

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1 (U.S.D.B.1)



FACULTE DE TECHNOLOGIE



DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER
en Génie Mécanique

Option : Energies Renouvelables

Thème

Effet de l'orientation et des propriétés optiques
des matériaux sur la transmittivité d'un vitrage
à enveloppe cylindrique

Présenté par :

BENZIANI MUSTAPHA RAZIK

Soutenu le : 22 Juin 2015

Devant le jury :

Pr. D.SEMMAR.....	Président
Dr. K.NEHAL	Examineur
Mr. D.LAFRI	Examineur
Pr. M.MERZOUK.....	Promoteur

Table des Matières

Nomenclature	3
Table des figures	4
Introduction générale	6
1 Etude bibliographique	8
Introduction	8
1.1 Définitions et concepts	8
1.1.1 Repérage de la position du soleil.....	8
a. Définitions	8
b. Le temps solaire	9
1.1.2 Eclairement solaire extra-terrestre.....	10
a. Constante solaire	10
b. Correction due à la variation de la distance terre-soleil	10
1.1.3 Mesure de l'éclairement solaire sur terre	11
a. L'éclairement solaire reçu au sol.....	11
b. Coefficients de conversion géométrique R_b et R_d	12
c. Mesure de l'éclairement solaire	12
1.1.4 Propriétés optiques des milieux transparents	13
a. Atténuation du rayonnement solaire.....	13
b. Masse d'air optique.....	13
c. Atténuation due aux propriétés des matériaux transparents.....	14
1.2 Etat de l'art	15
1.2.1 Rayonnement transmis par un couvert transparent.....	15
a. Rayonnement transmis par un couvert plan.....	16
<i>Rayonnement direct</i>	16
<i>Rayonnement diffus</i>	17
b. Rayonnement transmis par un couvert cylindrique	17
<i>Rayonnement direct</i>	18
<i>Rayonnement diffus</i>	20
1.2.2 Rendement optique.....	20
a. Eclairement solaire incident sur un plan incliné	20
b. Produit effectif $(\tau\alpha)_e$	21
c. Eclairement solaire absorbé.....	22
1.2.3 Eclairement solaire (modèles)	22
a. Modèle de Hottel, Liu et Jordan.....	22
b. Modèle de Perrin de Brichambaut	23
c. Modèle de Capderou simplifié	23
1.3 Position du problème	24
Conclusion	24
2 Modélisation	25
Introduction	25
2.1 Repérage de la position du soleil	25
2.2 Estimation de l'éclairement solaire sur un plan incliné	27
2.3 Estimation de la transmittivité moyenne pour l'éclairement direct	27
2.4 Estimation de la transmittivité moyenne pour l'éclairement diffus	29
2.5 Calcul du rendement optique	29
2.6 Organigramme du programme	30
Conclusion	31

3 Résultats et discussions	32
Introduction	32
3.1 Validation des résultats.....	32
3.2 Eclairage solaire.....	35
3.3 Effet de l'orientation (Montage)	36
3.3.1 Effet de la déviation azimutale	36
3.3.2 Effet de l'inclinaison.....	38
3.3.3 Montage adapté aux saisons.....	40
3.3.4 Discussion des résultats de l'effet du montage	43
3.4 Effet des propriétés optiques du vitrage	44
3.4.1 Effet de l'indice du milieu	44
3.4.2 Effet du coefficient d'extinction	46
3.4.3 Matériaux transparents usuels.....	47
3.5 Etude annuelle de transmittivité moyenne et du rendement optique	49
3.6 Effet de la latitude	51
3.7 Effet de l'absorptivité de l'absorbeur	52
Conclusion.....	54
Conclusion générale et Perspectives	55
Conclusion.....	55
Perspectives	56
Annexe 1	57
Annexe 2	64
Références.....	66

Nomenclature

D : Diamètre du vitrage.....	m
D_j : Durée d'ensoleillement.....	Heures
E : Energie solaire.....	W
ET : Equation du temps.....	Minutes
F : Facteur de forme, Rapport de l'éclairement diffus sur le direct.	
I : Eclairement solaire.....	W/m²
L : Longueur du cylindre.....	m
L_i : Longitude.....	Degrés
R : Coefficient de conversion géométrique.	
TL : Temps local.....	Heures
TSV : Temps solaire vrai.....	Heures
Z : Altitude du lieu.....	Km

e : Epaisseur du vitrage.....	m
h : Hauteur du soleil.....	Degrés
j : Nombre du jour.	
k : Coefficient d'extinction.....	m⁻¹
l : Chemin optique.....	m
m : Masse d'air optique.	
n : Indice du milieu.	
r : Réflexion du rayonnement solaire.	
w : Largeur de l'absorbeur.....	m

(Lettres grecques)

α : Azimut solaire, Réflectivité globale.....	Degrés
β : Inclinaison du capteur.....	Degrés
β' : Inclinaison de l'absorbeur.....	Degrés
γ : Déviation azimutale.....	Degrés
δ : Déclinaison solaire.....	Degrés
η₀ : Rendement optique.	
θ : Angle d'incidence.....	Degrés
ρ : Absorptivité globale.	
ρ_s : Albédo.	
τ : Transmittivité globale.	
τ̄ : Transmittivité moyenne.	
τα : Extinction du signal.	
ψ : Angle d'intégration.....	Degrés
ω : Angle horaire.....	Degrés
ξ, η : Projections de l'angle d'incidence.....	Degrés

(Indices)

b, d et g : Pour le direct, diffus et global respectivement.	
n : Normal.	
h : Horizontal.	
z : zénith.	
r : Réflichi.	
e : Equivalent, Effectif	
a : Désigne l'absorbeur.	
β : Incliné.	
 et ⊥ : Parallèle et perpendiculaire respectivement.	

Table des figures

Figure 1.1. L'azimut et la hauteur du soleil.....	9
Figure 1.2. Variation de l'éclairement extra-terrestre durant l'année.....	11
Figure 1.3. Eclairement direct sur une surface inclinée et horizontale.....	12
Figure 1.4. Réfraction du flux lumineux (loi de Snell).....	14
Figure 1.5. Multi réflexions-transmissions d'un milieu non absorbant.....	16
Figure 1.6. Multi réflexions-transmissions d'un couvert cylindrique.....	17
Figure 1.7. Chemin optique	18
Figure 1.8. Rotation reliant les repères liés à la terre et à un capteur tubulaire exposé au rayonnement solaire.	19
Figure 1.9. Multi réflexion d'un vitrage.	21
Figure 2.1. Organigramme du programme de simulation.....	30
Figure 3.1. Transmittivité moyenne en fonction du temps solaire, du type du capteur et de l'orientation.	33
Figure 3.4. Transmittivité moyenne en fonction du rapport w/D et la hauteur du soleil (Merzouk, 2014).	34
Figure 3.5. Transmittivité moyenne en fonction du rapport w/D et la hauteur du soleil.	34
Figure 3.7. Transmittivité moyenne en fonction de l'inclinaison et le rapport w/D pour l'éclairement diffus.....	35
Figure 3.8. comparaison entre l'éclairement solaire mesuré et l'éclairement selon le modèle de Brichambaut et de Capderou et les données du CDER.	36
Figure 3.10. Evolution du rendement optique à azimut nul en fonction de la déviation azimutale pour les deux solstices et l'équinoxe du printemps.....	37
Figure 3.11. Evolution de la transmittivité moyenne à azimut nul en fonction de l'inclinaison pour les deux solstices et l'équinoxe du printemps.	38
Figure 3.12. Evolution du rendement optique à azimut nul en fonction de l'inclinaison pour les deux solstices et l'équinoxe du printemps.	39
Figure 3.13. Transmittivité moyenne en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Mars.	40
Figure 3.14. Rendement optique en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Mars.	41
Figure 3.15. Transmittivité moyenne en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Juin.....	41
Figure 3.16. Rendement optique en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Juin.....	42
Figure 3.17. Transmittivité moyenne en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Décembre.....	42
Figure 3.18. Rendement optique en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Décembre.	43

Figure 3.19. Transmittivité moyenne en fonction de l'indice du milieu et le temps solaire.....	45
Figure 3.20. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction de l'indice de milieu pour le 21 Juin.....	45
Figure 3.21. Evolution du rendement optique en fonction de l'indice de milieu pour le 21 Juin.....	46
Figure 3.22. Transmittivité moyenne en fonction du coefficient d'extinction et le temps solaire pour le 21 Juin.	46
Figure 3.23. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction du coefficient d'extinction pour le 21 Juin.	47
Figure 3.24. Evolution du rendement optique en fonction du coefficient d'extinction pour le 21 juin.....	47
Figure 3.25. Transmittivité moyenne en fonction du type du matériau et le temps solaire pour le 21 Juin.	48
Figure 3.26. Rendement optique en fonction du type du matériau et le temps solaire pour le 21 Juin.....	48
Figure 3.27. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction des jours, de l'inclinaison et de la déviation azimutale à azimut nul.....	49
Figure 3.28. Evolution du rendement optique en fonction des jours, de l'inclinaison et de la déviation azimutale à azimut nul.....	50
Figure 3.29. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction de la latitude.....	51
Figure 3.30. Evolution du rendement optique en fonction de la latitude.....	52
Figure 3.31. Evolution du rendement optique en fonction de l'absorptivité de l'absorbeur pour le 21 Mars.....	53
Figure 3.32. Rendement optique en fonction du type du matériau et du temps solaire.....	53

Introduction générale

Avec la découverte du pétrole et le développement spectaculaire, à partir du dernier siècle, du champ de son utilisation, le pétrole est devenu rapidement un produit indispensable et primordial pour le développement industriel des pays. L'homme s'est acharné sur cette ressource fossile et a élargi son utilisation pour toucher pratiquement tous les domaines : l'énergie, l'industrie, l'agriculture et même domestique. Devenu très précieux et très difficile à atteindre après épuisement de la surface et des profondeurs raisonnables, l'homme a continué son acharnement et a développé des moyens de plus en plus précis et de hautes technologies pour extraire le pétrole.

La quête sans fin vers le développement économique et industriel, qui est une course interminable, n'a pas laissé de temps pour se soucier de la quantité astronomique de l'or noir épuisée et a poussé ses consommateurs à déverser ses déchets, extrêmement toxiques, en pleine nature.

Le lien magique entre les différents composants de la vie sur terre commence à se rompre qui se traduit par l'extinction de beaucoup d'espèces vivantes, l'épuisement d'eau douce, la désertification et le réchauffement climatique.

L'intérêt d'extraire l'énergie de sources renouvelables pour des fins industrielles, a grandi et s'est étendu à partir de la seconde moitié du dernier siècle, et pour des raisons économiques, politiques et écologiques, le développement théorique et expérimental des moyens de convertir cette énergie de sa source, a nettement augmenté et propose maintenant des rendements très acceptables. Le gisement solaire est l'une des sources qui suscite un intérêt majeur grâce à son énorme potentiel énergétique.

Les études optiques sur les capteurs solaires, ont porté majoritairement sur le capteur plan. Ce n'est que dans la fin des années 1970 que l'intérêt pour les vitrages cylindriques s'est manifesté avec l'introduction de la notion de la transmittivité moyenne par [Felske, 1979], son travail s'est arrêté sur un couvert cylindrique avec un absorbeur du même diamètre et pour l'éclairage direct uniquement.

Cette étude sera étendue pour l'éclairage diffus par [Theunisen et Beckman, 1985].

À partir des années 1970 (après les crises pétrolières de 73 et 79), les études sur l'énergie solaire, se sont multipliées, également en ce qui concerne le capteur solaire à couvert cylindrique, ou la transmittivité moyenne a été exprimée en fonction de l'angle d'incidence des rayons directs par [Bayazitoglu et al, 1980], [Mcintire, 1982] [Herrick, 1982].

Aussi, des travaux portés sur le rendement optique des enveloppes cylindriques ont été réalisés par [Window et Bassett, 1981], [Window et Zybert, 1981], [Saltiel et Sokolov, 1982], [Chow, 1985] et [Merzouk, 1986, 1987], et sur les effets des paramètres géométriques du couvert cylindrique et de l'absorbeur [Merzouk, 2003, 2014].

Le premier chapitre de ce travail sera dédié à l'étude bibliographique ou on fait le point sur les phénomènes physiques qui interviennent dans la transmission d'un rayon solaire dans une enveloppe cylindrique, et avec des définitions proposées par la littérature, on abordera le gisement solaire avec le repérage de la position du soleil, l'éclairement solaire direct et diffus incident sur un plan horizontal et incliné, les modèles empiriques qui permettent le calcul de l'éclairement solaire, et également les propriétés optiques d'un vitrage dont la transmittivité, réflectivité et absorptivité.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation ou on détermine la position du soleil et on estime l'éclairement solaire adapté à la position géographique, la transmittivité moyenne et le rendement optique.

Le troisième et dernier chapitre sera consacré à la présentation des résultats obtenus et l'interprétation de ces derniers. La transmittivité moyenne et le rendement optique serviront comme performances références qui nous permettront d'établir des comparaisons pour les différents paramètres théoriques.

1 Etude bibliographique

Introduction

Les premières études sur la transmittivité d'une enveloppe cylindrique n'ont vu le jour qu'à la fin des années 1970 avec l'apparition du modèle de J.D. Felske qui permet d'avoir une transmittivité moyenne en tenant compte de l'angle d'incidence qui est fonction du point d'impact du rayon solaire. Cette transmittivité sera obtenue par intégration sur la courbure de l'enveloppe cylindrique.

Pour l'éclairement diffus ciel et sol, le travail sera accompli par Theunissen et Beckman.

M. Merzouk a repris le travail pour différents rapports w/D et pour différentes possibilités de montage.

Dans la première partie de ce chapitre, on se focalisera sur l'essentiel de ce que la littérature nous propose en relation avec notre sujet d'étude, on abordera ainsi quelques données sur le soleil, le repérage de la position apparente du soleil, l'éclairement solaire direct et diffus sur un plan horizontal et incliné, les modèles empiriques pour l'estimation de l'éclairement et finalement les propriétés optiques d'un milieu transparent.

Dans la deuxième partie, nous aborderons les problèmes de l'étude et on précisera les hypothèses qui délimitent le champ d'application de notre travail et ses limites.

1.1 Définitions et concepts

1.1.1 Repérage de la position du soleil

Pour pouvoir déterminer la position du soleil, il faudrait tout d'abord donner à chaque point de la terre, des coordonnées.

a. Définitions

Les coordonnées permettant la localisation de la position du soleil par rapport à un point de la terre sont définies dans la littérature comme suit, [1, 2, 3] :

φ Latitude : localisation angulaire du nord ou du sud de l'équateur, $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$.

L Longitude : localisation angulaire de l'est ou l'ouest de la longitude référence.

$$-180^\circ \leq L \leq 180^\circ.$$

δ Déclinaison : la position angulaire du soleil à midi solaire vrai par rapport au plan de l'équateur. $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

β Inclinaison : l'angle entre le plan de la surface en question et l'horizontale.

$$0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ. (\beta = 90^\circ \implies \text{surface horizontale}).$$

h Hauteur du soleil : l'angle entre le plan horizontal et la direction du soleil.

a Angle d'azimut : l'écart entre la projection du soleil sur un plan horizontal et la direction sud, avec zéro plein sud, à l'est négative, et positif ouest.

Y Déviation azimutale : l'écart entre la projection de la perpendiculaire de la surface en question, et la direction sud. $-180^\circ \leq Y \leq 180^\circ$.

θ Angle d'incidence : l'angle formé par l'éclairement direct sur une surface, et la normale à cette surface.

ω Angle horaire : le déplacement angulaire du soleil de l'Est à l'Ouest du à la rotation de terre sur son axe (15° par heure).

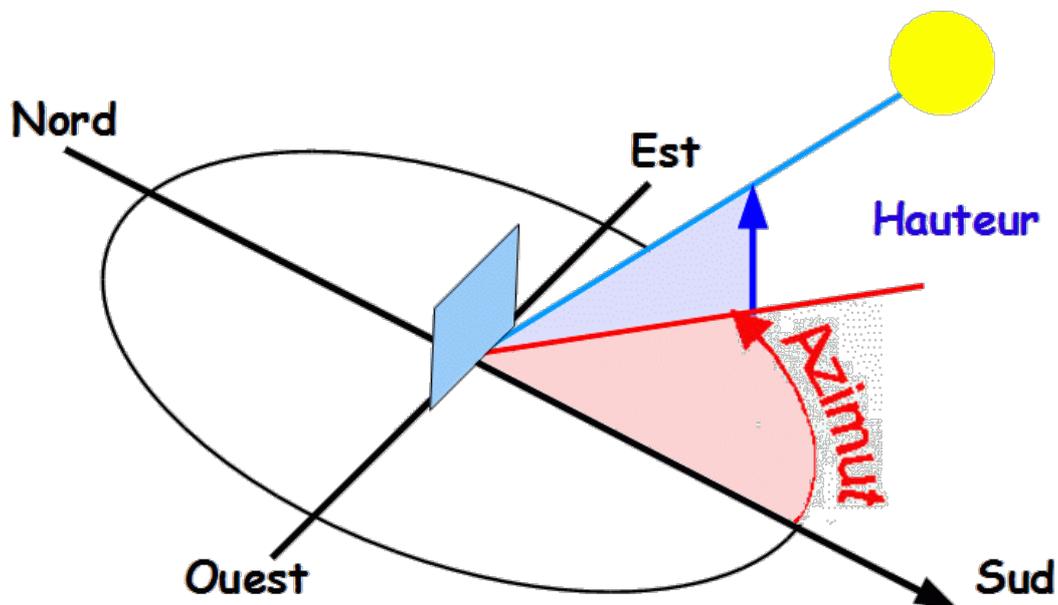


Figure 1.1. L'azimut et la hauteur du soleil

b. Le temps solaire

Temps basé sur la position apparente du soleil par rapport à un observateur au sol. La différence entre le temps solaire et le temps local est donnée par la relation suivante :

$$TSV = TL + 4(L_{reference} - L_{local}) + E_T \quad (1.1)$$

Ou :

$L_{Référence}$: La longitude de référence (Greenwich).

L_{Local} : La longitude du lieu.

E_T : L'équation du temps, est donnée par la formule suivante, [1] :

$$E_T = 229.9 [0.000075 + 0.001868 \cos(x) + 0.033 \sin(x) - 0.014615 \cos(2x) - 0.04089 \sin(2x)] \quad (1.2)$$

Avec :

$$x = \frac{360(j - 1)}{365} \quad (1.3)$$

1.1.2 Eclairage solaire extra-terrestre

Le soleil, l'étoile la plus proche de notre planète, source de lumière et de chaleur.

L'énergie émise par le soleil est sous forme de lumière traversant l'espace pour atteindre la terre.

Le soleil possède les caractéristiques physiques suivantes :

- Un diamètre de $1,39 \cdot 10^9$ m
- Une masse de $1,989 \cdot 10^{33}$ g
- Une température moyenne du noyau de $8 \cdot 10^6$ à $40 \cdot 10^6$ K
- Une température moyenne apparente de 5777 K.
- La distance séparant la terre du soleil est de $1,495 \cdot 10^{11}$ m (+/- 1.7%).
- L'énergie au centre du soleil est estimée à $3,83 \cdot 10^{20}$ MW, la fraction énergétique reçue par la terre est de $22 \cdot 10^{-6}$.

a. Constante solaire

C'est la valeur moyenne de l'éclairage solaire annuel reçu par une surface qui vaut l'unité, perpendiculaire à la direction du soleil et hors atmosphère [1].

$$I_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad [1981]$$

b. Correction due à la variation de la distance terre-soleil

En fonction de la distance variante entre la terre et le soleil, l'éclairage solaire hors atmosphère présente une variation annuelle de l'ordre de $\pm 3.3\%$, [1], comme l'indique la figure 1.2.

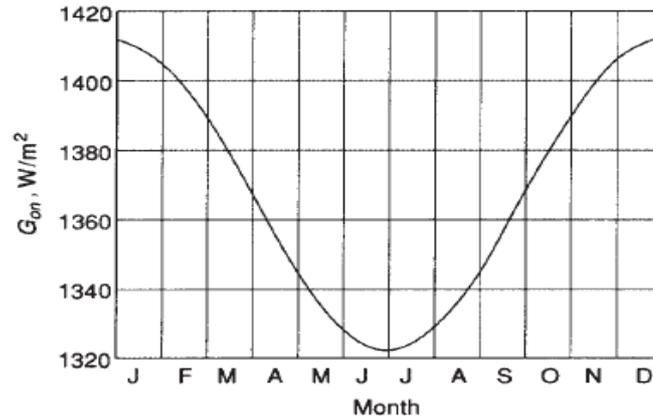


Figure 1.2. Variation de l'éclairement extra-terrestre durant l'année.

Cette variation peut s'écrire [1], sous cette forme :

$$I_0 = I_{cs} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360j}{365}\right) \right] \quad (1.4)$$

j : Nombre de jour de l'année

Par convention, la variation de l'éclairement extra-terrestre peut être négligée et prise en tant que constante [1].

1.1.3 Mesure de l'éclairement solaire sur terre

a. L'éclairement solaire reçu au sol

L'éclairement solaire est reçu sur terre sous deux composantes :

- Une composante directe I_b : Atteint la terre depuis le soleil sans perturbation de la trajectoire (arrive directement du soleil), [1-3].
- Une composante diffuse I_d : Atteint la terre après perturbation de la trajectoire (arrive souvent d'une autre direction que celle du soleil).

Les éléments produisant cette variation de trajectoire sont :

- La couronne du soleil qui présente une géométrie variable.
- L'absorption et l'émission des gaz et liquides de l'atmosphère.
- La multi-réflexion des particules solides.

