

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
Département de Mécanique

MEMOIRE
Pour Obtenir le Diplôme
de
MAGISTERE
EN
Génie Mécanique
Option Energétique

Présenté par

HAZEM AHMED

Ingénieur d'État en Mécanique

***Etude de l'influence des rideaux des locaux
sur la consommation énergétique***

Mémoire soutenu le Juin 2008

Devant le jury d'examen :

Dr. SI AMEUR	Mohamed	Professeur	Université de BATNA	Président
Dr. BOUGRIOU	Cherif	Maître de conférences	Université de BATNA	Rapporteur
Dr. RAHAL	Samir	Maître de conférences	Université de BATNA	Examineur
Dr. MAYOUF	Si Abdellah	Maître de conférences	Université de CONSTANTINE	Examineur

Remerciements

*En premier lieu, je tiens à manifester ma sincère reconnaissance envers mon encadreur, sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour. Je remercie monsieur docteur **BOUGRIOU Cherif**, maître de conférences à l'université de Batna, pour l'aide précieuse et la confiance qu'il m'a accordé durant ces années de mémoire, et qu'il m'accorde encore aujourd'hui. Je voudrais aussi le remercier pour son esprit passionné et enthousiaste qui rendait nos discussions de travail agréables et studieuses. La qualité de ce travail doit beaucoup à ce caractère entier.*

*J'adresse mes remerciements au docteur **SI AMEUR Mohammed**, professeur à l'université de Batna pour m'avoir fait l'honneur et le plaisir de présider mon jury.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers monsieur le docteur **MAYOUF SI Abdallah**, maître de conférence à l'université de Constantine, pour avoir bien voulu juger ce modeste travail et participer à cette commission et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.*

*Je souhaite remercier cordialement monsieur le docteur **RAHAL Samir**, maître de conférence à l'université de Batna, pour l'honneur qu'il me fait de participer au jury.*

A mes amis de toujours : Ali, Mazoz, Adel, Halim....

Et Bien sûr, j'ai une pensée pour ma famille...à mes chers parents, mes frères et soeurs que j'aime profondément. Père, merci pour ce que tu es, pour ce que tu as fait pour moi, et pour les milliers de fois où tu as su trouver les mots justes pour m'encourager. Mère, je ne peux trouver de mots plus doux...Cette réussite, aujourd'hui, est la vôtre, merci.

Ma dernière pensée, qui n'est pas la moindre, ira à ma femme et mes enfants...je tiens à les remercier sincèrement pour leurs supports dans les moments difficiles et pour leurs encouragements. C'est à eux que j'ai arrivé là.

DEDICACES

*A mes parents
A ma femme
A Haithem et Hala
A mon cher oncle Mohamed
qui nous a quitté trop tôt
Je dédie ce mémoire.*

SOMMAIRE

Nomenclature

INTRODUCTION	<i>i</i>
---------------------------	----------

Chapitre I : Généralités

I.1. LES VITRAGES :	<i>1</i>
I.1.1. Apparition du verre :	<i>1</i>
I.2. LES VITRAGES MODERNES :	<i>2</i>
I.3. LES PRINCIPAUX TYPES DE VITRAGES :	<i>2</i>
I.3.1. Le simple vitrage (Verre recuit) :	<i>2</i>
I.3.2. Le verre armé :	<i>2</i>
I.3.3. Le verre trempé :	<i>3</i>
I.3.4. Le verre durci :	<i>3</i>
I.3.5. Le verre feuilleté :	<i>3</i>
I.3.6. Le double vitrage :	<i>3</i>
I.3.7. Le triple vitrage :	<i>4</i>
I.3.8. Le vitrage chromogène :	<i>4</i>
I.4. L'INFLUENCE DES VITRAGES SUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE :	<i>4</i>
I.4.1. La lumière naturelle :	<i>4</i>
I.4.2. Les apports solaires :	<i>4</i>
I.4.3. L'isolation thermique :	<i>5</i>
I.5. FENETRES A HAUT RENDEMENT ENERGETIQUE :	<i>5</i>
I.5.1. Le double vitrage à basse émissivité (ou à haut rendement) :	<i>5</i>
I.5.2. Remplissage au gaz :	<i>7</i>
I.6. LES PROTECTIONS SOLAIRES :	<i>9</i>
I.6.1. Les différents types de protections solaires rencontrées :	<i>9</i>
I.6.2. La problématique des protections solaires :	<i>10</i>
I.7. PROPRIETES PHYSIQUES DES SYSTEMES DE PROTECTION SOLAIRE :	<i>11</i>
I.7.1. Coefficient de transmission thermique :	<i>11</i>
I.7.2. Coefficient de transmission solaire et facteur solaire des protections solaires :	<i>11</i>
I.7.3. Coefficient de transmission lumineuse :	<i>12</i>
I.8. INFLUENCE DES PROTECTIONS SOLAIRES SUR LES CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET SUR L'ECLAIRAGE NATUREL DISPONIBLE DANS UN BATIMENT :	<i>13</i>
I.8.1. Les charges de chauffage et de refroidissement :	<i>13</i>

I.8.2. Les consommations annuelles d'énergie y compris l'éclairage artificiel :.....	14
I.9. METHODES DE CALCUL :	14
I.10. SOLUTIONS TECHNIQUES :	14
I.10.1. Protection solaire intégrée au vitrage :.....	15
I.10.2. La protection solaire par le vitrage :.....	15
I.10.3. Le film de protections solaires :.....	16
I.10.4. Les protections extérieures :.....	16
I.10.5. Les protections intérieures :.....	17
I.11. LES DIFFERENTS TYPES DE FAÇADES :	17
I.11.1. La ventilation entre le verre et la protection solaire :.....	17
I.11.2. Différents modes de la ventilation naturelle :.....	18
I.12. LES DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENT :	22
I.12.1. Azimut :.....	23
I.12.2. Déclinaison :.....	24
I.12.3. Hauteur solaire :.....	25
I.12.4. Heure solaire :.....	25
I.12.5. L'équation du temps :.....	26
I.12.6. Équateur :.....	26

Chapitre II : Propriétés physiques

II.1. LES MECANISMES DU TRANSFERT DE CHALEUR :	29
II.1.1. La conduction :.....	29
II.1.2. La convection :.....	29
II.1.3. La radiation :.....	29
II.2. LES FACTEURS CARACTERISANT LES ECHANGES THERMIQUES A TRAVERS UN VITRAGE : 31	31
II.2.1. coefficient d'échange thermique globale U :.....	31
II.2.2. Le facteur solaire d'un vitrage (FS) :.....	32
II.2.3. Le facteur solaire de la protection solaire (SC).....	35
II.3. PROPRIETES OPTIQUE SOLAIRES DES VERRES :	36
II.3.1. La transmittivité :.....	36
II.3.2. La réflectivité :.....	37
II.3.3. L'absorption :.....	37
II.3.4. L'émissivité :.....	37
II.3.5. Propriétés optique pour simple vitrage sans couche de revêtement :.....	38

