

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

Thèse

Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales

Présentée par Amina BENHAMMOU

EN VUE DE L'OBTENTION

DE DIPLÔME DE DOCTORAT ES-SCIENCE

EN PHYSIQUE

A soutenir le mois de Février 2010 devant le jury

Prof CHAABANE SARI	Président de jury –Université de Tlemcen
Prof B. BENYOUCEF	Directeur de thèse –Université de Tlemcen
Prof M .KOUHILA	Co- Directeur de thèse- E N S de Marrakech
Prof B.ZEGHMATI	Examineur– Université de Perpignan
Dr M.BELHAMEL	Examineur-CDER de Bouzaréah
Dr BIBI TRIKI	Examineur –Université de Tlemcen

Résumé :

L'auteur étudie un système solaire de préparation de la marjolaine ; il commence d'abord par la simulation du gisement solaire d'Adrar, la région la plus connue par le séchage des plantes aromatiques et médicinales en Algérie. Ensuite, il détermine les paramètres de séchage de la plante par une modélisation de l'activité de l'eau et les isothermes de sorption et de désorption, pour arriver à la fin à se servir des résultats obtenus dans la suite du travail. Il décrit ce système composé d'un insolateur à eau, d'un échangeur eau/eau, d'une cuve de stockage d'eau chaude munie d'un appoint conventionnel auxiliaire, d'un aérotherme eau/air et d'une armoire de séchage munie d'un appoint conventionnel auxiliaire et propose un modèle mathématique représentatif incluant un modèle de rayonnement solaire, de collecteur d'énergie solaire, de stockage de la chaleur, du séchoir et un modèle économique. D'une part, il discrétise et présente une méthode de résolution des équations de fonctionnement et propose une méthode de dimensionnement du système et, d'autre part, il détermine les valeurs des paramètres et simule le système. Enfin, il élabore des abaques et des relations polynomiales de dimensionnement afin d'optimiser un système mixte de production d'eau chaude et d'air chaud pour le séchage de denrée agro-alimentaire parce que les performances des insolateurs à eau sont supérieures à celles des insolateurs à air.

Abstract :

The author examines a solar system for the preparation of marjoram and it starts with the simulation of the solar field of Adrar, the best region known by the drying of medicinal and aromatic plants in Algeria. Then, he determines the parameters of drying the plant by a model of the water activity and sorption isotherms and desorption, to use the results in further work.

It describes the system consisting of a sunstroke in water, a heat exchanger water / water, a bowl of hot water storage equipped with a conventional booster auxiliary heater with a water / air and a dryer equipped with a conventional auxiliary aids, and proposes a mathematical model including a representative model of solar radiation, solar collector, storing heat, the dryer and an economic model. He simulates this method of solving equations of operation and provides a method of sizing the system and, secondly, he determines the parameters and simulates the system. Finally, he prepares graphs and polynomial relations sizing to optimize a mix of hot water and hot air for drying food ; because the performance of sunstroke water are higher than those sunstroke air.

ملخص :

يتناول المؤلف في النظام الشمسي من أجل إعداد العترة ويبدأ مع محاكاة للحقل الطاقة الشمسية في منطقة ادرار المعروفة تجفيف النباتات الطبية والعطرية في الجزائر. ثم انه يحدد معالم تجفيف النبات بواسطة نموذج للنشاط المياه والأيسوثرم الامتصاص والامتزاز ، ليصل في نهاية لاستخدام النتائج في مزيد من العمل. فهو يصف النظام يتألف من ضربات الشمس في الماء ، والماء مبادل حراري / المياه ، وعاء من الماء الساخن تخزين مجهزة معززة التقليدية سخان المساعدة مع الماء / الهواء وعلى خزانة تجفيف مجهزة الإيدز مساعدة التقليدية ، ويقترح نموذج رياضي بما في ذلك نموذج ممثل للإشعاع الشمسي ، تجميع الطاقة الشمسية وتخزينها تحت درجة الطريقة في حل المعادلات من العملية وتوفر وسيلة لتحجيم النظام ، حرارة مجفف ونموذج اقتصادي. من ناحية ، و وثانيا ، فإنه يحدد معالم ومحاكاة النظام. وأخيرا ، تعد الرسوم البيانية والعلاقات متعدد الحدود التحجيم لتحسين مزيج الغذائية بسبب أداء ضربة شمس في الماء أعلى من من الماء الساخن والهواء الساخن لتجفيف المواد الغذائية المواد تلك ضربة شمس الهواء

Madame Amina BENHAMMOU

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : Modélisation du gisement solaire

Introduction.....	1
1. Le mouvement de la terre et le mouvement du soleil et ces coordonnées	1
1.1. La variation annuelle du rayonnement direct extraterrestre I_{on}	1
1.2. La déclinaison du soleil δ	2
1.3. Mesure de l'heure	3
1.4. Angle horaire du soleil ω	5
1.5. Angle horaire de lever et de coucher du soleil et la durée astronomique de jour	5
1.6. Mouvement apparente du soleil	6
1.6.1. Hauteur angulaire du soleil : α_s	6
1.6.2. Azimut du soleil γ_s :.....	6
1.6.3. Angle d'incidence des rayonnements solaires θ	7
1.6.4. Angle zénithal du soleil θ_z	8
2. Les irradiations extraterrestres.....	8
2. 1. Les irradiations extraterrestres reçues sur une surface horizontale.....	8
2.1.1. Les irradiations horaires.....	8
2.1.2. Les irradiations solaires extraterrestres horaires en moyenne mensuelle \bar{I}_0	9
2.1.3. Les irradiations solaires extraterrestres journalières H_0	10
2.1.4. Les irradiations solaires extraterrestres journalières en moyenne mensuelle \bar{H}_0	11
reçue sur une surface horizontale	11
2.2. Les irradiations solaires extraterrestres reçues sur une surface inclinée	11
2.2.1. Angle d'incidence des rayons solaires et l'angle du lever du soleil.....	11
2.2.1. a. Plan orienté vers l'équateur.....	12
2.2.1. b. Plan d'orientation arbitraire.....	12
2.2.2. Les irradiations solaires extraterrestres reçue sur une surface inclinée et orientée vers l'équateur	
2.2.2.a. Les irradiations horaires $I_{0\beta}$	12
2.2.2.b. Les irradiations journalières	14

2.2.3. Les irradiances solaires extraterrestres reçues sur une surface inclinée et d'orientation arbitraire	16
2.2.3.a. Les irradiances horaires	16
2.2.3.b. Les irradiances journalières.....	17
2.2.4. Les irradiances solaires extraterrestres reçues sur une surface normale aux rayons solaires (cas d'un héliostat).....	18
2.2.4.a. Les irradiances horaires I_{OP}	18
2.3. Calcul des rapports des irradiances solaires \dot{r}_b, r_b, R_b et \bar{R}_b	19
2.3.1. Rapports des irradiances solaires \dot{r}_b, r_b, R_b et \bar{R}_b dans le cas d'une surface orientée vers l'équateur.....	19
2.3.1. a. Rapport des irradiances \dot{r}_b	19
2.3.1. b. Rapport des irradiances horaires r_b	20
2.3.1.c. Rapport des irradiances horaire \bar{r}_b en moyenne mensuel	20
2.3.1.d. Rapport des irradiances journalières R_b	21
2.3.1.e. Rapport des irradiances journalières \bar{R}_b en moyenne mensuel.....	21
2.3.2. Rapports des irradiances solaires r_b, R_b et \bar{R}_b dans le cas d'une surface orientée arbitraire	22
2.3.2. a. Rapport des irradiances horaires r_b	22
2.3.2.3. Rapport des irradiances journalières R_b	22
2.4. La variation annuelle des irradiances journalières optimales en fonction de l'angle d'inclinaison du plan optimal	23
3. estimation des irradiances solaires en présence de l'atmosphère	23
3.1.. Corrélation des données des irradiances globales journalières avec les heures d'ensoleillement	23
3.2. Estimation des irradiances globales horaires en moyenne mensuelle sur une surface horizontale	24
3.3. Estimation des irradiances horaires et journalière global sur une surface horizontale.....	25
3.4. Estimations de l'irradiation diffuse journalière reçue sur une surface horizontale.....	26
3.5. Estimations des irradiances diffuses journalières en moyenne mensuelle sur une surface horizontale	26
3.6. Estimation des irradiances horaires diffus sur une surface horizontale.....	27
4. les irradiances solaires incidentes sur un plan incliné en présence de l'atmosphère.....	27
4.1. Les irradiances directes.....	27

4.1.1. Les irradiations directes instantanées incident sur un plan incliné $I_{b\beta\gamma}$	27
4.1.2. Les irradiations directes horaires incidentes sur un plan incliné $I_{b\beta\gamma}$	28
4.1.3. Les irradiations directes journalières incidentes sur un plan incliné $H_{b\beta\gamma}$	29
4.1.4. Les irradiations directs journalières en moyenne mensuel incident sur un plan incliné $H_{b\beta\gamma}$	29
4.2. Les irradiations réfléchi par le sol incident sur un plan incliné	29
4.2.1. Les irradiations horaires réfléchir par le sol	30
4.2.1.a. Les irradiations horaires diffuses sont isotrope	30
4.2.1.b. Les irradiations horaires diffuses sont anisotrope	30
4.2.2. Les irradiations journalières diffus par le sol	31
4.2.2.a. Les irradiations réfléchies sont isotrope	31
4.2.2.b. Les irradiation réfléchie sont anisotropes	31
4.3. Les irradiations diffus par le ciel	32
4.3.1. Les irradiations horaires diffus par le ciel	32
4.3.1.a. Modèle circomsolaire	32
4.3.1.b. Modèle isotopique	32
4.3.1.c. Modèle anisotropie	33
4.3.2. Les irradiations journalières diffus par le ciel	33
4.4.2.a. Modèle circomsolaire	33
4.4.2.b. Modèle isotopie	34
4.4.2.c. Modèle anisotropie	34
a). Modèle du Klucher	34
b). Modèle du Hay	34
4.5. Les irradiations globales incidentes sur un plan incliné situé à l'horizon	35
4.5.1. Les irradiations horaires globales incident sur un plan incliné	35
4.5.2. Les irradiations journalières globales incident sur un plan incliné	35
4.6. Rapport des irradiations globales incident sur un plan incliné au les radiations incident sur un plan horizontal	36
4.6.1. Rapport des radiations journalières	36
4.6.2. Rapport des irradiations journalières en moyenne mensuel	36

Chapitre II : Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

I. DIFFUSIVITÉ HYDRIQUE ET CINÉTIQUE DE SÉCHAGE SOLAIRE EN CONVECTION FORCÉE DES FEUILLES DE MARJOLAINE

1. INTRODUCTION.....	42
2. FORMULATION MATHÉMATIQUE.....	43
Teneur en eau et courbe caractéristique de séchage..... ;;;;;;	43
Critère de choix du modèle approprié	43

Diffusivité effective et énergie d'activation.....44

3. MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE.....	45
---	----

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	46
---------------------------------	----

5. CONCLUSION.....	47
--------------------	----

II. EQUILIBRE HYGROSCOPIQUE ET PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES DES FEUILLES DE MARJOLAINE

1. INTRODUCTION.....	53
----------------------	----

2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.....	54
--------------------------------	----

2.1 Matériel et mode opératoire.....	54
--------------------------------------	----

2.2 Critères statistiques de choix des modèles décrivant les isothermes de sorption.....	54
--	----

2.3 Chaleur isostérique ou enthalpie différentielle de sorption.....	55
--	----

2.4 Théorie de compensation enthalpie-entropie.....	56
---	----

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	57
---------------------------------	----

3.1 Isothermes de sorption de la marjolaine.....	57
--	----

3.2 Modélisation des isothermes de sorption des feuilles de marjolaine.....	57
---	----

3.3 Propriétés thermodynamiques des feuilles de marjolaine	57
--	----

3.4 Théorie de compensation.....	58
----------------------------------	----

4. CONCLUSION.....	59
--------------------	----

III. Modélisation de l'activité de l'eau et de l'enthalpie de la désorption d'eau de marjolaine (*Origanum majorana*).....64

1. Introduction.....	64
----------------------	----

2. Matériel et mode opératoire.....	65
-------------------------------------	----

3. Modélisation des courbes de sorption de marjolaine.....	66
--	----

4. Enthalpie de désorption de marjolaine.....	67
---	----

5. Résultats et discussion.....	68
---------------------------------	----

6. Conclusion.....	69
--------------------	----

Chapitre III : Description et modélisation du système

I. DESCRIPTION DU SYSTEME.....	70
II. MODELISATION DU SYSTEME.....	71
1. Energie Solaire	71
Entrer des données initiales	71
Calculer en grandeurs journalières.....	71
Calculer en grandeurs horaires	73
2. Système collecteur d'énergie	74
3. Stockage de la chaleur	78
4. Armoire de séchage	79
4.1. Hypothèses.....	79
4.2. Equation du séchoir	80
Bilan relatif à l'air.....	80
Bilan relatif aux feuilles.....	80
Bilan relatif aux parois.....	81

Chapitre IV: Discrétisation des équations et méthode de résolution

I. DESCRETISATION DES EQUATIONS.....	82
1. Equation des stockages	82
2. Equation de l'armoire de séchage	84
II. METHODE DE RESOLUTION DES EQUATIONS.....	85
III. DETERMINATION DES VALEURS DES PARAMETRES	85
1. Coefficients d'échange thermique	85
1. a. Echange par conduction	85
1. b. Echange par rayonnement	86
1. c. Echange par convection	87
ECOULEMENT NATUREL.....	88
2. Vitesse de séchage	90
3. Chaleur latente massique de vaporisation.....	90
4. Température de l'air ambiant.....	91
5. Température équivalente de la voute céleste.....	92

Chapitre V: Méthode de dimensionnement du système

I.METHODE DE DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE SECHAGE A CHAUFFAGE PARTIELLEMENT SOLAIRE.....	93
1. Système de production d'eau chaude	93
1. a. Couverture solaire f_1	93
1. b. Fraction de chaleur économisée J_1	96
2. Système de production d'air chaud.....	96
2. b. Fraction de chaleur économisée j_2	97
3. Grandeurs nécessaires a l'exploitation du modèle numérique	98
3. a. Grandeurs relatives au système de production d'eau chaude	98
Chaleur utile d'insolateur.....	99
Chaleur totale consommée	99
3. b. Grandeurs relatives au système de production d'air chaud.....	100
Chaleur d'évaporation	100
Chaleur de séchage	101
Chaleur rejetée dans l'ambiance	102
Chaleur recyclée	102
La chaleur d'appoint	103

Chapitre VI : Simulation du système et interprétation des résultats

I.SIMULATION DU SYSTEME ET INTERPRETATION DES RESULTATS	105
1. Le site et son climat.....	105
2. Simulation du rayonnement et interprétation.....	105
3. Simulation du fonctionnement de l'insolateur et interprétation.....	108
4. Simulation de la cuve de stockage d'eau chaud et interprétation	111
4. a. Effet de l'échangeur et de l'aérotherme	112
4. b. Effet du débit de l'eau venant de la cuve et circulant dans l'échangeur \dot{m}_{ec}	113
4. c. Effet du débit de l'eau circulant dans l'aérotherme \dot{m}_{ex}	116
4.d. Influence de la surface de captation sur la puissance délivrée à la cuve de stockage.....	122
4.e. Simulation du fonctionnement du séchoir et interprétation	126
Hypothèses	126
Effet du de débit massique de l'air asséchant \dot{m}_A	126
4.f. Couvertures solaire	129

Chapitre VII : Abaques de dimensionnement et optimisation du système

I.MODELE ECONOMIQUE, ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT ET OPTIMISATION DU SYSTEME	130
1. Modèle économique	130
1.1. Lois économiques	131
a. La capitalisation $F_c(\zeta, n)$	132
b. L'actualisation $F_a(\zeta, n)$	132
1.2. Hypothèses de travail	132
1.3. Modélisation économique.....	134
1.3.1. Les couts	136
1.3.2. L'économie réalisée	137
1.4. Actualisation	138
2. Abaques de dimensionnement.....	140
3. Relation polynomiales de dimensionnement.....	145
II. OPTIMISATION DU SYSTÈME	150
CONCLUSION GENERALE	

NOMENCLATURE

Nomenclature

LETTRES LATINES

A

a	:	Coefficient défini par l'équation (19)
A	:	Surface de l'isolant, de l'absorbeur, de la vitre ou de l'isolateurs (m ²)
[A]	:	Matrice des coefficients
a ₀	:	Facteur défini par l'équation (A22)
a ₁	:	Facteur défini par l'équation (A23)
a ₅	:	Surface de l'isolant latérale de l'insolateur (m ²)

B

b	:	Coefficient défini par l'équation (20)
B	:	Fonction objectif bénéfique
B	:	Vecteur connu lié aux coefficients de l'équation de départ

C

C	:	Facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison de l'insolateur Sur les coefficients de convection dans les conduits non utiles
C _e (1)	:	Coût de l'énergie conventionnelle d'appoint pour la première année
C _G	:	Coût global du système
C _G ^a	:	Coût global actualisé du système
C _I	:	Coût initial d'investissement
C _I ^a	:	Coût initial actualisé d'investissement
C _I ^a (i)	:	Coût annuel actualisé du crédit d'investissement
C _{Id}	:	Coût initial des composants dépendants de l'air de l'insolateur
C _{Ii}	:	Coût initial des composants indépendants de l'air de l'insolateur
C _{min}	:	Débit calorifique minimal de l'aérotherme
C _p	:	Capacité calorifique massique à pression constante de l'air humide (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
C _{pa}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de l'air sec (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
C _{pa}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de l'air asséchant (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
C _{pe}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de l'eau (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
C _{ppe}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de la paroi extérieur du séchoir (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
C _{ppi}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de la paroi intérieure du séchoir (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
C _{p,l}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de l'eau liquide au voisinage de la courbe de saturation (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹).
C _{p,vs}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de la vapeur au voisinage de la courbe de saturation (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹).
C _{p,v}	:	Capacité calorifique massique à pression constante de la vapeur d'eau

	$(J.Kg^{-1}.K^{-1})$
C_{pva}	: Capacité calorifique massique à pression constante du produit ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)
$C_U(i)$: Coût d'utilisation annuel
C_{UA}	: Coût d'assurance
C_{UA}^a	: Coût d'assurance annuel
$C_{UA(i)}^a$: Coût d'assurance annuel actualisé
$C_{UA(1)}^a$: Coût d'assurance pour la première année
C_{UF}	: Coût de fonctionnement
C_{UF}^a	: Coût d'assurance annuel actualisé
C_{UM}	: Coût de maintenance
C_{UM}^a	: Coût de maintenance actualisé
$C_{UM(i)}^a$: Coût de maintenance annuel actualisé
$C_{UM(1)}^a$: Coût de maintenance pour la première année
C_v	: Fraction massique de la vapeur
D	: Décalage entre le moment où le maximum de la température ambiante est atteint et celui correspondant au maximum de l'ensoleillement
D	: Rayonnement diffus total instantané
D^*	: Vapeur horaire du rayonnement diffus total
d_e	: Diamètre extérieur du tube des insolateurs (m)
D_h	: Diamètre hydraulique du milieu considéré (m)
d_i	: Diamètre intérieur du tube des insolateurs (m)
D_M	: Coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau ($m^2.s^{-1}$)

E

e	: Coefficient défini par l'équation (33)
e	: Épaisseur de la vitre (m)
E	: Puissance du rayonnement solaire reçu au niveau de la terre ($W.m^{-2}$)
E_{pe}	: Épaisseur de la paroi extérieure du séchoir (m)
E_{pi}	: Épaisseur de la paroi intérieure du séchoir (m)
E_{pp}	: Épaisseur de l'isolant entre les parois du séchoir (m)
ET	: Correction de l'équation des temps (h)
e_2	: Épaisseur des ailettes de l'absorbeur (m)
e_4	: Épaisseur de l'isolant arrière (m)
e_5	: Épaisseur de l'isolant latéral (m)

F

f	: Facteur correctif tenant compte de l'effet du vent
f	: Couverture solaire
F	: Facteur défini par l'équation (30)
F'	: Facteur de corrélation des insolateurs
$F_a(\zeta,n)$: Facteur d'actualisation
$F_{ac}(\zeta,n)$: Facteur d'annuité constante
$F_c(\zeta,n)$: Facteur de capitalisation
FFN^a	: Flux financier net actualisé
F_R	: Coefficient global de transfert absorbeur -fluide
F'_R	: Correction de F_R due à la conduction dans l'absorbeur
F''_R	: Correction de F_R due à l'échangeur de chaleur
f_1	: Couverture solaire du sous-système de production d'eau chaude
F_1	: Fonction de contrôle de débit de la cuve de stockage d'eau chaude
f_2	: Couverture solaire du sous-système de production d'air chaud

- F_2 : Fonction de contrôle indiquant si l'insolateur fournit ou non une énergie utile
 F_3 : Fonction de contrôle indiquant si l'organe d'utilisation sollicite ou non de la chaleur
 F_4 : Facteur indiquant si l'aérotherme fonctionne de façon continue ou par-à-coups

G

- g : Accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)
 G : Rayonnement global instantané
 G^* : Valeur horaire du rayonnement global
 Gr : Nombre adimensionnel de Grashof
 G_R : Gains réalisés par le système
 G_R^a : Economie réalisée actualisée
 $G_R^a(i)$: Cout de fonctionnement annuel actualisé
 G_{sc} : Constante solaire ($W.m^{-2}$)
 G_t : Rayonnement incident instantané frappant l'insolateur
 G_z : Nombre adimensionnel de Graetz

H

- \bar{H} : Rayonnement global journalier moyen mensuel frappant un plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 HA : Humidité absolue ou teneur en humidité de l'air humide (kg/kg)
 h_{cii} : Coefficient d'échange thermique conductif à travers l'isolant de l'insolateur ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{cpipe} : Coefficient d'échange thermique conductif entre les parois intérieure et extérieure du séchoir ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{c23} : Coefficient de transfert thermique par convection entre l'ailette et le tube de l'insolateur ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 \bar{H}_d : Rayonnement diffus journalier moyen mensuel frappant un plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 \bar{H}_0 : Rayonnement extraterrestre journalier moyen mensuel frappant un plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 h_r : Humidité relative de l'air asséchant (%)
 HR : Humidité relative de l'air ambiant (%)
 HR : Humidité relative ou degré hygrométrique de l'air humide (%)
 h_{rcp} : Coefficient d'échange thermique radiatif entre la voûte céleste et la paroi externe du séchoir ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{r24} : Coefficient d'échange thermique radiatif entre l'absorbeur et l'isolant de l'insolateur ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_s : Hauteur du soleil (rd)
 \bar{H}_T : Rayonnement global journalier moyen mensuel frappant un plan incliné ($W.m^{-2}$)
 h_v : Coefficient d'échange thermique par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{vAva} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'air asséchant et le produit ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{vape} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'air ambiant et la paroi externe du séchoir ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{vApi} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'air asséchant et la paroi interne du séchoir ($W.m^{-2}.K^{-1}$)

- h_{v1a} : Coefficient d'échange thermique convectif du au vent entre la vitre de l'insolateur et l'air ambiant ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{v2a} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'absorbeur et l'air confine arrière de l'insolateur ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{v3a} : Coefficient de transfert thermique convectif entre le tube conduit et l'eau de l'insolateur ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
 h_{v4a} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'isolant de la face inferieure de l'insolateur et l'air ambiant ($W.m^{-2}.K^{-1}$)

I

- \bar{I} : Rayonnement global horaire moyen mensuel reçu sur un plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 I_h^* : Valeur horaire du rayonnement direct total
 \bar{I}_b : Rayonnement direct horaire moyen mensuel frappant un plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 \bar{I}_d : Rayonnement diffus horaire moyen mensuel reçu sur un plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 I_h : Rayonnement direct total instantané
 I_T : Rayonnement global horaire frappant un plan incline ($W.m^{-2}$)
 \bar{I}_T : Rayonnement global horaire moyen mensuel frappant un plan incline ($W.m^{-2}$)

J

- J : Fraction de chaleur économisée
 JD : Facteur défini par l'équation (2)
 JD_0 : Facteur défini par l'équation (3)
 J_1 : Fraction de chaleur économisée dans le cas d'une production d'eau chaude de mortification
 J_2 : Fraction de chaleur économisée dans le cas d'une production d'air chaud de séchage

N

- n : Echéance
 N : Facteur défini par l'équation (26)
 n_j : Quantième (nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier).
 n_j : Jour moyen caractéristique du mois
 N_j : Nombre de jours dans le mois
 N_s : Humidité absolue du produit à sécher (kg_{eau}/kg_{MS})
 N_u : Nombre adimensionnel de *Nusselt*
 N_v : Nombre de vitrages de l'insolateur
 n_1 : Indice de réfraction du milieu 1 (air)
 n_2 : Indice de réfraction du milieu 2 (vitre)

P

P	:	Périmètre mouille de la section droite du conduit considéré (m)
P	:	Pression totale de l'air humide (Pa ou bars)
P_{as}	:	Pression partielle de l'air sec (Pa)
P_c	:	Taux de recyclage de l'air dans le système (%)
P_r	:	Nombre adimensionnel de <i>Prandtl</i>
PSB	:	Part du solaire dans le bénéfice actualise
P_{st}	:	Pertes thermiques de la cuve de stockage (W)
P_v	:	Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)
P_{vs}	:	Pression de vapeur saturante (Pa ou atm)

Q

Q_{A1}	:	Puissance instantanée apportée par l'appoint 1 conventionnel de la cuve secondaire (W)
\tilde{Q}_{A1}	:	Chaleur d'appoint au niveau de la cuve secondaire fournie par l'appoint 1 (W)
Q_{A2}	:	Puissance instantanée apportée par l'appoint 2 conventionnel de l'armoire de séchage (W)
\tilde{Q}_{A2}	:	Chaleur d'appoint au niveau de l'armoire de séchage fournie par l'appoint 2 (W)
Q_{c1}	:	Puissance totale instantanée consommée pour la production d'eau chaude de mortification (W)
Q_{c1}^*	:	Chaleur totale consommée durant le mois pour la production d'eau chaude de mortification (W)
\bar{Q}_{c1}	:	Chaleur totale consommée en valeurs journalières moyennes mensuelles pour la production d'eau chaude de mortification (W)
\tilde{Q}_{c1}	:	Chaleur totale consommée pour la production d'eau chaude (W) Puissance totale instantanée consommée pour la production d'air chaud(W)
\bar{Q}_{c2}	:	Chaleur totale consommée par jour en valeurs moyennes mensuelles pour la production d'air chaud (W)
\tilde{Q}_{c2}	:	Chaleur totale consommée utilisée dans le système de production d'air chaud (W)
Q_d	:	Puissance issue de l'insolateur transférée à la cuve de stockage (W)
\tilde{Q}_d	:	Chaleur utile d'insolation (W)
\tilde{Q}_E	:	Chaleur d'évaporation de l'eau du produit (W)
Q_{EA}	:	Energie horaire maximale transférable a travers l'aérotherme (W)
Q_{hx}	:	Energie transférable à travers l'échangeur (W)
Q_L	:	Valeur horaire des besoins thermiques (W)
\tilde{Q}_L	:	Chaleur de séchage véhiculée par l'air asséchant (W)
\tilde{Q}_R	:	Chaleur rejetée dans l'ambiance (W)
Q_{RC}	:	Puissance instantanée apportée par l'air de recyclage (W)
Q_{RC}^*	:	Valeur de QRC durant le mois (W)
\bar{Q}_{RC}	:	En valeur journalière moyenne mensuelle (W)
\tilde{Q}_{RC}	:	Chaleur recyclée de l'air asséchant (W)
\tilde{Q}_{RR}	:	Chaleur réellement rejetée dans l'ambiance et non récupérée (W)

Q_u	:	Puissance utile délivrée a la sortie des insolateurs (W)
\bar{Q}_u	:	Puissance utile en moyennes annuelles fournie par l'insolateur (W)
\bar{Q}_u^r	:	Puissance utile restreinte fournie par l'insolateur (W)
Q_X	:	Energie soustraite du ballon de stockage pour la satisfaction des besoins (W)

R

r	:	Facteur de conversion du rayonnement global journalier H en rayonnement global horaire I reçu sur un plan horizontal
R	:	Facteur défini par l'équation (28)
R'	:	Facteur défini par l'équation (27)
R_a	:	Nombre adimensionnel de Rayleigh
\bar{R}_b	:	Facteur de conversion du rayonnement direct journalier moyen mensuel sur une surface horizontale en rayonnement direct journalier moyen mensuel sur une surface inclinée
$R_b I_h$:	Rayonnement direct sur le plan incliné de l'insolateur
r_d	:	Facteur de conversion du rayonnement diffus journalier \bar{H}_d moyen mensuel en rayonnement diffus horaire \bar{I}_d moyen mensuel reçu sur un plan horizontal
R_{dc}	:	Angle solide sous lequel la surface voit le ciel
$R_{dc} D$:	Rayonnement diffus du ciel arrivant sur la surface de l'insolateur
Rdt	:	Rendement global de l'investissement
rdt_e	:	Rendement moyen de l'échangeur (%)
R_e	:	Nombre adimensionnel de Reynolds
$R_{ds} G$:	Rayonnement diffus du sol intéressant la surface de l'insolateur
S	:	Surface de la section droite du conduit considéré (m^2)
S^*	:	Somme actuelle constante a placer pendant n années pour obtenir la même somme finale S_o qu'en plaçant la somme S_o a l'année 0
S_{Ava}	:	Surface d'échange correspondant à h_{vAva} (m^2)
S_{Api}	:	Surface d'échange correspondant à h_{vApi} (m^2)
S_c	:	Inclinaison de l'insolateur (degrés)
S_n	:	Valeur future à l'année n d'une somme S_o actuelle
S_{pipe}	:	Surface d'échange relative à h_{cpipe} (m^2)
S_o	:	Somme a l'instant 0
S_2	:	Section de l'absorbeur (m^2)

T

t	:	Temps écoulé depuis le lever du soleil (h)
t	:	Durée de l'opération de production d'eau chaude (h)
t	:	Température de l'air ($^{\circ}C$)
T	:	Température de séchage (K)
T	:	Température de vaporisation (K)
T	:	Température de l'air humide (K)
T_a	:	Température de l'air ambiant (K)
T_A	:	Température de l'air asséchant (K)
\bar{T}_a	:	Valeur moyenne de la température ambiante (K)
T_{Aa}	:	Température de l'air a l'entrée de l'armoire de séchage (K)
T_{amax}	:	Température ambiante maximale ($^{\circ}C$)
T_{amin}	:	Température ambiante minimale ($^{\circ}C$)

T_{as}	:	Température de l'air asséchant (°C)
T_{As}	:	Température de l'air a la sortie de l'armoire de séchage (K)
T_c	:	Température équivalente de la voûte céleste (K)
T_{co}	:	Température de consigne de l'eau de mortification (K)
T_{eA}	:	Température de l'air asséchant a l'entrée de l'aérotherme (K)
TEC	:	Taux d'enrichissement en capital
T_{ei}	:	Température de l'eau a l'entrée des insolateurs (K)
TL	:	Temps légal (h)
T_{maxs}	:	Température d'ébullition (K)
T_{pes}	:	Température de la paroi extérieure de l'armoire de séchages (K)
T_{pis}	:	Température de la paroi intérieure de l'armoire de séchages (K)
t_s	:	Durée de séchage (h)
T_{sa}	:	Température de l'air sortant de l'aérotherme (K)
T_{se}	:	Température du fluide issu de la cuve et sortant de l'échangeur (K)
T_{si}	:	Température de l'eau a la sortie de l'insolateur (K)
T_{st}	:	Température de stockage de la cuve (K)
T_{stf}	:	Température de la cuve de stockage à la fin de l'heure (K)
T_{sti}	:	Température de la cuve de stockage au début de l'heure (K)
$T_{st}^{(1)}$:	Température dans le volume isotherme supérieur de la cuve de stockage d'eau chaude (K)
$T_{st}^{(2)}$:	Température dans le volume isotherme inferieur de la cuve de stockage d'eau chaude (K)
TSV	:	Temps solaire vrai (h)
T_{va}	:	Température du produit (K)
T_{x0}	:	Température de retour de l'eau venant de l'aérophone (K)
T_2	:	Température de l'absorbeur de l'insolateur (K)
T_4	:	Température de l'isolant de l'insolateur (K)

U

UA	:	Perte thermique totale du séchoir ($W.K^{-1}$)
U_{av}	:	Coefficient de pert.es avant des insolateurs ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
U_{ar}	:	Coefficients de pertes arrière des insolateurs ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
$(UA)_{st}$:	Produit de la surface des parois de la cuve par le coefficient de pertes thermiques a travers ses parois ($W. K^{-1}$)
U_L	:	Coefficient global de pertes des insolateurs ($W.m^{-2}.K^{-1}$)

V

V_v	:	vitesse du vent ($m.s^{-1}$)
-------	---	--------------------------------

X

\bar{X}	:	Vecteur des inconnues
X_1	:	Paramètre adimensionnel défini par l'équation (97)
X_2	:	Paramètre adimensionnel défini par l'équation (105)
X'_2	:	Paramètre adimensionnel défini par l'équation (114)

Y

Y_1	:	Paramètre adimensionnel défini par l'équation (98)
Y_2	:	Paramètre adimensionnel défini par l'équation (106)
Y_{2c}	:	Valeur corrigée de Y_2
Y'_2	:	Paramètre adimensionnel défini par l'équation (115)
Y'_{2c}	:	Valeur corrigée de Y'_2

Z

Z	:	Altitude du lieu (Km)
---	---	-----------------------

LETTRES GRECQUES

ALPHA

α	:	Coefficient d'absorption de l'absorbeur
----------	---	---

DELTA

δ	:	Déclinaison du soleil (degrés)
Δt	:	Pas de temps
$\Delta t'$:	Durée effective journalière du cycle de séchages (h)
ΔT	:	Différence de température entre T_{si} et la moyenne des températures dans la cuve (K)
Δz	:	Pas d'espace

EPSILON

ε_A	:	Efficacité thermique de l'aérotherme
ε_E	:	Efficacité thermique de l'échangeur
ε_{pes}	:	Emissivité de la paroi du séchoir
ε_1	:	Emissivité de la couverture transparente de l'insolateur
ε_2	:	Emissivité de l'absorbeur de l'insolateur
ε_4	:	Emissivité de l'isolant de l'insolateur

ZÊTA

ζ	:	Taux d'accroissement du capital
ζ'	:	Taux d'intérêt effectif
ζ_A	:	Taux de variation annuelle du coût d'assurance
ζ_E	:	Taux de variation annuelle du coût de l'appoint (électricité ou fuel, ...)
ζ_F	:	Taux de variation annuelle du coût de fonctionnement
ζ_I	:	Taux d'intérêt du à l'emprunt
ζ_M	:	Taux de variation annuelle du coût de maintenance

ÊTA

η_L	:	Efficacité thermique du séchoir
η_0	:	Rendement optique instantané de l'insolateur

THÊTA

θ	:	Température de vaporisation (°C)
θ	:	Angle d'incidence du rayonnement solaire (degrés)
Θ	:	Azimut (rd)
$\bar{\theta}_h$:	Angle d'incidence du rayonnement solaire frappant un plan horizontal (rd)
$\bar{\theta}_T$:	Angle d'incidence du rayonnement solaire frappant un plan incliné (rd)

LAMBDA

λ	:	Conductivité thermique de l'air humide ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_m	:	Conductivité thermique du milieu considéré ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_{pe}	:	Conductivité thermique de la paroi externe du séchoir ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_{pi}	:	Conductivité thermique de la paroi interne du séchoir ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_{pp}	:	Conductivité thermique de l'isolant entre les parois de l'armoire du séchoir ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_0	:	Conductivité de l'air sec ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_2	:	Conductivité thermique de l'absorbeur ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_3	:	Conductivité thermique du tube de l'insolateur ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_4	:	Conductivité thermique de l'isolant arrière ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
λ_5	:	Conductivité thermique de l'isolant latéral ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

MU

μ	:	Viscosité dynamique de l'air humide ($\text{Kg.m}^{-1}\text{S}^{-1}$)
μ_{as}	:	Viscosité dynamique de l'air sec ($\text{Kg.m}^{-1}\text{S}^{-1}$)
μ_v	:	Viscosité dynamique de la vapeur d'eau ($\text{Kg.m}^{-1}\text{S}^{-1}$)

RHÔ

ρ	:	Albédo du sol
ρ	:	Coefficient de réflexion du rayonnement direct
ρ	:	Albédo du sol
ρ	:	Masse volumique de l'air humide (kg.m^{-3})
ρ_{as}	:	Masse volumique de l'air sec (kg.m^{-3})
ρ_d	:	Coefficient de réflexion du rayonnement diffus
ρ_v	:	Masse volumique de la vapeur d'eau (kg.m^{-3})

ρ_{vs} : Masse volumique de la vapeur saturée (kg.m^{-3})
 $\rho_{\lambda}(\theta)$: Réflectivité monochromatique directionnelle hémisphérique

SIGMA

σ : Constante de Stefan Boltzmann ($\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$)

TAU

τ : Période du jour (h)
 τ : Coefficient de transmission du rayonnement direct
 τ' : Coefficient de transmission du rayonnement direct
 τ_d : Coefficient de transmission du rayonnement diffus
 $(\tau\alpha)$: Rendement optique instantané de l'insolateur
 $(\tau\alpha)_b$: Transmittivité-absorptivité du rayonnement direct
 $(\tau\alpha)_d$: Transmittivité-absorptivité du rayonnement diffus

PHI

ϕ : Latitude du lieu (degrés)
 Φ : Angle de réfraction du rayonnement solaire (degrés)
 ϕ_D : Déphasage entre l'ensoleillement et la température

KHI

ϕ : Taux d'inflation

OMÉGA

ω : Angle horaire compte positivement le matin et négativement l'après-midi
(degrés)
 ϕ_s : Angle horaire du lever du soleil au-dessus de l'horizon (degrés)
 ϕ_{st} : Angle horaire du lever du soleil par rapport au plan incliné de l'insolateur
(degrés)
 Ω : Taux d'actualisation annuel constant des coûts et gains

INTRODUCTION

L'origan est originaire du bassin méditerranéen et sa cousine la marjolaine vient de plus loin : le sud-ouest de l'Asie. Maintenant, ils sont tous deux cultivés dans de nombreux pays. Symbole de bonheur et de joie, les jeunes mariés grecs en portent des couronnes tressées. La marjolaine est utilisée surtout comme parfum, désinfectant et conservateur. Des recherches récentes ont démontré ses vertus thérapeutiques et ses propriétés antiseptique, vasodilatatrice, antirhumatisme, expectorante, antalgique et calmante [1-3].

La préparation des feuilles de la marjolaine avant sa commercialisation, est artisanale. Elle nécessite principalement à réduire la vitalité des tissus, source de déhiscence, tout en conservant celle des ferments qui favorisent la formation de l'arôme – c'est la mortification – et à assurer la conservation des feuilles par le séchage.

La mortification se fait par échaudage : selon les préparateurs qui procèdent par habitude de père en fils, les feuilles sont trempées dans l'eau chaude, soit à 80°C durant cinquante secondes, soit à 63°C pendant trois minutes.

Quant au séchage, il se fait au soleil pendant une huitaine de jours ou dans un local conditionné pendant un ou deux mois, cette plante est importée de l'étranger, malgré que nous pouvons la cultiver en Algérie, on peut même exporter son arôme ou son huile essentielle.

La préparation de la marjolaine nécessite donc de l'eau chaude et de l'air chaud.

Aussi peut-on raisonnablement s'interroger sur l'intérêt qu'il y aurait à les produire en utilisant l'énergie solaire.

L'idée a été mise de construire un système constitué d'un champ d'insolateurs à eau muni d'un circuit primaire fermé et d'un circuit secondaire alimentant, via un échangeur eau/eau, une cuve principale reliée au réseau d'alimentation en eau puis une cuve secondaire équipée d'une source auxiliaire de chaleur fonctionnant aux énergies conventionnelles et destinée à satisfaire le besoin d'eau chaude, la cuve principale chauffant, grâce à un aérotherme, de l'air qui est ensuite poussé, via une source de chaleur auxiliaire conventionnelle dans l'armoire de séchage où se trouve un thermostat électronique connecté à cette source auxiliaire. A la sortie du séchoir, l'air peut être en partie rejeté dans l'atmosphère et en partie recyclé à travers l'aérotherme.

Cette idée est-elle intéressante du point de vue des dépenses énergétiques ? Trouver la réponse à cette question est l'objectif de notre travail.

D'abord, nous avons choisis un site en Algérie, le plus favorable pour le séchage de la marjolaine c'est Adrar, et nous avons modélisé le rayonnement solaire avec une simulation du gisement solaire de cette ville des plantes aromatiques et médicinales, dans le chapitre I.

Passons après au chapitre II ; à la détermination des paramètres de séchage de la plante de marjolaine , par un travail purement expérimental , et une modélisation des isothermes de sorption , pour déterminer la vitesse de séchage, le temps de séchage, le débit de l'air , la température de séchage.....etc

Dans le chapitre III, nous décrivons le système étudié et proposons un model mathématique représentatif incluant un modèle de rayonnement solaire.

Le chapitre IV concerne la méthode de résolution des équations du modèle. Il s'agit d'une méthode classique aux différences finies. Nous donnons également les valeurs des paramètres du système ou les corrélations issues de la littérature permettant de les calculer.

Le chapitre V, présente le principe d'une méthode de dimensionnement reposant sur la méthode américaine dite F-Chart mise au point pour le chauffage des habitats et sur une méthode proposé par le laboratoire de mathématiques et physiques des systèmes de l'université de Perpignan sur le dimensionnement des séchoirs polyvalents à chauffage partiellement solaire.

Dans le chapitre VI, nous donnons et commentons les résultats de nos simulations. Les performances du système sont déterminées en fonction des principaux paramètres de fonctionnement ou de construction.

Nous consacrons le septième chapitre à la présentation des abaques obtenus en visant d'une part des concepteurs supposés posséder un bon niveau de connaissances et d'autre part des utilisateurs sans formation scientifique.

Nous rappelons aussi le modèle économique choisi, que nous voulons classique, puis nous donnons les résultats de nos calculs d'optimisation visant une économie maximale d'énergie de chauffage.

Pour ne pas alourdir le texte, nous renvoyons en annexes quelques compléments d'énergétiques.

CHAPITRE I

I. Modélisation du gisement solaire

Introduction

La variation des rayonnements solaires en fonction du temps est importante et influé directement sur les besoins énergétiques pour les applications des systèmes qui fonctionnent avec cette source d'énergie. A et effet, la connaissance du gisement de site où sera implanté le système, a nous permettre de faire, suivant leur exigence énergétique, un meilleur pré-dimensionnement du champ de captation, tel que le champs photovoltaïque, ce qui va être économiquement rentable vu le prix élevé des capteurs solaires photovoltaïques, et assurer une meilleur utilisation et bon fonctionnement et surtout un meilleur rendement des systèmes qui par mis eux, le pompage, et la réfrigération photovoltaïques...etc., par ailleurs, cette étude nécessite des renseignements plus détaillés heure par heure et jour par jour sur le gisement solaire.

Le travail, dans cette partie du projet, est consacré à l'élaboration d'une méthode de calcul qui permet d'estimé le meilleur gain d'énergie reçu sur le plan récepteur, a fin d'estimer les angles optimales d'inclinaison (journalière, en moyenne mensuelle, annuelle) et les angles d'orientation instantané sur l'horizontale (angle azimutale du soleil, uniquement pour le cas de la poursuite du soleil) de la surface de capteur. Cette étude est basée sur deux configurations qui sont:

1. les panneaux solaires sont inclinés sur l'horizon et orientés en plein Sud,
2. les panneaux solaires sont instantanément sous incidence normale aux rayons solaires (c'est le cas d'une poursuite avec un Héliostat).

1. Le mouvement de la terre et le mouvement du soleil et ces coordonnées :

1.1. La variation annuelle du rayonnement direct extraterrestre I_{on} :

Le rayonnement direct I_{on} est l'éclairement reçu par un plan disposé sous incidence normale aux rayons solaires par unité de surface à la limite supérieur de l'atmosphère, est donné par [1] en watts par mètre carré (voir fig.1):

$$I_{on} = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{366.N}{365}\right) \right) [w/m^2] \quad (1)$$

N : numéro d'ordre du jour dans l'année $1 \leq N \leq 365$;

I_{sc} : constante solaire, la valeur la plus probable actuellement retenue est 1367 W/m^2 ;

$E_0 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{366.N}{365}\right)$: Facteur de correction de l'excentricité de l'orbite terrestre ;

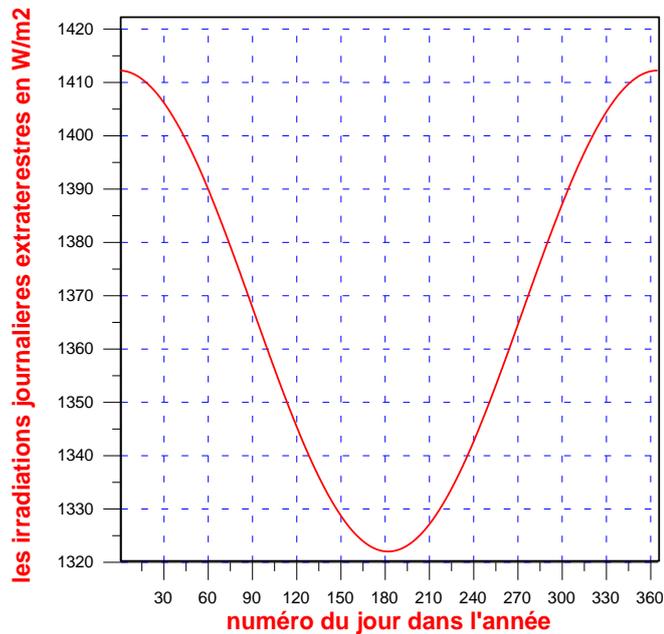


Fig. 1. La variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires (cite d'Adrar)

1.2. La déclinaison du soleil δ :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (compris entre 0° à l'équateur et $+90^\circ$ au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère Sud (compris entre 0° à l'équateur et -90° au pôle Sud), et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes $\pm 23.45^\circ$.

Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au long de l'année. Pour la pratique, une formule d'approximation est suffisante elle est donner par [1] (voir fig. 2):

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \frac{284.N}{365}\right) \text{ degré} \tag{2}$$

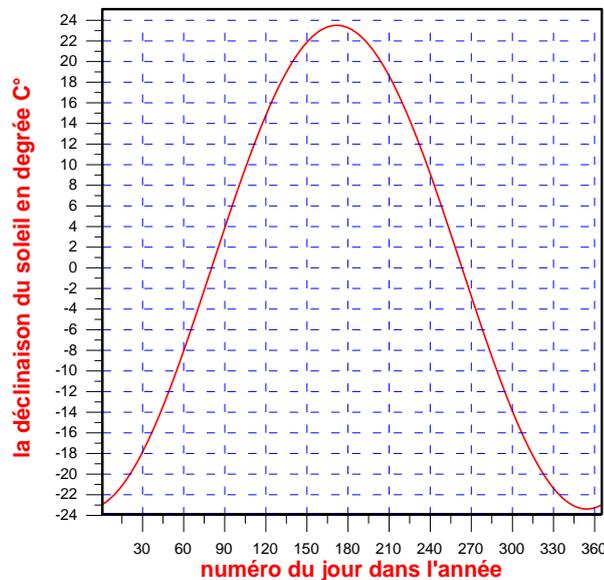


Fig.2. Schéma représente la variation annuelle de la déclinaison du soleil.

1.3. Mesure du l'heure :

Une rotation régulière de la terre sur elle-même autour de l'axe des pôles correspond à 24 heures en moyenne, et on voit ainsi qu'à chaque heure correspond à un écart angulaire en longitude de 15°, soit 4 minutes par degré de longitude, compte tenu du sens de rotation de la terre, et en effectuant du signe + les longitudes à l'Est de méridien origine, et de signe - les longitudes à l'Ouest de méridien [2]. Ainsi, le soleil passe au méridien de tous les lieux de même longitude à l'heure t_0 tel que :

$$t_0 = 12 - \frac{\lambda}{15} \text{ [heures]} \tag{3}$$

Le méridien retenu comme origine et celui de GREENWICH et le temps t_0 de ce méridien et le temps universel TU (GMT).

- Le temps solaire moyen TSM est compté à partir de midi ;
- Le temps civil moyen local TCML se compté à partir de minuit est donné par [3] :

$$TCML = TSM + 12 \text{ [heures]} \tag{4}$$

on peut exprimer ce dernier en fonction de temps universel comme suite [3] :

$$TCML = TU - \frac{24}{360}(L - L_G) \text{ [heures]} \tag{5}$$

où : $L_G = 0^\circ$ la longitude de Greenwich (prise comme origine);

L : la longitude du lieu considérée;

Où de là, on peut écrire [3,4]:

$$TCML = TU - \frac{24}{360}(L - L_{CF}) + \frac{24}{360}(L_{CF} - L_G) \text{ [heures]} \tag{6}$$

L_{CF} : la longitude du centre du fuseau horaire du lieu considéré.

- Le temps civil moyen du fuseau horaire de lieu considéré est donné par [3] :

$$TCMF = TU - \frac{24}{360}(L_{CF} - L_G) \text{ [heures]} \tag{7}$$

- le temps local TL lu sur les horloges est donné par [3] (voir fig.3):

$$TL = TCMF + n \tag{8}$$

Où n : nombre variable suivant le pays [3]

- le temps solaire vrai est compté à partir de midi est donnée par [3] :

$$TSV = TL - n - \frac{24}{360}(L - L_{CF}) - 12 + \Delta_t \text{ [heures]} \tag{9}$$

Δ_t : Equation du temps :

L'écart entre le temps solaire moyen TSM au méridien du lieu et le temps solaire vrai TSV, déterminé par la position réel du soleil, et par fois désigné par le terme équation du temps. On posera ici [2]:

$$\Delta_t = TSV - TSM \text{ [heures]} \tag{10}$$

Où Δ_t donnée en minutes et fraction décimales de minutes [2] (voir fig.4):

$$\Delta_t = 9.9\sin(2.(0.986.N + 100)) - 7.7\sin(0.986.N - 2) \text{ [heures]} \tag{11}$$

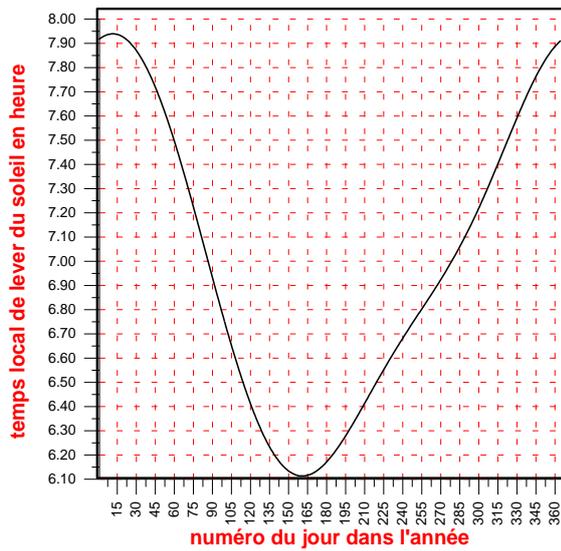


Fig Fig. 3. Le temps local de lever du soleil en fonction du numéro du jour dans l'année (cite d'Adrar)

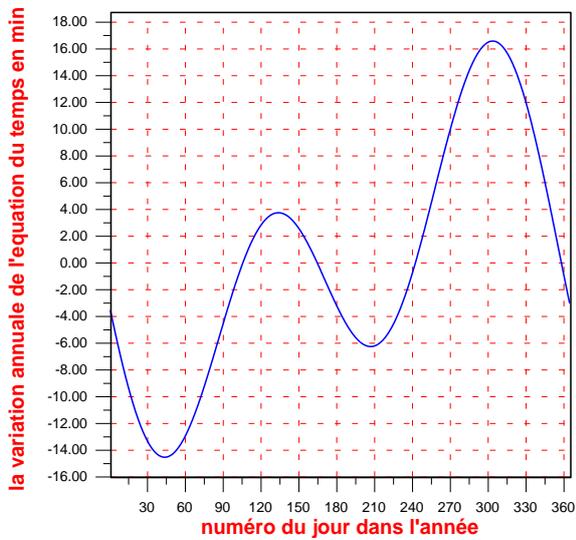


Fig. 4. Les variations annuelle de l'équation du temps en fonction du numéro du jour dans l'année (cite d'Adra)

1.4. Angle horaire du soleil ω :

C'est l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, augmente de 15° par heure, compté négativement avant midi TSV et positivement après midi-TSV, et nul à midi-TSV (voir fig. 5.9-a-b-c-d).

L'angle horaire pour un lieu de longitude λ est donné par [2]:

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \text{ [degré]} \tag{12}$$

où ω est mesuré en degrés et TSV en heures. Et comme on avait déjà, on déduit

$$\omega = 15 \left(\text{TU} + \frac{\lambda}{15} + \Delta_t - 12 \right) \text{ [degré]} \tag{13}$$

où ω et λ sont exprimés en degrés, et TU et Δ_t sont exprimés en heures.

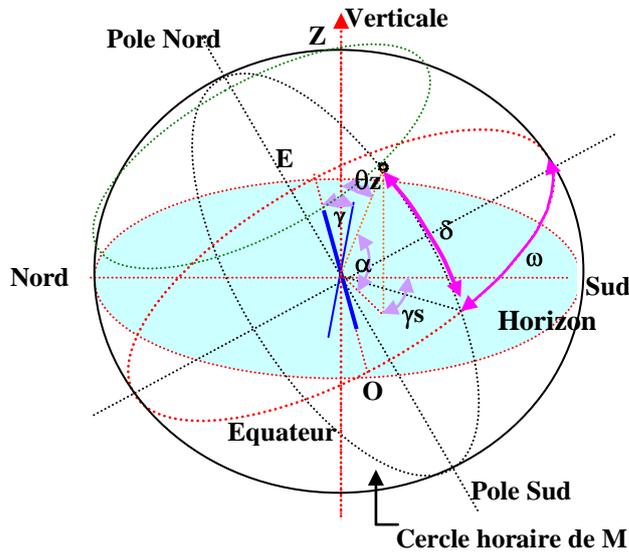


Fig. 5 Schéma représente les différents angles

1.5. Angle horaire de lever et de coucher du soleil et la durée astronomique de jour :

On déduit les heures de lever et de coucher de soleil ω_s (soleil sur l'horizon), on met la hauteur angulaire du soleil égal à zéro dans la formule (16), on trouve [1, 2,3] :

$$\cos \omega_s = - \tan \varphi \tan \delta \tag{14}$$

où ω_s est l'angle horaire du soleil à son lever, et de signe prés à son coucher ($\omega_{e\omega}$).

-La durée astronomique du jour est donnée par la formule suivante [1,2] :

$$D_j = \frac{2}{15} \arccos(- \tan \varphi \tan \delta) \text{ [heures]} \tag{15}$$

où : latitude du lieu φ , la déclinaison du soleil δ , sont exprimés en degrés.

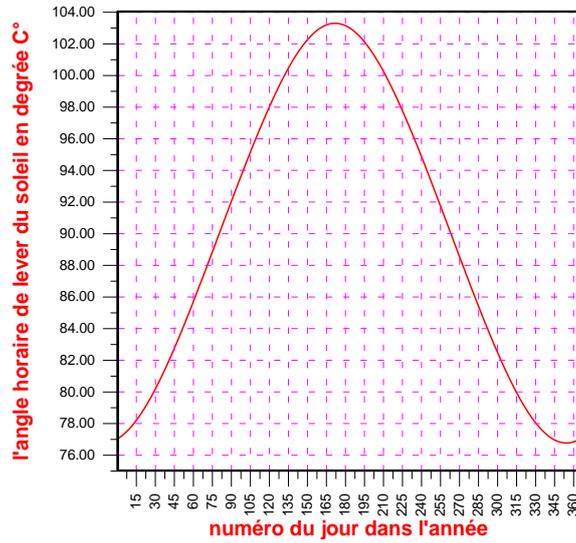


Fig.. 6. Les variations annuelles de l'angle horaires de lever du soleil (cite d'Adrar).

1.6. Mouvement apparente du soleil :

1.6.1. Hauteur angulaire du soleil : α_s

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil, durant le jour peut varié entre 0° (lever et coucher du soleil) et 90° (soleil au zénith), est donnée par la formule [4,3] (voir fig. 4. 6-a-b-c-d).

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \tag{16}$$

où : φ : latitude du lieu en degré;
 δ : déclinaison du soleil en degré ;
 ω : angle horaire du soleil en degré ;

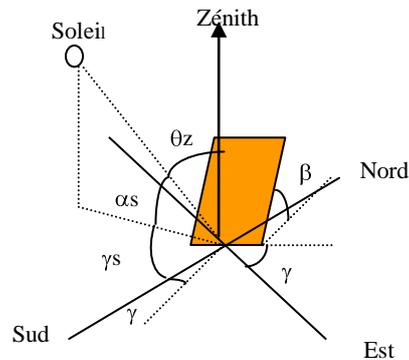


Fig. 7. Présentation des déférents angles pour une surface inclinée située sur l'horizon.

1.6.2. Azimut du soleil γ_s :

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est, l'origine 0° correspond à la direction dans l'hémisphère Nord et à la direction Nord dans l'hémisphère Sud, est donnée par la formule suivante [1] (voir fig. 5.7.9-a-b-c-d):

$$\gamma_s = C_1 C_2 \gamma'_s + C_3 \left(\frac{1 - C_1 C_2}{2} \right) 180 \text{ [degré]} \tag{17.a}$$

avec: $\sin \gamma'_s = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z}$ (17.b)

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } |\omega| \leq \omega_{e\omega} \\ -1 & \text{si } |\omega| > \omega_{e\omega} \end{cases} \tag{17.c}, \quad C_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } (\varphi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{si } (\varphi - \delta) < 0 \end{cases} \tag{17.d}, \quad C_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{si } \omega < 0 \end{cases} \tag{17.e}$$

$$\sin \omega_{e\omega} = \tan \delta / \tan \varphi \tag{17.f}$$

1.6.3. Angle d'incidence des rayonnements solaires θ :

C'est l'angle compris entre la direction des rayonnements solaires provenant de la direction (α_s, γ_s) sur une surface d'inclinaison β et d'orientation azimutale γ_s et la normale de se surface réceptrice [1,5] étant donnée par (voir fig. 7.8.9-a-b-c-d):

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \tag{18}$$

Où : β, γ sont respectivement la déclinaison et l'azimut du plan réceptif ($\gamma=0^\circ$ le plan dirigé en plein Sud, $\gamma=180^\circ$ en plein Nord).

1.6.4. Angle zénithal du soleil θ_z :

C'est l'angle compris entre la direction des rayonnements solaires incidents et la verticale au lieu, est donnée par la formule suivante [1] (voir fig. 5.7.8.9.a.b.c.d) :

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \tag{19}$$

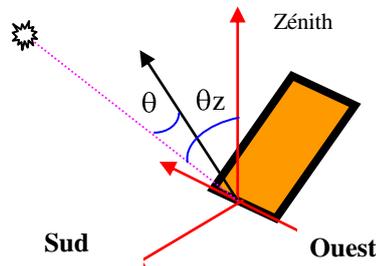


Fig. 8..Schéma présente l'angle zénith du soleil et l'angle d'incidence des rayons solaire.

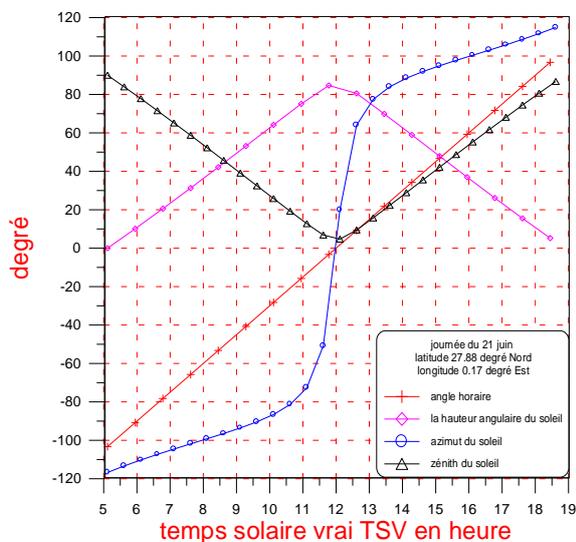


Fig. 9.a

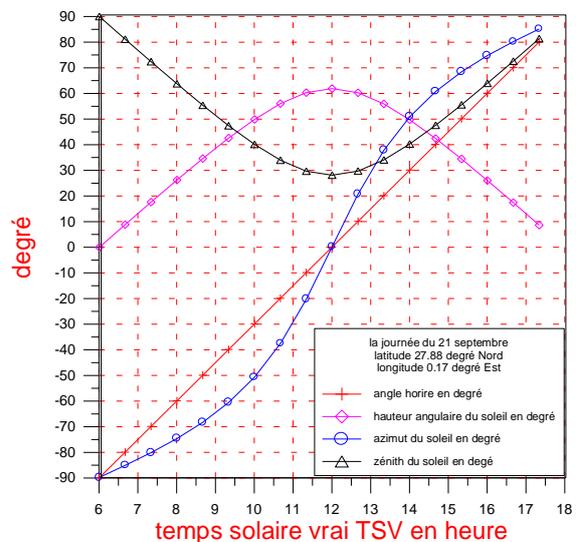


Fig. 9.b

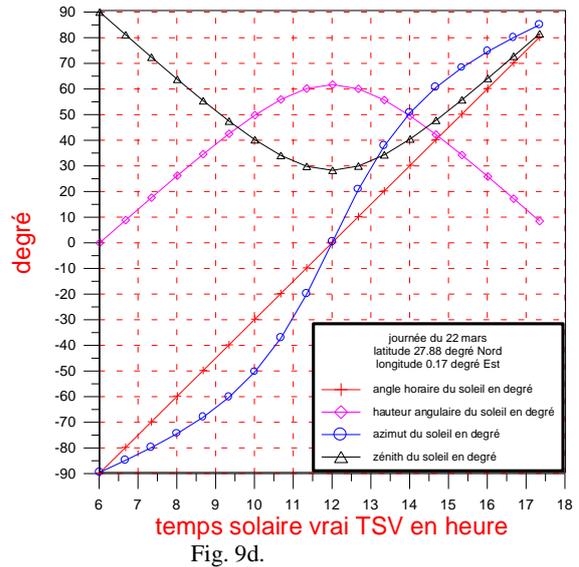
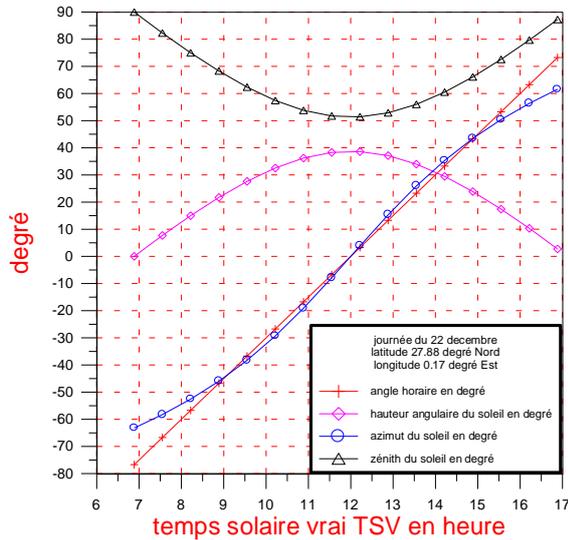


Fig. 9.a.b.c.d. Schémas présente les différents angles

2. Les irradiations extraterrestres :

2. 1. Les irradiations extraterrestre reçu sur une surface horizontale :

-Les irradiations solaires reçu sur une surface horizontale, hors atmosphère à chaque instant entre le lever et le coucher du soleil est donné par [1] (voir fig.10) :

$$I_o = I_{sc} (1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot N}{365}) \cos \theta_z \quad [Wm^{-2}] \quad (20)$$

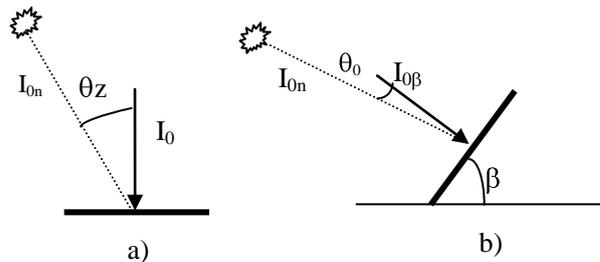


Fig.10. Les irradiations extraterrestres reçue sur une a) surface horizontale, b) surface inclinée

2.1.1. Les irradiations horaires :

Les irradiations extraterrestres reçue sur une surface horizontale pour une période d'une heure compris entre l'angle horaire ω_1, ω_2 tel que $\omega_2 > \omega_1$ est donnée par [1] (voir fig.11):

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot N}{365} \right) \left(\cos \varphi \cos \delta \sin(\omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) [Jm^{-2}] \quad (21)$$

Où sous une autre forme [5](voir fig.11) :

$$I_0 = I_{sc} \cdot E_0 \cos \delta \cos \varphi (\cos \omega_i - \cos \omega_s) [Kj \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}] \quad (22)$$

avec ω_s : l'angle horaire au coucher du soleil ;

ω_i : angle horaire au milieu d'heure ;

E_0 : facteur de correction de l'excentricité de l'orbite terrestre

où sous une autre forme pour une période d'une heure entre les temps t_1 et t_2 (t_1 et t_2 en heures) est donnée par [5] :

$$I_0|_{t_1}^{t_2} = I_{sc} \cdot E_0 \left[\sin \delta \sin \varphi (t_2 - t_1) + (12 / \pi) \cos \delta \cos \varphi (\sin(15 t_1) - \sin(15 t_2)) \right] \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (23)$$

2.1.2. Les irradiances solaires extraterrestres horaires en moyenne mensuelle \bar{I}_0 :

On peut exprimer Les irradiances solaires extraterrestres horaires en moyenne mensuelle \bar{I}_0 avec les deux manières suivantes :

a). en fonction des irradiances horaires est donnée par [5] (voir fig.11):

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} I_0 \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (24)$$

où n_1 et n_2 sont respectivement le début et la fin de mois considéré.

b).en fonction de la journée type du mois considéré qui est caractérisé par un angle de déclinaison caractéristique [5] (voir le tableau. 1, Fig.11)

$$\bar{I}_0 = I_0|_{\delta=\delta_c} \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (25)$$

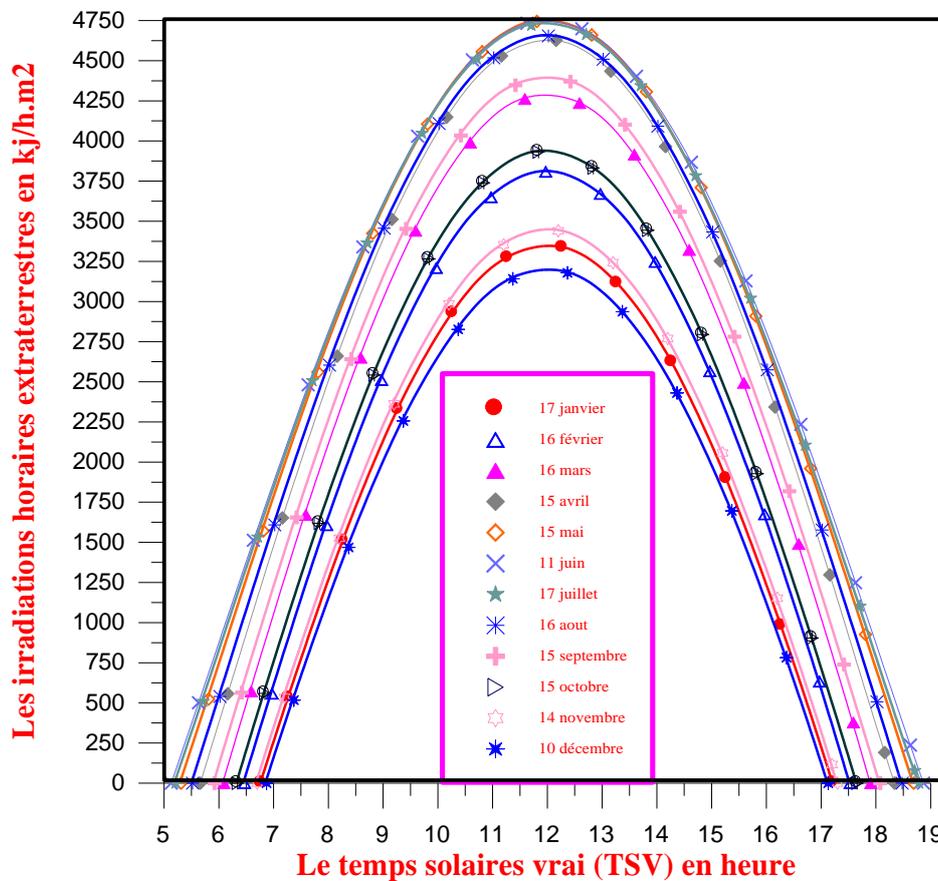


Fig. 11.La variation des irradiances horaires extraterrestres reçue sur un plan horizontal (cite d'Adrar)

Tableau. 1. Choix du jour du mois représentant le « jour type » [1,3].