L'éclairement global reçu sur terre est la somme des deux composantes [1-3].

$$I_g = I_b + I_d \quad (1.5)$$

Généralement, on considère deux sources de l'éclairement diffus :

- Le diffus qui provient du ciel.
- Le diffus qui provient du sol après réflexion (Albédo).

b. Coefficients de conversion géométrique R_b et R_d

Le rapport du rayonnement direct sur une surface inclinée sur celui sur une surface horizontale peut être calculé à tout moment par la relation suivante :

$$R_b = \frac{I_{bn}}{I_{bh}} = \frac{I_{bn} \cos(\theta)}{I_{bn} \sin(h)} = \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} \quad (1.6)$$

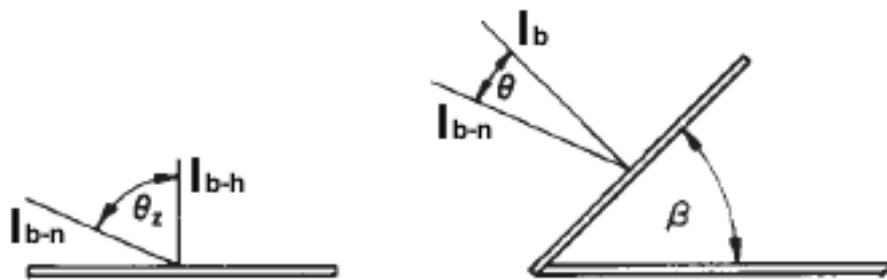


Figure 1.3. Eclairement direct sur une surface inclinée et horizontale

R_b est un coefficient de conversion géométrique appliqué pour le rayonnement direct.

Pour le diffus, on applique le coefficient R_d . (tant que l'on considère l'éclairement diffus comme isotrope, R_d vaut l'unité).

c. Mesure de l'éclairement solaire

Les mesures de l'éclairement se font au niveau des stations radiométriques, elles ont recours à différents instruments de mesure :

- Pour la mesure de l'éclairement global :
On utilise un pyranomètre (série de thermopiles) ou bien un fluxmètre.
Le fluxmètre est beaucoup plus utilisé dans les laboratoires à cause de sa sensibilité au spectre lumineux.

- Pour la mesure de l'éclairement diffus :
Cette mesure nécessite un pyranomètre et une occultation. Le principe est de cacher l'instrument du soleil de telle sorte qu'il ne laisse passer que l'éclairement diffus. Cette Occultation peut se faire d'une manière manuelle ou bien automatique.
- Pour la mesure de l'éclairement direct :
Cette mesure nécessite un pyranomètre et un tube directionnel. Le principe est de capter uniquement l'éclairement direct tout en bloquant ce qui est diffus, le tube doit suivre la direction du soleil. Cet instrument est appelé Pyrhéliomètre.

Pour mesurer la durée d'ensoleillement, on utilise un héliographe.

1.1.4 Propriétés optiques des milieux transparents

a. Atténuation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire reçu sur la surface terrestre fait l'objet de multiples changements, à cause de la variation de l'éclairement extraterrestre d'une part, et d'autres phénomènes plus significatifs d'autre part.

Le premier phénomène réside dans la diffusion atmosphérique par les molécules d'air, d'eau et des particules en suspension.

Le second phénomène implique l'absorption atmosphérique, par l'ozone, l'eau et le dioxyde de carbone.

b. Masse d'air optique

C'est le rayonnement solaire qui passe à travers l'atmosphère par rapport à celui qui passe si le soleil se trouve au zénith. [1].

Une approximation de la masse d'air optique est donnée par la relation suivante pour des angles θ_z variant de 0° à 70° au niveau de la mer :

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)} = \frac{1}{\sin(h)} \quad (1.7)$$

Avec :

θ_z : Angle d'incidence pour une surface horizontale ($\cos(\theta_z)=\sin(h)$).

Pour des angles θ_z supérieurs, la courbure et la rotation de la Terre deviennent significatives et doivent être prises en considération.

Kasten et Young (1989) donnent la relation suivante pour des angles θ_z proches de 90° :

$$m = \frac{\exp(-0.0001184h)}{\cos(\theta_z) + 0.5057(96.080 - \theta_z)^{-1.634}} \quad (1.8)$$

c. Atténuation due aux propriétés des matériaux transparents

Les propriétés optiques (transmittivité, réflectivité et absorptivité) au rayonnement solaire par un matériau transparent sont fonction de l'indice de milieu (\mathbf{n}) et du coefficient d'extinction (\mathbf{k}).

Dans la suite, on supposera que l'indice de milieu (\mathbf{n}) et le coefficient d'extinction (\mathbf{k}) sont indépendants de la longueur d'onde (λ).

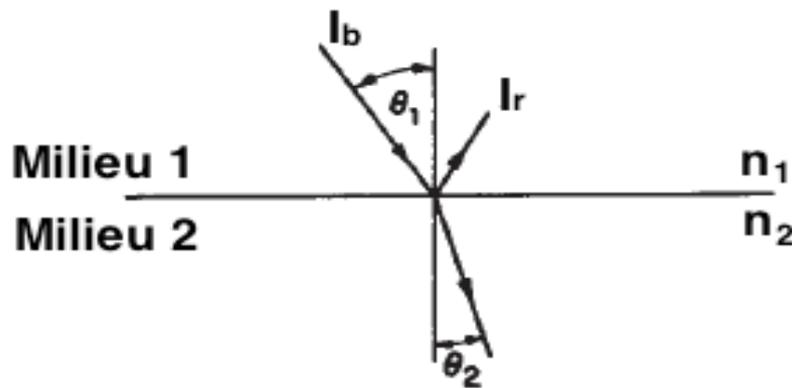


Figure 1.4. Réfraction du flux lumineux (loi de Snell).

Loi de Snell :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (1.9)$$

Avec :

I_b : Eclairage solaire direct

I_r : Eclairage solaire réfléchi

n_1 : Indice du milieu 1

n_2 : Indice du milieu 2

θ_1 : Angle d'incidence dans le milieu 1

θ_2 : Angle d'incidence dans le milieu 2

Fresnel a déterminé l'expression du coefficient de réflexion du rayonnement solaire direct non polarisé depuis un milieu 1 avec un indice n_1 , jusqu'à un milieu 2 avec un indice n_2 en considérant les deux composantes de l'onde électromagnétique.

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (1.10)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (1.11)$$

Et :

$$r = \frac{I_r}{I_h} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \quad (1.12)$$

L'extinction du signal (τ_a) est donnée par la loi de Lambert-Bouguer :

$$\tau_a = \exp\left(\frac{-kl}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (1.13)$$

Avec :

l : chemin optique parcouru par les rayons à travers le couvert.

θ_2 : Angle déterminé par la loi de Snell.

1.2 Etat de l'art

1.2.1 Rayonnement transmis par un couvert transparent

Le couvert transparent présente trois propriétés optiques qui influent sur l'intensité et la direction du rayonnement solaire, ces propriétés sont :

La transmittivité (τ_{\perp}) : c'est la fraction du rayonnement solaire qui traverse le milieu en question.

La réflectivité (ρ_{\perp}) : c'est la fraction du rayonnement solaire qui ne traverse pas le couvert et qui sera réfléchi vers une autre direction avec le même angle d'incidence. (Loi de Descartes).

L'absorptivité (α_{\perp}) : c'est la fraction du rayonnement solaire qui sera absorbée par le matériau en question.

a. Rayonnement transmis par un couvert plan

Rayonnement direct

La composante directe du rayonnement solaire qui arrive sur le couvert du capteur subit les trois propriétés optiques (transmissivité, réflectivité et absorptivité). La fraction transmise subit également les mêmes propriétés en quittant le couvert pour atteindre l'intérieur du capteur [1].

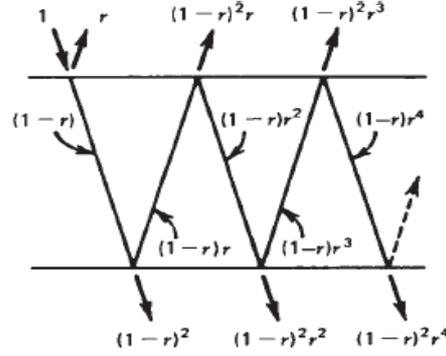


Figure 1.5. Multi réflexions-transmissions d'un milieu non absorbant

Fresnel a pris en considération la réflexion et la transmission du rayonnement direct et propose les équations suivantes : [1]

La composante perpendiculaire de la transmissivité est donnée par :

$$\tau_{\perp} = \tau_a \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \frac{1 - r_{\perp}^2}{1 - (\tau_a r_{\perp})^2} = \frac{\tau_a (1 - r_{\perp})^2}{1 - (\tau_a r_{\perp})^2} \quad (1.14)$$

La composante perpendiculaire de la réflectivité est donnée par :

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} + r_{\perp} \frac{\tau_a (1 - r_{\perp})^2}{1 - (\tau_a r_{\perp})^2} = r_{\perp} (1 + \tau_a r_{\perp}) \quad (1.15)$$

La composante perpendiculaire de l'absorptivité est donnée par :

$$\alpha_{\perp} = (1 - \tau_a) \frac{1 - r_{\perp}}{1 - \tau_a r_{\perp}} \quad (1.16)$$

Les composantes parallèles de la transmissivité (τ_{\parallel}), l'absorptivité (α_{\parallel}) et la réflectivité (ρ_{\parallel}) sont décrites par des expressions du même type que celles des composantes perpendiculaires.

Les transmittivité (τ), absorptivité (α) et réflectivité (ρ) du milieu considéré sont données par les demi-sommes des composantes parallèle et perpendiculaire [1], telque :

$$\tau = (r_{\perp} + r_{\parallel})/2 \quad (1.17)$$

Rayonnement diffus

Pour le rayonnement solaire diffus (ciel et sol), on fait appel à la notion de l'angle d'incidence équivalent (θ_e), c'est un angle qui est appliqué au direct et qui donne un résultat similaire à celui de l'intégration du diffus.

Angle équivalent pour le diffus sol : [1]

$$\theta_{e-sol} = 90 - 0.05788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (1.18)$$

Angle équivalent pour le diffus ciel : [1]

$$\theta_{e-ciel} = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (1.19)$$

Où β est l'inclinaison du capteur en degrés

b. Rayonnement transmis par un couvert cylindrique

Considérant que l'angle d'incidence est dépendant du point d'impact et de l'orientation du cylindre, la méthode de détermination de la transmittivité diffère de celle du couvert plan, d'où l'introduction de la notion de la transmittivité moyenne par J.D Felske (1979).

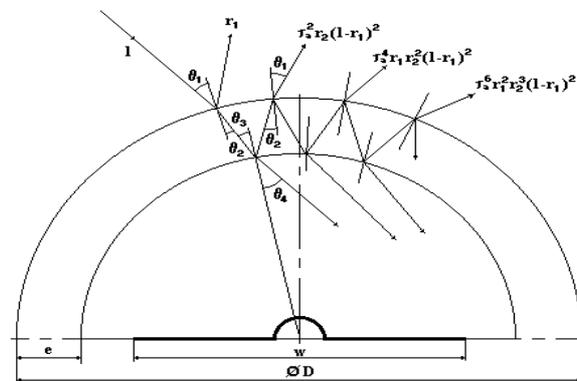


Figure 1.6. Multi réflexions-transmissions d'un couvert cylindrique

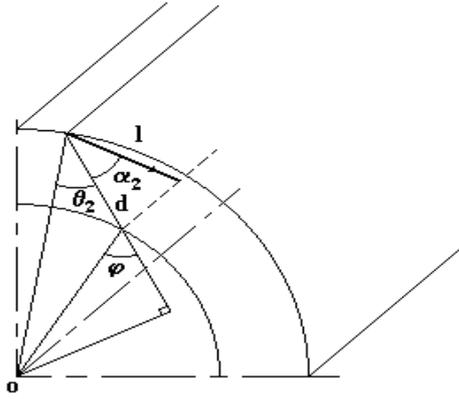


Figure 1.7. Chemin optique

'd' étant la composante du chemin optique dans le plan de la section droite du couvert tubulaire, les équations de la transmittivité (τ_{\perp}), l'absorptivité (α_{\perp}) et la réflectivité (ρ_{\perp}) issues des travaux de Fresnel sont maintenues.

l , le chemin optique est obtenu par la relation suivante : [7,8].

$$l = \frac{d}{\cos(\alpha_2)} \quad (1.20)$$

Avec :

$$d = \frac{D}{2} \left[\cos(\theta_2) - \left(1 - \frac{2e}{D}\right) \cos\left(\arcsin\left(\frac{\sin(\theta_2)}{1 - \frac{2e}{D}}\right)\right) \right] \quad (1.21)$$

D : diamètre du couvert.

(α_2) : angle qui représente la projection sur le plan axial.

Rayonnement direct

On considère un couvert cylindrique incliné par rapport à l'horizontale d'un angle (β) et orienté vers le sud avec une déviation azimutale (Υ), muni d'un absorbeur dont l'inclinaison (β'), comme l'indique la figure [4,7,8].

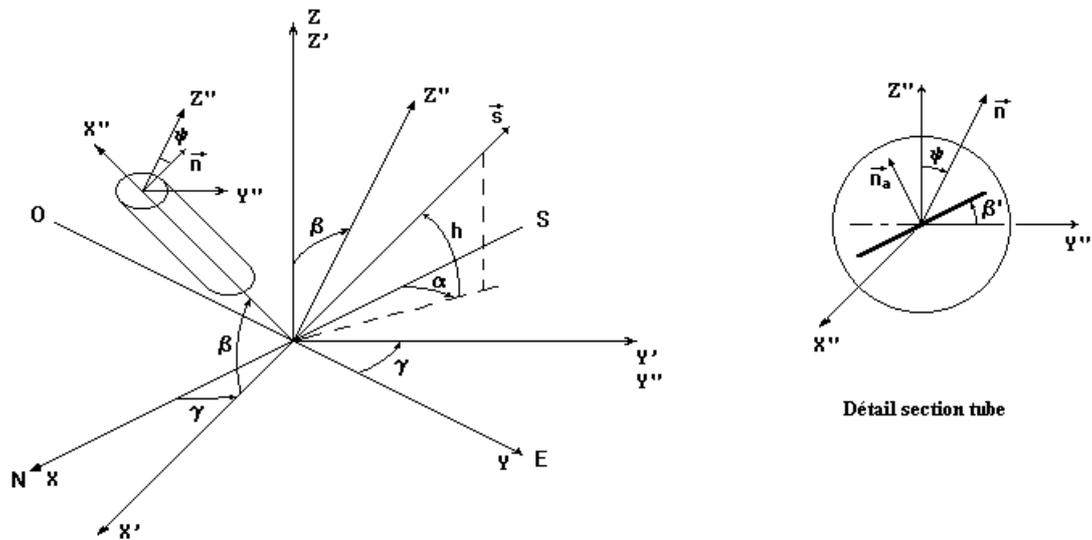


Figure 1.8. Rotation reliant les repères liés à la terre et à un capteur tubulaire exposé au rayonnement solaire.

L'énergie transmise par un élément du vitrage est définie par la surface de cet élément, l'éclairement reçu sur un plan horizontal et l'angle d'incidence. L'éclairement transmis par l'élément $d\psi$ dans ce cas est donné par :

$$dE = L \left(\frac{D}{2} \right) I_h \tau(\theta) \cos(\theta) d\psi \quad (1.22)$$

L'éclairement que recevrait un élément dw de l'absorbeur, en l'absence du couvert est donné par :

$$dE = L I_h \cos(\theta_a) dw \quad (1.23)$$

Avec :

L : longueur de l'absorbeur.

τ : Transmittivité totale.

La transmittivité moyenne est définie comme le rapport de l'énergie transmise par le couvert à l'énergie reçu par l'absorbeur en l'absence du couvert, et donc elle sera donnée par, [4,7,8] :

$$\bar{\tau}(\theta) = \frac{1}{E_l} \int_{\psi_1}^{\psi_2} dE = \frac{1}{L w I_h \cos(\theta)} \int_{\psi_1}^{\psi_2} L \frac{D}{2} I_h \tau(\theta) \cos(\theta) d\psi \quad (1.24)$$

Rayonnement diffus

Pour le rayonnement diffus, l'équation (1.24) devient : [7,8]

$$\bar{\tau}(\theta) = \frac{\iint_{\psi_1}^{\psi_2} dE}{\int_{\Omega} dE_t} = \frac{\iint_{\psi_1}^{\psi_2} LD I_d \tau(\theta) \cos(\theta) d\Omega d\psi}{\int_{\Omega} LI_d \cos(\theta_a) d\Omega d\psi} \quad (1.25)$$

Ou :

$$\bar{\tau}(\theta) = \frac{\iiint_{\Delta a \Delta h \psi_1}^{\psi_2} LD I_d \tau(\theta) \cos(\theta) \cos(h) da dh d\psi}{\iint_{\Delta a \Delta h} LI_d \cos(\theta_a) \cos(h) da dh d\psi} \quad (1.26)$$

Ou encore :

$$\begin{aligned} \bar{\tau}(\theta) = & \\ & \frac{D \int_0^{2\pi} \int_{h_m}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \tau(\xi, \eta) \cos^2(h) \sin(\alpha + \gamma) \sin(\psi) d\alpha dh d\psi}{\omega \int_0^{2\pi} \int_{h_m}^{\frac{\pi}{2}} \cos(h) [\sin(\beta) \cos(h) \cos(\alpha + \gamma) + \cos(\beta) \sin(h)] d\alpha dh} \\ & + \frac{D \int_0^{2\pi} \int_{h_m}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \tau(\xi, \eta) [\sin(\beta) \cos(h) \cos(\alpha + \gamma) + \cos(\beta) \sin(h)] \cos(h) \cos(\psi) d\alpha dh d\psi}{\omega \int_0^{2\pi} \int_{h_m}^{\frac{\pi}{2}} \cos(h) [\sin(\beta) \cos(h) \cos(\alpha + \gamma) + \cos(\beta) \sin(h)] d\alpha dh} \end{aligned} \quad (1.27)$$

Avec :

$$h_m = 0 \quad \text{Pour} \quad \alpha = \frac{-\pi}{2} \text{ à } \frac{\pi}{2} \quad (\text{face avant})$$

$$h_m = \beta \quad \text{Pour} \quad \alpha = \frac{\pi}{2} \text{ à } \frac{3\pi}{2} \quad (\text{face arriere})$$

1.2.2 Rendement optique

Le rendement optique est défini comme le rapport de l'éclairement transmis et absorbé à l'éclairement incident sur un plan incliné.

a. Eclairement solaire incident sur un plan incliné

L'éclairement solaire reçu sur une surface horizontale s'écrit comme suit :

$$I_g = I_b + I_{d\text{-ciel}} + I_{d\text{-sol}} \quad (1.28)$$

Et pour un plan incliné :

$$I_{\beta} = R_b I_b + F_{plan\text{-ciel}} R_d I_d + F_{plan\text{-sol}} I_g \rho_s \quad (1.29)$$

Avec :

F : Facteur de forme, tel que :

$$F_{plan-ciel} = \frac{[1 + \cos(\beta)]}{2} \quad (1.30)$$

$$F_{plan-sol} = \frac{[1 - \cos(\beta)]}{2} \quad (1.31)$$

ρ_s : albédo.

$R_d = 1$ (Éclairement diffus isotrope)

Donc, l'éclairement reçu sur un plan incliné s'écrit : **[1-3]**.

$$I_\beta = \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} I_b + \frac{1 + \cos(\beta)}{2} I_d + \frac{1 - \cos(\beta)}{2} I_g \rho_s \quad (1.32)$$

b. Produit effectif $(\tau\alpha)_e$

L'éclairement reçu et transmis par le couvert en verre, sera absorbé après multiples absorptions et réflexions, comme l'indique la figure suivante :

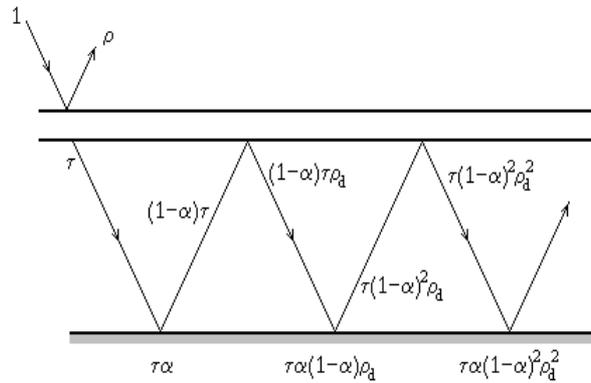


Figure 1.9. Multi réflexion d'un vitrage.

La sommation des quantités absorbées successivement est donnée par :

$$(\tau\alpha)_e = \tau\alpha \sum_{i=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^i \quad (1.33)$$

Série qui peut être ramenée à : **[1,7,8]**.

$$(\tau\alpha)_e = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (1.34)$$

Cette quantité doit être calculée pour les trois composantes de l'éclairement (direct, diffuse ciel et diffuse sol).

c. Eclairement solaire absorbé

Après avoir déterminé la quantité absorbée $(\tau\alpha)_e$, l'éclairement solaire absorbé s'écrit comme suit :

$$I_{abs} = \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} (\tau\alpha)_{e-b} I_b + \frac{1 + (\beta)}{2} (\tau\alpha)_{e-ciel} I_d + \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \rho_s (\tau\alpha)_{e-sol} I_g \quad (1.35)$$

Et donc, le rendement optique s'écrit par :

$$\eta_0 = \frac{I_{abs}}{I_\beta} \quad (1.36)$$

1.2.3 Eclairement solaire (modèles)

Il existe dans la littérature plusieurs modèles permettant l'estimation de l'éclairement solaire, nous avons affiné notre recherche pour ne proposer que les modèles qui donnent un résultat proche à la mesure de l'éclairement pour l'Algérie.

a. Modèle de Hottel, Liu et Jordan

L'estimation de l'éclairement solaire reçu sur un plan horizontal, s'écrit d'après Hottel par : [9]

$$I_{bh} = I_0 \sin(h) \tau_b \quad (1.37)$$

Avec :

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(-\frac{a_2}{\sin(h)}\right) \quad (1.38)$$

Les coefficients (a_0) , (a_1) et (a_2) ont été établis pour une visibilité de 23km et 5km tel que :

$$a_i = a + b(c - Z)^2, \quad i = 0,1,2$$

Z : Altitude du lieu (Km).