II.3.6. Propriétés optique pour simple vitrage avec une couche de revêtement :.....	41
II.3.7. Propriétés optique pour système à multi couches de verre :.....	42

Chapitre III : L'éclairage naturel

III.1. UNITES PHOTOMETRIQUES :	47
III.1.1. Le flux lumineux :.....	47
III.1.2. L'intensité lumineuse :.....	47
III.1.3. L'éclairage :	47
III.1.4. La luminance :.....	48
III.1.5. L'angle solide :.....	48
III.2. EVALUATION DES METHODES SIMPLIFIEES DE PREDETERMINATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL :	48
III.2.1. La méthode des diagrammes de Waldran :	49
III.2.2. La méthode B.R.S :.....	49
III.2.3. La méthode du facteur du jour (FLJ) :	49
III.2.4. La norme Belge :.....	49
III.2.5. La méthode de l'éclairage moyen sur un plan de travail :	50
III.3. DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL. :	50
III.3.1. La luminance du soleil, du ciel et du sol :.....	50
III.3.2. Luminance du ciel et du soleil sur les façades verticaux :	52
III.3.3. Luminance reflétée par le sol sur les surfaces verticales :	53
III.3.4. Transmittivité du système de la fenêtre :	54
III.4. INTENSITES DE L'ECLAIRAGE INTERIEUR RECOMMANDE :	58
III.5 DESCRIPTION DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS :	58
III.5.1. DETERMINATION DE L'ANGLE D'OBSTRUCTION :	60
III.6. RESULTATS ET DISCUSSION DE L'ECLAIREMENT INTERIEUR :	61

Chapitre IV : Formulation mathématique

IV.1. DESCRIPTION DU LOCAL :	67
IV.1.1. Coefficient du transfert de chaleur pour la surface extérieure et intérieur:	67
IV.1.2. Température extérieure :	68
IV.2. LA FORMULATION MATHEMATIQUE:	68
IV.2.1. Méthode des différences finies :	68

IV.2.1.1. Les conditions aux limites :	69
IV.2.1.2. Solution numérique.....	70
IV.2.1.3. Discrétisation des équations.....	71
IV.2.2. Résolution des équations du bilan thermique des verres :	73
IV.2.2.1. Hypothèses simplificatrices :	74
IV.2.2.2. Les équations du bilan thermique pour le double vitrage :	74
IV.2.2.3. Convection naturelle dans les cavités vitrées :	75
IV.2.2.4. Détermination du coefficient du transfert convectif entre le deux verres h_c :	75
IV.2.2.5. méthode de résolution du système d'équations du bilan thermique :	78
IV.3. LES EQUATIONS DU BILAN THERMIQUE POUR LE DOUBLE VITRAGE AVEC UNE PROTECTION SOLAIRE :	79
IV.3.1. Détermination du profil de la température :	81
IV.3.2. Equation de la différence des pressions :	82
IV.3.3. Expression de la vélocité de l'air dans le gap :	86
IV.3.4. Le flux de chaleur dans le canal.....	88

Chapitre V : Résultats et interprétations

V.1. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :	90
V.1.1.Effet de l'épaisseur :	90
V.1.2.Effet de la direction :	93
V.1.3.Effet des protections solaires :	97
V.1.4.Effet des gaz de remplacement et de l'espace intercalaire :	119
<i>Conclusion générale et perspectives futures</i>	<i>122</i>

Références bibliographiques

Annexes

Nomenclature

Notations latines

A	: Surface	m^2
A_{total}	: Absorption totale	
C_p	: Chaleur spécifique à pression constante	$J/kg \cdot K$
d	: Ecartement entre les deux verres	m
e	: Epaisseur du verre	m
E_c	: Luminance du plafond	<i>Lux</i>
E_{vw}	: Luminance de la paroi de la fenêtre	<i>Lux</i>
E_v	: Luminance du mur	<i>Lux</i>
E_p	: Luminance du plan de travail	<i>Lux</i>
E_{DN}	: Rayonnement solaire direct normal	W/m^2
FS	: Facteur solaire du verre	
g	: Accélération de la gravité	m/s^2
H	: Hauteur	m
h	: Coefficient du transfert de chaleur convectif	$W/m^2 \cdot K$
I_r	: Rayonnement solaire diffus de la part du sol	W/m^2
I_{dif}	: Rayonnement solaire diffus	W/m^2
I_{dir}	: Rayonnement solaire direct	W/m^2
I_{gl}	: Rayonnement solaire global	W/m^2
k	: Conductivité thermique du verre	$W/m \cdot K$
L	: Latitude du lieu	degré
\dot{m}	: Débit massique	Kg/s
N	: Nombre de verre	
P	: Pression	<i>Pa</i>
Δp_z	: Perte de charge	<i>Pa</i>
Q	: Flux	W/m^2
Q_{Abs}	: Chaleur absorbée par le verre	W/m^2
R_{total}	: Réflectivité totale	
SC	: Facteur solaire de la protection	
t	: Temps	<i>s</i>
T	: Température	<i>K</i>
T_{total}	: Transmittivité total	
U	: Coefficient d'échange thermique global	$W/m^2 \cdot K$
V	: Vitesse moyenne de l'air	m/s
W	: Largeur	m
Z	: Facteur des pertes de charge	

Symboles grecs

α	: Absorptivité	
β	: Hauteur solaire	<i>degré</i>
γ	: Angle horizontal d'impact	<i>degré</i>
δ	: Déclinaison solaire	<i>degré</i>
ε	: Emissivité	
θ	: Angle d'incidence	<i>degré</i>
λ	: Longueur d'onde	<i>m</i>
μ	: Viscosité dynamique du gaz	<i>kg/m.s</i>
ρ	: Réflectivité	
ρ_g	: Albédo	
σ	: Constante de Stefan Boltzmann	<i>W/m²K</i>
Σ	: Angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontal	<i>degré</i>
τ	: Transmittivité	
ϕ	: Azimut solaire	<i>degré</i>
ψ	: Azimut de la façade	<i>degré</i>
ω	: Heure solaire	<i>degré</i>
Ω	: Angle d'obstacle	<i>degré</i>

Notation indicielle

c	: Cavité
Ext	: Extérieur
Int	: Intérieur
Gap	: Ecartement entre le verre et la protection
gl	: Global
prot	: Protection solaire
Sol	: Solaire



INTRODUCTION

La diminution des réserves de combustible fossile ainsi que les dommages irréversibles causés par la combustion de ceux-ci est un des plus grands problèmes planétaires actuels. L'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère est à la base d'un échauffement global de la planète qui a déjà commencé à causer des préjudices irrévocables sur notre environnement. La meilleure manière de réduire l'impact des nuisances environnementales dues à la combustion des énergies fossiles est de limiter celle-ci en diminuant au maximum nos consommations d'énergie.