Mois	Numéro du jour dans le mois	Numéro du jour dans l'année	La déclinaison en degrés (δ_c)
Janvier	17	17	-20.91
Février	16	47	-12.95
Mars	16	75	-2.417
Avril	15	105	9.414
Mai	15	135	18.791
Juin	11	162	23.387
Juillet	17	198	22.107
Août	16	228	13.454
Septembre	15	258	2.216
Octobre	15	288	-9.599
Novembre	14	318	-18.911
Décembre	10	344	-23.049

2.1.3. Les irradiations solaires extraterrestres journalières H_0 :

Les irradiations extraterrestres journalières reçue sur une surface horizontale est donnée par [1] (voir fig. 12):

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot N}{365} \right) \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad [Jm^2] \quad (26)$$

Où ω_s : l'angle horaire de coucher du soleil en degré.

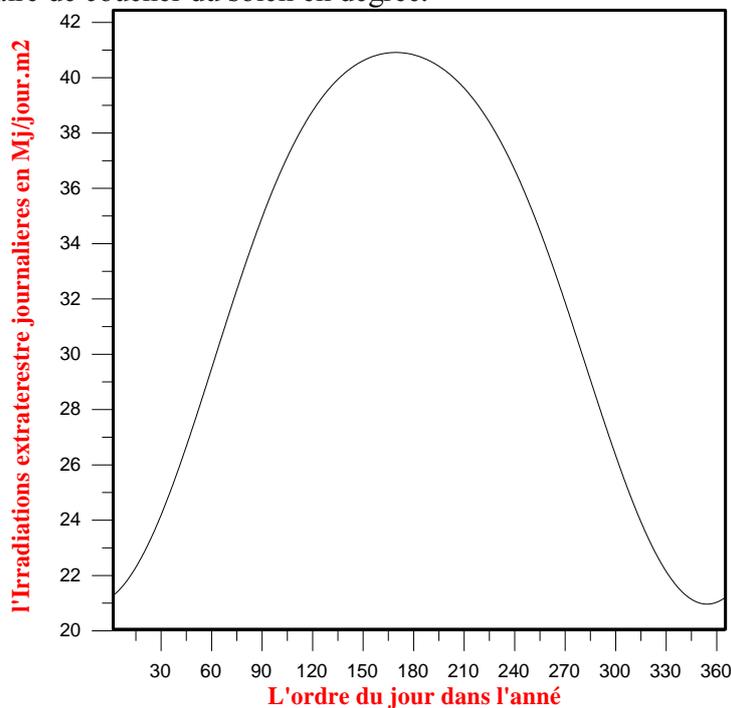


Fig. 12. La variation annuelle des irradiations journalières extraterrestres reçue sur un plan horizontal (cite d'Adrar).

Elle peut être aussi écrite sous une autre manière [5] :

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \left[\frac{\pi \omega_s}{180} \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s \right] [Mj.m^2.jour^{-1}] \quad (27)$$

2.1.4. Les irradiations solaires extraterrestres journalières en moyenne mensuelle \bar{H}_0 reçue sur une surface horizontale :

-Les irradiations extraterrestres journalières en moyenne mensuelle reçue sur une surface horizontale sont exprimés mathématiquement par l'expression suivante [5] (voir fig.13):

$$\bar{H}_0 = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} H_0 \text{ [Mj.m}^{-2}\text{.jour}^{-1}] \tag{28}$$

Où en peut aussi dans ce cas; introduire la notation de journée type [1, 5] (voir fig.13):

$$\bar{H}_0 = H_0 \Big|_{\delta=\delta_c} = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \cos \varphi \cos \delta_c \int_0^{\omega_s} \sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s \text{ [Mj.m}^{-2}\text{.jour}^{-1}] \tag{29}$$

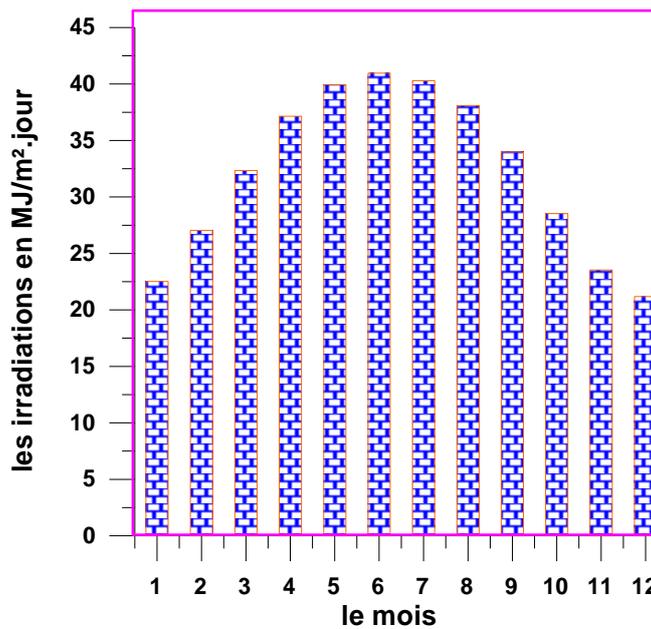


Fig. 13. La variation annuelle des irradiations journalières extraterrestres en moyenne mensuelle reçue sur un plan horizontal (cite d'Adrar)

2.2. Les irradiations solaires extraterrestres reçue sur une surface inclinée :

2.2.1. Angle d'incidence des rayons solaires et l'angle du lever du soleil :

2.2.1. a. Plan orienté vers l'équateur :

Considérons deux surfaces situées aux latitudes φ et $\varphi-\beta$. La première est inclinée d'un angle β , la deuxième, quand à elle, est horizontale. Selon Liu et Jordan, les deux surfaces sont parallèles. Cela veut dire qu'à la latitude, l'angle d'incidence θ_0 est identique à θ_z à la latitude $\varphi-\beta$. Donc on aura [5,6]:

$$\cos \theta_0 = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \tag{30}$$

L'angle horaire de lever du soleil sur la surface inclinée est donné par [5] :

$$\omega'_s = \arccos(-\text{tg} \delta \text{tg}(\varphi - \beta)) \tag{31}$$

d'après [5], en généralement on écrit :

$$\omega'_s = \min \left[\arccos(-\text{tg} \delta \text{tg} \varphi), \arccos(-\text{tg} \delta \text{tg}(\varphi - \beta)) \right] \quad (32)$$

2.2.1. b. Plan d'orientation arbitraire :

L'équation de l'angle d'incidence des rayons solaires pour le cas d'un plan orienté arbitrairement étant donné par (l'éq). L'angle horaire de lever et de coucher du soleil sur ce plan étant donné par [5,1] :

1^{er} cas : plan orienté vers l'Est ($\gamma > 0$) :

$$\omega_{sr} = \min \left[\omega_s, \cos^{-1} \left(\frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (33.a)$$

$$\omega_{ss} = -\min \left[\omega_s, \cos^{-1} \left(\frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (33.b)$$

2^{eme} cas : plan orienté vers l'Est ($\gamma < 0$)

$$\omega_{ss} = \min \left[\omega_s, \cos^{-1} \left(\frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (33.c)$$

$$\omega_{sr} = -\min \left[\omega_s, \cos^{-1} \left(\frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (33.d)$$

$$x = \frac{\cos \varphi}{\sin \gamma \tan \beta} + \frac{\sin \varphi}{\tan \gamma} \quad (33.e)$$

$$y = \tan \delta \left(\frac{\sin \varphi}{\sin \gamma \tan \beta} - \frac{\cos \varphi}{\tan \gamma} \right) \quad (33.f)$$

ω_{sr} : angle horaire du lever du soleil en degré

ω_{ss} : angle horaire de coucher du soleil en degré

2.2.2. Les irradiations solaires extraterrestres reçue sur une surface inclinée et orientée vers l'équateur :

2.2.2.a. Les irradiations horaires $I_{0\beta}$:

L'équation des radiations horaires extraterrestres instantanée reçue sur une surface inclinée d'un angle β et orientée vers l'équateur étant donné par [5]:

$$I_{0\beta} = I_{sc} \cdot E_0 \cos \theta_0 \quad [w/m^2] \quad (34)$$

Les irradiations horaires reçues sur une surface inclinée et orientée vers l'équateur pour une période d'une heure compris entre les angles horaires ω_1 et ω_2 est exprimée par [5]:

$$dI_{0\beta} = I_{sc} \cdot E_0 \cos \theta_0 \cdot dt \quad (35)$$

$$\text{où } dt = \frac{24}{2\pi} d\omega \quad [\text{heure}] \quad (36)$$

En remplace la valeur de dt donnée par l'éq (37) dans l'éq (36) et, on intègre cette dernière entre une période d'une heure compris entre les l'angles horaires ω_1 et ω_2

$$I_{0\beta} = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_0 \int_{\omega_i - \pi/24}^{\omega_i + \pi/24} I_{0\beta} = I_{sc} \cdot E_0 \left[\sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega_i \right] d\omega \quad (37)$$

Après l'intégration de l'équation (38) on obtient finalement l'équation des irradiances horaires en fonction de l'angle horaire à mi-heure et étant donné par l'équation suivante (voir fig.14a-b):

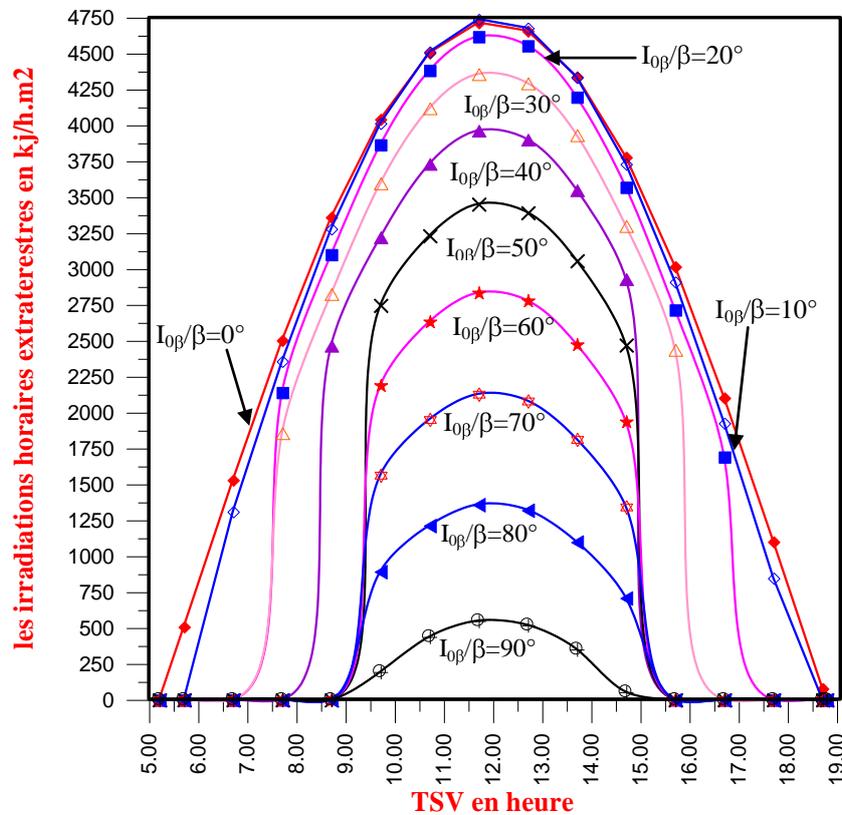


Fig. 14a. La variation des irradiances horaires extraterrestre reçue sur une surface orientée vers l'équateur pour différente inclinaison du plan du la journée 17 juillet (cite d'Adrar)

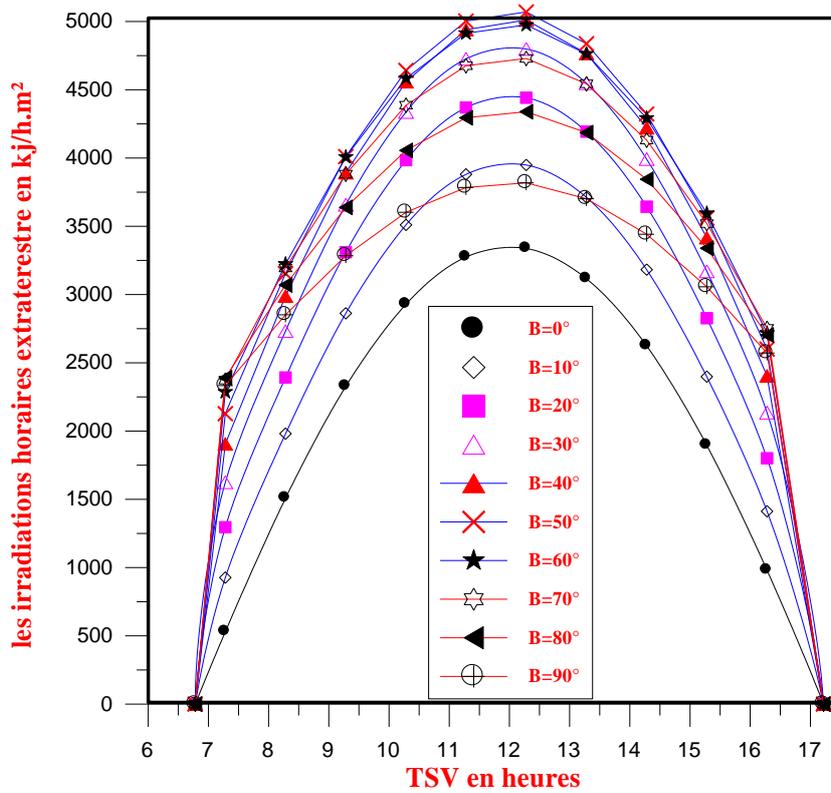


Fig. 14b. La variation des irradiations horaires extraterrestre reçue sur une surface orientée vers l'équateur pour différente inclinaison du plan du la journée 17janvier (cite d'Adrar)

$$I_{0\beta} = I_{sc} \cdot E_0 \left[\sin \delta \sin(\varphi - \beta) + 0.9972 \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega_i \right] \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (38, a)$$

où :

$$I_{0\beta} = I_{sc} \cdot E_0 \left[\sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega_i \right] \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (38,b)$$

ω_i : angle horaire au milieu de l'heure considéré ;

De même, en peut exprimé cette dernière équation entre les temps t_1 et t_2 comme suite [5](voir fig.14a-b):

$$I_{0\beta} \Big|_{t_1}^{t_2} = I_{sc} E_0 \left\{ \sin \delta \sin(\varphi - \beta)(t_2 - t_1) + \frac{12}{\pi} \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \left[\sin(15 \cdot t_1) - \sin(15 \cdot t_2) \right] \right\} \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (39)$$

où t_1 et t_2 sont exprimé en heures .

L'irradiation horaire en moyenne mensuelle est exprimée par [5]:

$$\bar{I}_{0\beta} = I_{0\beta} \Big|_{\delta=\delta_c} \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (40)$$

où :

$$\bar{I}_{0\beta} = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n_1}^{n_2} I_{0\beta} \quad [Kj.m^{-2}.h^{-1}] \quad (41)$$

En tant que la journée du 17 juillet représente la journée typique de ce mois,(voir tableau.1) alors, la figure (13) elle-même représente la variations des irradiations horaires extraterrestres en moyenne mensuelle

2.2.2.b. Les irradiations journalières :

Les irradiations journalières reçue sur une surface inclinée et orientée vers l'équateur pour un période d'une heure compris entre les angles horaires ω_1 et ω_2 est exprimé par [5] (voir fig.15):

$$H_{0\beta} = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \left[\frac{\pi}{180} \omega'_s \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \sin \omega'_s \right] \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \quad (42)$$

avec : $\omega'_s = \min \left[\omega_s, \cos^{-1} \left| \tan \delta \tan(\varphi - \beta) \right| \right]$ (43)

ω_s, ω'_s , en degrés

Les irradiations journalières en moyenne mensuelle reçue sur une surface inclinée d'un angle β et, orientée vers l'équateur en fonction de l'angle d'inclinaison caractéristique (voir tableau.1)est exprimée comme suite [5](voir fig.16):

$$\bar{H}_{0\beta} = H_{0\beta} \Big|_{\delta=\delta_c} \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \quad (44)$$

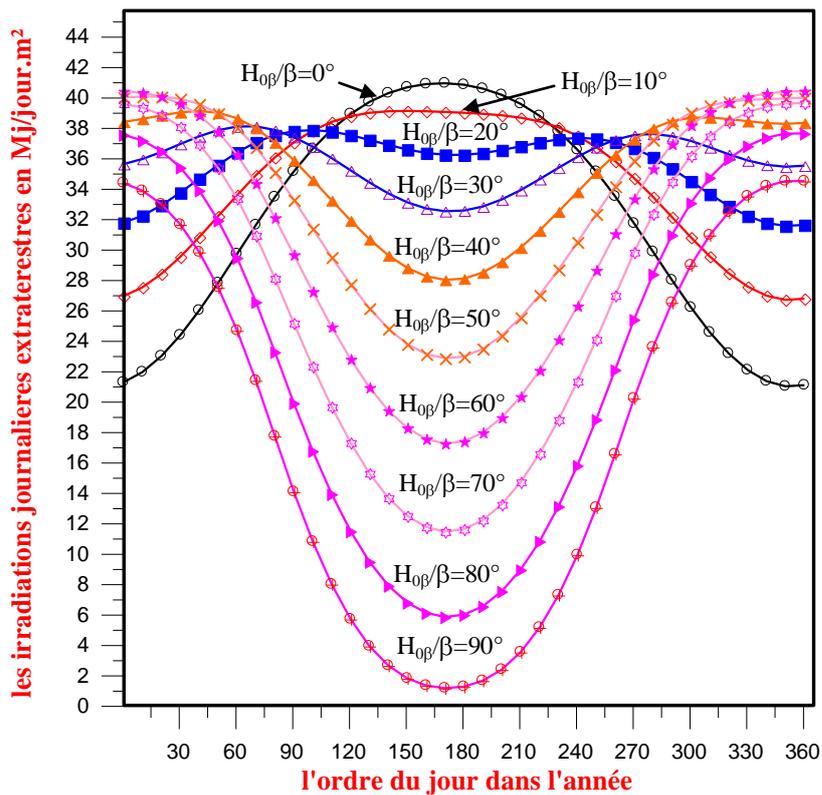


fig. 15. La variation annuelle des irradiations journalières extraterrestres pour différente inclinaison du plan (cite d'Adrar)

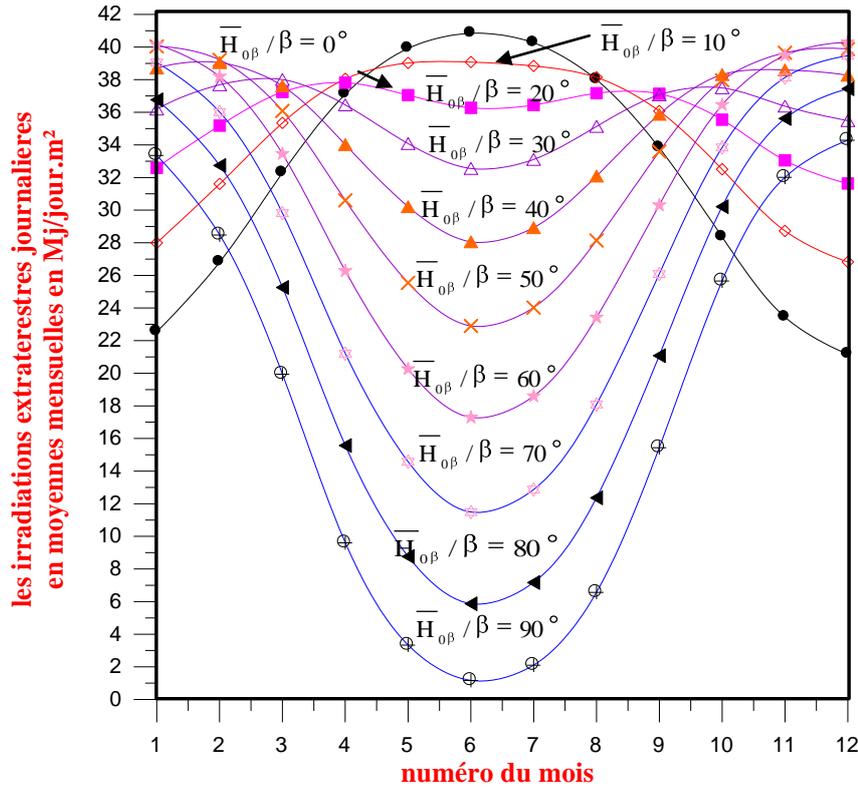


Fig. 16. La variation annuelle des irradiations journalières extraterrestres en moyenne mensuelle pour différente inclinaison du plan (cite d'Adrar)

2.2.3. Les irradiations solaires extraterrestres reçues sur une surface inclinée et d'orientation arbitraire :

2.2.3.a. Les irradiations horaires :

On peut exprimer les irradiations extraterrestres reçue sur une surface inclinée d'un angle β et d'azimut γ à chaque instant de façon suivante [5]:

$$I_{0\beta\gamma} = I_{sc} \cdot E_0 \cos \theta \text{ [Wj.m}^{-2}\text{]} \tag{45}$$

où $\cos\theta$ est donnée par la l'éq (18) ;

Les irradiations horaires extraterrestres reçue sur cette surface pendant une période d'une heure compris entre l'angle horaire ω_1 et ω_2 , étant donnée par [5] (voir Fig.17):

$$I_{0\beta\gamma} = I_{sc} E_0 \left(\begin{aligned} &(\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta + (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega_i \\ &+ \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega_i \end{aligned} \right) \text{ [Kj.m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{]} \tag{46}$$

Les irradiations journalières en moyenne mensuelle reçue sur cette surface étant donnée en fonction de l'angle d'inclinaison caractéristique [5] :

$$\bar{I}_{0\beta\gamma} = I_{0\beta} \Big|_{\delta=\delta_c} \text{ [Kj.m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{]} \tag{47}$$

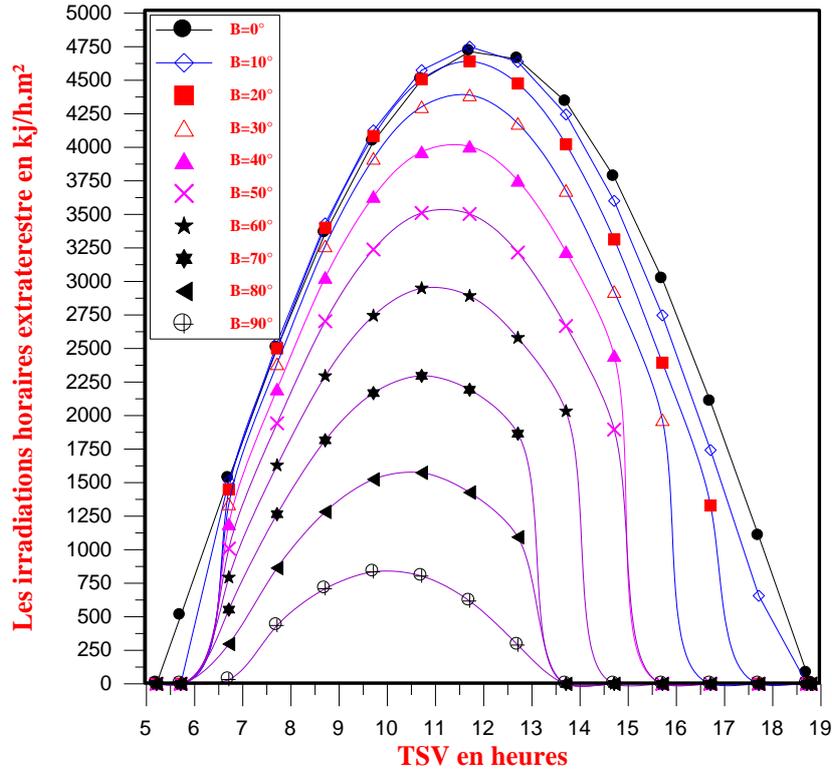


Fig. 17. La variation des irradiances horaires extraterrestre reçue sur une surface orientée vers l'Est ($\gamma=15^\circ$) avec différentes inclinaisons du plan de la journée 17 juillet (cite d'Adrar)

2.2.3.b. Les irradiances journalières :

-Les irradiances journalières reçue sur cette surface est exprimée par [5](voir Fig18):

$$H_{0\beta\gamma} = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_0 (\cos \beta \sin \delta \sin \varphi \left| \omega_{ss} - \omega_{sr} \right| \frac{\pi}{180} - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma \left| \omega_{ss} - \omega_{sr} \right| \frac{\pi}{180} + \cos \varphi \cos \delta \cos \beta \left| \sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr} \right| + \cos \delta \cos \gamma \sin \varphi \sin \beta \left| \sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr} \right| + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \left| \cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr} \right|) \quad [Mj.m^{-2}Jour^{-1}] \quad (48)$$

ω_{ss} et ω_{sr} sont respectivement les angles horaire de coucher et de lever du soleil et sont exprimé en radians et données par le paragraphe 2.2.1.b,

-Les irradiances journalières extraterrestres en moyenne mensuelle sur cette surface sont exprimées en fonction de l'angle de déclinaison solaire δ_c [5]

$$\bar{H}_{0\beta\gamma} = H_{0\beta\gamma} \Big|_{\delta=\delta_c} \quad [Mj.m^{-2}Jour^{-1}] \quad (49)$$

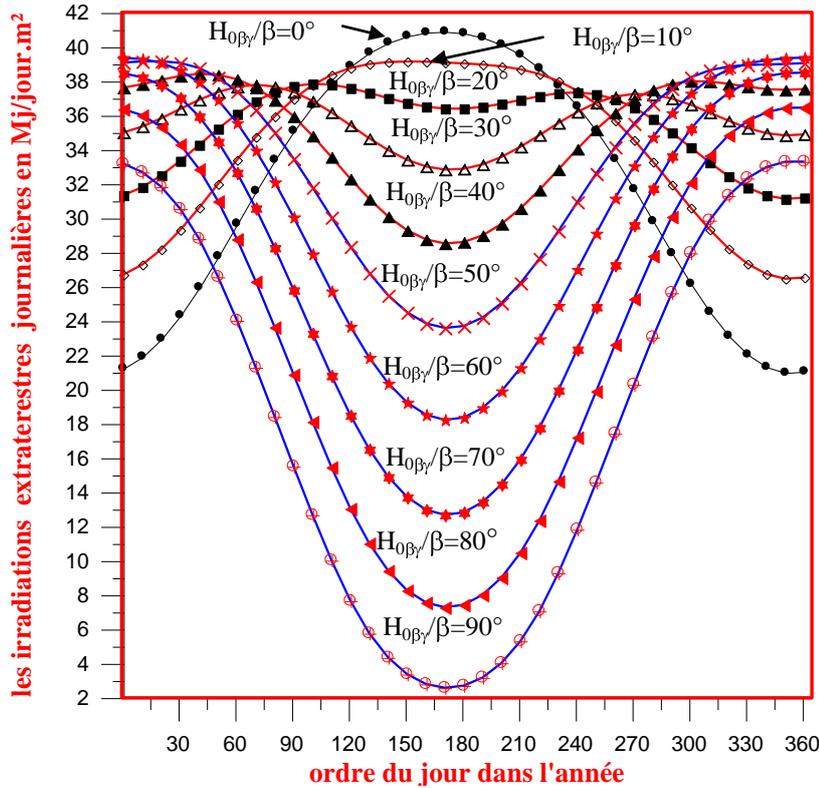


Fig. 18. La variation annuelle des irradiations journalières extraterrestres pour différentes inclinaisons d'un plan d'orientation 15° vers l'Est (cite d'Adrar)

2.2.4. Les irradiations solaires extraterrestres reçues sur une surface normale aux rayons solaires (cas d'un héliostat):

2.2.4.a. Les irradiations horaires I_{0P} :

Dans ce cas, les irradiations horaires extraterrestres reçue sur une surface normale aux rayons solaires à chaque instant est constant pendant tout la journée et, on peut l'exprimée de la façon suivante :

$$I_{0P} = I_{sc} \cdot E_0 \text{ [Kj.m}^2\text{h}^{-1}] \tag{50}$$

2.2.4.b. Les irradiations journalières H_{0P} :

Les irradiations journalières extraterrestres reçues sur une surface normale aux rayons solaires peut être exprimé de la façon suivante (voir fig.19):

$$H_{0P} = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \int_0^{\omega_s} \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \, d\omega \tag{51}$$

d'où :

$$H_{0P} = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \cdot \omega_s \tag{52}$$

où ω_s l'angle horaire de coucher du soleil en radian

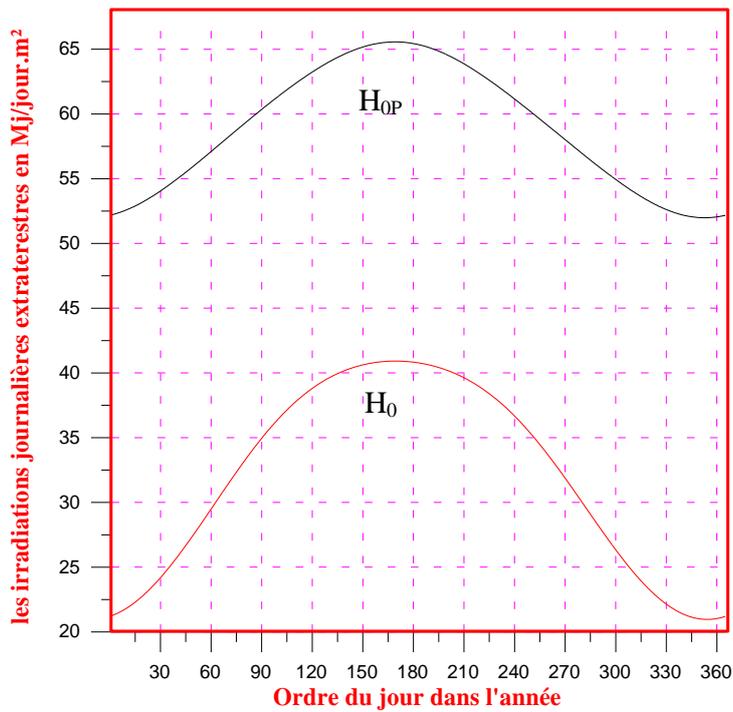


Fig. 19. La variation annuelle des irradiances extraterrestres journalières reçue sur une surface normale aux rayons solaires et une surface horizontale (cite d'Adrar).

2.3. Calcul des rapports des irradiances solaires \dot{r}_b, r_b, R_b et \bar{R}_b :

2.3.1. Rapports des irradiances solaires \dot{r}_b, r_b, R_b et \bar{R}_b dans le cas d'une surface orientée vers l'équateur :

2.3.1. a. Rapport des irradiances \dot{r}_b :

C'est le rapport des irradiances extraterrestres incident reçu sur une surface inclinée aux irradiances extraterrestres reçue sur une surface horizontale comme montre la figure (**), à chaque instant est exprimé par [5] (voir Fig.20-21):

$$\dot{r}_b = \frac{I_0 \beta}{I_0} \tag{53}$$

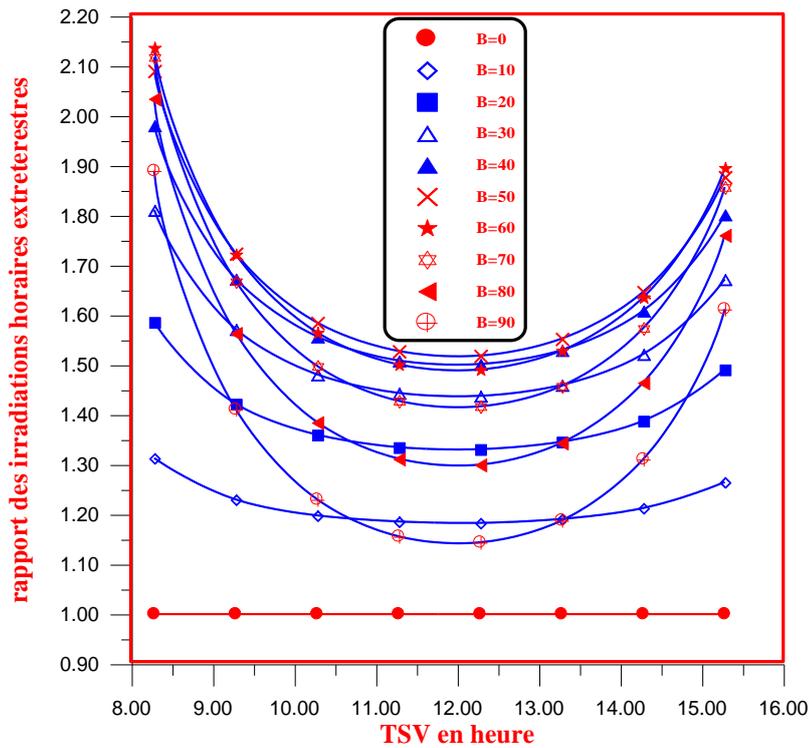


Fig.20. Rapport des irradiances horaires extraterrestres de la journée 17 janvier pour le cas d'une surface orientée vers l'équateur (cite d'Adrar)

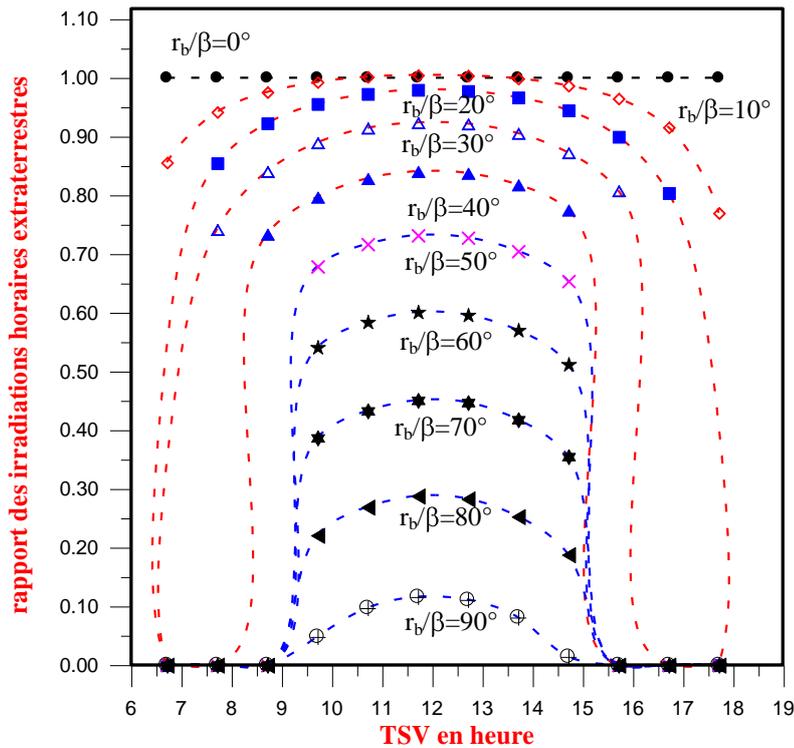


Fig.21. Rapport des irradiances horaires extraterrestres de la journée 17 janvier pour le cas d'une surface orientée vers l'équateur (Cite d'Adrar)

2.3.1. b. Rapport des irradiances horaires r_b :

C'est le rapport des irradiances horaires extraterrestres incident reçu sur une surface inclinée aux irradiances horaires extraterrestres reçue sur une surface horizontale comme montre la figure (**), pendant une période d'une heure est exprimé par [5]:

$$r_b = \frac{I_{0\beta}}{I_0} \approx \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_z} \tag{54}$$

Rappelons que les valeurs de θ_0 et θ_z sont calculées au milieu d'heure considéré

2.3.1.c. Rapport des irradiances horaire \bar{r}_b en moyenne mensuel :

C'est le rapport des irradiances horaires extraterrestres en moyenne mensuelle incident reçu sur une surface inclinée aux irradiances horaire extraterrestre en moyenne mensuel reçue sur une surface horizontale, en fonction de l'angle de déclinaison caractéristique, est exprimé par [5]:

$$\bar{r}_b = \frac{\bar{I}_{0\beta}}{\bar{I}_0} = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_z} \Big|_{\delta=\delta_c} \tag{55}$$

2.3.1.d. Rapport des irradiances journalières R_b :

Le rapport des irradiances journalières extraterrestres reçu sur une surface inclinée aux irradiances journalières extraterrestres reçue sur une surface horizontale, étant donnée par [5] :

$$R_b = \frac{H_{0\beta}}{H_0} = \frac{\frac{\pi}{181} \omega'_s \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \sin \omega'_s}{\frac{\pi}{180} \omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s} \tag{56}$$

2.3.1.e. Rapport des irradiances journalières \bar{R}_b en moyenne mensuel:

C'est le rapport des irradiances journalières extraterrestres en moyenne mensuelle incident reçu sur une surface inclinée aux irradiances journalières extraterrestres en moyenne mensuelle reçue sur une surface horizontale, en fonction de l'angle de d'inclinaison caractéristique, est exprimé par [5]:

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_{0\beta}}{\bar{H}_0} \Big|_{\delta=\delta_c} \quad [Mj.m^{-2}Jour^{-1}] \tag{57}$$

2.3.2. Rapports des irradiances solaires r_b, R_b et \bar{R}_b dans le cas d'une surface orientée arbitraire :

2.3.2. a. Rapport des irradiances horaires r_b :

C'est le rapport des irradiances horaires extraterrestres incident reçu sur une surface inclinée et d'orientation arbitraire aux irradiances horaires extraterrestres reçue sur une surface horizontale, est exprimé par [5]:

$$r_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \tag{58}$$

θ et θ_z sont évalués au milieu d'heure considéré

2.3.2.3. Rapport des irradiations journalières R_b :

C'est le rapport des irradiations journalières extraterrestres reçu sur une surface inclinée d'orientation arbitraire aux irradiations journalières extraterrestres reçue sur une surface horizontale, étant donnée par [5] (voir Fig.22):

$$R_b = \frac{H_{0\beta\gamma}}{H_0} \tag{59}$$

$$R_b = \left\{ \begin{aligned} &\cos \beta \sin \delta \sin \varphi \left| \omega_{ss} - \omega_{sr} \right| \frac{\pi}{180} - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma \left| \omega_{ss} - \omega_{sr} \right| \frac{\pi}{180} + \cos \varphi \cos \delta \cos \beta \left| \sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr} \right| \\ &+ \cos \delta \cos \gamma \sin \varphi \sin \beta \left| \sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr} \right| + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \left| \cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr} \right| \end{aligned} \right\} \times \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta \right] \tag{60}$$

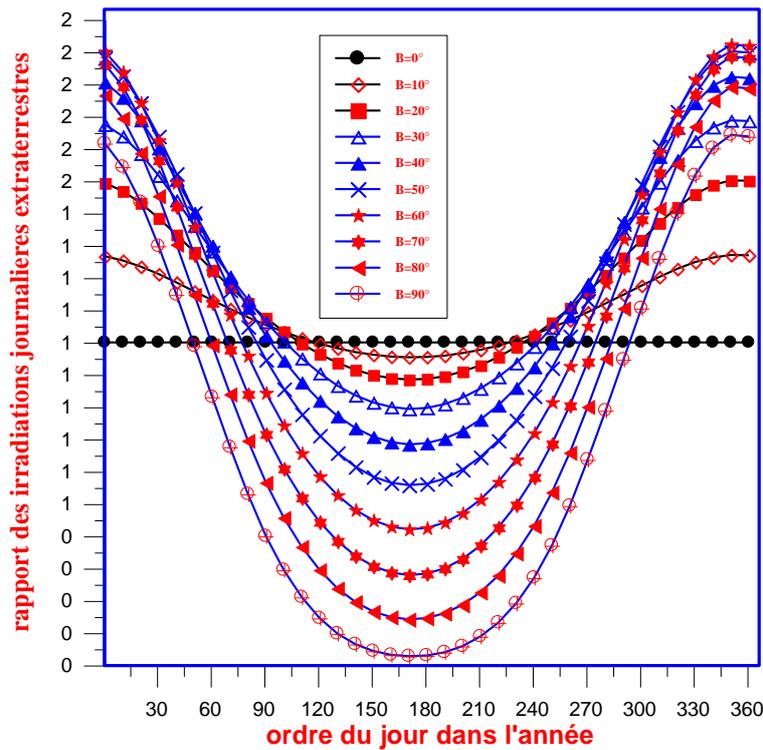


Fig.22. Rapport des irradiations journalières pour le cas d'une surface orientée vers l'équateur (Cite d'Adrar)

2.4. La variation annuelle des irradiations journalières optimales en fonction de l'angle d'inclinaison du plan optimal :

On fait la dérivée de l'équation des irradiations extraterrestres journalières par rapport à l'angle d'inclinaison du plan égal à zéro et par la suite on tire l'angle d'inclinaison qui représente l'angle optimal β_{opt} et on remplace cette dernière dans l'équation des irradiations journalières (voir Fig.23)

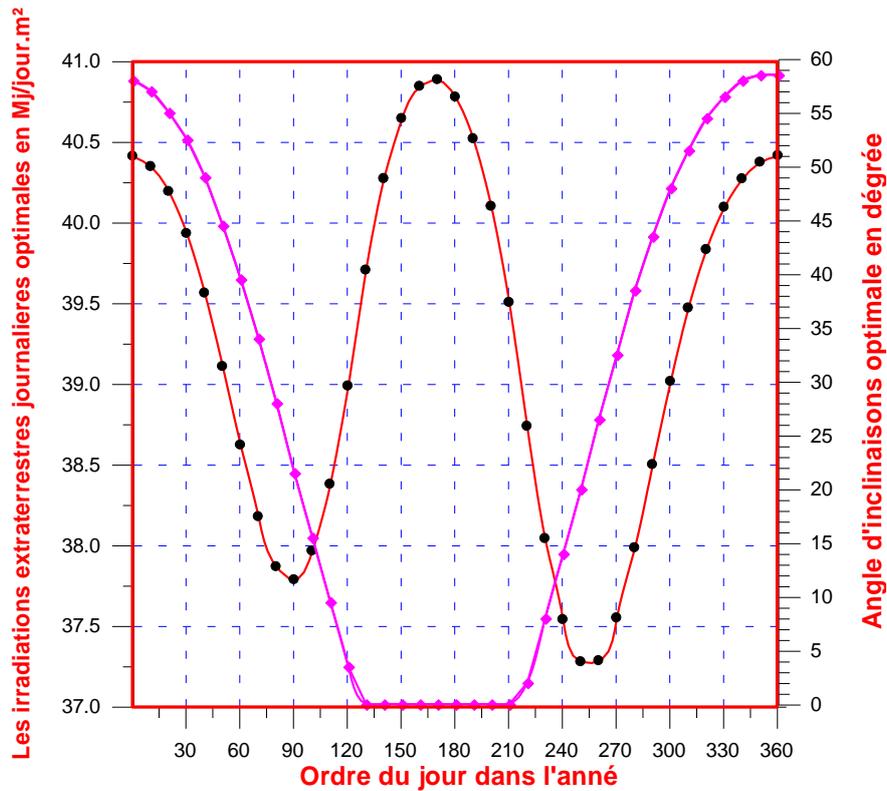


Fig. 23. Schéma représente les variations annuelles optimales des irradiations extraterrestres journalières et l'angle d'inclinaison du plan pour le cas d'un plan orienté vers l'équateur (cite d'Adrar)

3. estimation des irradiations solaires en présence de l'atmosphère :

L'atténuation de l'éclairement direct par les nuages dépend du type de nuage, leur épaisseur et le nombre des couches, une détermination théorique de l'éclairement direct et diffus est tout à fait difficile, une telle tâche nécessite des données sur le type et les propriétés optiques des nuages , la quantité ,l'épaisseur, la position , et nombre des couches des nuages, de telles données sont rarement collectées, toutefois, l'ensoleillement et la fraction de ciel couvert par des nuages sont largement disponibles pour la plus part des utilisateurs, une approche commune est destiner à la composante diffus a partir de l'éclairement global mesuré où estimé, les deux principaux objectifs de présenter les méthodes simples de prédiction du global les méthodes d'estimation du diffus à partir du global

3.1.. Corrélation des données des irradiations globales journalières avec les heures d'ensoleillement :

D'après la relation proposer par Prescott [5], présenter ci-dessous (éq.61), et le manque d'une bonne définition d'une parfaite journée claire et l'évaluation des deux coefficients a et b, a poussé les chercheurs a se baser sur l'irradiation extraterrestres, qui est facilement calculé.

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a + b \frac{\bar{n}}{N_d} \tag{61}$$

Reitveld a examiné plusieurs valeurs de a et b et proposera la relation suivante [5]:

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = 0.18 + 0.62 \frac{\bar{n}}{N_d} \quad (62)$$

le rapport $\frac{\bar{n}}{N_d}$ présente la fraction d'ensoleillement,

où N_d : représente la journée moyenne du mois en heures est exprimées par la relation suivante [5]:

$$N_d = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \text{ [heures]} \quad (63)$$

3.2. Estimation des irradiances globales horaires en moyenne mensuelle sur une surface horizontale :

Liu et Jordan est effectuée des moyennes mensuelles et après avoir constaté que statiquement, les irradiances journalières sont symétriques par rapport au midi solaire, ils ont présenté les résultats de leurs travaux sous forme des abaques que différents auteurs ont ensuite décrites à l'aide d'équations obtenues par lissage. Whiller a développé une relation entre les irradiances directes horaires et les irradiances directes journalières qui peuvent être exprimé comme suite [5] :

$$\frac{\bar{I}_b}{H_b} = \frac{\bar{I}_0}{H_0} = \frac{\pi}{24} \frac{\sin \frac{\pi}{24} \cos \omega_i - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s} \quad (64)$$

Le sol

Collares-Pereira et Rabl ont développé une relation (sous forme d'un rapport, r_t) entre les irradiances horaires en moyenne mensuelle et les irradiances journalière en moyenne mensuelle qui peut être exprimé comme suite [5] :

$$r_t = \frac{\bar{I}}{H} = \left(\frac{\bar{I}_0}{H_0} \right) a + b \cos \omega_i \quad (65)$$

avec :

$$a = 0.409 + 0.5015 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

D'après Liu et Jordan [1], pour une journée quelconque du mois, r_t est identique au rapport $\frac{\bar{I}}{H}, \frac{I}{H}$. Dans ce cas, r_t peut aussi être calculé à l'aide de l'équation (64) telle que la quantité $\frac{24}{\pi} \sin \frac{\pi}{24} \approx 1$ où ω_s représente l'angle horaire du lever du soleil au-dessus de l'horizon pour le jour considéré. De plus, en garde la même approche ($\frac{24}{\pi} \sin \frac{\pi}{24} \approx 1$), l'équation (54) est proportionnel au rapport \bar{I}_d/\bar{H}_d , et aussi proportionnel au irradiation diffus horaire au irradiation diffus journalière (I_d/H_d) d'une journée quelconque du mois.

D'une manière général, en résumé cette estimation par les deux équations suivantes [1] :

$$r_d = \frac{\bar{I}_d}{H_d} \cong \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega_i - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s} \quad (66)$$

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega_i - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s} \quad (67)$$

3.3. Estimation des irradiances horaires et journalière global sur une surface horizontale :

Liu et Jordan, ont caractériser le climat par un rapport qui représente les irradiances globales en présence de l’atmosphère au les irradiances extraterrestres globales; sur une surface horizontale, ce rapport est appelé indice de clarté.

L’indice de clarté en moyenne mensuelle \bar{K}_T , est le rapport des irradiances journalières en moyenne mensuelle sur une surface horizontale au les irradiances journalières en moyenne mensuelle est exprimé par [1,5] :

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \tag{68}$$

-l’indice de clarté journalière K_T , est le rapport des irradiances journalières sur une surface horizontale au les irradiances journalières extraterrestres pour le même jour est exprimé par [1,5] :

$$K_T = \frac{H}{H_0} \tag{69}$$

-l’indice de clarté horaire k_T , est le rapport des irradiances horaires sur une surface horizontale au les irradiances horaires extraterrestres pour le même heure est exprimé par [1,5](voir Fig.24)

$$k_T = \frac{I}{I_0} \tag{70}$$

I : les irradiances horaires reçue sur une surface horizontale située à l’horizon et exprimer en kJ/h.m^2 et mesuré a l’aide d’un pyranomètre.

A partir de la figure 24, la valeur des irradiances journalières reçue sur une surface horizontale situé à l’horizon est $21,76 \text{ Mj/jour.m}^2$, ainsi, les irradiances journalières extraterrestres reçue sur une surface horizontale est $30.208 \text{ Mj/jour.m}^2$, et a partir de l’éq.(69) en déduit la valeur de l’indice de clarté journalières égale a 0.72.

Par la suite de l’étude n’en considère que l’indice de clarté égale à 0.61 qui est valable pour les journées de caractéristiques de ciel anisotropique.

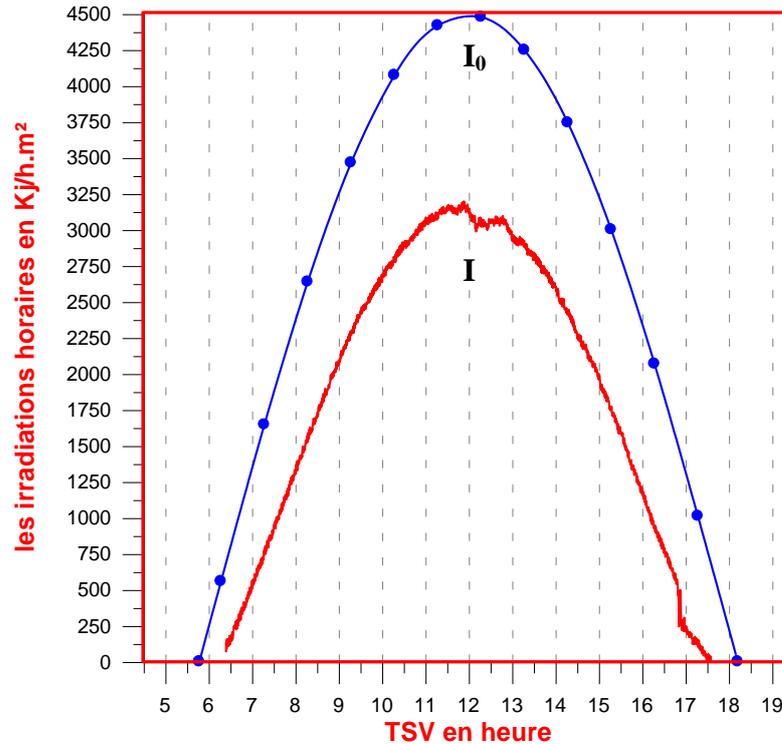


Fig .24.les irradiations horaires reçue sur une surface horizontale pour la journée du 06 Octobre 2008 (cite d'Adrar)

3.4. Estimations de l'irradiation diffuse journalière reçue sur une surface horizontale :

Klein, a proposé la corrélation suivante, après lissage de la courbe de la variation de H_d/H de Liu et Jordan, est donnée par [1] :

$$\frac{H_d}{H} = 1.0045 + 0.04349 K_T - 3.5227 K_T^2 + 2.63 K_T^3 \tag{71}$$

Collares-Pereira et Rabl ont proposés [1,5]:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} = 0.99 & \text{pour } K_T < 0.17 \\ = 1.88 - 2.272 K_T + 9.473 K_T^2 - 21.856 K_T^3 + 14.648 K_T^4 & \text{pour } 0.17 < K_T < 0.8 \\ = 0.2 & \text{pour } K_T > 0.8 \end{cases} \tag{72}$$

3.5. Estimations des irradiations diffuses journalières en moyenne mensuelle sur une surface horizontale :

Liu et Jordan ont proposé la relation suivante [5]:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.39 - 4.027 \bar{K}_T + 5.531 \bar{K}_T^2 - 3.108 \bar{K}_T^3 \quad \text{pour } 0.3 < \bar{K}_T < 0.7 \tag{73}$$

Collares-Pereira et Rabl ont proposés [1,5]:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0.775 + 0.347 \frac{\pi}{180} (\omega_s - 90^\circ) - \left[0.505 + 0.261 \frac{\pi}{180} (\omega_s - 90^\circ) \right] \cos \left[\bar{K}_T - 0.9 \right] \tag{74}$$

où ω_s l'angle horaire du lever du soleil du jour représentatif du mois est exprimé en degré

3.6. Estimation des irradiations horaires diffus sur une surface horizontale :

Orgill et Hollands ont proposé la corrélation suivante [1,5]

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} = 1 - 0.249 k_T & \text{pour } 0 \leq k_T \leq 0.35 \\ = 1.577 - 1.184 k_T & \text{pour } 0.35 \leq k_T \leq 0.75 \\ = 0.177 & \text{pour } k_T > 0.75 \end{cases} \quad (75)$$

Erbs et al ont proposé la corrélation suivante [1,5]

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} = 1 - 0.9 k_T & \text{pour } 0 \leq k_T \leq 0.22 \\ = 0.9511 - 0.1604 k_T + 4.388 k_T^2 - 16.638 k_T^3 + 12.336 k_T^4 & \text{pour } 0.22 \leq k_T \leq 0.80 \\ = 0.165 & \text{pour } k_T > 0.8 \end{cases} \quad (76)$$

4. les irradiations solaires incidentes sur un plan incliné en présence de l’atmosphère :

Considérons un plan incliné par rapport à l’horizon d’un angle β , les irradiations globales incident sur se plan est la somme des irradiations essentielles suivantes :

- Les irradiations directes,
- Les irradiations réfléchissent par le sol,
- Les irradiations réfléchissent par le ciel,

4.1. Les irradiations directes :

4.1.1. Les irradiations directes instantanées incident sur un plan incliné $I_{b\beta\gamma}$:

On peut exprimer les irradiations directes instantanées incidentes sur un plan inclinée en fonction des irradiations extraterrestres de la manière suivante [5]:

$$I_{b\beta\gamma} = I_b \dot{r}_b \text{ [w /m}^2\text{]} \quad (77)$$

I_b : les irradiations directes incidentent sur un plan incliné en présence de l’atmosphère et exprimé en w/m²

\dot{r}_b : est donné par l’ég (53).

4.1.2. Les irradiations directes horaires incidentes sur un plan incliné $I_{b\beta\gamma}$:

Les irradiations directes horaires (au milieu d’heure considéré) peuvent être formulées comme suite [5] (voir Fig.25)

$$I_{b\beta\gamma} = I_b \frac{I_{0\beta\gamma}}{I_0} = I_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} = I_b r_b \text{ [kjm}^2\text{hr}^{-1}\text{]} \quad (78)$$

θ et θ_z sont calculé au milieu d’heure considérée,

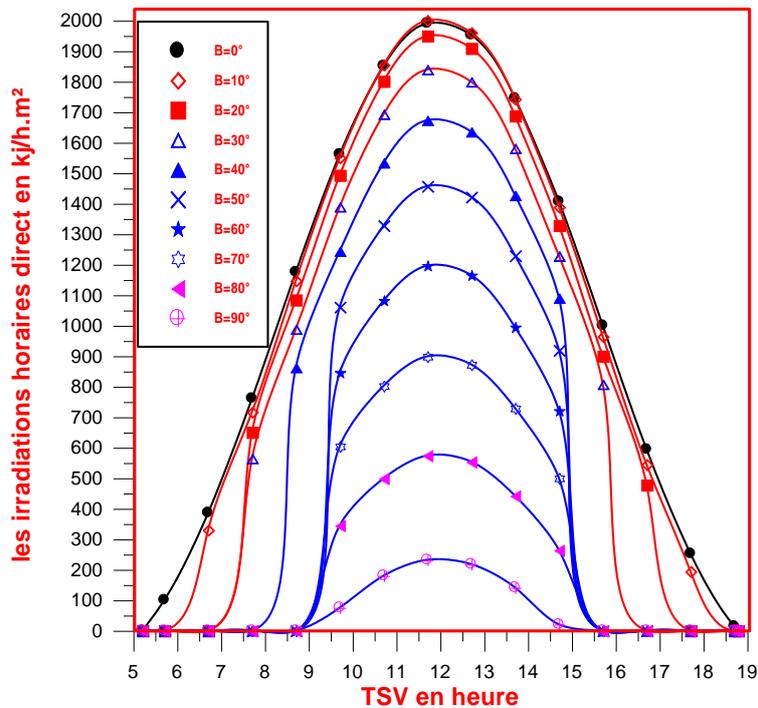


Fig.27. la variation des irradiations horaires directes sur un plan incliné d'un angle β et orienté vers l'équateur pour la journée du 17 juillet (cite d'Adrar, $K_T=0.61$)

4.1.3. Les irradiations directes journalières incidentes sur un plan incliné $H_{b\beta\gamma}$:

Les irradiations directes journalières peuvent être formulées comme suite [5]:

$$H_{b\beta\gamma} = H_b \frac{H_{0\beta\gamma}}{H_0} \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{79}$$

$$\text{où : } H_{b\beta\gamma} = H_b R_b \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{80}$$

Pour un plan orientée vers l'équateur, R_b est donné par l'éq (51), et pour une orientation arbitraire est donné par l'éq (54),
De même, on peut l'exprimé en fonction des irradiations directes horaires sur un plan inclinée [5] (voir fig.28):

$$H_{b\beta\gamma} = \sum_{\text{jour}} I_{b\beta\gamma} \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{81}$$

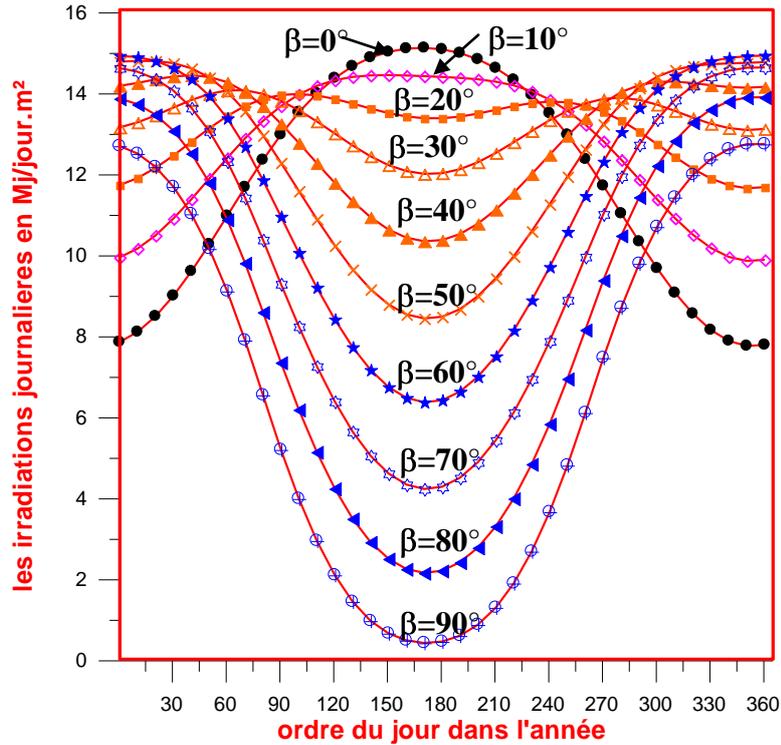


Fig.28. la variation annuelle des irradiations journalières direct sur un plan incliné d'un angle β et orienté vers l'équateur (cite d'Adrar, $K_T=0.61$)

4.1.4. Les irradiations directs journalières en moyenne mensuel incident sur un plan incliné $H_{b\beta\gamma}$:

On peut exprimer les irradiations journalières en moyenne mensuelle en fonction de l'angle d'inclinaison caractéristique du mois considéré (voir tableau. 1) comme suite :

$$\bar{H}_{b\beta\gamma} = H_{b\beta\gamma} \Big|_{\delta=\delta_c} \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{82}$$

Où : $\bar{H}_{b\beta\gamma} = H_b \Big|_{\delta=\delta_c} \bar{R}_b \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{83}$

\bar{R}_b est donné par l'éq. (52)

4.2. Les irradiations réfléchies par le sol incident sur un plan incliné :

Les irradiations totales réfléchies par le sol peut être écrite comme suit [5]:

$$(I_b \rho_b + I_d \rho_d) A_g \tag{84}$$

A_g surface totale vue par le plan incliné ;

ρ_b albédo pour les radiations direct ;

ρ_d albédo pour les radiations diffusés ;

Pour simplifier la discussion, nous allons considérer d'abord deux cas limites :

4.2.1. Les irradiations horaires réfléchir par le sol :

4.2.1.a. Les irradiations horaires diffuses sont isotrope :

Cette approximation est valable pour le cas d'un ciel uniformément couvert (diffusion parfaite). Les irradiations reçu sur le plan considéré est proportionnelle à l'angle solide sous lequel il voit le sol et par la suite, les irradiations horaires diffus isotrope est exprimée par [5]:

$$I_r = (I_b \rho_b + I_d \rho_d) \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \text{ [kj.m}^{-2}\text{hr}^{-1}] \tag{85}$$

Dans le cas où la réflectivité des radiations direct et diffuse sont identique on aura [5] (voir fig.28):

$$I_r = \frac{1}{2} I_p (1 - \cos \beta) \text{ [kj.m}^{-2}\text{hr}^{-1}] \tag{86}$$

4.2.1.b. Les irradiations horaires diffuses sont anisotrope :

Les radiations diffus anisotrope provient essentiellement de la partie du ciel entourant le soleil. En autres termes, les radiations circom-solaires sont plus importantes que les radiations diffuses hémisphériques. C'est le cas lorsque le ciel est clair et sans nuages et, que la turbidité est importante (diffusion imparfaite), ainsi, la radiation globale est composée essentiellement de la radiation direct.

