866268-055-9).
- [10] Pierre Henri communy : heliothermiques, le gisement solaire. Méthode et calculs. Grope de recherche et d’Édition-2002 ;
- [11] Boudem Abdelmalek, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque Université Mentouri, 2008.
- [12] Chenni Rachid, étude technico-économique d’un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, université Mentouri de Constantine 2007.
- [13] Rarreau. C, DUFFOUR.M, GIBILISCO. M, les énergies renouvelables dans l’habitat en France 2001.
- [14] Algérie Energie Solaire et hydrogène AMARDJIA-ADNANI HANIA.
- [15] M. Daguenet, les séchoirs solaires : théorie et pratique. 1985.
- [16] WH. Mc Adams. 1954. Heat transmission, 3rd ed. McGraw Hill, New York.
- [17] J.F. Saccadura. 1978. Initiation aux transferts thermiques. Cast, Lyon, Technique et Documentation Lavoisier, Paris.
- [18] S.E. Charm. 1963. Fundamental of food engineering. Avi Pub Co, Wesport, Connecticut, USA.
- [19] WC. SWINBANK. 1963. Long wave radiation from clear skies. Q. J. Roy Meteor Soc 89.
- [20] EL MOKRETAR SOFIANE, Contribution théorique et expérimentale à l’étude du bilan d’énergie et de séchage des prunes. P.F.E, USTHB, 2009.

Bibliographie

- [21] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, "Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et Applications", 2^{ème} Edition, Technique et Documentation, Lavoisier, 1980.
- [22] R. Miri, "Contribution Théorique et Expérimentale à l'Etude du Bilan d'Energie d'une Serre Solaire", Thèse de Magister, USTHB, 1983.

Annexe

1. Facteurs de forme [20]

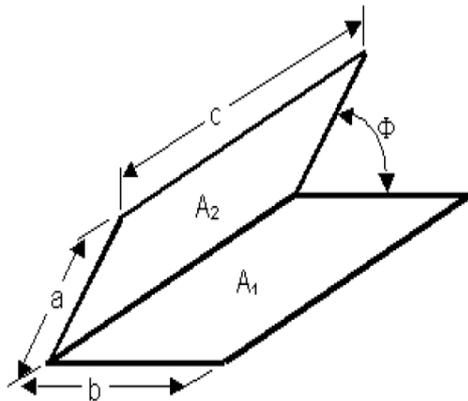
Le facteur de forme ou facteur d'angle, représente la fraction de rayonnement issu de (S_i) et intercepté par (S_j). F_{ij} (facteur de forme) est une quantité purement géométrique, qui ne dépend ni de la nature ni de la température des deux surfaces. On peut aussi interpréter F_{ij} comme étant la probabilité pour qu'un rayon issu de (S_i) soit intercepté par (S_j).

Les facteurs de formes caractérisant les différents échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir-serre après simplification sont les suivants :

- entre le sol et le vitrage F_{1v} , F_{v1}
- entre le sol et la paroi verticale nord F_{15} , F_{51}
- entre la paroi nord verticale et le vitrage F_{5v} , F_{v5}

Facteur de forme entre deux surfaces adjacentes

Le facteur de forme F_{ij} entre deux surfaces adjacentes A_1 et A_2 (figure 1)



avec :

$$A = a/c \text{ et } B = b/c$$

Figure 1 : Surfaces adjacentes

Tableau A.1 Facteurs d'angle entre surfaces adjacentes pour $\Phi = 30^\circ$

B	A = 0.05	A = 0.1	A = 0.2	A = 0.4	A = 0.6	A = 1.0	A = 2.0	A = 4.0	A = 6.0	A = 10.0	A = 20.0
0.1	0.435207	0.728385	0.860505	0.889039	0.894753	0.898003	0.899505	0.899894	0.899965	0.900001	0.900011
0.2	0.225270	0.430252	0.715630	0.840821	0.859340	0.868201	0.871800	0.872651	0.872802	0.872876	0.872904
0.4	0.113808	0.222260	0.420410	0.690387	0.777610	0.812110	0.822722	0.824783	0.825115	0.825275	0.825338
0.6	0.076063	0.149126	0.286447	0.518407	0.665734	0.754703	0.778772	0.782558	0.783112	0.783368	0.783467
1.0	0.045708	0.089800	0.173640	0.324844	0.452822	0.619028	0.700100	0.709846	0.710994	0.711484	0.711663
2.0	0.022871	0.044975	0.087180	0.164544	0.233632	0.350050	0.521308	0.573427	0.577607	0.579017	0.579454
4.0	0.011438	0.022497	0.043633	0.082478	0.117384	0.177461	0.286713	0.394538	0.418659	0.424969	0.426314
6.0	0.007626	0.014999	0.029093	0.055008	0.078311	0.118499	0.192535	0.279106	0.319775	0.337879	0.341110
10.0	0.004575	0.009000	0.017458	0.033011	0.047002	0.071148	0.115803	0.169987	0.202727	0.235961	0.247963
20.0	0.002288	0.004500	0.008729	0.016507	0.023504	0.035583	0.057945	0.085263	0.102333	0.123981	0.148312