De nombreuses études portant sur les réductions de consommation d'énergie dans les bâtiments ont déjà été entamées depuis plusieurs années.

Actuellement, les chercheurs sont en mesure de citer les principaux paramètres influençant la consommation d'énergie d'un bâtiment particulièrement l'effet des baies vitrées et leurs protections solaires ou tout simplement on parle du rendement énergétique des fenêtres.

Les fenêtres offrent d'habitude une aire de moindre résistance à l'écoulement calorique que les autres éléments des murs d'un bâtiment.

En hiver, par conséquent, les températures de la face interne les plus faibles se trouveront aux fenêtres.

Les propriétés thermiques des fenêtres dépendent des caractéristiques du verre, de la lame d'air interne et de l'installation de stores ou de rideaux.

Les vitrages habillent aujourd'hui les façades et signent la modernité de grands projets architecturaux : le verre est aussi un matériau raffiné, jouant pleinement ou discrètement de ses qualités de transparence.

Le verre ferme l'espace intérieur en permettant la vision, l'éclairage et le captage de l'énergie solaire. Au-delà de la transparence, les nouveaux vitrages doivent remplir d'autres fonctions : thermique, acoustique, esthétique, sécuritaire. Le choix d'un vitrage dépendra donc des performances à atteindre relativement à ces fonctions, pour assurer le confort des occupants, au moindre coût.

Cependant, le choix du vitrage étant une question qui nous semblait essentielle lors de la conception d'un immeuble de bureaux, il nous paraissait très intéressant de l'analyser en détail.

La réduction des pertes de chaleur en hiver permet d'effectuer des économies de chauffage et la réduction des gains de chaleur en été réduit le coût du refroidissement des maisons climatisées.

L'industrie des fenêtres n'a pas tardé à élaborer des technologies de substitution afin de corriger les faiblesses des vitrages ordinaires sur le plan du rendement énergétique.

*Les efforts réalisés dans ce domaine pendant ces dernières années n'ont été rien de moins que révolutionnaires et ont mené à la mise au point de la **fenêtre à haut rendement énergétique**.*

Il existe divers types de fenêtres à haut rendement énergétique qui conviennent à une foule d'applications.

La présente étude développe un code de calcul qui permet une caractérisation du comportement thermique et optique des fenêtres et de leurs protections solaires.

Nous avons choisi de combiner les aspects solaire et thermique du verre et de la protection solaire car il paraît évident que le choix d'un système de fenêtre devra se faire en tenant compte des deux aspects sans oublier l'effet de l'éclairage naturel.

Objectifs du travail

Le premier objectif de ce mémoire était de comprendre les mécanismes liant les aspects solaire et thermique afin de choisir le vitrage optimum selon la situation rencontrée, dans un immeuble de bureaux, situé à la ville de BATNA. Notre idée était donc d'entamer une large série de simulations thermiques et solaire afin d'étudier précisément l'influence d'un grand nombre de paramètres sur les performances de différents types de vitrages. A partir des résultats de cette étude, nous comptons tirer des conclusions permettant, à l'avenir, de choisir les vitrages des immeubles de bureaux en fonction de critères de consommation d'énergie et de confort pour le dite site.

Pour ce travail, nous n'avons envisagé que l'immeuble de bureaux, pour lesquels le problème du choix du vitrage semble le plus crucial. Cependant, la méthodologie utilisée pour ce type de bâtiment peut, sans trop de difficultés, être étendue à d'autres types de bâtiments.

Nous nous sommes également limités au climat de la ville de BATNA, en sachant que la méthodologie peut également être étendue à d'autres climats.

On a essayé de manipuler différents paramètres qui peuvent être très importants dans le choix des vitrages des bureaux tel que l'épaisseur du verre, la position des protections solaires (extérieure ou intérieure), le type du verre (verre avec revêtement ou sans

revêtement), l'écartement entre les deux verres et la nature du gaz de remplissage tel que l'air, l'argon et le krypton, toute variation de l'un de ces paramètres sera décrite en détaille dans les prochains paragraphes.

Organisation de travail

On a essayé d'organiser ce travail comme suit:

Après une introduction, on présente dans le premier chapitre un historique de l'évolution des vitrages, les différents types de vitrage ainsi que et les différentes façades et leurs protections solaires rencontrées dans les immeubles de bureaux, quelques solutions techniques ont été situées, sans oublier de mentionner des rappels astronomiques et le modèle de calcul du rayonnement solaire.

On aborde ensuite, dans le chapitre 2 les propriétés physiques des verres. Le chapitre 3 est consacré pour l'étude de la lumière naturelle à l'intérieur des locaux et leur influence sur la consommation d'énergie, un model de calcul a été bien détaillé comme on a essayé de présenter quelques résultats obtenus par le programme de calcul tout en comparant avec d'autres études. La formulation mathématique est présentée dans le quatrième chapitre.

Enfin le chapitre cinq, après avoir décrit les différents paramètres à étudier, on exposera les résultats de notre étude, et une comparaison ainsi qu'une discussion des résultats y sont présentées.

Sans oublier la conclusion générale, on a décrit comment ce travail pourrait être étendu et complété dans les années à venir.

Enfin comme toute étude l'idée d'un programme informatique réalisée en langage pascal est apparue tout naturellement. En effet, celui-ci a l'avantage de permettre la variation rapide de certains paramètres, par exemple les paramètres évoluant au cours du temps, Le but ultime de ce travail était donc la définition qualitative des vitrages et de leurs protections solaires qui constituent une baie vitrée, en vue de garantir le confort thermique d'hiver et d'été.

HISTORIQUE

I.1. LES VITRAGES :

Avant d'entrer dans le vif du sujet et de présenter en détail les vitrages actuels, il nous semblait intéressant d'étudier l'historique des fenêtres et de montrer le chemin parcouru depuis l'apparition des premiers vitrages jusqu'à la large gamme de vitrages très performants proposés actuellement par les industriels.

Au départ, les fenêtres étaient un signe de luxe, les maisons primitives étaient souvent construites sans fenêtres. La porte était bien entendu un élément essentiel permettant aux personnes d'entrer et de sortir de la maison mais les fenêtres restaient au départ un raffinement, un agrément, qui permettaient de rendre un endroit plus agréable à vivre [1].

I.1.1. Apparition du verre :

Ce n'est qu'avec l'apparition du vitrage transparent, à l'époque Romaine, que la fenêtre peut simultanément laisser pénétrer l'éclairage naturel et permettre un contrôle des développements modernes.