Temps et Coulson [5] ont recommandé une expression sous ces conditions qui devrait être multiplié par le facteur suivant donnée comme suite [5]:

$$\left[1 + \sin^2 \left(\frac{\theta_z}{2} \right) \right] \left(\cos \Delta \right) \tag{87}$$

où Δ (pour plus d'information voir Réf.5) est l'azimut de la surface inclinée envers le soleil. Par conséquent, au dessous d'un ciel clair, la radiation incidente sur un plan inclinée peut être exprimé [5] (voir fig.29):

$$I_r = \frac{1}{2} I_p (1 - \cos \beta) \left[1 + \sin^2 \left(\frac{\theta_z}{2} \right) \right] \left(\cos \Delta \right) \text{ [kj.m}^{-2}\text{hr}^{-1}] \tag{88}$$

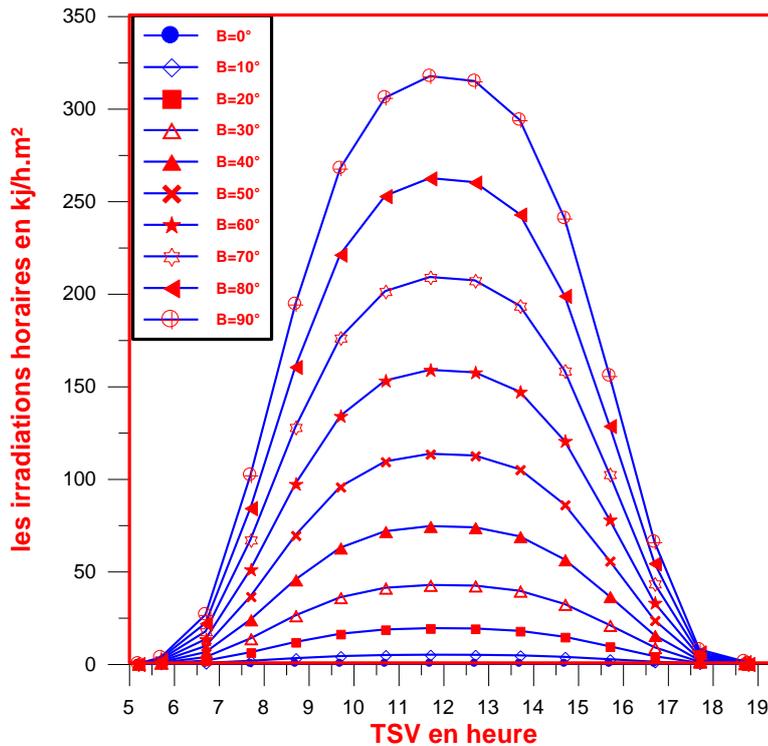


Fig.29. la variation des irradiances horaires réfléchi par le sol incidents sur un plan incliné d'un angle β et orienté vers l'équateur pour la journée du 17 juillet (cite d'Adrar, $K_T=0.61$)

4.2.2. Les irradiances journalières diffus par le sol :

4.2.2.a. Les irradiances réfléchies sont isotrope:

Les irradiances journalières totales diffusées par le sol, incident sur un plan incliné peuvent être écrites comme suite [5]:

$$H_r = \frac{1}{2} H_p (1 - \cos \beta) \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{89}$$

4.2.2.b. Les irradiation réfléchie sont anisotropes:

Les irradiances journalières totales diffusées par le sol incident sur un plan incliné peut être exprimé en terme de sommation des radiations horaires comme suite [5] (voir fig.29):

$$H_r = \sum_{\text{jour}} \frac{1}{2} I_p (1 - \cos \beta) \left[1 + \sin^2 \left(\frac{\theta_z}{2} \right) \left(\frac{1 + \cos \Delta}{2} \right) \right] \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{90}$$

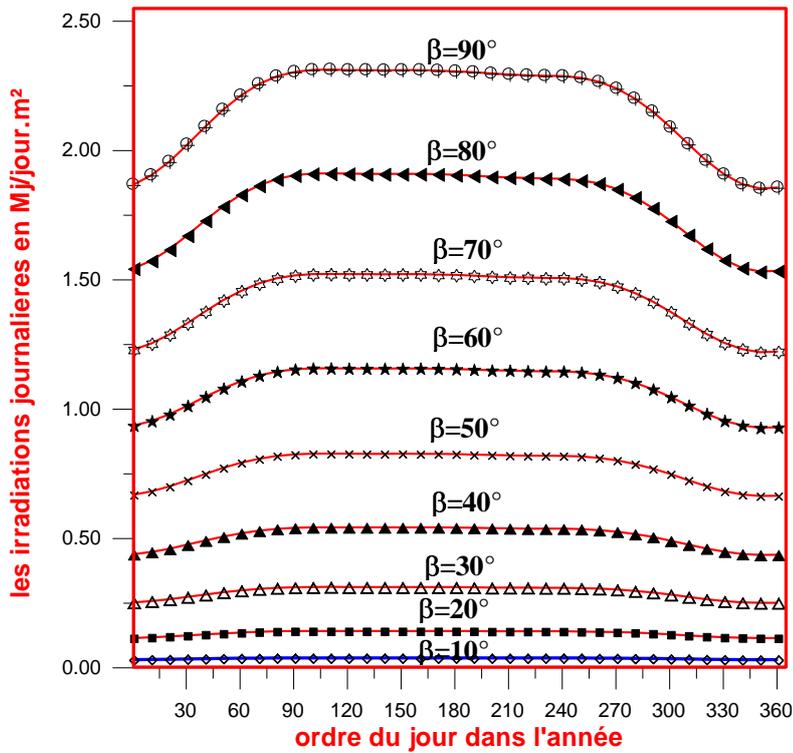


Fig.30. la variation annuelle des irradiances journalières diffus par le sol incident sur un plan incliné d'un angle β et orienté vers l'équateur (cite d'Adrar, $K_T=0.61$)

4.3. Les irradiances diffus par le ciel:

L'évaluation des radiations dans ce cas, est en fonction des caractéristiques du ciel :

- ciel clair
- ciel couvert
- ciel partiellement couvert

Suivant les trois cas du ciel, on définit trois modèles d'évaluations des irradiances qui peuvent être exprimés comme au dessous :

4.3.1.. Les irradiances horaires diffus par le ciel:

4.3.1.a. Modèle circonsolaire :

Ce modèle est applicable dans le cas d'un ciel clair et sans nuages, les irradiances horaires diffus sont exprimées par [5]:

$$I_s = I_d r_b \text{ [kj.m}^{-2}\text{hr}^{-1}] \tag{93}$$

on général cette équation est sous-estimé [5].

4.3.1.b. Modèle isotopique :

Approximativement se modèle est valable pour le cas d'un temps couvert, nuageux. Les irradiances diffus sont exprimées par l'expression suivante [5]:

$$I_s = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \text{ [kjm}^{-2}\text{hr}^{-1}] \tag{94}$$

4.3.1.c. Modèle anisotropie :

Pour le cas d'un ciel clair, Temps et Coulson ont proposés une expression des radiations horaires sur un plan incliné orienté en plein sud est donné par [5] (voir fig.31):

$$I_s = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \left[1 + \sin^3 \theta + \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z \right] \quad [kJm^{-2}hr^{-1}] \quad (95)$$

Klucher a modifié cette expression pour rendre applicable pour le cas d'un ciel partiellement couvert est donné par [5]:

$$I_s = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \left[F + F \sin^3 \theta + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z \right] \quad [kJm^{-2}hr^{-1}] \quad (96-a)$$

$$\text{ou : } F = 1 - \left(\frac{I_d}{I} \right)^2 \quad (96-b)$$

Pour ciel clair, on a $F \cong 1$

Pour ciel couvert, on a $F \cong 0$.

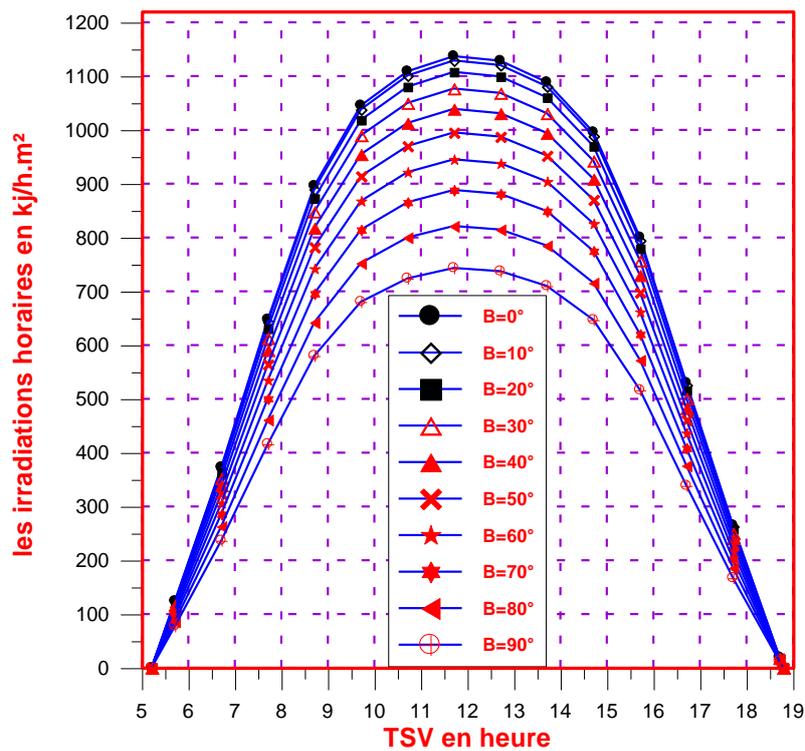


Fig.31. la variation des irradiations horaires réfléchi par le ciel incidents sur un plan incliné d'un angle β et orienté vers l'équateur pour la journée du 17 juillet (cite d'Adrar, $K_T=0.61$)

4.3.2. Les irradiations journalières diffus par le ciel :

De même on définit trois modèles suivant les caractéristiques du ciel.

4.4.2.a. Modèle circonsolaire:

La radiation circonsolaires journalière totale incident sur un plan incliné étant donné par l'équation suivante [5]:

$$H_s = H_d R_d \quad [Mj.m^{-2}Jour^{-1}] \quad (97)$$

4.4.2.b. Modèle isotopie :

La radiation journalière totale diffuse par le ciel incident sur un plan incliné est exprimée par l'équation suivante [5] :

$$H_s = \frac{1}{2} H_d (1 + \cos \beta) \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{98}$$

4.4.2.c. Modèle anisotropie :

Dans le cas d'une diffusion anisotropie, on peut calculer les irradiances journalières totales diffusives incidentes sur un plan incliné à partir des irradiances horaires diffus ou à partir des irradiances journalières diffus, étant donné par les deux modèles suivantes:

a). Modèle du Klucher [5]:

$$H_s = \sum_{\text{Jour}} \left[\frac{1}{2} H_d (1 + \cos \beta) + F \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z \right] \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{99}$$

b). Modèle du Hay [5]:

$$H_s = H_d \left\{ \frac{H - H_d}{H_0} R_b + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left[1 - \frac{H - H_d}{H_0} \right] \right\} \text{ [Mj.m}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \tag{100}$$

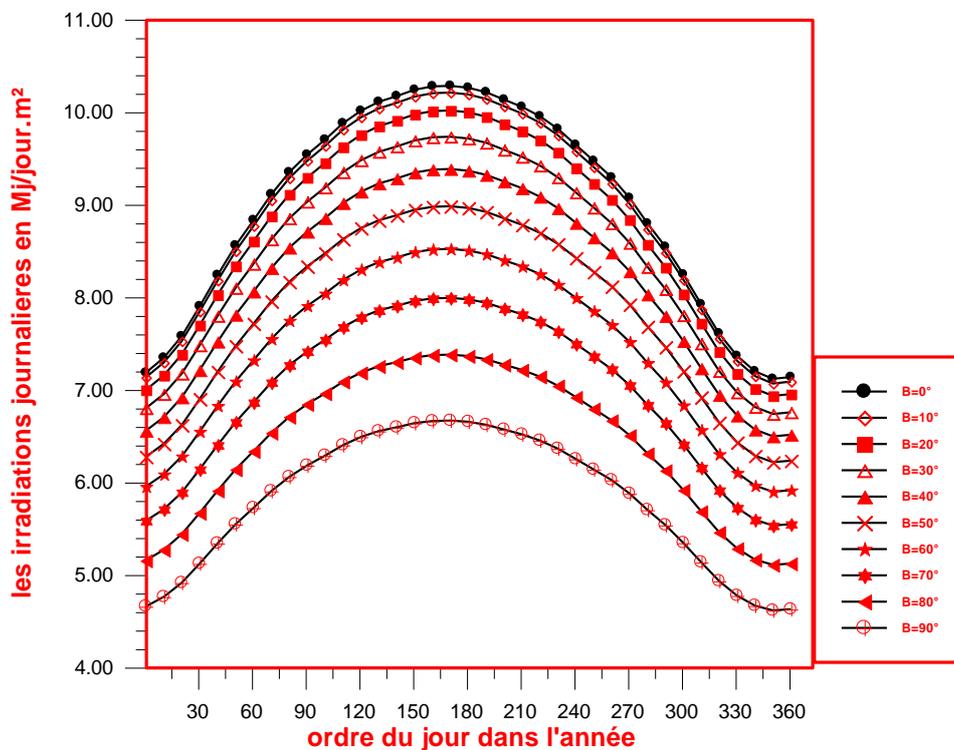


Fig.32. la variation annuelle des irradiances journalières vient de la partie circom-solaire incident sur un plan incliné d'un angle β et orienté vers l'équateur (cite d'Adrar, $K_T=0.61$. **Modèle du Klucher**)

4.5. Les irradiations globales incidentes sur un plan incliné situé à l’horizon:

Les irradiations globales incident sur un plan incliné est composé essentiellement par :

- les irradiations directes incident sur un plan incliné ;
- les irradiations diffuses par le sol incident sur un plan incliné ;
- les irradiations diffuses par le ciel incident sur un plan incliné ;

4.5.1. Les irradiations horaires globales incident sur un plan incliné :

C’est les irradiations horaires globales et diffus, incident sur un plan horizontal sont connu c’est-à-dire mesurer où en peut l’estimer, alors, les irradiations horaires globales reçue sur un plan incliné est exprimé par [5](voir Fig.33):

$$I_{\beta\gamma} = (I - I_d)r_b + I_r + I_s \text{ [kjm}^2\text{hr}^{-1}\text{]} \tag{101}$$

D’autre part, les radiations horaires globales incident sur un plan incliné en moyenne mensuel est exprimé par [5]:

$$\bar{I}_{\beta\gamma} = (\bar{I} - \bar{I}_d)r_b + \bar{I}_r + \bar{I}_s \text{ [kjm}^2\text{hr}^{-1}\text{]} \tag{102}$$

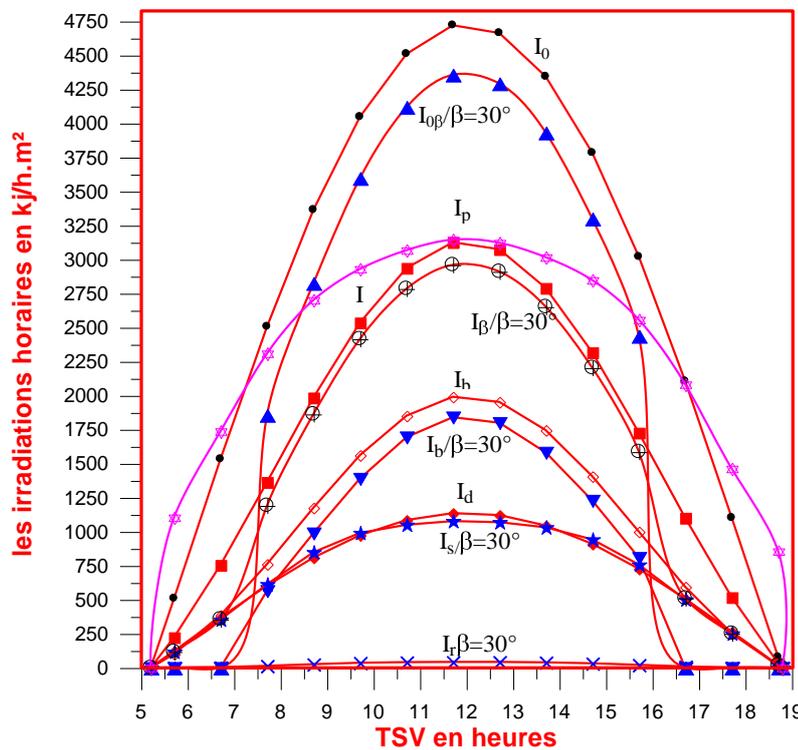


Fig.33. la variation des irradiations horaires reçus sur un plan incliné d’un angle β et orienté vers l’équateur pour la journée du 17 juillet (cite d’Adrar, $K_T=0.61$)

4.5.2. Les irradiations journalières globales incident sur un plan incliné :

C’est les irradiations journalières globales et diffus, incident sur un plan horizontal sont connu (c’est-à-dire mesurer) où en peut l’estimer, alors, les radiations journalières globales reçue sur un plan incliné sont exprimées par [5] (voir Fig.34):

$$H_{\beta\gamma} = (H - H_d)R_b + H_r + H_s \text{ [Mj.m}^2\text{Jour}^{-1}\text{]} \tag{103}$$

Les radiations journalières globales incident sur un plan incliné en moyenne mensuel sont exprimées par [5] :

$$\overline{H}_{\beta\gamma} = (\overline{H} - \overline{H}_d)\overline{R}_b + \overline{H}_r + \overline{H}_s \text{ [M.jm}^{-2}\text{Jour}^{-1}] \quad (104)$$

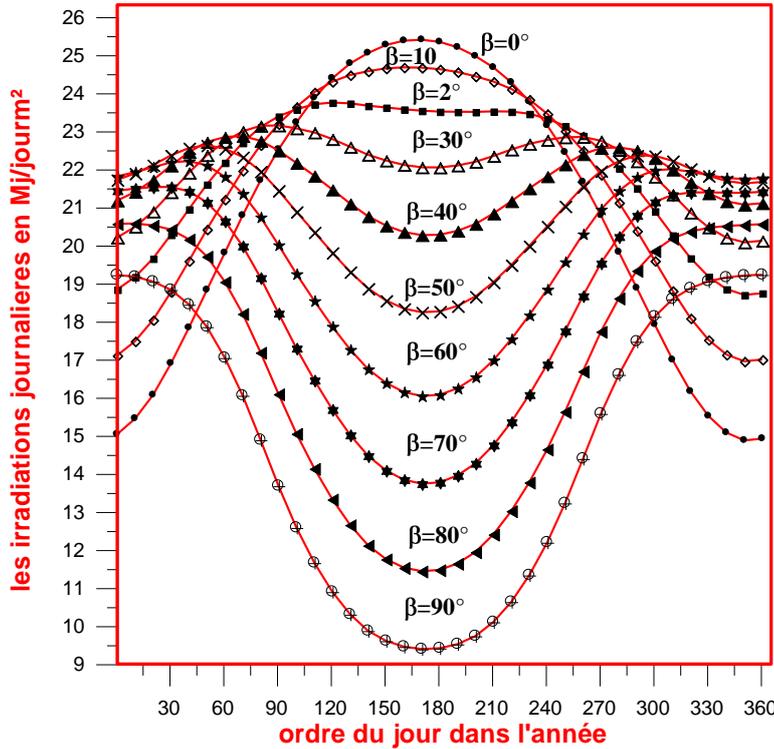


Fig.34. la variation des irradiations journalières reçues sur un plan incliné d'un angle β et situé à l'horizon et orienté vers l'équateur (cite d'Adrar, $K_T=0.61$)

4.6. Rapport des irradiations globales incident sur un plan incliné au les radiations incident sur un plan horizontal :

4.6.1. Rapport des radiations journalières :

Étant donné par l'expression suivante [5](voir fig..35):

$$R = \frac{\overline{H}_{\beta\gamma}}{\overline{H}} \quad (105)$$

4.6.2. Rapport des irradiations journalières en moyenne mensuel :

Étant donné par l'expression suivante [5]:

$$\overline{R} = \frac{\overline{H}_{\beta\gamma}}{\overline{H}} = \left[1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} \right] \overline{R}_b + \frac{\overline{H}_r + \overline{H}_s}{\overline{H}} \quad (106)$$

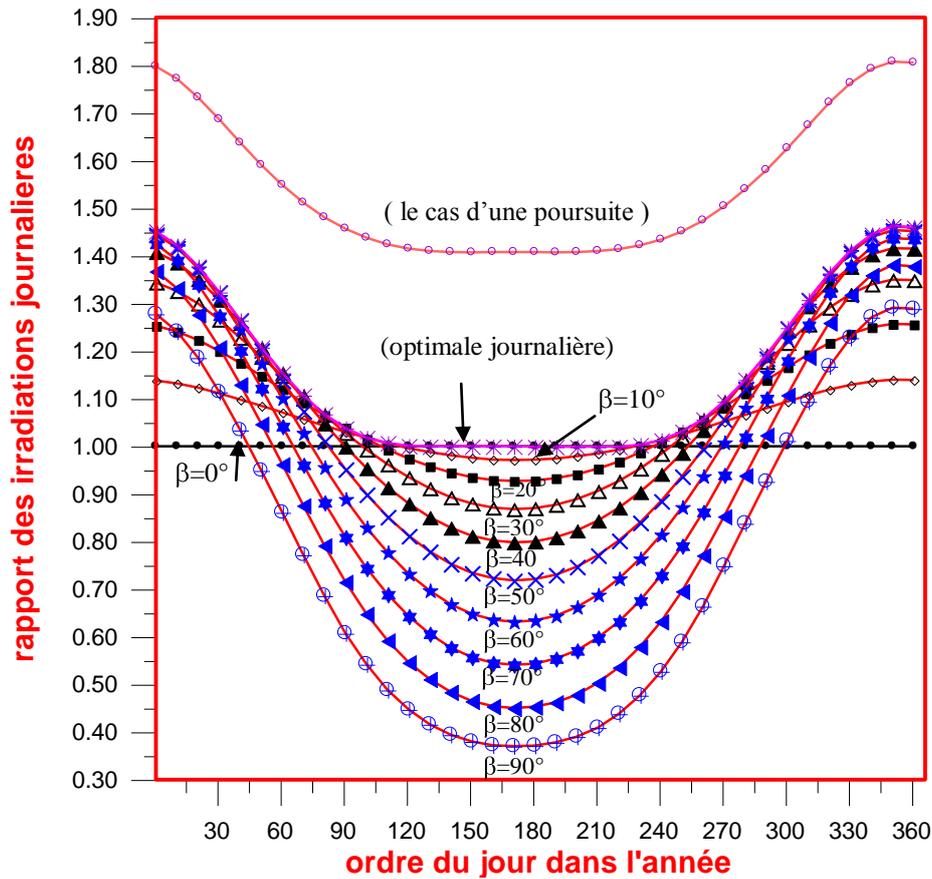
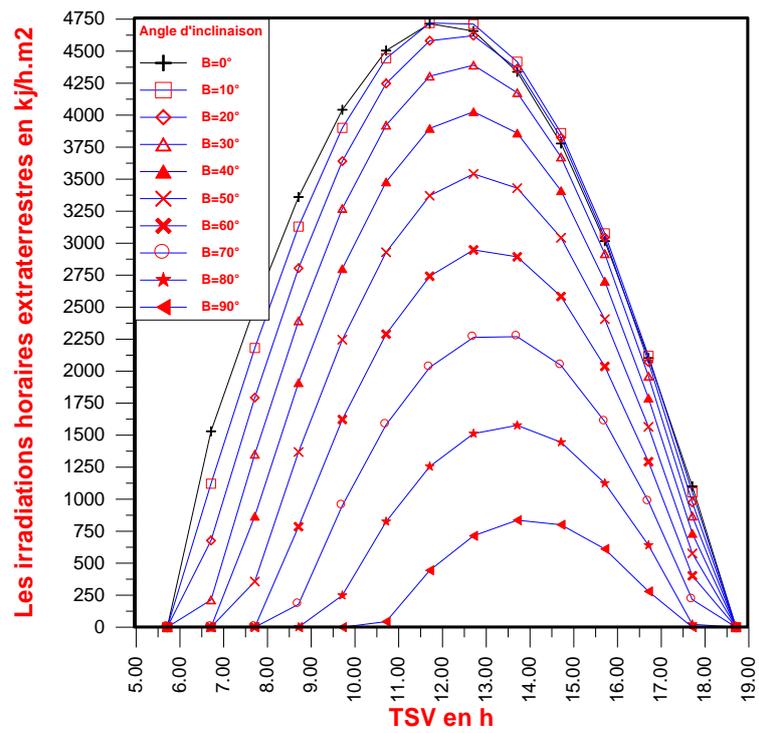
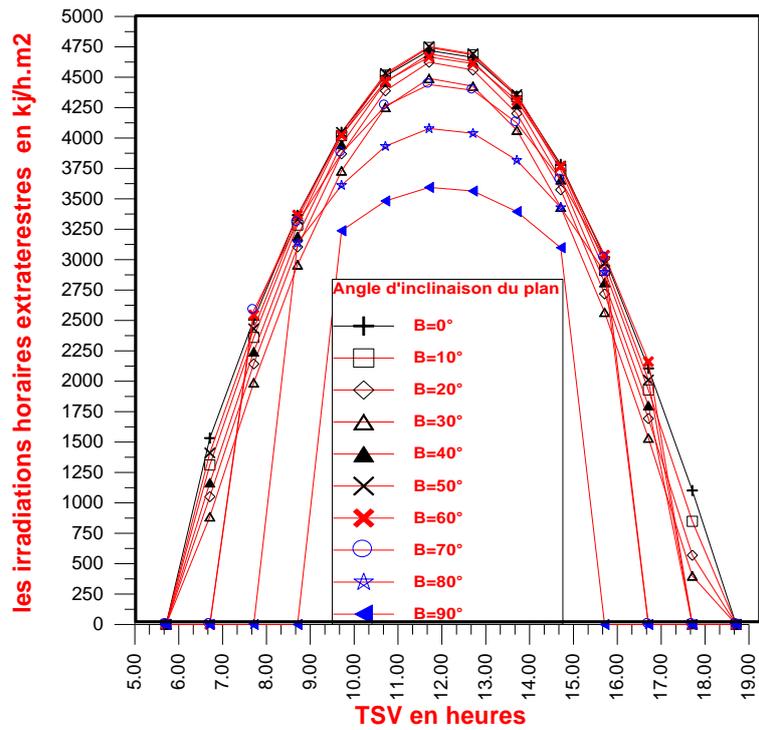


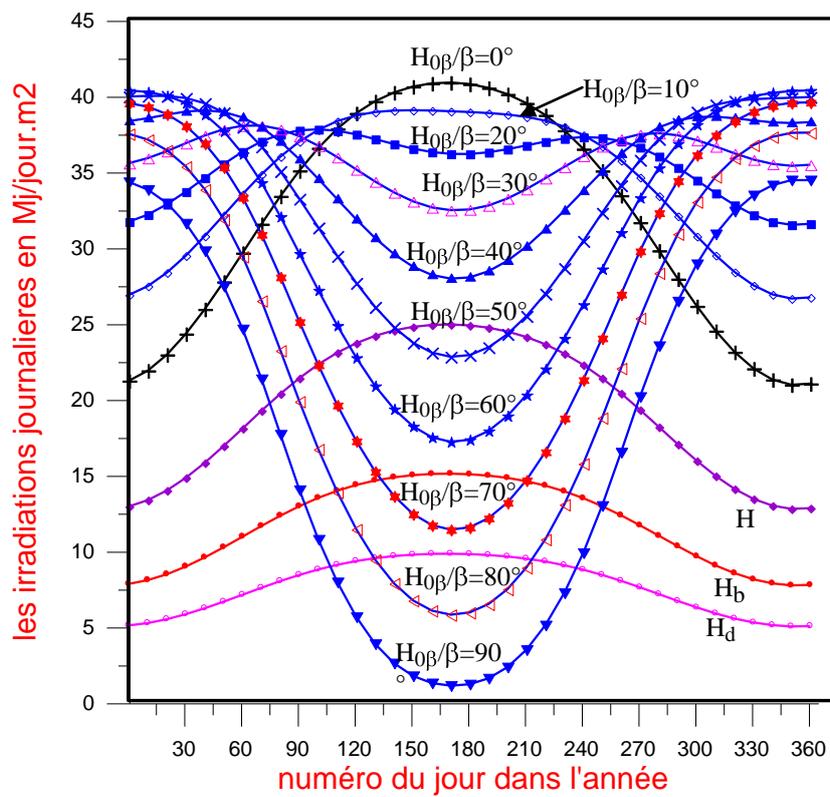
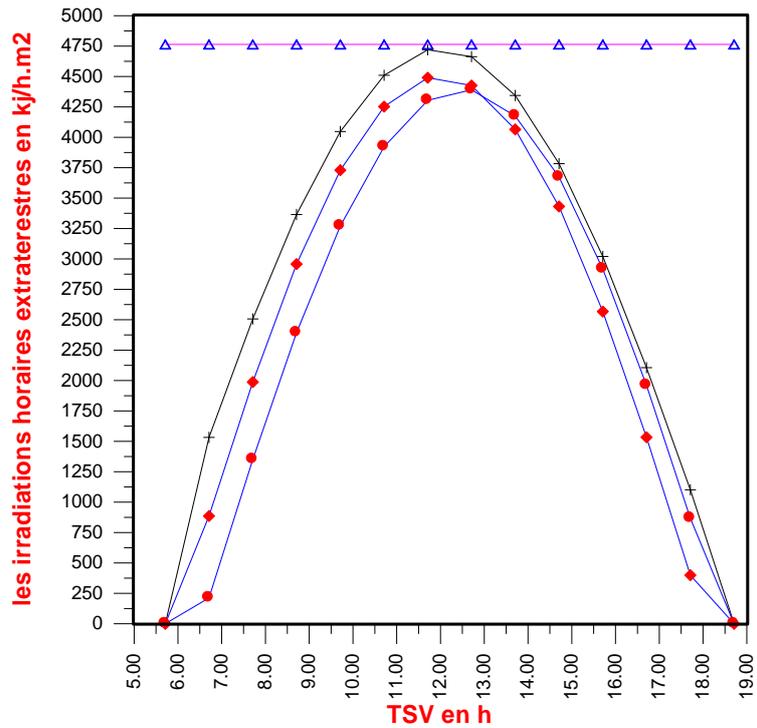
Fig.35. la variation des rapports des irradiations journalières reçus sur un plan incliné d'un angle β et situé à l'horizon et orienté vers l'équateur (cite d'Adrar, $K_T=0.61$)

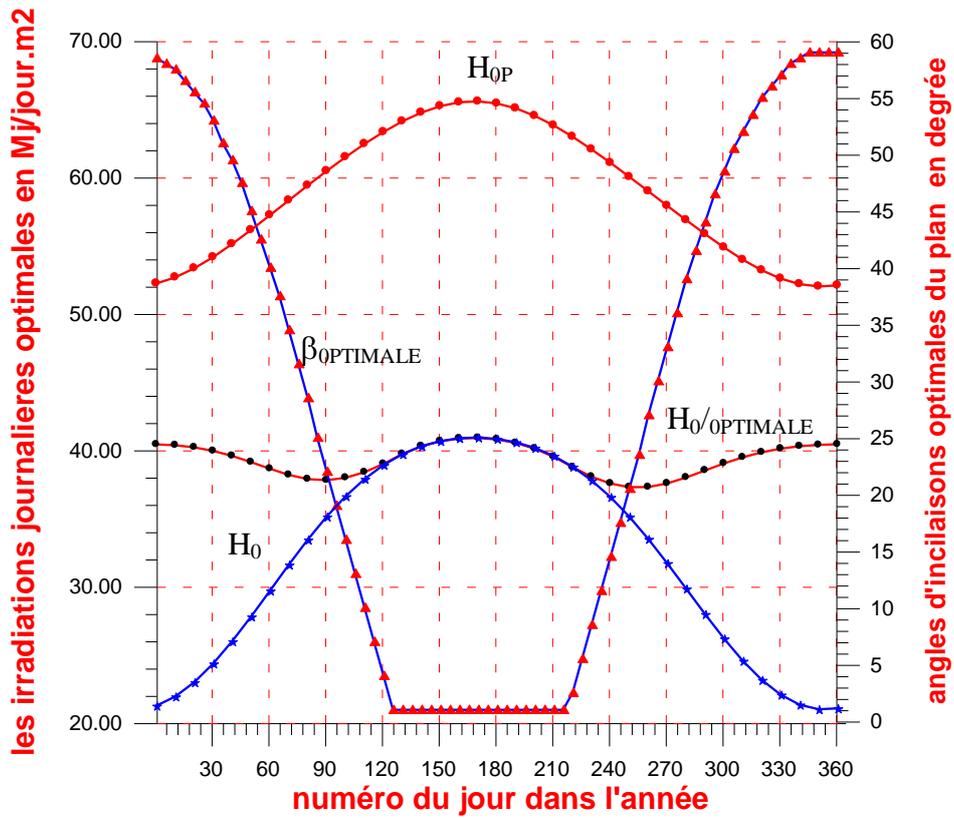
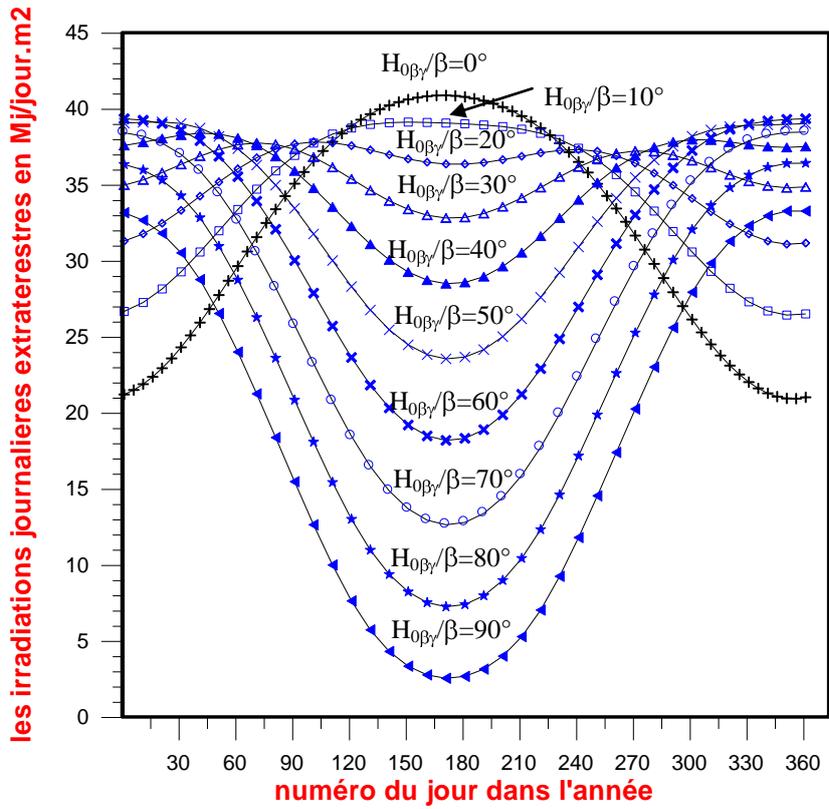
La variation des rayonnements solaires en fonction du temps est importante et qui va influé directement sur les besoins énergétiques pour les applications des systèmes qui fonctionnent avec cette source d'énergie, a cet effet, la connaissance du gisement de site où il sera implanté le système va nous permettre de faire, suivant leur exigence énergétique, un meilleur pré dimensionnement du champ de captation, ce qui va être économiquement rentable vu le prix élevé des capteurs solaires photovoltaïques, et assurer une meilleur utilisation et bon fonctionnement et surtout un meilleur rendement des systèmes qui parmi eux, le pompage, et la réfrigération photovoltaïques...etc., par ailleurs, cette étude nécessite des renseignements plus détaillés heure par heure et jour par jour sur le gisement solaire.

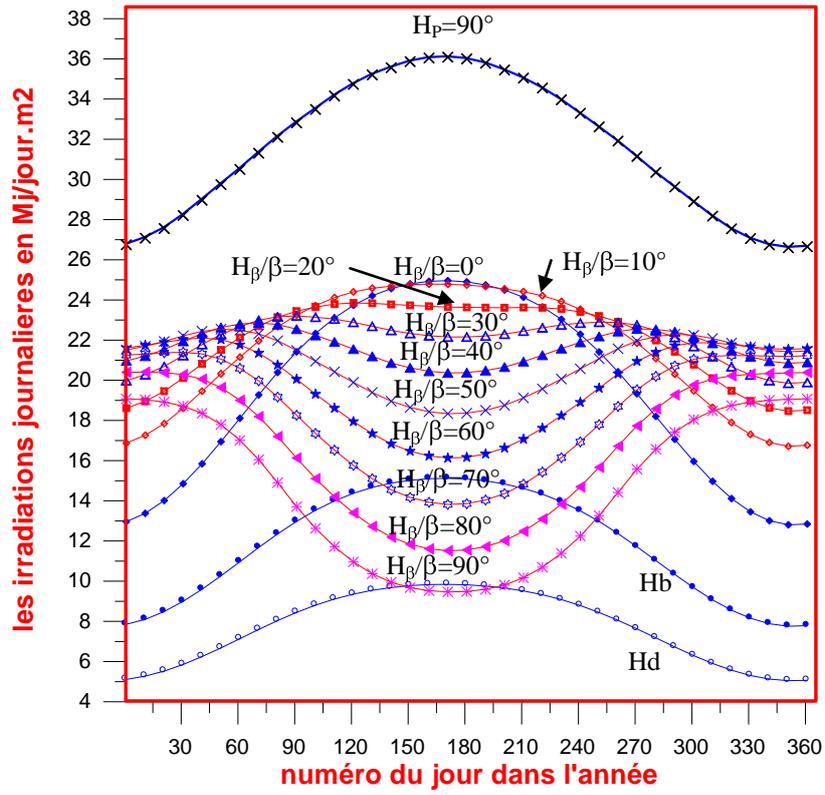
Cette partie, est consacré à l'élaboration d'une méthode de calcul qui permet d'estimer le meilleur gain d'énergie reçu sur le plan récepteur, afin d'estimer les angles optimales d'inclinaison (journalière, en moyenne mensuelle, annuelle) et les angles d'orientation instantané sur l'horizontale (angle azimutale du soleil, uniquement pour le cas de la poursuite du soleil) de la surface de capteur. Cette étude est basée sur deux configurations qui sont:

1. les capteurs solaires sont inclinés sur l'horizon et orientés en plein Sud,
2. les capteurs solaires sont instantanément sous incidence normale aux rayons solaires (c'est le cas d'une poursuite avec un Héliostat).









CHAPITRE II

I. DIFFUSIVITÉ HYDRIQUE ET CINÉTIQUE DE SÉCHAGE SOLAIRE EN CONVECTION FORCÉE DES FEUILLES DE MARJOLAINE

1. INTRODUCTION

La relation entre la durée de conservation d'un produit alimentaire et son degré d'hydratation est connue depuis toujours, L'eau intervient dans un très grand nombre de phénomène d'altération : modifications biochimiques ou biophysiques, réactions enzymatiques ou encore processus d'ordre microbiologique. La durée de conservation pourra être considérablement augmentée par abaissement de l'activité de l'eau, quelle que soit la technique mise en œuvre pour réduire cette activité : séchage, salage, ...

Dans le secteur agroalimentaire, de nombreux travaux ont été menés pour optimiser l'opération du séchage [1-3]. Cette opération consiste à rationaliser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. A cet égard, le séchage solaire constitue une solution adéquate pour les pays pauvres en ressources énergétiques conventionnelles et disposant d'un gisement solaire important durant toute l'année [3, 4].

Les cinétiques de séchage des feuilles de la Marjolaine sont étudiés, à l'aide d'un séchoir solaire muni d'un appoint électrique et fonctionnant en convection forcée. Le but de cette étude est de contribuer à l'analyse et à la compréhension des mécanismes de diffusion qui influent le processus de séchage des plantes médicinales. Les conditions aérothermiques de fonctionnement du séchoir ont été étudiées sans que la qualité organoleptique et nutritionnelle du produit soit altérée [5-7].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'approche macroscopique expérimentale qui consiste à déterminer le comportement cinétique des feuilles de marjolaine au cours de son séchage dans des conditions de la température et de débit d'air contrôlées à l'aide d'un séchoir indirect à couche mince partiellement solaire fonctionnant en convection forcée installé au laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure de Marrakech [8-10]. Les différents essais expérimentaux consistent à étudier l'influence séparée des diverses conditions de l'air asséchant (température, humidité de l'air, débit) sur le processus de séchage. La vitesse de séchage est déterminée d'une façon empirique à partir de la courbe caractéristique de séchage (CCS). Les courbes expérimentales de séchage obtenues sont approchées par sept modèles mathématiques existant dans la littérature. Ceci nous a permis de déterminer les coefficients

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

de diffusion effective et l'énergie d'activation correspondant et d'analyser les mécanismes relatifs au processus de séchage [11].

2. FORMULATION MATHÉMATIQUE

Teneur en eau et courbe caractéristique de séchage

Durant toutes les expériences, on fixe la température et le débit d'air asséchant et on suit l'évolution de la masse humide $M_h(t)$ du produit à sécher au cours du temps par pesées successives jusqu'à ce qu'elle devienne stationnaire. On procède ensuite à la déshydratation du produit dans une étuve à 105°C pendant 24h dans le but de déterminer la masse sèche (M_s) du produit. La teneur en eau en base sèche à un instant t est définie par :

$$X(t) = \frac{M_h(t) - M_s}{M_s} \quad (\text{I.1})$$

La teneur en eau finale est une caractéristique de chaque produit. C'est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles et organoleptiques (forme, texture, couleur, odeur et huiles essentielles) [12].

La détermination de la cinétique de séchage se fait par calcul direct de la dérivée de la teneur en eau à partir des points expérimentaux en utilisant des logiciels appropriés.

Le principe de la méthode développée par Van Meel [13] consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t $\left(\frac{-dX}{dt}\right)$ à la vitesse de première phase $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1$, dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite $\frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}}$. Etant donné que la première phase est absente dans le cas des produits agroalimentaires, alors on prend $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1 = \left(\frac{-dX}{dt}\right)_0$ et $X_{cri} = X_0$. Ainsi, la forme générale de l'équation de la courbe caractéristique de séchage est donnée par $f = f(X^*)$:

$$\text{Abscisse : } X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (\text{I.2})$$

$$\text{Ordonnée : } f = \frac{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_t}{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1} = \frac{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_t}{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_0} \quad (\text{I.3})$$

La teneur en eau d'équilibre X_{eq} est déterminée à partir des isothermes de désorption du produit.

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

Pour une gamme raisonnable de conditions expérimentales constantes durant le séchage (température, vitesse, humidité de l'air et dimensions du produit à sécher), la courbe caractéristique de séchage (CCS) vérifie les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} f = 0 \text{ pour } X^* = 0 \\ 0 \leq f \leq 1 \text{ pour } 0 \leq X^* \leq 1 \\ f = 1 \text{ pour } X^* \geq 1 \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Critère de choix du modèle approprié :

Plusieurs modèles empiriques ou semi empiriques sont utilisés pour décrire les cinétiques de séchage et prédire la teneur en eau réduite X^* en fonction du temps de séchage [9, 14-17]. Pour décrire l'allure de séchage des feuilles de marjolaine et déterminer l'équation empirique la plus adéquate, nous avons utilisé sept modèles de séchage en couche mince des plantes médicinales [7, 9, 18, 19]. Le tableau 1 regroupe les équations empiriques de séchage utilisées dans la modélisation.

Le modèle approprié à la description de l'allure de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine est choisi selon les critères suivants:

- Coefficient de corrélation (r) élevé
- Erreur systématique moyenne (ESM) minimale
- χ -carrée réduite minimale.

Ces paramètres statistiques sont définis par:

$$ESM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{pre,i}^* - X_{exp,i}^* \quad (\text{I.5})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_{pre,i}^* - X_{exp,i}^*^2}{N-n} \quad (\text{I.6})$$

Diffusivité effective et énergie d'activation

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau. Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide sous l'effet du gradient de concentration. L'évolution de la teneur en eau s'exprime en fonction du gradient de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe les différents phénomènes de transport, dans une loi analogue à la seconde loi de Fick [20] :

$$\frac{\partial X^*}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X^* \quad (\text{I.7})$$

avec D_{eff} , diffusivité effective (en $m^2.s^{-1}$) qui, le plus souvent, varie avec la température et la teneur en eau du produit et est affectée par la rétraction de la matrice solide.

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

La solution analytique de la deuxième loi de Fick, développée par Crank [21], Dans le cas d'une plaque infinie, en assumant la distribution initiale uniforme d'humidité, avec la simplification du mouvement d'humidité par diffusion, rétrécissement négligeable, coefficients de diffusion constants et la température peut être exprimée par :

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (I.8)$$

Lorsque le temps est suffisamment grand, tous les termes de la série sont négligeables devant le premier et on obtient :

$$X^* \cong \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (I.9)$$

Où L (m) est la demi-épaisseur de la feuille de marjolaine.

L'origine de l'autodiffusion est l'agitation thermique. La diffusion est donc thermiquement activée, et le coefficient de diffusion suit une loi d'Arrhenius :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (I.10)$$

où D_0 est le facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhénius ($m^2.s^{-1}$), E_a est l'énergie d'activation ($kJ.mol^{-1}$), qui est l'équivalent d'une barrière de potentiel qui s'oppose à l'avancement de la réaction, R est la constante des gaz parfaits ($kJ.mol^{-1}.K^{-1}$) et T est la température de l'air asséchant en K [22, 23].

3. MÉTHODOLOGIE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

L'appareillage expérimental utilisé pour étudier les cinétiques de séchage des feuilles de marjolaine est un séchoir convectif indirect partiellement solaire fonctionnant en convection forcée (Figure 1). Il s'agit d'un système sans stockage et avec recyclage total ou partiel d'air [9, 15, 16, 24]. C'est un prototype de séchoir réel destiné aux petites exploitations agricoles.

Les feuilles de marjolaine sont pesés et répartis en couche mince sur des claies en plastique de la chambre de séchage. La densité de chargement de chaque claie est 3 kg/m^2 du produit frais. Des études antérieures ont montré que le produit de la claie inférieure sèche plus vite que celui de la claie supérieure [24, 25]. Ainsi, durant tous les essais, seul la première claie est utilisée. Les échantillons sont uniformément et régulièrement répartis en couche mince afin d'assurer une homogénéité de diffusion lors de l'opération de séchage.

La variation de la masse humide du produit $M_h(t)$ en fonction du temps est déterminée en faisant des pesées successives d'une durée de 30 s, au moyen d'une balance de précision $\pm 0,001g$. Le pas de temps varie de 10min au début des essais jusqu'à 1h vers la fin de l'expérience. À la fin de chaque expérience, on procède à l'étuvage du produit séché à $105^\circ C$ pendant 24 h pour déterminer sa masse sèche M_s . La teneur en eau des échantillons en fonction du temps est obtenue en appliquant l'équation (I.1)

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les différentes conditions expérimentales de séchage sont présentées dans le tableau I.2. Les expériences de séchage sont réalisées pour trois températures de l'air asséchant (40, 50 et $60 \pm 0,1^\circ\text{C}$) et pour deux débits d'air ($0,028$ et $0,056 \pm 0,002 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps est présentée dans la figure I.2 pour l'ensemble des six essais (deux débits et trois températures de l'air asséchant).

Les courbes expérimentales décrivant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps et de la teneur en eau sont présentées respectivement dans les figures I.3 et I.4. Les différentes courbes expérimentales obtenues ont montré une allure de séchage décroissante. Cependant, on note l'absence de la phase 0 (phase à allure croissante) et de la phase I (à allure constante), et la présence unique de la phase II (à allure décroissante) dans les courbes de séchage solaire convectif en couches minces des feuilles de marjolaine. Les mêmes résultats ont été obtenus pour différents produits végétaux [24, 26, 27, 28]. Le séchage durant la phase à allure décroissante est régi par la diffusion d'eau dans le solide. C'est un mécanisme complexe impliquant l'eau dans deux états liquide et vapeur, qui est souvent caractérisé par la diffusion effective. Cette propriété dépend de la température, de la pression et de la teneur en eau du produit [29, 30].

Pour un même débit d'air asséchant, la vitesse de séchage augmente quand la température de l'air asséchant croît et par conséquent la teneur en eau des feuilles marjolaine diminue considérablement (Figure I.5). L'influence du débit d'air asséchant (D_v) sur la vitesse de séchage des feuilles marjolaine est illustrée sur la figure (I.6). Nous constatons que pour une même température de l'air asséchant, une augmentation du débit d'air asséchant favorise l'accélération du processus de séchage en impliquant des échanges convectifs.

À partir des six essais de séchage, nous avons établi la corrélation exprimant la vitesse de séchage normée des feuilles de marjolaine sous forme d'un polynôme d'ordre 4 en X^* (figure I.7). Nous avons utilisé la méthode d'optimisation non linéaire de Marquard-Levenberg en utilisant le logiciel Origin 6.1 et en traitant tous les points expérimentaux. Le meilleur lissage est obtenu en choisissant comme critère d'évaluation un coefficient de corrélation r élevé et une erreur systématique moyenne ESM minimale.

$$f = 0,0923 - 0,0642 X^* + 3,6143 X^{*2} - 6,2326 X^{*3} + 3,5775 X^{*4} \quad (\text{I.11})$$
$$r = 0,9572 \quad \text{ESM} = 0,0608$$

Les courbes présentant les teneurs en eau réduites en fonction du temps de séchage sont décrites par six modèles. Les coefficients de chaque modèle de séchage sont déterminés (Tableau I.3). Le modèle Logarithmique a montré une bonne corrélation avec les courbes expérimentales avec un r de 0.9986 et un χ^2 de $5,2154 \cdot 10^{-5}$. En effet, la figure (I.8) montre une parfaite concordance entre les teneurs en eau réduites expérimentales et les teneurs en eau réduites calculées par le modèle Logarithmique.

La diffusivité effective D_{eff} est typiquement calculée par la méthode graphique en représentant les données de séchage expérimentales en terme du logarithme népérien de la teneur en eau réduite X^* en fonction du temps de séchage. Le résultat est une droite de pente $\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \right)$, ce qui permet de calculer le coefficient de diffusion effectif pour différentes conditions aérothermiques (Tableau I.4).

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

Les courbes de la figure (I.9) montrent les effets simultanés de la température et du débit d'air asséchant sur la diffusivité effective D_{eff} . On remarque une augmentation de D_{eff} avec la température et avec le débit d'air chaud.

L'équation (I.10) peut être réarrangée sous la forme :

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (\text{I.12})$$

L'énergie d'activation est calculée en représentant le logarithme népérien des valeurs expérimentales de la diffusivité effective D_{eff} en fonction de l'inverse de la température. C'est une droite qui indique la dépendance d'Arrhenius dans la gamme de températures étudiées. Cette dépendance peut être représentée par l'équation suivante tirée de la figure (I.10) qui représente l'influence de la température de l'air asséchant sur la diffusivité effective.

$$D_{\text{eff}} = 322,8216 \exp \left(\frac{-9824,8370}{T} \right) \quad (\text{I.13})$$

De la pente de la droite décrite par l'équation (I.12) et représentée sur la figure (I.10), on tire une énergie d'activation des feuilles de marjolaine de : $E_a = 82 \text{ kJ.mol}^{-1}$ avec un coefficient de corrélation $r=0,9936$.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, les expériences de séchage solaire convectif en couche mince des feuilles de marjolaine sont effectuées pour trois températures (40, 50 et 60 °C) et pour deux débits d'air asséchant (0,0227 et 0,0556 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$). Les courbes expérimentales obtenues ont montré une allure de séchage décroissante. Le principal facteur qui influe les cinétiques de séchage est la température de l'air asséchant. La courbe caractéristique de séchage est obtenue et l'équation de la vitesse de séchage est déterminée empiriquement.

L'analyse statistique des résultats expérimentaux en coordonnées réduites $X^*(t)$, lissés par six modèles a permis de conclure que le modèle Logarithmique est le plus approprié pour la description des cinétiques de séchage solaire convectif en couche mince des feuilles de marjolaine.

Le coefficient effectif de diffusion, qui regroupe les différents phénomènes de transport, est déterminé selon une loi analogue à la seconde loi de Fick (approximation de Madamba). Les effets simultanés de la température et du débit d'air asséchant sur la diffusivité effective D_{eff} sont mentionnés. On remarque une augmentation de D_{eff} avec la température et avec le débit d'air chaud. L'énergie d'activation, qui représente la barrière énergétique que le système doit franchir pour se stabiliser, est déterminée en utilisant l'équation d' Arrhenius.

NOMENCLATURE

D_v	débit de l'air asséchant ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	M_h	masse humide du produit
ESM	erreur systématique moyenne	M_s	masse sèche du produit
F	vitesse de séchage normée	N	nombre de points expérimentaux
X_{eq}	teneur en eau d'équilibre (% MS)	n	nombre de constantes du modèle

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

X^* teneur en eau réduite $X_{exp,i}^*$ i ^{ème} teneur en eau réduite expérimentale $X_{pre,i}^*$ i ^{ème} teneur en eau réduite prédite a, b, c, Coefficients des modèles utilisés k, k_0 , k_1 et n D_{eff} Diffusivité effective ($m^2 \cdot s^{-1}$)	r coefficient de corrélation T température absolue (K) Ha humidité relative de l'air (%) t temps de séchage (min) θ température de l'air asséchant ($^{\circ}C$) E_a énergie d'activation ($kJ \cdot mol^{-1}$) MS matière sèche
---	---

Tableau (I.1) : Modèles de séchages appliqués à la description des courbes de séchage des feuilles de marjolaine [18, 19]

Nom du modèle	Expression du modèle
Newton	$X^* = \exp -kt$
Page	$X^* = \exp -kt^n$
Logarithmique	$X^* = a \exp -kt + c$
Two-term	$X^* = a \exp -k_0t + b \exp -k_1t$
Wang et Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$
Verma <i>et al.</i>	$X^* = a \exp -kt + (1 - a) \exp -k_0t$

Tableau (I.2) : Conditions expérimentales de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine

Essai n ^o	D_v ($m^2 \cdot s^{-1}$)	$\theta \pm 0,1$ ($^{\circ}C$)	$Ha \pm 2$ (%)	t (min)
1	0,028	40	53,1	425
2	0,028	50	47,3	105
3	0,028	60	43,0	80
4	0,056	40	45,2	340
5	0,056	50	46,5	90
6	0,056	60	49,5	40

Tableau (I.3) : Modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage des feuilles de marjolaine

Modèle	Coefficients	r	ESM	χ^2
Newton	k=0,0190	0,9818	0,0596	$5,3111 \cdot 10^{-3}$
Page	k=0,0040 ; n=1,400	0,9974	0,0242	$1,2732 \cdot 10^{-4}$
Logarithmique	a=1,0223 ; k=0,0249 ; c=-0,0422	0,9986	0,0194	$5,2154 \cdot 10^{-5}$
Two-term	a=0,9308 ; $k_0=0,0204$; b=0,1307 ; $k_1=0,0206$	0,9856	0,0650	$5,6506 \cdot 10^{-3}$
Wang et Singh	a=-0,0141 ; b= $4,4424 \cdot 10^{-5}$	0,9965	0,0280	$1,8441 \cdot 10^{-4}$
Verma <i>et al.</i>	a= $6,7371 \cdot 10^4$; k=0,0050 ; $k_0=0,0050$	0,9960	0,0318	$2,2809 \cdot 10^{-4}$

Tableau (I.4) : Valeurs de la diffusivité effective D_{eff} des feuilles de marjolaine pour différentes conditions aérothermiques

Essai n°	$D_v(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	θ (°C)	$D_{\text{eff}} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	r
1	0,028	40	$7,19 \cdot 10^{-12}$	0,9947
2	0,028	50	$4,54 \cdot 10^{-11}$	0,9872
3	0,028	60	$4,71 \cdot 10^{-11}$	0,9886
4	0,056	40	$1,01 \cdot 10^{-11}$	0,9412
5	0,056	50	$5,79 \cdot 10^{-11}$	0,9969
6	0,056	60	$1,17 \cdot 10^{-10}$	0,9682

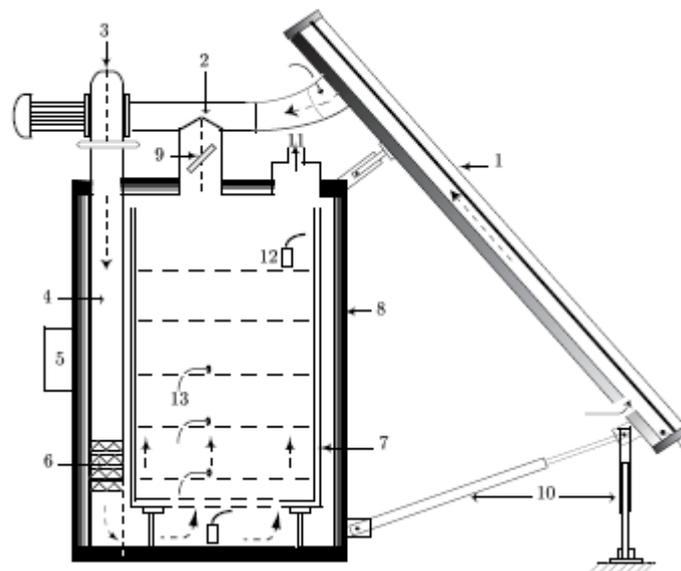


Figure (I.1) : Coupe schématique du séchoir solaire indirect (LESPAM, ENS Marrakech)

- (1) isolateur, (2) conduite de ventilation, (3) ventilateur, (4) conduit d'aspiration, (5) boîte de commande, (6) appoint électrique, (7) étages, (8) armoire de séchage, (9) volet d'air, (10) entrée d'air, (11) sortie d'air, (12) sonde d'humidité, (13) thermocouple.

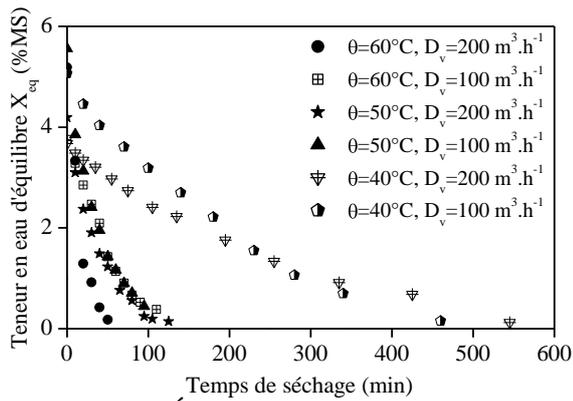


Figure (I.2) : Évolution de la teneur en eau des feuilles de marjolaine en fonction du temps de séchage pour différentes conditions de l'air asséchant

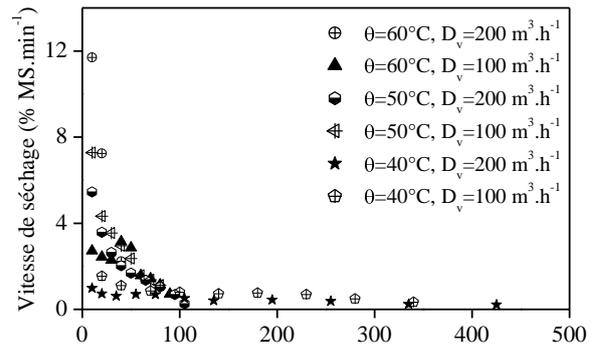


Figure (I.3) : Évolution de la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine en fonction du temps pour différentes conditions de l'air asséchant

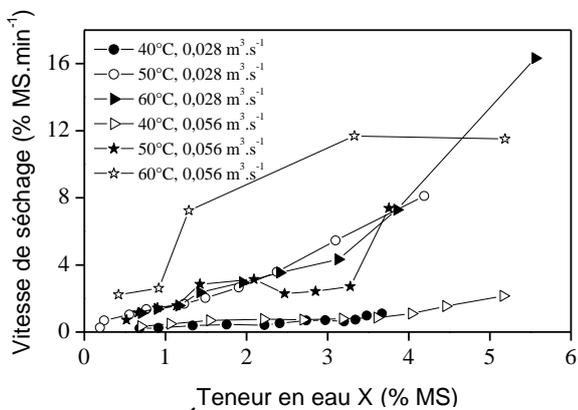


Figure (I.4) : Évolution de la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine en fonction de la teneur en eau pour différentes conditions de l'air asséchant

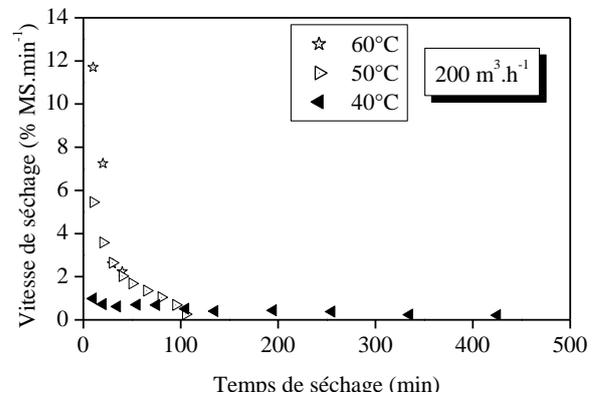


Figure (I.5) : Influence de la température sur la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine

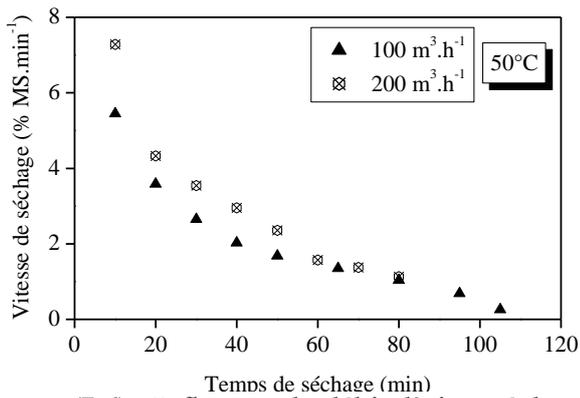


Figure (I.6) : Influence du débit d'air asséchant sur la vitesse de séchage des feuilles de marjolaine

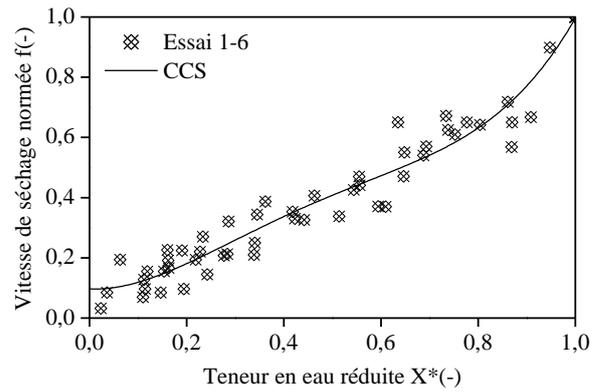


Figure (I.7) : Courbe caractéristique de séchage des feuilles de marjolaine

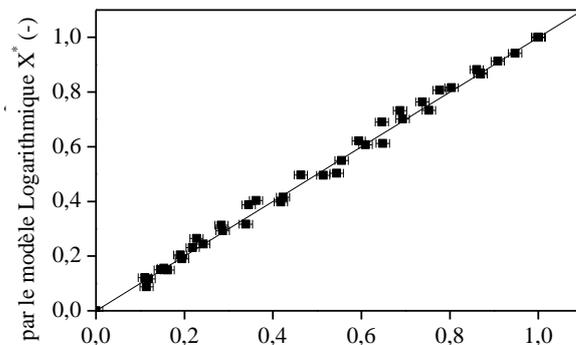


Figure (I.8) : Teneur en eau réduite prédite par le modèle Logarithmique en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale des feuilles de marjolaine

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

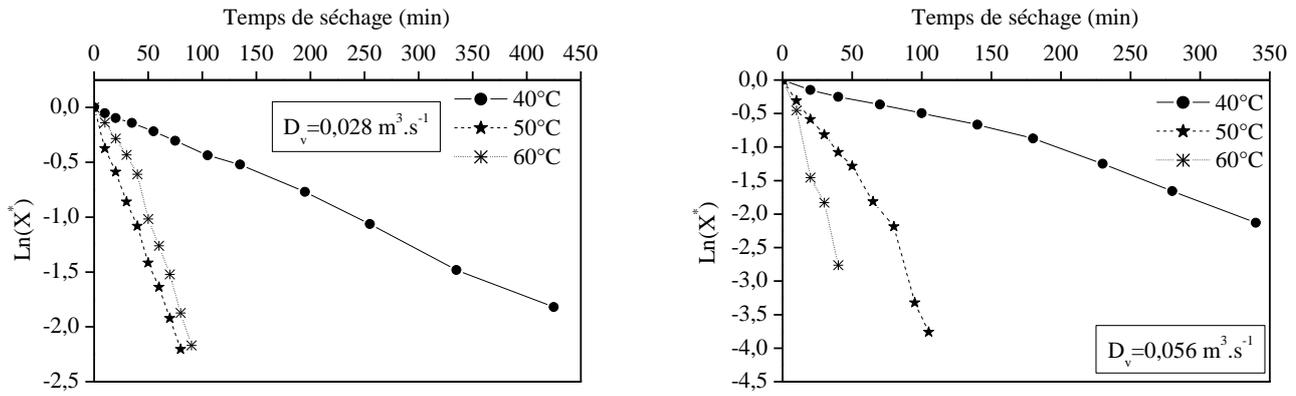


Figure (I.9) : Effets simultanés de la température et du débit d'air sur le coefficient de diffusion effectif des feuilles de marjolaine

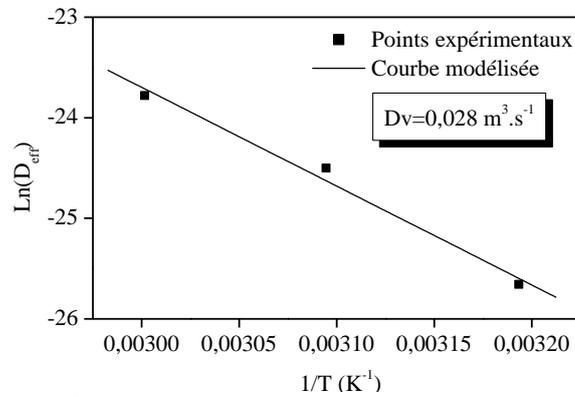


Figure (I.10) : Influence de la température de l'air asséchant sur le coefficient de diffusion effectif des feuilles de marjolaine

II. EQUILIBRE HYGROSCOPIQUE ET PROPRIETES THERMODYNAMIQUES DES FEUILLES DE MARJOLAINE

1. INTRODUCTION

L'origan est originaire du bassin méditerranéen et sa cousine la marjolaine vient de plus loin : le sud-ouest de l'Asie. Maintenant, ils sont tous deux cultivés dans de nombreux pays. Symbole de bonheur et de joie, les jeunes mariés grecs en portent des couronnes tressées. La marjolaine est utilisée surtout comme parfum, désinfectant et conservateur. Des recherches récentes ont démontré ses vertus thérapeutiques et ses propriétés antiseptique, vasodilatatrice, antirhumatisme, expectorante, antalgique et calmante [1-3].