Annexe

Tableau A.2 Facteurs d'angle entre surfaces adjacentes pour $\Phi = 45^\circ$

B	A = 0.05	A = 0.1	A = 0.2	A = 0.4	A = 0.6	A = 1.0	A = 2.0	A = 4.0	A = 6.0	A = 10.0	A = 20.0
0.1	0.375581	0.602836	0.739178	0.784462	0.794799	0.800914	0.803820	0.804584	0.804725	0.840796	0.804820
0.2	0.200041	0.369589	0.588433	0.715476	0.743645	0.758908	0.765574	0.767215	0.767510	0.767658	0.767716
0.4	0.102175	0.196115	0.357738	0.560160	0.639400	0.683955	0.701380	0.705178	0.705816	0.706128	0.706253
0.6	0.068482	0.132467	0.247882	0.426267	0.533008	0.613844	0.646980	0.653563	0.654601	0.655093	0.655288
1.0	0.041226	0.080091	0.151782	0.273582	0.368306	0.483347	0.556138	0.570557	0.572588	0.573499	0.573844
2.0	0.020647	0.040191	0.076557	0.140276	0.194094	0.278069	0.388223	0.431687	0.437615	0.439975	0.440777
4.0	0.010328	0.020115	0.038361	0.070518	0.098034	0.142639	0.215844	0.280023	0.297844	0.305205	0.307359
6.0	0.006886	0.013412	0.025584	0.047054	0.065460	0.095431	0.145871	0.198563	0.221866	0.235558	0.239761
10.0	0.004132	0.008048	0.015353	0.028245	0.039306	0.057350	0.087995	0.122082	0.1441334	0.160116	0.169555
20.0	0.002066	0.004024	0.007677	0.014125	0.019659	0.028692	0.044078	0.061472	0.071928	0.084777	0.098507

Tableau A.3 Facteurs d'angle entre surfaces adjacentes pour $\Phi = 60^\circ$

B	A = 0.05	A = 0.1	A = 0.2	A = 0.4	A = 0.6	A = 1.0	A = 2.0	A = 4.0	A = 6.0	A = 10.0	A = 20.0
0.1	0.310755	0.485586	0.609105	0.662542	0.676303	0.684811	0.688985	0.690106	0.690315	0.690422	0.690462
0.2	0.169942	0.304553	0.471290	0.584692	0.616579	0.635878	0.644981	0.647333	0.647765	0.647983	0.648072
0.4	0.087890	0.165635	0.292346	0.443475	0.509004	0.553691	0.574728	0.579884	0.580795	0.581247	0.581432
0.6	0.059112	0.112717	0.205526	0.339336	0.417249	0.483580	0.518254	0.526650	0.528088	0.528791	0.529075
1.0	0.035665	0.068481	0.127176	0.221476	0.290148	0.370905	0.429971	0.445869	0.448504	0.449756	0.450250
2.0	0.017882	0.034449	0.064498	0.114946	0.155476	0.214986	0.288274	0.322089	0.328378	0.331274	0.332360
4.0	0.008948	0.017253	0.032367	0.057988	0.078997	0.111467	0.161045	0.202035	0.214957	0.221801	0.224342
6.0	0.005966	0.011505	0.021592	0.038720	0.052809	0.074751	0.109459	0.143304	0.158048	0.168139	0.172358
10.0	0.003580	0.006904	0.012960	0.023250	0.031727	0.044976	0.066255	0.088720	0.100883	0.112663	0.119822
20.0	0.001790	0.003452	0.006481	0.011629	0.015872	0.022512	0.033236	0.044868	0.051707	0.059911	0.068489

Annexe

Tableau A.4 Facteurs d'angle entre surfaces adjacentes pour $\Phi = 120^\circ$

B	A = 0.05	A = 0.1	A = 0.2	A = 0.4	A = 0.6	A = 1.0	A = 2.0	A = 4.0	A = 6.0	A = 10.0	A = 20.0
0.1	0.085852	0.128098	0.166340	0.191745	0.200462	0.206687	0.210135	0.211149	0.211348	0.211452	0.211501
0.2	0.050029	0.083170	0.122335	0.155990	0.169537	0.180050	0.186287	0.188211	0.188597	0.188801	0.188891
0.4	0.026983	0.047936	0.077995	0.111512	0.128269	0.143284	0.153457	0.156919	0.157648	0.158040	0.158213
0.6	0.018400	0.033410	0.056512	0.085512	0.101942	0.118331	0.130801	0.135469	0.136500	0.137067	0.137319
1.0	0.011209	0.020669	0.036010	0.057314	0.070998	0.086615	0.100808	0.107099	0.108626	0.109502	0.109904
2.0	0.005650	0.010507	0.018629	0.030691	0.039240	0.050404	0.063248	0.070897	0.073172	0.074618	0.075339
4.0	0.002831	0.005279	0.009411	0.015692	0.020320	0.026775	0.035449	0.042260	0.044891	0.046880	0.048041
6.0	0.001888	0.003522	0.006287	0.010510	0.013650	0.018105	0.024391	0.029927	0.032391	0.034502	0.035908
10.0	0.001133	0.002115	0.003776	0.006322	0.008224	0.010950	0.014924	0.018752	0.020701	0.022639	0.024212
20.0	0.000567	0.001057	0.001889	0.003164	0.004120	0.005495	0.007534	0.009608	0.010773	0.012107	0.013499

Tableau A.5 Facteurs d'angle entre surfaces adjacentes pour $\Phi = 135^\circ$

B	A = 0.05	A = 0.1	A = 0.2	A = 0.4	A = 0.6	A = 1.0	A = 2.0	A = 4.0	A = 6.0	A = 10.0	A = 20.0
0.1	0.048889	0.072612	0.094561	0.109725	0.115103	0.119025	0.121242	0.121904	0.122035	0.122105	0.122140
0.2	0.028702	0.047280	0.069179	0.088375	0.096342	0.102696	0.106586	0.107821	0.108072	0.108207	0.108267
0.4	0.015578	0.027431	0.044187	0.062773	0.072173	0.080788	0.086847	0.088999	0.089465	0.089720	0.089833
0.6	0.010648	0.019184	0.032114	0.048115	0.057168	0.066314	0.080201	0.076339	0.076986	0.077349	0.077514
1.0	0.006498	0.011902	0.020539	0.032315	0.039789	0.048310	0.056206	0.059871	0.060800	0.061348	0.061606
2.0	0.003279	0.006062	0.010659	0.017369	0.022053	0.028103	0.035044	0.039278	0.040590	0.041454	0.041902
4.0	0.001644	0.003048	0.005391	0.008900	0.011451	0.014968	0.019639	0.023305	0.024748	0.025873	0.026560
6.0	0.001096	0.002034	0.003602	0.005964	0.007699	0.010134	0.013530	0.016499	0.017827	0.018988	0.019794
10.0	0.000658	0.001221	0.002164	0.003589	0.004641	0.006135	0.008291	0.010349	0.011393	0.012436	0.013305
20.0	0.000329	0.000610	0.001083	0.001797	0.002325	0.003080	0.004190	0.005312	0.005938	0.006653	0.007401