Pour l'éclairement diffus, Liu et Jordan proposent la relation suivante : [12]

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939\tau_b \quad (1.39)$$

Avec :

$$I_d = I_0 \tau_d$$

Visibilité	a ₀			a ₁			a ₂		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
23 km	0.424	-0.0082	6	0.5055	0.0059	6.5	0.271	0.0186	2.5
5 km	0.254	-0.0063	6	0.7678	0.001	6.5	0.249	0.081	2.5

Tableau1.1. Coefficients de Hottel.

b. Modèle de Perrin de Brichambaut

Perrin de Brichambaut propose les formules de l'éclairement solaires suivantes : [11]

L'éclairement direct (I_b) est donné par :

$$I_b = A \sin(h) \exp \left[- \left\{ C \cdot \sin \left(h + \frac{4\pi}{180} \right) \right\}^{-1} \right] \quad (1.40)$$

L'éclairement diffus (I_d) est donné par :

$$I_d = B [\sin(h)]^{0.4} \quad (1.41)$$

L'éclairement global (I_g) est donné par :

$$I_g = D [\sin(h)]^E \quad (1.42)$$

Les coefficients A, B, C, D et E dépendent de la qualité du ciel. Ils sont donnés dans le tableau suivant :

Ciel	A [W/m ²]	B [W/m ²]	C	D [W/m ²]	E
Très pur	1300	87	6	1150	1.15
Moyen	1230	125	4	1080	1.22
Pollué	1200	187	2.5	990	1.25

Tableau1.2. Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut.

c. Modèle de Capderou simplifié

Capderou estime que pour l'Algérie, la relation donnant le meilleur résultat est : [10]

$$I_g = 1080 \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot j}{365} \right) \right] \sin(h) \left[\frac{\sin(h)}{0.89Z} \right]^{0.22} \quad (1.43)$$

Z : Altitude du lieu (Km)

1.3 Position du problème

Un capteur solaire est un système soumis aux conditions environnantes. D'un point de vue optique, les performances de ce capteur sont fonction de l'éclairement solaire (direction et intensité), l'orientation du capteur et les propriétés optiques et géométriques des matériaux utilisés dans le capteur solaire.

L'étude de la direction et de l'intensité de l'éclairement solaire nécessite le repérage de la position du soleil tout au long de la journée et de l'année.

L'étude de l'impact de l'orientation du capteur sur ses performances optiques est également une fonction du temps journalier et du jour sur l'année. Cette étude sera établie à l'aide d'un programme sous MATLAB qui permet d'évaluer les performances sur tout le quart logique de la sphère qui entoure le capteur.

Une étude sera portée sur les effets du changement du matériau ou de ses caractéristiques géométriques pour évaluer et comparer les performances du capteur solaire.

Conclusion

Les principaux travaux réalisés auparavant nous ont fait part des méthodes permettant de comprendre et résoudre les phénomènes qui interviennent dans le passage des rayons solaire à travers le vitrage d'un capteur solaire.

L'étude bibliographique qui a été menée nous a permis de rapporter l'essentiel de ces méthodes pour la détermination de la transmittivité d'une enveloppe cylindrique.

2 Modélisation

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons en premier lieu sur l'estimation de l'énergie qui parvient à un capteur solaire en tenant compte de la position du soleil. Pour ce faire, nous utiliserons des modèles issus de la littérature Capederou [10] et Brichambaut [12]. En second lieu, nous nous intéresserons sur l'estimation de la transmittivité moyenne d'une enveloppe cylindrique en se basant sur les travaux de Felske [4]. La troisième partie du chapitre sera dédiée au calcul du rendement optique. Ce dernier servira de référence pour la comparaison des différents montages et propriétés optiques et géométriques qu'un capteur solaire peut présenter.

2.1 Repérage de la position du soleil

La déclinaison du soleil peut être calculée par la formule suivante : [1-3]

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360 (j + 284)}{365} \right] \quad (2.1)$$

Ou :

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360 (j - 81)}{365} \right] \quad (2.2)$$

Avec :

j : Nombre du jour

La hauteur du soleil est donnée par la formule suivante : [1-3]

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (2.3)$$

L'azimut du soleil est donné par : [1-3]

$$\sin(\alpha) = \frac{\sin(\omega) \cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (2.4)$$

Qui pose des problèmes de discontinuité aux extrêmes.

Il existe une autre méthode pour le calcul de l'azimut qui donne des résultats plus fiables pour toute l'année. Cette méthode s'écrit comme suit :

$$\alpha = \alpha' C_1 C_2 + 180 \times C_3 \left[\frac{1 - C_1 C_2}{2} \right] \quad (2.5)$$

Avec :

$$\sin(\alpha') = \frac{\sin(\omega) \cos(\delta)}{\cos(h)}$$

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{pour } |\omega| < \omega_e \text{ ou } \left| \frac{\tan(\delta)}{\tan(\varphi)} \right| > 1 \\ -1 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 & \text{pour } \varphi(\varphi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{pour } \omega > 0 \\ -1 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Et :

$$\omega_e = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\varphi)}$$

L'angle horaire au lever ou au coucher du soleil est donné par :

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (2.6)$$

Avec :

$$\omega_s = \begin{cases} < 0 & \text{Avant midi solaire} \\ > 0 & \text{Après midi solaire} \end{cases}$$

La durée du jour en heures, est donnée par :

$$Dj = \frac{2}{15} \omega_s \quad (2.7)$$

L'heure du lever du jour en temps solaire, est donnée par :

$$TSV_{Lever} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (2.8)$$

L'heure du coucher du jour en temps solaire, est donnée par :

$$TSV_{Coucher} = Dj + TSV_{Lever} \quad (2.9)$$

Nous considérons le temps solaire vrai à partir du lever du soleil jusqu'à son coucher.

$$TSV = [TSV_{Lever}; TSV_{Coucher}]$$

Donc, l'angle horaire est décrit par la formule suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (2.10)$$

2.2 Estimation de l'éclairement solaire sur un plan incliné

Dans le chapitre précédent, nous avons indiqué la relation qui lie l'éclairement global reçu sur un plan horizontal et un plan incliné. Pour rappel, l'éclairement solaire sur un plan incliné est décrit par l'équation (1.32).

Nous avons également donné quelques modèles permettant l'estimation de l'éclairement solaire. Dans notre simulation, nous avons retenu le modèle simplifié de Capderou [10] qui exprime l'éclairement sous la forme suivante :

$$I_g = 1080(\sin(h))^{1.22} \quad (2.11)$$

$$I_d = 125(\sin(h))^{0.4} \quad (2.12)$$

L'éclairement direct étant obtenu par la différence, soit :

$$I_b = I_g - I_d$$

2.3 Estimation de la transmittivité moyenne pour l'éclairement direct

La formule finale permettant le calcul de la transmittivité moyenne pour l'éclairement direct, donnée après développement dans le chapitre précédent, représente un calcul de primitive selon l'angle Ψ , [4,7,8].

$$\frac{\left(\frac{D}{2w}\right)}{-X\sin(\beta') + Y\cos(\beta')} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \tau(\theta)(X\sin(\psi) + Y\cos(\psi))d\psi \quad (2.13)$$

Le cosinus de l'angle d'incidence peut être exprimé par : [1].

$$\cos(\theta) = X \sin(d\psi) + Y \cos(d\psi) \quad (2.14)$$

Il s'en suit que le cosinus de l'angle d'incidence de l'absorbeur est donnée par :

$$\cos(\theta_a) = X \sin(\beta') + Y \cos(\beta') \quad (2.15)$$

Avec :

$$X = \cos(h) \sin(\alpha + \gamma)$$

$$Y = \sin(\beta) \cos(h) \cos(\alpha + \gamma) + \cos(\beta) \sin(h)$$

Selon la direction des rayons solaires, les bornes d'intégration seront déterminées selon les schémas de la figure 2.1.

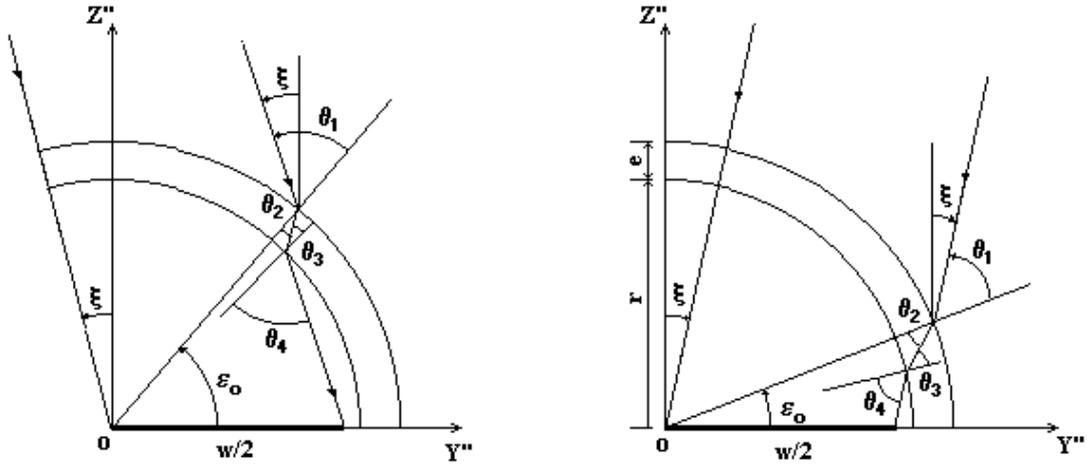


Figure 2.1. Représentation des limites d'intégration du flux incident sur le couvert.

Les bornes d'intégration représentent les limites de l'éclairement solaire transmis par le couvert et reçu par l'absorbeur. (Le flux transmis qui n'a pas atteint pas l'absorbeur n'est pas pris en compte). [7,8].

Les limites d'intégration sont données par, [7,8] :

$$\begin{cases} \psi_1 = \xi \\ \psi_2 = \xi - \theta_1 \end{cases} \quad (2.16)$$

Avec θ_1 solution du système, [7,8] :

$$\begin{cases} \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_4)} = 1 - \frac{2e}{D} \\ \frac{\sin(\theta_4)}{w} = \frac{\cos\left[\theta_1 - \xi - \theta_4 + \left\{\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\sin(\theta_4)\right) - \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\sin(\theta_1)\right)\right\}\right]}{D - 2e} \end{cases} \quad (2.17)$$

Ce système peut être résolu par la minimisation de θ_1 sous MATLAB avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Les projections de l'angle d'incidence des rayons solaires sur la section droite et axiale du couvert sont données par : [4,7,8].

$$\tan(\xi) = \frac{\cos(h) \sin(\alpha + \gamma)}{\cos(h) \sin(\beta) \cos(\alpha + \gamma) + \sin(h) \cos(\beta)} \quad (2.18)$$

$$\tan(\eta) = \frac{-\cos(h) \cos(\beta) \cos(\alpha + \gamma) + \sin(h) \sin(\beta)}{\cos(h) \sin(\beta) \cos(\alpha + \gamma) + \sin(h) \cos(\beta)} \quad (2.19)$$

L'intégration permettant le calcul de la transmittivité moyenne peut être assimilée numériquement à une sommation de (Ψ_1) à (Ψ_2) ou bien par la méthode de Simpson.

La sommation prendra alors la forme suivante :

$$\bar{\tau}(\theta) = Z\Delta\psi \sum_{\psi_1}^{\psi_2} \tau(\theta)[X \sin(\psi) + Y \cos(\psi)] \quad (2.20)$$

Avec :

$$\tau(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \rho_{\parallel}(\theta)}{1 + \rho_{\parallel}(\theta)} + \frac{1 - \rho_{\perp}(\theta)}{1 + \rho_{\perp}(\theta)} \right]$$

Et :

$$Z = \frac{D}{2\omega[-X \sin(\beta') + Y \cos(\beta')]}$$

2.4 Estimation de la transmittivité moyenne pour l'éclairement diffus

Pour le rayonnement solaire diffus (ciel et sol), on fait appel à la notion de la hauteur du soleil équivalente (h_e), c'est un angle qui est appliqué au direct et qui donne un résultat équivalent que celui de l'intégration du diffus. [7,8], soit :

$$h_{e-ciel} = 136.4 - [0.063(r - 0.5) + 1.3164]\beta + 0.0031\beta^2 + 0.46238[1 - \exp\{9.04259(r - 0.5)\}]$$

$$h_{e-sol} = 158.7 - [1.5616 - 0.067051 \ln\{1 + 110.6895(0.9351 - r)\}]\beta$$

En remplaçant la hauteur du soleil (h) par la hauteur équivalente (h_e) et en suivant les mêmes étapes que celles de l'éclairement direct, nous obtenons pour (h_{e-ciel}) et (h_{e-sol}) la transmittivité moyenne pour l'éclairement diffus ciel et sol respectivement.

2.5 Calcul du rendement optique

Les équations de l'énergie incidente et l'énergie absorbée présentées dans le chapitre précédent peuvent être écrites comme suit :

$$I_{abs} = \left[(1 - F_d)R_b(\tau\alpha)_{e-b} + \frac{1 + (\beta)}{2} F_d(\tau\alpha)_{e-d.ciel} + \frac{1 - (\beta)}{2} \rho_s(\tau\alpha)_{e-d.sol} \right] I_g \quad (2.21)$$

Et :

$$I_{\beta} = \left[(1 - F_d)R_b + \frac{1 + (\beta)}{2} F_d + \frac{1 - (\beta)}{2} \rho_s \right] I_g \quad (2.22)$$

L'expression du rendement optique s'écrit alors :

$$\eta_0 = \frac{\left[(1 - F_d)R_b(\tau\alpha)_{e-b} + \frac{1 + (\beta)}{2}F_d(\tau\alpha)_{e-d.ciel} + \frac{1 - (\beta)}{2}\rho_s(\tau\alpha)_{e-d.sol} \right]}{\left[(1 - F_d)R_b + \frac{1 + (\beta)}{2}F_d + \frac{1 - (\beta)}{2}\rho_s \right]} \quad (2.23)$$

2.6 Organigramme du programme

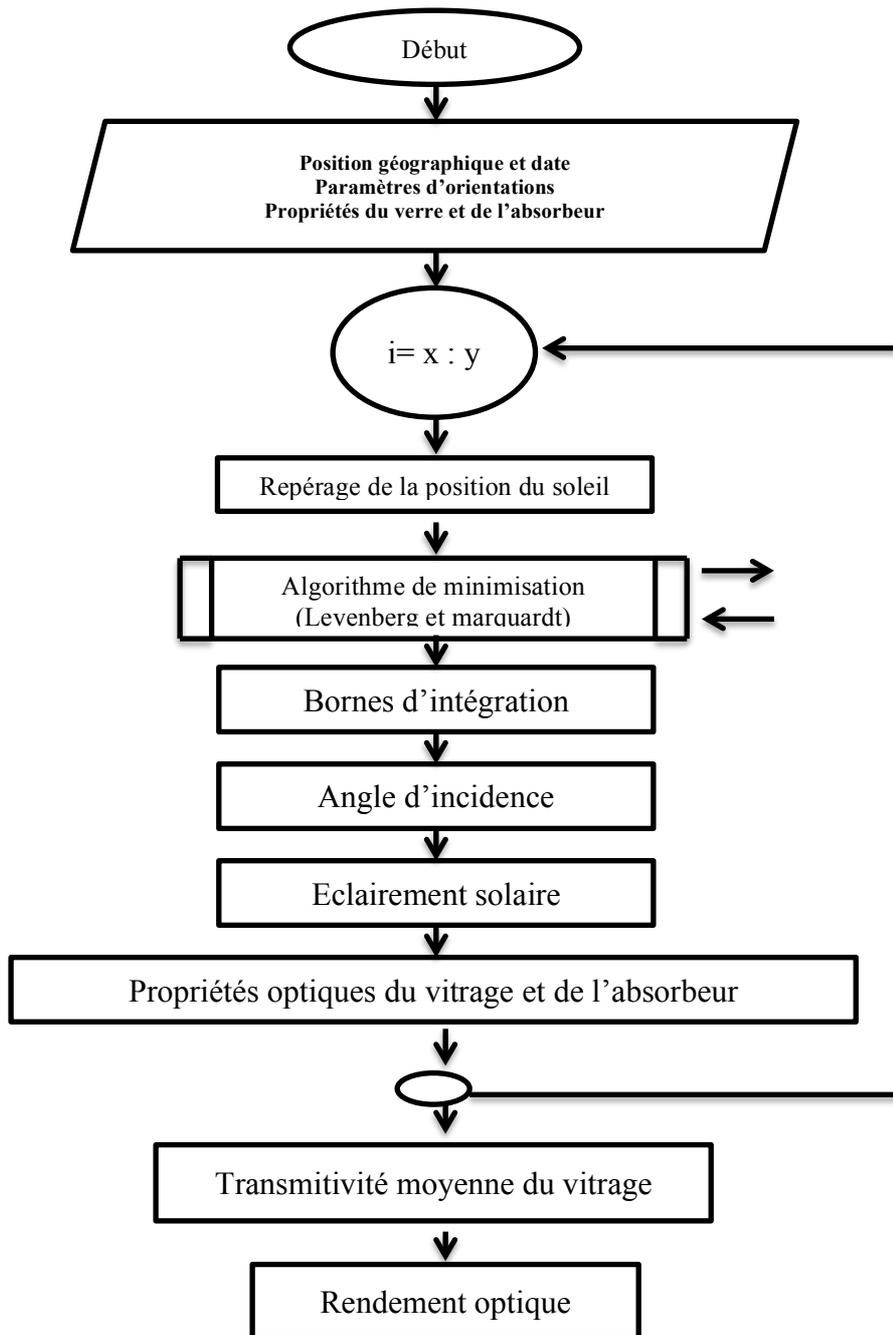


Figure 2.1. Organigramme du programme de simulation.

Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre le modèle permettant le calcul de la transmittivité moyenne et le rendement optique, et ceci en commençant par développer les différentes équations des angles qui déterminent la position du soleil, les bornes d'intégration, l'angle d'incidence et les propriétés optiques du vitrage.

Nous avons également présenté les modèles qui permettent l'estimation de l'éclairement solaire tout en choisissant le mieux adapté pour l'Algérie.

Un organigramme qui décrit les différentes étapes du programme numérique a été présenté en fin du chapitre de modélisation, les résultats seront développés dans le chapitre suivant.

3 Résultats et discussions

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus par le programme numérique implémenté sous MATLAB en s'appuyant sur la modélisation définie dans le second chapitre.

Dans un premier temps, ces résultats seront comparés avec ceux des travaux présentés dans le chapitre étude bibliographique.

En un second temps, nous élargirons la plage d'étude des paramètres qui influent sur les performances optiques d'un vitrage cylindrique. Pour ce faire, nous établirons une simulation des différents effets (Déviation azimutale, inclinaison, latitude, propriétés optiques du vitrage et de l'absorbeur) en fonction du temps solaire et des saisons. Nous présenterons également une interprétation des résultats dans ce chapitre.

3.1 Validation des résultats

J.D. Felske (1979) a déterminé la transmittivité moyenne de deux capteurs tubulaire où l'axe du premier capteur est orienté vers la direction Nord-sud avec une inclinaison qui vaut la latitude du lieu, et l'axe du deuxième capteur est orienté vers la direction Est-Ouest sans inclinaison. Il a déterminé également la transmittivité d'un capteur plan orienté plein sud et incliné à la latitude du lieu.

Pour la validation de nos résultats, nous avons réuni les mêmes conditions d'orientation appliquées pour la wilaya d'Alger.

Après comparaison de nos résultats à ceux de Felske, nous avons observé que nous avons obtenu une allure identique aux résultats de Felske. Comme le montre la figure 3.1.

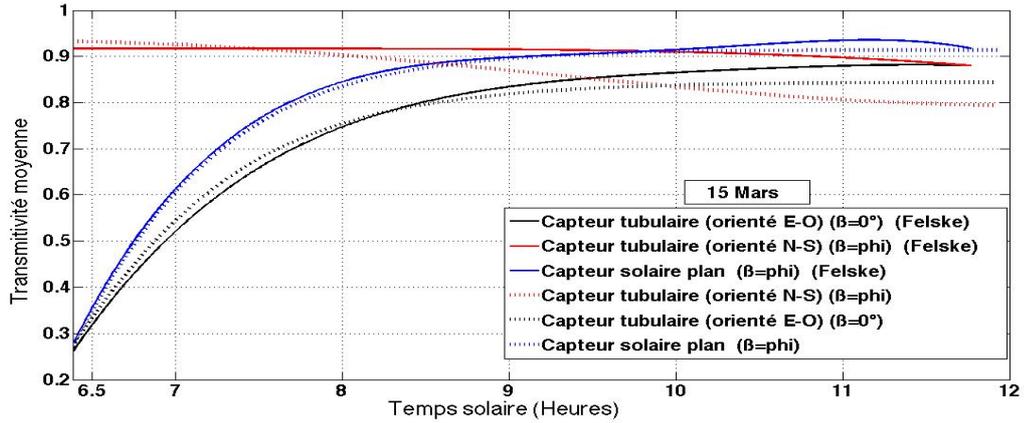


Figure 3.1. Transmittivité moyenne en fonction du temps solaire, du type du capteur et de l'orientation.

Nous avons également comparé nos résultats avec ceux des travaux de Merzouk [2004]. Dans ses travaux, Merzouk [2004] a déterminé l'effet de l'inclinaison du capteur sur sa transmittivité moyenne en fonction de la hauteur du soleil pour l'éclairage direct. Également, il a déterminé l'effet de la largeur de l'absorbeur sur la transmittivité moyenne d'un capteur à enveloppe cylindrique en fonction de la hauteur du soleil. Pour l'éclairage diffus, il a déterminé l'effet de l'inclinaison du capteur sur sa transmittivité moyenne en fonction de la largeur de son absorbeur.

Nous avons réuni les mêmes conditions géométriques et suivi les mêmes étapes que celles entreprises dans Merzouk [2014]. Après comparaisons, nous avons constaté que nos résultats sont très proches (voir les figures 3.2-3.7).