La bonne connaissance du caractère hygroscopique d'un matériau est une des clés de la bonne appréciation des processus de séchage. En effet, un matériau est séché pour être ensuite utilisé pour une application particulière nécessitant généralement une teneur en eau précise liée à la stabilité du produit.

Dans le domaine hygroscopique, où l'eau qui se déplace n'est plus qu'eau liée ou vapeur d'eau, il existe une relation macroscopique entre la teneur en eau d'équilibre du produit et le milieu environnant. L'isotherme de sorption lie la teneur en eau d'équilibre, pour une température donnée, et l'humidité relative de l'environnement entourant le produit. Elle est caractéristique des nombreuses interactions entre le squelette solide et les molécules d'eau qui ont lieu à l'échelle microscopique [4]. Cette courbe exprime :

- en ordonnée : la teneur en eau d'équilibre du produit, exprimée en kg d'eau par kg de matière sèche (% MS).
- en abscisse : soit la concentration en vapeur d'eau de l'atmosphère en équilibre avec le produit, exprimée en humidité relative d'équilibre (HR_{eq}), soit l'activité de l'eau dans le produit (a_w).

Devant la complexité des phénomènes intervenant lors de la sorption de l'eau, quatre modèles mathématiques reposant sur des bases plus ou moins physiques ont été testés. Trois modèles avec trois paramètres (BET modifié, Halsey modifié et GAB) et un modèle avec quatre paramètres (Peleg).

L'utilisation d'un modèle convenable pour l'analyse de données expérimentales est une étape essentielle dans les études de conception et d'optimisation d'une unité de séchage. Les produits agroalimentaires sont des mélanges chimiques complexes où les réactions de concurrence obscurcissent souvent l'équilibre de sorption. Une théorie prometteuse qui a été largement appliquée pour étudier les phénomènes physico-chimiques [5-7] est la théorie de compensation enthalpie-entropie. Cette théorie approuve que la compensation résulte des changements naturels de l'interaction entre le corps dissous et le dissolvant causant la réaction et que le rapport entre l'enthalpie et l'entropie soit linéaire [8].

Notre travail a pour objectifs :

- déterminer les isothermes de sorption de la marjolaine pour optimiser les conditions hygroscopiques d'équilibre en vue d'une valorisation et une meilleure conservation durant l'opération de stockage,
- déterminer un modèle de transfert d'eau adéquat et reposant sur une comparaison entre des profils de teneur en eau calculés et mesurés [9, 10].
- étudier et calculer les propriétés thermodynamiques de la marjolaine.

2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

2.1 Matériel et mode opératoire

Les procédures d'obtention des isothermes de sorption de l'eau des produits agroalimentaire sont décrites en détail par plusieurs auteurs [11, 12]. Parmi ces procédures, on utilise soit des méthodes dynamiques où l'échantillon est placé dans un courant de gaz de température et d'humidité maintenues constantes, sans agitation d'air, soit des procédures statiques où l'échantillon à adsorber ou à désorber, est placé dans des enceintes contenant des solutions de sels saturées et maintenues à température et à humidité relative constantes, jusqu'à atteindre l'équilibre thermodynamique.

Pour déterminer les isothermes d'adsorption et de désorption de la marjolaine, nous avons opté pour la méthode des solutions salines saturées. Diverses solutions salines saturées sont préparées (tableau II.1) : la gamme obtenue permet d'obtenir les teneurs en eau sur l'ensemble de la gamme d'hygrométrie. Les solutions de sels saturés utilisées sont : KOH, (MgCl₂, 6H₂O), K₂CO₃, NaNO₃, KCl et (BaCl₂, 2H₂O). Ces solutions sont préparées dans des bocaux hermétiques et sont maintenues isothermes dans une étuve régulée en température [13, 14]. L'échantillon est suspendu dans le bocal, au-dessus des sels, (Figure II.1) et reste donc dans une ambiance stabilisée en température et en hygrométrie.

Le problème essentiel des mesures effectuées par cette méthode statistique est que le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre est très long ; la vitesse de diffusion de la vapeur d'eau est un facteur limitant [15]. Mais cette méthode présente notamment l'avantage de permettre d'obtenir de façon continue toutes les valeurs de l'humidité relative entre 5 et 90 % [16, 17].

On effectue régulièrement la pesée de l'échantillon, jusqu'à ce que le poids mesuré ne varie plus : on atteint alors l'équilibre hygroscopique. On détermine l'extrait sec de l'échantillon : on connaît alors, pour une hygrométrie donnée, la teneur en eau de l'échantillon. Si l'échantillon placé dans l'enceinte est humide, on obtient la courbe de désorption : c'est à dire que l'échantillon perd de l'eau pour atteindre l'équilibre. Par contre, si l'échantillon est sec initialement, on obtient une courbe d'adsorption. Les figures (II.2) et (II.3) illustrent ces résultats.

2.2 Critères statistiques de choix des modèles décrivant les isothermes de sorption

De nombreuses équations ont été proposées pour modéliser les isothermes de sorption. Certaines se basent sur un modèle théorique d'adsorption, alors que d'autres sont de nature empirique. Un inconvénient de ces relations est qu'elles ne sont pas applicables sur toute la gamme des humidités relatives.

Dans ce travail, nous avons étudié en détails quatre modèles mathématiques utilisés par plusieurs auteurs [17-19] pour l'ajustement et la modélisation des isothermes de sorption des produits étudiés. Le tableau (II.2) regroupe les modèles utilisés et leurs équations.

Le principe de la méthode des moindres carrés est appliqué à des modèles non linéaires par rapport aux paramètres à identifier. Le coefficient de corrélation (r) reste le premier critère d'ajustement. La méthode de résolution utilisée dans ce travail est l'algorithme de Levenberg-Marquardt avec le logiciel CurveExpert 3.1 et le logiciel Origine 6.0. Ces logiciels proposent comme critères d'ajustement et de choix du modèle adéquat, le calcul de l'écart type de X_{eq} autour de la ligne d'ajustement, appelée l'erreur type d'estimation (ESH), et l'erreur relative moyenne (EMR). Ces paramètres statistiques sont définis comme suit :

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_{eq_{i,pre}} - \overline{X_{eq_{i,exp}}}}{\sum_{i=1}^N X_{eq_{i,exp}} - \overline{X_{eq_{i,exp}}}}^2} \quad (II.1)$$

La teneur en eau moyenne expérimentale est définie par : $\overline{X_{eq_{i,exp}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{eq_{i,exp}}$

$$ESH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_{eq_{i,exp}} - X_{eq_{i,pre}}}{d_f}}^2 \quad (II.2)$$

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eq_{i,exp}} - X_{eq_{i,pre}}}{X_{eq_{i,exp}}} \right| \quad (II.3)$$

Avec

$X_{eq_{i,exp}}$: $i^{\text{ème}}$ teneur en eau expérimentale d'équilibre (% MS)

$X_{eq_{i,pre}}$: $i^{\text{ème}}$ teneur en eau prédite d'équilibre (% MS)

N : nombre de points expérimentaux ; dans notre cas ($N=6$)

d_f : degré de liberté de la régression du modèle ; $d_f = N-n$

n : nombre de variables de chaque modèle

Pour identifier les paramètres du modèle et savoir si les résidus entre les valeurs calculées avec le modèle et celles de l'expérience sont minimales, on procède au calcul de l'erreur résiduelle, définie par :

$$e_i = X_{eq_{i,exp}} - X_{eq_{i,pre}} \quad (II.4)$$

2.3 Chaleur isostérique ou enthalpie différentielle de sorption

La chaleur isostérique de sorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron (Éq. 5) [20-23]. Cette relation nécessite de déterminer les isothermes à différentes températures afin de calculer la variation logarithmique de l'humidité relative en fonction de l'inverse de la température, pour une teneur en eau d'équilibre fixée. Cependant, à partir des équations modifiées, il est possible d'obtenir l'expression analytique de la chaleur de sorption Q_{st} . Cette approche suppose que la chaleur isostérique ne varie pas avec la température.

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{Q_{st} - L_v}{R} = \frac{-q_{st}}{R} \quad (II.5)$$

Où

Q_{st} : chaleur isostérique de sorption (kJ.mol^{-1})

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

- q_{st} : chaleur isostérique nette de sorption à la teneur en eau d'équilibre X_{eq} ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)
 T : température absolue (K)
 R : constante des gaz parfaits ($8,3145 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
 L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau pure ($43,53 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) à 35°C

La chaleur isostérique nette représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat, c'est-à-dire la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure qu'il faudrait fournir au produit pour le déshydrater. Le calcul de q_{st} peut se faire en exploitant les courbes isothermes de sorption obtenues à différentes températures. La valeur de q_{st} augmente généralement à mesure que le degré de déshydratation avance. La chaleur isostérique se calcule par la relation :

$$Q_{st} = q_{st} + L_v \quad (\text{II.6})$$

2.4 Théorie de compensation enthalpie-entropie

L'entropie différentielle peut être calculée à partir de l'équation de Gibbs-Helmholtz (Eq. II.7) ou l'énergie libre de Gibbs est calculée par l'équation (8) [24].

$$\Delta S = \frac{q_{st} - \Delta G}{T} \quad (\text{II.7})$$

$$\Delta G = RT \ln(a_w) \quad (\text{II.8})$$

En substituant l'équation 8 dans l'équation 7 et en arrangeant le résultat, nous obtenons :

$$\ln(a_w) = \frac{-q_{st}}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (\text{II.9})$$

Selon la théorie de compensation, le rapport linéaire entre l'enthalpie et l'entropie pour une réaction spécifique est donné par :

$$q_{st} = T_\beta \Delta S + \Delta G_\beta \quad (\text{II.10})$$

La température isocinétique, T_β représente la température à laquelle toutes les réactions de la série procèdent au même taux et l'énergie libre à la température T_β , ΔG_β fournit un critère pour évaluer si le processus de la sorption d'eau est spontanée ($-\Delta G_\beta$) ou non ($+\Delta G_\beta$).

La chaleur isostérique nette de sorption n'est autre que le coefficient directeur de la courbe $\ln(a_w)$ en fonction de $\left(\frac{1}{T}\right)$ pour une humidité du produit constante à R près. L'entropie différentielle, quant à elle, représente l'intersection de la courbe avec l'axe des ordonnées à R près.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Isothermes de sorption de la marjolaine

L'équilibre hygroscopique des feuilles de marjolaine est atteint au bout de 12 jours pour la désorption et au bout de 9 jours pour l'adsorption. Les teneurs en eau d'équilibre X_{eq} sont groupés dans le tableau 3 pour trois températures 30°C, 40°C et 50°C.

Les isothermes de désorption et d'adsorption expérimentales sont présentées dans la figure (II.2). Elles ont une allure sigmoïdale (isotherme de type II), ceci est en concordance avec le comportement des autres produits agroalimentaires et plantes médicinales et aromatiques [25-27].

Les courbes expérimentales obtenues montrent que pour une même activité de l'eau, la teneur en eau d'équilibre augmente quand la température diminue. Des résultats similaires ont été rapportés dans la littérature [17, 28, 29, 30].

Les isothermes d'adsorption et de désorption à 40°C des feuilles de marjolaine s'accompagnent d'un phénomène d'hystérésis plus marqué (figure II.3). Ce phénomène s'explique en considérant que les pores de structures rigides sont liés avec le milieu ambiant par capillarité. Lors de l'adsorption, les capillaires fins désorbent l'eau puisque le milieu ambiant a une humidité relative plus grande que celle des pores. Quand la pression partielle de la vapeur d'air devient supérieure à celle du liquide dans les capillaires, l'humidité change à l'intérieur des pores [31].

3.2 Modélisation des isothermes de sorption des feuilles de marjolaine

Les courbes de sorption expérimentales et modélisées par les équations utilisés, sont illustrées par les figures (II.4) et (II.5). Une simple analyse des quatre modèles statistiques montre que le modèle de Peleg à 4 paramètres est le plus approprié pour décrire les isothermes de sorption de marjolaine. Ce modèle présente les coefficients de corrélation r les plus élevés et des erreurs d'estimation ESH et EMR les plus faibles. Les tableaux (II.4) et (II.5) présentent les paramètres statistiques et les coefficients des modèles utilisés.

3.3 Propriétés thermodynamiques des feuilles de marjolaine

La chaleur isostérique peut être calculée à partir des isostères de sorption ; données par l'équation (II.5), pour une teneur en eau d'équilibre constante. La figure (II.6) présente les chaleurs isostériques d'adsorption et de désorption de marjolaine à des températures variant entre 30 et 50°C.

Cette courbe montre que la chaleur isostérique est plus importante pour les faibles valeurs de la teneur en eau, ce qui illustre la forte liaison de l'eau avec le substrat, et elle devient négligeable devant la chaleur latente de vaporisation de l'eau pour des teneurs en eau élevées [32]. L'énergie nécessaire au processus de désorption est supérieure à l'énergie nécessaire au phénomène d'adsorption. Des résultats similaires sont cités par d'autres auteurs [17, 33, 34, 30]. Les valeurs obtenues expérimentalement ont été corrélées avec satisfaction par les relations polynomiales suivantes :

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

$q_{st}(des) \text{ (kJ.mol}^{-1}\text{)}$	$q_{st}(ads) \text{ (kJ.mol}^{-1}\text{)}$
$73,2788-6,3017 X_{eq} + 0,1483 X_{eq}^2$	$4,8074-0,2756 X_{eq} + 0,0074 X_{eq}^2$
$r = 1$	$r = 1$

L'entropie différentielle de sorption est calculée à partir de l'équation (II.9). La méthode d'optimisation non linéaire basée sur l'algorithme de Marquardt-Levenberg est appliquée pour calculer l'entropie différentielle de sorption de marjolaine. L'entropie différentielle n'est autre que l'intersection de la courbe avec l'axe des ordonnées à R près. La figure (II.7) présente les entropies différentielles d'adsorption et de désorption de marjolaine pour les températures 30, 40 et 50°C. Les valeurs obtenues expérimentalement sont corrélées, avec un coefficient de corrélation voisin de l'unité, par les polynômes suivants :

$\Delta S(des) \text{ (J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$	$\Delta S(ads) \text{ (J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$
$206,5612-18,0066X_{eq} + 0,4280X_{eq}^2$	$13,4062-0,6431X_{eq} + 0,0124X_{eq}^2$
$r = 1$	$r = 1$

3.4 Théorie de compensation

Le processus de compensation enthalpie-entropie manifeste thermodynamiquement la structuration-déstructuration de l'eau. La connaissance du changement de la chaleur isostérique, et donc aussi du changement d'entropie différentielle, calculé à partir de l'équation de Gibbs-Helmholtz, est intéressante car elle offre un niveau d'information supplémentaire pour caractériser l'association de deux molécules.

La figure (II.8) met en évidence cette théorie de compensation pour des feuilles de marjolaine. Selon cette théorie, le rapport linéaire entre l'enthalpie et l'entropie pour une réaction spécifique est donné par l'équation (II.10). La température iso cinétique, T_β représente la température à laquelle toutes les réactions de la série procèdent au même taux et l'énergie libre à la température T_β , ΔG_β fournit un critère pour évaluer si le processus de la sorption d'eau est spontané ($-\Delta G_\beta$) ou non ($+\Delta G_\beta$). Les valeurs obtenues expérimentalement pour des feuilles de marjolaine sont :

$T_\beta \text{ (K)}$	$T_\beta \text{ (K)}$	$\Delta G_\beta \text{ (J.mol}^{-1}\text{)}$	$\Delta G_\beta \text{ (J.mol}^{-1}\text{)}$
(désorption)	(adsorption)	(désorption)	(adsorption)
357,84	204,99	320,14	1076,12

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

4. CONCLUSION

Les courbes d'adsorption et de désorption des feuilles de marjolaine ont été déterminées expérimentalement pour trois températures (30, 40 et 50°C). Ces courbes sont décrites par quatre modèles mathématiques. On remarque que les courbes prédites par le modèle de Peleg coïncident avec les points expérimentaux dans le domaine d'activités allant de 0 à 0,9. Le modèle de BET décrit aussi les isothermes de sorption des feuilles de marjolaine pour des activités de l'eau inférieures à 0,5. Le phénomène d'hystérésis thermique, qui montre l'effet de mémoire des produits végétaux et agroalimentaires sur leurs propriétés hygroscopiques, a été observé pour les feuilles de marjolaine. La nature de l'interaction eau-produit est mise en évidence dans l'enthalpie différentielle de sorption. La courbe de la compensation entre l'enthalpie et l'entropie montre que la partie linéaire se corrèle bien pour la sorption d'eau de marjolaine, et que l'adsorption et la désorption de l'eau sont irréversibles, et que tous les deux sont des mécanismes d'entraînement enthalpiques.

NOMENCLATURE

A, B, C, D	coefficients des modèles	X_{eq}	teneur en eau d'équilibre (% MS)
ads	adsorption	EMR	Erreur moyenne relative (%)
a_w	activité de l'eau (-)	ESH	Erreur standard de l'humidité
B_0, C_0, h_1, h_2	coefficients du modèle de GAB	r	Coefficient de corrélation
MS	matière sèche	T	température absolue (K)
exp	expérimentale	ΔS	entropie de sorption ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)
pred	prédite par le modèle	ΔG	énergie libre ($J \cdot mol^{-1}$)
des	désorption	θ	température en (°C)

Tableau (II.1) : Valeurs standards des activités de l'eau des solutions salines utilisées

	KOH	MgCl ₂ , 6H ₂ O	K ₂ CO ₃	NaNO ₃	KCl	BaCl ₂ , 2H ₂ O
30°C	0,738	0,3238	0,4317	0,7275	0,8362	0,8980
40°C	0,626	0,3159	0,4230	0,7100	0,8232	0,8910
50°C	0,572	0,3054	0,4091	0,6904	0,8120	0,8823

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

Tableau (II.2) : Modèles mathématiques utilisés

Nom du modèle	Expression du modèle	Reference
BET modifié	$X_{eq} = \frac{A+B\theta}{1-a_w} \frac{Ca_w}{1-a_w+Ca_w}$	[35]
Halsey modifié	$a_w = \exp \left[\frac{-\exp(A+B\theta)}{X_{eq}^C} \right]$	[36]
GAB	$X_{eq} = \frac{ABCa_w}{1-Ba_w} \frac{1}{1-Ba_w+BCa_w}$ $B = B_0 \exp \left(\frac{h_1}{RT} \right) \text{ et } C = C_0 \exp \left(\frac{h_2}{RT} \right)$	[37]
Peleg	$X_{eq} = A(a_w)^C + B(a_w)^D$	[38]

Tableau (II.3) : Valeurs des équilibres de sorption des feuilles de marjolaine

30 °C			40 °C			50 °C		
a_w	Des	Ads	a_w	des	ads	a_w	des	ads
0,0738	8,1146	5,1724	0,0626	7,9254	4,9550	0,0572	7,9137	4,5455
0,3238	11,5556	8,2040	0,3159	10,9474	7,9812	0,3054	8,4211	7,8603
0,4317	15,1163	10,4803	0,4230	14,3737	9,7614	0,4091	9,9567	9,8684
0,7275	22,3256	14,7826	0,7100	21,9027	13,4694	0,6904	17,5055	13,0435
0,8362	27,5610	22,7074	0,8232	25,5000	20,4255	0,8120	23,2558	18,6441
0,8980	42,2222	32,3113	0,8910	37,5000	24,4444	0,8823	27,8075	22,1739

Tableau (II.4) : Constantes des modèles issues des isothermes de désorption de la marjolaine

	BET modifié	Halsey modifié	GAB	Peleg
A	-10,2872	8,5432	0,8563	29,0603
B	0,6237	-0,0864	$4,64 \cdot 10^9$	7,45
C	95,6	2,0179	6,9052	2,8873
D				0,2145
B_0			0,403	
C_0			$2,2000 \cdot 10^{-3}$	
h_1			2021,1579	
h_2			77148,8598	
r	1	0,9917	0,9847	0,9999
EMR %	3,2280	5,7505	7,0279	0,8173
ESH	0,4671	1,8126	2,8163	0,1703

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

Tableau (II.5) : Constantes des modèles issues des isothermes d'adsorption de la marjolaine

	BET modifié	Halsey modifié	GAB	Peleg
A	-16,6456	9,66	0,9326	13,7329
B	0,5588	-0,1008	4531,5551	52,1249
C	6,46E+01	2,1483	5,1616	0,3878
D				9,3076
B ₀			0,1961	
C ₀			10,7	
h ₁			3913,852	
h ₂			47425,8467	
r	1	0,9946	0,9936	0,9993
EMR %	0,7066	5,9779	7,98	2,8719
ESH	0,0682	0,8913	1,4879	0,5081

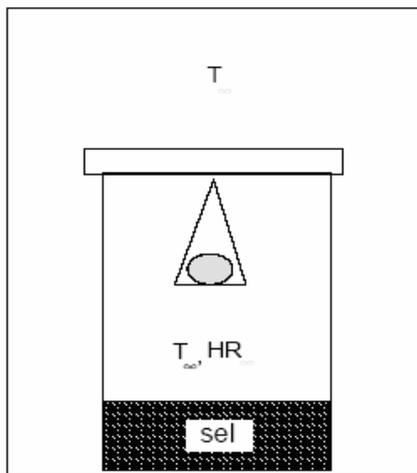


Figure (II.1) : Dispositif expérimental pour la mesure des isothermes de sorption

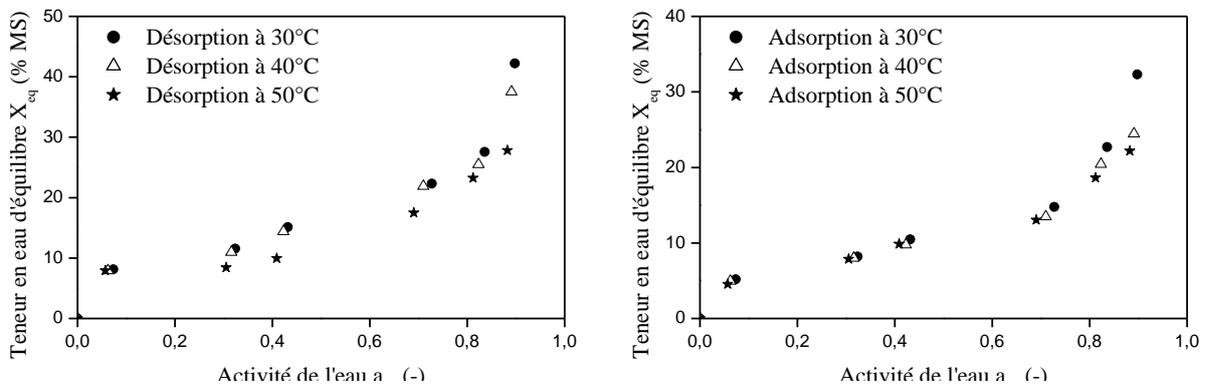


Figure (II.2) : Isothermes de désorption et d'adsorption dans le système marjolaine/eau

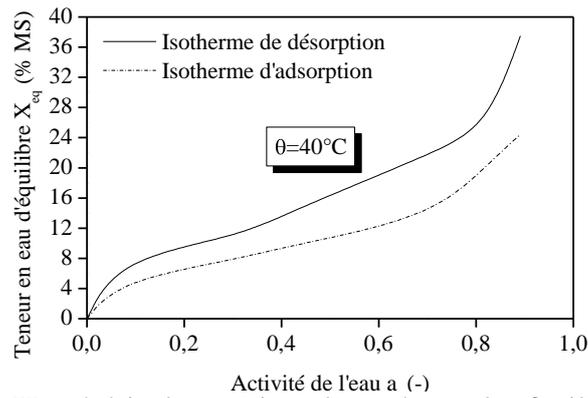


Figure (II.3) : Hystérésis de sorption observé pour les feuilles de marjolaine

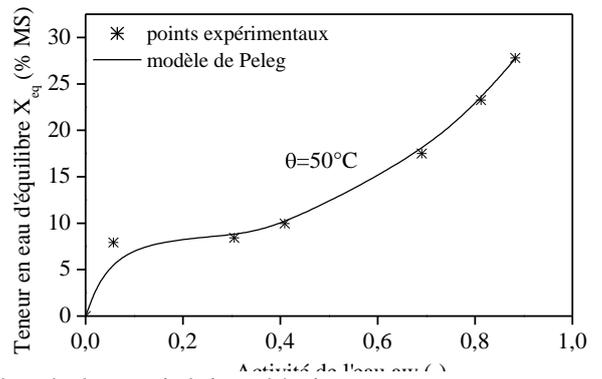
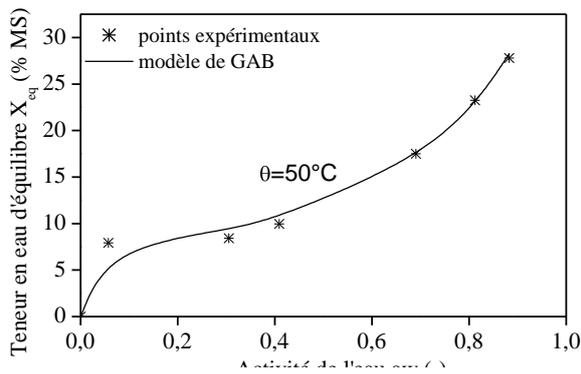
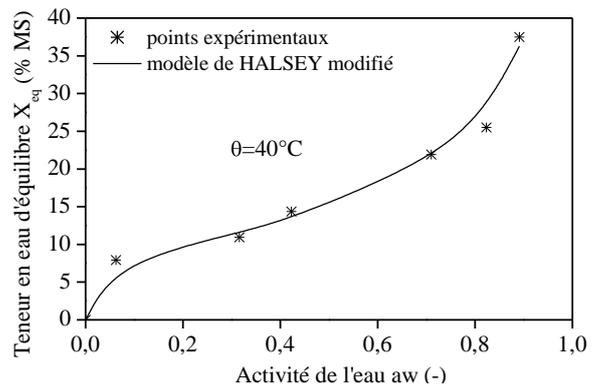
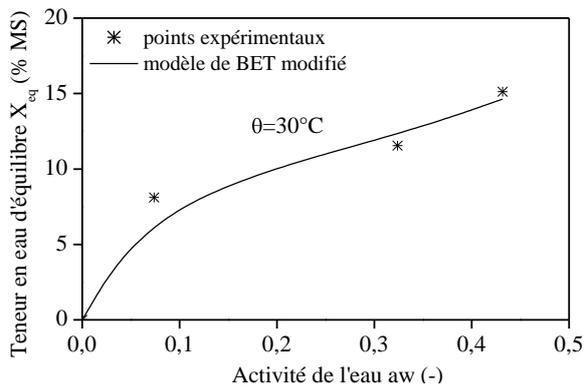


Figure (II.4) : Isothermes de désorption des feuilles de la marjolaine décrites par quatre modèles

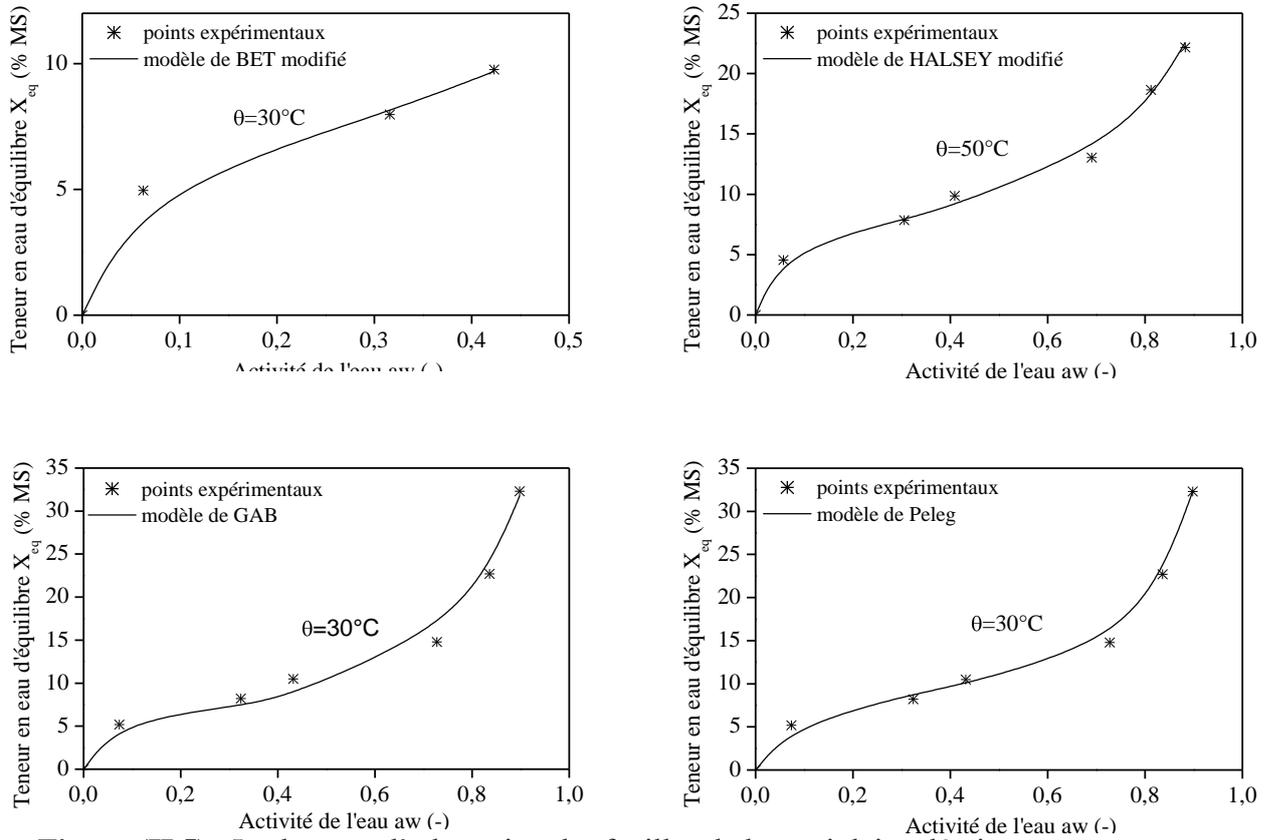


Figure (II.5) : Isothermes d’adsorption des feuilles de la marjolaine décrites par quatre modèles

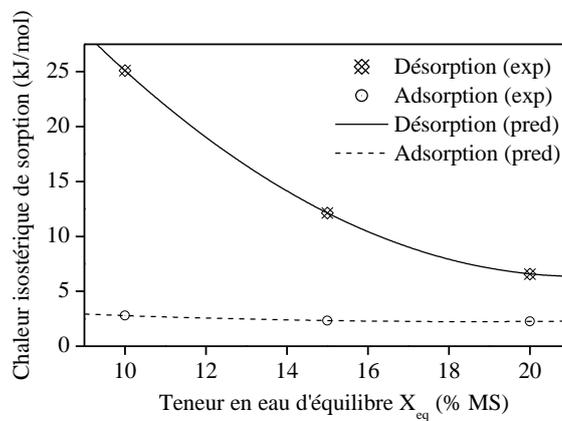


Figure (II.6) : Chaleurs isostériques d’adsorption et de désorption des feuilles de la marjolaine en fonction de la teneur en eau d’équilibre.

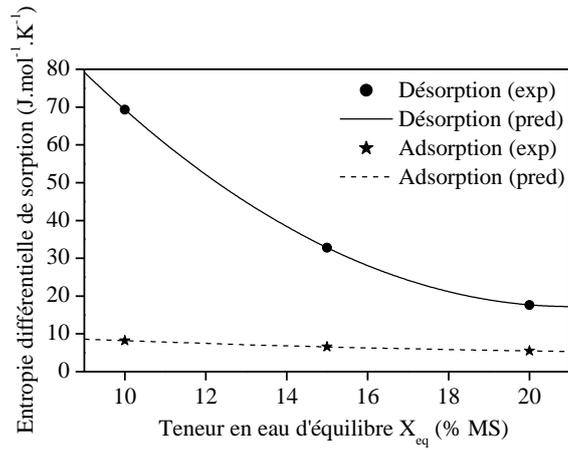


Figure (II.7) : Entropies différentielles d'adsorption et de désorption des feuilles de la marjolaine en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

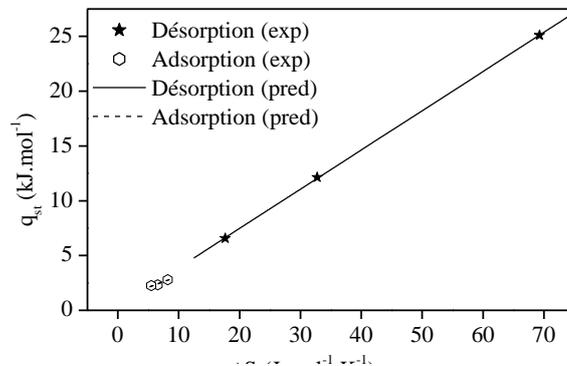


Figure (II.8) : Théorie de compensation enthalpie/entropie des feuilles de marjolaine

III. Modélisation de l'activité de l'eau et de l'enthalpie de la désorption d'eau de marjolaine (*Origanum majorana*)

1. Introduction

L'origan est originaire du bassin méditerranéen et sa cousine la marjolaine vient de plus loin : le sud-ouest de l'Asie. Maintenant, ils sont tous deux cultivés dans de nombreux pays. Symbole de bonheur et de joie, les jeunes mariés grecs en portent des couronnes tressées. La marjolaine est utilisée surtout comme parfum, désinfectant et conservateur. Des recherches récentes ont démontré ses vertus thérapeutiques et ses propriétés antiseptique, vasodilatatrice, antirhumatismale, expectorante, antalgique et calmante [1]. La détermination des isothermes de sorption de marjolaine est une étape indispensable dans l'étude de son séchage et sa conservation, du fait qu'elle permet de déterminer la teneur en eau d'équilibre et offre des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit. Afin de modéliser les courbes de sorption, de nombreuses corrélations empiriques existent dans la littérature. Nous avons appliqué trois modèles aux isothermes de sorption. Le modèle de GAB [2], qui repose sur une théorie de l'adsorption multimoléculaire localisée et homogène, décrit bien les courbes des isothermes de désorption de ce produit dans le domaine d'activités allant de 0 à 90%. L'enthalpie différentielle de désorption ou l'énergie nécessaire pour libérer les molécules d'eau liée au squelette solide est déterminée à partir de l'équation de Clausius-Clapeyron [3].

6. Matériel et mode opératoire

Le dispositif expérimental utilisé dans les expériences de désorption est présenté par la figure 1. Il consiste en une série de six bocaux de 1 litre chacun, remplis au quart environ de solutions différentes de sels saturées [4] (KOH, MgCl₂, K₂CO₃, NaNO₃, KCl et BaCl₂). Chaque bocal comporte un trépied porte-échantillon sur lequel est placé un flacon contenant une masse du produit environ 0,2 g pour la désorption. L'expérience consiste à mettre les échantillons à désorber dans des enceintes contenant des solutions de sels saturées et maintenues à température et à humidité relative constantes. A l'aide d'une balance électronique de précision, chaque échantillon est pesé régulièrement par intervalle de quatre jours jusqu'à atteindre la masse caractérisant l'équilibre thermodynamique (Me). Cet équilibre est obtenu au bout de onze jours. On procède à l'étuvage à 105°C pendant 24 heures pour déterminer les masses sèches correspondantes (Ms). Ainsi, on détermine la teneur en eau d'équilibre X_{eq}, par :

$$X_{eq} = \frac{M_e - M_s}{M_s} \quad (III.1)$$

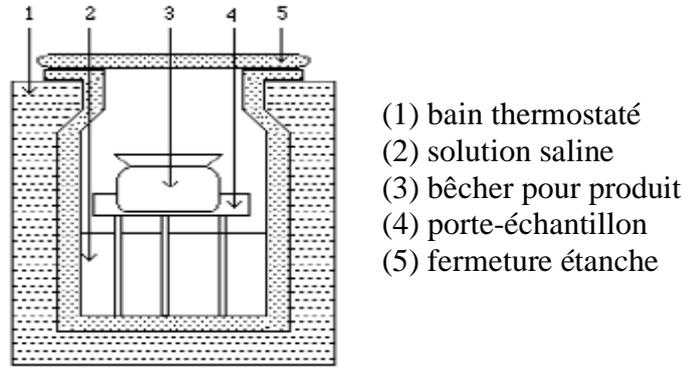


Figure (III.1) : Schéma d'une unité du dispositif expérimental

7. Modélisation des courbes de sorption de marjolaine

Plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme empirique pour décrire la relation graphique entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température. Dans ce travail, nous avons choisi six modèles (tableau III.1).

Tableau (III.1) : Modèles statistiques appliqués aux courbes de sorption de marjolaine

Auteurs	Modèle	Paramètres	Références
Guggenheim Anderson Boer (GAB)	$X_{eq} = \frac{ABC a_w}{1 - B a_w \quad 1 - B a_w + B C a_w}$	$B = B_0 e^{\left(\frac{h_1}{RT}\right)}$ $C = C_0 e^{\left(\frac{h_2}{RT}\right)}$ A	[2]
Henderson modifié	$1 - a_w = \exp[-A t + B X_{eq}^C]$	A, B, C	[5]
Peleg	$X_{eq} = A(a_w)^C + B(a_w)^D$	A, B, C, D C<1 et D>1	[6]

Les coefficients A, B, C et D sont des constantes empiriques qui peuvent être fonction de la température. Ils se déterminent en général à partir de l'expérience.

Pour identifier les paramètres du modèle et savoir si les résidus entre les valeurs calculées avec le modèle et celles de l'expérience sont minimales, on procède au calcul de l'erreur résiduelle, définie par :

$$e_i = X_{eq,i,exp} - X_{eq,i,pre} \tag{III.2}$$

$X_{eq,i,exp}$: i^{ème} teneur en eau expérimentale d'équilibre (% MS)
 $X_{eq,i,pre}$: i^{ème} teneur en eau prédite par le modèle (% MS)

8. Enthalpie de désorption de marjolaine

L'enthalpie de désorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron [7, 8, 9]. Cette relation nécessite de déterminer les isothermes à différentes températures afin de calculer la variation logarithmique de l'activité de l'eau en fonction de l'inverse de la température, pour une teneur en eau d'équilibre fixée.

$$\left(\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right)_{X_{eq}} = \frac{-q_{st}}{R} \tag{III.3}$$

- a_w : activité de l'eau
- q_{st} : enthalpie différentielle de désorption à la teneur en eau d'équilibre X_{eq} (kJ.mol⁻¹)
- T : température absolue (K)
- R : constante des gaz parfaits (8,3145 J.mol⁻¹.K⁻¹)

9. Résultats et discussion

Les données expérimentales des teneurs en eau d'équilibre de désorption de l'*Origanum majorana* pour trois températures (30, 40 et 50°C) sont illustrées par la figure (III.2). On remarque que plus la température augmente plus la teneur en eau diminue.

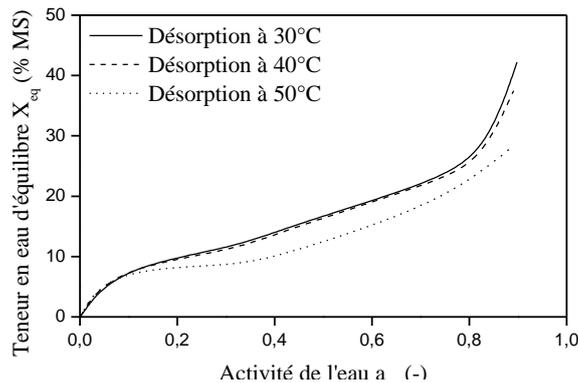


Figure (III.2) : Influence de la température sur les isothermes de désorption de marjolaine

La figure (III.2) montre que les isothermes de sorption ont une allure sigmoïdale, comme celles présentées communément par les produits agroalimentaires [10, 11, 12]. Les courbes expérimentales obtenues montrent que pour une même activité de l'eau, la teneur en eau d'équilibre augmente quand la température diminue.

Les valeurs des paramètres des modèles utilisés pour le lissage des isothermes de désorption de marjolaine sont obtenues par la méthode d'optimisation non linéaire de Marquardt-Levenberg en utilisant le logiciel Curve Expert 3.1. De l'analyse de l'ensemble des isothermes de désorption de l'*origanum majorana*, on peut conclure que, dans le domaine d'activités

Chapitre II Détermination des paramètres de séchage de la marjolaine

allant de 0 à 90%, les courbes du modèle de Peleg coïncident avec la plupart des points expérimentaux (figure III.3).

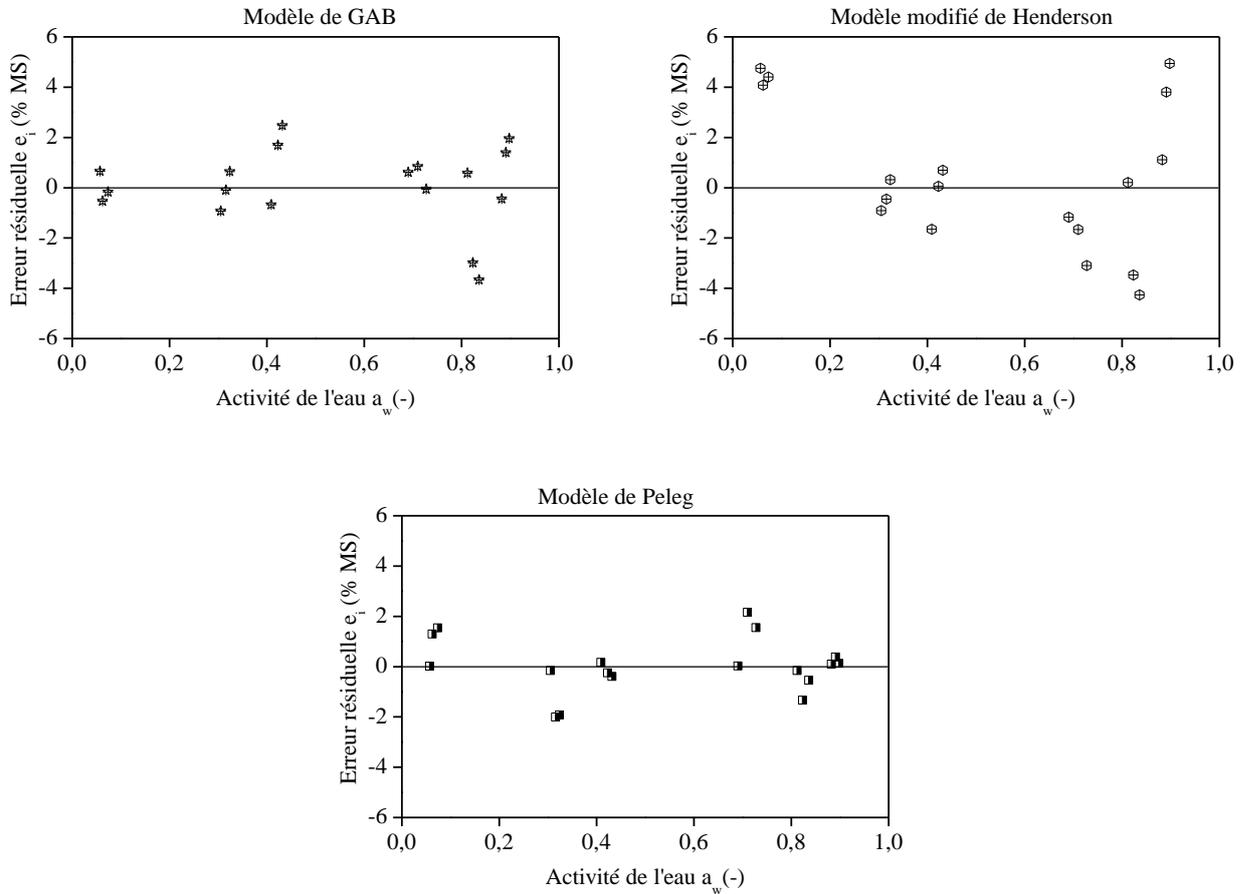


Figure (III.3) : Résidus des isothermes de désorption de marjolaine

La figure (III.4) présente l'enthalpie différentielle de désorption de marjolaine pour des températures variant entre 30 et 50°C.

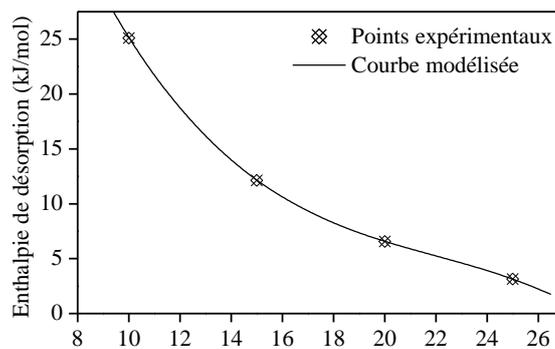


Figure (III.4) : Enthalpie de désorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre

Cette courbe montre que l'enthalpie est plus importante pour les faibles valeurs de la teneur en eau, ce qui illustre la forte liaison de l'eau avec le substrat, et elle devient négligeable devant la chaleur latente de vaporisation de l'eau pour des teneurs en eau élevées.

10. Conclusion

La détermination et la modélisation des isothermes de désorption constituent une étape incontournable dans tout procédé de séchage. À partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les isothermes de désorption des feuilles de marjolaine (*Origanum majorana*) suivent bien l'allure générale de la courbe de sorption donnée par Multon [13] et que le modèle de Peleg décrit bien ces isothermes de désorption pour différentes températures. La nature de l'interaction eau-produit est mise en évidence dans l'enthalpie différentielle de désorption. Connaissant la teneur en eau d'équilibre des feuilles de marjolaine, nous pouvons maintenant envisager de déterminer la cinétique de séchage dans un séchoir modulaire polyvalent.

CHAPITRE III

I. DESCRIPTION DU SYSTEME

La figure 1 présente le schéma du système solaire de séchage étudié.

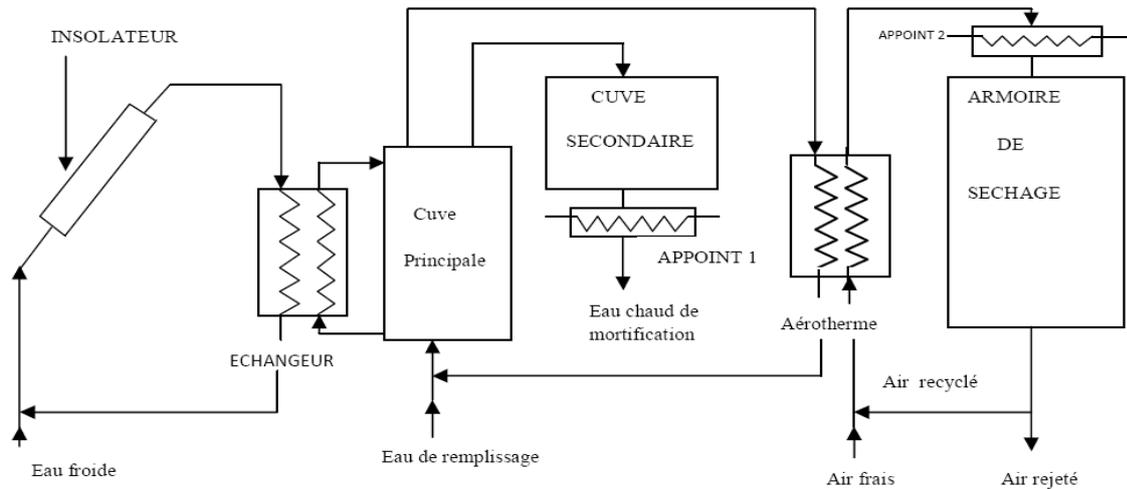


Figure 1 : schéma du système solaire de séchage étudié.

Celui-ci utilise l'eau pour la collecte comme pour le stockage d'énergie solaire;

Des insolateurs Giordano [1,15,16] sont utilisés pour transformer les rayonnements solaires incidents en énergie thermique. Celle-ci est stockée sous forme de chaleur sensible dans deux cuves d'eau : une petite cuve, dite cuve secondaire, destinée à satisfaire directement le besoin en eau chaude de mortification de la marjolaine et une grande cuve, dite cuve principale, qui dessert à la fois l'aérotherme du séchoir et la cuve secondaire.

Un échangeur de chaleur est placé entre les insolateurs et la cuve principale afin de régulariser la température à l'entrée des insolateurs et de gérer cette Cuve d'une façon plus économique [13].

Deux appoints conventionnels auxiliaires fournissent éventuellement de l'énergie supplémentaire, l'un (appoint 1) placé en aval de la cuve secondaire et l'autre (appoint 2) en aval de l'aérotherme.

L'équipement comprend aussi des appareils de contrôles, des soupapes de sécurité de pression, des vannes, des pompes et des tuyaux.

II. MODELISATION DU SYSTEME

1. Energie Solaire :

Pour déterminer le gisement solaire ou plus précisément évaluer la puissance solaire disponible sur le site considéré, nous avons retenu [1] une méthode de calcul fréquemment utilisée [17-21] basée sur la courbe universelle de Liu et Jordan [7,8] obtenue à partir d'une théorie statistique des mesures disponibles.

Cette théorie permet de déterminer les valeurs horaires et journalières des composantes du rayonnement solaire en moyennes mensuelles. Elle affirme aussi qu'il existe un jour dans le mois dit "jour moyen caractéristique", pour lequel les valeurs des composantes du rayonnement sont égales à leurs valeurs moyennes mensuelles [9].

La seule donnée météorologique nécessaire est le rayonnement global \bar{H} journalier moyen mensuel frappant un plan horizontal.

Notre algorithme de calcul de la puissance solaire incidente, tiré des équations de [1] est le suivant :

➤ Entrer des données initiales

- Φ : Latitude du lieu (degrés).
- L_g : Longitude du lieu (degrés).
- L_{st} : Longitude du méridien de référence situé au centre du fuseau (degrés).
- S_c : Inclinaison de l'insolateur (degrés).
- P : Albédo du sol.
- \bar{H} : Rayonnement global journalier moyen mensuel frappant un plan horizontal ($W.m^{-2}$).
- n_j : Numéro du jour moyen caractéristique du mois d'après Klein [9].

➤ Calculer en grandeurs journalières

-La correction de l'équation des temps ET :

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

Avec :

$$JD = JDo + \frac{180}{\pi} (0,007133 \sin JDo + 0,032680 \cos JDo - 0,000318 \sin 2JDo + 0,000145 \cos 2JDo) \quad (2)$$

ET

$$JDo = \frac{360}{365} (n_j - 81) \quad (3)$$

-La déclinaison δ du soleil :

$$\delta = 23,5 \sin JD \quad (4)$$

-L'angle horaire ω_s du lever du soleil au dessus d l'horizon :

$$\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (5)$$

-L'angle horaire ω_{st} du lever du soleil par apport au plan incliné d l'insolateur :

$$\omega_s = \operatorname{Min} \{ \omega_s, \arccos[-\operatorname{tg} (\phi - s_c) \cdot \operatorname{tg} \delta] \} \quad (6)$$

-Le rayonnement extraterrestre \bar{H}_0 journalier frappant un plan horizontal:

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360}{365} n_j \right) \right] \quad (7)$$

$$\left(\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \cdot \sin \delta \right)$$

avec $G_{sc} = 1367 \text{ W.m}^{-2}$. Cette valeur de la constante solaire rapportée par **Ma** et **Iqbal** [39] est recommandée par **Fröhlich** et **Wehrli** [40] et, A est adoptée comme valeur standard internationale par l' Organisation Mondiale de la Météorologie [41].

-L'indice de clarté \bar{K}_T journalier moyen mensuel :

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (8)$$

-Le facteur de conversion R_b du rayonnement direct journalier moyen mensuel sur une surface horizon tale en rayonnement direct journalier moyen mensuel sur une surface inclinée :

$$\bar{R}_b = \frac{\left(\cos(\phi - s_c) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{st} + \frac{\pi}{180} \omega_{st} \sin(\phi - s_c) \cdot \sin \delta \right)}{\left(\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \cdot \sin \delta \right)} \quad (9)$$

-

-Le rapport (\bar{H}_d/\bar{H}) du rayonnement diffus journalier moyen mensuel au rayonnement global journalier moyen mensuel frappant un plan horizontal :

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = 1,390 - 4,027\bar{K}_T + 5,531\bar{K}_T^2 - 3,108\bar{K}_T^3 \quad (10)$$

-Le rayonnement \bar{H}_T global journalier moyen mensuel frappant un plan incliné :

$$\bar{H}_T = \bar{K}_T \bar{K}_0 \left\{ \left(1 - \frac{H}{H_0} \right) \bar{R}_{Tb} + \frac{H_d}{H} \frac{(1+\cos s_c)}{2} + \rho \frac{(1-\cos s_c)}{2} \right\} \quad (11)$$

➤ **Calculer en grandeurs horaires :**

- Le temps solaire vrai TSV :

$$TSV = TL - 4(L_g - L_{st}) + ET \quad (12)$$

Où TL est le temps légal.

- L'angle horaire ω :

$$\omega = \frac{360}{24} (TSV - 12) \quad (13)$$

- La hauteur du soleil h_s :

$$h_s = \arcsin(\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta) \quad (14)$$

- L'azimute θ :

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h_s} \right) \quad (15)$$

-L'angle d'incidence $\bar{\theta}_h$ du rayonnement solaire frappant un plan horizontal :

$$\cos \bar{\theta}_h = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega \quad (16)$$

-L'angle d'incidence $\bar{\theta}_T$ du rayonnement solaire frappant un plan incliné:

$$\begin{aligned} \cos \bar{\theta}_T &= \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin s_c \cdot \cos \omega \cdot \cos \theta \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega \cdot \cos s_c \\ &+ \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \theta \cdot \sin \omega \\ &- \sin \delta \cdot \sin s_c \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta \\ &+ \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos s_c \end{aligned} \quad (17)$$

-Le facteur de conversion r du rayonnement global journalier en rayonnement global horaire :

$$r = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \left(\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s} \right) \quad (18)$$

$$a = 0,4090 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (19)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (20)$$

-Le facteur de conversion r d du rayonnement diffus journalier au rayonnement diffus horaire :

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s} \quad (21)$$

Le rayonnement f T global horaire moyen mensuel frappant un plan incliné:

$$\bar{I}_T = \bar{K}_T \bar{H}_0 \left[\frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_h} \left(1 - r_d \frac{H_d}{H_0} \right) + r_d \frac{H}{H_0} \left(\frac{1 + \cos s_c}{2} \right) \right] \quad (22)$$

2. Système collecteur d'énergie :

Les insolateurs, l'échangeur, les soupapes de sécurité de pression, les circulateurs et le contrôleur de pompe constituent le système collecteur d'énergie solaire.

Les modèles mathématiques décrivant la performance thermique de chacun de ses composants peuvent être combinés dans un modèle unique qui permet de simuler efficacement la performance thermique de l'ensemble.

Le modèle d'insolateur plan à eau développé par **HOTTEL**, **WHILLIER** [2] et **BLISS** [3,4] est simple et donne des résultats bien corrélés avec l'expérience comme l'ont montré diverses simulations de systèmes solaires [13, 20,21]. Il est, de plus, en excellent accord avec des modèles plus élaborés [5].

Ce modèle exprime la puissance utile Q_u (en W) délivrée à la sortie des insolateurs par une relation connue sous le nom de l'équation de **HOTTEL**, **WHILLIER** et **BLISS** (**HWB**).

Elle s'écrit [1] :

$$Q_u = F_R A [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_{si} - T_a)] = (\dot{m}_s c_{pe})_i (T_{si} - T_{ei}) \quad (23)$$

Où :

A = Aire des insolateurs (m^2);

F_R = Coefficient global de transfert absorbeur-fluide défini par :

$$F_R = \frac{\dot{m}_s c_{pe}}{A U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L F A}{\dot{m}_s c_{pe}}\right) \right] \quad (24)$$

- I_T : Puissance solaire incidente sur le plan des insolateurs (W.m^{-2});
- $(\tau\alpha)$: Transmissivité - absorptivité effective ou rendement Optique des insolateurs (calcul en annexe A);
- U_L : Coefficient global de pertes des insolateurs ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$);
- T_{ei} : Température de l'eau a l'entrée des insolateurs (K);
- T_{si} : Température de l'eau a la sortie des insolateurs (K);
- T_a : Température de l'air ambiant (K);
- \dot{m}_e : Débit massique de l'eau dans les insolateurs (kg.s^{-1});
- C_{pe} : Capacité calorifique massique a pression constante de l'eau ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$);
- $(\dot{m}_e C_{pe})_i$: Débit calorifique de l'insolateur (W.K^{-1}).

Si la conduction dans l'absorbeur suivant le sens de l'écoulement n'est pas négligeable, le facteur FR doit être remplacé par le facteur F_R ainsi défini [6] :

$$\hat{F}_R = \frac{\hat{F} \left[1 - \exp\left(-\frac{N}{1 - F_R}\right) \right]}{N + \hat{F} R \left[1 - \exp\left(-\frac{N}{1 - F_R}\right) \right]} \quad (25)$$

Avec :

$$N = \frac{U_L}{\dot{m}_e C_{pe}} \quad (26)$$

$$N = \frac{R}{R + 0,111} \quad (27)$$

$$N = \frac{S_2 \lambda_2 \hat{F}}{U_L L_2} \quad (28)$$

Où :

- L_2 : Longueur de l'absorbeur (m);
- S_2 : Section de l'absorbeur (m^2);
- λ_2 : Conductivité thermique de l'absorbeur ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Plus précisément, F_R doit être utilisé si les conditions suivantes ne sont pas vérifiées:

$$1 < \frac{U_L}{\dot{m}_e C_{pe}} < 10 \quad \text{Et} \quad F' R' < 0,2$$

Le facteur d'efficacité des insolateurs F' , fonction de leur construction, est déterminé, pour notre configuration, [1] par l'expression suivante :

$$\dot{F} = \frac{\frac{1}{U_L}}{\left\{ \frac{1}{U_L[(l_2-d_e)F+d_e]} + \frac{1}{h_{c23} \pi d_e} + \frac{1}{h_{v3f} \pi d_i} \right\}} \quad (29)$$

- l_2 : Largeur de l'absorbeur (m);
- d_e : Diamètre extérieur du tube des insolateurs (m);
- d_i : Diamètre intérieur du tube des insolateurs (m);
- h_{c23} : Coefficient de transfert thermique par convection entre l'ailette et le tube des insolateurs ($W.m^{-2}.K^{-1}$);
- h_{v3f} : Coefficient de transfert thermique par convection entre le fluide caloporteur (eau) et le tube des insolateurs ($W.m^{-2}.K^{-1}$);
- F : Coefficient défini par [1] :

$$F = \frac{\tau h \left[m \left(\frac{l_2-d_e}{2} \right) \right]}{m \left(\frac{l_2-d_e}{2} \right)} \quad (30)$$

Avec :

$$m^2 = \frac{U_L}{\varepsilon_2 \lambda_2} \quad (31)$$

Le coefficient global de pertes des insolateurs U_L est une fonction complexe à fois de leur construction et de leurs conditions de fonctionnement. Il est la somme de deux coefficients de pertes : U_{av} et U_{ar} respectivement à l'avant et à l'arrière l'insolateur [1].

KLEIN[10] a développé une expérience pour le coefficient de perte avant U_{av} :

$$U_{av} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{C}{T_2} \left(\frac{T_2 - T_a}{N_v + f} \right)^{\varepsilon} + h_{v1a}} + \frac{1}{\frac{\sigma(T_2 + T_a)(T_2^2 + T_a^2)}{\varepsilon_2 + 0,00591 N_v h_{v1a}} + \frac{2N_{v+f-1} + 0,133 \varepsilon_2}{\varepsilon_1} - N_v}} \quad (32)$$

Dans laquelle :

$$e = 0,43 \left(1 - \frac{100}{T_2} \right) \quad (33)$$

- σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$);
- N_v = Nombre de vitrages ($N_v = 1$ dans notre cas);
- h_{y1a} = Coefficient d'échange thermique convectif du au vent entre le vitrage et l'air ambiant ($W.m^{-2}.K^{-1}$) tel que:

$$h_{y1a} = 5,67 + 3,86 V_v \quad (34)$$

- V_v = Vitesse du vent ($m.s^{-1}$);
 ε_2 = Emissivité de l'absorbeur;
 ε_4 = Emissivité de la couverture transparente ($\varepsilon_1 = 0,88$);
 f = Facteur correctif tenant compte de l'effet du vent défini par

$$f = (1 + 0,089h_{v1a} - 0,1166h_{v1a} \varepsilon_2)(1 + 0,07866 N_v) \quad (35)$$

- C = Facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison de l'insolateur sur les coefficients de convection dans des conduits non utiles :

$$\begin{aligned}
 &\text{pour } 0^\circ < S_c < 70^\circ, & C &= 520 (1 - 0,000051 S_c^2) \\
 &\text{pour } 70^\circ < S_c < 90^\circ, & &\text{on prend } S_c = 70^\circ
 \end{aligned} \quad (36)$$

- S_c = Inclinaison de l'insolateur (degrés);
 T_2 = Température moyenne de l'absorbeur (K).