Annexe

Tableau A.6 Facteurs d'angle entre surfaces adjacentes pour $\Phi = 150^\circ$

B	A = 0.05	A = 0.1	A = 0.2	A = 0.4	A = 0.6	A = 1.0	A = 2.0	A = 4.0	A = 6.0	A = 10.0	A = 20.0
0.1	0.021915	0.032449	0.042335	0.049342	0.051883	0.053764	0.054843	0.055169	0.055234	0.055269	0.055286
0.2	0.012931	0.021168	0.030862	0.039469	0.043113	0.046073	0.047925	0.048524	0.048648	0.048715	0.048746
0.4	0.007049	0.012336	0.019735	0.027914	0.032081	0.035957	0.038751	0.039773	0.039998	0.040123	0.040180
0.6	0.004827	0.008647	0.014371	0.021387	0.025353	0.029394	0.032644	0.033963	0.034272	0.034449	0.034530
1.0	0.002949	0.005376	0.009215	0.014383	0.017637	0.021346	0.024826	0.026492	0.026926	0.027188	0.027313
2.0	0.001489	0.002742	0.004792	0.007750	0.009793	0.012413	0.015415	0.017276	0.017868	0.018267	0.018480
4.0	0.000747	0.001379	0.002426	0.003977	0.005094	0.006623	0.008638	0.010220	0.010850	0.011351	0.011666
6.0	0.000498	0.000921	0.001622	0.002667	0.003427	0.004488	0.005956	0.007233	0.007807	0.008315	0.008677
10.0	0.000299	0.000553	0.000974	0.001605	0.002067	0.002719	0.003654	0.004540	0.004989	0.005439	0.005821
20.0	0.000149	0.000276	0.000487	0.000804	0.001036	0.001366	0.001848	0.002334	0.002603	0.002911	0.003233

Les facteurs de formes F15 (F51) entre les surfaces adjacentes et faisant un angle droit ($\Phi = 90^\circ$) entre elles se déduisent de la figure suivante :

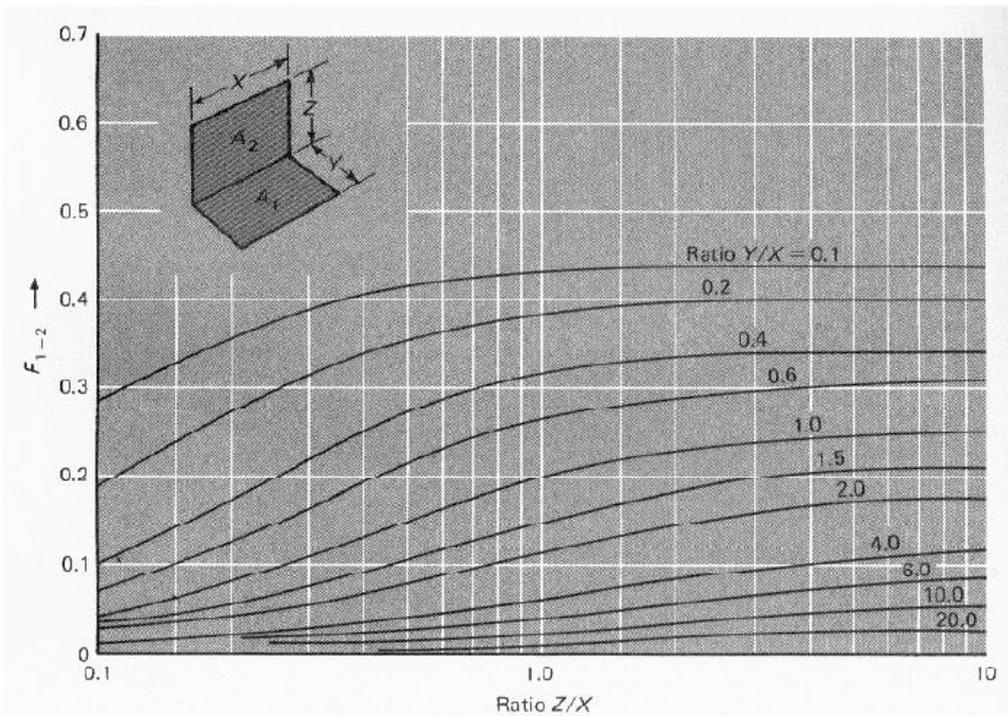
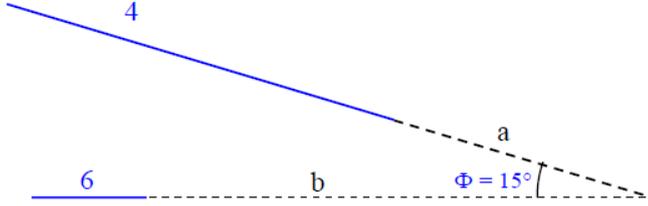


Fig. (A-2) Radiation shape factor for radiation between perpendicular rectangles with a common edge.