Entre 1920 et 1930, les techniques de fabrication du verre se modernisèrent grâce aux procédures d'étirage mécanique. Le travail à froid (doux et poli) s'améliora également et demanda moins de temps. En 1959, la technique du float fut mise au point en Angleterre par Pilkington. Elle fut exploitée dès le début des années 1960.

Ce processus de fabrication, qui est réalisé en continu, consiste à la mise en fusion d'un mélange composé des matières premières suivantes : silice, chaux, magnésie, soude et additif, dans un four montant jusqu'à une température d'environ 1600°C. Quand il sort du four, le verre en fusion, qui atteint alors une température de 1000°C, se déverse sur un bain d'étain en fusion. Par différence de densité, le verre flotte sur l'étain, ce qui lui assure une parfaite planéité et un poli de surface. Le verre, entré à 1000°C, sort du flottage à 600°C. Les épaisseurs réalisables vont de 1,7 à 19 mm. Le verre est ensuite refroidi progressivement de 600°C à 50 °C, de manière à supprimer les contraintes internes qui rendraient la découpe impossible. Aussitôt refroidi, le ruban de verre est contrôlé et coupé d'équerre. Finalement, il passe dans une laveuse puis sous un rouleau imprégné d'une solution adéquate qui le protège contre le vieillissement.

Cette technique produit des surfaces de verre extrêmement plates, d'épaisseur uniforme et ne présentant quasiment pas de distorsion visuelle. La planéité et le parallélisme

des faces du verre rendent alors inutiles les opérations de doucissage et de polissage nécessaires dans tous les procédés anciens. Actuellement, la quasi totalité du verre plat est fabriqué par ce procédé [2].

I.2. LES VITRAGES MODERNES :

L'apparition de cette technique marqua un tournant important dans l'évolution du verre réalisé ces dernières années. En effet, l'application de couches minces sur les vitrages qui sont communément utilisées actuellement nécessite absolument une telle qualité de surface du verre.

Le changement le plus important dans la production des fenêtres entre 1965 et 1980 fut le développement de vitrages isolants ou doubles vitrages (deux panneaux de verre scellés ensemble, séparés par un espace rempli en premier temps par l'air).

Vers la fin des années 1970, en réponse aux crises d'énergie ayant touché cette décennie, des triples vitrages furent développés. Ils sont actuellement peu à peu abandonnés en raison de nouveautés techniques qui permettent d'atteindre des caractéristiques d'isolation thermiques équivalentes au moyen de doubles vitrages.

Actuellement, il existe une très large gamme de doubles vitrages couvrant un très vaste domaine de paramètres tout aussi bien physiques qu'esthétiques. Ce sont quelques uns de ces types de vitrages que nous avons choisi de prendre en compte dans notre travail notamment le vitrage à basse émissivité. Ces vitrages, ainsi que leurs propriétés physiques, sont décrits précisément ci-dessous et au chapitre deux.

I.3. LES PRINCIPAUX TYPES DE VITRAGES :

I.3.1. Le simple vitrage (Verre recuit) :

Il est constitué d'un verre clair ou coloré obtenu par coulage sur bain d'étain en fusion. Il est le produit de base pour former les doubles vitrages, les vitrages thermiques, feuilletés, armés, durcis, trempés, etc.

I.3.2. Le verre armé :

C'est un verre dans lequel on a incorporé lors de la phase de fabrication, un treillis métallique destiné à maintenir les morceaux de verre en place en cas de bris mais ne participant pas à la résistance mécanique ou thermique.

Les performances de ce type de vitrage sont les mêmes que celles d'un simple vitrage.

I.3.3. Le verre trempé :

Il s'agit d'un verre ayant subi un traitement thermique de renforcement augmentant considérablement sa résistance aux contraintes mécaniques et d'origine thermique (différence de températures pouvant aller jusqu'à 200 °C). En cas de bris, le verre se fragmente en petits morceaux non coupants minimisant ainsi les risques de blessures profondes.

I.3.4. Le verre durci :

C'est un verre ayant subi un traitement thermique particulier augmentant sensiblement sa résistance aux contraintes d'origine mécanique ou thermique. Ce verre est appelé durci ou parfois semi trempé. Ce traitement ne peut être réalisé que sur des verres d'épaisseur inférieure ou égale à 10 mm. En cas de bris, ces vitrages se fragmentent en morceaux de grandes dimensions. Ce type de vitrage présente des caractéristiques de résistance supérieures à celles d'un vitrage recuit mais inférieur à celle des vitrages trempés.

I.3.5. Le verre feuilleté :

Il est composé de deux ou plusieurs feuilles de verre assemblées à l'aide d'un ou plusieurs films plastiques (en général du butyral de polyvinyle : PVB) ou de résines. Après la mise en place des composants, l'adhérence parfaite est obtenue par traitement thermique sous pression. Après la trempe, le verre feuilleté ne peut plus être coupé, scié, percé ou façonné.

En cas de bris du vitrage, le ou les films PVB retiennent les fragments de verre en place, en faisant varier le nombre ou l'épaisseur de chacun des constituants, on obtient des vitrages feuilletés de caractéristiques différentes pour répondre à tous les types de sollicitations. Les films PVB peuvent être clairs, opalins ou, pour certaines applications, colorés.

I.3.6. Le double vitrage :

Le double vitrage consiste à enfermer entre deux verres une lame d'air déshydraté ou un gaz améliorant l'isolation thermique (souvent de l'argon ou le krypton), les deux verres sont séparés par un intercalaire en aluminium ou en acier, L'étanchéité périphérique est assurée par des joints organiques ainsi que des agents déshydratants sont contenus dans l'intercalaire.

I.3.7. Le triple vitrage :

Il est possible de diminuer la valeur U (coefficient d'échange global) du vitrage en ajoutant une troisième, voire une quatrième plaque de verre.

On obtient alors un meilleur pouvoir isolant, mais également une augmentation de l'épaisseur totale et du poids du vitrage. En outre les transmissions solaire et lumineuse diminuent.

I.3.8. Le vitrage chromogène :

Ce type de vitrage est composé de deux verres entre lesquels est placé un film dont les deux faces sont recouvertes d'une couche métallique parfaitement transparente conductrice d'électricité.

Des cristaux liquides sont emprisonnés dans ce film et les deux couches sont reliées à un conducteur électrique.

- Lorsque aucune tension électrique n'est imposée au système, les cristaux liquides ne sont pas alignés et leur position désordonnée entraîne une diffusion de la lumière dans toutes les directions : le vitrage apparaît alors d'un blanc laiteux, opaque à la vision.

- Par contre, dès qu'un champ électrique est établi entre les deux couches métalliques, les cristaux liquides s'alignent et le verre devient transparent.

I.4. L'INFLUENCE DES VITRAGES SUR LA CONSOMMATION D'ENERGIE :

L'influence du choix du vitrage sur les consommations énergétiques se caractérise principalement par les trois critères suivants :

I.4.1. La lumière naturelle :

Le vitrage permet de laisser passer le plus de lumière naturelle possible afin de réduire le recours à un éclairage artificiel durant la journée.