-Le coefficient de perte arrière est donné par [1] :

$$U_{ar} = \frac{1}{\frac{1}{h_{v2a}} + \frac{1}{h_{cii}} + \frac{1}{h_{v4a}}} \quad (37)$$

Dans laquelle :

- h_{cii} = Coefficient d'échange thermique conductif de l'isolant ($W.m^{-2}.K^{-1}$);
 h_{v2a} = Coefficient d'échange thermique convectif entre l'absorbeur et l'air confiné arrière ($W.m^{-2}.K^{-1}$);
 h_{v4a} = Coefficient d'échange thermique convectif entre la face inférieure de l'isolant et l'air ambiant ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

La performance thermique de "l'échangeur de chaleur- insolateur-cuve principale" (en négligeant les pertes thermiques de l'ensemble "accessoires - tuyauterie") peut s'écrire [11,26] :

$$Q_{hx} = \varepsilon_E (\dot{m}_e C_{pe})_{min} (T_{si} - T_{st}) = (\dot{m}_e C_{pe})_c (T_{se} - T_{st}) \quad (38)$$

- Q_{hx} : Energie transférable a travers l'échangeur (W);
 ε_E : Efficacité thermique de l'échangeur;
 T_{st} : Température de stockage de la cuve (K);
 T_{si} : Température du fluide sortant de l'insolateur (K);
 T_{se} : Température du fluide (venant de la cuve) sortant de l'échangeur (K);
 $(\dot{m}_e C_{pe})_{min}$: Minimum entre $(m_e C_{pe})_i$ et $(m_e C_{pe})_c$
 $(\dot{m}_e C_{pe})_i$: Débit calorifique total de l'insolateur ($W.K^{-1}$);
 $(\dot{m}_e C_{pe})_c$: Débit calorifique de l'eau venant de la Cuve et circulant dans l'échangeur ($W.K^{-1}$).

En suivant de Winter [12] qui suppose un état quasi stable tel que Q_u est égal à Q_{hx} , nous obtenons l'expression de la puissance Q_d transférée a la cuve de stockage [13] en égalisant l'équation (23) et l'équation (38):

$$Q_d = F''_F A [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_{st} - T_a)] \quad T_{st} \leq T_{max} \quad (39)$$

$$Q_d = (\dot{m}_s C_{ps})_i \quad (40)$$

Avec :

$$F''_R = \frac{F_R}{1 + \frac{F_R U_L A}{(\dot{m}_s C_{ps})_i} \left(\frac{(\dot{m}_s C_{ps})_i}{\varepsilon E (\dot{m}_s C_{ps})_{min}} - 1 \right)} \quad (41)$$

et T_{max} , température d'ébullition (K).

3. Stockage de la chaleur

La chaleur est transférée de la cuve principale à la cuve secondaire lorsque la température de l'eau dans la seconde tombe au-dessous de celle de la première.

La température moyenne de l'eau dans la cuve secondaire sur une période étendue est presque la même que celle de la cuve principale [13]. Ainsi, pour nos travaux, est-il suffisamment précis de modéliser les ballons de stockage d'eau chaude (cuve principale et cuve secondaire) comme une seule cuve ayant un volume égal a la Somme des deux.

-Le bilan énergétique dans la cuve s'écrit :

$$(\dot{M}_s C_{ps})_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = Q_d - Q_x - P_{st} \quad (42)$$

- Q_d : Puissance issue de l'insolateur transférée a la cuve (W);
- Q_x : Energie soustraite du ballon de stockage pour la satisfaction des besoins (W);
- P_{st} : Pertes thermiques de la cuve de stockage (W) :

$$P_{st} = (AU)_{st} (T_{st} - T_a) \quad (43)$$

- T_{st} : Température de stockage de la cuve (K);
- $(\dot{M}_s C_{ps})_{st}$: Capacité calorifique totale de stockage (J.K-I);
- $(UA)_{st}$: Produit de la surface des parois de la cuve par le coefficient de pertes Thermiques à travers ces parois (W.K-I).

4. Armoire de séchage

L'air venant de l'aérotherme, relativement sec et suffisamment chaud, dont la température est ajustée à la température fixe T_A de 65°C au moyen du système d'appoint conventionnel auxiliaire situé en aval, traverse les feuilles de la marjolaine à sécher disposées en couches minces.

Le phénomène de séchage est relativement complexe et dépend de nombreux paramètres :

- évolution de la température et de l'humidité dans l'air asséchant utilisé, en fonction des conditions hydrodynamiques et thermiques propres au séchoir;
- conditions d'interface entre l'air et les produits à sécher caractérisées par des coefficients de transfert de chaleur et de masse. Ces coefficients sont liés à teneurs en eau de l'air et du produit, et dépendent des dimensions géométriques du produit ainsi que des conditions thermiques et hydrodynamiques.

4.1. Hypothèses

- le problème est unidimensionnel suivant la direction z de l'écoulement de l'air asséchant;
- les feuilles de la marjolaine sont à la même température et possèdent la même teneur en eau;
- l'ensemble des feuilles est considéré comme un milieu homogène qui sera caractérisé par sa température de surface;
- la température, l'humidité et le débit de l'air asséchant sont homogènes et uniformes avant et après le mélange;
- l'inertie thermique de l'air est négligeable devant celle des feuilles, ce qui revient à négliger les termes $(m_A C_{pA}) \frac{\partial T_A}{\partial t}$ par rapport à $(m_{va} C_{pva}) \frac{\partial T_{va}}{\partial t}$.
- les parois ont une température uniforme;
- les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligeables ;
- les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligeables ;

4.2. Equation du séchoir

Les équations qui suivent découlent des bilans thermiques effectués au niveau d'une tranche quelconque du séchoir.

➤ **Bilan relatif à l'air :**

$$\Delta z \dot{m}_A C_{pA} \frac{\partial T_A}{\partial z} = S_{Ava} h_{vAva} (T_A - T_{va}) + S_{Api} h_{vApi} (T_A - T_{pis}) \quad (44)$$

avec:

- m_A : Débit massique de l'air asséchant (kg.s^{-1});
- C_{pA} : Capacité calorifique massique a pression constante de l'air asséchant ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$);
- T_A : Température de l'air asséchant (K);
- T_{va} : Température des feuilles de la marjolaine (K);
- T_{pis} : Température de la paroi interne (K);
- h_{vAva} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'air asséchant et le produit ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$);
- h_{vApi} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'air asséchant et la paroi interne ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$);
- S_{Ava} : Surface d'échange correspondant a h_{vAva} (m^2);
- S_{Api} : Surface d'échange correspondant a h_{vApi} (m^2);
- Δz : Pas d'espace.

➤ **Bolan relatif aux feuilles**

$$m_{va} C_{pva} \frac{\partial T_{va}}{\partial t} = S_{Ava} h_{vAva} (T_A - T_{va}) - L_v (T_A) \dot{m}_{es} (T_{av}, T_A) \quad (45)$$

Où :

- m_{va} : Masse des feuilles de la marjolaine (kg) ;
- C_{pva} : Capacité calorifique massique a pression constante des feuilles ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ;
- L_v : Chaleur Latente massique de vaporisation (J.kg^{-1}) ;
- m_{es} : Vitesse de séchage (kg.s^{-1}).

➤ **Bilan relatif aux parois**

$$m_{pi} C_{ppi} \frac{\partial T_{pis}}{\partial t} = S_{A_{pi}} h_{vA_{pi}} (T_A - T_{pis}) - S_{pipe} h_{cpipe} (T_{pis} - T_{pes}) \quad (46)$$

$$m_{pe} C_{ppe} \frac{\partial T_{pes}}{\partial t} = S_{pipe} h_{cpipe} (T_{pis} - T_{pes}) - S_{ape} h_{vape} (T_{pes} - T_{as}) - S_{cpe} h_{rcpe} (T_{pes} - T_c) \quad (47)$$

Où :

- m_{pi} : Masse de la paroi interne (Kg) ;
- m_{pe} : Masse de la paroi externe (Kg) ;
- T_a : Température de l'air ambiant(K) ;
- T_{pes} : Température de la paroi interne (K) ;
- T_c : Température de la voûte céleste (K) ;
- C_{ppi} : Capacité calorifique massique de la paroi interne (J.Kg⁻¹.K⁻¹)
- C_{ppe} : Capacité calorifique massique de la paroi externe (J.Kg⁻¹.K⁻¹)
- H_{vape} : Coefficient d'échange thermique convectif entre l'air ambiant et la paroi externe (W.m⁻².K⁻¹)
- H_{rcpe} : Coefficient d'échange thermique radiatif entre la voûte céleste et la paroi externe (W.m⁻².K⁻¹)
- H_{cpipe} : Coefficient d'échange thermique conductif entre la paroi interne et la paroi externe (W.m⁻².K⁻¹)
- S_{pipe} : Surface d'échange relatif à h_{cpipe} (m²) ;
- S_{Ava} : Surface d'échange relatif à h_{vAva} (m²) ;
- $S_{A_{pi}}$: Surface d'échange relatif à $h_{vA_{pi}}$ (m²)

CHAPITRE IV

I. DESCRETISATION DES EQUATIONS

1. Equation des stockages

En régime permanant sur une heure, l'équation (42) discrétisée s'écrit :

$$T_{stf} = T_{sti} + \frac{1}{(M_{\epsilon} C_{pe})_{st}} [Q_d - Q_x - (UA)_{st} (T_{sti} - T_a)] \quad (48)$$

Cette approximation donne la température T_{sti} de la cuve à la fin de l'heure à partir de sa température T_{sti} au début de l'heure .cette température T_{stf} devient ensuite la température T_{sti} pour l'heure suivante et ainsi de suite

Selon **Beckman et al** [25], il est indifférent de modéliser un ballon de stockage en une seule ou plusieurs strates isothermes. Mais **Van Koppen** [23], **Gutierrez et al** [22] pensent le contraire. Nous suivons ces derniers et nous considérons le cas de deux strates isothermes dues à une grille de stratification au milieu de la cuve [1]. Nous ajoutons une fonction de contrôle du débit F_1 [24], des fonctions de contrôle supplémentaires F_2 , F_3 et un facteur F_4 [21] afin d'étudier les cas suivants :

- l'eau issue de l'échangeur se stabilise dans la partie inferieure froide de la cuve lorsque $F_1 = 0$ et dans la partie supérieure chaude lorsque $F_1 = 1$;
- l'insolateur fournit ou non une énergie utile (F_2) ;
- l'organe d'utilisation sollicite ou non de la chaleur (F_3) ;
- l'aérotherme fonctionne de façon continue ou par-à-coups (F_4)

Nous obtenons les équations discrétisées suivantes [1] sur une heure :

- **Dans le volume supérieur :**

$$(M_{\epsilon} C_{pe})^{(1)} (T_{stf}^{(1)} - T_{sti}^{(1)}) = F_1 F_2 (\dot{m}_{\epsilon} C_{pe})_c (T_{se} - T_{sti}^{(1)}) \quad (49)$$

- **Dans le volume inferieur :**

$$\begin{aligned} (M_{\epsilon} C_{pe})^{(2)} (T_{stf}^{(2)} - T_{sti}^{(2)}) &= (1 - F_1) F_2 (\dot{m}_{\epsilon} C_{pe})_c (T_{se} - T_{sti}^{(2)}) \\ &+ F_1 F_2 (\dot{m}_{\epsilon} C_{pe})_c (T_{sti}^{(1)} - T_{sti}^{(2)}) \\ &+ \frac{F_3}{F_4} (\dot{m}_{\epsilon} C_{pe})_x (T_{x0} - T_{sti}^{(2)}) \\ &- (UA) (T_{sti}^{(1)} - T_a) \end{aligned} \quad (50)$$

Dans les quelles

- F1 = 1 si $T_{se} > T_{sti}^{(1)}$
- F1 = 0 si $T_{sti}^{(1)} > T_{se} > T_{sti}^{(2)}$
- F2 = 1 si $T_{si} > T_{ei}$
- F2 = 0 si $T_{si} \leq T_{ei}$
- Fa = 1 si $Q_L > 0$
- Fa = 0 si $Q_L = 0$
- F4 = $\frac{Q_L}{Q_x}$

- Les exposants (1) et (2) désignent respectivement les volumes isothermes supérieur et inférieur de la cuve;

- $(M_e C_{pe})_{st}$: Capacité calorifique totale de stockage (J.K⁻¹);
- $(\dot{m}_e C_{pe})_c$: Débit calorifique de l'eau venant de la cuve circulant dans l'échangeur (W.K⁻¹);
- $(\dot{m}_e C_{pe})_x$: Débit calorifique de l'eau circulant dans l'aérotherme (W.K⁻¹);
- T_{se} : Température de l'eau (venant de la cuve) à la sortie de l'échangeur (K);
- T_{si} : Température du fluide caloporteur (eau) à la sortie de l'insolateur (K);
- T_{ei} : Température du fluide caloporteur (eau) à l'entrée de l'insolateur (k);
- T_{xo} : Température de retour de l'eau refroidie venant de l'aérotherme (K).

La température T_{xo} doit être calculée d'avance à partir de la valeur horaire de Q_x . L'énergie Q_{EA} horaire maximale transférable a travers l'aérotherme est donnée [11,26] par:

$$Q_{EA} = \varepsilon_A (\dot{m} C_p)_{\min} (T_{sti}^{(1)} - T_{eA}) \tag{51}$$

- ε_A : Efficacité thermique de l'aérotherme;
- T_{eA} : Température de l'air asséchant a l'entrée de l'aérotherme (K);
- $(\dot{m} C_p)_{\min}$: Minimum entre $(\dot{m}_e C_{pe})_x$ et $(\dot{m}_A C_{pA})$;
- $(\dot{m} C_p)$: Débit calorifique de l'air asséchant (W.K⁻¹).

Beckman et *al.* [25] ont pose la relation suivante pour modéliser le fonctionnement de l'aérotherme :

$$Q_x = \text{Min}(Q_{EA}, Q_L) \tag{52}$$

2. Equation de l'armoire de séchage

Discrétisons le système dans l'espace en découpant l'enceinte de séchage en N tranches pour N claies et la durée de séchage en périodes (t,t+Δt).

Nous avons retenu [1], parmi les méthodes aux différences finies de résolution des équations d'évolution, la méthode implicite qui est inconditionnellement stable car on peut choisir les incréments d'espace Δz et de temps Δt sans contrainte particulière [27]; alors la discrétisation des équations (44) a (47) donne les expressions suivantes :

➤ **Au niveau de l'air asséchant :**

$$\begin{aligned} \dot{m}_A C_{pA} (T_{A,i-1}^{j+1} - T_{A,i}^{j+1}) = \Delta S_{Ava} h_{vAva} (T_{A,i}^{j+1} - T_{va,i}^{j+1}) \\ + \Delta S_{Api} h_{vApi} (T_{A,i}^{j+1} - T_{pis,i}^{j+1}) \end{aligned} \quad (53)$$

➤ **Au niveau des feuilles de la marjolaine :**

$$\begin{aligned} \Delta m_{va} C_{pva} \frac{T_{va,i}^{j+1} - T_{va,i}^j}{\Delta t} = \Delta S_{Ava} h_{vAva} (T_{A,i}^{j+1} - T_{va,i}^{j+1}) \\ - L_v (T_{va,i}^{j+1}) \dot{m}_{es} (T_{va,i}^{j+1} - T_{A,i}^{j+1}) \end{aligned} \quad (54)$$

➤ **Au niveau des parois :**

$$\begin{aligned} \Delta m_{pi} C_{ppi} \frac{T_{pis,i}^{j+1} - T_{pis,i}^j}{\Delta t} = \Delta S_{Api} h_{vApi} (T_{A,i}^{j+1} - T_{pis,i}^{j+1}) \\ - \Delta S_{pipe} h_{cpipe} (T_{pis,i}^{j+1} - T_{pes,i}^{j+1}) \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{pe} C_{ppe} \frac{T_{pes,i}^{j+1} - T_{pes,i}^j}{\Delta t} = \Delta S_{ape} h_{vape} (T_{a,i}^{j+1} - T_{pis,i}^{j+1}) \\ + \Delta S_{pipe} h_{cpipe} (T_{pis,i}^{j+1} - T_{pes,i}^{j+1}) \\ - \Delta S_{cpe} h_{rcpe} (T_{pes,i}^{j+1} - T_{c,i}^{j+1}) \end{aligned} \quad (56)$$

Les exposants j et $j+1$ représentent respectivement le s instants t et t+Δt tandis que l'indice i représente la tranche considérée.

II. METHODE DE RESOLUTION DES EQUATIONS

La discrétisation des équations (44) à (47) conduit à un système de 4 équations à 4 inconnues (équations (53) à (56)) que l'on peut mettre sous la forme condensée suivante :

$$[A].\vec{X} = \vec{B} \quad (57)$$

Ou :

- [A] : Matrice des coefficients;
- \vec{X} : Vecteur des inconnues;
- \vec{B} : Vecteur connu lié aux coefficients de l'équation initiale.

Nous résolvons le système à l'aide de la méthode de *Diabolo Sablier* (DIASA) [27,28]. Ensuite, les valeurs calculées des températures sont comparées aux valeurs précédentes et les calculs arrêtés lorsque la précision voulue est atteinte. Dans le cas contraire, les calculs sont repris par itération.

III. DETERMINATION DES VALEURS DES PARAMETRES

1. Coefficients d'échange thermique

1. a. Echange par conduction

- A travers le tube de l'insolateur [29] :

$$h_{c23} = \frac{2\lambda_3}{d_e \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)} \quad (58)$$

Avec:

- λ_3 : Conductivité thermique du tube de l'insolateur ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- d_i : Diamètre intérieur du tube de l'insolateur (m);
- d_e : Diamètre extérieur du tube de l'insolateur (m).

$$h_{cii} = \frac{\varepsilon_4 \lambda_5 A_5 + \varepsilon_5 \lambda_4 A}{\varepsilon_4 \varepsilon_5 A} \quad (59)$$

- A travers l'isolant arrière de l'insolateur [1,6] :

Avec:

- A : Surface de l'isolant, en général, égale a la surface de l'absorbeur et a celle de la vitre, donc de l'insolateur (m²);
- A₅ : Surface de l'isolant latéral (m²);
- e₅ : Epaisseur de l'isolant latéral (m);
- e₄ : Epaisseur de l'isolant arrière (m);
- λ₅ : Conductivité thermique de l'isolant latéral (W.m⁻¹.K⁻¹);
- λ₄ : Conductivité thermique de l'isolant arrière (W.m⁻¹.K⁻¹).

- A travers la paroi du séchoir [29] :

$$h_{cpipe} = \frac{1}{\frac{e_{pi}}{\lambda_{pi}} + \frac{e_{pp}}{\lambda_{pp}} + \frac{e_{pe}}{\lambda_{pe}}} \quad (60)$$

Avec:

- e_{pi} : Epaisseur de la paroi interne du séchoir (m);
- e_{pe} : Epaisseur de la paroi externe du séchoir (m);
- e_{pp} : Epaisseur de l'isolant entre les parois du séchoir (m);
- λ_{pi} : Conductivité thermique de la paroi interne du séchoir (W.m⁻¹.K⁻¹);
- λ_{pe} : Conductivité thermique de la paroi externe du séchoir (W.m⁻¹.K⁻¹);
- λ_{pp} : Conductivité thermique de l'isolant entre les parois du séchoir (W.m⁻¹.K⁻¹).

1. b. Echange par rayonnement

- Entre la paroi externe du séchoir et la voûte céleste [29] :

$$h_{rcpes} = \sigma \varepsilon_{pes} (T_{pes} + T_c)(T_{pes}^2 + T_c^2) \quad (61)$$

Avec:

- σ : Constante de Stefan-Boltzmann (a = 5,67.10⁻⁸ W.m⁻². K⁻⁴);
- ε_{pes} : Emissivité de la paroi du séchoir;
- T_c : Température équivalente de la voûte céleste (K);
- T_{pes} : Température de la paroi externe du séchoir (K).

- Entre l'absorbeur et l'isolant de l'insolateur [29] :

$$h_{r24} = \frac{\sigma(T_2 + T_4)(T_2^2 + T_4^2)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_4} - 1} \quad (62)$$

- ε_2 : Emissivité de l'absorbeur de l'insolateur;
- ε_4 : Emissivité de l'isolant de l'insolateur;
- T_2 : Température de l'absorbeur de l'insolateur (K);
- T_4 : Température de l'isolant de l'insolateur (K).

1. c. Echange par convection

Le coefficient d'échange par convection dû au vent entre la vitre de l'insolateur et le milieu extérieur est donné par Mac Adams [31] comme suit :

$$h_{v1a} = 5,67 + 3,86V_v \quad (63)$$

Avec V_v : vitesse du vent ($m.s^{-1}$)

Les coefficients d'échange thermique par convection h_v s'écrivent [29] :

$$h_v = \frac{N_u \lambda_m}{D_H} \quad (64)$$

- N_u : Nombre adimensionnel de Nusselt;
- λ_m : Conductivité thermique du milieu considéré ($W.m^{-1}.K^{-1}$);
- D_H : Diamètre hydraulique du milieu considéré (m).

Il faut déterminer le nombre adimensionnel de Nusselt à partir des corrélations données dans la littérature selon le type et le régime d'écoulement.

Pour conduit de section quelconque, le diamètre hydraulique est donné par :

$$D_H = \frac{4S}{P} \quad (64)$$

Avec:

- S : Surface de la section droite du conduit (m^2);
- P : Périmètre mouillé de la section droite du conduit (m).

ÉCOULEMENT NATUREL

- entre l'absorbeur et l'air confine arrière de l'insolateur (h_{v2a});
- entre l'isolant et l'air extérieur de l'insolateur (h_{v4a});
- entre la paroi extrême du séchoir et l'air ambiant (h_{vape});

Les nombres adimensionnels de Nusselt sont donnés par la corrélation de **Hollands** et **al** [30] lorsque l'inclinaison S_c des plans par rapport au plan horizontal est comprise entre 0 et 75°, c'est-à-dire, pour h_{v2a} et h_{v4a} :

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos S_c} \right] + \left[1 - \frac{1708 \sin(1,8 S_c)^{1,6}}{Ra \cos S_c} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos S_c}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (64)$$

avec:

R_a : Nombre adimensionnel de Rayleigh :

$$R_a = Gr_r \cdot Pr_r$$

Gr : Nombre adimensionnel de Grashof;

Pr : Nombre adimensionnel de Prandtl.

L'exposant + signifie que la quantité entre crochets est prise égale à zéro pour toute valeur négative.

Pour h_{vape} , nous utilisons les corrélations suivantes :

- Régime laminaire $Gr_{ape} < 10^9$

D'après **Sparrow** et **Gregg** [32], on a :

$$Nu = 0,508 Gr_{ape}^{1/4} \frac{Pr_{ape}^{1/2}}{(0,95 + Pr_{ape})} \quad (68)$$

- Régime turbulent $Gr_{ape} > 10^9$

D'après **Mac Adams** [31], on a :

$$Nu = 0,13 (Gr_{ape} Pr_{ape})^{1/3} \quad (69)$$

- Le tube conduit et l'eau de l'insolateur (h_{v3f});
- L'air asséchant et la paroi interne du séchoir (h_{vApi});
- L'air asséchant et le produit dans le séchoir (h_{vAvA}).

On suppose dans tous les cas que les propriétés physiques sont constantes et définies pour des températures moyennes afin de négliger les termes correctifs.

Pour h_{v3f} , nous avons, selon **PERRY** et **CHILTON** [34], les corrélations suivantes :

-Régime laminaire $Re_{3f} < 2100$

$$\text{Si } Gz_{3f} < 100 \quad Nu = 3,66 + \frac{0,085 Gz_{3f}}{1 + 0,047 Gz_{3f}^{2/5}} \quad (70)$$

$$\text{Si } Gz_{3f} > 100 \quad Nu = 1,86 Gz_{3f}^{1/3} + 0,87 \left(1 + 0,015 Gz_{3f}^{1/3} \right) \quad (71)$$

Où Gz_{3f} est le nombre adimensionnel de **Graetz** défini par :

$$Gz_{3f} = Re_{3f} Pr_{3f} \frac{d_i}{L} \quad (72)$$

Avec:

d_i : Diamètre intérieur du conduit (m);
 L : Longueur du conduit (m).

- Régime transitoire $2100 \leq Re_{3f} \leq 10000$

$$Nu = 0,116 \left(Re_{3f}^{2/3} - 125 \right) Pr_{3f}^{1/3} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] \quad (73)$$

- Régime turbulent $Re_{3f} \geq 10000$

$$Nu = 0,118 Re_{3f}^{0,18} Pr_{3f}^{0,4} \quad (74)$$

Pour $h_{vA\pi i}$, nous avons [29] :

- Régime laminaire $Re_{A\pi i} \leq 3.10^5$

$$Nu = 0,66 Re_{A\pi i}^{1/2} Pr_{A\pi i}^{1/3} \quad (75)$$

- Régime laminaire $Re_{A\pi i} > 3.10^5$

$$Nu = 0,0366 Re_{A\pi i}^{4/5} Pr_{A\pi i}^{1/3} \quad (76)$$

Pour h_{vAva} , en supposant qu'une feuille de marjolaine ait une configuration parallélépipédique, la corrélation proposée par *Slessor* et *Cleland* [33] pour un écoulement perpendiculaire à une série de corps parallélépipédiques rangés côte à côte s'écrit :

$$Nu = 0,32 Re_{Ava}^{0,7} Pr_{Ava}^{0,4} \quad (77)$$

2. Vitesse de séchage

La vitesse de séchage de la marjolaine est indépendante de son humidité absolue. Elle est donnée par l'expression suivante [46]:

$$\frac{dN_s}{dt} = -exp\left(-\frac{6100}{T} - 3,91.10^{-2} h_r + 10,4\right) \quad (78)$$

Avec:

$$\begin{aligned} \frac{dN_s}{dt} &: \text{Vitesse de séchage (kg}_{\text{eau}}\text{kg}_{\text{MS}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \\ T &: \text{Température de séchage (K);} \\ h_r &: \text{Humidité relative de l'air asséchant (\%).} \end{aligned}$$

3. Chaleur latente massique de vaporisation

En général, l'eau dans le produit se présente, soit sous forme libre ("eau libre"), soit sous forme liée ("eau liée"). Lorsque l'eau est absorbée dans le produit, au-dessous d'un certain seuil d'hydratation correspondant à la limite entre "eau libre" et "eau osmotique", les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie appelée "énergie de liaison", qui devient d'autant plus importante qu'il s'agit d'eau osmotique, absorbée ou combinée chimiquement.

La chaleur latente massique de vaporisation L_v de l'eau est donc la somme de la chaleur de vaporisation de "l'eau libre" L_{vi} et de la chaleur de liaison de l'eau absorbée L_{va} qu'il faut fournir pour évaporer l'eau liée (eau osmotique, eau absorbée, eau combinée chimiquement) :

$$L_v = L_{vi} + L_{va} \quad (79)$$

La variation de la chaleur latente de vaporisation de l'eau : eau libre ou considérée comme telle, peut se mettre sous la forme suivante loin de la température critique:

$$\frac{dL_{vi}}{dT} = C_{p,vs} - C_{p,l} \quad (80)$$

Où :

$C_{p,vs}$: Capacité calorifique massique A pression constante de la vapeur au voisinage de la courbe de saturation ($J.kg^{-1}.K^{-1}$);

$C_{p,1}$: Capacité calorifique massique a pression constante de l'eau liquide au voisinage de la courbe de saturation ($J.kg^{-1}.K^{-1}$);

Pour de faibles températures, elles sont constantes et l'on a :

$$L_{v1} = L_{v0} - (C_{p,1} - C_{p,vs})T \quad (81)$$

Où L_{v0} est la chaleur de vaporisation à 0 °C et T la température de vaporisation exprimée en kelvins.

En pratique, on peut prendre l'expression suivante :

$$L_{v1} \approx 597 - 0,56 \theta \quad (82)$$

Où L_{v1} est exprimé en $kcal.kg^{-1}$ et θ est la température de vaporisation exprimée en °C.

Bien que la chaleur latente de vaporisation L_v soit fonction de la teneur en eau et de la température du produit, cette chaleur L_v diminue lorsque la température augmente. Néanmoins, à température constante, elle ne croit réellement que pour une teneur en eau inférieure à un seuil donné.

Comme dans le séchoir de la marjolaine la dessiccation est arrêtée a ce seuil ou au-dessous, la chaleur de liaison de l'eau L_{va} . Peut être négligée. Donc, la chaleur latente de vaporisation L_v est celle de l'eau dite "libre".

La température de vaporisation θ (°C) est prise égale à la température du produit T_{va} (°C).

4. Température de l'air ambiant

L'importance de l'effet de la température de l'air ambiant dans un processus de séchage, notamment sur les pertes extérieures et les performances des insolateurs, nous, conduit a recourir a une distribution temporelle basée sur les températures ambiantes maximale T_{amax} et minimale T_{amin} a l'aide d'une fonction sinusoïdal [38] comme suit:

$$T_a = \left(\frac{T_{amax} + T_{amin}}{2} \right) + \left(\frac{T_{amax} - T_{amin}}{2} \right) \sin \left(\frac{2\pi t}{\tau} - \Phi_D \right) \quad (83)$$

Où :

- T_a : Température de l'air ambiant sous abri, à l' instant t;
 T : Temps écoulé depuis le lever du soleil (h);
 T : Période du jour (24 h);
 Φ_D : Déphasage entre l'ensoleillement et la température exprime par:

$$\Phi_D = \frac{2\pi D}{\tau} \quad (84)$$

- D : Decalage entre le moment où le maximum de la température ambiante est atteint et celui correspondant au maximum de l'ensoleillement (12 h TSV).

Dans notre cas, pour ADRAR $D = 2$ h.

5. Température équivalente de la voûte céleste

On considère la voûte céleste comme un corps noir. Sa température équivalente T_c peut être reliée à la température ambiante T_a par la relation de *Swinbank* [3] qui s'écrit:

$$T_c = 0,0552T_a^{1,5}$$

Dans la quelle T_a et T_c sont exprimés en kelvins.

CHAPITRE V

1. METHODE DE DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE SECHAGE A CHAUFFAGE PARTIELLEMENT SOLAIRE

La méthode de dimensionnement utilisée est la méthode nouvelle nommée *J-chart* élaborée par des chercheurs du Laboratoire de Thermodynamique et Energétique de l'Université de Perpignan [36]. Elle consiste à établir 3 types d'abaques :

- le premier en fonction du temps de séchage t_s ;
- le second en fonction de la couverture solaire f ;
- et le troisième en fonction de la fraction de chaleur économisée J .

Comme notre système est conçu pour produire de l'eau chaude pour la mortification des marjolaines et de l'air chaud pour leur séchage, nous devons scinder le système en deux sous-systèmes :

- ensemble collection d'énergie - appoint 1 - cuve secondaire;
- ensemble collection d'énergie - aérotherme - appoint 2 - séchoir,

et effectuer au niveau de la cuve secondaire pour le premier (eau chaude) et au niveau de l'armoire de séchage pour le second (air chaud) les bilans afin de déterminer la couverture solaire f et la fraction de chaleur économisée J .

1. Système de production d'eau chaude

1. a. Couverture solaire f_1

La couverture solaire est la fraction de chaleur issue du rayonnement solaire utilisée dans le système. Pour une période comprise entre t et $t+\Delta t$, elle est définie au niveau de la cuve secondaire par l'expression:

$$f_1 = \frac{\int_t^{t+\Delta t} Q_d dt}{\int_t^{t+\Delta t} Q_{c1} dt} \quad (86)$$

avec:

- Q_d : Puissance utile instantanée délivrée par l'insolateur et transférée à la cuve principale donnée par l'équation (39);
- Q_{c1} : Puissance totale instantanée consommée pour la production d'eau chaude de mortification et définie par :

$$Q_{c1} = Q_d + Q_{A1} \quad (87)$$

Q_{Al} : Puissance instantanée apportée par l'appoint conventionnel auxiliaire de la cuve secondaire (appoint 1).

Introduisant dans l'équation (86) l'équation (39), nous obtenons :

$$f_1(t, t + \Delta t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} AF_R^n(\tau\alpha)I_T - U_L(T_{st} - T_a)I_T dt}{\int_t^{t+\Delta t} Q_{c1} dt} \quad (88)$$

Cette équation peut se décomposer sous la forme :

$$f_1(t, t + \Delta t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} AF_R^n(\tau\alpha)I_T dt}{\int_t^{t+\Delta t} Q_{c1} dt} - \frac{\int_t^{t+\Delta t} AF_R^n U_L(T_{st} - T_a)I_T dt}{\int_t^{t+\Delta t} Q_{c1} dt} \quad (89)$$

Si on intègre l'équation (89) sur une période Δt d'un mois tout en supposant que les caractéristiques de l'insolateur F_R^n et U_L sont constantes sur cette période et que la surface de captation A de l'insolateur est fixée, et si, de plus, on pouvait écrire, ce qui n'est pas le cas [45] :

$$\overline{[(\tau\alpha)I_T]} = (\overline{\tau\alpha})\overline{I_T} \quad (90)$$

Nous obtenons une couverture hypothétique moyenne mensuelle :

$$f_1 \approx \frac{AF_R^n(\overline{\tau\alpha})\overline{I_T} \Delta t}{Q_{c1}^*} - \frac{AF_R^n U_L(T_{st} - T_a)^* \Delta t}{Q_{c1}^*} \quad (91)$$

Avec :

$(T_{st} - T_a)$: Valeur moyenne mensuelle de $(T_{st} - T_a)$;
 Q_{c1}^* : Chaleur totale consommée durant le mois.

Duffie et Beckman [3] ont pose que $(T_{st} - T_a)$ est égal a une constante CTE ayant une valeur de 100 °C qu'ils ont déterminée empiriquement.

En outre posons :

$$Q_{c1}^* = N_j \overline{Q}_{c1} \quad (92)$$

$$\Delta t = N_j \Delta t' \quad (93)$$

Où :

- N_J : Nombre de jours du mois;
- Q_{cl} : Chaleur totale consommée en valeur journalière moyenne mensuelle;
- $\Delta t'$: Durée effective journalière du cycle de séchage.

L'équation (91) devient alors :

$$f_1 \approx \frac{AF_R^0(\overline{\tau\alpha})I_T \Delta t'}{Q_{c1}} - \frac{AF_R^0 U_L CTE \Delta t'}{Q_{c1}} \quad (94)$$

Et compte tenu de la définition du rayonnement journalier \overline{H}_T moyen mensuel tel que:

$$\overline{H}_T = \overline{I}_T \Delta t \quad (95)$$

On a :

$$f_1 \approx \frac{AF_R^0(\overline{\tau\alpha})\overline{H}_T}{Q_{c1}} - \frac{AF_R^0 U_L CTE \Delta t'}{Q_{c1}} \quad (96)$$

Enfin, en regroupant les paramètres caractéristiques dans deux paramètres adimensionnels X_I et Y_I tels que:

$$X_1 = \frac{AF_R^0 U_L CTE \Delta t'}{Q_{c1}} \quad (97)$$

et

$$Y_1 = \frac{AF_R^0(\overline{\tau\alpha})\overline{H}_T}{Q_{c1}} \quad (98)$$

La couverture solaire s'écrit sous la forme suivante :

$$f_I \approx Y_I + X_I \quad (99)$$

Ce qui signifie qu'elle peut être exprimée en fonction de deux paramètres adimensionnels X_I et Y_I . Nous choisissons une expression polynomiale simple de la forme [18]:

$$f_1(X_1, Y_1) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 Y_1 + a_3 X_1 Y_1 + a_4 X_1^2 + a_5 Y_1^2 \quad (100)$$

où $(a_i)_{i=0,5}$ sont des coefficients déterminés en appliquant une méthode de degrés multiple à toutes les valeurs issues des simulations.

1. b. Fraction de chaleur économisée J_1

La fraction de chaleur économisée est la fraction de chaleur apportée au système autre que celle fournie par l'appoint conventionnel.

Pour la production d'eau chaude de mortification, la fraction de chaleur économisée J_1 est égale à la couverture solaire f_1 :

$$J_1 = f_1 \tag{101}$$

2. Système de production d'air chaud

2.a. Couverture solaire f_2

Selon la définition donnée au § 1.a , pour une période comprise entre t et t_0 elle est définie, sans tenir compte d'abord de l'aérotherme, au niveau de l'armoire séchage par l'expression :

$$f_2 = \frac{\int_t^{t+\Delta t} Q_d dt}{\int_t^{t+\Delta t} Q_{c2} dt} \tag{102}$$

avec:

- Q_d : Puissance utile instantanée délivrée par l'insolateur et transférée à la cuve principale donnée par l'équation (39);
- Q_{c2} : Puissance totale instantanée consommée pour la production d'air chaud de séchage et définie par :

$$Q_{c2} = Q_d + Q_{A2} + Q_{RC} \tag{103}$$

- Q_{A2} : Puissance instantanée apportée par l'appoint conventionnel de l'armoire de séchage (appoint 2).
- Q_{RC} : Puissance instantanée apportée par l'air de recyclage.

Une démarche identique à celle suivie pour établir la couverture solaire f_1 conduit à l'expression suivante de la couverture solaire f_2 :

Où $(b_i)_{i=0,5}$ sont des coefficients que l'on déterminera en appliquant une méthode de régression multiple à toutes les valeurs issues des simulations; les paramètres adimensionnels X_2 et Y_2 sont définis par :

$$X_2 = \frac{AF_R^* U_L CTE \Delta t'}{Q_{c2}} \quad (105)$$

et

$$Y_2 = \frac{AF_R^* (\bar{\tau}\bar{\alpha}) H_T}{Q_{c2}} \quad (106)$$

Où \bar{Q}_{c2} est la chaleur totale consommée en valeurs journalières moyennes mensuelles. Il faut cependant corriger la valeur de la couverture solaire due à l'aérotherme.

La taille de l'aérotherme est caractérisée par la valeur du paramètre $(\varepsilon_A C_{min})/UA$. Lorsqu'elle est égale à 2, la valeur de Y_2 doit être corrigée en utilisant la formule suivante :

$$Y_{2c} = Y_2 \left[0,39 + 0,65 \exp \left(- \frac{0,139}{\frac{\varepsilon_A C_{min}}{UA}} \right) \right] \quad (107)$$

Avec :

- ε_A : Efficacité thermique de l'aérotherme ;
- C_{min} : Débit calorifique minimale de l'aérotherme défini par :

$$C_{min} = (\dot{m} C_p)_{min} = \min \left\{ (\dot{m}_e C_{pe})_x, (\dot{m}_A C_{pA}) \right\} \quad (108)$$

- $(\dot{m}_e C_{pe})_x$: Débit calorifique de l'eau circulant dans l'aérotherme (W.K⁻¹) ;
- $(\dot{m}_A C_{pA})$: Débit calorifique de l'air asséchant (W.K⁻¹) ;
- UA : Perte thermique totale du séchoir (W.K⁻¹).

2. b. Fraction de chaleur économisée j_2

Comme la fraction de chaleur économisée est par définition , la fraction de chaleur apportée au système autre que celle fournie par l'appoint conventionnel, elle est définie au niveau de l'armoire de séchage par le rapport de la chaleur délivrée par l'insolateur et transférée à la cuve principale Q_d et la chaleur recyclée Q_{RC} sur la chaleur totale consommée Q_{c2} pour produire de l'air chaud :

Pour une période comprise entre t et $t + \Delta t$, on a :

$$J_2(t, t + \Delta t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} Q_d dt + \int_t^{t+\Delta t} Q_{RC} dt}{\int_t^{t+\Delta t} Q_{c2} dt} \quad (109)$$

Où Q_{RC} est la puissance instantanée récupérée grâce au recyclage d'air chaud dans l'armoire de séchage.

Décomposons l'équation (109) en :

$$J_2(t, t + \Delta t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} Q_d dt + \int_t^{t+\Delta t} Q_{RC} dt}{\int_t^{t+\Delta t} Q_{c2} dt} \quad (110)$$

Intégrons l'équation (110) sur une période Δt de un (1) mois comme lors de la détermination de f_1 et posons :

$$Q_{RC}^* = N_j \bar{Q}_{RC} \quad (111)$$

Avec :

- \bar{Q}_{RC} : Nombre de jours du mois ;
- N_j : Valeur de Q_{RC} durant le mois ;
- Q_{RC}^* : Valeur de Q_{RC} en valeur journalière moyenne mensuelle.

Il vient alors :

$$J_2 \approx Y_2 - X_2 + \frac{\bar{Q}_{RC}}{Q_{c2}} \quad (112)$$

Ou bien, pour retrouver la forme standard :

$$J_2 \approx Y'_2 - X'_2 \quad (113)$$

En posant :

$$X'_2 = \frac{AF_R U_L CTE \Delta t'}{Q_{c2}} = X_2 \quad (114)$$

et

$$Y'_2 = \frac{AF_R (\bar{T}_R) H_T}{Q_{c2}} + \frac{\bar{Q}_{RC}}{Q_{c2}} = Y_2 + \frac{\bar{Q}_{RC}}{Q_{c2}} \quad (115)$$

D'autre part, il faut tenir compte comme précédemment de la correction sur Y_2 exigée par l'aérotherme.

Enfin on cherche une relation polynomiale de la forme :

$$(X'_2, Y'_2) = c_0 + c_1 X'_2 + c_2 Y'_2 + c_3 X'_2 Y'_2 + c_4 X'^2_2 + c_5 Y'^2_2 \quad (116)$$

Où $(c_i)_{i=0,5}$ sont des coefficients que l'on déterminera en appliquant une méthode de régression multiple à toutes les valeurs issues des simulations.

3. Grandeurs nécessaires a l'exploitation du modèle numérique

3. a. Grandeurs relatives au système de production d'eau chaude

➤ Chaleur utile d'insolateur :

La chaleur utile d'insolation est la chaleur utile fournie par les insolateurs et transférée a la cuve principale.

Elle peut se calculer en utilisant l'équation suivante :

$$\tilde{Q}_d = \int_0^t AF_R'' [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_{st} - T_a)] dt \quad (117)$$

Ella est aussi utilisée pour établir le modèle numérique relatif au Système de production d'air chaud (§ 3.3.2).

➤ Chaleur totale consommée :

C'est la somme de toutes les chaleurs utilisées dans le système production d'eau chaude. On peut la calculer comme suit:

$$\tilde{Q}_{c1} = \int_0^t \dot{m}_E C_{ps} (T_{co} - T_a) dt \quad (118)$$

\dot{m}_E : Débit massique du besoin en eau chaude (kg.S⁻¹);

- C_{ps} : Capacité calorifique massique a pression constante de l'eau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$);
 T_{oc} : Température de consigne de l'eau de mortification (K);
 T_a : Température ambiante (K).

Comme la température de consigne T_{oc} de l'eau de mortification est constante, il est possible d'écrire pendant la durée t de l'opération:

$$\bar{Q}_{c1} = \dot{m}_E C_{ps} (T_{oc} - \bar{T}_a) t \quad (119)$$

La chaleur d'appoint permet d'obtenir et/ou de maintenir à une température constante de consigne T_{oc} l'eau nécessaire à la mortification sortant de la cuve secondaire.

Elle est fournie par la source de chaleur auxiliaire conventionnelle (appoint 1) munie d'une régulations de température et se calcule comme suit:

$$\tilde{Q}_{A1} = \int_0^t \dot{m}_E C_{ps} (T_{oc} - T_{st}) dt \quad (120)$$

- T_{st} : Etant la température de stockage (K).

Ou encore:

$$\tilde{Q}_{A1} = \tilde{Q}_{c1} - \tilde{Q}_d \quad (121)$$

3. b. Grandeurs relatives au système de production d'air chaud

➤ **Chaleur d'évaporation :**

C'est la chaleur nécessaire pour évaporer l'eau du produit.
Elle est donnée par :

$$\tilde{Q}_E = \int_0^t \dot{m}_{es} L_v dt \quad (122)$$

avec :

- \dot{m}_{es} : Vitesse de séchage ($Kg.S^{-1}$);
 L_v : Chaleur latente massique d'évaporation de l'eau du produit ($J .kg^{-1}$).

Cette chaleur \tilde{Q}_E apportée par l'air asséchant ne représente qu'une partie de l'énergie Q_L véhiculée par ce dernier, car une autre est perdue (par conduction et par convection) à travers les parois de l'armoire de séchage.

➤ **Chaleur de séchage :**

C'est la chaleur utilisée dans l'armoire de séchage et véhiculée par l'air asséchant. Elle est donnée par :

$$\tilde{Q}_L = \int_0^t \dot{m}_A C_{pA} (T_{Ae} - T_{As}) dt \quad (123)$$

avec:

- T_{Ae} : Température de l'air à l'entrée de l'armoire (K);
- T_{As} : Température de l'air à la sortie de l'armoire (K);
- \dot{m}_A : Débit massique de l'air asséchant ($\text{kg} \cdot \text{S}^{-1}$);
- C_{pA} : Capacité calorifique massique à pression constante de l'air asséchant ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

En outre, si on connaît la chaleur d'évaporation Q_E et l'efficacité thermique du séchoir η_L (pourcentage des pertes des parois de l'armoire de séchage), calculer la chaleur de séchage à l'aide de l'expression:

$$\tilde{Q}_L = \frac{Q_L}{\eta_L}$$

Avec :

- $\eta_L = 82\%$: système avec recyclage et mélange d'air [18];
- $\eta_L = 85\%$: système sans recyclage d'air [18].

C'est la somme de toutes les chaleurs utilisées dans le système de production d'air chaud. On peut la calculer à l'aide de l'expression :

$$Q_{c2} = \int_0^t \dot{m}_A C_{pA} (T_A - T_a) dt \quad (125)$$

avec:

- T_A : Température de l'air asséchant (K);
- T_a : Température ambiante (K).

Où encore en écrivant le bilan thermique global au niveau de l'armoire de séchage :

$$\tilde{Q}_{c2} = \tilde{Q}_d + \tilde{Q}_{A2} + \tilde{Q}_{RC} \quad (126)$$

- \tilde{Q}_{A2} : Chaleur d'appoint (appoint 2);
- \tilde{Q}_{ac} : Chaleur recyclée (recyclage de l'air asséchant);
- \tilde{Q}_d : Chaleur utile d'insolation (cf. § 3.3.1.).

En supposant, en outre, que la température de séchage T_A est constante pendant la durée t de l'opération, on peut écrire à partir de (125) que:

$$\bar{Q}_{c2} = \dot{m}_A C_{pA} (T_A - \bar{T}_a) t \quad (127)$$

Où \bar{T}_a désigne la valeur moyenne de la température ambiante (K).

➤ **Chaleur rejetée dans l'ambiance :**

La chaleur rejetée est la chaleur véhiculée par l'air sortant du séchoir. On peut l'évacuer à l'aide de la relation suivante :

$$\tilde{Q}_R = \tilde{Q}_{c2} + \tilde{Q}_L \quad (128)$$

Où encore à l'aide de :

$$\tilde{Q}_R = \int_0^t \dot{m}_A C_{pA} (T_{As} - T_a) dt \quad (129)$$

Elle représente donc une perte d'autant plus importante que la température de l'air asséchant à la sortie du séchoir est élevée.

➤ **Chaleur recyclée :**

Comme l'air sortant du séchoir a une température nettement supérieure à la température ambiante, son recyclage conduit à un apport supplémentaire d'énergie réutilisable par le système.

On peut évaluer cette énergie supplémentaire comme suite :

$$\tilde{Q}_{RC} = P_c \tilde{Q}_R \quad (130)$$

Où P_c représente le taux de recyclage de l'air dans le système

Notons que la chaleur réellement rejetée dans l'ambiance et non récupérée est :

$$\tilde{Q}_{RR} = (1 - P_c) \tilde{Q}_R \quad (131)$$

➤ **La chaleur d'appoint :**

La chaleur d'appoint régularise l'air entrant dans l'armoire de séchage à une température constante. Elle est fournie par la source de chaleur auxiliaire conventionnelle (appoint 2) munie d'une régulation de température et se calcule comme suit:

$$\tilde{Q}_{A2} = \int_0^t \dot{m}_A C_{PA} (T_A - T_{sa}) dt \quad (132)$$

T_{sa} : étant la température de l'air sortant de l'aérotherme (K).

Soit encore :

$$\tilde{Q}_{A2} = \tilde{Q}_{c2} + \tilde{Q}_d + \tilde{Q}_{RC} \quad (133)$$

CHAPITRE VI

I.SIMULATION DU SYSTEME ET INTERPRETATION DES RESULTATS

La simulation du système s'effectue en deux étapes :

- Primo, on simule le système "rayonnement-insolateur" pendant toute l'année afin de voir l'évolution de l'insolation dans le temps en fonction de l'inclinaison de l'insolateur et d'en déduire l'inclinaison optimale de ce dernier;

- Secundo, avec la valeur optimale de l'inclinaison de l'insolateur, on simule l'ensemble du système et on en déduit les abaques de dimensionnement.

1. Le site et son climat

Le site choisi est Adrar qui est la ville des plantes aromatiques et médicinales en Algérie. Ses coordonnées sont [42] :

- Longitude : $-0^{\circ}28$ E,
- Latitude : $27^{\circ}88$ S,
- Altitude : 264 m.

Rappelons que la marjolaine est une orchidée qui ne pousse que dans des conditions climatiques bien déterminées : en climat tropical.

Nous présentons ci-dessous l'évolution de la température ambiante T_a et celle de la voûte céleste T_c dans le temps (*figure 2*). Les données météorologiques sont présentées dans l'annexe C.

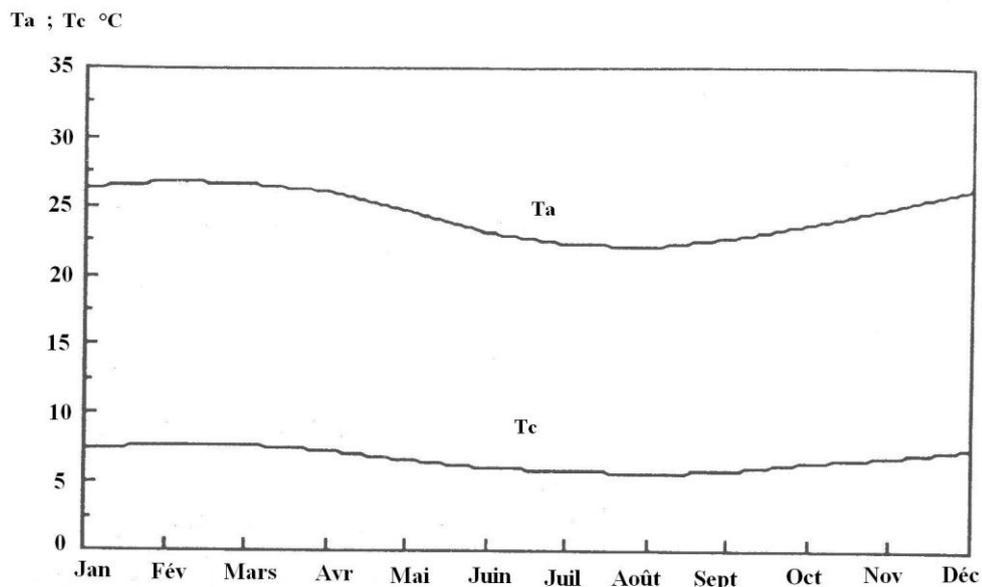


Figure 2: Evolution annuelle de la température ambiante T_a et de la température T_c de la voûte céleste en moyennes mensuelles. Site d'Adrar

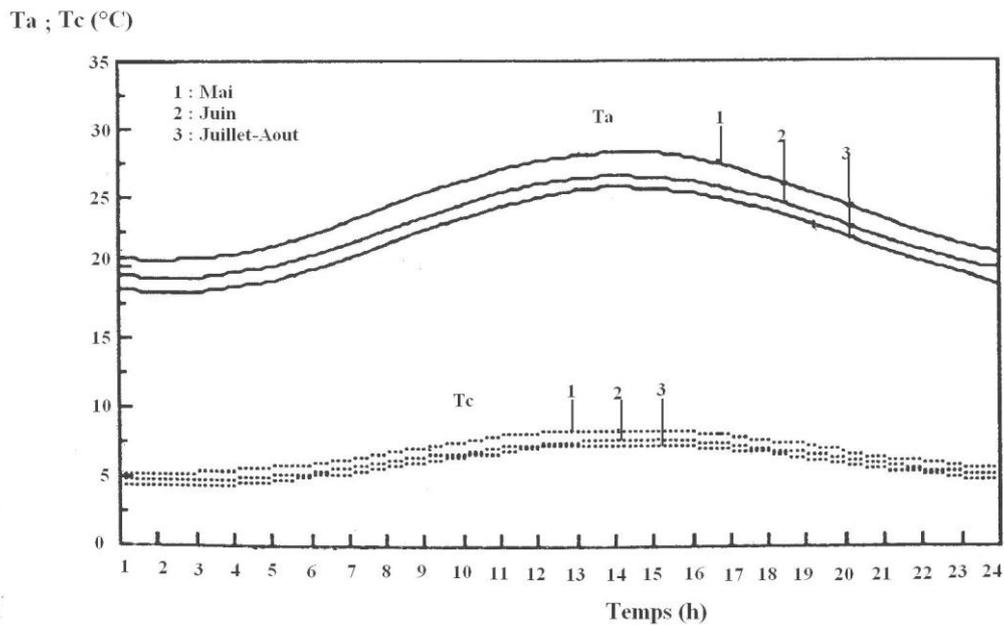


Figure 3: Evolution journalière de la température ambiante T_a et T_c de la voûte céleste du mois de mai au mois d'aout en valeurs moyennes mensuelles. Site d'Adrar.

Nous pouvons constater sur *la figure 2* que la variation de la moyenne mensuelle de la température ambiante est faible, de l'ordre de 5 °C.

La température ambiante atteint son maximum au mois de février avec 26,8 °C et son minimum au mois d'aout avec 21,9 °C. La moyenne mensuelle de la température de la voûte céleste calculée selon la formule de *Swinbank* varie de ce fait entre 7,7 °C et 5,7 °C (*fig 2*).

La figure 3 présente les variations de la température ambiante et celles de la voûte céleste de mai à aout, mois pendant lesquels se récolte et se traite la marjolaine.

2. Simulation du rayonnement et interprétation

L'évolution du rayonnement global extraterrestre \bar{H}_o , du rayonnement global \bar{H} journalier moyen mensuel reçu sur un plan horizontal (données météorologiques) et du rayonnement global \bar{H}_T journalier moyen mensuel reçu sur un plan incliné est donnée sur la *figure 4* pour un indice de clarté journalier moyen mensuel \bar{K}_T égal à 0,51 et une inclinaison de l'insolateur S_c de 10 degrés.

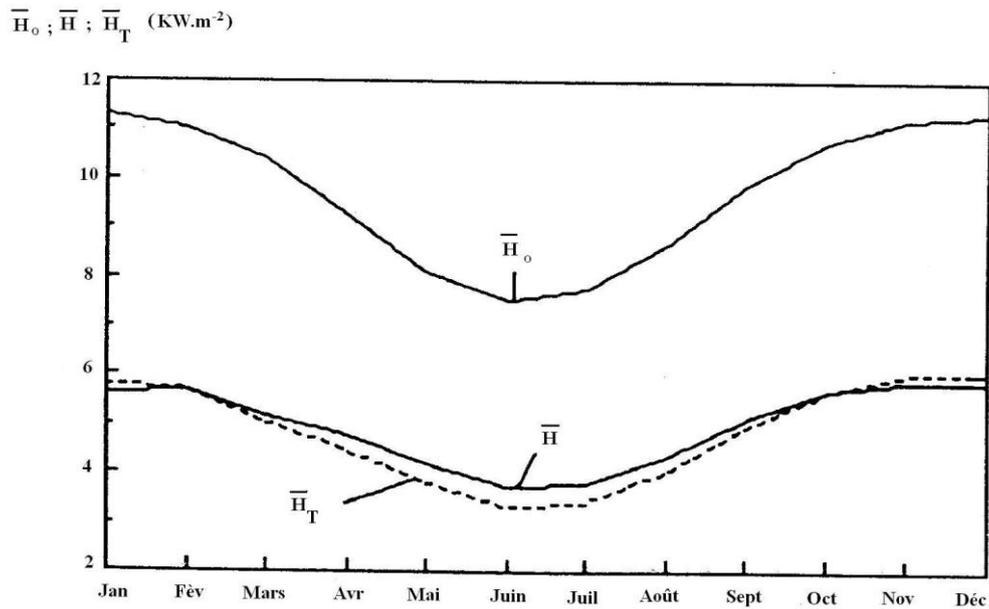


Figure 4: Evolution annuelle du rayonnement global journalier extraterrestre \overline{H}_o , du rayonnement global H journalier moyen mensuel sur un plan horizontal et du rayonnement global HT journalier moyen mensuel sur un plan incline ($S_c = 10^\circ$ et $K_T = 0,51$).

On constate donc qu'a un moment donné, le rayonnement global journalier moyen mensuel reçu sur un plan incliné devient inférieur au rayonnement global journalier moyen mensuel reçu sur un plan horizontal.

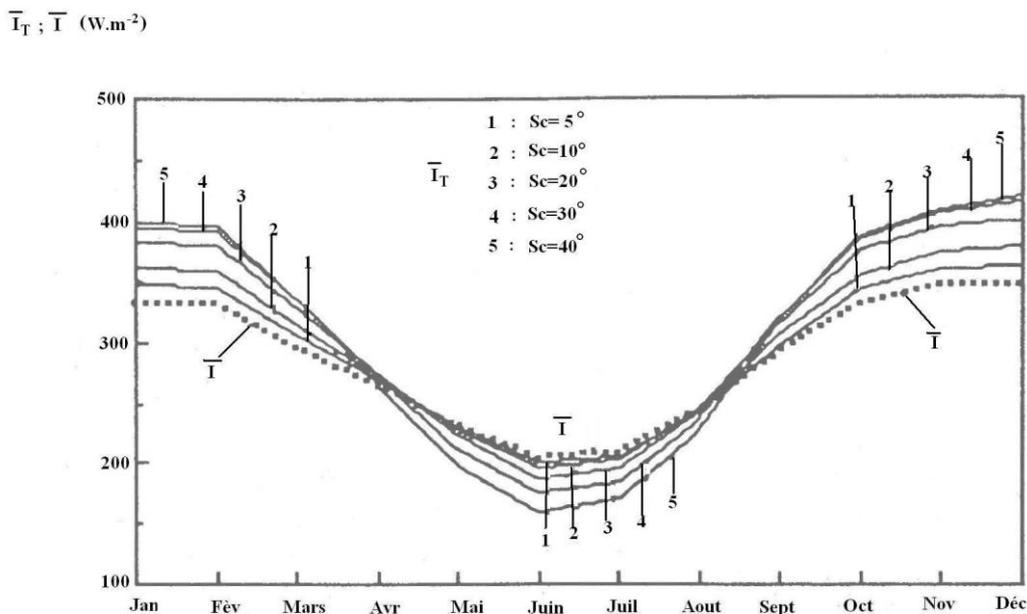


Figure 5: Variations annuelles du rayonnement global horaire moyen mensuel \overline{I} reçu sur un plan horizontal et variation du rayonnement global horaire moyen mensuel \overline{I}_T reçu sur un plan incliné en fonction de l'inclinaison S_c .

De plus, la *figure 5* montre que, pour la région d' Adrar, le rayonnement global horaire moyen mensuel reçu sur un plan incliné par rapport au même rayonnement reçu sur un plan horizontal est, en général, d'autant plus important pendant l'été (septembre à mars), que l'inclinaison du capteur est accentuée. C'est l'inverse en hiver (avril à Août). On rappelle qu'en pratique, il n'existe à Adrar que deux saisons distinctes : l'été et l'hiver.

L'analyse détaillée de la même figure nous a permis d'établir le *tableau 1* présentant les valeurs optimales de l'angle d'inclinaison de l'insolateur pour chaque mois de l'année, c'est-à-dire, les angles d'inclinaison qui correspondent au maximum de rayonnement capté en moyennes mensuelles.

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
S_c (°)	40	35	35	20	5	0	0	10	30	35	35	35

Tableau 1: Inclinaison optimale de l'insolateur pour les différents mois de l'année (région d'Adrar).

Enfin, nous donnons ci-après (*figure 6*) l'évolution du rayonnement global horaire moyen mensuel I sur un plan incliné et ses composantes directe I_b et diffuse I_d .

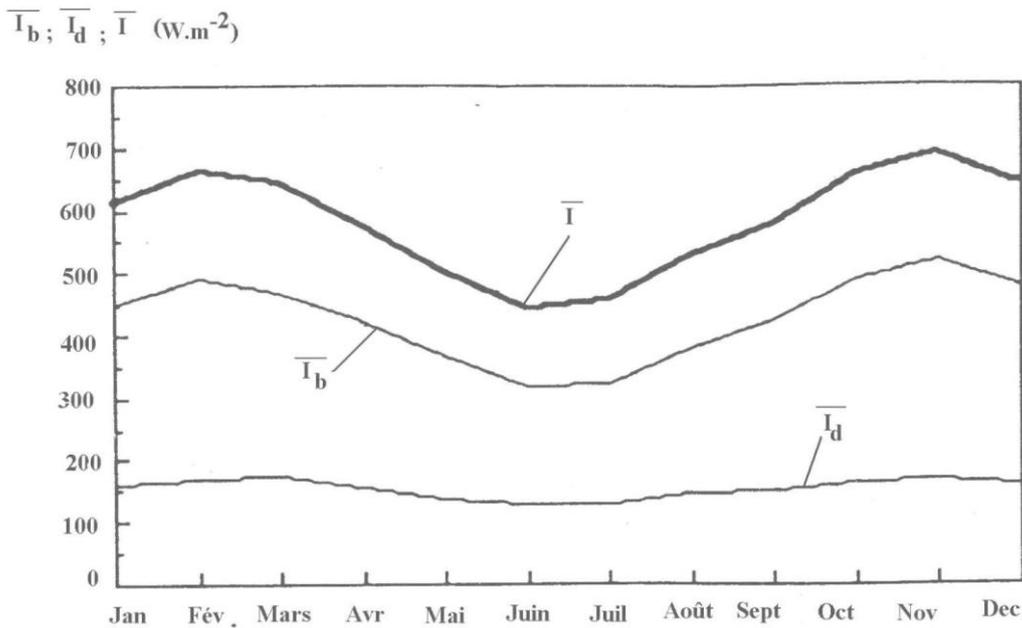


Figure 6 : Evolution annuelle des rayonnements directe I_b , diffuse I_d et global I horaire moyen mensuel sur plan horizontal.(région Adrar)

3. Simulation du fonctionnement de l'insolateur et interprétation

Il faut donc déterminer l'inclinaison pour capter le maximum d'énergie solaire.

Nous donnons l'évaluation de la puissance utile \bar{Q}_u en moyennes annuelles en fonction de l'inclinaison du capteur sur la *figure 7*.

On peut en déduire que l'inclinaison optimale, si l'insolateur a un support fixe, est de l'ordre de 40 degrés.

Mais, comme la récolte de la marjolaine se situe entre mai et août, nous devons considérer l'évolution de la puissance utile délivrée par l'insolateur pendant ces mois. Nous l'appelons puissance utile restreinte \bar{Q}_u^r . Nous l'avons représentée en fonction de l'inclinaison S_c sur la *figure 8*.