Annexe

2. Facteur de forme entre deux surfaces séparées par un milieu transparent [20]

Pour la détermination de F1V (FV1) et F5V (FV5) nous utilisons la méthode algébrique. Nous donnons dans ce qui suit un exemple de calcul pour déterminer F64 (F46) :



$$F_{6b-4a} = F_{6b-4} + F_{6b-a}$$

$$F_{6b-4} = F_{6b-4a} - F_{6b-a}$$

Figure A.3 Exemple pour 2 surfaces séparées par un milieu transparent

Et en utilisant le théorème de réciprocité, nous aurons :

$$S_{6b} F_{6b-4} = S_4 F_{4-6b} = S_4 (F_{4-6} + F_{4-b}) = S_4 F_{4-6} + S_4 F_{4-b} \quad (A1.3)$$

Déterminons à présent F4-b (Fb-4)

$$F_{b-4a} = F_{b-4} + F_{b-a}$$

$$\text{d'où : } F_{b-4} = F_{b-4a} - F_{b-a} \text{ et } S_b F_{b-4} = S_b F_{b-4a} - S_b F_{b-a} \quad (A1.4)$$

$$\text{Sachant que } S_4 F_{4-b} = S_b F_{b-4} \quad (A1.5)$$

En combinant les équations (A1-4) et (A1-5), nous aurons :

$$S_4 F_{4-b} = S_b F_{b-4a} - S_b F_{b-a} \quad (A1.6)$$

$$\text{de (A1-3), nous avons : } S_4 F_{46} = S_{6b} F_{6b-4} - S_4 F_{4-b} \quad (A1.7)$$

et en combinant (A1-6) et (A1-7) nous aurons en définitif :

$$F_{46} = (S_{6b} F_{6b-4} - S_b F_{b-4a} - S_b F_{b-a}) / S_4 \quad (A1.8)$$

Avec:

F6b-4, facteur d'angle entre les surfaces adjacentes S6b et S4, faisant entre elles un angle $\Phi=15^\circ$

Fb-4a, facteur d'angle entre les surfaces adjacentes Sb et S4a, faisant entre elle un angle $\Phi=15^\circ$

Fb-a, facteur d'angle entre les surfaces adjacentes Sb et Sa, faisant entre elle un angle $\Phi=15^\circ$

Pour le détermination de F6b-4, Fb-4a et Fb-a, nous utilisons une interpolation entre les valeurs de Fij pour $\Phi = 0^\circ$ et ceux pour $\Phi = 30^\circ$ du tableau A.1.

Annexe

2. Préparation de séchage de poivron rouge



Figure A.4 Poivron rouge avant le séchage



Figure A.5 Début de séchage dans le séchoir.



Figure A.6 Milieu de séchage de poivron rouge

Figure A.7 Fin de séchage de poivron rouge.

Annexe

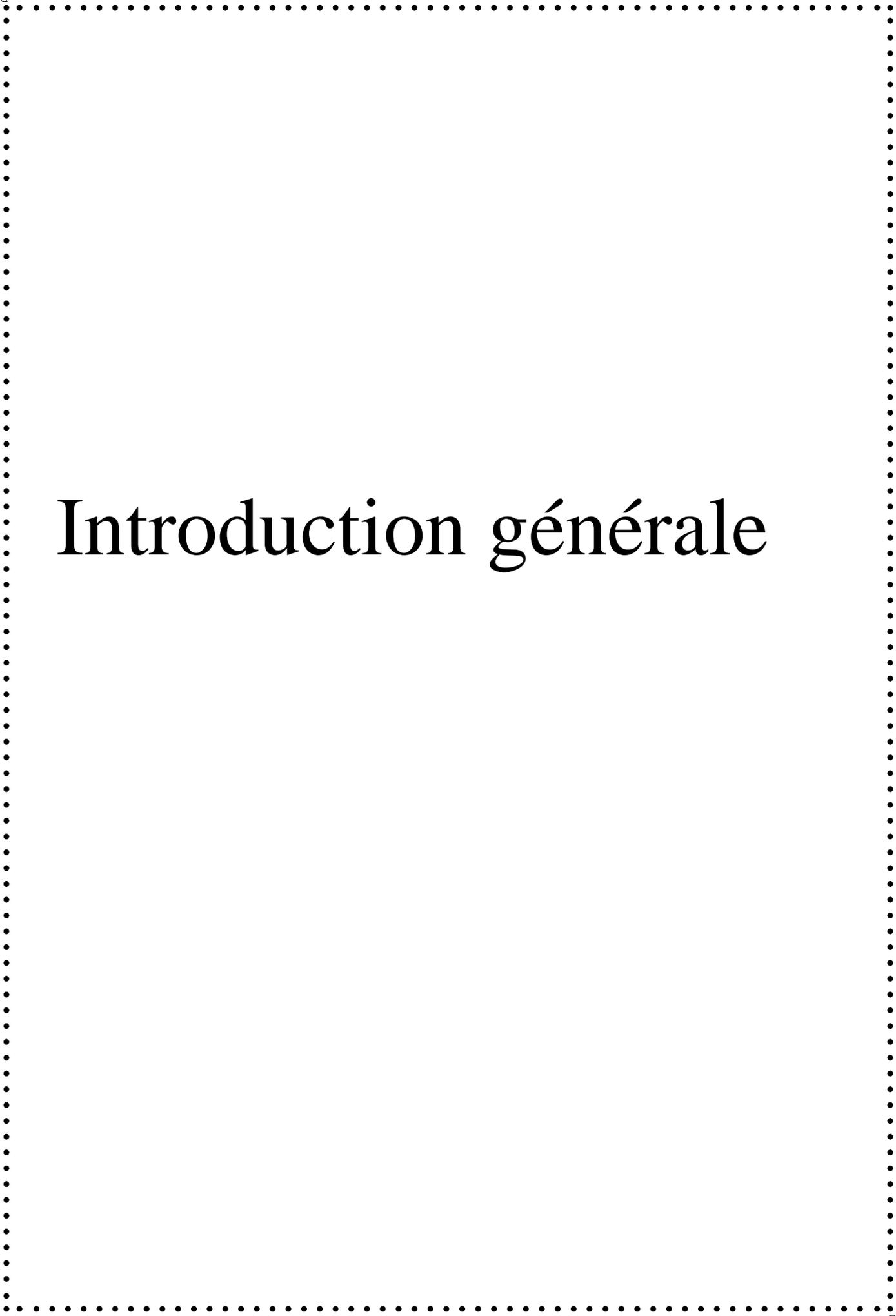
3. Deuxième cheminée qui nous ajoutons :