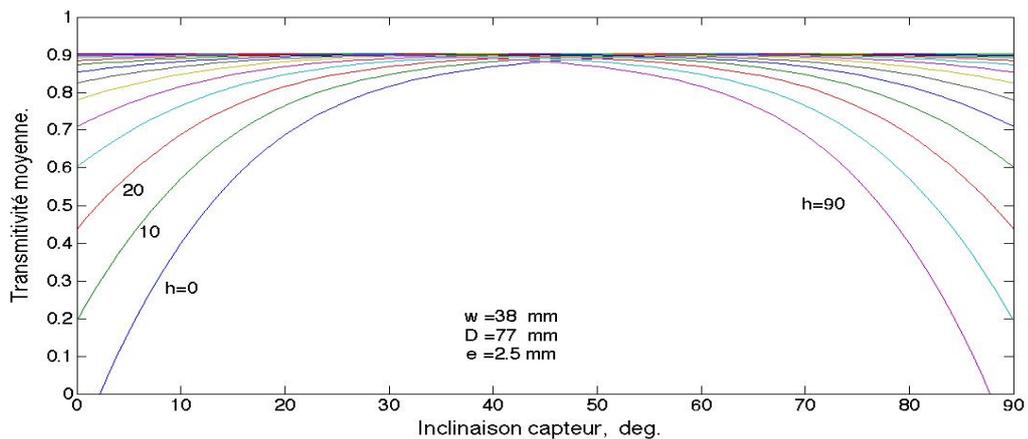


Figure 3.2. Transmittivité moyenne en fonction de l'inclinaison et la hauteur du soleil (Merzouk, 2014).

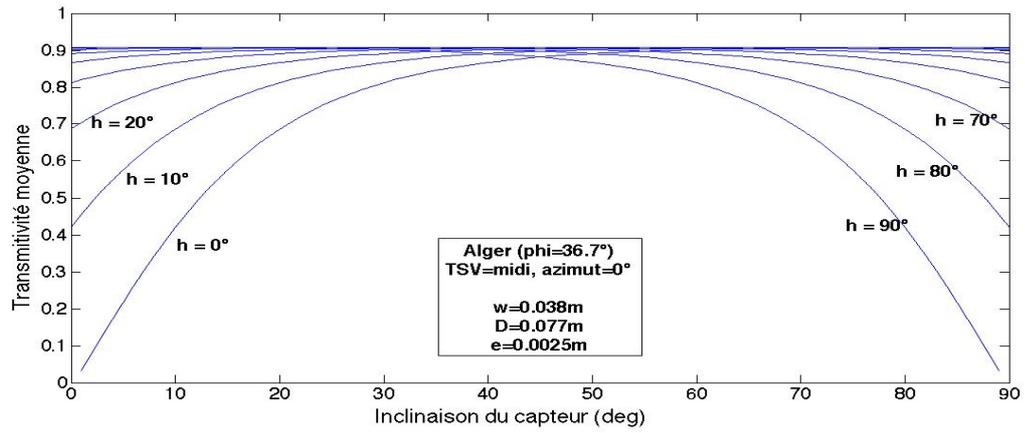


Figure 3.3. Transmittivité moyenne en fonction de l'inclinaison et la hauteur du soleil.

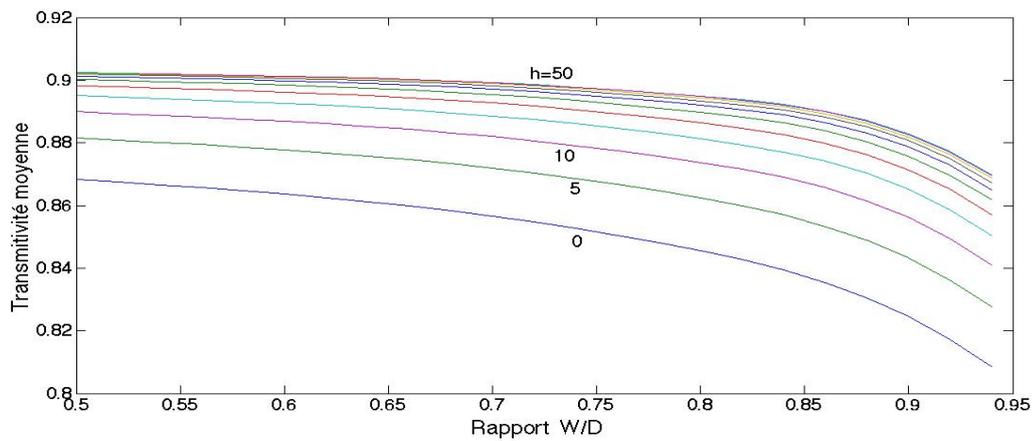


Figure 3.4. Transmittivité moyenne en fonction du rapport w/D et la hauteur du soleil (Merzouk, 2014).

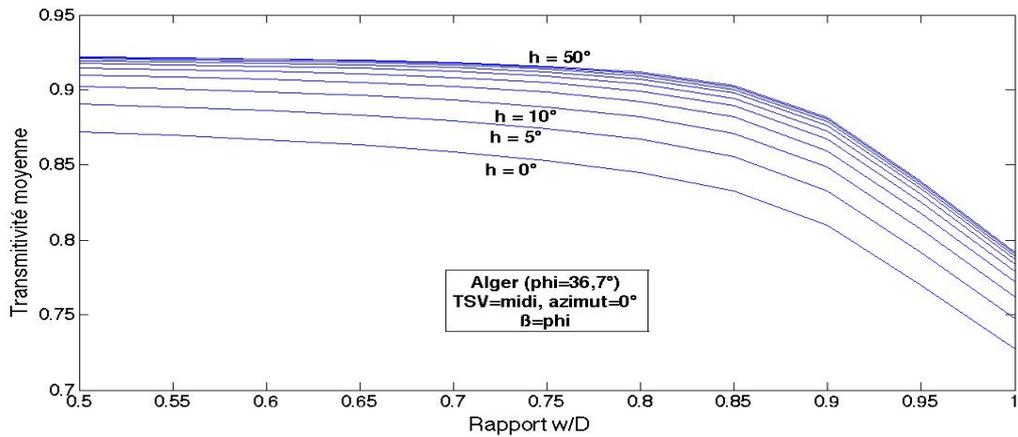


Figure 3.5. Transmittivité moyenne en fonction du rapport w/D et la hauteur du soleil.

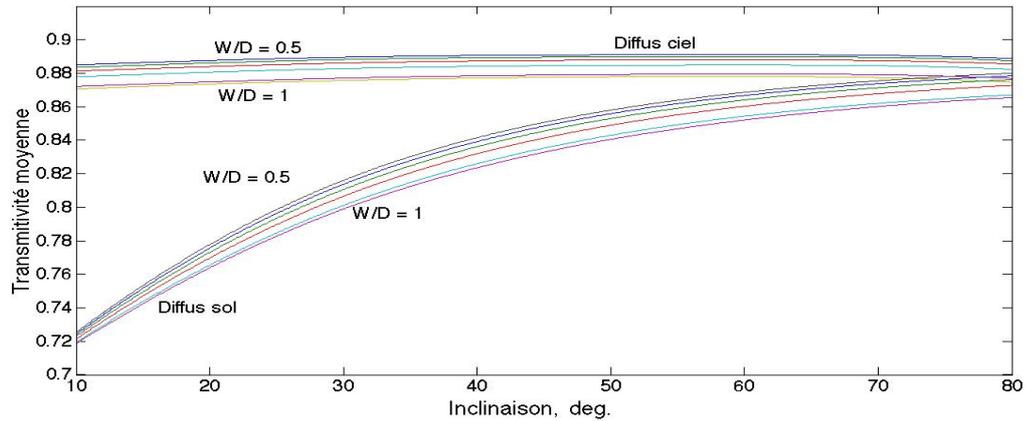


Figure 3.6. Transmittance moyenne en fonction de l'inclinaison et le rapport w/D pour l'éclairage diffus (Merzouk, 2014).

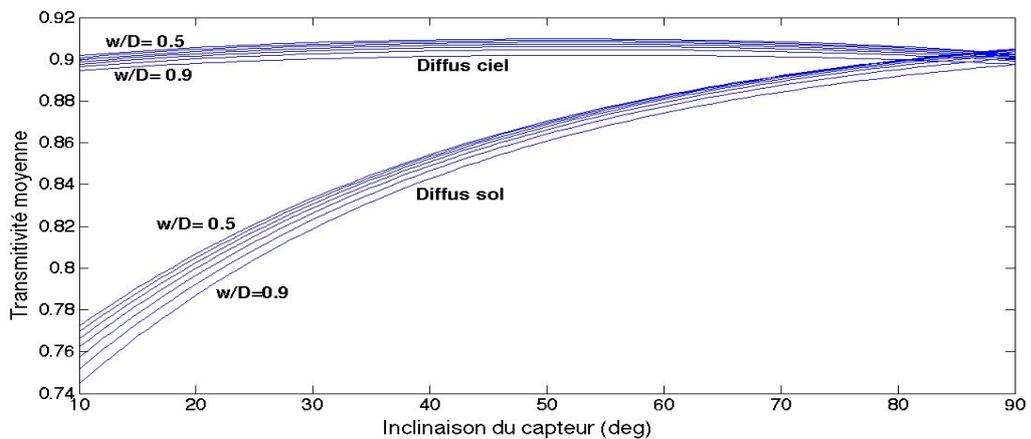


Figure 3.7. Transmittance moyenne en fonction de l'inclinaison et le rapport w/D pour l'éclairage diffus.

3.2 Eclairage solaire

Dans cette partie nous avons estimé l'éclairage solaire en s'appuyant sur le modèle de Capderou simplifié. Nous justifions notre choix par une étude comparative entre le modèle de Brichambaut, le modèle de Capderou et des mesures de l'éclairage solaire réalisées au sein du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER).

Nous avons établi la comparaison pour les douze jours types de l'année, et nous présentons seulement les journées ou les mesures n'étaient pas altérées par un passage nuageux. Les résultats sont comme suit :

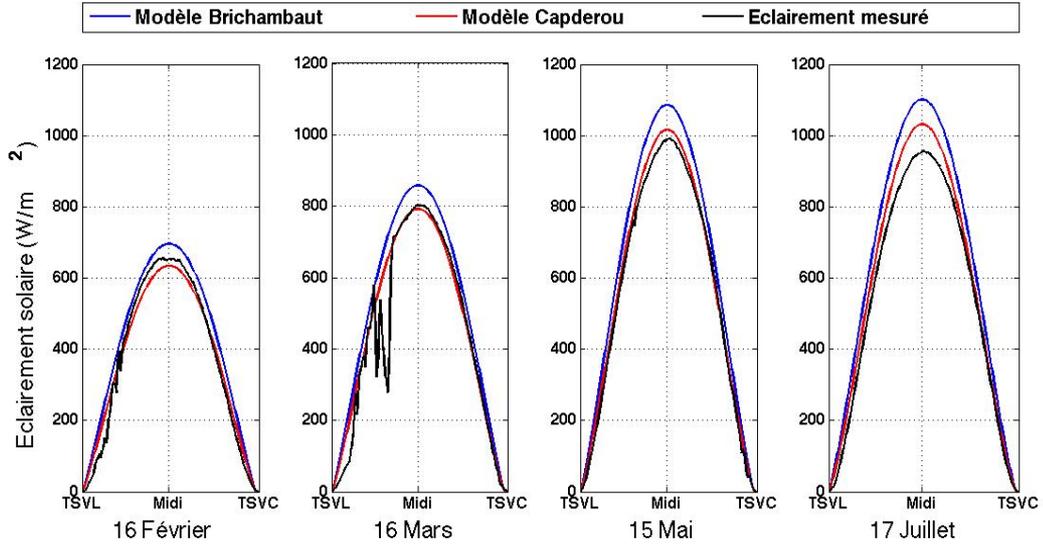


Figure 3.8. comparaison entre l'éclairement solaire mesuré et l'éclairement selon le modèle de Brichambaut et de Capderou et les données du CDER.

Les figures des autres journées types sont présentées en **Annexe 1**.

Par le biais de la figure 3.8, nous constatons que c'est le modèle Capderou (tracé rouge) qui présente des résultats proches de l'éclairement mesuré.

3.3 Effet de l'orientation (Montage)

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la déviation azimutale et de l'inclinaison sur la transmittivité moyenne et le rendement optique d'un capteur à enveloppe cylindrique.

La simulation a été réalisée pour les journées correspondant aux deux solstices (hiver et été) et l'équinoxe de printemps. Ces trois journées étant représentatives du point de vue de la hauteur du soleil, cela nous permet de faire une comparaison plus significative.

3.3.1 Effet de la déviation azimutale

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à l'effet de la déviation azimutale. La simulation qui permet l'étude de cet effet est soumise aux conditions suivantes :

- $\varphi = 36,7^\circ$ (Alger).
- Matériaux du couvert cylindrique : Verre blanc avec un indice de milieu $n_2=1.526$ et un coefficient d'extinction $k=4$.
- Le capteur ne présente aucune inclinaison ($\beta = 0^\circ$) de même pour l'absorbeur ($\beta' = 0^\circ$).

- Le diamètre du couvert $D = 0.077\text{m}$.
- L'épaisseur du couvert $e = 0.0025\text{m}$.
- La largeur de l'absorbeur $w = 0.038\text{m}$.

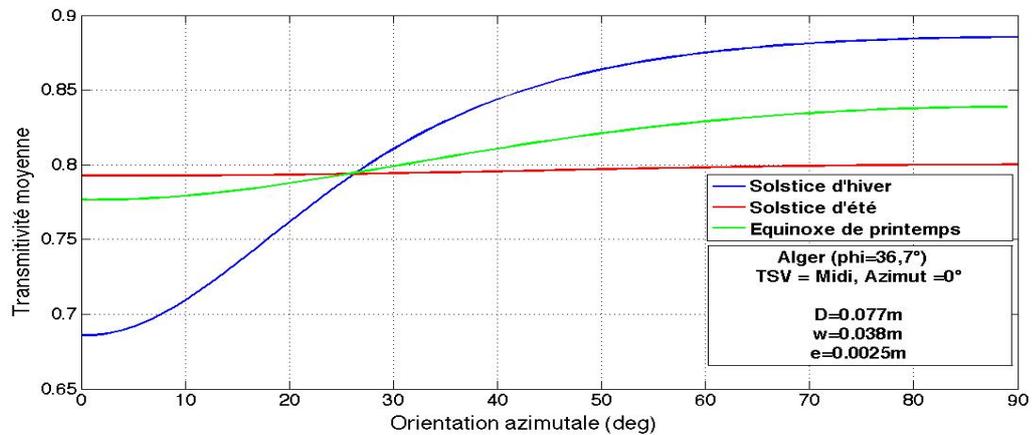


Figure 3.9. Evolution de la transmittivité moyenne à azimut nul en fonction de la déviation azimutale pour les deux solstices et l'équinoxe de printemps.

La Figure.3.9 représente l'évolution de la transmittivité moyenne à azimut nul (Tsv = Midi) selon la déviation azimutale. Nous remarquons, pour le solstice d'été, que la déviation n'a pas un grand effet sur la transmittivité moyenne contrairement au solstice d'hiver. Dans ce dernier cas, si le capteur est orienté plus vers l'Est, la transmittivité moyenne est plus importante et atteint la valeur de 88% à l'orientation plein Est. Quant à l'équinoxe, il reste peu affecté par l'effet de l'orientation.

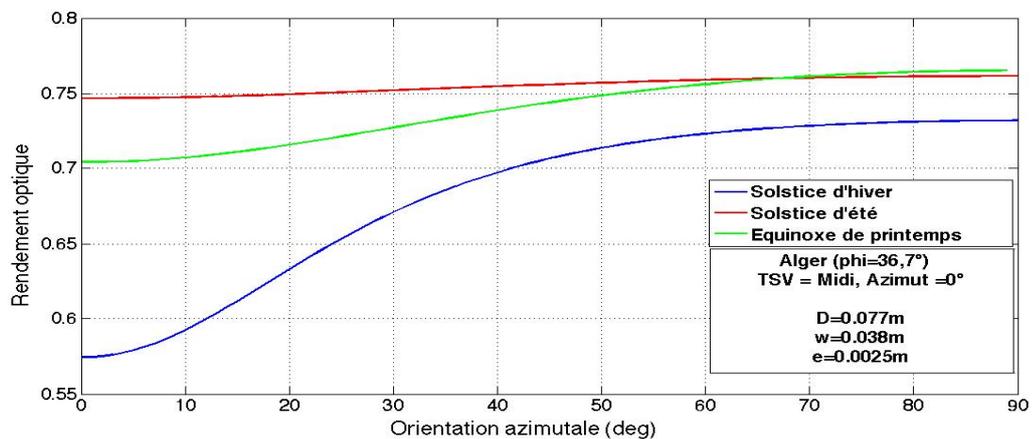


Figure 3.10. Evolution du rendement optique à azimut nul en fonction de la déviation azimutale pour les deux solstices et l'équinoxe du printemps.

La Figure.3.10 représente l'évolution du rendement optique à azimut nul (Tsv = Midi) selon la déviation azimutale. Nous constatons le même comportement que celui observé pour la transmittivité moyenne. L'effet de l'orientation est plus important pour le solstice d'hiver, contrairement au solstice d'été et l'équinoxe du printemps.

La simulation de l'effet de la déviation azimutale est présentée sous forme graphique d'une manière plus détaillée en **annexe 1**.

3.3.2 Effet de l'inclinaison

En second lieu, nous nous focaliserons sur l'effet de l'inclinaison sur la transmittivité moyenne et le rendement optique. La simulation a été portée sur l'équinoxe du printemps et les deux solstices, sous les conditions suivantes :

- $\varphi = 36,7^\circ$ (Alger).
- Matériaux du couvert cylindrique : Verre blanc avec un indice de milieu $n_2=1.526$ et un coefficient d'extinction $k=4$.
- Le capteur est orienté plein Sud ($\gamma=0^\circ$) et l'absorbeur est sur l'inclinaison ($\beta'=0^\circ$).
- Le diamètre du couvert $D = 0.077\text{m}$.
- L'épaisseur du couvert $e = 0.0025\text{m}$.
- La largeur de l'absorbeur $w = 0.038\text{m}$.

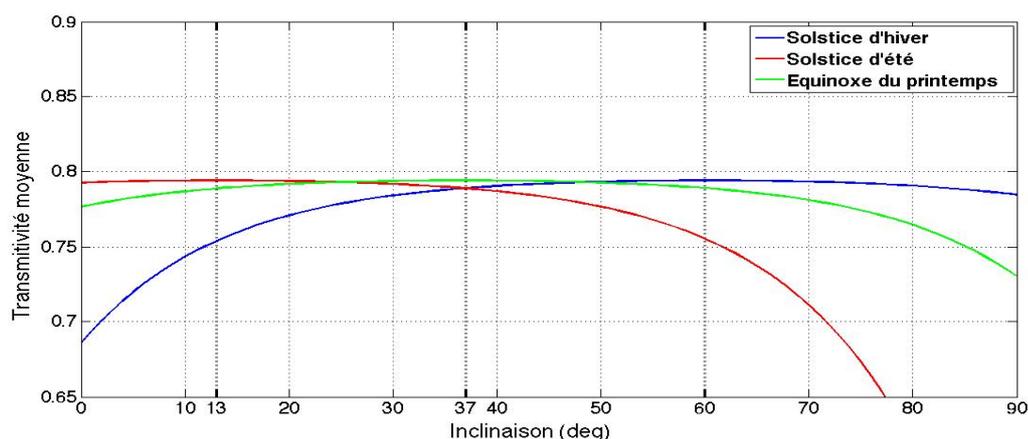


Figure 3.11. Evolution de la transmittivité moyenne à azimuth nul en fonction de l'inclinaison pour les deux solstices et l'équinoxe du printemps.

La Figure.3.11 représente l'évolution de la transmittivité moyenne à azimuth nul ($T_{sv} = \text{Midi}$) selon l'inclinaison du couvert cylindrique.

Nous remarquons que :

Pour le solstice d'été, et pour des faibles inclinaisons, la variation de la transmittivité moyenne est négligeable. La transmittivité moyenne atteint son maximum pour une inclinaison de $\beta = 13^\circ$. Au-delà de 40° d'inclinaison, la transmittivité diminue brutalement.

Pour l'équinoxe de printemps, la transmittivité moyenne atteint son maximum pour une inclinaison de $\beta = 37^\circ$. Pour des inclinaisons plus faibles, on note une petite

diminution de l'ordre de 1,5%. Par contre, pour des inclinaisons plus importantes, jusqu'à $\beta = 90^\circ$, on note une diminution de l'ordre de 6%.

Pour le solstice d'hiver, un maximum de transmittivité moyenne est atteint pour une inclinaison $\beta = 60^\circ$. Pour des inclinaisons plus importantes, on note une diminution négligeable. Par contre, pour des inclinaisons moins importantes, la transmittivité moyenne subit une diminution de l'ordre de 10%.

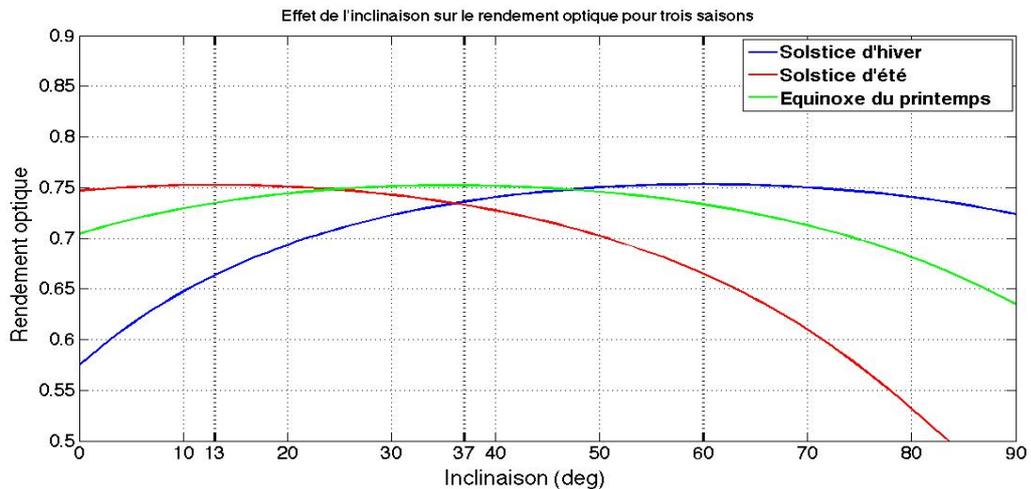


Figure 3.12. Evolution du rendement optique à azimut nul en fonction de l'inclinaison pour les deux solstices et l'équinoxe du printemps.

La **Figure.3.12** représente l'évolution du rendement optique à azimut nul ($T_{sv} = \text{Midi}$) selon l'inclinaison du couvert cylindrique. Nous constatons que le rendement optique présente les mêmes allures observées pour la transmittivité moyenne.