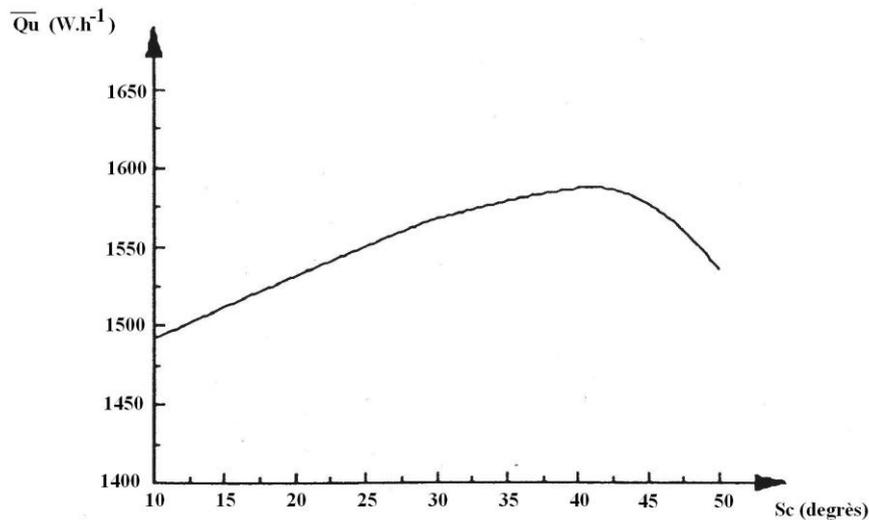


Figure 7 : Evolution de la puissance utile Q_u en moyennes annuelles délivrée par l'insolateur en fonction de son inclinaison S_c . ($A = 20 \text{ m}^2$, $m_e = 0,0005 \text{ kg.s}^{-1}$, region: Adrar).

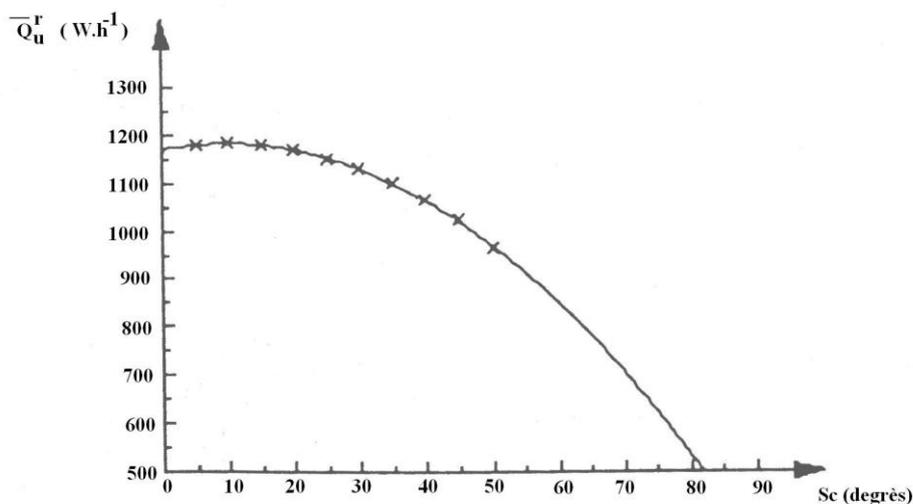


Figure 8: Evolution de la puissance utile restreinte Q_u^r en fonction de l'inclinaison S_c de l'insolateur. ($A = 20 \text{ m}^2$, $m_e = 0,0005 \text{ kg.s}^{-1}$, région: Adrar).

La courbe de la *figure 8* peut-être approchée avec une corrélation égale à l'unité par une parabole d'équation :

$$\bar{Q}_u^r = 1170,1 + 2,5971 s_c - 0,13231 s_c^2 \quad (134)$$

On trouve une inclinaison optimale de 9,81 degrés. Dans tout ce qui suit, nous retenons la valeur arrondie de 10 degrés comme valeur optimale de l'inclinaison s_c de l'insolateur.

L'effet de l'aire A de l'insolateur sur la puissance utile délivrée Q_u est présentée sur la *figure 9*.

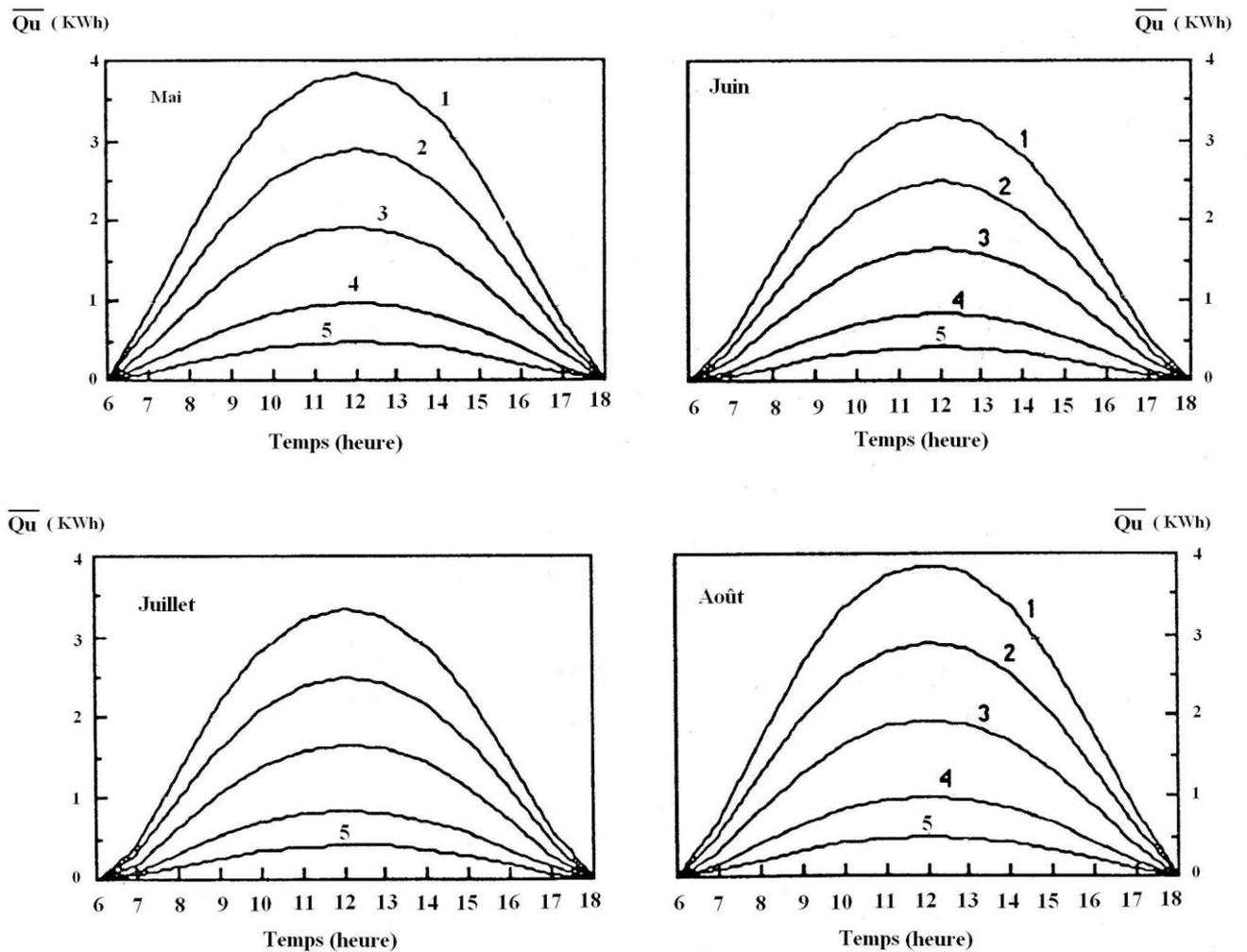


Figure 9: Evolution de la puissance utile Q_u délivrée par l'insolateur à eau pour les mois de Mai à Août entre le lever et le coucher du soleil en fonction de l'aire de l'insolateur A ($s_e = 10^\circ$, $m_e = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, région: Adrar).

On constate que la puissance utile délivrée par l'insolateur est d'autant importante que son aire est grande et que le débit d'eau est élevé (cf. *figure 10*).

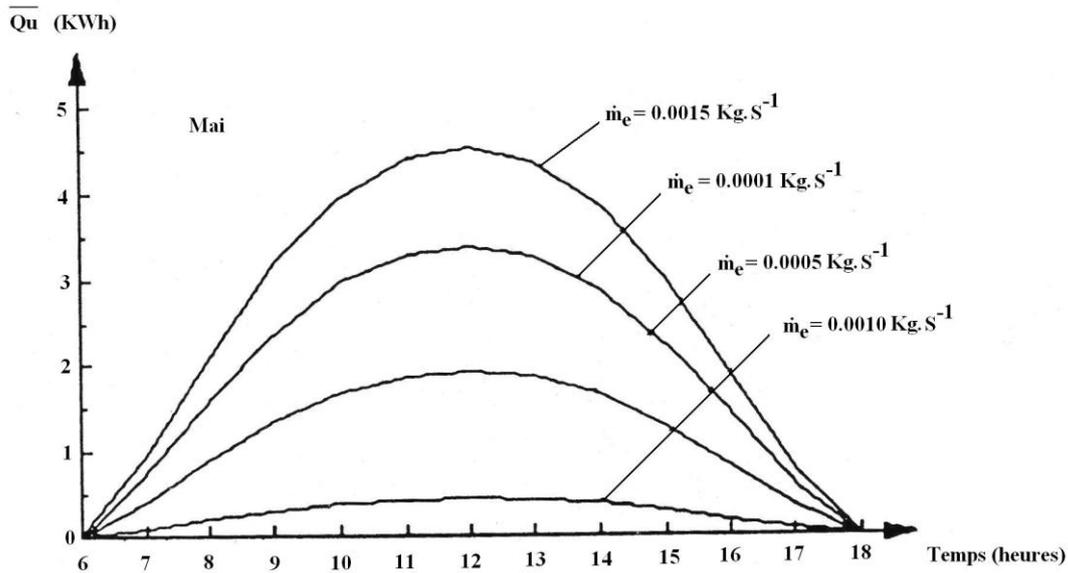


Figure 10: Influence du débit d'eau \dot{m}_e (kg.s^{-1}) de l'insolateur sur sa puissance utile $\overline{Q_u}$ dans la journée.

($s_c = 10^\circ$. $A = 20 \text{ m}^2$, région : Adrar).

Inversement, la température T_{si} de l'eau à la sortie de l'insolateur diminue de plus en plus lorsque son débit massique \dot{m}_e croit (figure 11).

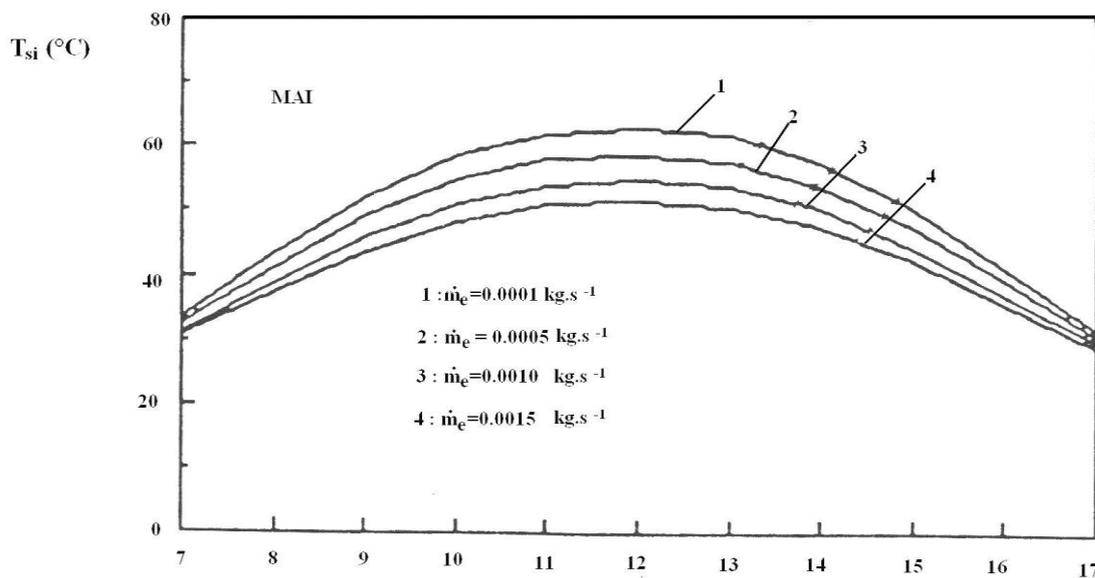


Figure 11: Influence du débit massique \dot{m}_e (kg.s^{-1}) de l'eau sur sa température T_{si} à la sortie de l'insolateur ($s_c = 10^\circ$. $A = 20 \text{ m}^2$).

Les caractéristiques de l'insolateur à eau sont données dans l'annexe D

4. Simulation de la cuve de stockage d'eau chaude et interprétation

La simulation considère la cuve de stockage d'eau chaude comme une cuve à deux volumes isothermes, c'est-à-dire comme une cuve présentant une stratification thermique.

Elle subit, en amont, l'effet de l'échangeur et, en aval, celui de l'aérotherme. Plus précisément, la température de l'eau dans la cuve de stockage dépend fortement, en amont, de la valeur du débit \dot{m}_{ec} , de l'eau venant de la cuve principale et circulant dans l'échangeur; et en aval, du débit \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme. Déterminer la valeur de ces débits est donc très important.

4. a. Effet de l'échangeur et de l'aérotherme

L'échangeur et l'aérotherme utilisés dans notre simulation sont des échangeurs de chaleur que le constructeur nous a proposés. Ils ont une efficacité thermique égale à 0,9.

L'influence de l'échangeur sur la puissance réellement délivrée à la cuve de stockage, est représentée sur la *figure 12* suivante :

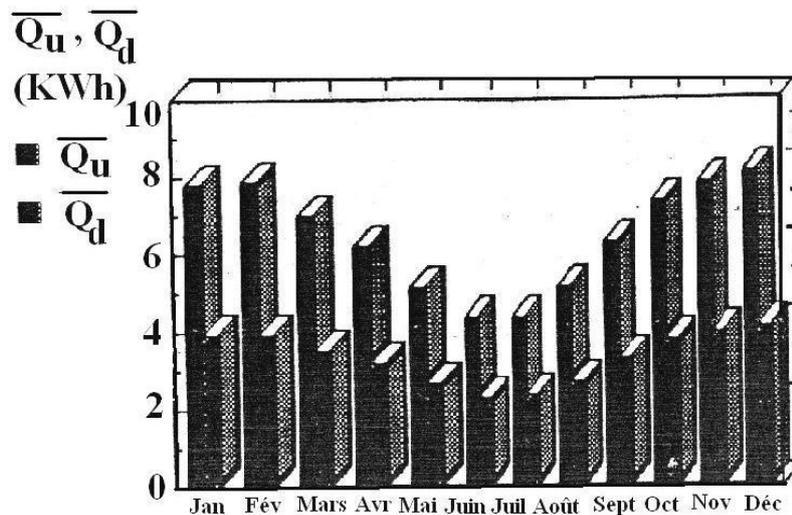


Figure 12: Evolution dans le temps de la puissance $\overline{Q_u}$ délivrée par les insolateurs et de la puissance $\overline{Q_d}$ transmise à la cuve de stockage en moyennes mensuelles.

La présence de l'aérotherme nous oblige à décomposer la cuve de stockage deux volumes isothermes puisque la température de retour de l'eau, après passage dans l'aérotherme, accentue la stratification.

L'évolution annuelle des températures $T_{st}^{(1)}$ et $T_{st}^{(2)}$ respectivement dans volume isotherme supérieur et inférieur par rapport à la température T_{si} délivrée par l'insolateur est la suivante (*figure 13*) :

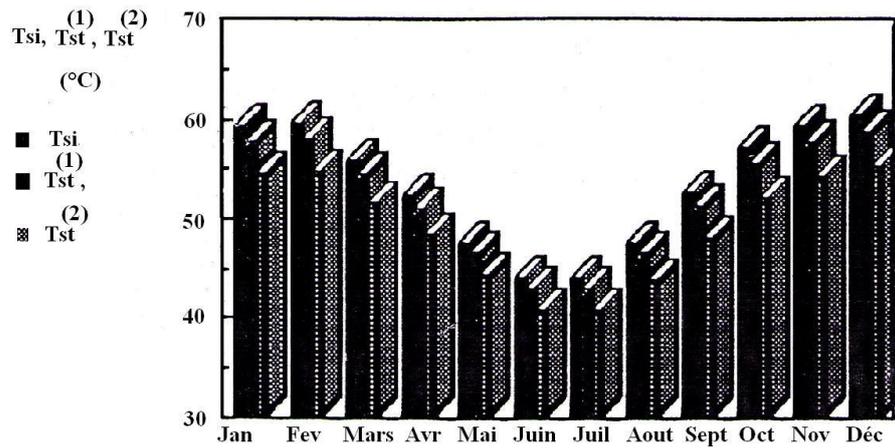


Figure 13: Evolution dans le temps des températures $T_{st}^{(1)}$ et $T_{st}^{(2)}$ dans le volume supérieure et inférieure de la cuve par rapport a la température T_{si} de l'eau délivrée à la sortie de l'insolateur.
 ($\dot{m}_{ex} = 0,1 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg.s}^{-1}$ A=80 m²;V=3200 l)

La différence de température entre T_i et la moyenne des températures dans la cuve est en moyennes annuelles de 2,84 °C, soit de l'ordre de 3 °C. Sa variation annuelle est représentée sur la *figure 14* :

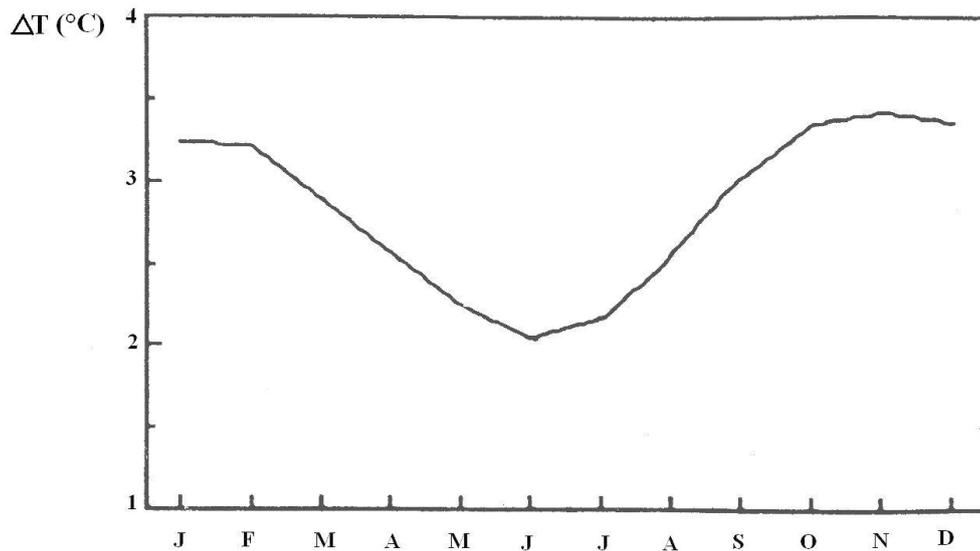


Figure 14: Évolution annuelle de la différence de températures en moyennes mensuelles entre la température T_{si} de l'eau à la sortie de l'insolateur et la moyenne T_{st} de la température dans la cuve.

4. b. Effet du débit de l'eau venant de la cuve et circulant dans l'échangeur \dot{m}_{ec}

Nous représentons sur les figures 15 et 16 l'évolution moyenne dans le temps entre le lever et le coucher du soleil des températures respectivement dans le volume supérieur et inférieur pour différentes valeurs du débit massique de l'eau venant de la cuve et circulant dans l'échangeur \dot{m}_{ec}

On constate que plus la valeur de ce débit \dot{m}_{ec} , augmente, plus la température de l'eau dans la cuve de stockage augmente aussi.

Il est à noter que, pour les simulations horaires, journalières et mensuelles, nous choisissons le mois de juillet, d'une part parce que le séchage de la marjolaine s'effectue surtout entre mai et septembre et d'autre part parce que le rayonnement est à son minimum en juillet, ce qui valide l'extrapolation des résultats pour les autres mois d'utilisation puisque les résultats obtenus sont les moins bons.

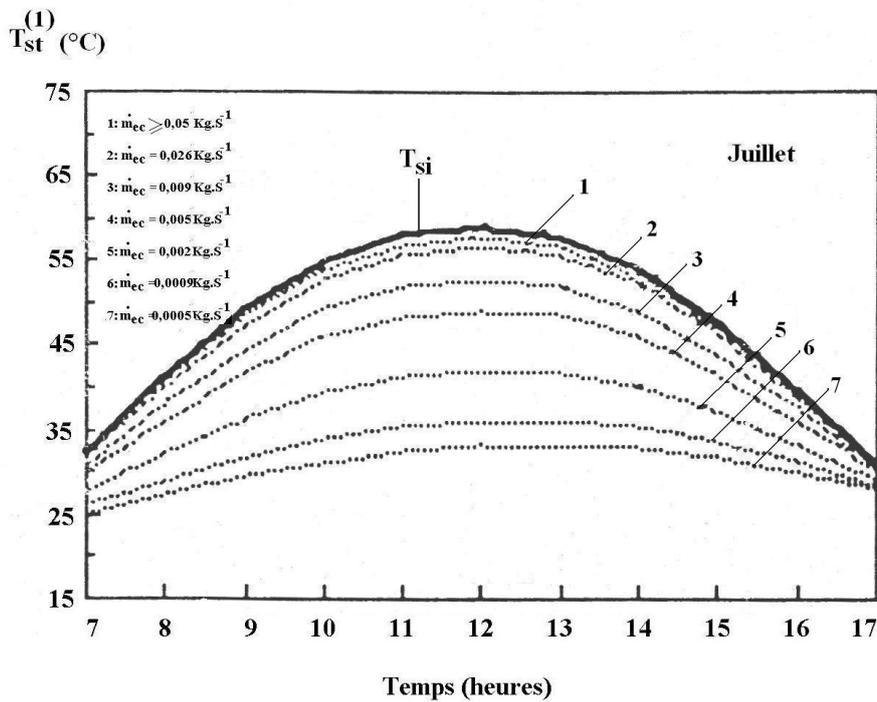


Figure 15: Comparaison de la température de l'eau à la sortie T_{st} de l'insolateur avec la température dans le volume supérieur de la cuve $T_{st}^{(1)}$ pour différentes valeurs du débit massique \dot{m}_{ec} (kg .s⁻¹) de l'eau circulant dans l'échangeur. (Site: Adrar; $\dot{m}_{ei} = 0,0005$ kg.s⁻¹;

$\dot{m}_{ex} = 0,05$ kg.s⁻¹; $\dot{m}_A = 0,425$ kg.s⁻¹; A = 80 m²; V = 3200l)

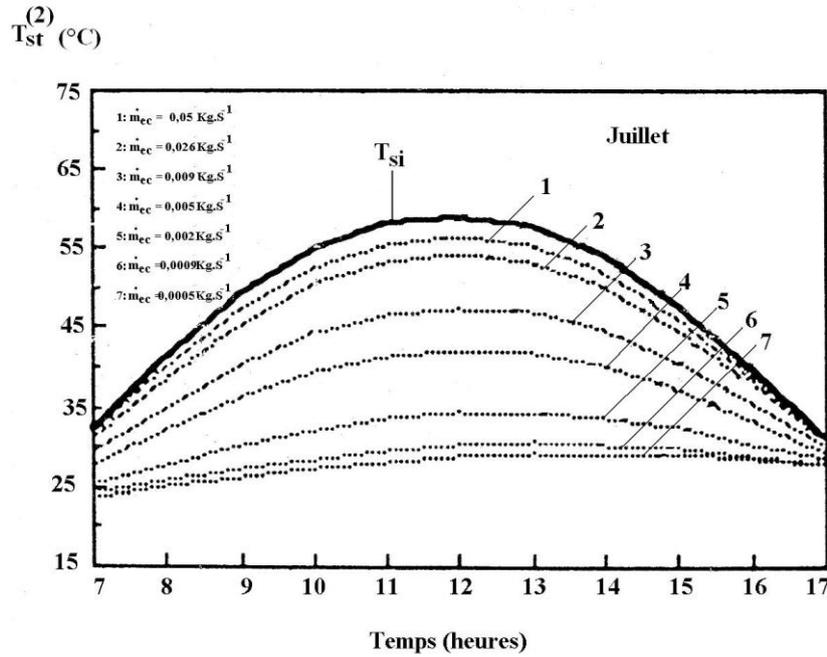


Figure 16: Comparaison de la température de l'eau a la sortie T_{si} de l'insolateur avec la température dans le volume supérieur de la cuve $T_{st}^{(2)}$ pour différentes valeurs du débit massique \dot{m}_{ec} ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'eau circulant dans l'échangeur. (Site: Adrar; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ex} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_A = 0,425 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 3200\text{l}$)

Au contraire, le rendement de l'échangeur diminue sensiblement lorsque \dot{m}_{ec} de l'eau venant de la cuve et circulant dans l'échangeur augmente (figure 17)

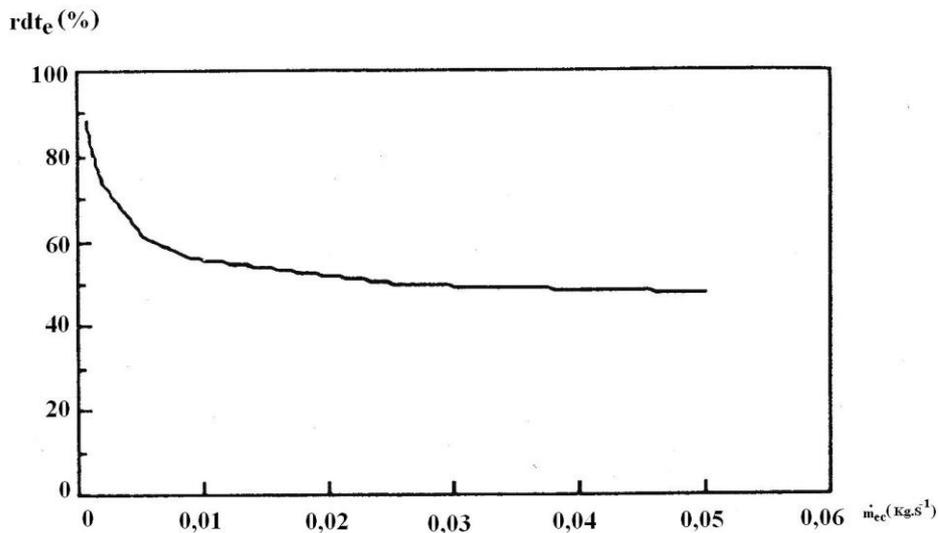


Figure 17: Variations du rendement moyen de l'échangeur en fonction du débit massique \dot{m}_{ec} de l'eau venant de la cuve et circulant dans l'échangeur. (site: Adrar; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 3200 \text{ l}$; $\dot{m}_{ec} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ex} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_A = 0,425 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

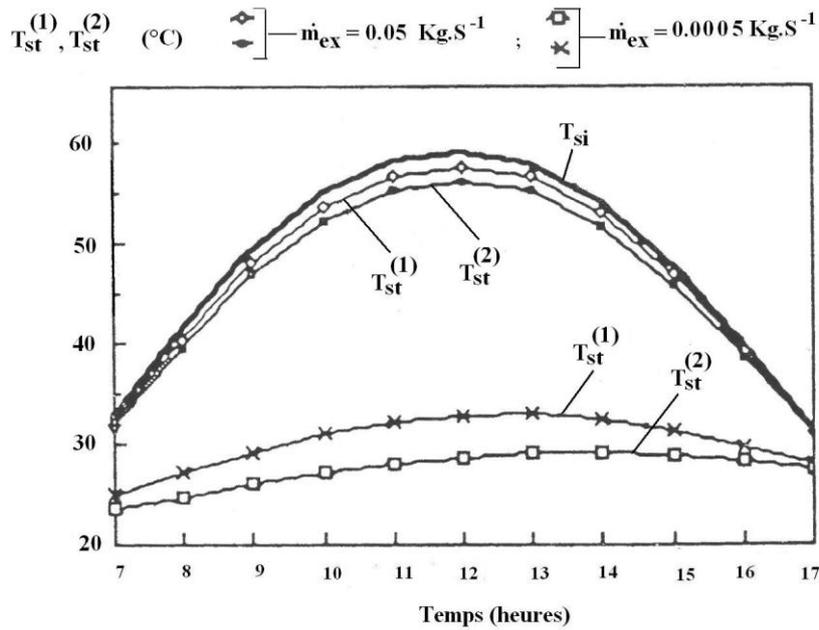


Figure 18: Comparaison des températures $T_{st}^{(1)}$ et $T_{st}^{(2)}$ de l'eau dans la cuve avec la température T_{si} de l'eau a la sortie de l'insolateur pour deux valeurs extrêmes du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau venant de la cuve et circulant dans l'échangeur.

En effet, les températures de l'eau $T_{st}^{(1)}$ du volume supérieur et $T_{st}^{(2)}$ du volume inférieur dans la cuve avoisinent la température de l'eau T_{si} délivrée par l'insolateur. L'écart de température T_{si} et $T_{st}^{(2)}$ et donc minime, comme la figure 18 de sorte que le rendement est faible

4. c .Effet du débit de l'eau circulant dans l'aérotherme \dot{m}_{ex}

L'évolution moyenne dans le temps entre le lever et le coucher du soleil des variations des températures dans le volume supérieur et inférieur pour différentes valeurs du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme, est représenté respectivement sur les figures 19 et 20.

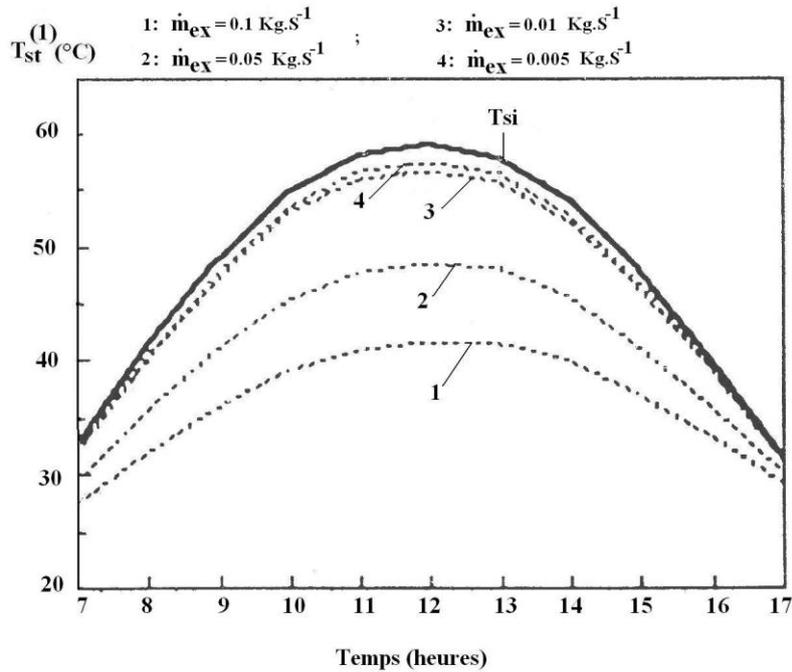


Figure 19: Comparaison de la température de l'eau a la sortie T_{si} de l'insolateur avec la température dans le volume supérieur de la cuve $T_{st}^{(1)}$ pour différentes valeurs du débit massique \dot{m}_{ex} (kg.s^{-1}) de l'eau circulant dans l'aérotherme. (Site: Adrar; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_A = 0,425 \text{ kg.s}^{-1}$; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 32001$)

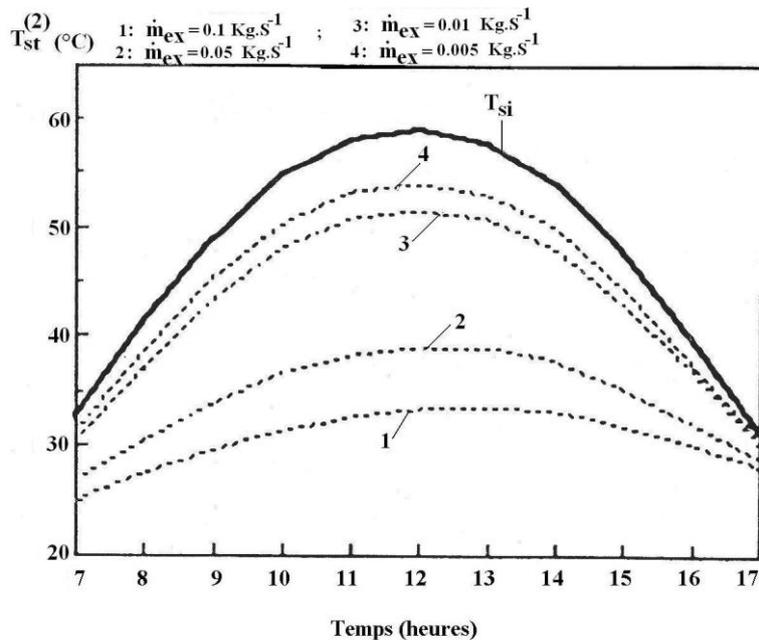


Figure 20: Comparaison de la température de l'eau a la sortie T_{si} de l'insolateur avec la température dans le volume supérieur de la cuve $T_{st}^{(2)}$ pour différentes valeur du débit massique \dot{m}_{ex} (kg.s^{-1}) de l'eau circulant dans l'aérotherme. (Site: Adrar; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_A = 0,425 \text{ kg.s}^{-1}$; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 32001$)

Contrairement au cas précédent, on constate que, plus la valeur du débit \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme augmente, plus la température de l'eau dans la cuve de stockage diminue.

En outre, le rendement de l'échangeur diminue sensiblement avec ce débit (figure 21) parce que les températures de l'eau $T_{sr}^{(1)}$ du volume supérieur et $T_{sr}^{(2)}$ du volume inférieur dans la cuve avoisinent la température de l'eau T_{si} délivrée par l'insolateur. L'écart de température entre $T_{sr}^{(1)}$ et $T_{sr}^{(2)}$ est donc minime, comme le montre la figure 22 de sorte que le rendement est faible.

Il faut donc optimiser \dot{m}_{ex} pour obtenir à la fois une température de l'eau dans la cuve de 65°C et un rendement moyen suffisant pour l'échangeur. Nous avons obtenu une valeur de 0,005 kg.s⁻¹.

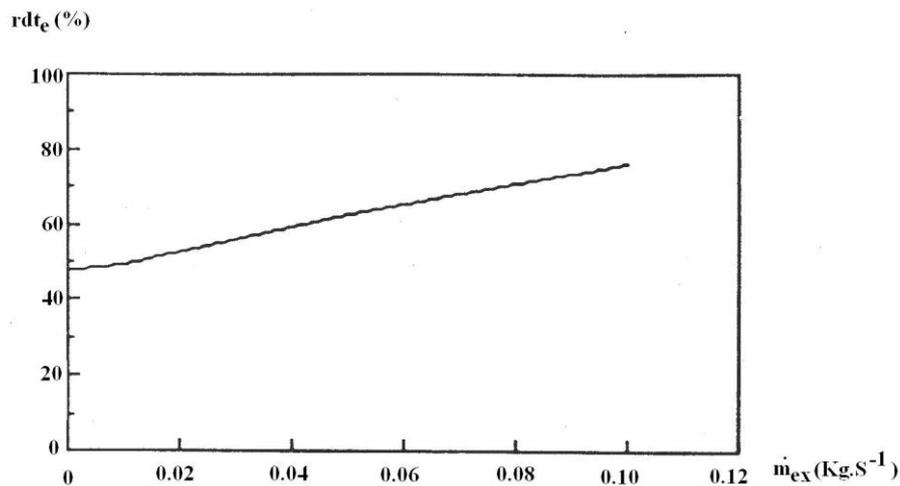


Figure 21: Variations du rendement moyen de l'échangeur en fonction du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme. (Site: Adrar; $\dot{m}_{ei} = 0,0005$ kg.s⁻¹; $\dot{m}_{ec} = 0,05$ kg.s⁻¹; $\dot{m}_A = 0,425$ kg.s⁻¹; A = 80 m²; V = 3200l) .

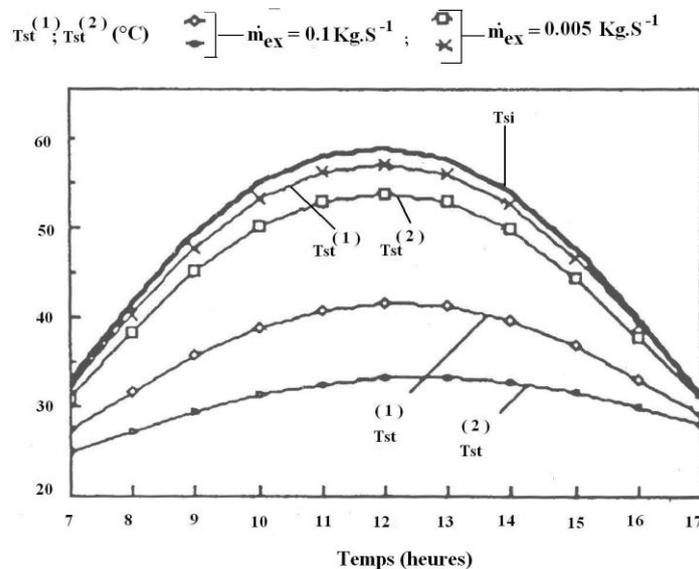


Figure 22: Comparaison des températures $T_{sr}^{(1)}$ et $T_{sr}^{(2)}$ de l'eau dans la cuve avec la température T_{si} de l'eau à la sortie de l'insolateur pour deux valeurs extrêmes du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme.

La valeur du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme conditionne la stabilité de la cuve. En effet, lorsque cette valeur est optimale, température de l'eau au sein de la cuve est stable vis-à-vis du débit massique \dot{m}_A l'air asséchant (figure 23), alors qu'elle ne l'est pas (figures 24 et 25) dans le cas contraire.

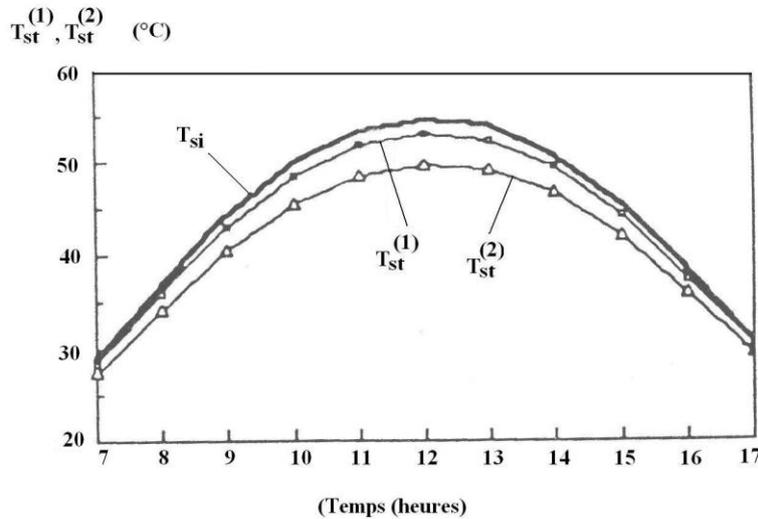


Figure 23: Evolution de la température de l'eau à la sortie T_{si} de l'insolateur, de la température de l'eau dans le volume supérieur de la cuve $T_{sr}^{(1)}$ et de la température dans le volume inférieur de la cuve $T_{sr}^{(2)}$ quelle que soit la valeur du débit massique \dot{m}_A ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'air asséchant pour la valeur optimale du débit massique \dot{m}_A de l'eau circulant dans l'aérotherme. ($\dot{m}_{ex} = 0,005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 3200 \text{ l}$)

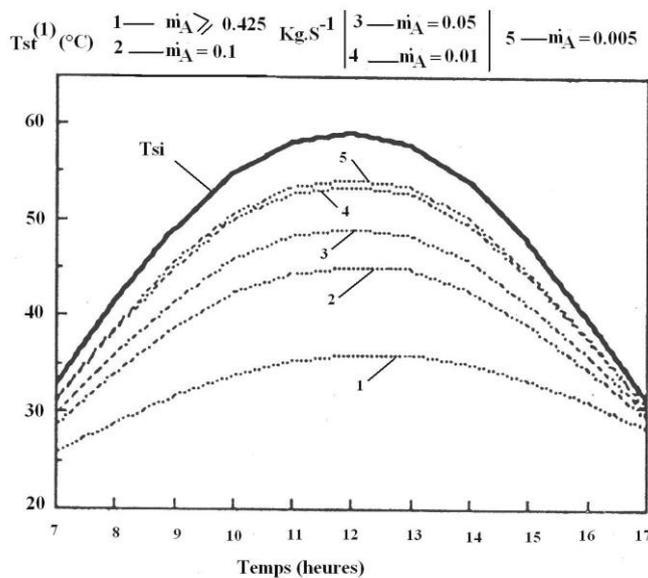


Figure 24: Evolution de la température de l'eau à la sortie T_{si} de l'insolateur et de la température de l'eau dans le volume supérieur de la cuve $T_{sr}^{(1)}$ pour des valeurs de débit massique \dot{m}_A ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'air asséchant. La valeur du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme n'est pas optimale. ($\dot{m}_{ex} = 0,005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 3200 \text{ l}$).

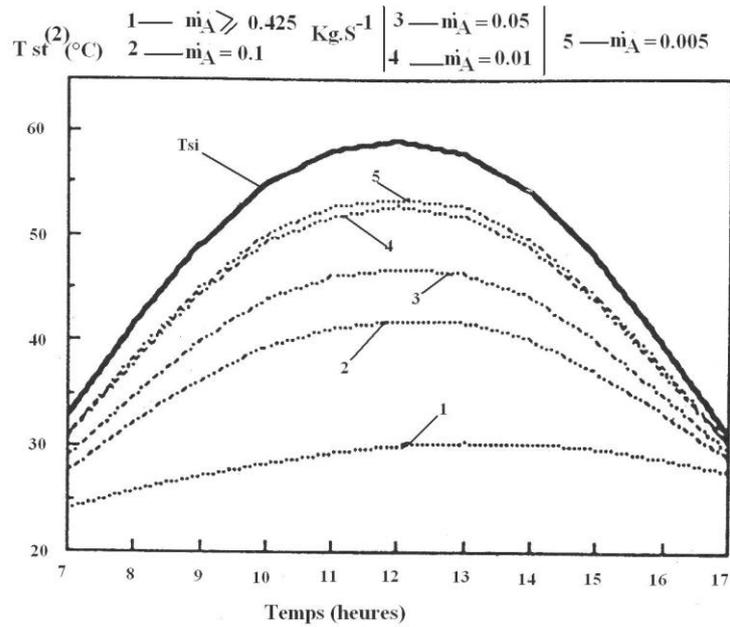


Figure 25: Evolution de la température de l'eau à la sortie T_{si} de l'insolateur et de la température de l'eau dans le volume inférieur de la cuve $T_{sr}^{(2)}$ pour des valeurs du débit massique \dot{m}_A ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'air asséchant. La valeur du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme n'est pas optimale. ($\dot{m}_{ex} = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 3200 \text{ l}$).

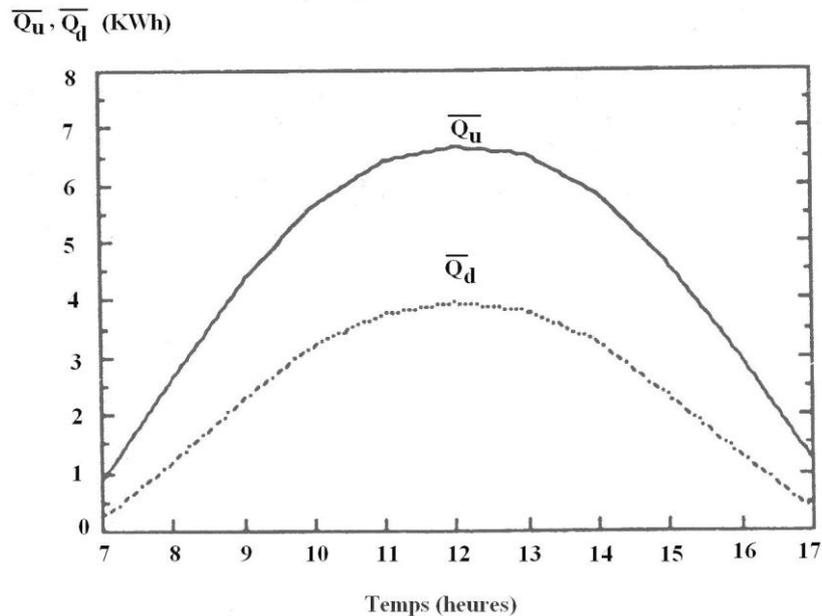


Figure 26: Evolution de la puissance $\overline{Q_u}$ délivrée par l'insolateur et de la puissance $\overline{Q_d}$ transférée à la cuve de stockage d'eau à travers l'échangeur quelle que soit la valeur du débit massique \dot{m}_A ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'air asséchant pour la valeur optimale du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme. ($\dot{m}_{ex} = 0,005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A = 80 \text{ m}^2$; $V = 3200 \text{ l}$).

La puissance $\overline{Q_d}$ transférée à la cuve de stockage (énergie d'origine solaire transférée à travers l'échangeur) varie de façon similaire (figures 26 et 27).

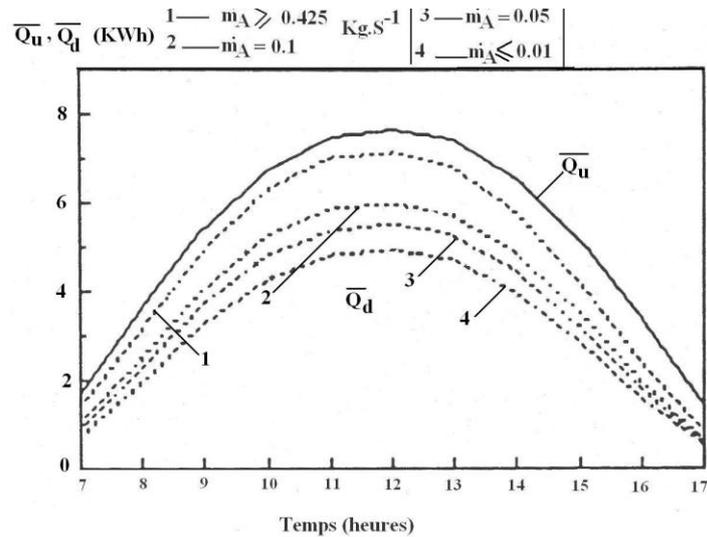


Figure 27: Evolution de la puissance \bar{Q}_u délivrée par l'insolateur et de la puissance Q_d transférée dans la cuve de stockage d'eau à travers l'échangeur pour des valeurs du débit massique \dot{m}_A ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'air asséchant. La valeur du débit massique \dot{m}_{ex} de l'eau circulant dans l'aérotherme n'est pas optimale. ($\dot{m}_{ex} = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A=80 \text{ m}^2$; $V=3200 \text{ l}$)

4.d. Influence de la surface de captation sur la puissance délivrée à la cuve de stockage

On rappelle que les insolateurs sont disposés en parallèles. En effet, il est connu que le rendement d'un insolateur dépend surtout de la température d'entrée du fluide caloporteur. η augmente lorsque celle-ci diminue. Il n'est donc pas justifié de placer en série les insolateurs en vue seulement d'augmenter la température à leur sortie puisque leur rendement est très faible.

Les insolateurs étant disposés parallèlement, la température à leur sortie n'est pas sensible à leur aire et ne dépend que de leurs caractéristiques (longueur des insolateurs, diamètre du tube, conductivités des éléments constituants, isolants ...) autres que celle-ci.

Au contraire, l'aire des insolateurs influe beaucoup sur la puissance qu'ils délivrent comme le montre la *figure 28* de sorte que la puissance réellement délivrée à la cuve de stockage après passage dans l'échangeur varie aussi avec cette aire (*figure. 29*).

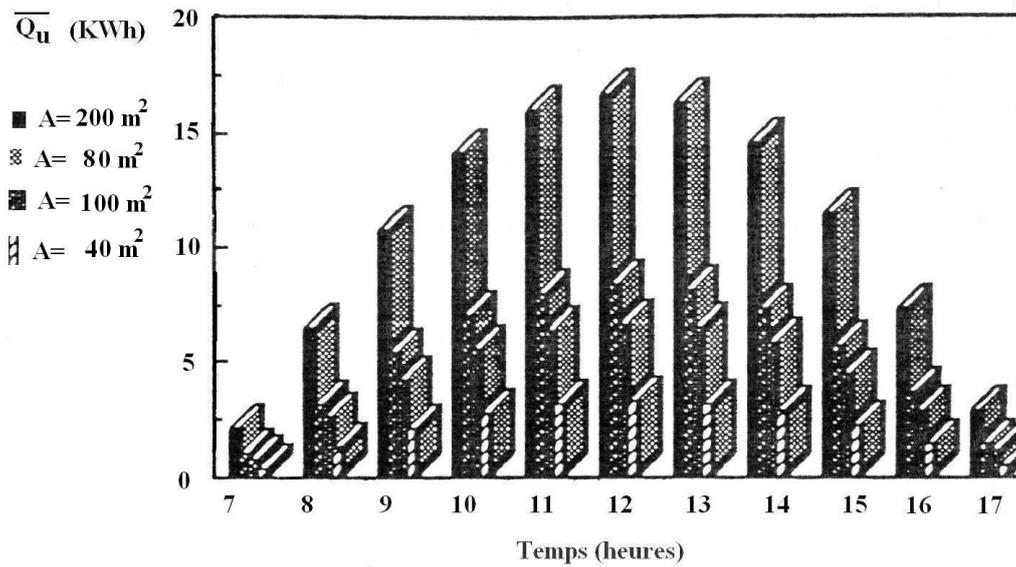


Figure 28: Evolution annuelle de la puissance $\overline{Q_u}$ délivrée par l'insolateur pour différentes valeurs de l'aire A de l'insolateur (Site :Adrar; $\dot{m}_{ex} = 0,1 \text{ kg.s}^{-1}$);

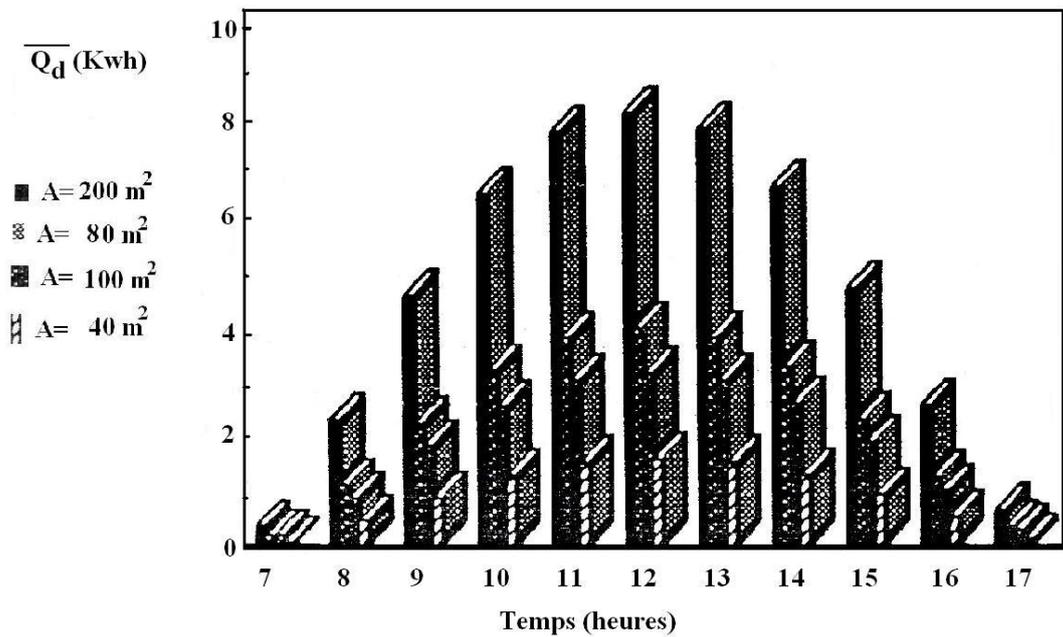


Figure 29: Evolution annuelle de la puissance $\overline{Q_d}$ transférée dans La cuve de stockage d'eau à travers l'échangeur pour différentes valeurs A de l'aire de l'insolateur pour la région d' Adrar. ($\dot{m}_{ex} = 0,0005 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,005 \text{ kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,05 \text{ kg.s}^{-1}$; $V = 3200 \text{ l}$)

4.e. Simulation du fonctionnement du séchoir et interprétation

➤ Hypothèses

- La charge de produit à sécher est de 200 kg par cycle.
- L'humidité absolue initiale du produit est prise égale à $6,8 \text{ kg}_{\text{eau}} \text{ kg}^{-1} \text{ MS}$.

- La température initiale du produit (après échaudage) est égale à 30°C.

➤ **Effet du de débit massique de l'air asséchant \dot{m}_A**

La durée du séchage est fortement liée au débit massique \dot{m}_A de l'air asséchant comme le montre la *figure 30*.

A une température de consigne de séchage égale a 65 °C, la durée de séchage t_s . est minimale pour un débit massique de l'air asséchant compris entre 0,56 et 0,64 kg.s^{-1} . Elle augmente lorsque celui-ci s'accroît puis se stabilise à 155 heures. D'autre part, lorsque \dot{m}_A diminue, la durée de séchage t_s augmente pour atteindre celle des séchages traditionnels qui s'effectuent en convection naturelle (faible débit d'air asséchant).

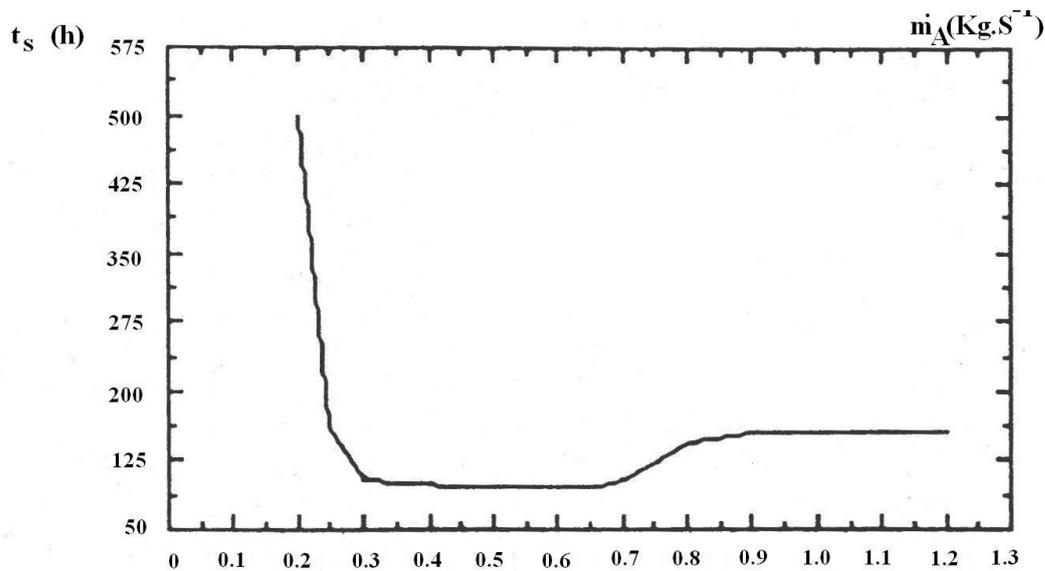


Figure 30: Evolution de la durée de séchage t_s (h) en fonction du débit massique \dot{m}_A (kg.s^{-1}) de l'air asséchant. La température de séchage T_c est égale à 65°C. ($\dot{m}_{ex}=0,005\text{kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec}=0,05\text{kg.s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei}=0,0005\text{kg.s}^{-1}$; $A=80\text{ m}^2$; $V=3200\text{ l}$)

La *figure 31* donne quelques exemples de l'évolution de la température de l'air asséchant T_{sa} (°C) et de la température T_{va} (°C) du produit au cours du séchage pour différentes valeurs du débit massique \dot{m}_A de l'air asséchant.

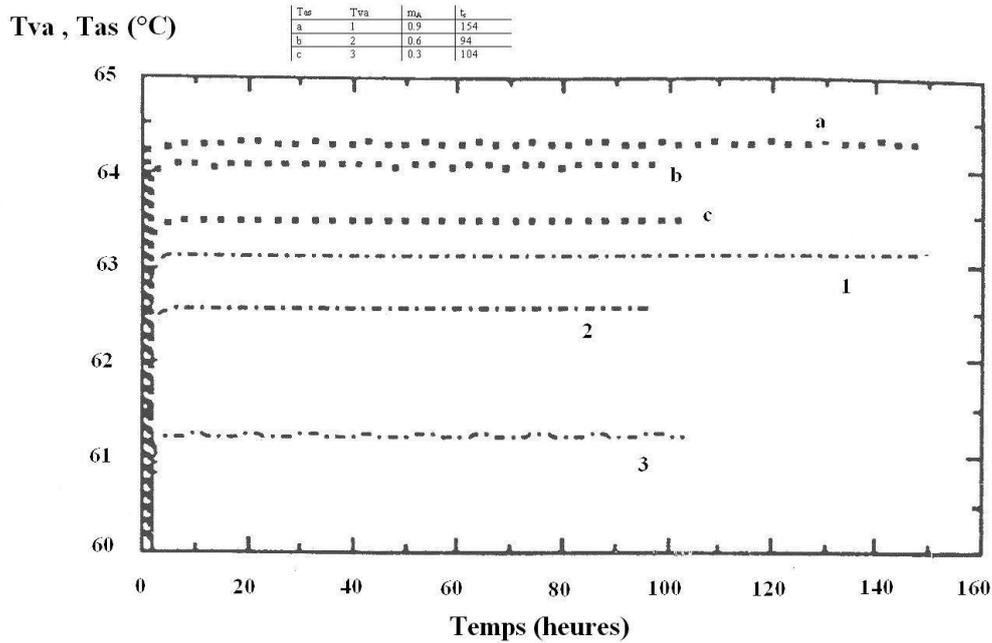


Figure 31: Evolution de la température de l'air asséchant T_{as} et de celle du produit T_{va} en fonction du débit massique \dot{m}_A ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'air asséchant. t_s est la durée du séchage en heures. La température de séchage T_c est égale à 65°C . ($\dot{m}_{ex}=0,005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec}=0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei}=0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A=80 \text{ m}^2$; $V=3200 \text{ l}$)

L'évolution correspondante de l'humidité absolue N_s du produit au cours séchage est illustrée sur la *figure 32*.

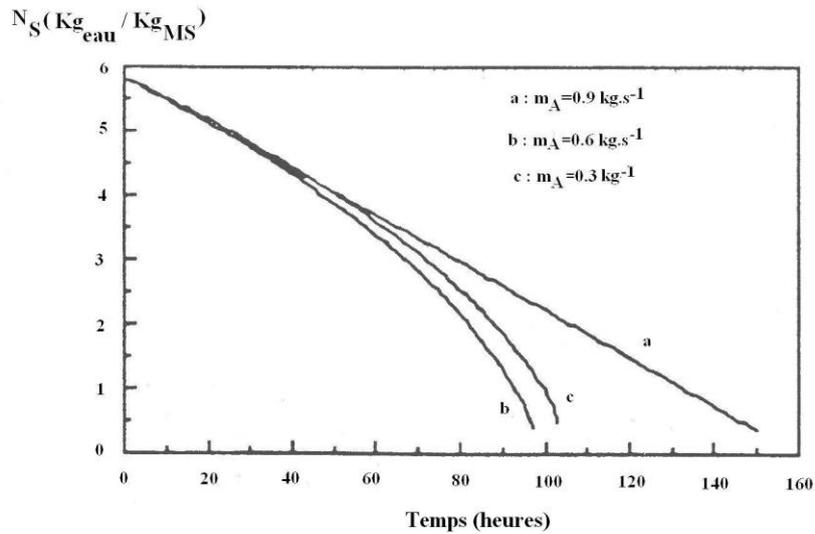


Figure 32: L'évolution de l'humidité absolue N_s du produit pour différentes valeurs du débit massique \dot{m}_A ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) de l'air asséchant. La température de séchage $T_c = 65^\circ\text{C}$. ($\dot{m}_{ex} = 0,005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ec} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{ei} = 0,0005 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$; $A=80 \text{ m}^2$; $V=3200 \text{ l}$)

Dans la suite, nous considérerons un débit massique de l'air asséchant de $0,6\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

➤ Effet de la température de séchage T

Dans le domaine de validité de la vitesse de séchage ($30\text{ °C} \leq T \leq 65\text{ °C}$), la durée t_s de séchage est une fonction décroissante de la température T de séchage (figure 33).

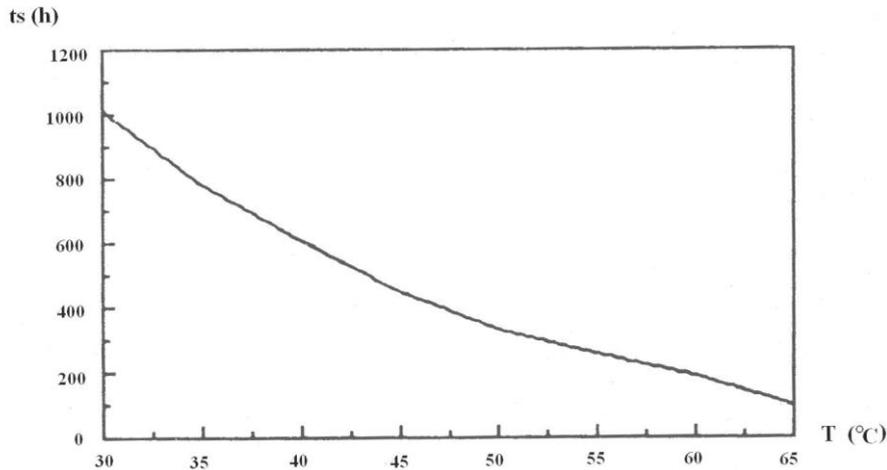


Figure 33: Variations de la durée de séchage t_s (heures) en fonction de la température de séchage T (°C).

L'évolution de l'humidité absolue N_s du produit au cours du séchage pour différentes valeurs de la température de consigne T de séchage est représentée sur la figure 34.

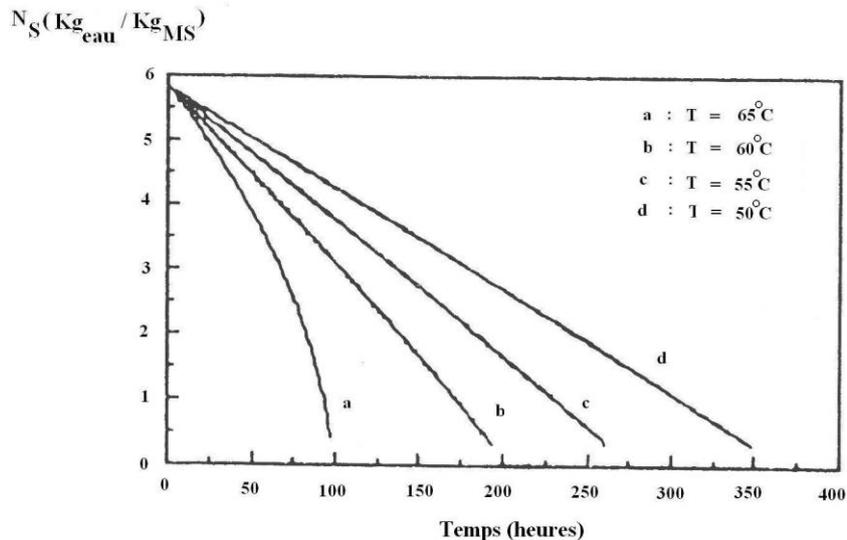


figure 34 : Evolution de l'humidité absolue N_s du produit au cours du séchage pour différentes valeurs de la température de séchage T .

Enfin, pour une température de séchage égale a 65 °C et un débit massique de l'air asséchant égal à $0,6\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, nous montrons, sur la figure 35, l'évolution des températures

de l'air asséchant T_{as} , du produit T_{va} , de la paroi intérieure de l'armoire de séchage T_{pis} et de la paroi extrême de l'armoire de séchage T_{pes} .