Figure A.7 Vue de phase

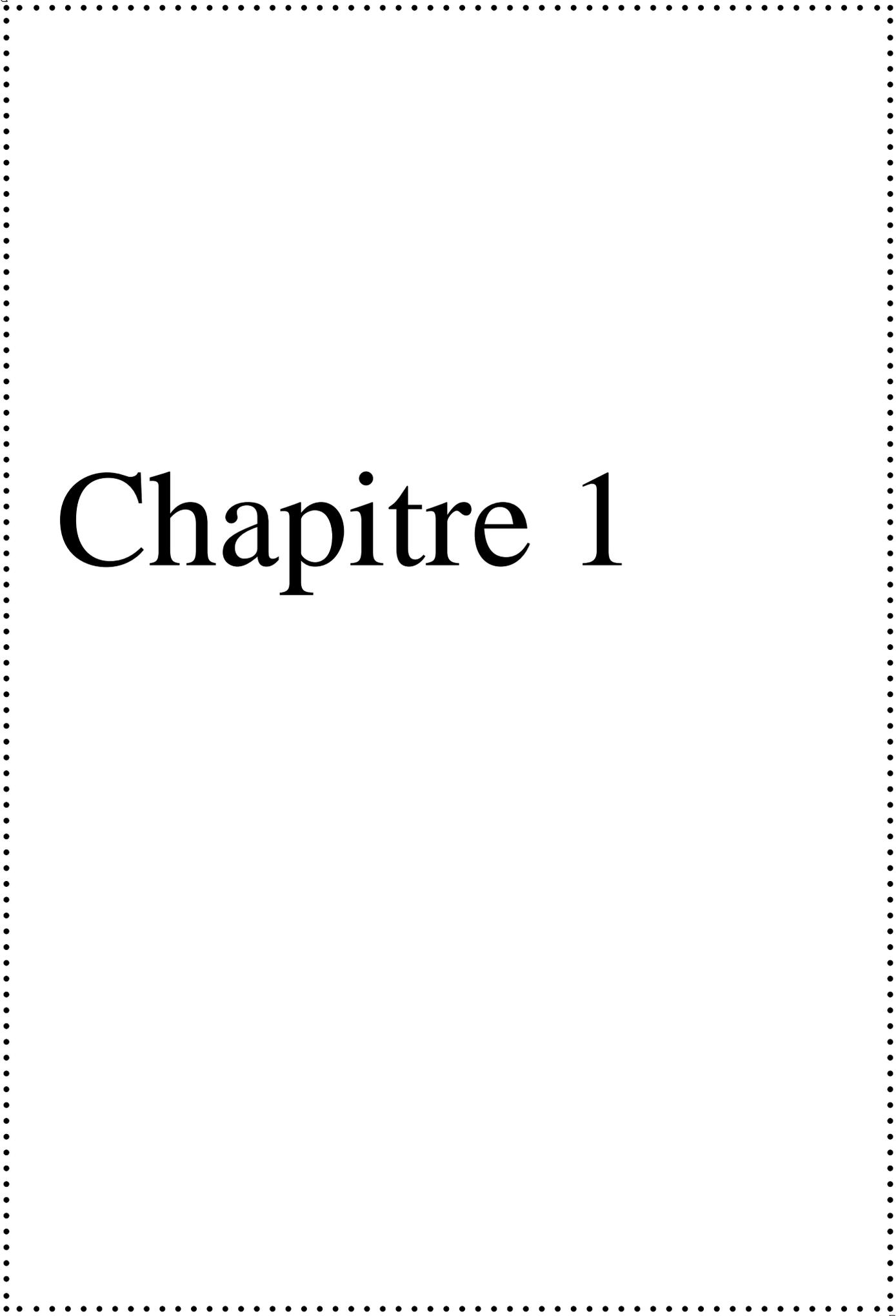


figure A.8 Vue de l'arrière