Sans ceci, cela entraîne des problèmes d'éblouissement, l'utilisation de la lumière naturelle peut ainsi être optimisée.

I.4.2. Les apports solaires :

Le vitrage doit contrôler le rayonnement entrant afin de limiter, voire d'éviter les dépenses en énergie de refroidissement en été. En effet, l'excès des apports solaires peut provoquer une surchauffe des locaux et donc l'inconfort des habitants qui auront alors tendance à recourir à la climatisation.

Il faut cependant veiller à ne pas trop limiter les apports solaires afin de pouvoir encore bénéficier de cette énergie gratuite en hiver.

I.4.3. L'isolation thermique :

L'enveloppe extérieure d'un bâtiment doit limiter les pertes de chaleur en hiver et protéger de la radiation solaire en été. Cet objectif dépend des caractéristiques de transmission thermique des parois par conduction, convection et rayonnement, en moyenne 20 % des déperditions thermiques de l'enveloppe se font par les fenêtres.

Les vitrages doivent donc être associés à l'isolation thermique. Plus le vitrage est isolant, plus les déperditions thermiques seront réduites et plus la température de la face intérieure du vitrage sera élevée, assurant ainsi le confort thermique pour une température de l'air intérieur plus faible.

C'est pourquoi on parle de gestion des apports solaires.

I.5. FENETRES A HAUT RENDEMENT ENERGETIQUE :

Les fenêtres à haut rendement énergétique nous permettront de réaliser des économies en réduisant nos coûts d'énergie. De plus, elles contribueront au maintien du confort de notre maison ou de notre bâtiment tout au long de l'année. Elles atténuent les bruits extérieurs et la condensation sur les vitres par temps froid, comparé à un produit traditionnel.

Les améliorations qui comportent ces fenêtres sont : revêtements à faible émissivité, remplissage aux gaz inertes, cadres et pourtours isolés, fenêtre à double vitrage, divers types de protections solaires témoignent des derniers progrès de la technologie.

Donc il faut se renseigner sur cette nouvelle technologie et comprendre le système.

I.5.1. Le double vitrage à basse émissivité (ou à haut rendement) :

Le verre ordinaire laisse facilement passer l'énergie du soleil. Cependant, la nuit, il transmet tout aussi efficacement vers l'extérieur l'énergie calorifique sous forme de rayons infrarouges, phénomène qu'on appelle perte thermique par rayonnement

Pour réduire cette forte émissivité des vitrages ordinaires, les chercheurs ont mis au point le revêtement à faible émissivité (faible E en anglais low-E).

Le double vitrage dit "à basse émissivité" a les mêmes caractéristiques que le double vitrage, ce n'est qu'une couche peu émissive de métaux nobles déposée par pulvérisation

cathodique sur la face intérieure de la feuille de verre extérieure ou sur la face extérieure de la feuille de verre intérieure, figures (I.1), (I.2), et (I.3).

En hiver, elle retient à l'intérieur du logement la chaleur émanant des appareils de chauffage, en été, les verres a isolation renforcé permettent de contrôler la chaleur solaire.

La couche peu émissive doit être obligatoirement placée à l'intérieur du double vitrage.

Ce dispositif lui confère une résistance thermique renforcée, tout en laissant pénétrer un maximum d'apports solaires.

De nombreuses études ont été réalisées dans le sens de déterminer les propriétés de ces couches ainsi que leurs influences sur les consommations énergétiques dans l'habitat, on peut situer les travaux [3], [4] et [5] dont l'auteur a étudié les caractéristiques de certains films tel que le VO₂ afin de les déposer sur les vitrages des fenêtres, les résultats obtenus montrent que l'épaisseur de la couche varie entre 0.03mm et 1mm, ainsi que les oxydes assurent une bonne transmission de lumière.

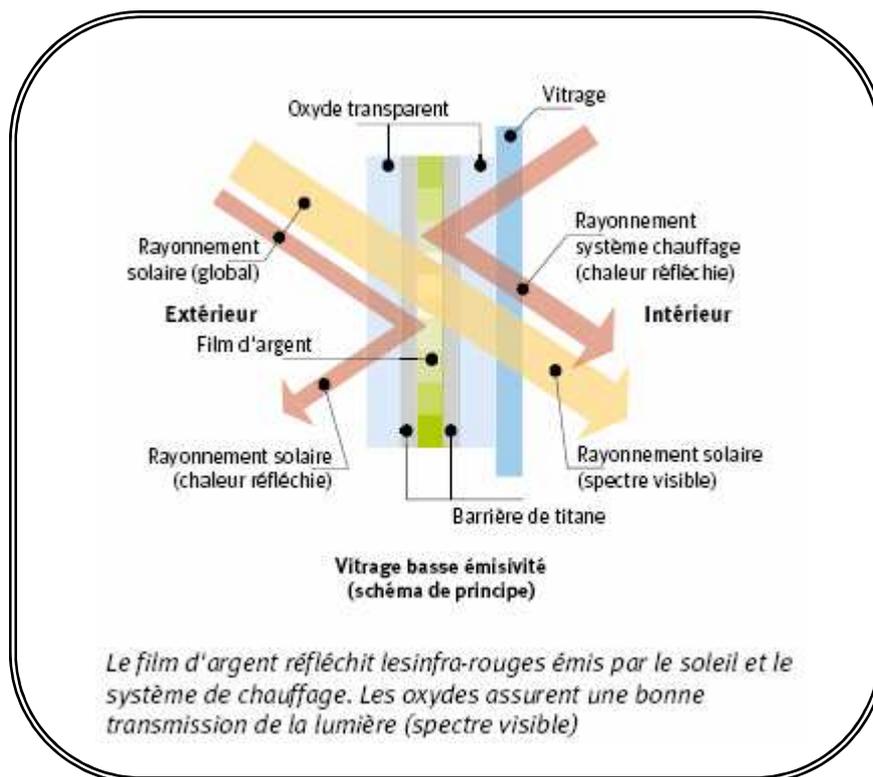


Figure 1.1 : Vitrage basse émissivité

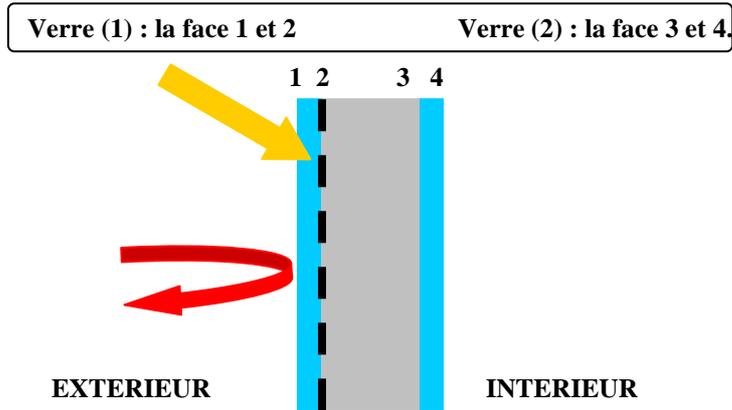


Figure 1.2 : Comportement d'un double vitrage lorsque la couche basse émissivité est placée en face 2