Pour le solstice d'été, le rendement optique présente une augmentation négligeable pour atteindre un maximum à l'inclinaison $\beta = 13^\circ$. Au-delà de 40° d'inclinaison, le rendement optique diminue brutalement.

Pour le solstice d'hiver, le rendement optique présente une augmentation de 18%, de l'inclinaison nulle jusqu'à son maximum ($\beta = 60^\circ$). Au-delà de cette inclinaison, le rendement optique diminue légèrement.

Pour l'équinoxe de printemps, un maximum de rendement optique est atteint pour une inclinaison de $\beta = 37^\circ$. Pour des inclinaisons plus faibles, on note une diminution qui atteint 5% pour $\beta = 0^\circ$. Pour des inclinaisons plus importantes, une diminution de 12% est atteinte pour $\beta = 90^\circ$.

La simulation de l'effet de l'inclinaison est présentée sous forme graphique d'une manière plus détaillée en **annexe 1**.

3.3.3 Montage adapté aux saisons

Pour l'équinoxe de printemps ou d'automne, les tests de montage ont donné les résultats suivants :

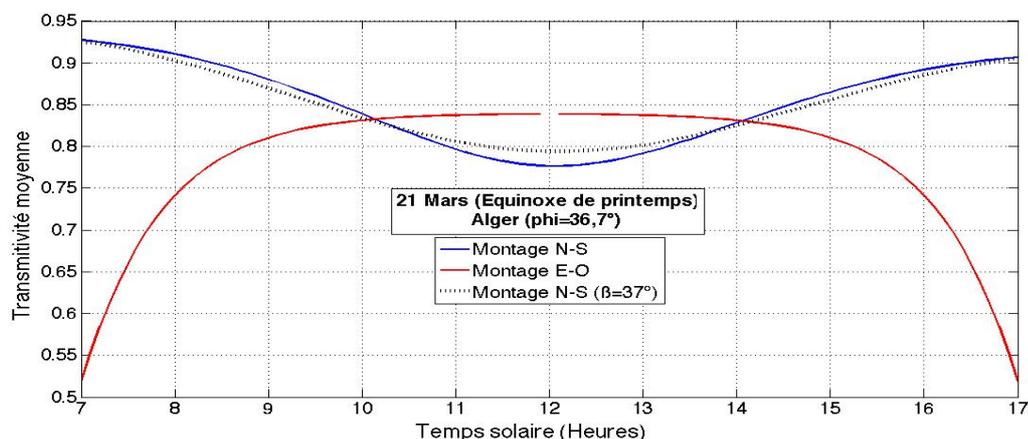


Figure 3.13. Transmittivité moyenne en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Mars.

La Figure.3.13 représente l'évolution de la transmittivité moyenne selon le montage N-S ou E-O et le temps solaire pour l'équinoxe. Par le biais d'un calcul d'intégral pour toutes les heures du jour (Résultats détaillés en **annexe 2**), nous constatons que le montage N-S (tracé bleu) est meilleur que le montage E-O (tracé rouge).

Nous remarquons également que la transmittivité moyenne pour le montage N-S est importante durant toute la durée d'ensoleillement. Elle est de l'ordre de 90% en début et en fin du jour, et diminue de 14% à midi.

Cependant, dans l'intervalle du temps qui varie de 10 heures à 14 heures, le montage E-O a pour effet une transmittivité moyenne plus importante. Elle est de l'ordre de 6% par rapport à celle du montage N-S.

En ajoutant l'effet de l'inclinaison ($\beta = 37^\circ$) au montage N-S, un gain de 2% en transmittivité moyenne est observé à midi.

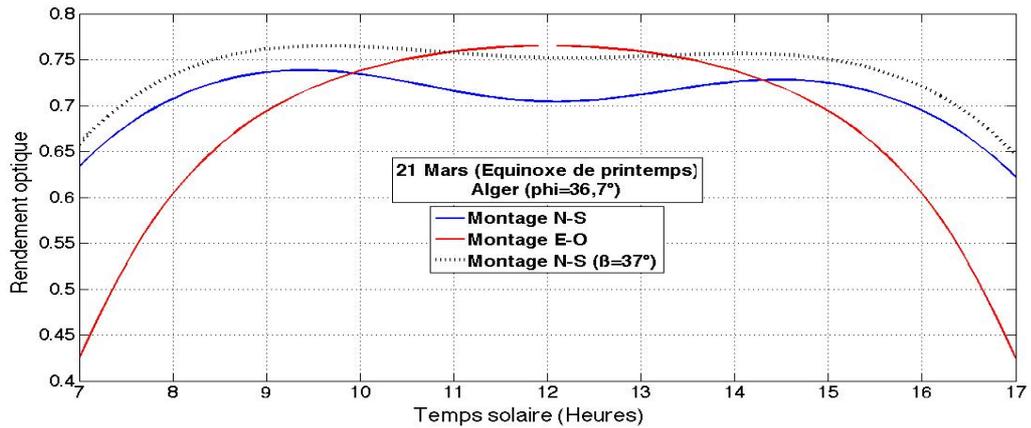


Figure 3.14. Rendement optique en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Mars.

La Figure.3.14 représente l'évolution du rendement optique selon le montage N-S ou E-O et le temps solaire pour l'équinoxe. Nous constatons, pour le rendement optique, que le meilleur montage est le montage N-S (tracé bleu). (Résultats du calcul d'intégration décrit en **annexe 2**). Ce montage engendre un rendement optique important durant toute la durée d'ensoleillement. Néanmoins, une diminution à midi est constatée.

Le montage E-O (tracé rouge) à pour conséquence un rendement optique supérieur de 7% à celui du montage N-S à midi.

L'inclinaison ($\beta = 37^\circ$) appliquée au montage N-S (tracé noir) conduit à une augmentation du rendement optique de l'ordre de 5% à midi.

Pour le solstice d'été, les tests de montage ont donné les résultats suivants :

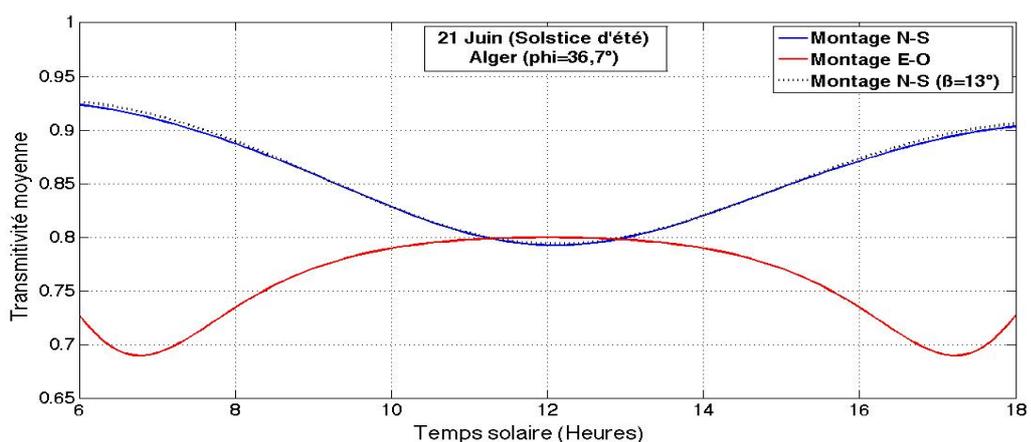


Figure 3.15. Transmittivité moyenne en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Juin.

La Figure.3.15 représente l'évolution de la transmittivité moyenne selon le montage N-S ou E-O et le temps solaire pour le solstice d'été. Nous constatons que le meilleur montage est le montage N-S, avec une transmittivité moyenne importante tout au long de la journée et qui est très proche que celle du montage E-O à midi.

Pour le solstice d'été, l'apport de l'inclinaison ($\beta = 13^\circ$) est négligeable.

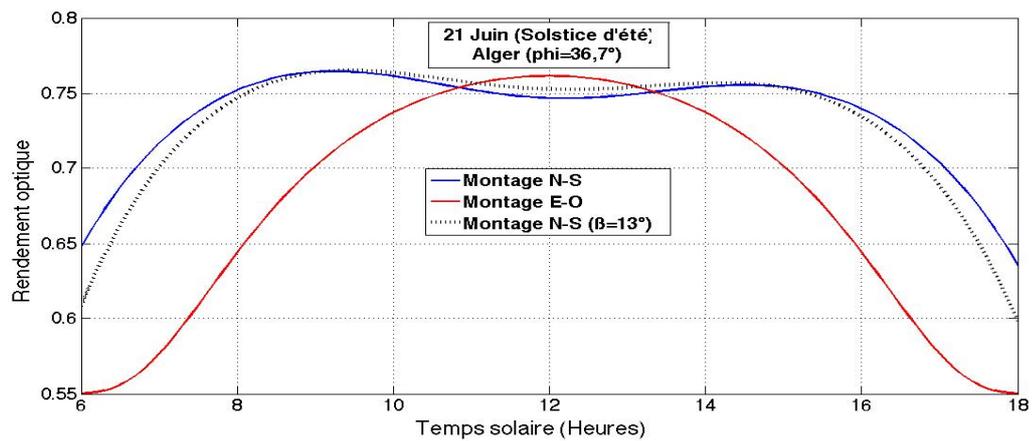


Figure 3.16. Rendement optique en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Juin.

La Figure.3.16 représente l'évolution du rendement optique selon le montage N-S ou E-O et le temps solaire pour le solstice d'été. Nous constatons les mêmes résultats observés pour la transmittivité moyenne, avec un rendement optique nettement meilleur pour le montage N-S (tracé bleu). Il est de même pour l'apport de l'inclinaison qui est négligeable.

Pour le solstice d'hiver, les tests de montage ont donné les résultats présentés en figure 3.17.

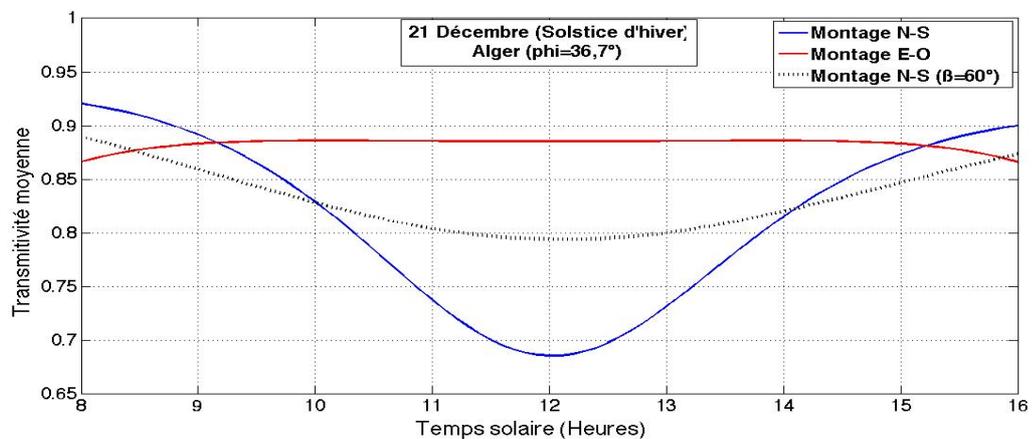


Figure 3.17. Transmittivité moyenne en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Décembre.

La **Figure.3.17** représente l'évolution de la transmittivité moyenne selon le montage (Nord-Sud ou Est-Ouest) et le temps solaire pour le solstice d'hiver. Nous constatons que le montage qui donne le meilleur résultat est le montage E-O, avec une transmittivité moyenne importante tout au long de la journée et qui est supérieur à celle que obtenue avec un montage N-S à de 20% à midi.

L'apport de l'inclinaison au montage N-S mène à une augmentation de la transmittivité moyenne de 11% à midi.

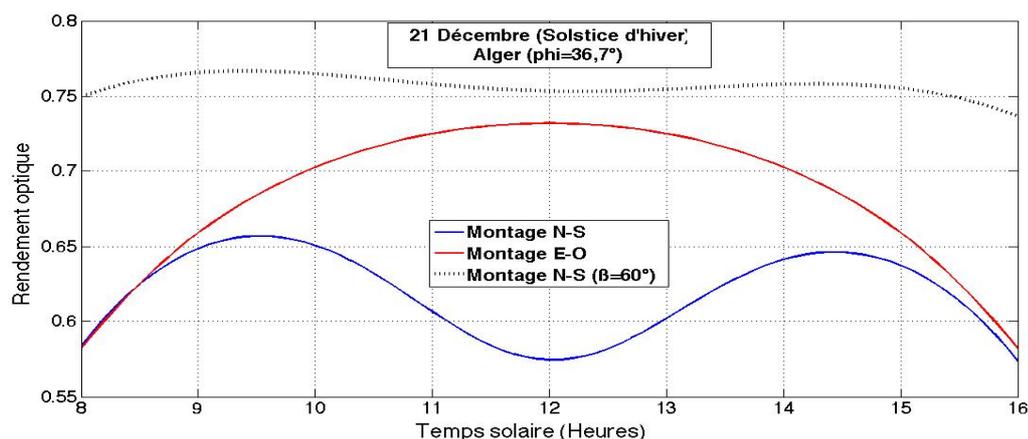


Figure 3.18. Rendement optique en fonction du montage et du temps solaire pour le 21 Décembre.

La **Figure.3.18** représente l'évolution du rendement optique selon le montage N-S ou E-O et le temps solaire pour le solstice d'hiver. Nous constatons que le montage E-O (tracé rouge) est celui qui donne le meilleur résultat. Le rendement optique pour ce montage est supérieur de 15% à celui obtenu avec un montage N-S (tracé bleu) à midi.

De plus, une inclinaison de ($\beta = 60^\circ$) permet d'améliorer le rendement optique du montage N-S pour atteindre un résultat plus important que le montage E-O tout au long de la journée (tracé noir).

3.3.4 Discussion des résultats de l'effet du montage

Dans un premier temps, nous avons constaté que la transmittivité moyenne d'un vitrage cylindrique dépend essentiellement de l'orientation par rapport à la direction du soleil. Plus l'axe du cylindre est normal et à la direction du soleil, et plus l'intervalle d'intégration est large (également le cosinus de l'angle d'incidence), donc la transmittivité moyenne est plus importante. Ceci peut être relevé pour tous les jours de l'année. (Détail représenté graphiquement en **annexe 2**).

Le rendement optique dépend de la transmittivité moyenne. En effet, lorsque la transmittivité moyenne est faible, l'énergie absorbée diminue et par conséquent le

rendement optique diminue également. D'autre part, le rendement optique dépend également de l'angle d'incidence que présente le plan de la normale de son absorbeur avec le plan de la direction du soleil, un angle plus large a pour effet la diminution du coefficient de conversion géométrique et par conséquent le rendement optique diminue également.

Par ailleurs, nous avons observé que l'inclinaison optimale pour l'amélioration de la transmittivité moyenne et le rendement optique est obtenue par l'angle complémentaire à la hauteur du soleil. Ceci peut être constaté pour tous les jours.

Par le biais de ces résultats, nous pouvons déduire que pour des applications de concentration (Cylindro-parabolique) et de chauffage sanitaire, un système qui permet la Rotation du montage et le changement d'inclinaison (système de poursuite) est une solution très intéressante pour améliorer la transmittivité moyenne et le rendement optique du vitrage cylindrique.

3.4 Effet des propriétés optiques du vitrage

Dans cette partie, nous allons étudier l'effet des propriétés optiques du vitrage sur la transmittivité moyenne et le rendement optique d'un capteur à enveloppe cylindrique.

La simulation a été réalisée sous les conditions suivantes :

- $\varphi = 36,7^\circ$ (Alger).
- Le capteur est orienté plein Sud ($\gamma = 0^\circ$) et incliné à la latitude du lieu.
- L'absorbeur est sur l'inclinaison ($\beta = 0^\circ$).
- Le diamètre du couvert $D = 0.077\text{m}$.
- L'épaisseur du couvert $e = 0.0025\text{m}$.
- La largeur de l'absorbeur $w = 0.038\text{m}$.

3.4.1 Effet de l'indice du milieu

Pour un coefficient d'extinction $k = 4$, la simulation d'effet de l'indice du milieu a donné les résultats suivants :

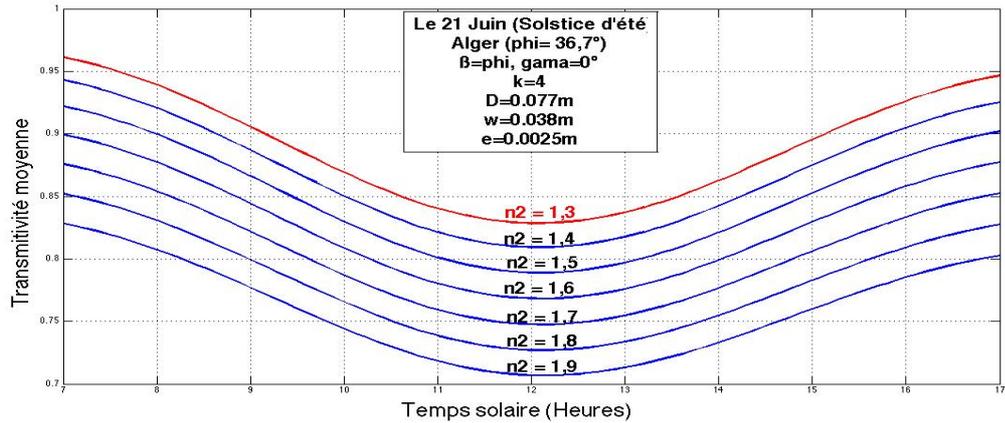


Figure 3.19. Transmittivité moyenne en fonction de l'indice du milieu et le temps solaire.

La **Figure.3.19** représente l'évolution de la transmittivité moyenne selon l'indice du milieu et le temps solaire. Nous remarquons que plus l'indice du milieu augmente, et plus la transmittivité moyenne diminue.

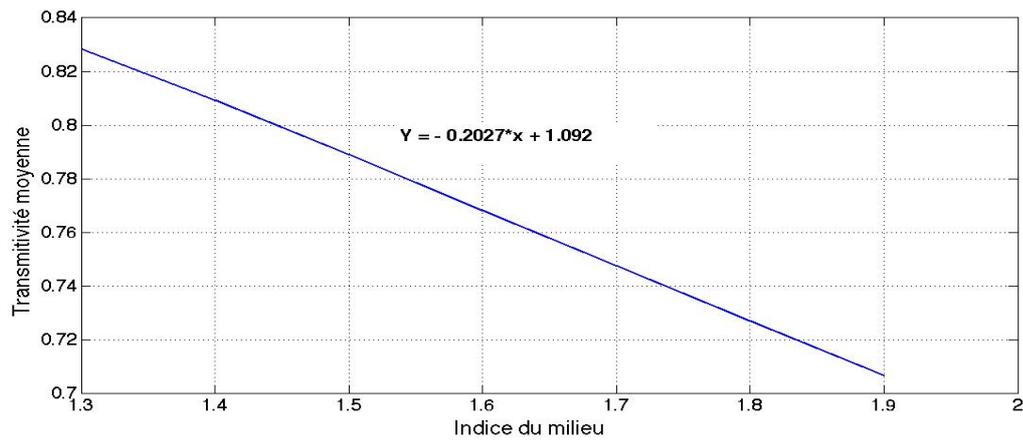


Figure 3.20. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction de l'indice de milieu pour le 21 Juin.

La **Figure.3.20** représente la variation de la transmittivité moyenne à midi solaire vrai selon l'indice du milieu. Les pertes en transmittivité moyenne sont caractérisées par une droite de pente $a = -0.2027$, et un ajustement $b = 1.092$.

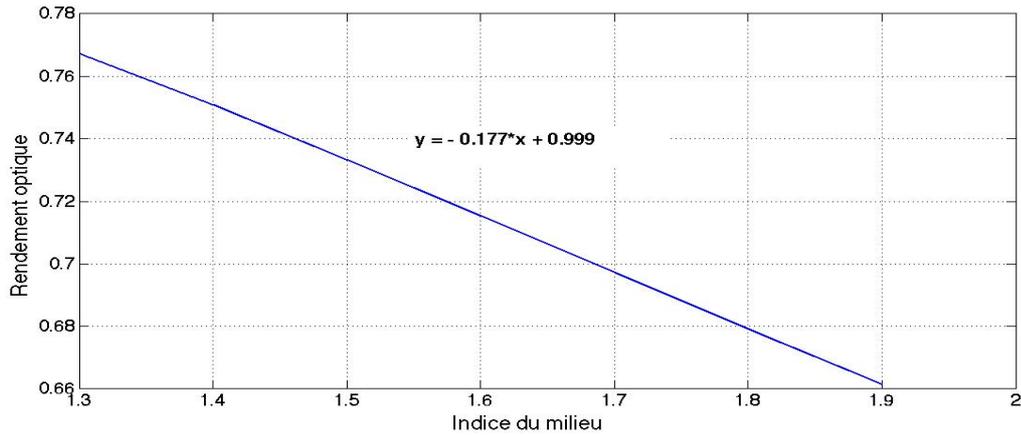


Figure 3.21. Evolution du rendement optique en fonction de l'indice de milieu pour le 21 Juin.

La Figure.3.21 représente la variation du rendement optique à midi solaire vrai selon l'indice du milieu. Les pertes en rendement optique sont caractérisées par une droite de pente $a = -0.177$, et un ajustement qui vaut l'unité $b = 0.999$.

3.4.2 Effet du coefficient d'extinction

Pour un indice du milieu $n_2 = 1.5$, la simulation d'effet de l'indice du milieu a donné les résultats suivants :

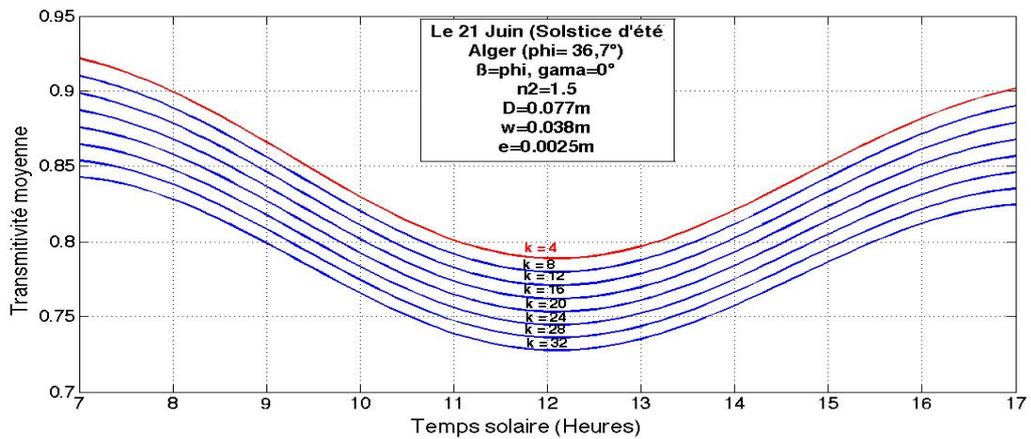


Figure 3.22. Transmittivité moyenne en fonction du coefficient d'extinction et le temps solaire pour le 21 Juin.