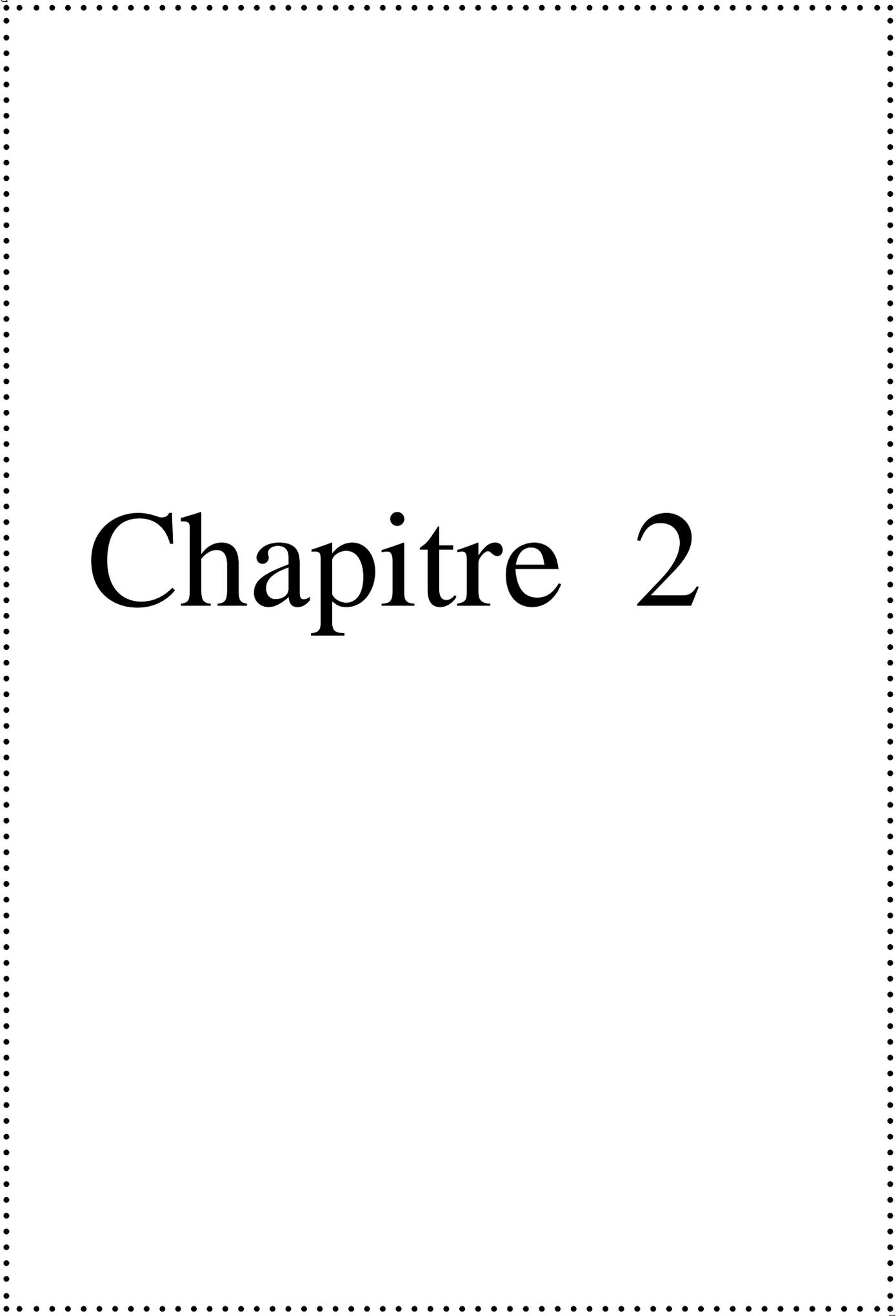
Introduction générale





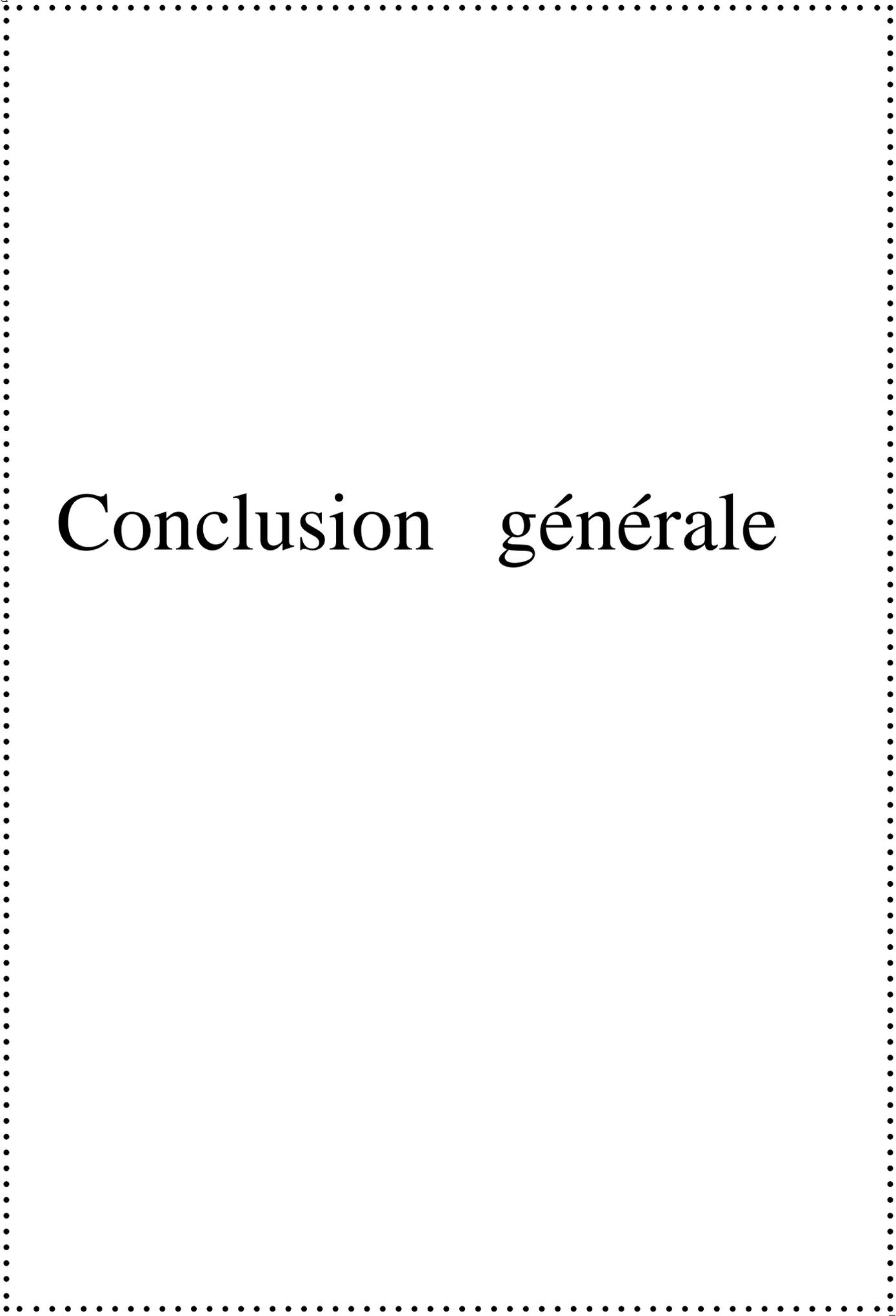
Chapitre 1