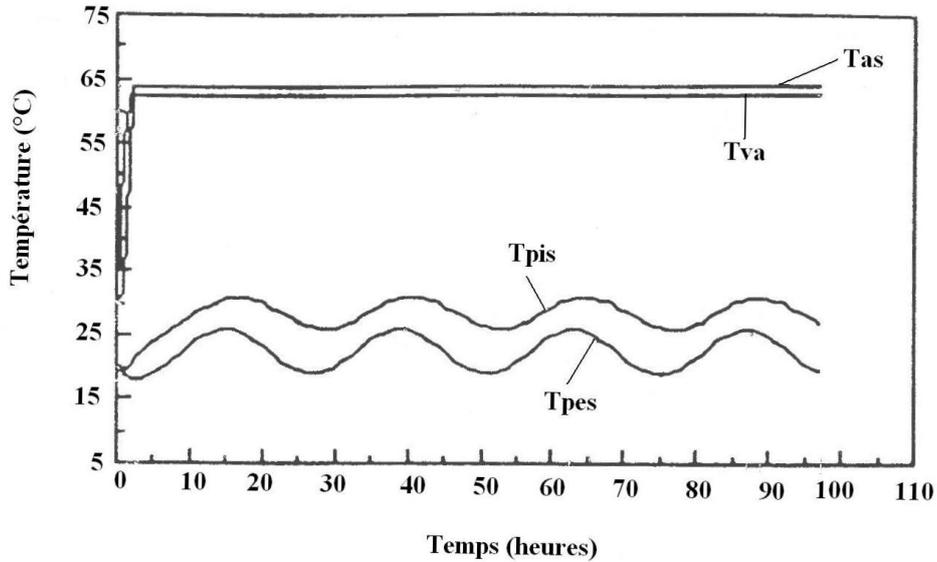


Figure 35: Evolution des températures T_{as} , T_{va} , T_{pis} et T_{pes} au cours du séchage. $\dot{m}_a = 0,6 \text{ kg.s}^{-1}$, $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$, région d'Adrar.

La durée de séchage dépend de l'humidité h_r de l'air et de la masse du produit à sécher, comme le montre la *figure 36*.

La variation annuelle de la durée de séchage pour différentes masses de produits à sécher est donnée sur la *figure 37*. Au mois de septembre, on constate une variation brusque de la durée de séchage à cause de la diminution de l'humidité de l'air (elle est égale à 76,13% en septembre tandis qu'en aout et en octobre, elle est égale respectivement a 83,53 % et 82,27 %).

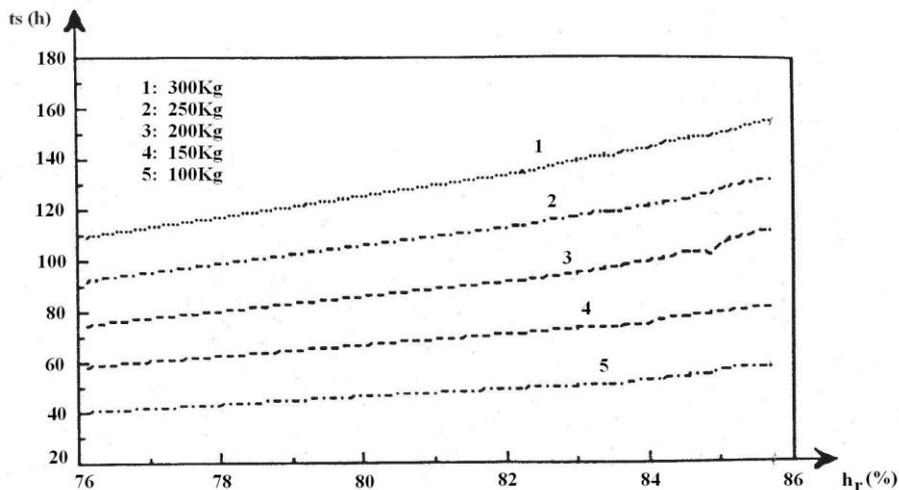


Figure 36 : variation de la durée de séchage t_s (heures) en fonction de l'humidité h_r de l'air pour différentes masses de produits à sécher.

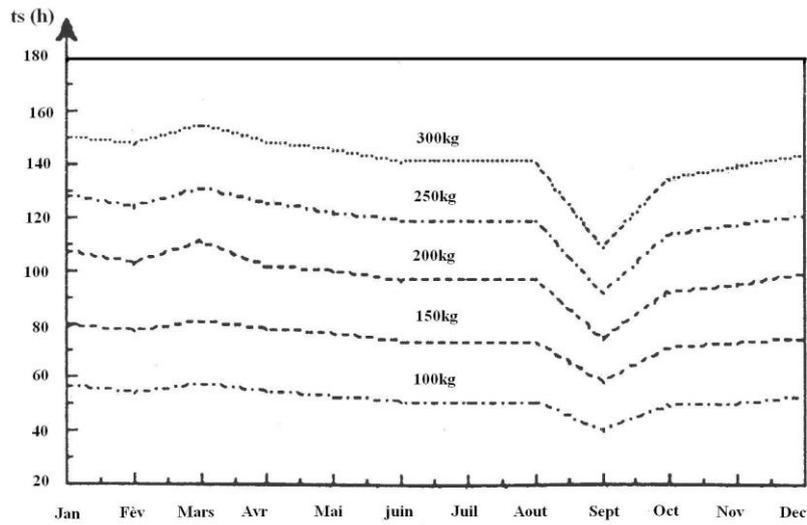


Figure 37 : variation de la durée de séchage t_s (heures) dans l'année pour différentes masses de produits à sécher.

4.f. Couvertures solaire

Les figures 38 et 39 présentent l'évolution des couvertures solaires f_1 et f_2 respectivement pour le stockage d'eau chaude et le séchoir.

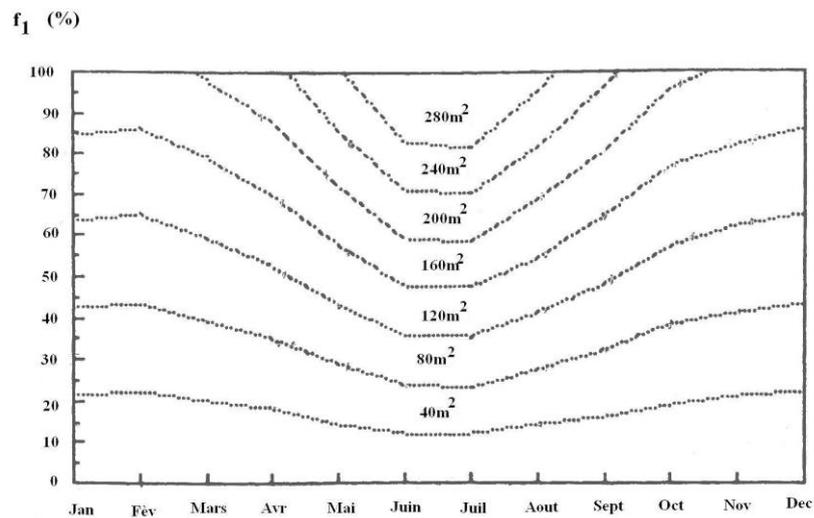


Figure 38 : Evolution de la couverture solaire f_1 pour la production d'eau chaude et pour différentes valeurs de l'aire des insolateurs.

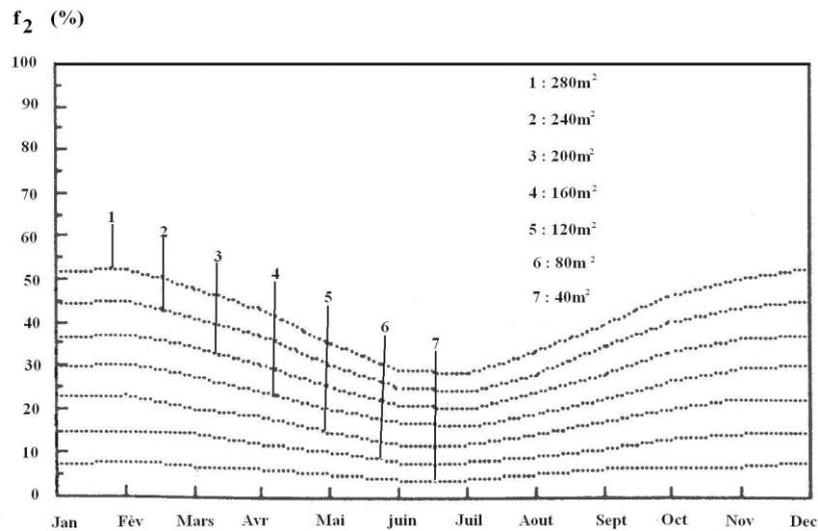


Figure 39 : Evolution de la couverture solaire f_2 pour la production d'air chaud et de séchage et pour différentes valeurs de l'aire des insolateurs.

Pour une même surface de captation, on constate que la couverture solaire f_1 pour la production d'eau chaude est presque deux fois plus grande que la couverture solaire f_2 pour la production d'air chaud.

CHAPITRE VII

I. MODELE ECONOMIQUE, ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT ET OPTIMISATION DU SYSTEME

1. Modèle économique

Le rendement énergétique maximal d'un système solaire n'est significatif et complet que lorsque l'on compare des systèmes à coût identique.

Il faut donc coupler un modèle technique et un modèle économique rendant notre système solaire optimal: c'est le "critère technico-économique".

Le modèle économique choisi [1] est la méthode d'analyse des coûts sur toute la durée de vie de l'installation, qui prend en compte l'influence des principaux paramètres et néglige ceux ayant un effet secondaire.

La fonction-objectif est la fonction bénéfice B que l'on maximisera. Elle est définie par :

$$B = G_R - C_G \quad (135)$$

Où

G_R : Gains réalisés par le système.

C_G : Coût global du système.

Le rendement global R_{dt} de l'investissement est donc :

$$R_{dt} = \frac{B}{C_G} \quad (136)$$

G_R et C_G sont déterminés par la méthode de la valeur actualisée.

1.1. Lois économiques

La capitalisation et l'actualisation, telles sont les deux notions complémentaires pour rendre comparables des coûts et des gains relatifs à des périodes différentes. Ces notions sont complétées par celle des annuités constantes.

a. La capitalisation $F_c(\zeta, n)$

Elle vise à déterminer la valeur future S_n à l'année n d'une somme S_0 actuelle donnée à l'instant 0 en supposant qu'elle augmente annuellement d'un taux ζ . On a :

$$F_c(\zeta, n) = (1 + \zeta)^n \quad (137)$$

et

$$S_c = S_0 F_c(\zeta, n) = S_0 \cdot (1 + \zeta)^n \quad (138)$$

b. L'actualisation $F_a(\zeta, n)$

Elle permet de calculer la valeur actuelle S_0 d'une somme donnée à l'année n , le taux d'accroissement étant ζ . On a :

$$F_a(\zeta, n) = \frac{1}{(1+\zeta)^n} = \frac{1}{F_c(1+\zeta)} \quad (139)$$

et

$$S_0 = S_c \cdot F_a(\zeta, n) = S_n \frac{1}{(1+\zeta)^n} \quad (140)$$

Elle permet de connaître la somme actuelle constante S^* à placer pendant n années pour obtenir la même somme finale S_n qu'en plaçant la somme S_0 à l'année 0.

On a :

$$F_{ac}(\zeta, n) = \frac{(1+\zeta)^n}{\sum_{j=1}^n (1+\zeta)^j} = \frac{\zeta(1+\zeta)^n}{(1+\zeta)^n - 1} \quad (141)$$

$$S^* = S_0 \cdot F_{ac}(\zeta, n) = \frac{\zeta(1+\zeta)^n}{(1+\zeta)^n - 1} \quad (142)$$

Si on tient compte de l'inflation, dont le taux est noté χ , il faut remplacer le taux ζ dans les équations (137) a (142) par le taux d'intérêt effectif ζ' défini par :

$$\zeta = \frac{\zeta+1}{\chi+1} - 1 = \frac{1+\chi}{1+\chi} \quad (143)$$

1.2. Hypothèses de travail

Les calculs sont faits sur une base annuelle, les coûts et les gains sont donc supposés attribuables au début ou à la fin de l'année.

Les coûts et les gains varient linéairement au cours du temps à un taux annuel constant propre à chacun d'eux.

Tous les taux intervenant dans le modèle restent constants sur toute la durée de vie du système.

L'investissement initial est financé par un emprunt remboursé par annuités constantes.

Les coûts de fonctionnement et de maintenance ainsi que les gains sont réglés à la fin de l'année.

Le coût d'assurance est réglé au début de l'année.

Coûts et gains sont actualisés suivant un taux annuel constant Ω .

On néglige les effets tels que l'impôt sur le crédit d'investissement, le versement à la commande, etc ...

1.3. Modélisation économique

1.3.1. Les couts

Le coût global C_G pour toute la durée de vie n de l'installation est la somme d'un coût initial C_I (emprunt) et des coûts d'utilisation annuels $C_U(i)$:

$$C_G = C_I \sum_{i=1}^{i=n} C_U(i) \quad (144)$$

Avec

$$C_I = C_{Ii} + A \cdot C_{Id} \quad (145)$$

et

$$C_U(i) = C_{UA}(i) + C_{UF}(i) + C_{UM}(i) \quad (146)$$

- A : Aire de l'insolateur;
- C_{Ii} : Coût des composants indépendant de l'aire de l'insolateur (pompe, régulateur, etc...);
- C_{Id} : Coût des composants dépendants de l'aire de l'insolateur (insolateurs, stockage, etc);
- C_{UA} : Coût d'assurance;
- C_{UF} : Coût de fonctionnement;
- C_{UM} : Coût de maintenance.

1.3.2. L'économie réalisée

L'économie réalisée est le gain dû à la fraction annuelle de l'énergie thermique totale nécessaire au système fournie par le soleil, c'est-à-dire par la puissance utile Q_u délivrée par m^2 d'insolateurs.

Si $C_e(1)$ est le coût de l'énergie conventionnelle d'appoint (électricité ou fuel ...) supposé S payé à la fin de l'année, le gain pour la première année sera alors :

$$C_R(1) = Q_u \cdot C_e(1) \quad (147)$$

1.4. Actualisation

A partir des lois économiques et compte tenu des hypothèses de travail, nous obtenons les valeurs actualisées suivantes :

-Cout initial actualisé C_I^a :

$$C_I^a = \sum_{i=1}^{i=n} C_I^a (i) = \frac{\zeta_I(1+\zeta_I)^n}{(1+\zeta_I)^n - 1} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{(1+\Omega)^i} \tag{148}$$

Avec:

- n : Echéance;
- ζ_I : Taux d'intérêt dû à l'emprunt;
- Ω : Taux d'actualisation;
- $C_I^a(i)$: Coût annuel actualise du crédit d'investissement.

- Coût d'assurance actualisé C_{UA}^a :

$$C_{UA}^a = \sum_{i=1}^{i=n} C_{UA}^a (i) = C_{UA}^a(1) \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(1+\zeta_A)^{i-1}}{(1+\Omega)^i} \tag{149}$$

Avec:

- n : Echéance;
- ζ_A : Taux de variation annuelle du coftt d'assurance;
- Ω : Taux d'actualisation;
- $C_{UA}^a(i)$: Coût d'assurance annuel actualisé;
- $C_{UA}^a(1)$: Coût d'assurance pour la première année.

- Coût de fonctionnement actualisé C_{UF}^a :

$$C_{UF}^a = \sum_{i=1}^{i=n} C_{UF}^a (i) = C_{UF}^a(1) \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(1+\zeta_F)^{i-1}}{(1+\Omega)^i} \tag{150}$$

Avec:

- n : Echéance;
- ζ_F : Taux de variation annuelle du coût de fonctionnement
- Ω : Taux d'actualisation;
- $C_{UF}^a(i)$: Coût de fonctionnement annuel actualisé;
- $C_{UF}^a(1)$: Coût de fonctionnement pour la première année.

- Coût de maintenance actualisé C_{UM}^a :

$$C_{UM}^a = \sum_{i=1}^{i=n} C_{UM}^a(i) = C_{UM}^a(1) \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(1+\zeta_M)^{i-1}}{(1+\Omega)^i} \quad (151)$$

avec:

- n : Echéance;
- ζ_M : Taux de variation annuelle du coût de maintenance
- Ω : Taux d'actualisation;
- $C_{UM}^a(i)$: Coût de maintenance annuel actualisé;
- $C_{UM}^a(1)$: Coût de maintenance pour la première année.

-Economie réalisé actualisé C_R^a :

$$C_R^a = \sum_{i=1}^{i=n} C_R^a(i) = Q_u C_e(1) \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(1+\zeta_E)^{i-1}}{(1+\Omega)^i} \quad (152)$$

Avec :

- n : Echéance;
- ζ_E : Taux de variation annuelle du coût de l'appoint (électricité, ou Fuel...etc)
- Ω : Taux d'actualisation;
- $C_R^a(i)$: Coût de fonctionnement annuel actualisé;

- Cout global actualisé C_G^a :

$$C_G^a = C_I^a + C_{UA}^a + C_{UF}^a + C_{UM}^a \quad (153)$$

- Rendement global des investissements actualisé :

$$Rdt^a = \frac{B^a}{C_G^a} = \frac{FFN^a}{C_G^a} \quad (154)$$

Avec :

B^a : Bénéfice actualisé;
 DAN^a : Flux financier net actualisé.

- Flux financier net actualisé FFN^a :

$$FFN^a = Re_G^a - C_G^a \quad (155)$$

Avec:

Re_R^a : Recette globale actualisé.

- Part du solaire dans le bénéfice actualisé PSB :

$$PSB = \frac{C_R^a}{B^a} \quad (156)$$

- Taux d'enrichissement en capital TEC :

$$TEC = \frac{FFN^a}{C_I} \quad (157)$$

Avec :

C_I : Coût initial.

2. Abaques de dimensionnement

Nous présentons deux groupes d'abaques: l'un destine aux concepteurs (groupe 1) et l'autre, aux utilisateurs (groupe 2).

Les figures 40 à 42 donnent respectivement la couverture solaire f_1 du système de production d'eau chaude, la couverture solaire f_2 et la fraction de chaleur économisée J_2 du système de production d'air chaud.

Il s'agit de déterminer les couvertures solaires mensuelles f_1 , f_2 et la fraction de chaleur économisée mensuelle J_2 a partir de trois couples de paramètres adimensionnels (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) et (X'_2, Y'_2) définis respectivement par les équations (97),(98) , ((105),(106)) et ((114),(115)).

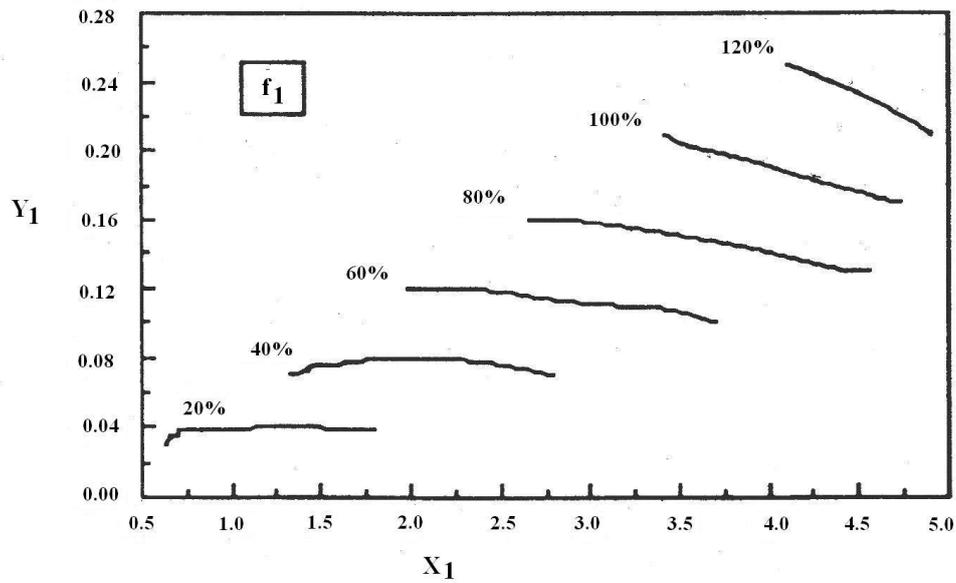


Figure 40 : Couverture solaire f_1 pour la production d'eau chaude.

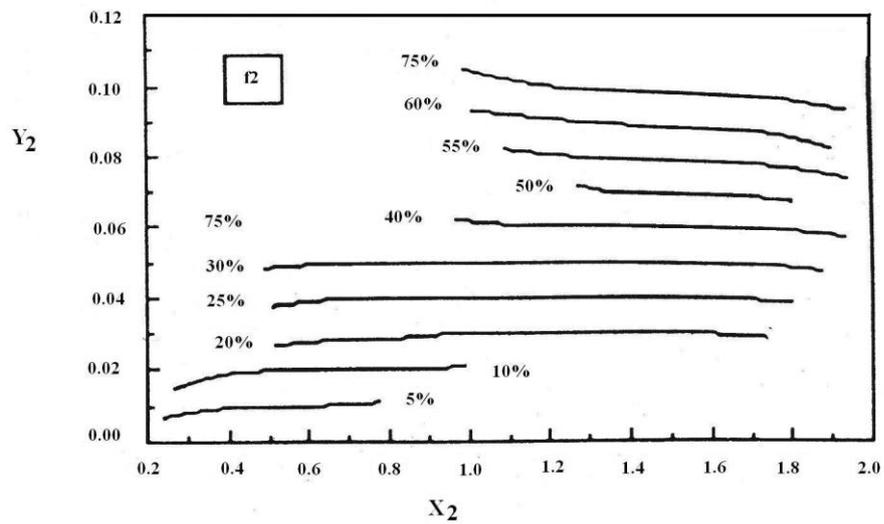


Figure 41 : couverture f_2 pour la production d'air chaud de séchage.

(Sans recyclage de l'air asséchant).

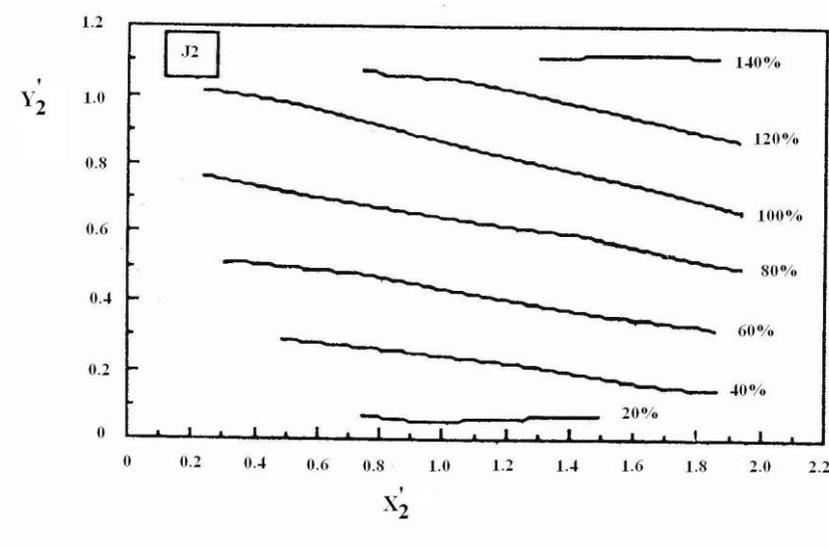


Figure 42 : fraction de la chaleur économisée J_2 pour la production d'air chaud de séchage.(Avec recyclage de l'air asséchant).

Notons que la fraction de chaleur économisée J_2 est égale à la couverture solaire f_2 pour un système sans recyclage.

Pour utilisé des abaques, il faut successivement :

- Choisir les donnés initial: température de séchage, durée de séchage, caractéristiques de l'insolateur, rayonnement.
- Fixer l'aire de l'insolateur voulu.
- Calculer les chaleurs totales consommées à l'aide des équations (119) et (127).
- Calculer la chaleur recyclée et déterminer le rapport $\frac{Q_{RC}}{Q_{C_2}}$.
- Calculer les paramètres adimensionnels (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) et (X'_2, Y'_2) .
- Déterminer f_1 , f_2 et J_2 à partir des abaques correspondants.

Les lecteurs peuvent se reporter à la référence [19] ou sont utilisées des abaques du même genre dans le cas du même, pour un exemple d'application plus explicite. La démarche est la même. Notons que ces abaques sont peu pratiques de sorte que nous avons élaboré les abaques du groupe 2 destinés à un usage courant.

Groupe 2 :

La méthode consiste à relier entre eux les paramètres principaux (nécessaires à une étude technico-économique ultérieure) tels que la durée de séchage t_s . La masse m_{va} de marjolaine à sécher par cycle, celle produite m_{sec} , l'aire de l'insolateur A , les couvertures solaires f_1 , f_2 et la fraction de chaleur économisée J_2 .

Pour cela, nous élaborons 3 types d'abaques :

- le premier, en fonction du temps de séchages t_s . (figure 43);

- le second, en fonction de la couverture solaire f (figures 44 et 45);
- et le troisième, en fonction de la fraction de chaleur économisée J (figure 46).

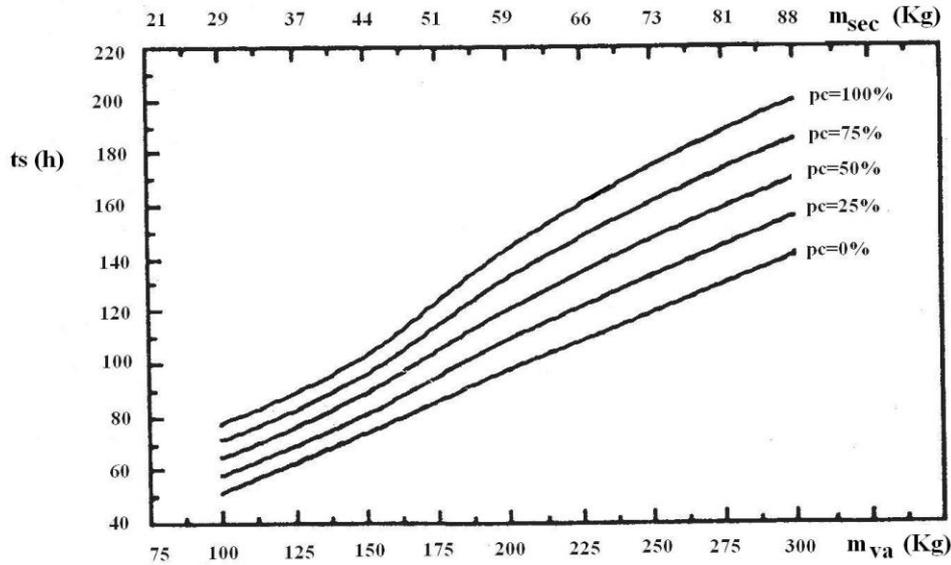


Figure 43 : Abaque t_s , durée de séchage pour sécher 100 à 300 kg de marjolaine par cycle. (Région d’Adrar ; $T= 65^{\circ}C$; $\dot{m}_a = 0,425 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Cet abaque donne la durée de séchage t_s en fonction, soit du poids de produits à sécher, en bas de l’abscisse, soit du poids de produits secs, en haut de l’abscisse et ce, pour différentes valeurs du pourcentage de recyclage de l’air asséchant.

ABAQUES TYPE 2 :

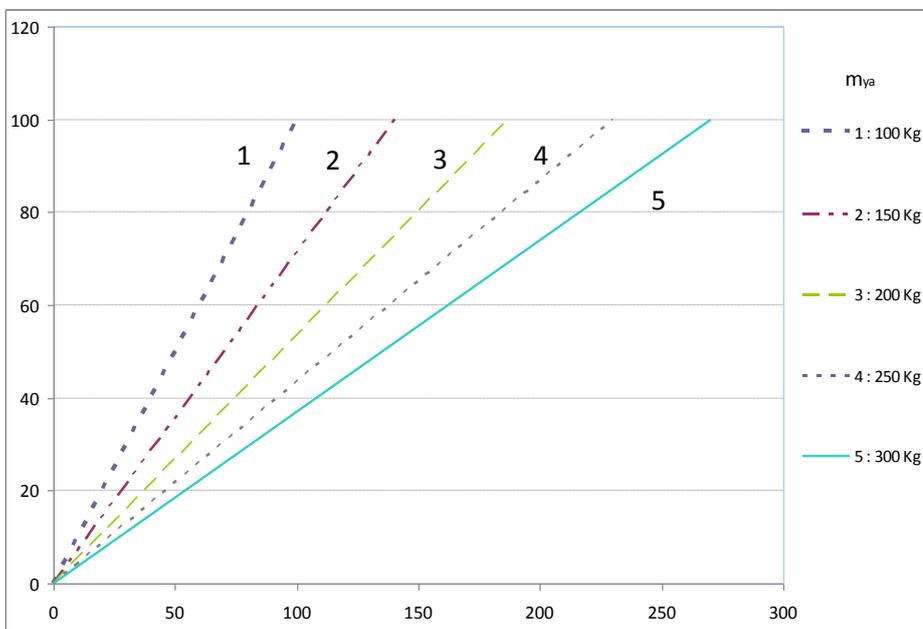


Figure 44 : Abaque f_1 couverture solaire du système de production d'eau chaude en fonction de l'air de l'insolateur A et de la masse m_{av} du produit à sécher par cycle. (Région d'Adrar ; $T=65^{\circ}\text{C}$; $\dot{m}_a = 0,425\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

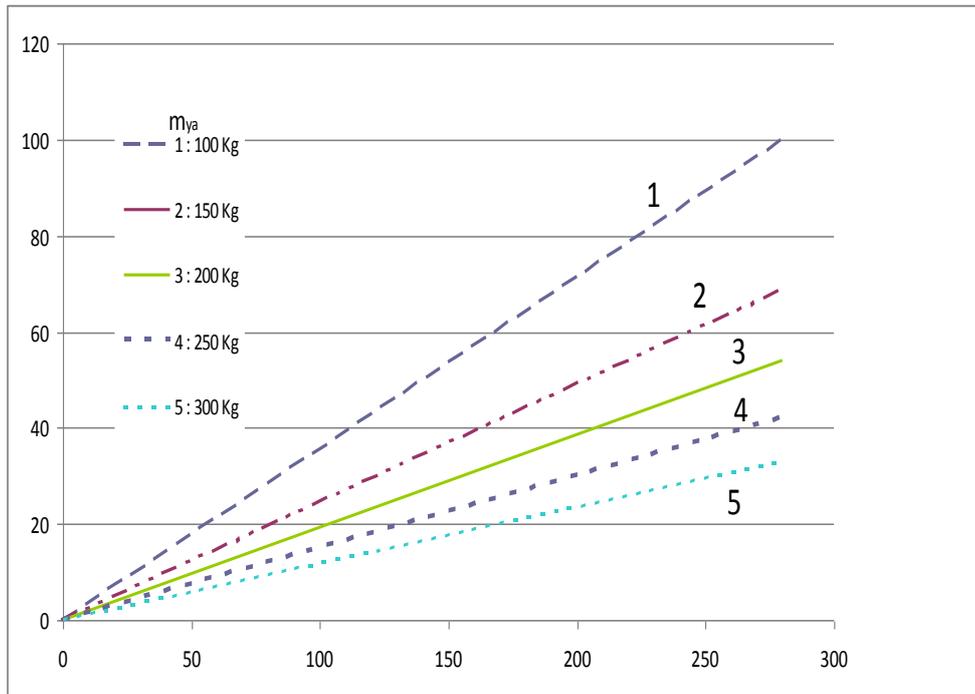


Figure 45 : Abaque f_2 couverture solaire du système de production d'air chaud en fonction d'eau séchage en fonction de l'air de l'insolateur A et de la masse m_{av} du produit à sécher par cycle. (Région d' Adrar ; $T=65^{\circ}\text{C}$; $\dot{m}_a = 0,425\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

Notons que les modèles mathématiques utilisés pour élaborer les abaques sont satisfaisants puisqu'on constate que, pour une aire de l'insolateur égale à zéro, les couvertures solaires f_1 et f_2 sont égales à zéro. De plus, ces abaques présentent l'avantage d'être souples. Le choix des paramètres constants est libre, ce qui n'est pas le cas des abaques du groupe 1 dont le rôle est de déterminer la couverture solaire en fixant les autres paramètres.

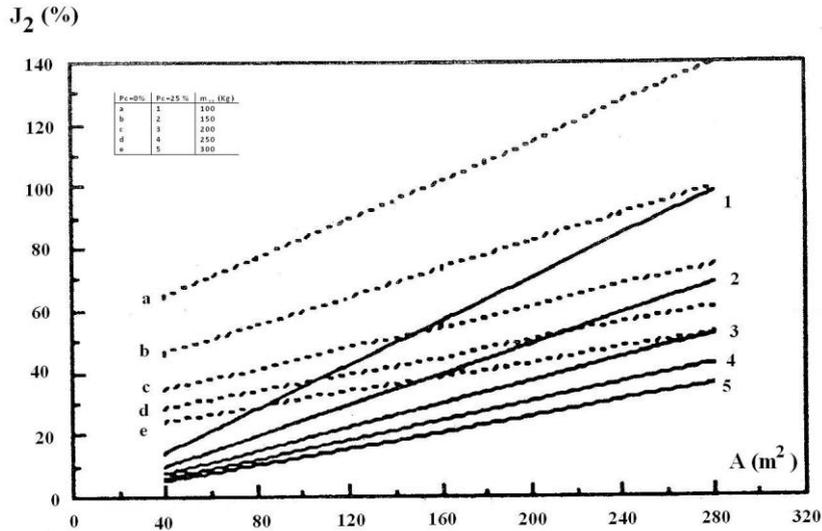


Figure 46: Abaque J_2 , fraction de chaleur économisée du système de production d'air chaud de séchage en fonction de l'aire de l'insolateur A et de la masse m_{va} du produit à sécher par cycle pour différentes valeurs du pourcentage de recyclage de l'air asséchant (Région d' Adrar ; $T=65^{\circ}C$; $m_{A}^i = 0,425kg \cdot s^{-1}$).

Des abaques individuels J_2 pour 25, 50, 75 et 100 % d'air recycle sont donnés dans l'annexe E.

3. Relation polynomiales de dimensionnement

En appliquant une méthode de régression multiple à tous les points issus des simulations, nous obtenons les relations polynomiales suivantes :

Pour f_1 :

$$f_1(X_1, Y_1) = 31,437 + 0,033Y_1 - 0,002X_1^2 - 0,086Y_1^2 \tag{158}$$

Pour f_2 :

$$P_c = 0 \% \quad f_2(X_2, Y_2) = 8,508 + 0,015Y_2 - 0,016X_2Y_2 - 0,001X_2^2 - 0,083Y_2^2 \tag{159}$$

$$P_c = 25 \% \quad f_2(X_2, Y_2) = -3,050 - 0,025X_2 + 0,487Y_2 + 0,720X_2Y_2 + 0,026X_2^2 - 1,117Y_2^2 \quad (160)$$

$$P_c = 50 \% \quad f_2(X_2, Y_2) = -412,020 + 0,059X_2 + 12,594Y_2 + 0,061X_2Y_2 + 0,031X_2^2 - 8,648Y_2^2 \quad (161)$$

$$P_c = 75 \% \quad f_2(X_2, Y_2) = -627,882 + 0,026X_2 + 13,113Y_2 - 0,013X_2Y_2 + 0,067X_2^2 - 6,212Y_2^2 \quad (162)$$

$$P_c = 100 \% \quad f_2(X_2, Y_2) = 4,276 + 0,043X_2 + 27,519Y_2 - 0,021X_2Y_2 + 0,053X_2^2 - 11,577Y_2^2 \quad (163)$$

Pour J_2 :

$$P_c = 0 \% \quad f_2(X'_2, Y'_2) = 8,543 + 0,015X'_2 + 0,013X'_2Y'_2 + 0,001X'^2_2 - 0,046Y'^2_2 \quad (164)$$

$$P_c = 25 \% \quad f_2(X'_2, Y'_2) = 22,447 - 0,027X'_2 + 0,459Y'_2 + 0,723X'_2Y'_2 + 0,027X'^2_2 - 1,094Y'^2_2 \quad (165)$$

$$P_c = 50 \% \quad f_2(X'_2, Y'_2) = -3,231 - 0,124X'_2 + 2,018Y'_2 + 0,344X'_2Y'_2 + 0,076X'^2_2 + 1,701Y'^2_2 \quad (166)$$

$$P_c = 75 \% \quad f_2(X'_2, Y'_2) = 1791,008 + 0,440X'_2 - 36,111Y'_2 + 0,385X'_2Y'_2 - 0,142X'^2_2 + 17,341Y'^2_2 \quad (167)$$

$$P_c = 100 \% \quad f_2(X'_2, Y'_2) = 4,048 + 0,041X'_2 + 27,341Y'_2 - 0,020X'_2Y'_2 + 0,055X'^2_2 + 11,494Y'^2_2 \quad (168)$$

II. OPTIMISATION SYSTÈME

Elle consiste à coupler les paramètres techniques et économiques. En effet, on sait qu'en augmentant la surface de captation du rayonnement solaire, on a de plus en plus d'énergie utile. Mais, on ne sait pas jusqu'à quelle surface du capteur le système reste rentable. C'est pourquoi l'étude économique est nécessaire.

Notons d'une part que nous avons travaillé en monnaie constante plutôt qu'en monnaie courante, c'est-à-dire en annulant dans les calculs les effets de l'inflation, et d'autre part que nous ne présentons comme résultats que des termes adimensionnels tels que le rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a , la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB*, le taux moyen d'enrichissement en capital TEC*, afin que nos résultats puissent être exploités à court, moyen et long terme.

Les hypothèses économiques de simulation sont les suivantes :

- l'échéance n'est égale à 10 ans;
- le taux d'actualisation Ω n'est égal à 7,5 %;
- le taux d'inflation χ est égal à 1,5 %;
- les taux d'accroissement $\zeta_A, \zeta_E, \zeta_F, \zeta_I$, et ζ_M sont égaux à 3 %;
- le coût d'assurance C_{UA} est égal à 1% du coût initial C_I ;
- l'appoint utilisé est le fuel (P.C.I= 11 kWh. kg⁻¹ Prix = 605,7 DA/tonne)*.

Les figures 47 à 51 donnent le rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a , en fonction de l'aire A de l'insolateur pour différents prix de vente de la marjolaine et différentes masses m_{va} de marjolaine à sécher par cycle.

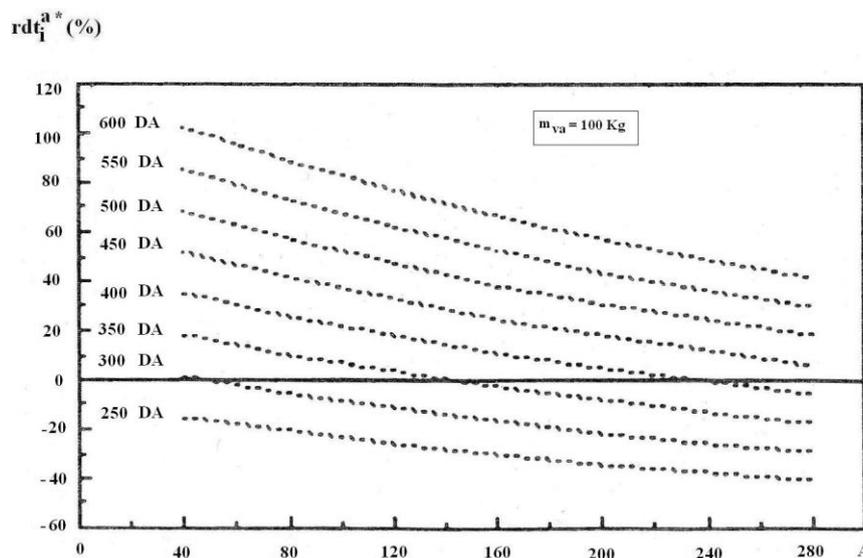


Figure 47: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a en fonction de l'aire de l'insolateur A pour différentes valeurs du prix de vente de la marjolaine. La masse du produit à sécher par cycle est égale à 100 kg.

* Valeur industrielle communiquée par La Chambre de Commerce de Adrar.

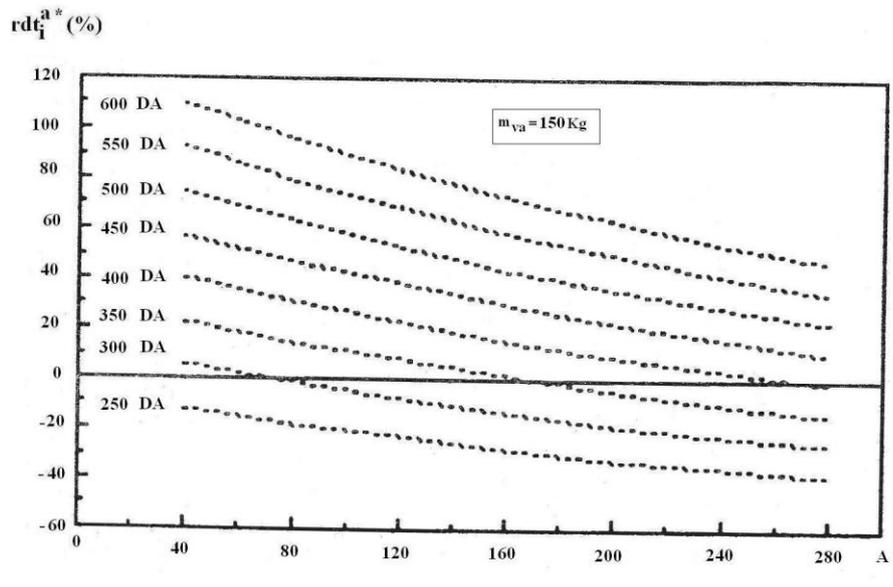


Figure 48: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^{a*} en fonction de l'aire de l'insolateur A et pour différentes valeurs du prix de vente de la marjolaine. La masse du sécher produit à sécher par cycle est égal à 150 kg.

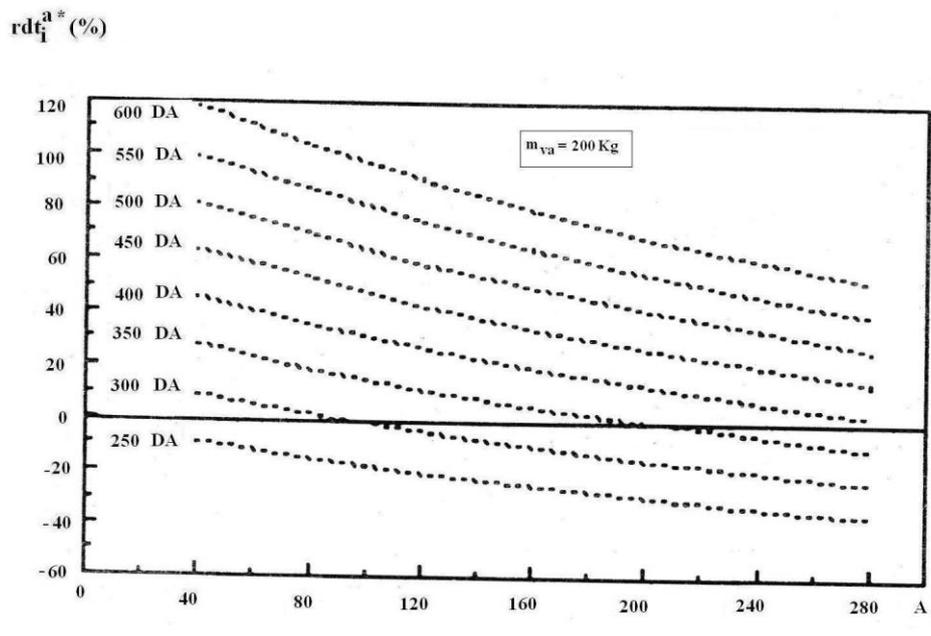


Figure 49: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^{a*} en fonction de l'aire de l'insolateur A et pour différentes valeurs du prix de vente de la marjolaine. La masse du sécher produit à sécher par cycle est égal à 200 kg.

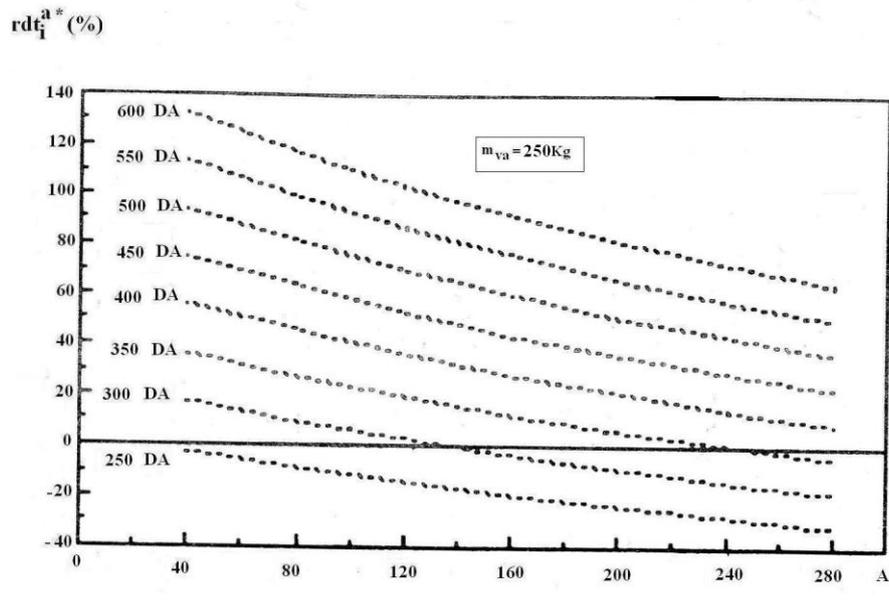


Figure 50: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^{a*} en fonction de l'aire de l'insolateur A et pour différentes valeurs du prix de vente de la marjolaine. La masse du sécher produit à sécher par cycle est égal à 250 kg.

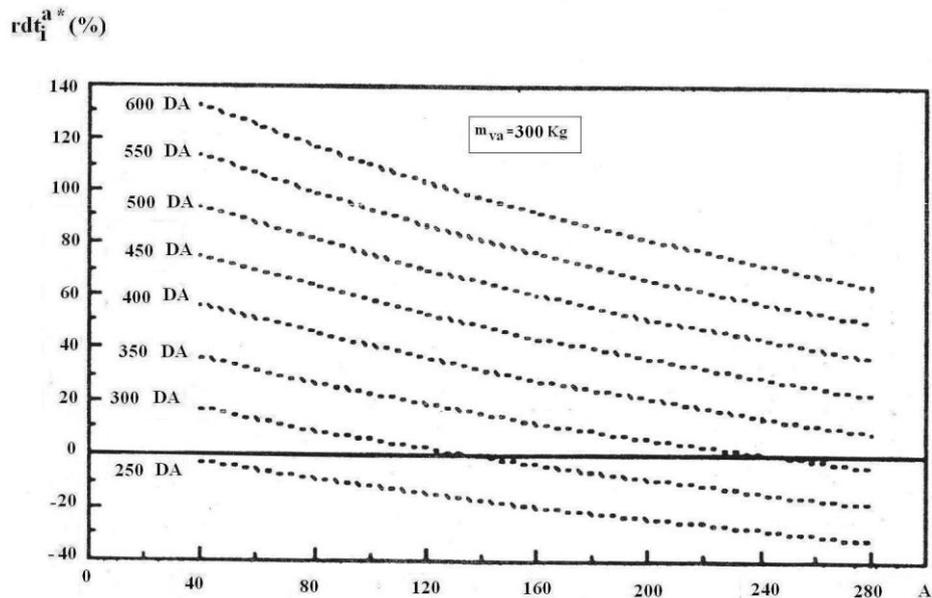


Figure 51: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^{a*} en fonction de l'aire de l'insolateur A et pour différentes valeurs du prix de vente de la marjolaine. La masse du sécher produit à sécher par cycle est égal à 300 kg.

D'après les figures 47 et 51, le rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a est une fonction croissante simultanée de la masse m_{va} à sécher par cycle et du prix de vente de la marjolaine. Il en est de même pour le bénéfice B (cf. équation (136)). Au contraire, il est une fonction décroissante de l'aire A de l'insolateur.

Ce résultat montre une fois de plus qu'augmenter inconsidérément l'aire de captation afin d'avoir plus d'énergie utile et donc une plus grande contribution du solaire dans le système est insensé.

Cela nous incite à élaborer des abaques pour différents prix de vente de la marjolaine allant de 250 DA a 600 DA/kg (prix de vente actuel).

Ils sont présentés sur les figures 52 a 59 et permettent d'optimiser technico économiquement une installation solaire comme celle étudiée. Ils donnent surtout l'aire optimale de l'insolateur pour un besoin de marjolaine a sécher par cycle donne et pour différents prix de vente.

En outre, Ils présentent l'avantage de permettre une politique d'investissement à long terme selon la conjoncture économique.

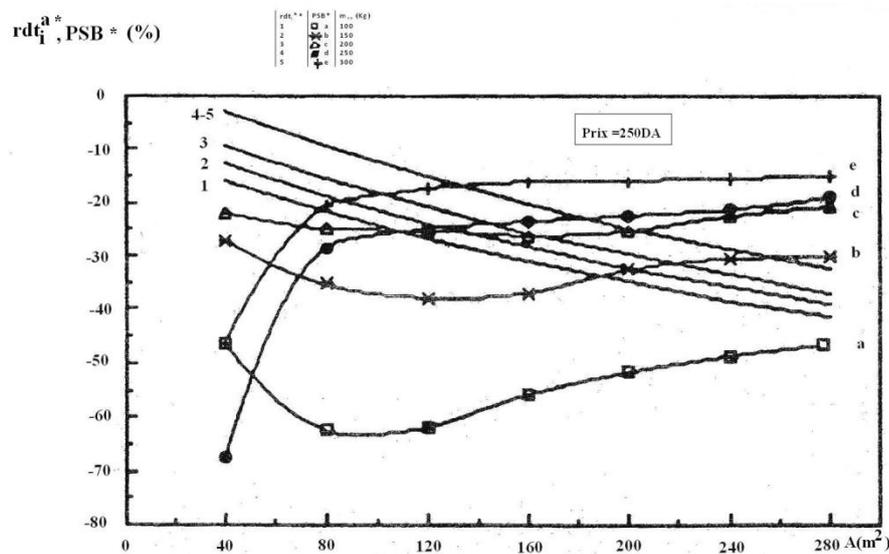


Figure 52: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 250 DA/kg.

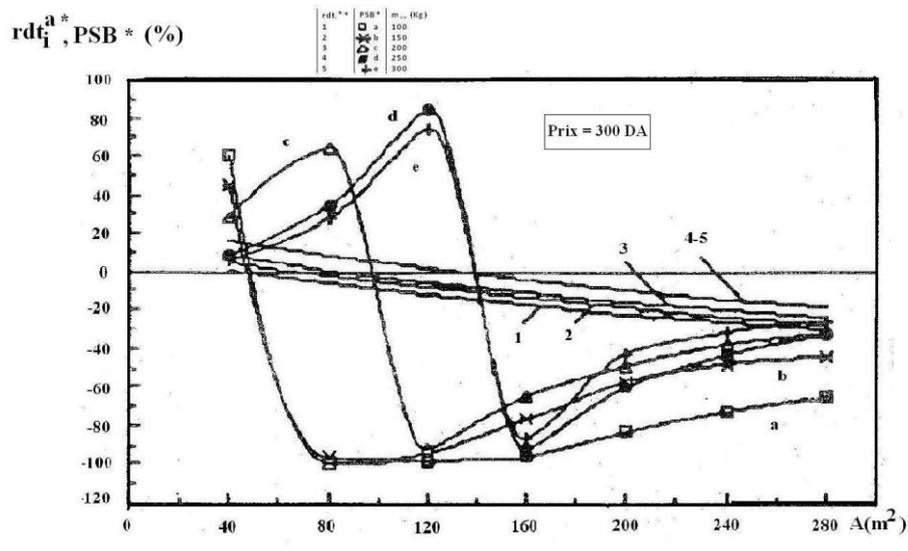


Figure 53: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 300 DA/kg.

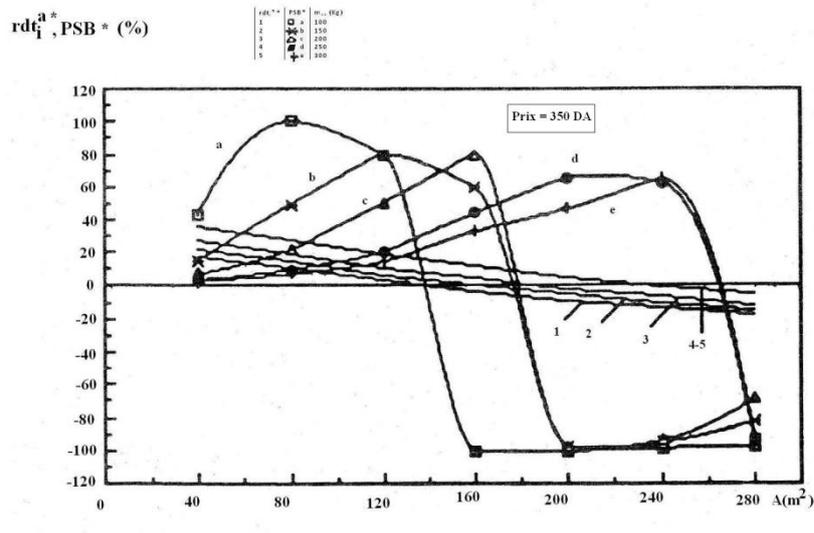


Figure 54: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 350 DA/kg.

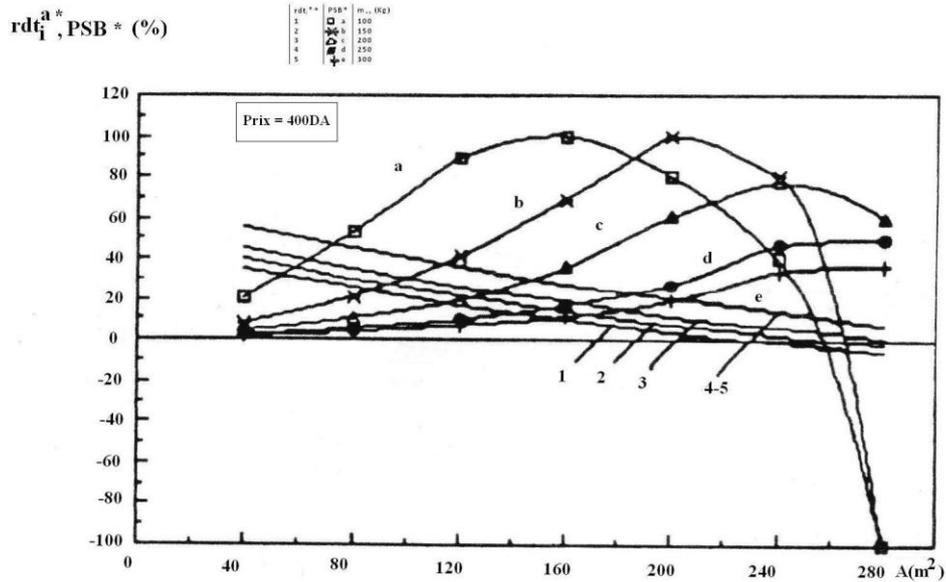


Figure 55: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 400 DA/kg.

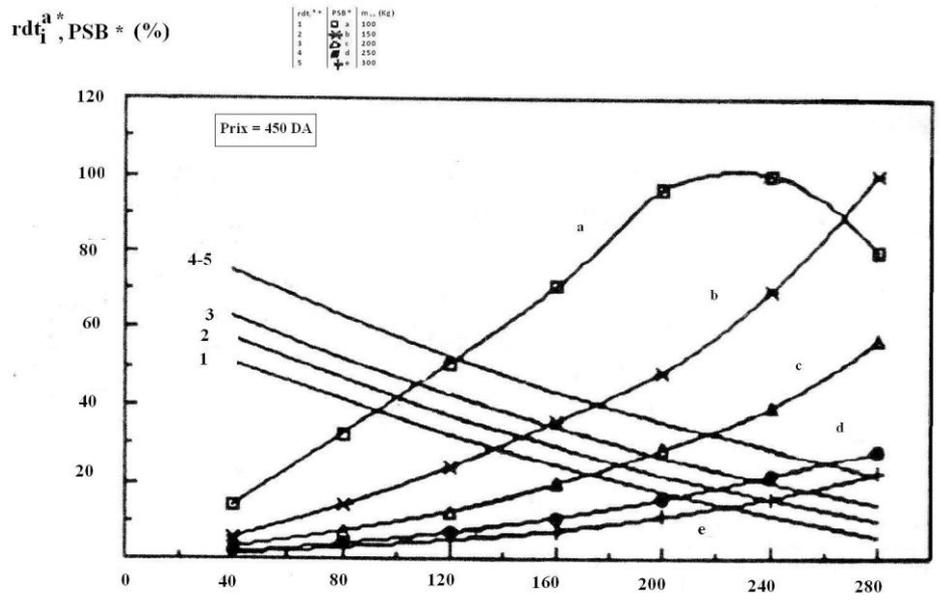


Figure 56: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 450 DA/kg.

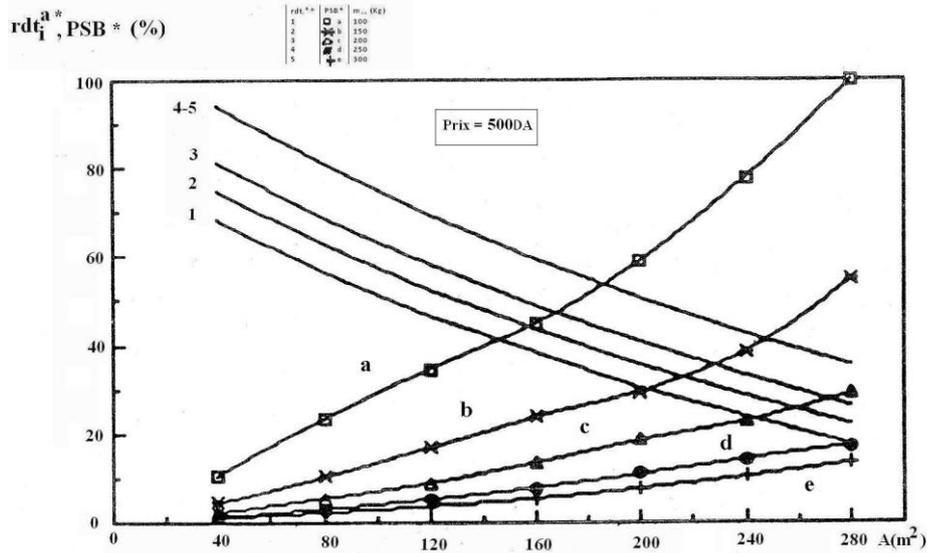


Figure 57: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 500 DA/kg.

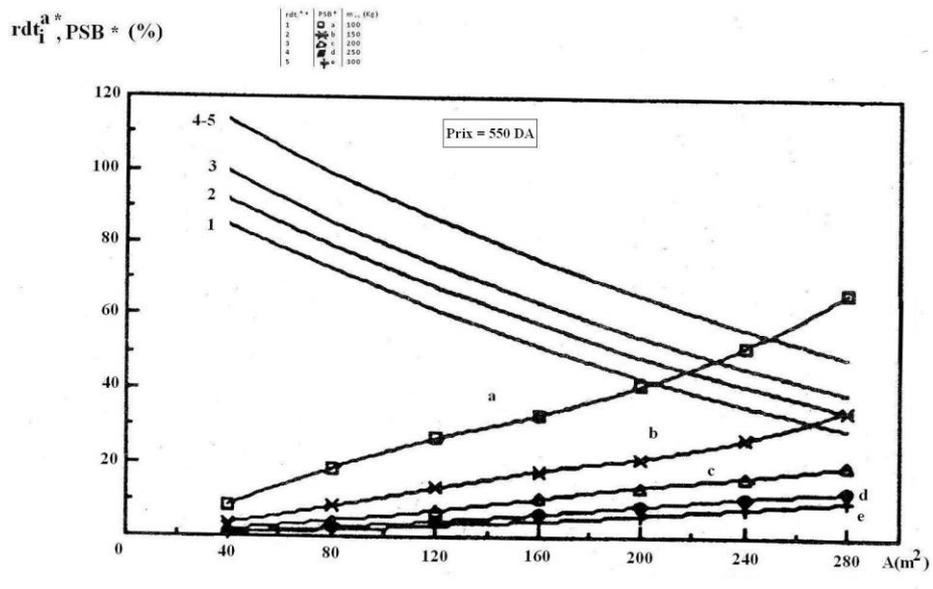


Figure 58: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^a et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 550 DA/kg.

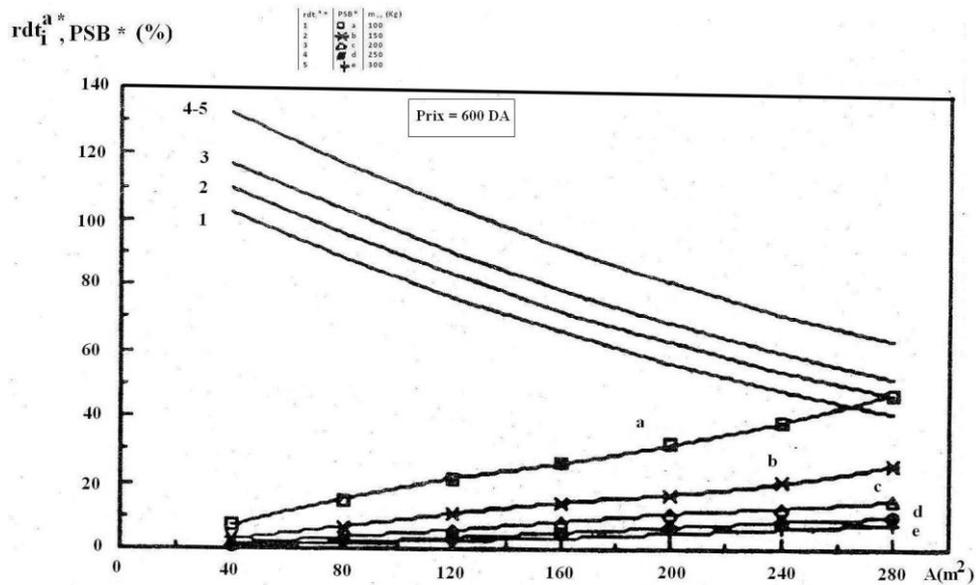


Figure 59: Variations du rendement moyen global actualisé de l'investissement rdt_i^{a*} et de la part moyenne du solaire dans le bénéfice actualisé PSB^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 600 DA/kg.

L'aire optimale est obtenue à l'intersection des courbes rdt_i^{a*} et PSB^* .

Nous constatons, sur la figure 52, qu'avec un prix de vente égal à 250DA, nous ne pouvons prétendre à aucun bénéfice quel que soit le scénario envisagé.

Au contraire, d'après la figure 59, avec un prix de vente de 600DA, soit le cours actuel sur le marché international, le rendement moyen global actualisé des investissements rdt_i^{a*} est élevé, sa valeur minimale pour des cas extrêmes ($m_{va} = 100\text{Kg}$ et $A = 280\text{ m}^2$) et encore de l'ordre de 40%. Le bénéfice est donc certain. Néanmoins, la part du solaire dans le bénéfice est inversement proportionnelle au rendement moyen global actualisé des investissements rdt_i^{a*} , donc faible.

Enfin, les courbes des figures 60 à 67 donnent le taux moyen d'enrichissement en capital TEC^* .

Ce dernier paramètre permet de connaître combien de fois nous pouvons espérer gagner le capital investi.

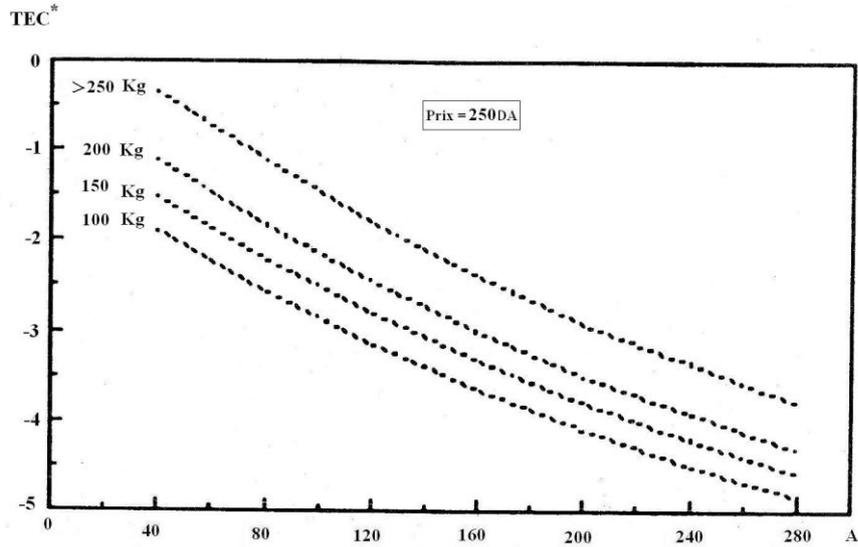


Figure 60: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 250 DA/kg.