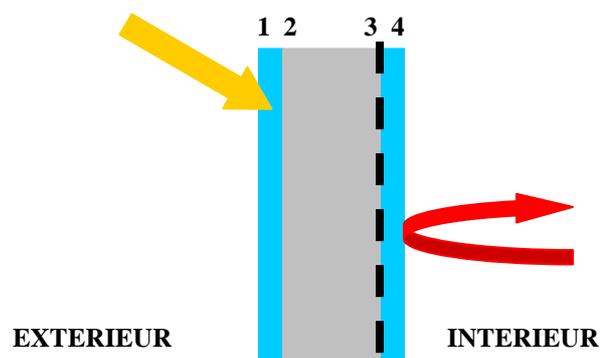


Figure 1.3 : Comportement d'un double vitrage lorsque la couche basse émissivité est placée en face 3

I.5.2. Remplissage au gaz :

Donc un autre moyen pour améliorer considérablement le rendement énergétique des fenêtres en remplissant l'espace entre les deux verres d'un gaz inerte, (argon ou parfois même du krypton, qui sont des gaz plus visqueux et ainsi thermiquement plus isolants que l'air), mais l'argon est le choix le plus courant, celui qui coûte le moins cher.

Le terme gaz inerte désigne une famille de gaz stables, non réactifs et donc sans danger.

Même si les fenêtres ne consomment pas d'énergie, elles peuvent constituer une source importante de perte de chaleur dans une maison ou un bâtiment.

Les études montrent que lorsque la pulvérisation d'une couche d'oxydes métalliques, le remplissage de gaz et la composition totale du vitrage conduisent à une valeur U_{tot} inférieure à $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ [6], on parle d'une fenêtre à haut rendement.

Les gains solaires à travers une fenêtre à haut rendement sont inférieurs de quelques pour-cent à ceux d'un double vitrage ordinaire.

Les fenêtres à haut rendement laissent un peu moins pénétrer la lumière du jour que les doubles vitrages ordinaires. Les performances acoustiques du vitrage HR sont parfaitement identiques à celles du double vitrage ordinaire en cas d'utilisation d'air sec dans l'espace. Par contre, le remplissage au moyen de certains gaz permet d'atteindre une meilleure isolation acoustique.

I.6. LES PROTECTIONS SOLAIRES :

I.6.1. Les différents types de protections solaires rencontrées :

Dans les façades vitrées, la protection solaire est dans la plupart du temps située soit à l'extérieur soit à l'intérieur du local, dans les autres situations tel que les grandes façades ventilées la protection peut être facilement située dans la cavité entre les deux panneaux de la façade.

Les protections solaires rencontrées sont généralement du type store vénitien figure (I.5), store enroulable figure (I.6) ou store plissé figure (I.7).

Un store vénitien se définit par un système de lames fines horizontales, reliées par des cordons et dont l'inclinaison peut être adaptée, un store enroulable est constitué d'un rouleau sur lequel s'enroule la toile qui se déroule parallèlement à la vitre, un store plissé se compose d'une toile fine, souvent translucide qui se replie verticalement grâce à un cordon de tirage.

Les formes et les dimensions des protections solaires requises pour protéger les façades, et notamment les baies vitrées, contre le rayonnement solaire dépendent de leur orientation.

Dans le climat méditerranéen [7], où le soleil est souvent présent dans le ciel, c'est l'orientation qui définit la quantité d'énergie solaire incidente sur une paroi verticale. Cette quantité d'énergie est la principale cause de l'exigence de protection solaire.