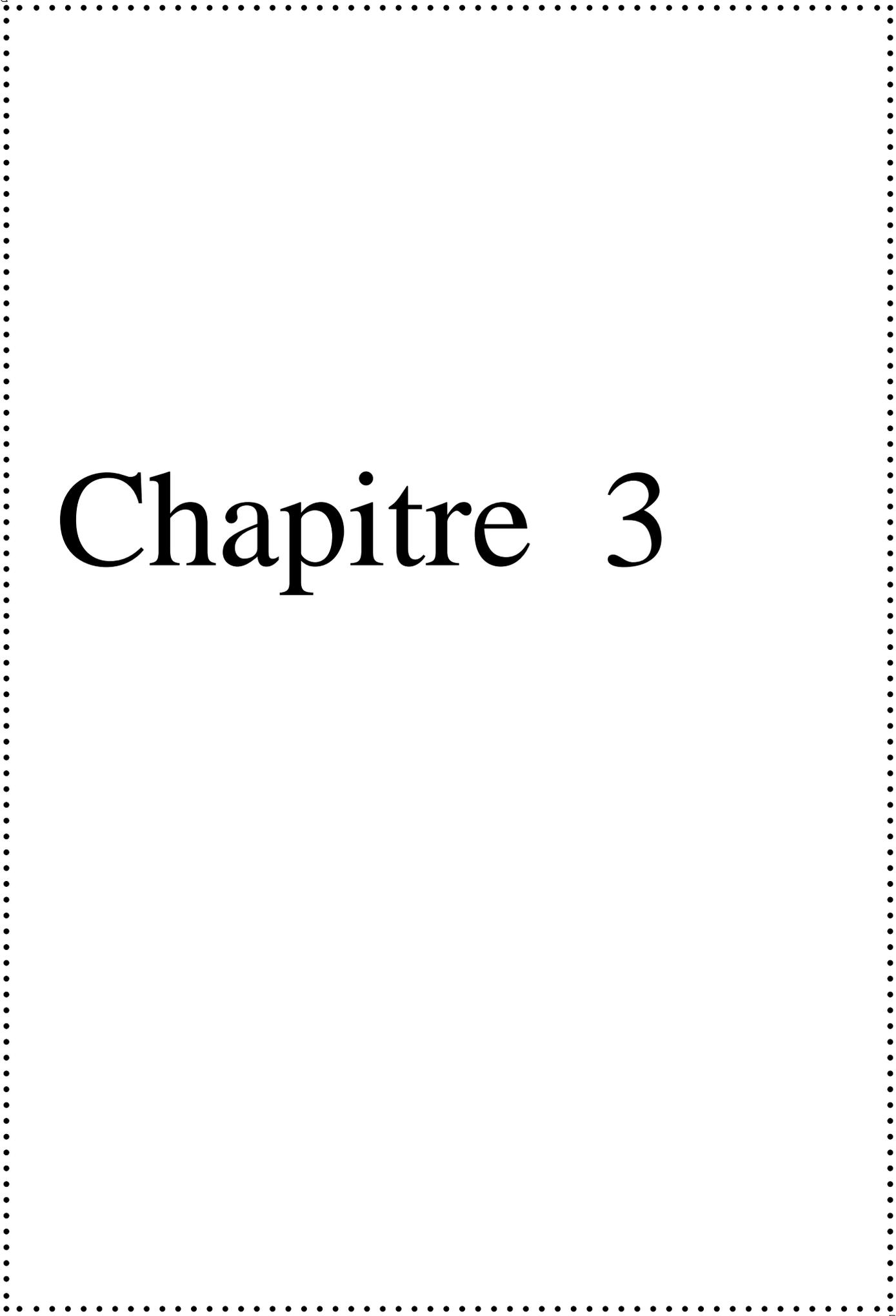
Chapitre 2





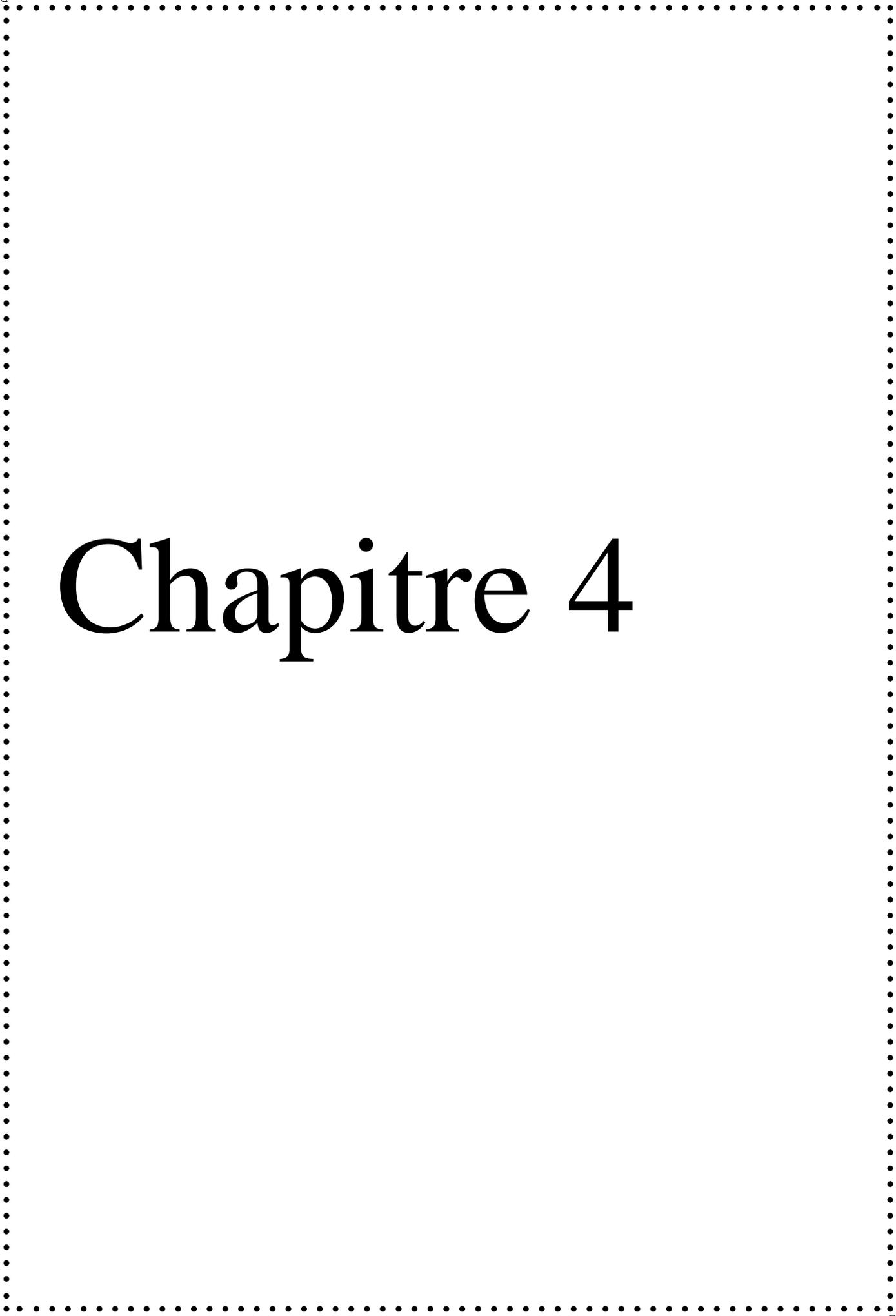
Conclusion générale