La Figure.3.22 représente l'évolution de la transmittivité moyenne selon le coefficient d'extinction et le temps solaire. Nous remarquons que plus le coefficient d'extinction augmente, et plus la transmittivité moyenne diminue.

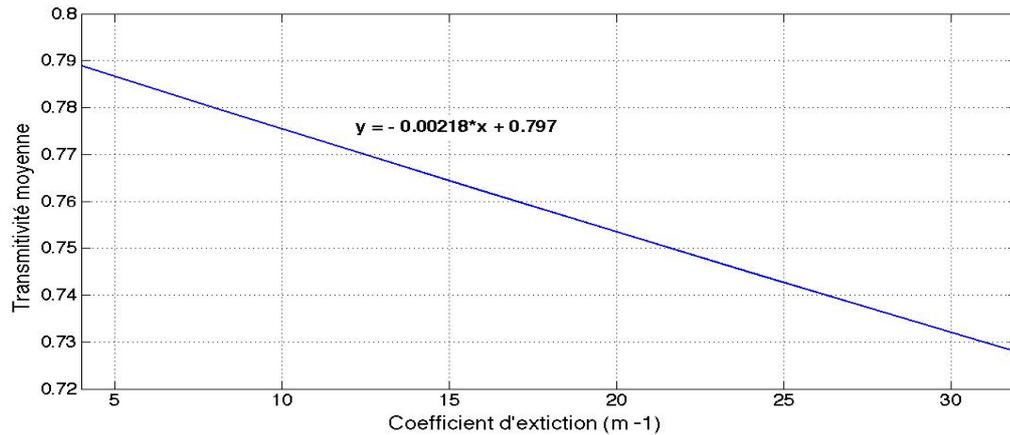


Figure 3.23. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction du coefficient d'extinction pour le 21 Juin.

La Figure.3.23 représente la variation de la transmittivité moyenne à midi solaire vrai selon le coefficient d'extinction. Les pertes en transmittivité moyenne sont caractérisées par une droite de pente $a = -0.00218$, et un ajustement $b = 0.797$.

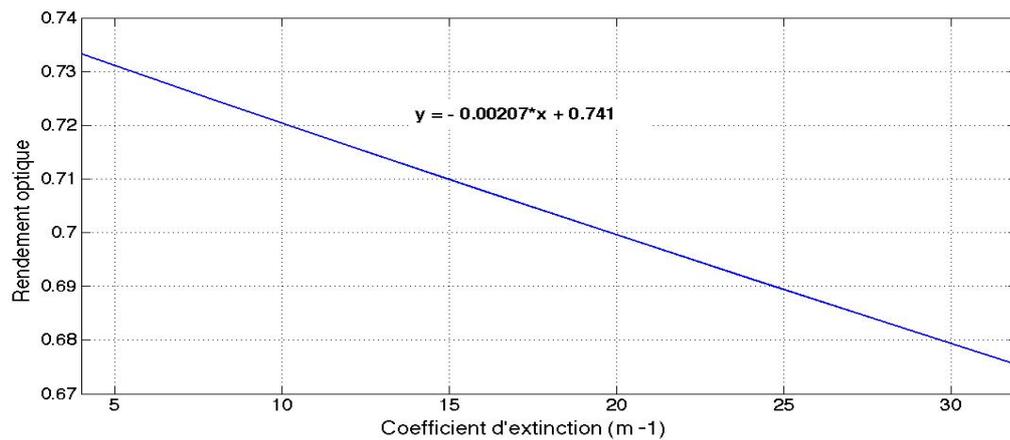


Figure 3.24. Evolution du rendement optique en fonction du coefficient d'extinction pour le 21 juin.

La Figure.3.24 représente la variation du rendement optique à midi solaire vrai selon le coefficient d'extinction. Les pertes en rendement optique sont caractérisées par une droite de pente $a = -0.00207$, et un ajustement qui vaut l'unité $b = 0.741$.

3.4.3 Matériaux transparents usuels

Dans cette partie, nous avons réalisé des tests portant sur la différence entre quelques matériaux utilisés dans la fabrication des milieux transparents. [1].

Tableau.3.1. Propriétés optiques de quelques matériaux, [1,2].

Matériau	Coefficient d'extinction k (m ⁻¹)	Indice du milieu
Verre classique	4 – 32 ($k = 10^*$)	1,526
Verre ordinaire	16	1,5
Tedlar	140	1,45
Mylar	205	1,64
Teflan	59	1,34

Le (Tableau.3.1) indique les propriétés optiques des matériaux choisis pour la simulation. Les résultats sont donnés dans les figures 3.25 et 3.26.

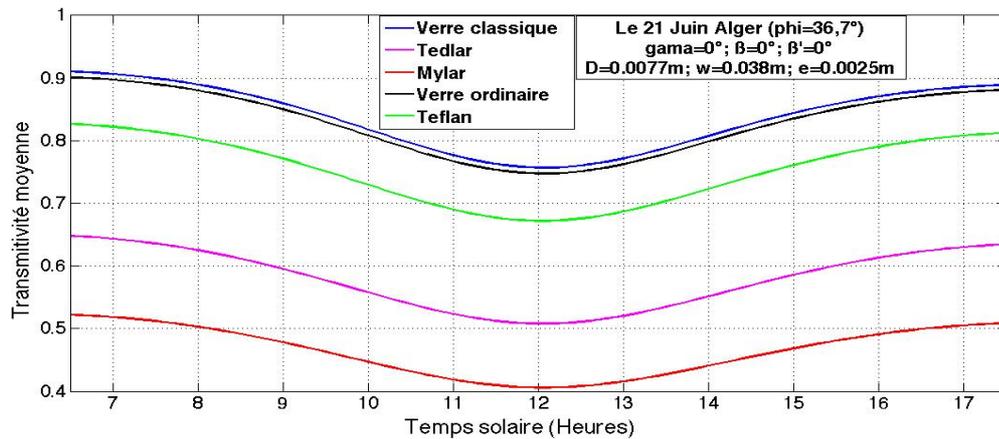


Figure 3.25. Transmittivité moyenne en fonction du type du matériau et le temps solaire pour le 21 Juin.

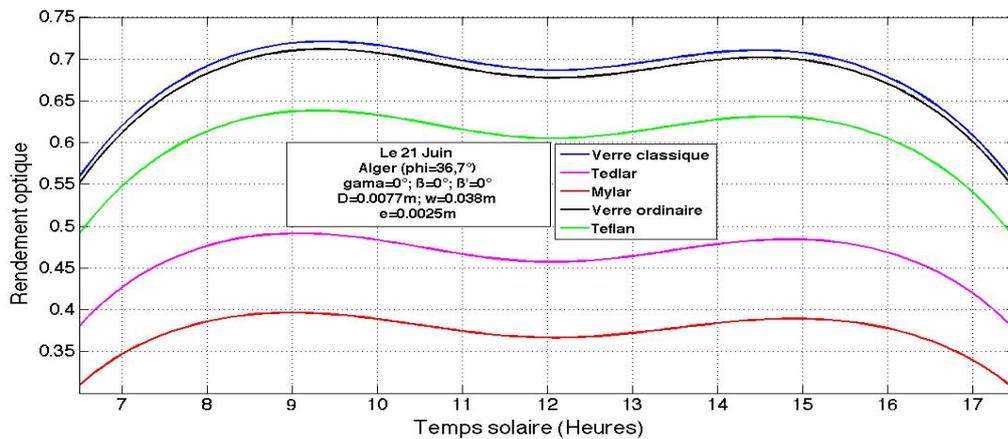


Figure 3.26. Rendement optique en fonction du type du matériau et le temps solaire pour le 21 Juin.

Les figures 3.25 et 3.26 montrent les comparaisons entre les différents matériaux choisis. Nous remarquons que le verre classique et le verre ordinaire présentent de meilleurs résultats du point de vue de la transmittivité moyenne et du rendement optique. En outre, les résultats du Teflan sont légèrement inférieurs.

Pour le Mylar et le Tedlar, la transmittivité moyenne et le rendement optique sont considérablement inférieurs par rapport aux autres matériaux.

3.5 Etude annuelle de transmittivité moyenne et du rendement optique

Dans cette partie, nous allons étudier l'évolution de la transmittivité moyenne et le rendement optique durant toute l'année à azimuth nul ($T_{sv} = \text{Midi}$). En utilisant l'inclinaison et de la déviation azimutale optimales obtenues précédemment.

La simulation a été réalisée sous les conditions suivantes :

- $\varphi = 36,7^\circ$ (Alger).
- Le capteur est orienté plein Sud ($\gamma = 0^\circ$) et incliné à la latitude du lieu.
- L'absorbeur est sur l'inclinaison ($\beta' = 0^\circ$).
- Indice du milieu $n_2 = 1.5$ et le coefficient d'extinction $k = 4$.
- Le diamètre du couvert $D = 0.077\text{m}$.
- L'épaisseur du couvert $e = 0.0025\text{m}$
- La largeur de l'absorbeur $w = 0.038\text{m}$.

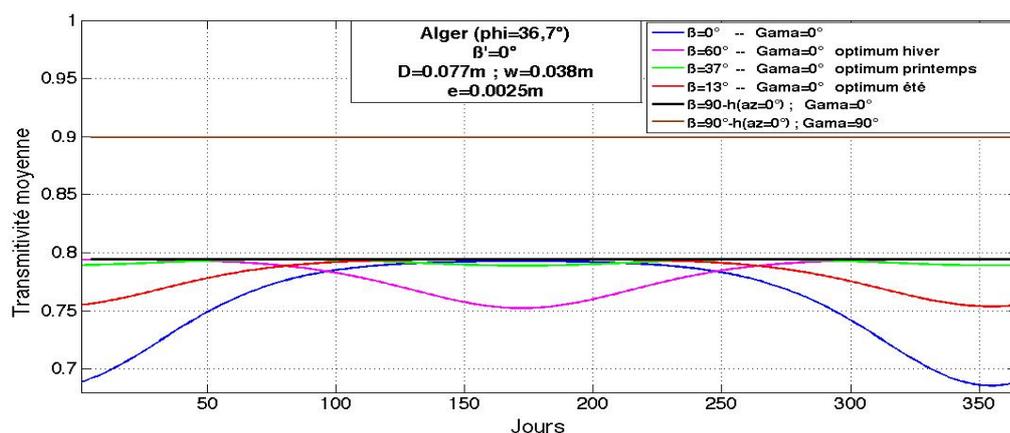


Figure 3.27. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction des jours, de l'inclinaison et de la déviation azimutale à azimuth nul.

La Figure.3.27 représente l'évolution de la transmittivité moyenne durant toute l'année en fonction de l'inclinaison et de la déviation optimale à azimuth nul ($T_{sv} = \text{Midi}$).

La transmittivité moyenne représentée par le tracé bleu ($\beta = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$) est plus importante pour le printemps, l'automne et l'été. Par contre, la transmittivité moyenne est moins importante en hiver.

En inclinant le cylindre pour atteindre l'inclinaison optimale pour le solstice d'hiver à midi (tracé violet, $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 0^\circ$), nous améliorons la transmittivité moyenne pour toute la saison d'hiver. En revanche, la transmittivité moyenne de la saison d'été diminue.

En inclinant le cylindre pour atteindre l'inclinaison optimale du solstice d'été à midi (tracé rouge, $\beta = 13^\circ$, $\gamma = 0^\circ$), nous améliorons légèrement la transmittivité moyenne pour la saison d'hiver. Toutefois, cette transmittivité demeure pratiquement stable pour la saison de printemps, d'été et d'automne.

En inclinant le cylindre pour atteindre l'inclinaison optimale de l'équinoxe à midi (tracé vert, $\beta = 37^\circ$, $\gamma = 0^\circ$), nous améliorons considérablement la transmittivité moyenne pour la saison d'hiver. Les répercussions sur la saison d'été sont négligeables.

En inclinant le cylindre pour atteindre l'inclinaison optimale de chaque journée (tracé noir, $\beta + h = 90^\circ$, $\gamma = 0^\circ$), nous obtiendrons une transmittivité moyenne constante de l'ordre de 80% durant toute l'année et elle est supérieure aux précédentes.

En ajoutant une déviation azimutale, de sorte que l'axe du cylindre soit perpendiculaire à la direction du soleil (tracé marron $\beta + h = 90^\circ$ et $\gamma = 90^\circ$), nous obtiendrons une transmittivité moyenne maximale et constante de l'ordre de 90% durant toute l'année. Cette dernière configuration est celle qui optimise la transmittivité moyenne pour toutes les saisons.

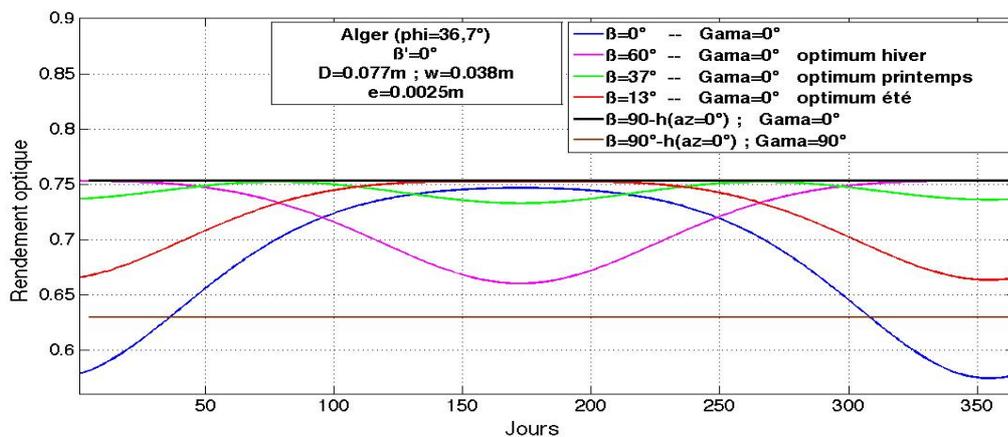


Figure 3.28. Evolution du rendement optique en fonction des jours, de l'inclinaison et de la déviation azimutale à azimut nul.

La **Figure.3.28** représente l'évolution du rendement optique durant toute l'année en fonction de l'inclinaison et de la déviation optimale à azimut nul ($T_{sv} = \text{Midi}$).

Nous constatons la même évolution que celle de la transmittivité moyenne. Un angle d'inclinaison optimal pour le solstice d'hiver améliore le rendement optique pour cette saison, mais détériore celui de la saison d'été (tracé violet).

Une inclinaison optimale pour le solstice d'été n'a pas un grand impact sur le rendement optique de la saison d'hiver (tracé rouge).

Une inclinaison optimale pour les équinoxes améliore le rendement optique de la saison d'hiver (tracé vert). Les répercussions sur la saison d'été sont négligeables.

Une inclinaison optimale pour chaque jour donne un rendement optique maximal et constant de l'ordre de 75% durant toute l'année (tracé noir) et il est supérieur aux précédents.

En ajoutant une déviation azimutale, le rendement optique est détérioré et cela peut être constaté dans la figure précédente (tracé marron). Ceci est expliqué par la perpendiculaire de l'absorbeur qui présente un angle très large par rapport à la direction du soleil à midi solaire vrai.

3.6 Effet de la latitude

Dans cette partie, nous allons étudier l'évolution de la transmittivité moyenne et le rendement optique en fonction de la latitude du lieu. L'intervalle de latitude de l'Algérie se situe entre 17° et 37°.

La simulation a été réalisée sous les conditions suivantes :

- Le capteur est orienté plein Sud ($\gamma = 0^\circ$) et incliné à la latitude du lieu.
- L'absorbeur est sur l'inclinaison ($\beta' = 0^\circ$).
- Indice du milieu $n_2 = 1.5$ et le coefficient d'extinction $k = 4$.
- Le diamètre du couvert $D = 0.077\text{m}$.
- L'épaisseur du couvert $e = 0.0025\text{m}$
- La largeur de l'absorbeur $w = 0.038\text{m}$.

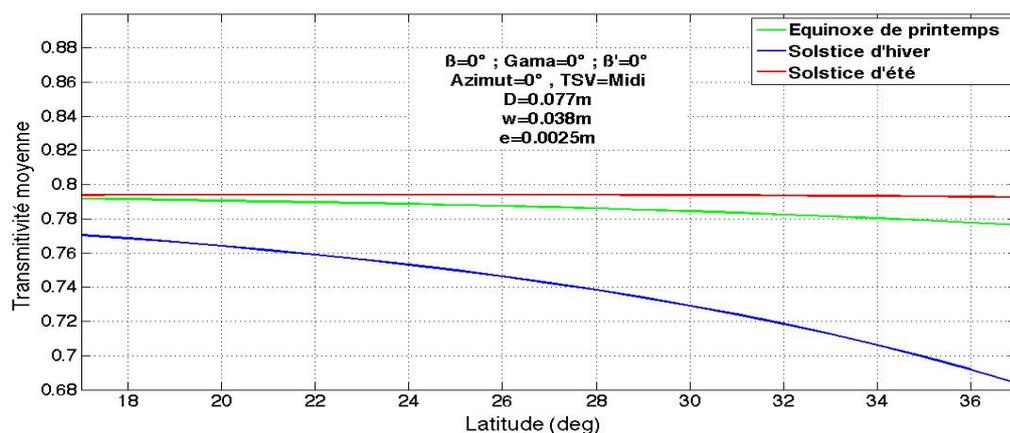


Figure 3.29. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction de la latitude.

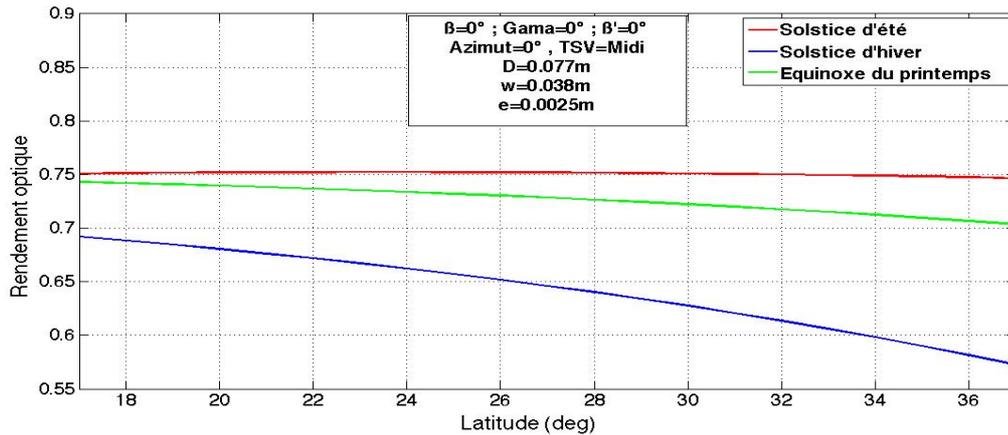


Figure 3.30. Evolution du rendement optique en fonction de la latitude.

Dans la Figure.3.29 et la Figure.3.30, nous constatons que l'effet de la latitude sur la transmittivité moyenne et le rendement optique n'est notable qu'en hiver, avec une diminution de 8% et de 12% pour la transmittivité moyenne et le rendement optique respectivement.

3.7 Effet de l'absorptivité de l'absorbeur

Dans cette partie, nous allons étudier l'évolution du rendement optique en fonction de l'absorptivité de l'absorbeur. Les résultats des tests sont les suivants :

La simulation a été réalisée sous les conditions suivantes :

- $\varphi = 36,7^\circ$ (Alger).
- Le capteur est orienté plein Sud ($\gamma = 0^\circ$) et incliné à la latitude du lieu.
- L'absorbeur est sur l'inclinaison ($\beta' = 0^\circ$).
- Indice du milieu $n_2 = 1.5$ et le coefficient d'extinction $k = 4$.
- Le diamètre du couvert $D = 0.077\text{m}$.
- L'épaisseur du couvert $e = 0.0025\text{m}$
- La largeur de l'absorbeur $w = 0.038\text{m}$.

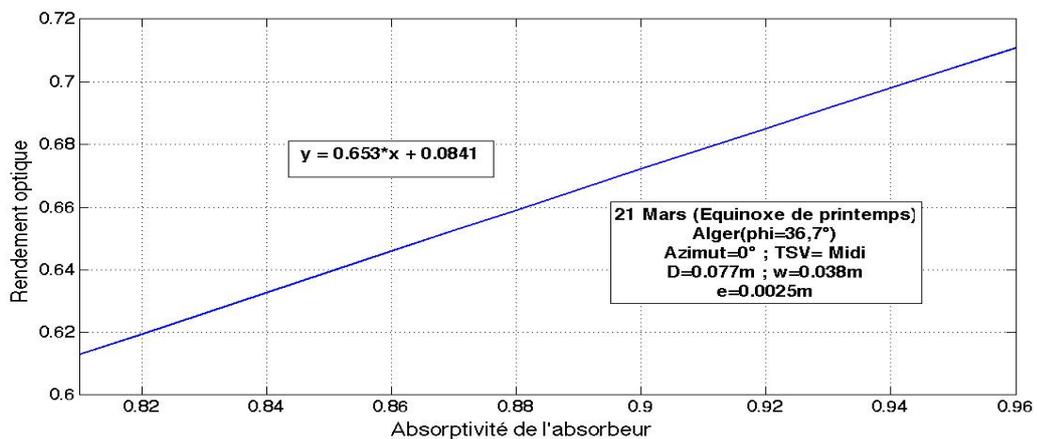


Figure 3.31. Evolution du rendement optique en fonction de l'absorptivité de l'absorbeur pour le 21 Mars.