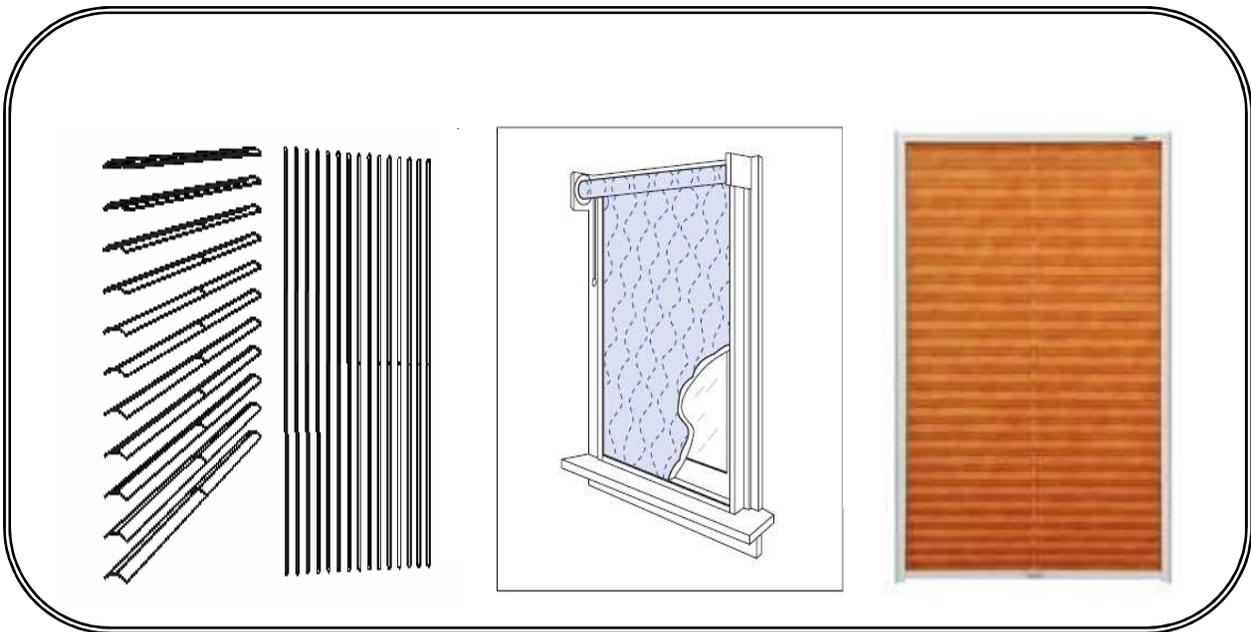


Figure 1. 5 : Store vénitien

Figure 1. 6 : Store enroulable

Figure 1.7 : Store plissé

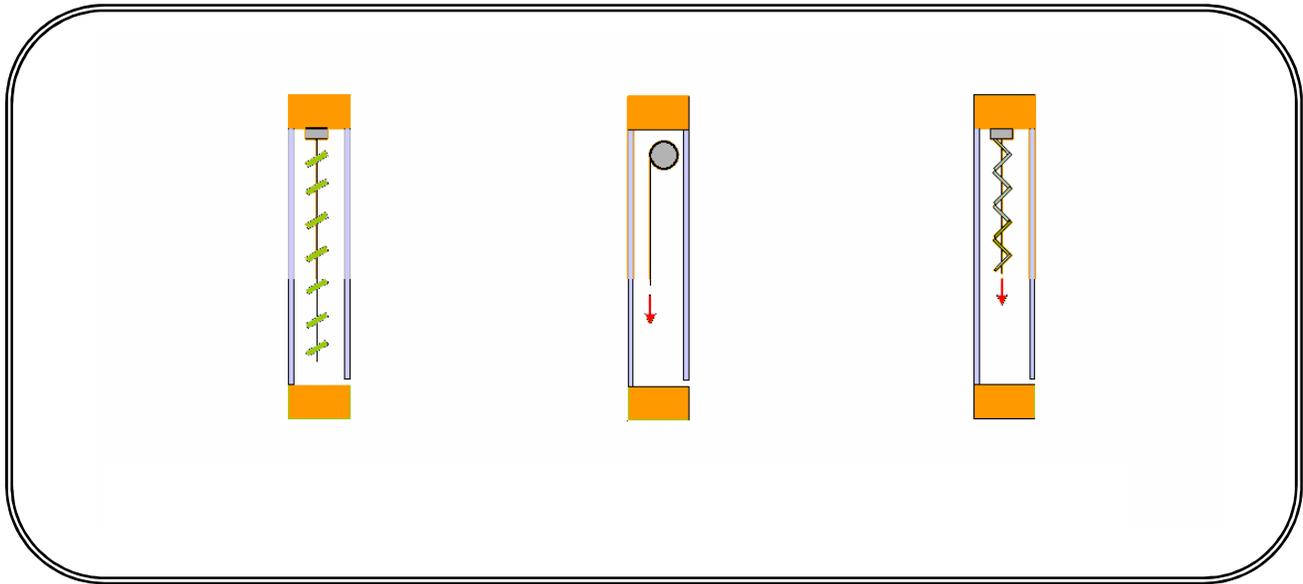


Figure 1.5.1 : Store vénitien

Figure 1.6.1 : Store enroulable

Figure 1.7.1 : Store plissé vénitien

I.6.2. La problématique des protections solaires :

Les protections solaires affectent la consommation d'énergie des bâtiments en réduisant les gains solaires et en modifiant les pertes thermiques au travers des fenêtres. Les protections solaires influencent aussi le niveau d'éclairage naturel atteint à l'intérieur et la vue vers l'extérieur.

Les protections solaires influencent donc directement les consommations d'énergie de chauffage, refroidissement et éclairage ainsi que le confort visuel et thermique.

Il est fort compliqué de mettre en place les protections solaires dans un bâtiment en tenant compte de tous ces aspects.

Les études réalisées montrent que la connaissance par rapport aux systèmes des protections solaires peut être organisée selon trois thèmes principaux :

- les propriétés physiques (thermiques et optiques) des systèmes de protection solaire.
- l'effet des protections solaires sur les consommations d'énergie et l'éclairage naturel disponible dans un bâtiment.
- les méthodes de calcul permettant d'évaluer les performances des bâtiments équipés de protections solaires [8], un calcul détaillé sera réservé dans le 4ème chapitre (formulation mathématique).

Détaillons ces différents points :

I.7. PROPRIETES PHYSIQUES DES SYSTEMES DE PROTECTION SOLAIRE :

I.7.1. Coefficient de transmission thermique :

Un grand nombre d'études ayant pour but de quantifier la réduction du flux de chaleur au travers des fenêtres, pour différents types de protections solaires [9], [10], et [11], ont été réalisées dans les années 1990 et 2000.

Ces études ont montré que la présence d'un système de protections solaires affecte de manière significative les flux de chaleur au travers des fenêtres, spécialement dans le cas d'un simple vitrage clair.

La résistance thermique d'un tel système est fortement améliorée si le système de protections solaires piège une couche d'air derrière le vitrage, il existe différentes manières d'améliorer encore la résistance thermique d'un système de protections solaires comme par exemple en utilisant des systèmes de protections solaires intégrés au vitrage.

Les valeurs de réduction de flux de chaleur mesurées lors de tests réalisés avec différents systèmes de protections solaires varient selon le type de protections solaires testé, les conditions expérimentales, le type et la taille de la fenêtre utilisée lors des expériences, [12], [13], et [14].

En résumé, la plupart des auteurs s'accordent à dire que les stores vénitiens, les tentures et les stores enroulables, placés derrière un simple vitrage, réduisent les pertes de chaleur de 20 à 30 %. Les stores enroulables réfléchissants placés à l'intérieur du vitrage réduisent les pertes de chaleur de 40 à 58%, selon le type de matériel et la méthode de montage utilisée [15].

I.7.2. Coefficient de transmission solaire et facteur solaire des protections solaires :

Lorsque le rayonnement solaire est intercepté par une paroi, une partie de l'énergie incidente est directement réfléchi vers l'extérieur, une partie est directement transmise vers l'intérieur et une partie est absorbée par le matériau. Ce dernier, va s'échauffer et réémettre une partie de cette énergie vers l'intérieur et une partie vers l'extérieur.

Le pourcentage d'énergie transmise directement vers l'intérieur est appelé **coefficient de transmission thermique** de protections solaires.

Une bonne protection solaire doit intercepter le rayonnement incident et ne pas trop l'absorber afin d'éviter tout échauffement de la protection elle-même. Le rayonnement absorbé doit donc être majoritairement réfléchi. Les exigences thermiques d'une baie équipée de sa protection se mesurent en fonction de son **facteur solaire**.

Le facteur solaire est la somme de la partie transmise du flux énergétique et de la partie absorbée réémise vers l'intérieur du local.

La partie réémise vers l'intérieur comprend deux phases : une émission radiative (grande longueur d'onde) directement liée à la température de la surface intérieure de la baie équipée de sa protection, et une émission convective, du fait des échanges thermiques entre l'air de la pièce et la baie protégée à plus haute température. Ceux-ci sont plus importants si un effet de cheminée est créé avec la circulation naturelle de l'air entre une protection solaire intérieure par exemple et un vitrage (voir le paragraphe : **1.11**).

On parlera souvent du facteur solaire d'un ensemble **protection solaire + vitrage**.

Le facteur solaire ainsi défini tient compte de l'effet d'une éventuelle couche d'air échauffée prisonnière entre la protection solaire et le vitrage.

Certains fabricants caractérisent les protections solaires par leur facteur d'ombrage plutôt que leur facteur solaire.