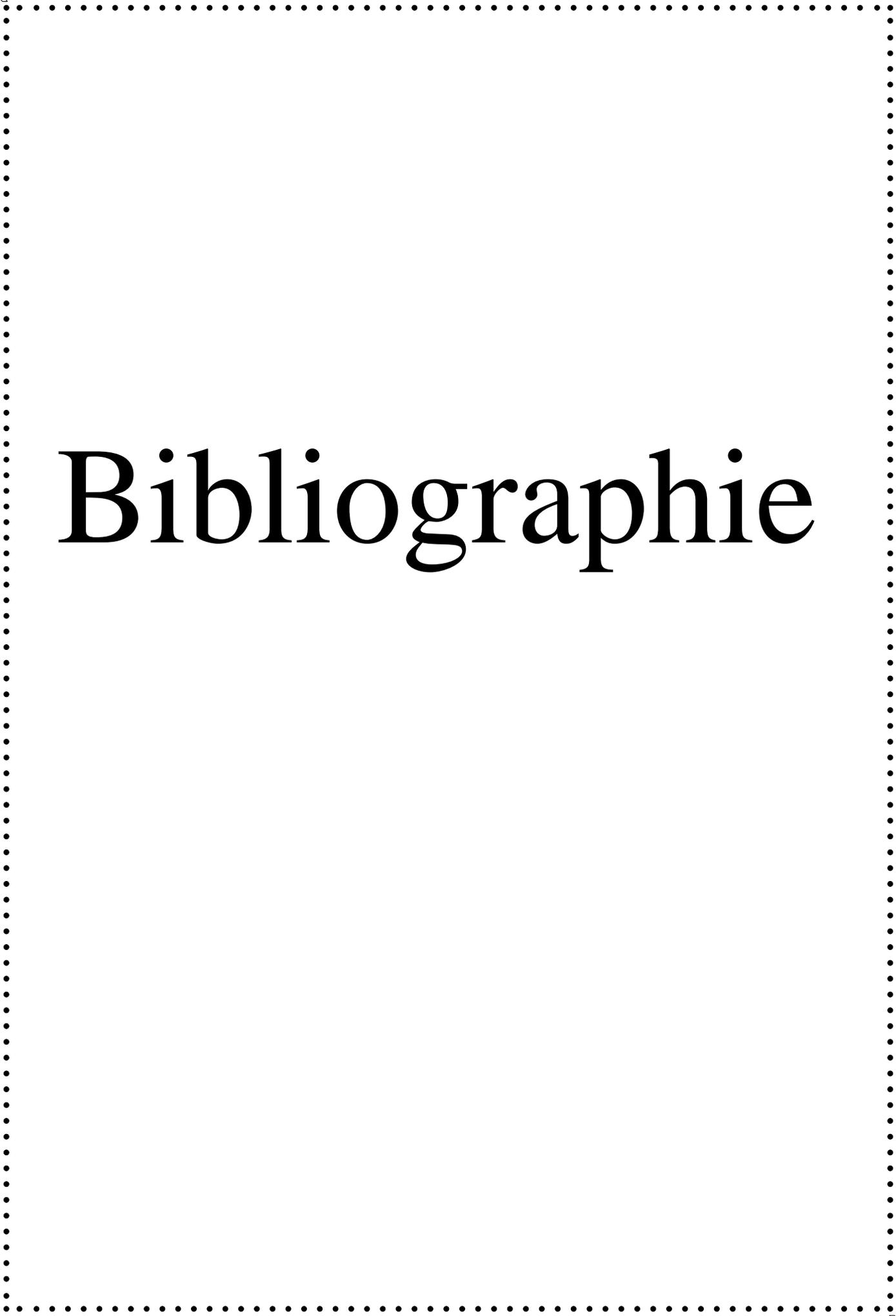
Chapitre 3





Chapitre 4





Bibliographie





Annexes