La (Figure.3.31) représente l'évolution du rendement optique en fonction de l'absorptivité de l'absorbeur à azimut nul (Tsv = Midi). Les gains en rendement optique sont caractérisés par une droite de pente $a = 0.653$, et d'ajustement $b = 0.0841$.

Nous avons également tracé les courbes du rendement optique pour quelques matériaux utilisés dans la fabrication des absorbeurs.

Tableau.3.2. Pouvoir absorbant de quelques matériaux, [1,2].

Matériau	Absorptivité
Chrome noir	0,95
Cuivre oxydé	0,85
Fer oxydé	0,85
Sulfure de nickel et de zinc	0.95
Maxorb	0.97
Nickel noir sur acier galvanisé	0.81

Le (Tableau.3.2) présente l'absorptivité des différents matériaux choisis pour la simulation. Les résultats sont représentés par la (Figure.3.29).

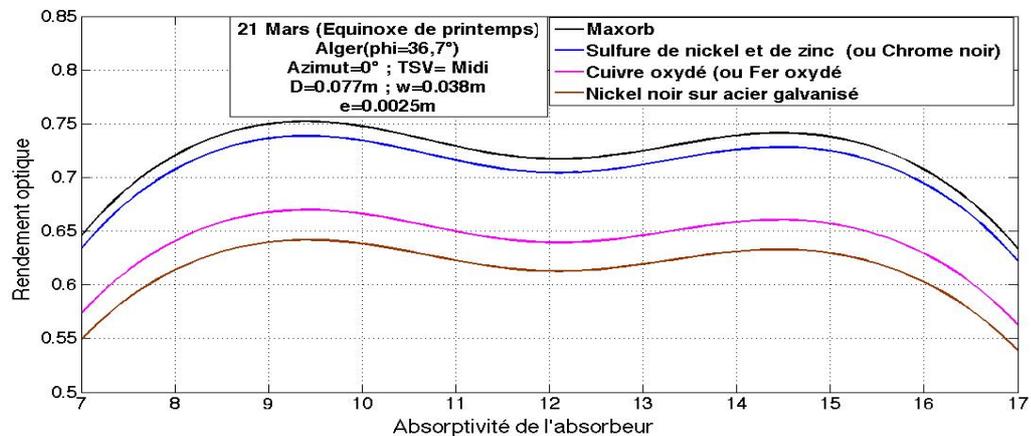


Figure 3.32. Rendement optique en fonction du type du matériau et du temps solaire.

Nous remarquons dans la Figure.3.32 que les matériaux présentant le meilleur rendement optique sont le Maxorb, le chrome noir et le sulfure de nickel et de zinc.

Conclusion

Nous avons comparé nos résultats dans ce chapitre par l'intermédiaire d'autres travaux réalisés sur le même thème (Felske 1979, Beckman 1985 et Merzouk 1986, 1987, 2003 et 2014). Différents effets influant sur les performances optiques d'un vitrage cylindrique ont été étudiés et interprétés dans ce chapitre également.

Dans ce chapitre, la simulation des effets nous a permis d'obtenir l'optimal des performances optiques d'un vitrage cylindrique en utilisant les configurations suivantes :

- La déviation azimutale est optimale lorsque l'axe du cylindre est orienté de façon qu'il soit perpendiculaire à la direction du soleil.
- L'optimum des performances optiques d'un vitrage cylindrique par rapport à l'inclinaison est atteint lorsque le cylindre présente un angle d'inclinaison complémentaire à la hauteur du soleil. Pour un calage annuel adapté, l'inclinaison optimale de l'équinoxe ($\beta=37^\circ$) donne un meilleur résultat pour toutes les saisons.
- L'optimum des performances optiques d'un vitrage cylindrique par rapport aux propriétés optiques des matériaux, est atteint lorsque les facteurs d'atténuation du vitrage sont réduits et la fraction d'absorptivité de l'absorbeur est élevée.
- L'optimum des performances optiques d'un vitrage cylindrique par rapport à la latitude du lieu, est atteint pour l'Algérie pour les sites qui se trouvent plus au Sud.
- L'optimum des performances optiques d'un vitrage cylindrique par rapport aux combinaisons des paramètres d'orientation et d'inclinaison en même temps, a été jugé partiellement efficace et insuffisant.

Conclusion générale et perspective

Conclusion

Pour étudier l'effet des paramètres influant sur les performances optiques d'un vitrage cylindrique muni d'un absorbeur plan, nous avons réalisé une étude bibliographique en présentant l'essentiel des travaux publiés sur le même thème. Le modèle mathématique permettant le calcul de la transmittivité moyenne et le rendement optique d'un capteur à couvert cylindrique en se basant sur les travaux de J.D Felske et M. Merzouk a été établi.

Pour la suite, nous avons élaboré un programme sous MATLAB qui nous permet de déterminer la position du soleil par rapport à un point sur terre, d'estimer l'éclairement solaire selon le modèle simplifié de Capderou et de calculer les performances optiques d'un vitrage cylindrique.

Le programme a été étendu pour l'estimation de l'effet de différents paramètres (déviations azimutales, inclinaison, latitude, propriétés optiques du vitrage et de l'absorbeur).

Les résultats obtenus par la simulation numérique ont été présentés sous forme graphique, puis nous les avons interprétés en nous appuyant sur les travaux présentés dans l'étude bibliographique.

En un troisième lieu, nous avons déterminé le meilleur montage adapté aux saisons pour des applications de cylindro-parabolique ou de chauffage sanitaire. Nous en sommes sortis avec la conclusion que le montage Nord-Sud avec inclinaison convient pour toutes les saisons excepté celle de l'hiver. Saison pour laquelle le montage Est-Ouest convient le mieux.

Pour l'effet des propriétés optiques du vitrage et de l'absorbeur, nous avons confirmé que plus les paramètres d'atténuation sont importants et plus les performances optiques sont réduites. Par ailleurs, plus l'absorptivité de l'absorbeur est proche de l'unité, et plus le rendement optique est important.

Pour l'effet de la position géographique, nous avons conclu que plus on est au sud de l'Algérie et plus les performances optiques du vitrage sont importantes.

Nous avons terminé l'étude avec l'exposition des limites atteintes par nos simulations et nous proposons des perspectives pour compléter ce modeste travail.

Perspectives

Pour la poursuite du présent travail, il nous semble intéressant de considérer les cas suivants :

Une étude qui porte sur l'effet d'inclinaison de l'absorbeur combinée avec la déviation azimutale et l'inclinaison du vitrage cylindrique permettant de déterminer l'orientation et les inclinaisons optimales.

Une étude expérimentale impliquant la thermique et l'optique apportera sans aucun doute des résultats plus fiables qui permettent la détermination de l'optimum des paramètres étudiés.

Annexe 1

Eclairement solaire

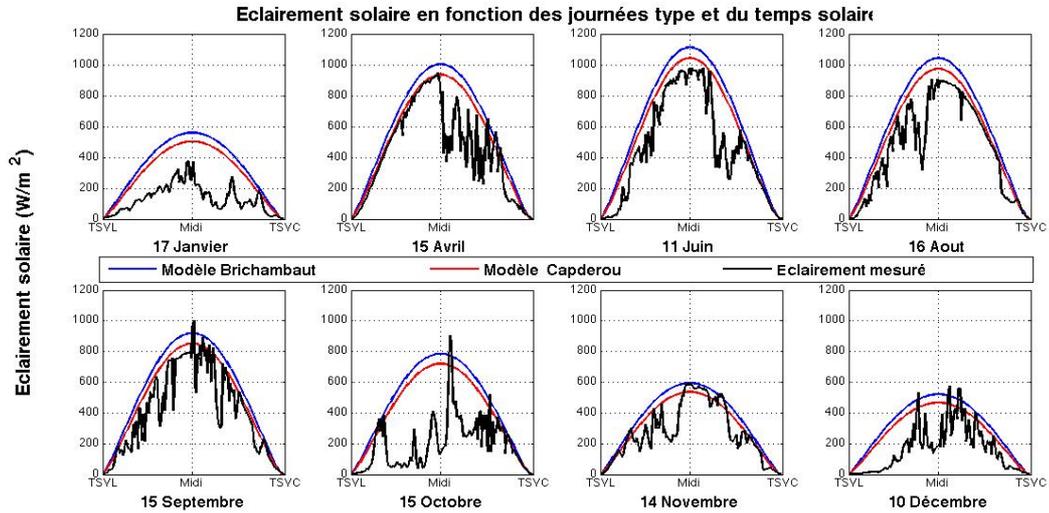


Figure.A.1. comparaison entre l'éclairement solaire mesuré et l'éclairement selon le modèle de Brichambaut et de Capderou et les données du CDER.

Effet de la déviation azimutale

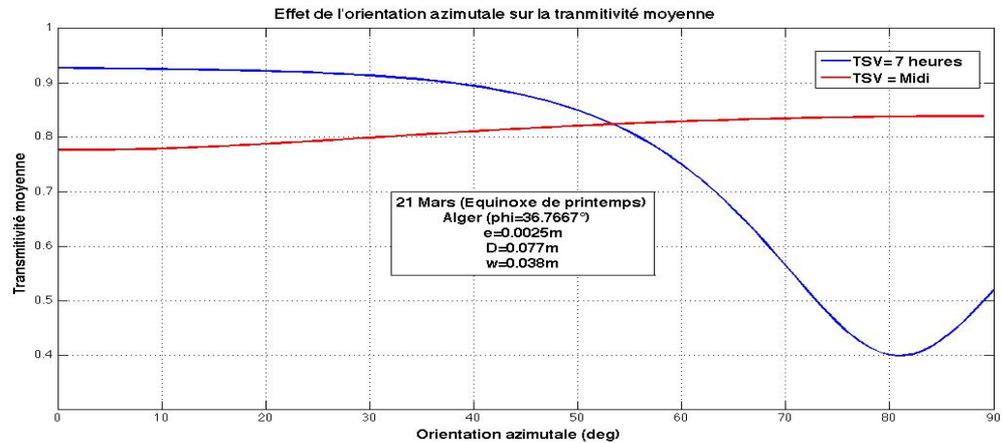


Figure.A.2. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction de la déviation azimutale et le temps solaire pour l'équinoxe de printemps.

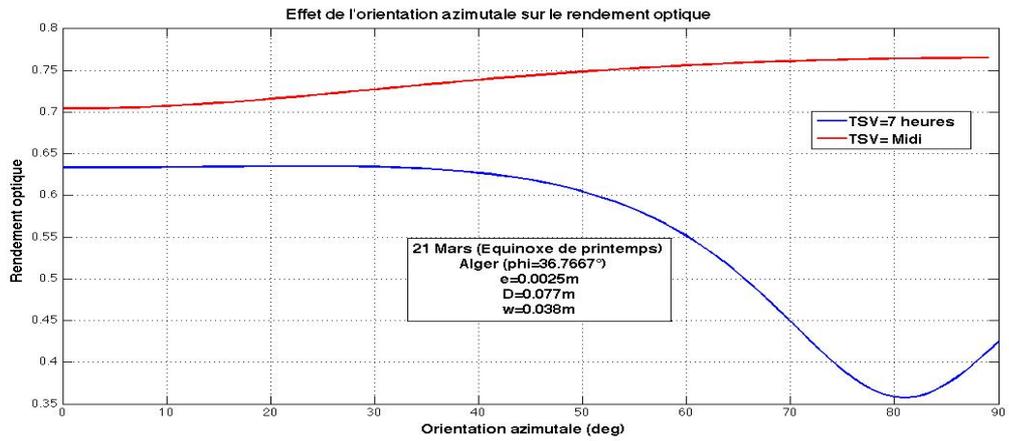


Figure.A.3. Evolution du rendement optique en fonction de la déviation azimuthale et le temps solaire pour l'équinoxe de printemps.

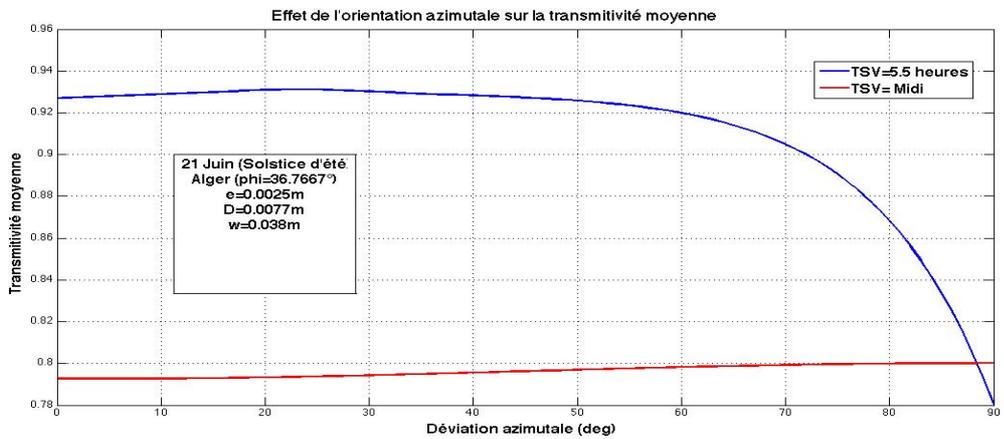


Figure.A.4. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction de la déviation azimuthale et le temps solaire pour le solstice d'été.

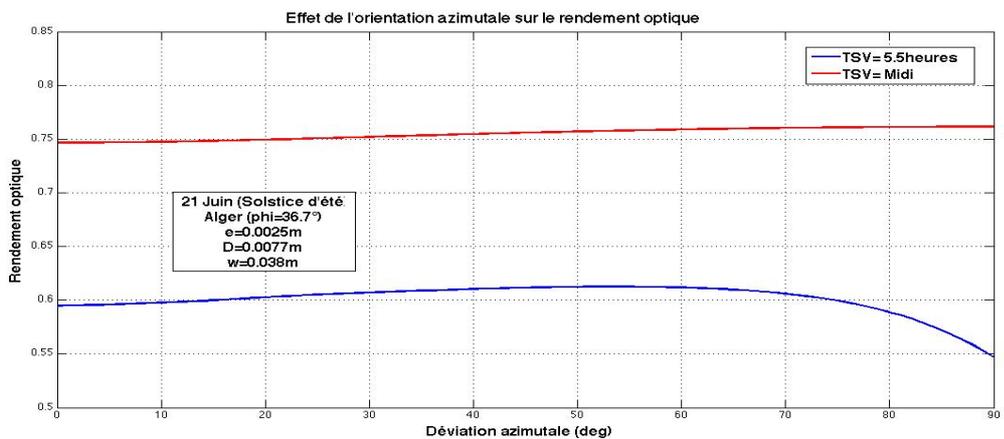


Figure.A.5. Evolution du rendement optique en fonction de la déviation azimuthale et le temps solaire pour le solstice d'été.

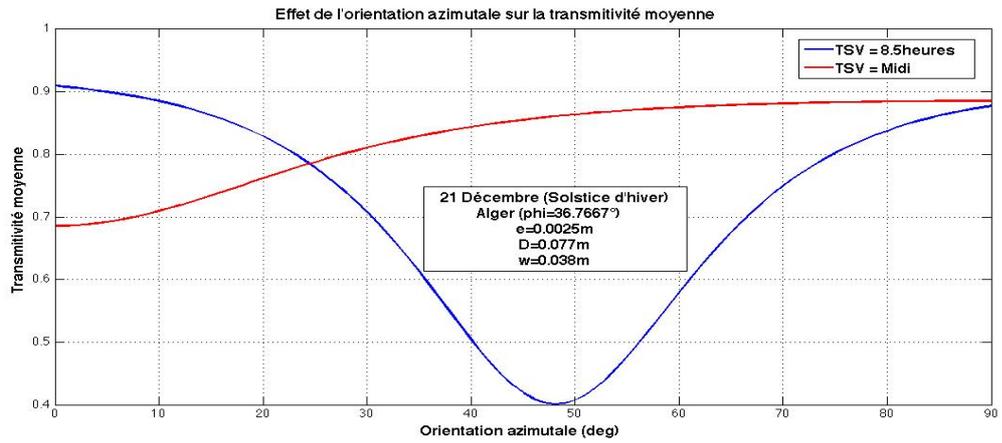


Figure.A.6. Evolution de la transmittivité moyenne en fonction de la déviation azimutale et le temps solaire pour le solstice d'hiver.

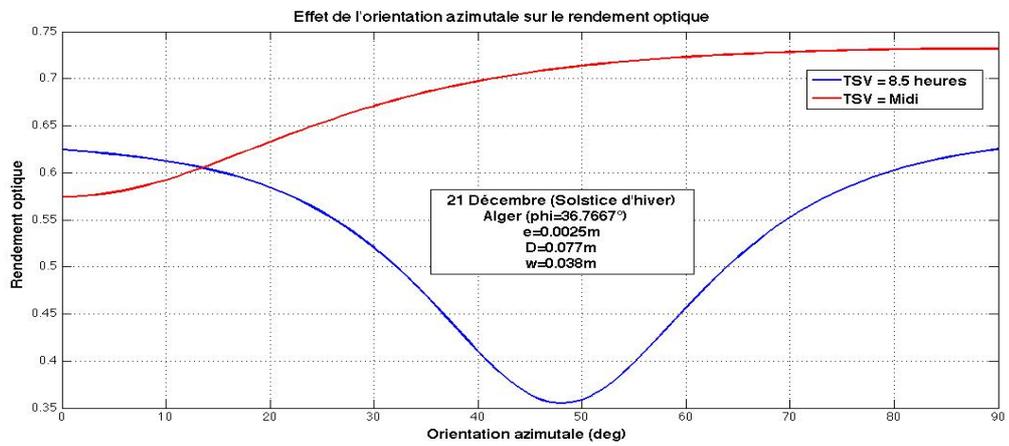


Figure.A.7. Evolution du rendement optique en fonction de la déviation azimutale et le temps solaire pour le solstice d'hiver.

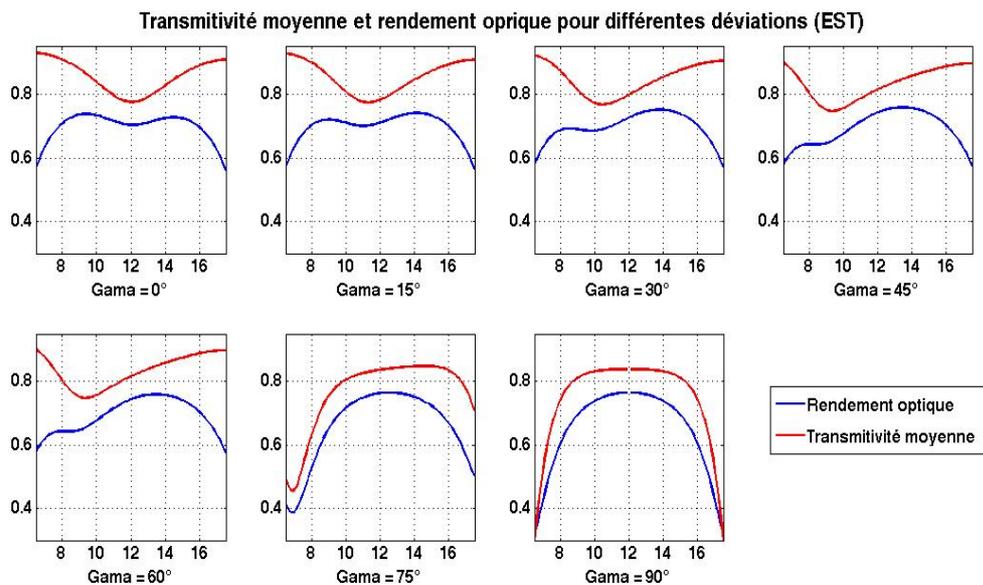


Figure.A.8. Transmittivité moyenne et rendement optique en fonction du temps solaire et l'angle d'orientation azimutal pour le 21 Mars.

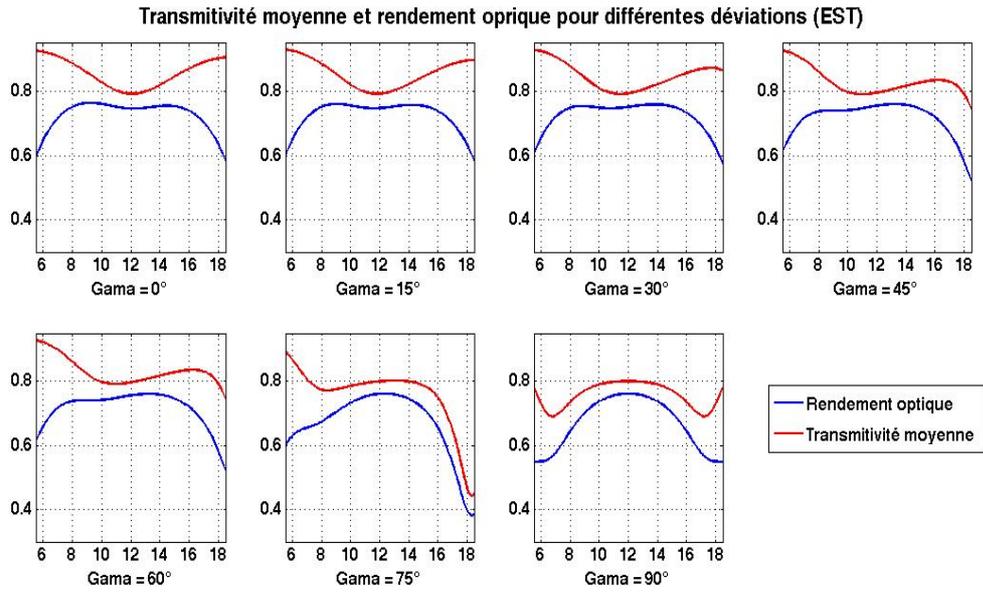


Figure.A.9. Transmittivité moyenne et rendement optique en fonction du temps solaire et l'angle d'orientation azimuthal pour le 21 Juin.