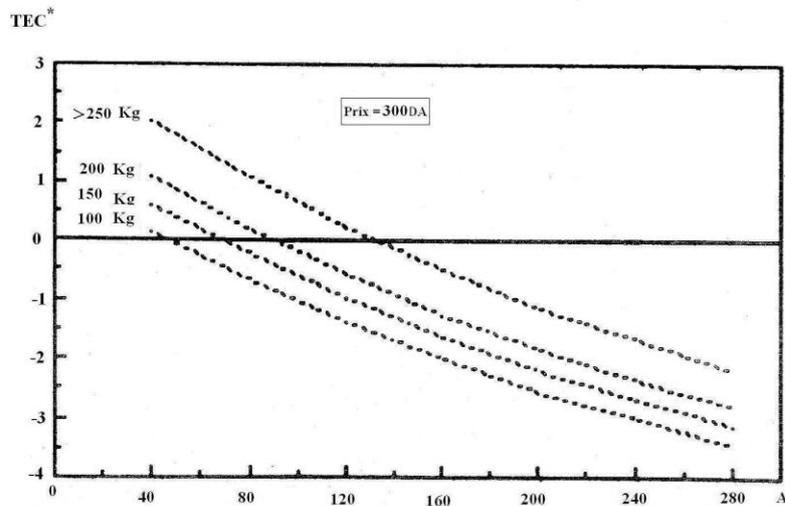


Figure 61: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 300 DA/kg.

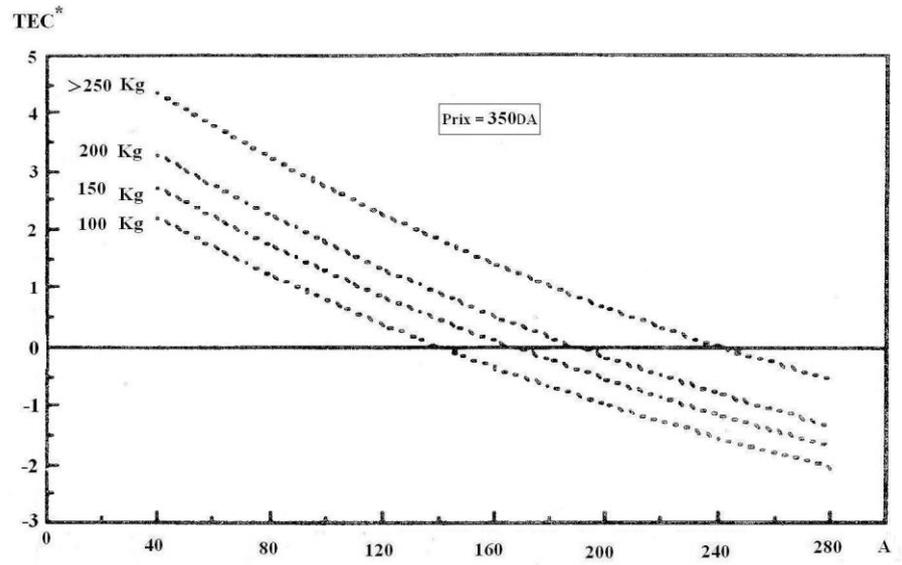


Figure 62: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 350 DA/kg.

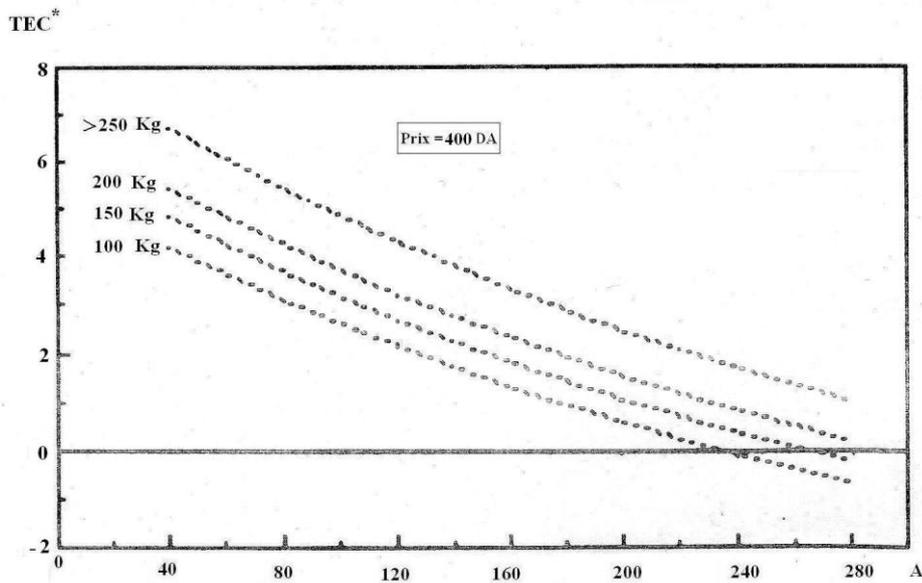


Figure 63: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC^* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 400 DA/kg.

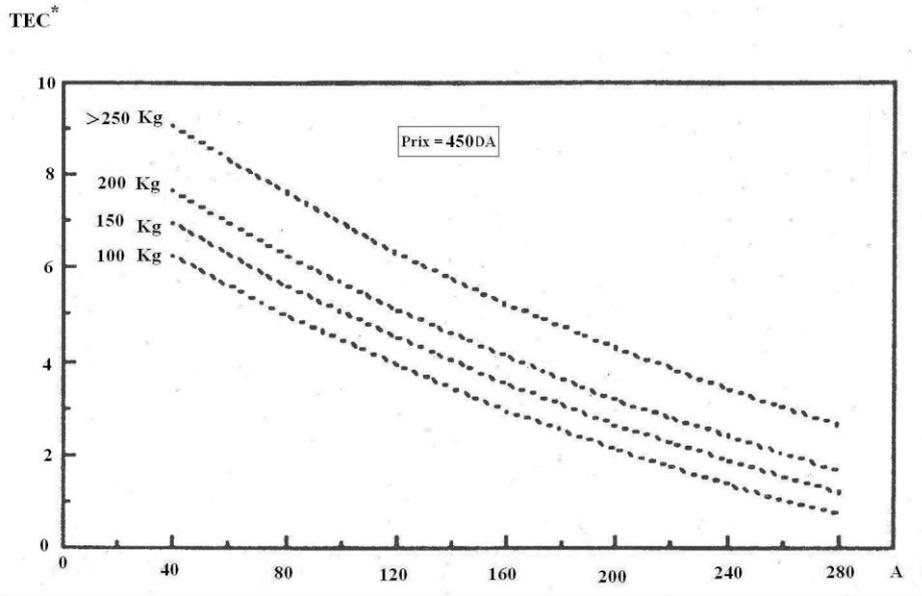


Figure 64: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 450 DA/kg.

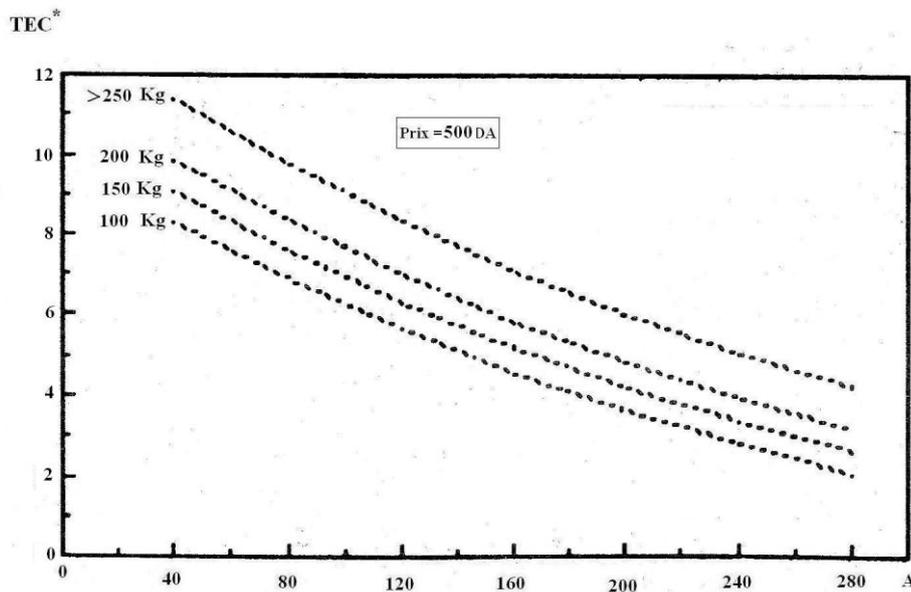


Figure 65: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 500 DA/kg.

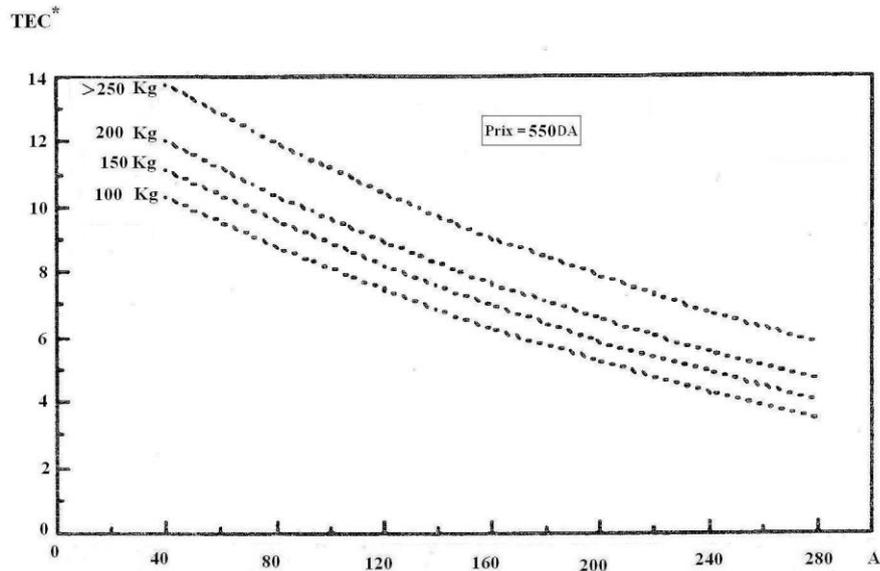


Figure 66: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 550 DA/kg.

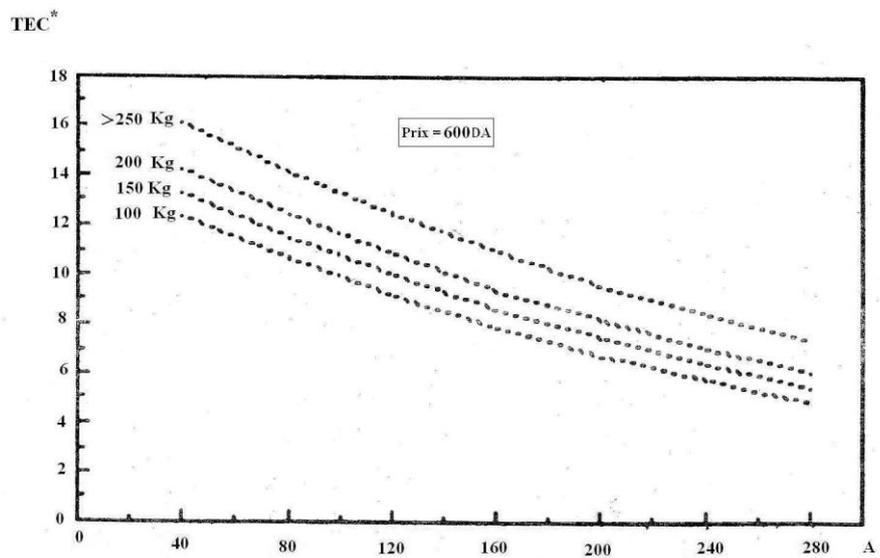


Figure 67: Variations du taux moyen d'enrichissement en capital TEC* en fonction de l'aire A de l'insolateur et pour différentes valeurs de la masse du produit m_{va} à sécher par cycle. Le prix de vente de la marjolaine est égal à 600 DA/kg.

ABAQUES J_2

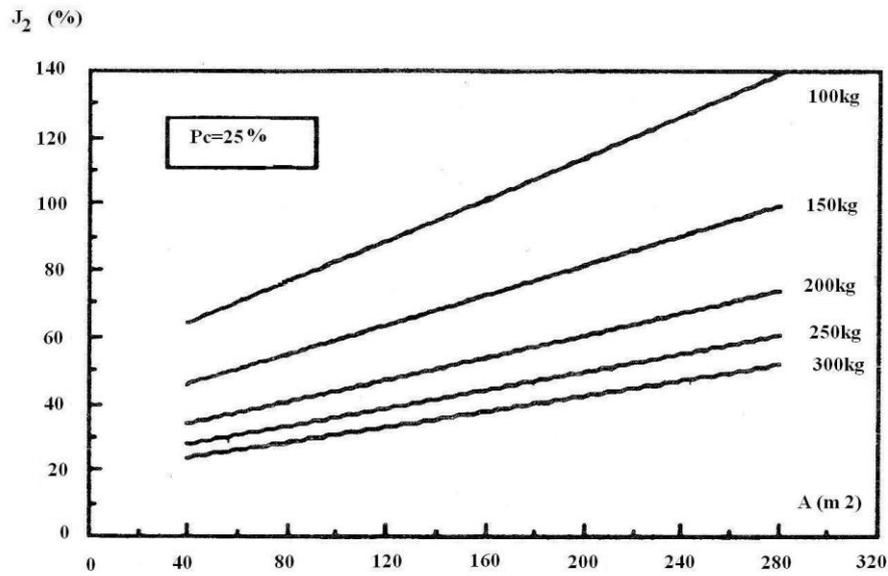


Figure E1: Abaque J_2 , fraction de Chaleur économisée du système de production d'air chaud en fonction de l'aire de l'isolateur A et de la masse m_v du produit à sécher par cycle. (Region d' Adrar; $P_c= 25\%$; $T= 65\text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{m}_{a,4}=0,425\text{KG}\cdot\text{s}^{-1}$).

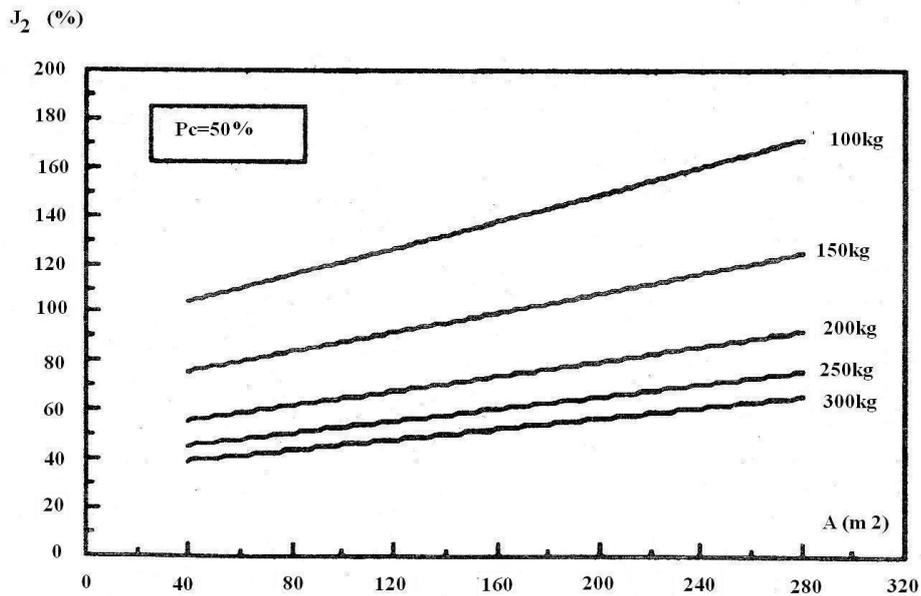


Figure E2: Abaque J_2 , fraction de Chaleur économisée du système de production d'air chaud de séchage en fonction de l'air de l'isolateur A et de la masse m_{va} du produit à sécher par cycle. (Region d' Adrar; $P_c= 50\%$; $T= 65\text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{m}_{a,4}=0,425\text{KG}\cdot\text{s}^{-1}$).

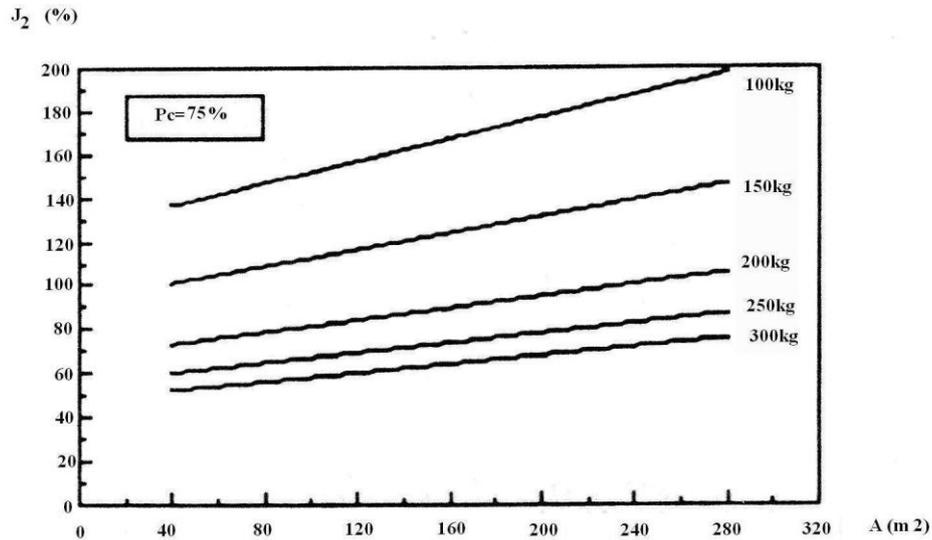


Figure E3: Abaque J_2 , fraction de Chaleur économisée du système de production d'air chaud en fonction de l'aire de l'insolateur A et de la masse m_v du produit à sécher par cycle. (Region d' Adrar; $P_c = 75\%$; $T = 65\text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{m}_a = 0,425\text{KG}\cdot\text{s}^{-1}$).

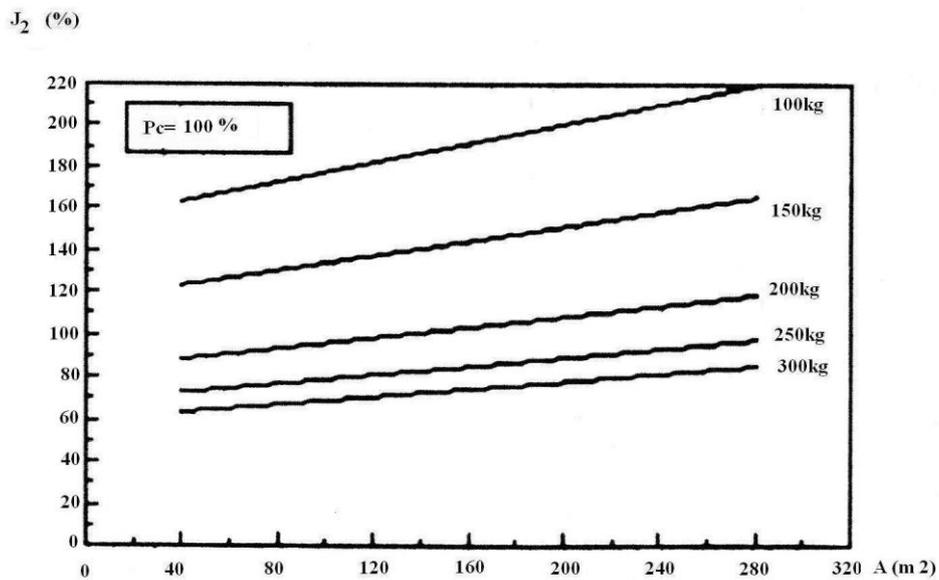


Figure E4: Abaque J_2 , fraction de Chaleur économisée du système de production d'air chaud de séchage en fonction de l'aire de l'insolateur A et de la masse m_{va} du produit à sécher par cycle. (Region d' Adrar; $P_c = 100\%$; $T = 65\text{ }^\circ\text{C}$; $\dot{m}_a = 0,425\text{KG}\cdot\text{s}^{-1}$).

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de ce travail, nous disposons d'un outil de dimensionnement, simple et scientifique, d'un système de production simultanée d'eau et d'air chauds à chauffage partiellement solaire pour le traitement de la marjolaine. Ce système est constitué d'un champ d'insolateurs à eau muni d'un circuit primaire fermé et d'un circuit secondaire alimentant, via un échangeur de chaleur eau/eau, une cuve principale reliée au réseau d'alimentation en eau puis une cuve secondaire équipée d'une source auxiliaire de chaleur fonctionnant aux énergies conventionnelles et destinée à satisfaire le besoin d'eau chaude. La cuve principale assure, grâce à un aérotherme, le chauffage de l'air qui est ensuite poussé, via une source de chaleur auxiliaire fonctionnant, elle aussi, aux énergies conventionnelles, dans l'armoire de séchage où se trouve un thermostat électronique connecté à la seconde source auxiliaire. A la sortie du séchoir, l'air est en partie rejeté dans l'atmosphère et en partie recyclé à travers l'aérotherme.

Cet outil de dimensionnement est constitué d'abaques ou de relations polynomiales les décrivant. Plus précisément, nous proposons deux groupes d'abaques selon que nous nous adressons à des concepteurs ou à des utilisateurs.

Destinés à des concepteurs, nos abaques, pour la production d'eau chaude, associent à une masse de produits à sécher et à une surface d'insolateurs, une valeur de la couverture solaire et pour la production d'air chaud, une valeur de la couverture solaire ainsi qu'une valeur de la fraction d'énergie économisée si l'air sortant du séchoir est partiellement recyclé au-dessus de la source de chaleur conventionnelle.

A l'adresse des utilisateurs, nous proposons trois abaques : le premier associe le temps de séchage, la masse de produits à sécher (ou de produits séchés) et le pourcentage d'air sortant du séchoir recyclé; le deuxième associe la masse de produits à sécher, la surface d'insolateur et les couvertures solaires relatives à la production d'eau et d'air chauds respectivement; le troisième associe la masse de produits à sécher, la surface d'insolateurs et la fraction de chaleur économisée pour la production d'air chaud lorsqu'une partie de l'air sortant du séchoir est recyclée.

L'obtention de ces abaques est le résultat de nombreuses simulations informatiques exécutées à l'aide (un modèle mathématique représentatif du système étudié. Ce modèle est complexe puisque le système est lui-même complexe.

Pour modéliser le rayonnement solaire, nous avons utilisé la théorie statistique de Liu et Jordan qui ne nécessite la connaissance que d'une seule donnée expérimentale et qui affirme qu'il existe, dans un mois considéré, une journée, dite journée moyenne caractéristique du mois, pour laquelle les valeurs des composantes du rayonnement solaire sont précisément égales à leurs valeurs moyennes mensuelles. Quand le système est utilisé tous les jours de la même façon, comme dans notre cas, cela évite de simuler son comportement pendant tous les jours du mois : il suffit de faire les calculs seulement pendant le jour caractéristique. Le gain de calcul est donc important.

A cause de sa complexité, le modèle représentatif du système contient de nombreux paramètres plus ou moins bien connus. Parmi ceux-ci figure la vitesse de séchage de la marjolaine (Chapitre II) qui joue un rôle essentiel. Celle-ci a été mesurée durant une phase expérimentale effectuée au niveau du laboratoire de l'énergie solaire et plantes aromatiques et médicinales de l'ENS de Marrakech, avec l'aide du Professeur Ali IDLIMAM et le chef du laboratoire le Professeur Kouhila Mohamed.

La méthode de résolution des équations du modèle est classique et repose sur une discrétisation aux différences-finies(Chapitre IV) ; cette partie de résolution a été effectuée avec le soutien du Professeur ZEGHMATI Belkacem ; chef du laboratoire de mathématique et physique des systèmes de l'université de Perpignan, durant un stage effectué au niveau de ce dernier.

La possession d'abaques permet, à l'aide d'un modèle économique que nous avons choisi classique, d'optimiser la surface d'isolateurs en fonction d'un objectif, par exemple pour économiser le maximum d'énergie de chauffage.

Ainsi, au prix de vente actuel de la marjolaine, autour de 100 DA le kg, il est tout à fait possible de réaliser un bénéfice. Par exemple, dans le cas très défavorable où l'on ne sécherait que 100 kg de marjolaine par opération (13 opérations par mois, sur 7 mois de l'année pendant

10 ans) avec un système comportant 280 m² d'insolateur, on gagnerait quand même soixante fois le capital investi.

Cependant, la part du solaire dans le bénéfice réalisé n'est que de 40 %. Cette faible contribution solaire résulte du prix de vente élevé de la marjolaine dû à la forte valeur ajoutée lors de sa préparation.

Quand on connaît toutes les difficultés techniques qu'il faut surmonter pour maintenir en bon état de marche un système solaire de production d'eau chaude, difficultés que nos calculs ne prennent pas en compte, on peut se demander s'il est intéressant de solariser, du moins à Adrar, le sous-système de production d'eau' implique dans notre étude et destine, rappelons-le, à satisfaire simultanément un besoin d'eau chaude et un besoin d'air chaud, via un aérotherme. D'autres questions se posent alors : ne conviendrait-il pas de séparer le sous-système de production d'eau chaude de celui de production d'air chaud relie au séchoir? Il est, en effet, possible de chauffer de l'air à l'aide de l'énergie solaire avec du matériel peu sophistiqué et bon marché, ce qui n'est pas recommandé pour l'eau; de plus, cela éliminerait l'usage d'un aérotherme, organe relativement coûteux et qui fait chuter le rendement du chauffage de l'air. Ne pourrait-on pas utiliser des insolateurs mixtes, c'est-à-dire produisant simultanément de l'eau et de l'air chauds ? Répondre à ces questions constitue autant de suites à donner à notre travail. De même, les coefficients d'échange thermique, dont nous avons extrait les valeurs d'une masse de données bibliographiques, jouent un rôle essentiel dans nos Calcul et nous pensons qu'une étude comparative critique des innombrables expressions existantes serait intéressante. Enfin, puisque le prix de vente élevé de la marjolaine autorise un appareillage sophistiqué, ne serait-il pas intéressant d'utiliser des micro-ondes au cours de sa préparation ? Répondre à une telle question nécessiterait une étude expérimentale.

BIBLIOGRAPHIE

- 1.** H.C. Hottel and A. Whillier, « Evaluation of flat-plate solar collector performance. Trans. Of the Conference on the Use of Solar Energy », Thermal processes, University of Arizona, Tempe, 74-104, 1955.
- 2.** J.A. Duffie & W.A. Beckman, « Solar Engineering of thermal processes », J. Wiley and Son Inc, New York, 1980.
- 3.** R.W. Bliss, « The derivation of several 'Plate-efficiency factors' useful in the design of flat-plate solar heat collectors », Solar Energy, Vol.3, No.4, 5-64, 1959.
- 4.** S.A. Klein, J.A. Duffie & W.A. Beckman « Transient considerations of flat-plate solar collectors », ASME Journal of Engineering for power, Vol.96, No.2, 1974.
- 5.** M. Dagueneat, « Les séchoirs solaires : théorie et pratique » UNESCO, Paris, 1985.
- 6.** B. Y.H Liu & R.C. Jordan, « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », Solar Energy, Vol.4, No.3, 1-19, 1960.
- 7.** B. Y.H Liu & R.C. Jordan, « A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors », Solar Energy, Vol.7 No 2, 53-74, 1960.
- 8.** S.A. Klein, « Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces », Solar Energy, Vol.19, No.4, 325-329, 1977.
- 9.** S.A. Klein, « Calculation of flat-plate collector loss coefficients », solar energy, Vol.17, No.1, 79-80, 1975.
- 10.** W. M. Kays & A.L London, « compact Heat Exchangers », McGraw-Hill, New York, 1958.
- 11.** F. de winter, « Heat exchanger penalties in double-loop solar water heating systems » Solar energy, vol.17, No. 6, 335-337, 1976.
- 12.** S.A. Klein, W. A. Beckman & J.A. Duffie, « A design procedure for solar heating systems », Solar energy. Vol .18, No. 2, 113-127, 1976.
- 13.** J.M Chassériaux, « Conversion thermique du rayonnement solaire », Dunod, Paris, 1984.

- 14.** J .Giordano, « Capteur C2-Notice d'étude d'installation » Energie Solaire Total, France, 1987.
- 15.** J .Giordano, « Capteur C2 & C2S- Instructions de montage » Energie Solaire Total, France, 1987.
- 16.** J.Khedari, « Méthode scientifique simple de dimensionnement d'un système de chauffage partiellement solaire utilisant un mur capteur-accumulateur, Applications au chauffage domestique et aux séchoirs modulaires polyvalents », thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 1991.
- 17.** J .Hirunlabh, « Abaques de dimensionnement de séchoirs modulaires polyvalents à chauffage partiellement solaire » Thèse de Doctorat, Université de Nice –Sophia Antipolis, 1991.
- 18.** B. O.A. Ramamonjisoa , « Contribution au développement de séchoirs à chauffage partiellement solaire à la Réunion : Mise au point d'un dispositif de mesure de vitesse de séchage en couche mince et d'un code de calcul d'abaques de dimensionnement »,Thèse de Doctorat, Université de la Réunion ,1993.
- 19.** S.Janjia, « Faisabilité technico-économique d'un système de séchage solaire du tabac virginie », Thèse de Docteur de 3^e cycle, Université de Perpignan, 1985.
- 20.** T.A.Reddy, « MIRA : une méthode de simulation horaire du comportement moyen mensuel d'un système solaire de préchauffage. Application au séchage »Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de perpignan, 1982.
- 21.** G.Gutierrez, F.Hincapie, J.A.Duffie & W .A. Beckman, « Simulation of forced circulation water heaters effects of auxiliary energy supply, load type, and storage capacity », Solar energy, Vol.15, 287-298, 1974.
- 22.** C.W J.Van Koppen « Conference introductive de la session: Active Heating and cooling, Solar World Forum », ISES, Brighton, 1981.
- 23.** J.A.Duffie & W.A. Beckman, « Solar energy thermal processes », Wiley interscience, New York, 1974.

24. W.A. Beckman, J.A.Duffie & S.A.Klien, « Simulation of solar heating systems-‘Chap IX: Applications of solar energy for heating and cooling of Building’», Eds.-R.C.Liu, ASHRAE GRP 170, 1977.
25. J.R.Welty, « Engineering heat transfer », SI version, USA, 1978.
26. B.Carnahan, H.A.Luther & L.O.Wilkes, « Applied numerical methods »; John Wiley and Son Inc, New York, 1969.
27. M.Kouhila, « Contribution à l’étude des performances technico-économiques d’un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire, application au séchage des abricots », Thèses de docteur de 3^e cycle, Ecole Normale Supérieure de Marrakech, 1989.
28. J.F.Saccadura, «Initiation au transfert thermiques» Lavoisier Technique et documentation, Paris, 1982.
29. K.G.T.Hollands, T.E.Unny, G.D.Raithby & L.konicek, « Free convection across inclined air layers », J.Heat Transfer, vol.98,No. 2,189,1976.
30. H.W. Adams, « La transmission de la chaleur », Dunod, Paris, 1964.
31. E.M.Sparrow & J.E.Gregg, « Trans. A.S.M.E », Vol.78, 435-440, 1956.
32. C.G.M. Slesser & D.Cleland, « Surface evaporation by forced convection », I
.Simultaneous heat and mass transfer, Int. J.Heat & Mass Transfer , Pergamon Press, Vol.5,735-749, 1962.
33. J.H.Perry & C.H.Chilton, « Chemical Engineer’s Handbook »; McGraw-Hill, New York, 1973.
34. H.C.Hottel, « A Simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres », Solar energy, Vol. 18, No.2, 129-134, 1976.
35. J.Hirunlabh, J.Khedari & M.Daguenet , « J-Chart method in designing a partially solar heated dryer » , Int J. Solar energy , Vol.11,91-103,1992.
36. W.A.Beckman, S.A.Klien & J.A.Duffie, « Solar heating desing by the F-Chart method », John Wiley and son Inc, New York, 1977.

37. H.Weinberger, « the physics of the solar pond », Solar Energy, Vol.8, No.2, 45-56, 1964.
38. C.C.Y.MA & M.Iqbal, « Statistical comparison of solar radiation correlations: Monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces » solar energy, vol.33, No.2, 143-148, 1984.
39. C.Fö hliche & C. Wehrli, « Spectral distribution of solar irradiance from 25000 to 250 nm », World Radiation Center , Davos , Switzerland , 1981.
40. Word Meteorological Organization, Commission for Instruments, « Measurement and Observation », 8 th session, Mexico City, 1981.
41. « Atlas Internationa », Rand McNally & Company, USA, 1977.
42. ASHRAE Handbook & Product Directory, Fundamentals volume, American Society of Heating, « Refrigeration and Air-Conditioning Engineers », Inc. 345E,47th ST, New York, 1985.
43. J.Hirunlabh, « Recherche d'une méthode simple de dimensionnement des séchoirs à chauffage partiellement solaire pour fruits et légumes », Thèse de Doctorat de 3^e cycle, université de Nice, 1988.
44. M.S.Keovimol, « Recherche d'une méthode simple de dimensionnement des séchoirs solaires à céréales », Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Nice, 1989.
45. J .Khedari, B.Ramamonjisoa, J.C.Gatina, M.Kaoua,A.Belghit & M.Daguenet, « Détermination expérimentale de la vitesse de séchage de denrées agroalimentaires », in Actes du colloque international- COMPLES- Techniques de dimensionnement des systèmes énergétiques solaires, France,1994.
46. Belghit, A., Kouhila, M., Boutaleb, B.C. (1999). Experimental study of drying kinetics of sage in a drying tunnel working in forced convection, *Revue des énergies Renouvelables*, vol. 2(1), pp. 17-26
- 47..Daguenet M. (1985). *Les séchoirs solaires : théorie et pratique*, Publication de l'UNESCO, paris, France.=====

- 48.** Idlimam A. (1990), *Étude théorique d'un système de séchage des peaux et des cuirs pour la région de Marrakech constitué d'une serre agricole jouant le rôle de générateur solaire d'air chaud et d'un séchoir conventionnel*, Thèse de 3ème cycle, École Normale Supérieure, Marrakech, Maroc.
- 49.** Idlimam A., Jamali A., Kaoua M., Kouhila M. & Fliyou M. (2006). Etude comparative expérimentale des températures et des composantes du rayonnement solaire à Marrakech et à Oukaimeden, *Les cahiers de la recherche*, Université Hassan II-Ain Chock, Ref VPR-DR.
- 50.** Archimed G. & Solagro B. (1989). Le séchage des plantes aromatiques et médicinales, *Guide de conception et d'utilisation d'un séchoir*, Fondation de France et Direction de l'énergie de la Commission des communautés européennes, 80p.
- 51.** Camara, M. (1993). *Séchage solaire des plantes aromatiques*, Mémoire de fin d'études de 3ème cycle, IAV Hassan II, Rabat, 81 p
- 52.** Lahsasni S., Kouhila M., Mahrouz M., Idlimam A. & Jamali A. (2004). Thin layer Convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*), *Energy*, vol. 29(2), pp. 211-224.
- 53.** Ait Mohamed, L., Kouhila, M., Jamali A., Lahsasni, S., Kechaou, N. Mahrouz, M. (2005). Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection, *Energy conversion and Management*, vol. 46(9-10), pp. 1473-1483.
- 54.** Idlimam A., Kane C.S.E. & Kouhila M. (2007). Single layer drying behaviour of grenade peel in a forced convective solar dryer, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10(2), pp. 191-203.
- 55.** Lahsasni S., Kouhila M., Mahrouz M., Ait Mohamed L. & Agorram, B. (2004). Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*), *Journal of Food Process Engineering*, vol. 27(2), pp. 103- 117.
- 56.** Iguaz A., San Martin M.B., Mate J.I., Fernandez T., & Virseda, P. (2003). Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatures, *Journal of Food Engineering*, vol. 59(2-3); pp. 253–258.

- 57.** Kouhila M., Belghit A. & Daguene M., (2001). Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte, *Entropie*, vol. 37(233), pp. 20-31.
- 58.** Van Meel D.A. (1958). Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chemical Engineering Science*, vol. 9, pp. 36-44.
- 59.** Ait Mohamed, L. (2006). *Etude physico-chimique de la qualité de la conservation avant et après séchage solaire convectif du Gelidium sesquipedale (Algue rouge) et du Citrus aurantium (Orange amer)*, Thèse de Doctorat, Université cadi Ayyad, Marrakech
- 60.** Jamali A. (2006). *Étude des isothermes de sorption et des cinétiques de séchage solaire par convection forcée des feuilles d'ansérine (Chenopodium ambrosioides) et de mandarinier (Citrus reticulata) pour une meilleure conservation*, Thèse d'Habilitation Universitaire, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 250p.
- 61.** Lahsasni S. (2004). *Étude de la composition chimique et de la conservation par séchage solaire convectif d'un cactus inerme d'Opuntia ficus indica : impact du séchage sur la qualité des polysaccharides et des pigments*, Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 189 p.
- 62.** Midilli A. & Kucuk H. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy Conversion and Management*, vol. 44(7), pp. 1111-1122.
- 63.** Ertekin C., Yaldiz O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *Journal of Food Engineering*, vol. 63(3), pp. 349–359.
- 64.** Midilli A., Kucuk H. & Yapar Z. (2002). A new model for single layer drying, *Drying Technology*, vol. 20(7), pp. 1503-1513.
- 65.** Fick A. (1855). Ueber diffusion, *annalen der physik*, vol. 170, pp. 59-86.
- 66.** Crank J. (1975). *The mathematics of diffusion*. 2nd. Ed, Oxford, Oxford University Press. 414 p.

- 67.**Doymaz I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots, *Journal of Food Engineering*, vol. 61(3), pp. 359–364.
- 68.**Doymaz I. & Pala, M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn, *Journal of Food Engineering*, vol. 60(2), pp. 125–130.
- 69.**Kouhila M. (2001). *Étude expérimentale et théorique de cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (menthe, verveine, sauge et eucalyptus) de la région de Marrakech*, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 170 p.
- 70.**Midilli A. (2001). Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system, *International Journal of Energy Research*, vol. 25(8), pp. 715-725.
- 71.**Belghit, A., Kouhila, M., Boutaleb, B.C. (2000). Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, *Energy Conversion & Management*, vol. 41(12), pp. 1303-1321.
- 72.**Bellagha S., Amami E., Farhat A., Kechaou N. (2002). Drying Kinetics And Characteristic Drying Curve Of Lightly Salted Sardine (*Sardinella Aurita*). *Drying Technology*, vol. 20(7), pp. 1527 – 1538
- 73.**Kechaou, N. (2000). *Étude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agro-alimentaires*, Thèse de Doctorat d'État, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie, 192 p.
- 74.**Boudhrioua, N. (2004). *Étude des migrations de l'eau et du chlorure de sodium dans des gels alimentaires et influence de la composition du gel et du procédé appliqué*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, Massy, France, 149 p.
- 75.**Moyne C., Kechaou N., Do Amaral Sobral P. J., Roques M., Cairault A., Bizot H. (1992). Séchage et mécanismes de transport de l'eau dans les gels. *Entropie*, vol 28(167), pp. 9-17.

ANNEXE

Annexe A

CALCUL DE $\overline{(\tau\alpha)}$

A.1. TRANSMISSION DU RAYONNEMENT DIRECTE

En supposant que la surface de séparation de deux milieux transparents est parfaite (propre, lisse ...) de sorte que la réflexion soit spéculaire, on peut montrer que [14] :

-le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence et fait avec la normale a la surface un angle égal à l'angle d'incidence θ ;

- les angles d'incidences θ et de réfraction Φ sont liés par la *loi de Descartes*:

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \Phi \quad (\text{A1})$$

- la réflectivité monochromatique directionnelle hémisphérique $\rho_{\lambda}(\theta)$ est donnée par les formules de *Fresnel* :

◇ Pour une onde polarisée parallèlement au plan d'incidence :

$$\rho_{\lambda//}(\theta) = \frac{tg^2(\theta - \Phi)}{tg^2(\theta + \Phi)} \quad (\text{A2})$$

◇ Pour une onde polarisée perpendiculairement au plan d'incidence :

$$\rho_{\lambda\perp}(\theta) = \frac{\sin^2(\theta - \Phi)}{\sin^2(\theta + \Phi)} \quad (\text{A3})$$

Dans le cas particulier d'une incidence normale du rayonnement $\theta = \Phi = 0$, on a :

$$\rho_{\lambda//}(0) = \rho_{\lambda\perp}(0) = \frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)} \quad (\text{A4})$$

Dans ce qui suit, nous avons omis l'angle d'incidence θ et les indices λ , $//$ et \perp pour simplifier les notations bien que les relations s'entendent pour une longueur d'onde, une direction et une polarisation données. On note :

$$\rho_p = \rho_{\lambda//}(0) \quad \text{et} \quad \rho_p = \rho_{\lambda\perp}(0) \quad (\text{A5})$$

Dans le cas des lames transparentes à faces parallèles, telle la vitre, il faut tenir compte des réflexions multiples sur les surfaces de séparations.

En supposant que la lame est suffisamment froide pour que son émission puisse être négligée, on obtient les coefficients de réflexion ρ et de transmission τ suivants :

$$\rho_{(\rho_n, \tau')} = \rho_n [1 + \tau' \tau_{(\rho_n, \tau')}] \quad (\text{A6})$$

$$\rho_{(\rho_p, \tau')} = \rho_p [1 + \tau' \tau_{(\rho_p, \tau')}] \quad (\text{A7})$$

$$\tau_{(\rho_n, \tau')} = \frac{\tau'(1-\rho_n)^2}{1-(\rho_n\tau')^2} \quad (\text{A8})$$

$$\tau_{(\rho_p, \tau')} = \frac{\tau'(1-\rho_p)^2}{1-(\rho_p\tau')^2} \quad (\text{A9})$$

τ' étant un coefficient de transmission défini par la loi de **Bouper-Lambert** [29] comme suite:

$$\frac{e}{\cos \Phi} \quad (\text{A10})$$

avec:

K : Coefficient d'extinction (m^{-1}) Pour le verre $K = 32 \text{ m}^{-1}$;

e : Epaisseur de la vitre (m);

Φ : Angle de réfraction (degrés);

$\frac{e}{\cos \Phi}$: Trajet optique du rayonnement.

Lorsque le rayonnement incident est non polarisé, comme dans notre cas, les coefficients globaux de réflexion ρ et de transmission τ' à travers les milieux transparents (vitre) sont les suivants :

$$\rho = \frac{1}{2} [\rho_{(\rho_n, \tau')} + \rho_{(\rho_p, \tau')}] \quad (\text{A11})$$

$$\tau = \frac{1}{2} [\tau_{(\rho_n, \tau')} + \tau_{(\rho_p, \tau')}] \quad (\text{A12})$$

A.2. TRANSMISSION DU RAYONNEMENT DIFFUS

Pour obtenir les coefficients de réflexion ρ_d et de transmission τ_d pour le rayonnement diffus à travers une vitre, il faudrait intégrer les formules obtenues précédemment pour le rayonnement direct sur toutes les incidences en les pondérant en fonction de l'anisotropie de ce rayonnement diffus. Ce calcul est évidemment compliqué mais, en pratique, **Duffie** et **Beckman** [3] ont montré que l'on obtient une bonne approximation de ρ_d et de τ_d pour une incidence de 60° . Il en est de même pour le rayonnement réfléchi par le sol.

A.3.CALCUL DE $(\tau\alpha)$

Le rendement optique instantané ou de l'insolateur est donné par [14] :

$$\eta_0 = (\tau\alpha) = R_b(\tau\alpha)_b \frac{I_h}{G_t} + R_{dc}(\tau\alpha)_d \frac{D}{G_t} + R_{ds}(\tau\alpha)_d \frac{G}{G_t} \quad (\text{A13})$$

avec:

I_h : Rayonnement direct total instantané;

D : Rayonnement diffus total instantané;

G : Rayonnement global instantané, avec :

$$G = D + I \sin h_s \quad (\text{A14})$$

h_s : étant la hauteur du soleil;

G_t : Rayonnement incident instantané frappant l'insolateur, donné par l'expression :

$$G_t = R_b I_h + R_{dc} D + R_{dc} G \quad (\text{A15})$$

$R_b I_h$: Rayonnement directe sur le plan incliné de l'insolateur, tel que :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\sin h_s} \quad (\text{A16})$$

θ : étant l'angle entre la normale au plan et la direction du soleil ;

$R_{dc} D$: Rayonnement diffus du ciel arrivant sur la surface de l'insolateur, tel que :

$$R_{dc} = \frac{1}{2}(1 + \cos s_c) \quad (\text{A17})$$

R_{ds} : étant l'angle solide sous lequel la surface voit le ciel ;

$R_{ds} G$: Rayonnement diffus du sol intéressant la surface de l'insolateur, tel que:

$$R_{dc} = \frac{1}{2}(1 - \cos s_c)\rho \quad (\text{A18})$$

ρ étant l'albédo du sol.

$(\tau\alpha)_b$ et $(\tau\alpha)_d$ respectivement pour les rayonnements direct et diffus sont donnés par [14]:

$$(\tau\alpha)_b = \frac{\tau_{d,\alpha}}{1-\rho_d(1-\alpha_d)} \left[1 - \rho_d \left(1 - \frac{\alpha_d}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{A19})$$

$$(\tau\alpha)_d = \frac{\tau_{d,\alpha}}{1-\rho_d(1-\alpha)} \quad (\text{A20})$$

α étant le coefficient d'absorption de l'absorbeur .

Les rayonnements I_h , D et G peuvent être calculés en suivant l'algorithme suivant :

1 - Calculer la transparence de l'atmosphère pour le rayonnement direct par ciel clair d'après la relation de **Hottel** [35] :

$$\tau_d = r_0 a_0 + r_1 a_1 \exp \left(-\frac{r_k k}{\sin h_s} \right) \quad (\text{A21})$$

Avec :

$$a_0 = 0,4237 - 0,00821(6 - z)^2 \quad (\text{A22})$$

$$a_1 = 0,5055 + 0,00595(6,5 - z)^2 \quad (\text{A23})$$

$$k = 0,2711 + 0,01858(2,5 - z)^2 \quad (\text{A24})$$

où :

z est l'altitude en km ($z < 2,5$).

r_0 , r_1 et r_k sont des coefficients dépendant du climat.

2 - Estimer le rayonnement diffus par ciel clair suivant la formule de **Liu et Jordan** [7] :

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939 \tau_b \quad (\text{A25})$$

3 - Calculer la puissance E du rayonnement solaire reçue par m^2 au niveau de la terre [14] :

$$E = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos n_j \frac{360}{365} \right] \quad (\text{A26})$$

Où :

n_j : Quatrième (nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} Janvier);
 G_{sc} : Constante solaire ($G_{sc} = 1367 \text{ W.m}^{-2}$).

4 - Calculer la valeur horaire D^* du rayonnement diffus total suivant la corrélation de **Stauter et Klein** [3] :

$$\frac{D^*}{G^*} = \begin{cases} 1 - 0,1 k_c & \text{pour } 0 \leq k_c \leq 0,48 \\ 1,11 + 0,0396 k_c - 0,789 k_c^2 & \text{pour } 0,48 \leq k_c \leq 1,10 \\ 0,2 & \text{pour } k_c \geq 1,10 \end{cases} \quad (\text{A27})$$

Avec :

$$k_c = \frac{G^*}{G_c^*} \quad (\text{A28})$$

et

$$G^* = 3600 \cdot E \cdot (\tau_b + \tau_d) \sin h_s \quad (\text{A29})$$

Connaissant la valeur de G^* (données météorologiques), on en déduit D^* .

5 - Calculer la valeur horaire I_h^* du rayonnement direct total à l'aide de la relation:

$$I_h^* = G^* - D^* \quad (\text{A30})$$

6 - Calculer les valeurs instantanées I_h , D et G :

$$I_h = \frac{I_h^*}{3600} \quad G = \frac{G^*}{3600} \quad D = \frac{D^*}{3600} \quad (\text{A31})$$

A.4.CALCUL DE $(\overline{\tau\alpha})$

Partant de l'équation (AI3), en faisant appel au modèle proposé par *Liu* et *Jordan* [7,8], on aboutit aux valeurs journalières moyennes mensuelles suivantes :

$$(\overline{\tau\alpha}) = \frac{1}{R} \left\{ \begin{array}{l} \bar{R}_b \left(1 - \frac{r_d \bar{H}_d}{r H} \right) (\overline{\tau\alpha})_b \\ + \frac{(\overline{\tau\alpha})_d}{2} \left[(1 + \cos s_c) \frac{r_d \bar{H}_d}{r H} + (1 - \cos s_c) \rho \right] \end{array} \right\} \quad (\text{A32})$$

Annexe B

CARACTERISTIQUES DE L'AIR HUMIDE

On rappelle qu'un air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Sans entrer dans les considérations thermodynamiques, nous donnons ci-après quelques définitions et formules usuelles permettant de calculer les propriétés physiques de l'air humide, donc de l'air asséchant.

B.1. HUMIDITE RELATIVE

L'humidité relative HR ou degré hygrométrique de l'air humide est défini comme le rapport (ρ_v / ρ_{vs}) entre la masse volumique de la vapeur d'eau ρ_v et la masse volumique de la vapeur saturée ρ_{vs} . Elle est exprimée en (%) et la formule usuelle est donnée par [6] :

$$HR \approx \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (B1)$$

avec:

P_v : Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air;
 P_{vs} : Pression de vapeur saturante.

B.1. HUMIDITE ABSOLUE

L'humidité absolue HA ou la teneur en humidité de l'air humide est définie comme le rapport (ρ_v / ρ_{as}) entre la masse volumique de la vapeur d'eau ρ_v et la masse volumique de l'air sec ρ_{as} . Elle est exprimée en (kg/kg) et la formule usuelle est donnée par [43] :

$$HR = 0,62198 \frac{P_v}{P - P_{vs}} \quad (B2)$$

Où P est la pression totale de l'air humide.

B.3. PRESSION DE VAPEUR SATURANTE

Bertrand a donné pour l'eau la formule suivante de la pression de vapeur saturante P_{vs} (atm) valable entre 0 et 200 °C :

$$P_{vs} = 10^{\left(17,443 - \frac{2795}{T} - 3868 \log_{10} T\right)} \quad (B3)$$

Où T est la température de l'air humide (K).

Elle peut aussi s'écrire en fonction de la température ambiante T_a [43,44]:

$$P_{vs} = \exp\left(\frac{C_1}{T_a} + C_2 + C_3 T_a + C_4 T_a^2 + C_5 T_a^2 + C_6 \log_{10} T_a\right) \quad (\text{B4})$$

Avec :

$$\begin{aligned} C1 &= -5800,2206 \\ C2 &= 1,3914993 \\ C3 &= -0,04860239 \\ C4 &= 0,41764768 \cdot 10^{-4} \\ C5 &= -0,14452093 \cdot 10^{-7} \\ C6 &= 6,5459673 \end{aligned}$$

B.4. COEFFICIENT DE DIFFUSION MOLECULAIRE DE LA VAPEUR D'EAU. DANS L'AIR

Le coefficient de diffusion moléculaire D_M de la vapeur d'eau dans l'air est donné par la formule de *Shirmer* [29] :

$$D_M = 2,26 \cdot 10^{-5} \frac{1}{P} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} \quad (\text{B5})$$

avec:

$$D_M [m^2 \cdot s^{-1}]; \quad P [\text{bar}]; \quad T [\text{K}]$$

B.5. MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique ρ de l'air humide est donnée par [6] :

$$\rho = \frac{1}{r_a T} (P - 0,378 P_v) \quad (\text{B6})$$

$$\text{Avec : } \rho [kg \cdot s^{-3}]; \quad T [\text{K}]; \quad P \text{ et } P_v [Pa]; \quad r_a = 287,1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

B.6. CHALEUR SPECIFIQUE

La fraction massique C_v de la vapeur est donnée par [6] :

$$C_v = \frac{0,622 P_v}{P - 0,378 P_v} \quad (\text{B7})$$

B.7. CHALEUR SPECIFIQUE

La chaleur spécifique C_p de l'air humide est donnée par [6] :

$$C_p = C_{pa} (1 - C_v) + C_{pv} C_v \quad (\text{B8})$$

$C_{pa} = 1004,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$: chaleur spécifique de l'air sec;

$C_{pv} = 1862,3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$: chaleur spécifique de la vapeur d'eau.

B.8. CONDUCTIVITE THERMIQUE

La conductivité de l'air sec λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$) de l'air humide donnée par [6] :

λ_0 est la conductivité de l'air sec et s'écrit comme suit :

$$\lambda = \lambda_0 + 0,00476 \frac{c_v}{1-c_v} \quad (\text{B8})$$

avec:

$$\lambda = \lambda_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (\text{B4})$$

t : Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$);

$$a_0 = 0,0243$$

$$a_1 = 9,47167.10^{-5}$$

$$a_2 = -0,18250.10^{-5}$$

$$a_3 = 0,00227.10^{-5}.$$

B.9. VISCOSITE DYNAMIQUE

La viscosité dynamique μ ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) de l'air humide est donnée par [6]:

$$\mu = \frac{g}{\frac{P_v}{\mu_v} + \frac{P_{as}}{\mu_{as}}} \quad (\text{B11})$$

avec:

g : Accélération de la pesanteur (m.s^{-2});

P_{as} : Pression Partielle de l'air sec exprimé par :

μ_{as} : Viscosité dynamique de l'air sec ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$), donnée par:

$$\mu_{as} = 25,393.10^{-7} \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{122}{T} \right)^{-1} \quad (\text{B13})$$

μ_v : Viscosité dynamique de la vapeur d'eau ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) exprimée Par:

$$\mu_v = 30,147.10^{-7} \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{673}{T} \right)^{-1} \quad (\text{B14})$$

T : Température de l'air humide(K).

Annexe C

DONNEES METEOROLOGIQUES

Région cible : Adrar.

Source de données : Centre de développements des énergies renouvelables CDER et le centre de recherche d'Adrar.

C.1. RAYONNEMENT GLOBAL JOURNALIER MOYEN MENSUEL \bar{H}

Mois	Jan.	Fev.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Jun.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
\bar{H}	5625	5695	5160	4732	4206	3737	3804	4364	5088	5677	5861	5844

\bar{H} en (Wh.m⁻²) : données moyennes sur 10 ans (1975-1984).

C.2. VITESSE MOYENNE DU VENT V_v

Mois	Jan.	Fev.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Jun.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
V_v	1,94	1,94	1,94	2,22	2,5	2,78	3,06	2,78	2,78	2,5	2,22	1,94

V_v en (m.s-1) : données moyennes sur 20 ans (1966-1985).

C.3. HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR HR

Mois	Jan.	Fev.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Jun.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
HR	85,13	84,57	85,67	84,87	84,20	83,40	83,60	83,53	76,13	82,27	83,00	84,00

HR en (%) : données moyennes sur 15 ans (1976-1990).

C.4. TEMPERATURE AMBIANTE MINIMA T_{amin}

Mois	Jan.	Fev.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Jun.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
T_{amin}	22,39	22,47	22,41	21,83	20,51	19,21	18,26	18,13	18,52	19,54	20,67	21,88

T_{amin} en (°C) : données moyennes sur 15 ans (1976-1990).

C.4. TEMPERATURE AMBIANTE MINIMA T_{amax}

Mois	Jan.	Fev.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Jun.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
T_{amax}	30,55	31,19	30,53	29,87	28,43	26,68	25,82	25,72	26,47	27,63	28,91	30,23

T_{amax} en (°C) : données moyennes sur 15 ans (1976-1990).

Annexe D

CARACTERISTIQUES DES INSOLATEURS

Mois	FR	U_L	$\tau\alpha$	$F_R U_L$	$F_R \tau\alpha$	Q_u (J)
Janvier	0,16	9,77	0,78	1,563	0,125	2,55 E+07
Février	0,16	9,71	0,78	1,554	0,125	2,56 E+07
Mars	0,17	9,40	0,77	1,598	0,131	2,27 E+07
Avril	0,16	9,80	0,78	1,568	0,125	2,32 E+07
Mai	0,17	9,49	0,77	1,613	0,131	1,94 E+07
Juin	0,17	9,25	0,76	1,572	0,129	1,62 E+07
Juillet	0,17	9,34	0,77	1,588	0,131	1,63 E+07
Août	0,16	9,67	0,78	1,547	0,125	1,93 E+07
Septembre	0,16	9,78	0,78	1,565	0,125	2,17 E+07
Octobre	0,16	10,07	0,79	1,611	0,126	2,56 E+07
Novembre	0,16	10,15	0,79	1,624	0,126	2,74 E+07
Décembre	0,16	9,83	0,78	1,573	0,125	2,64 E+07

Tableau D1: Calcul des caractéristiques et de la puissance utile délivrée à la sortie des insolateurs à eau pour tous les mois de l'année. ($S_c = 10^\circ$. région: Adrar).

Mois	FR	U_L	$\tau\alpha$	$F_R U_L$	$F_R \tau\alpha$	Q_u (J)
Janvier	0,16	9,91	0,79	1,586	0,126	2,70 E+07
Février	0,16	9,88	0,79	1,581	0,126	2,71 E+07
Mars	0,17	9,60	0,79	1,532	0,134	2,39 E+07
Avril	0,16	9,85	0,79	1,576	0,125	2,37 E+07
Mai	0,17	9,49	0,78	1,613	0,133	1,92 E+07
Juin	0,17	9,21	0,77	1,566	0,131	1,57 E+07
Juillet	0,17	9,31	0,77	1,583	0,131	1,59 E+07
Août	0,16	9,70	0,79	1,552	0,125	1,95 E+07
Septembre	0,16	9,90	0,79	1,584	0,126	2,27 E+07
Octobre	0,15	10,19	0,80	1,529	0,120	2,71 E+07
Novembre	0,15	10,26	0,80	1,539	0,120	2,90 E+07
Décembre	0,16	9,81	0,79	1,570	0,126	2,58 E+07

Tableau D2: Calcul des caractéristiques et de la puissance utile délivrée à la sortie des insolateurs à eau pour tous les mois de l'année. ($S_c = 20^\circ$. région: Adrar).

Mois	FR	U_L	$\tau\alpha$	$F_R U_L$	$F_R \tau\alpha$	Q_u (J)
Janvier	0,16	9,95	0,80	1,592	0,128	2,81 E+07
Février	0,16	9,92	0,80	1,587	0,128	2,821 E+07
Mars	0,16	9,64	0,79	1,542	0,126	2,47 E+07
Avril	0,16	9,78	0,79	1,556	0,126	2,37 E+07
Mai	0,17	9,38	0,78	1,695	0,133	1,86 E+07
Juin	0,17	9,06	0,77	1,540	0,131	1,49 E+07
Juillet	0,17	9,18	0,77	1,561	0,131	1,52 E+07
Août	0,16	9,61	0,79	1,538	0,126	1,93 E+07
Septembre	0,16	9,89	0,79	1,582	0,126	2,33 E+07
Octobre	0,15	10,20	0,80	1,530	0,120	2,82 E+07
Novembre	0,15	10,27	0,80	1,540	0,120	2,01 E+07
Décembre	0,16	10,03	0,80	1,506	0,128	2,92 E+07

Tableau D3: Calcul des caractéristiques et de la puissance utile délivrée à la sortie des insolateurs à eau pour tous les mois de l'année. ($S_c = 30^\circ$. région: Adrar).

Mois	FR	U_L	$\tau\alpha$	$F_R U_L$	$F_R \tau\alpha$	Q_u (J)
Janvier	0,16	9,87	0,80	1,579	0,128	2,87 E+07
Février	0,16	9,85	0,80	1,576	0,128	2,88 E+07
Mars	0,16	9,85	0,80	1,576	0,128	2,88 E+07
Avril	0,16	9,62	0,79	1,539	0,126	2,34 E+07
Mai	0,17	9,15	0,77	1,555	0,131	1,76 E+07
Juin	0,18	9,79	0,75	1,582	0,135	1,37 E+07
Juillet	0,17	9,93	0,76	1,518	0,129	1,41 E+07
Août	0,17	9,43	0,78	1,603	0,133	1,87 E+07
Septembre	0,16	9,78	0,80	1,565	0,128	2,34 E+07
Octobre	0,16	10,11	0,80	1,618	0,128	2,87 E+07
Novembre	0,15	10,18	0,80	1,527	0,120	2,07 E+07
Décembre	0,16	9,96	0,80	1,594	0,128	2,99E+07

Tableau D4: Calcul des caractéristiques et de la puissance utile délivrée à la sortie des insolateurs à eau pour tous les mois de l'année. ($S_c = 40^\circ$. région: Adrar).

Résumé :

L'auteur étudie un système solaire de préparation de la marjolaine ; il commence d'abord par la simulation du gisement solaire d'Adrar, la région la plus connue par le séchage des plantes aromatiques et médicinales en Algérie. Ensuite, il détermine les paramètres de séchage de la plante par une modélisation de l'activité de l'eau et les isothermes de sorption et de désorption, pour arriver à la fin à se servir des résultats obtenus dans la suite du travail. Il décrit ce système composé d'un insolateur à eau, d'un échangeur eau/eau, d'une cuve de stockage d'eau chaude munie d'un appoint conventionnel auxiliaire, d'un aérotherme eau/air et d'une armoire de séchage munie d'un appoint conventionnel auxiliaire et propose un modèle mathématique représentatif incluant un modèle de rayonnement solaire, de collecteur d'énergie solaire, de stockage de la chaleur, du séchoir et un modèle économique. D'une part, il discrétise et présente une méthode de résolution des équations de fonctionnement et propose une méthode de dimensionnement du système et, d'autre part, il détermine les valeurs des paramètres et simule le système. Enfin, il élabore des abaques et des relations polynomiales de dimensionnement afin d'optimiser un système mixte de production d'eau chaude et d'air chaud pour le séchage de denrée agro-alimentaire parce que les performances des insolateurs à eau sont supérieures à celles des insolateurs à air.

Abstract :

The author examines a solar system for the preparation of marjoram and it starts with the simulation of the solar field of Adrar, the best region known by the drying of medicinal and aromatic plants in Algeria. Then, he determines the parameters of drying the plant by a model of the water activity and sorption isotherms and desorption, to use the results in further work.

It describes the system consisting of a sunstroke in water, a heat exchanger water / water, a bowl of hot water storage equipped with a conventional booster auxiliary heater with a water / air and a dryer equipped with a conventional auxiliary aids, and proposes a mathematical model including a representative model of solar radiation, solar collector, storing heat, the dryer and an economic model. He simulates this method of solving equations of operation and provides a method of sizing the system and, secondly, he determines the parameters and simulates the system. Finally, he prepares graphs and polynomial relations sizing to optimize a mix of hot water and hot air for drying food ; because the performance of sunstroke water are higher than those sunstroke air.

ملخص :

يتناول المؤلف في النظام الشمسي من أجل إعداد العترة ويبدأ مع محاكاة للحقل الطاقة الشمسية في منطقة ادرار المعروفة تجفيف النباتات الطبية والعطرية في الجزائر. ثم انه يحدد معالم تجفيف النبات بواسطة نموذج للنشاط المياه والأيسوثرم الامتصاص والامتزاز ، ليصل في نهاية لاستخدام النتائج في مزيد من العمل. فهو يصف النظام يتألف من ضربات الشمس في الماء ، والماء مبادل حراري / المياه ، وعاء من الماء الساخن تخزين مجهزة معززة التقليدية سخان المساعدة مع الماء / الهواء وعلى خزانة تجفيف مجهزة الإيدز مساعدة التقليدية ، ويقترح نموذج رياضي بما في ذلك نموذج ممثل للإشعاع الشمسي ، تجميع الطاقة الشمسية وتخزينها تحت درجة الطريقة في حل المعادلات من العملية وتوفر وسيلة لتحجيم النظام ، حرارة مجفف ونموذج اقتصادي. من ناحية ، و وثانيا ، فإنه يحدد معالم ومحاكاة النظام. وأخيرا ، تعد الرسوم البيانية والعلاقات متعدد الحدود التحجيم لتحسين مزيج الغذائية بسبب أداء ضربة شمس في الماء أعلى من من الماء الساخن والهواء الساخن لتجفيف المواد الغذائية المواد تلك ضربة شمس الهواء

Madame Amina BENHAMMOU