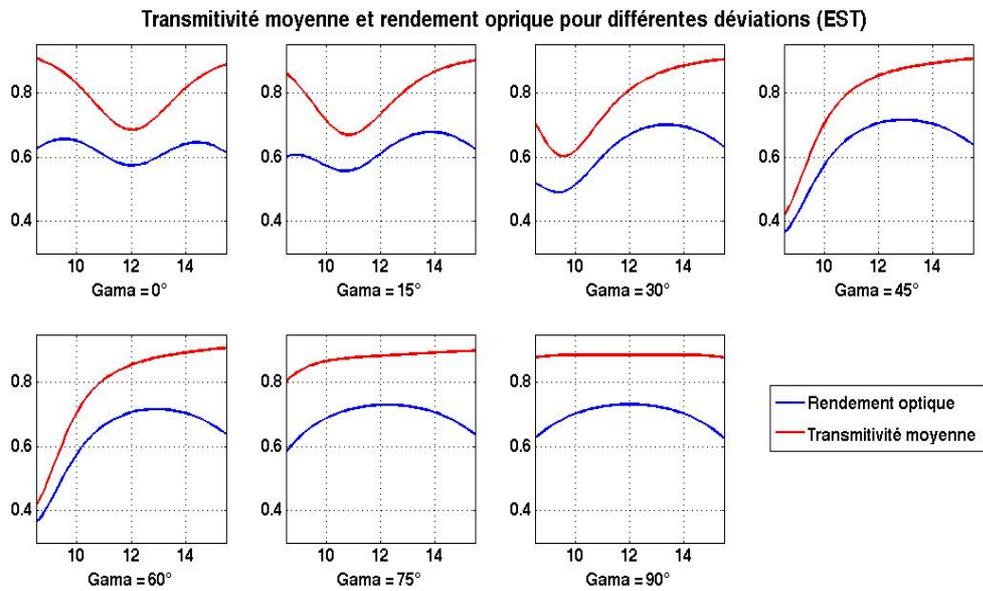


Figure.A.10. Transmittivité moyenne et rendement optique en fonction du temps solaire et l'angle d'orientation azimuthal pour le 21 Décembre.

Effet de l'inclinaison

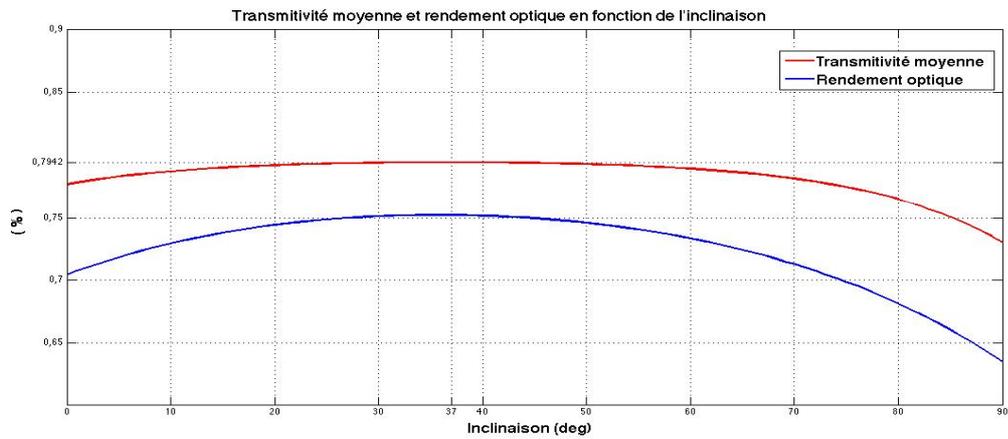


Figure.A.11. Transmittance moyenne et rendement optique en fonction de l'inclinaison pour la journée du 21 Mars

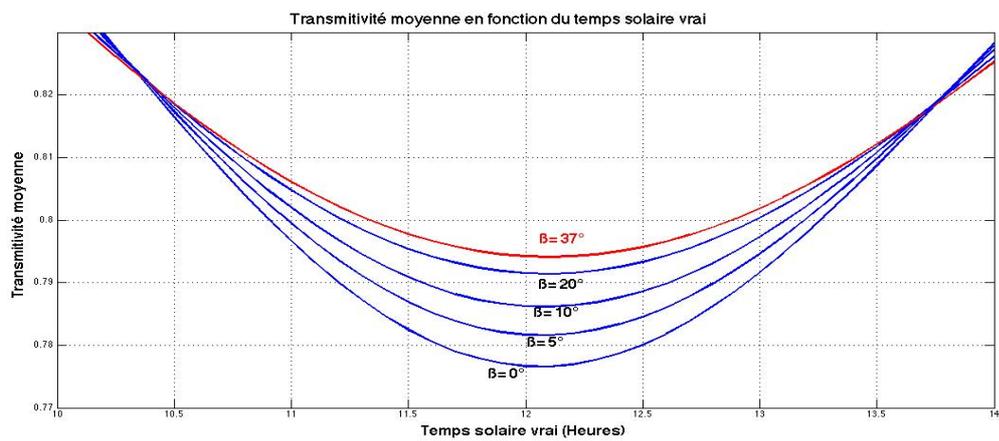


Figure.A.12. Transmittance moyenne en fonction de l'inclinaison et du temps solaire pour la journée du 21 Mars

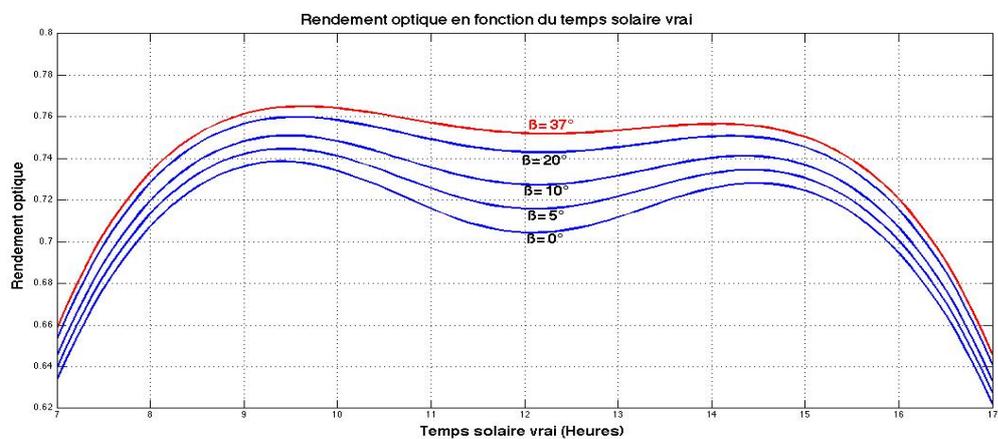


Figure.A.13. Rendement optique en fonction de l'inclinaison et du temps solaire pour la journée du 21 Mars

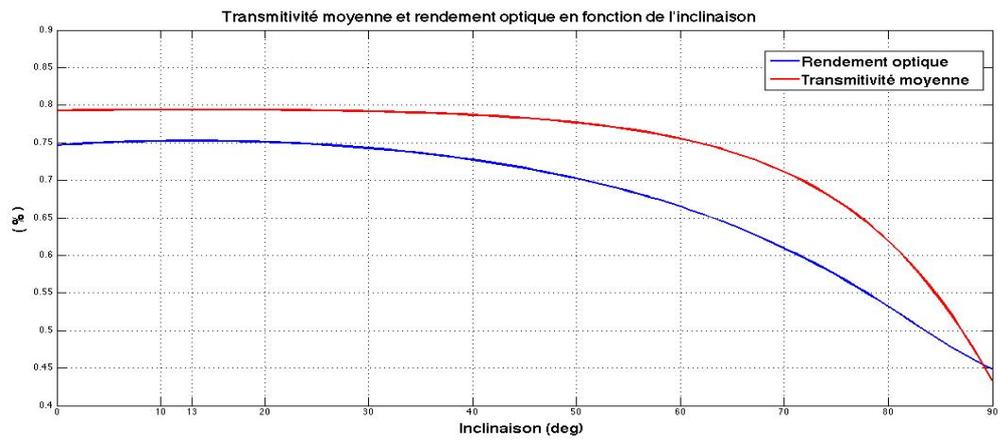


Figure.A.14. Transmittivité moyenne et rendement optique en fonction de l'inclinaison pour la journée du 21 Juin

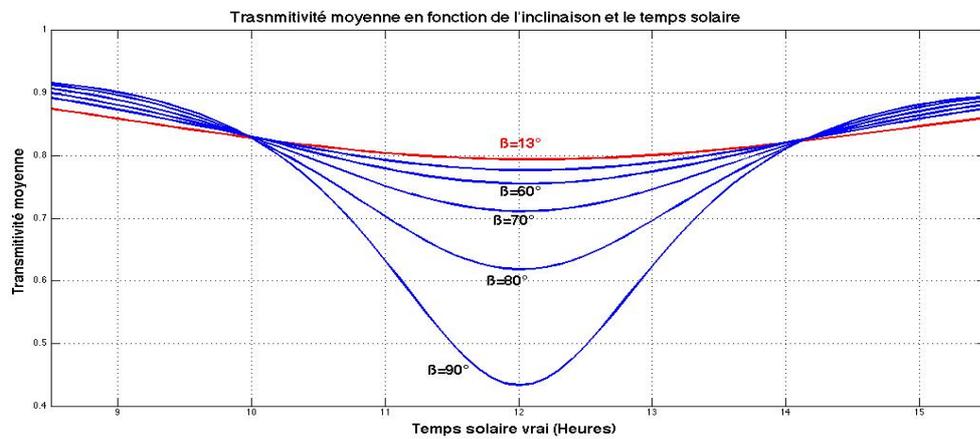


Figure.A.15. Transmittivité moyenne en fonction de l'inclinaison et du temps solaire pour la journée du 21 Juin

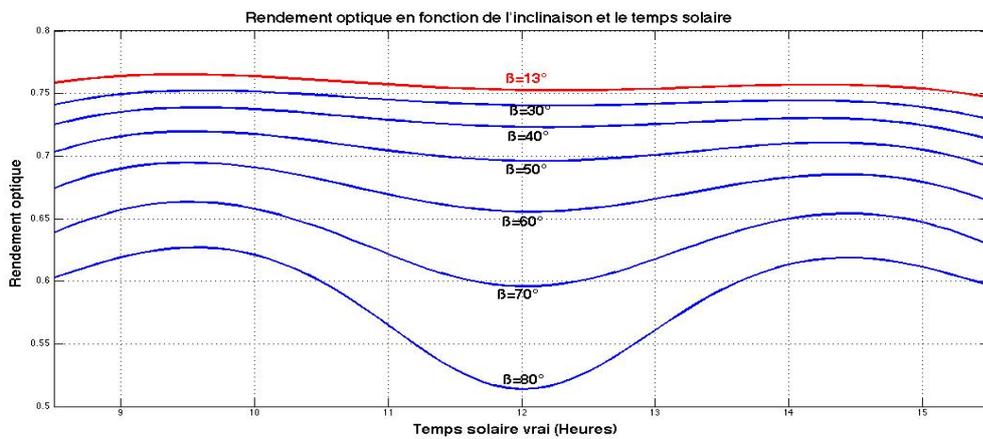


Figure.A.16. Rendement optique en fonction de l'inclinaison et du temps solaire pour la journée du 21 Juin

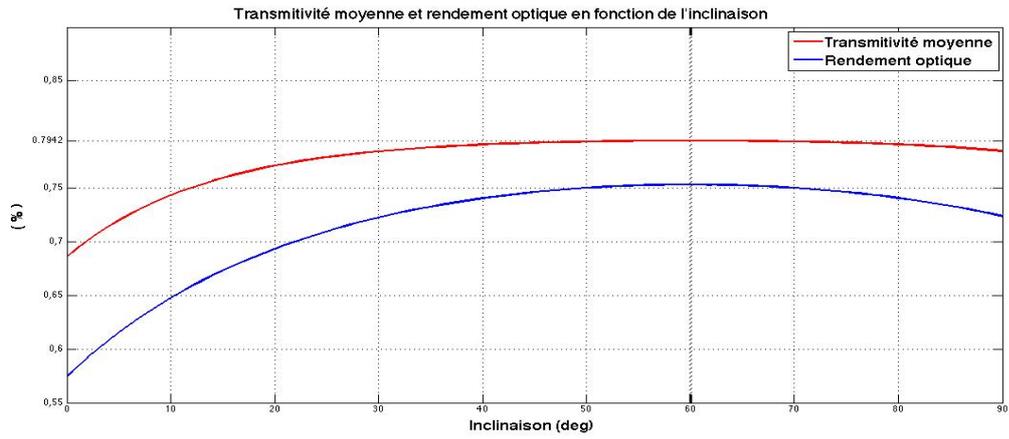


Figure.A.17. Transmittivité moyenne et rendement optique en fonction de l'inclinaison pour la journée du 21 Décembre.

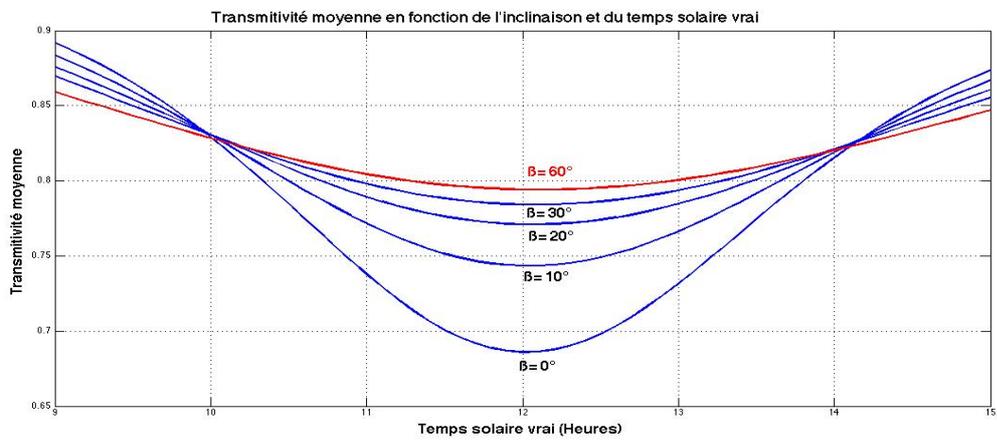


Figure.A.18. Transmittivité moyenne en fonction de l'inclinaison et du temps solaire pour la journée du 21 Décembre.

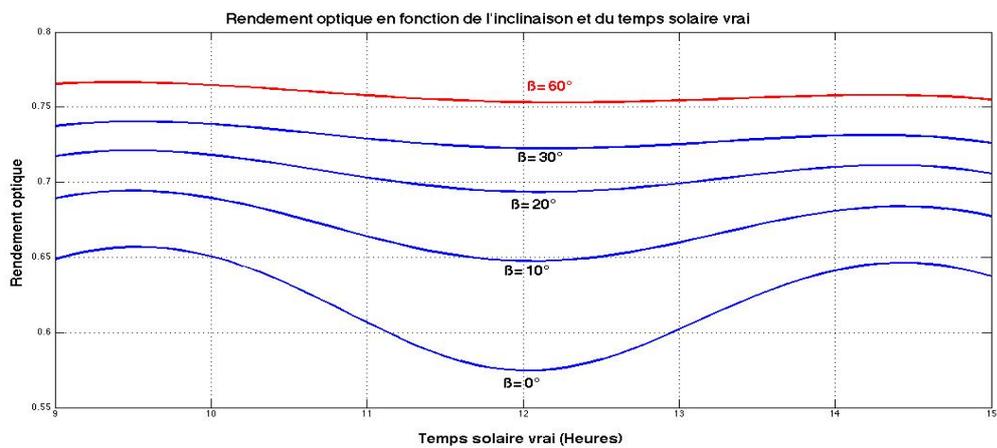


Figure.A.19. Rendement optique en fonction de l'inclinaison et du temps solaire pour la journée du 21 Décembre.

Annexe 2

Résultats du calcul d'intégral permettant de déterminer le meilleur montage pour l'équinoxe du printemps et les deux solstices.

Montage		21 Mars	21 Juin	21 Décembre
Montage N-S	Transmittivité globale	8,5867	10,3143	4,7633
	Rendement optique global	7,1625	8,9139	3,7876
Montage E-O	Transmittivité globale	7,8252	9,1567	5,4018
	Rendement optique global	6,7822	8,1959	4,3215
Montage N-S Avec inclinaison	Transmittivité globale	8,5795	10,3316	4,9812
	Rendement optique global	7,4841	8,8546	4,6254

Tableau.A.2. Résultats d'intégration pour la partie effet du montage.

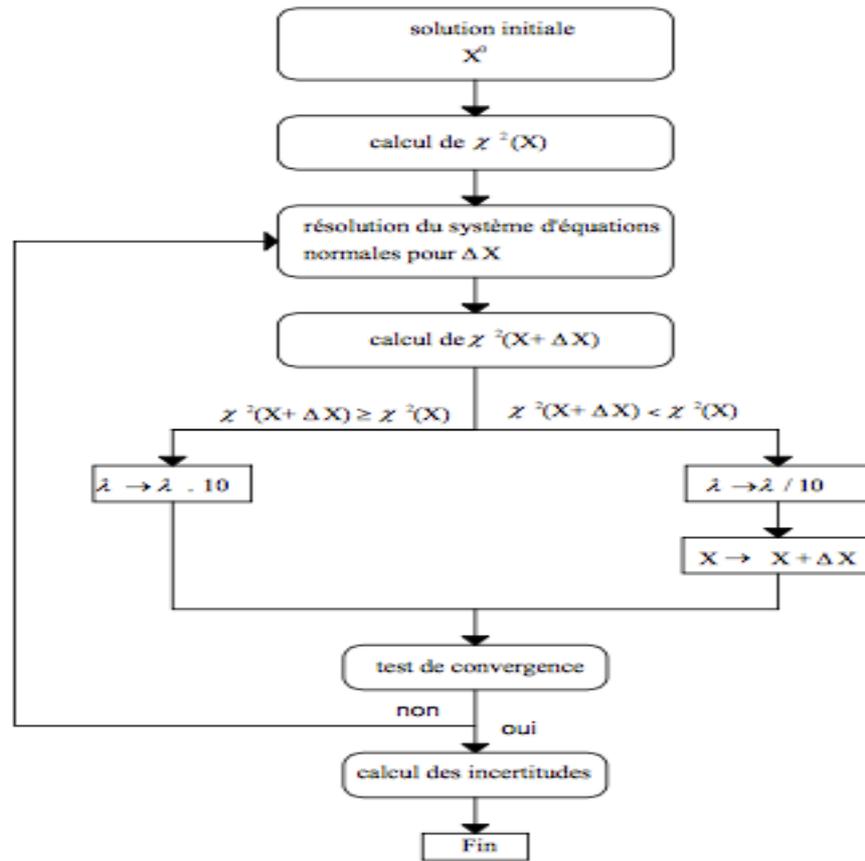


Figure.A.20. Organigramme de l'algorithme de Levenberg et Marquart.

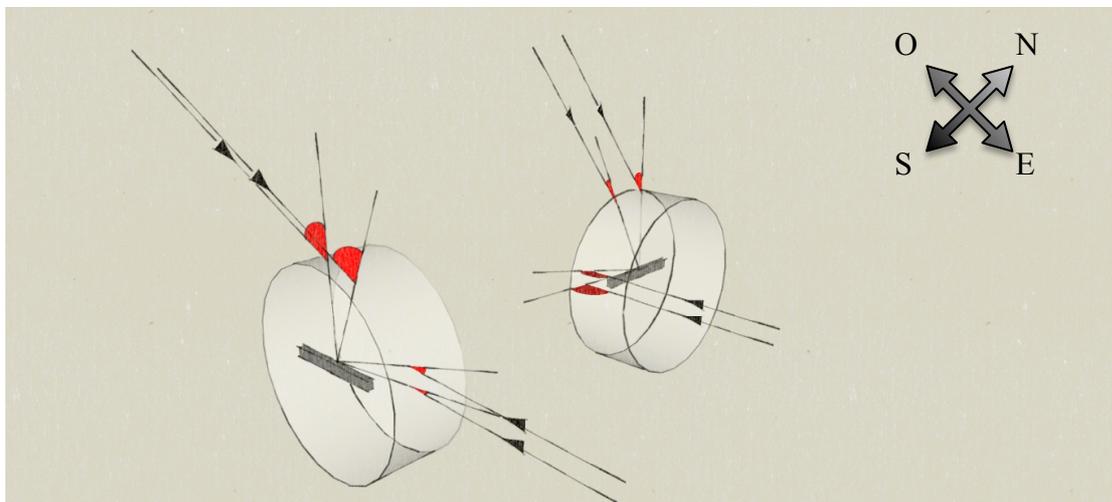


Figure.A.21. Angle d'incidence par rapport au montage.

Références

- [1] Duffie J.A. and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition, Ed. J. Willey & sons, USA 2013.
- [2] Bernard R., G. Menguy et M. Shwartz, Le rayonnement solaire – Conversion thermique et applications, 2^{ème} Edition, Ed. Technique et Documentation, Paris, 1980.
- [3] Sfeir A.A. et G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires, Ed. Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [4] Felske J.D., Analysis of an evacuated cylindrical solar collector – Technical note, Solar Energy, Vol. 22, pp. 567-570, 1979.
- [5] Merzouk M., Contribution à la détermination des performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires sous vide en régime permanent, Thèses de Magister, Alger 1986.
- [6] Merzouk M., R. Lazzarin et N. Kasbadji, Etude expérimentale de l'angle d'incidence modifié pour un capteur solaire à tubes sous vide selon les différentes possibilités de montage, Journée internationale de la Thermique, Lyon, 1987.
- [7] Merzouk M., P.R. Bala, M. Feidt and B. Benyoucef. Derivation of a tube solar collector transmittance for beam and diffuse radiation, International Journal of Thermal Sciences 42, pp. 317-322, 2003.
- [8] Merzouk M. et N.K. Merzouk, Performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires, Editions Universitaires Européennes, 2014.
- [9] Hottel H.C., A simple method for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres, Solar Energy, vol. 18, pp.129, Pergamon press 1976.
- [10] Capderou M., Atlas solaire de l'Algérie – Modèles théoriques et expérimentaux, OPU, mai 1988.
- [11] Brichambaut P. et C. Vauge, Le gisement solaire. Evaluation de la ressource énergétique, Technique et Documentation, Paris 1982.
- [12] Liu B.Y.H. and R.C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct diffuse and total solar radiation, Solar Energy, vol. 4, N°3, pp. 1-19, 1960.