Le facteur d'ombrage d'une combinaison **vitrage + protection solaire** est le rapport entre l'apport d'énergie au travers de la fenêtre protégée et l'apport d'énergie au travers d'un simple vitrage clair. D'une manière générale, on peut dire que le facteur solaire vaut 0.86 fois le facteur d'ombrage [16].

I.7.3. Coefficient de transmission lumineuse :

Le coefficient de transmission lumineuse d'un ombrage est le pourcentage de lumière visible qui traverse celui-ci.

Dans la littérature, il est très difficile de trouver des recommandations quant à la valeur du coefficient de transmission lumineuse à choisir. Celle-ci dépendra surtout de la couleur et du type de protection solaire.

La couleur de la protection solaire sera souvent choisie en fonction de sa position ; une protection solaire intérieure devra être la plus claire possible afin de réfléchir un maximum de

chaleur alors que si cette protection est placée à l'extérieur, sa teinte aura moins d'influence sur ses caractéristiques thermiques et sera généralement choisie en fonction de critères esthétiques.

Quand aux protections de type store en tissus, c'est le mode de tissage de celui-ci qui influencera principalement la quantité de chaleur et de lumière le traversant.

1.8. INFLUENCE DES PROTECTIONS SOLAIRES SUR LES CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET SUR L'ECLAIRAGE NATUREL DISPONIBLE DANS UN BATIMENT :

Depuis le développement des programmes informatiques performants, un grand nombre d'études paramétriques sur les protections solaires et leurs influences sur les consommations d'énergie ont été réalisées [17], [18], et [19].

La relation entre l'utilisation de protections solaires et les variations de consommation d'énergie a aussi été étudiée expérimentalement [20] et [21].

Au commencement de leurs travaux sur ce sujet, les chercheurs ont concentré leur attention sur la relation qui existe entre les charges de refroidissement et les protections solaires.

Ensuite, l'impact des protections solaires sur les charges de chauffage et les consommations annuelles d'énergie a été étudié [22], [23] et [24]. Cependant, depuis le milieu des années 80, le développement des systèmes d'ombrage (les systèmes qui contrôlent l'éclairage artificiel automatiquement et en fonction de l'éclairage naturel à l'intérieur), permettant de remplacer une partie de l'éclairage artificiel par l'éclairage naturel qui a introduit un nouvel aspect qui se définit comme l'influence des protections solaires sur les consommations d'électricité d'éclairage, cet aspect doit être couplé aux aspects de chauffage et refroidissement.

1.8.1. Les charges de chauffage et de refroidissement :

Des travaux étudiant l'effet des protections solaires sur les charges de chauffage et de refroidissement ont montré que les stratégies des protections solaires dépendent du climat.

Alors que la plupart des auteurs s'accordent à dire que l'usage de protections solaires réduit la quantité d'énergie nécessaire pour refroidir et tend à augmenter les consommations d'énergie de chauffage, peu d'entre eux donnent les mêmes valeurs d'économies potentielles ni la même stratégie optimale.

I.8.2. Les consommations annuelles d'énergie y compris l'éclairage artificiel :

Il est clair que l'utilisation d'un système d'ombrage de l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel disponible réduit les consommations d'éclairage artificiel.

Les auteurs ont cependant du mal à s'accorder sur la quantification des bénéfices de l'utilisation de l'éclairage naturel sur la consommation d'énergie totale.

En résumé, on peut voir au travers des différents articles (**CH.III**), que la stratégie à adopter quand on compte sur l'éclairage naturel pour diminuer les charges électriques d'un bâtiment n'est pas encore claire et que c'est un problème complexe. Bien que tous les travaux de recherche montrent que l'utilisation de l'éclairage naturel permet des réductions de consommations d'énergie, on parle de l'éclairage naturel et les différents modèles de calcul dans le troisième chapitre.

I.9. METHODES DE CALCUL :

De nombreuses méthodes ont été développées, afin de déterminer précisément la forme et la position optimale des systèmes des protections solaires en tenant compte de tous les facteurs tels que la position du soleil, les données astronomiques et conditions climatiques du site, la nature du vitrage, etc.

Dans notre travail le calcul du flux énergétique passant au travers des vitrages équipés de protections solaires a été développé tout en passant par :

- Calcul du rayonnement solaire.
- Dépendance angulaire et calcul des propriétés optiques (vitrage et protection).
- Calcul de l'éclairement intérieur et son influence sur la consommation d'énergie.
- Représentation précise des transferts de chaleurs et des échanges radiatifs au travers des systèmes fenêtres couplées à des systèmes de protection solaire.
- Etude de la convection entre la protection et le verre afin de déterminer la température des faces du verre ou de la protection solaire.

I.10. SOLUTIONS TECHNIQUES :

Suite à ce qui a été mentionné ci-dessus on va essayer de citer quelques solutions techniques qui peuvent améliorer l'utilisation des protections solaires.

Il existe différentes manières d'améliorer la résistance thermique d'un système protection+ vitrage comme par exemple en utilisant des systèmes de :

I.10.1. Protection solaire intégrée au vitrage :

Pour ces procédés, le double vitrage simple ou à isolation renforcée intègre un store mobile, le store est donc totalement intégré dans le battant de la fenêtre, il a pour effet de diminuer le facteur solaire et d'augmenter l'isolation thermique globale de la baie figure (1.8).

Le store peut être constitué soit de lamelles orientables, soit d'un film métallique micro perforé. Les performances obtenues, qui dépendent de la nature du store, peuvent atteindre des niveaux comparables à celles d'un store extérieur [25] (Facteur Solaire proche de 0,10), sans les contraintes liées l'exposition du store aux contraintes climatiques.

Ces stores peuvent être manœuvrés manuellement, ou bien être motorisés et pilotés soit par l'utilisateur soit automatiquement.

A noter qu'il existe, un système avec cellules photovoltaïques incorporées qui assurent l'autonomie en énergie du store intégré au double vitrage.



I.10.2. La protection solaire par le vitrage :

Les caractéristiques thermiques et optiques des vitrages peuvent être très différentes, cependant la proportion du rayonnement réfléchi, absorbé ou transmis, dépend : de la couleur du

vitrage, de son épaisseur et de la nature de la couche dans le cas d'un verre à couche c'est-à-dire le verre avec revêtement.

En choisissant les caractéristiques du vitrage, il est possible de contrôler, à la fois :

- les entrées de lumière,
- les apports de chaleur solaire.

Il existe des vitrages à contrôle solaire qui permettent de réduire de plus de 50 % le facteur solaire [26], tout en conservant un taux de transmission lumineuse similaire.

Il existe également d'autres matériaux qui présentent des caractéristiques thermo-optiques intéressantes, c'est le cas par exemple de certains polycarbonates avec une transmission lumineuse de 56 % et un facteur solaire de 27%, mais ils sont translucides et ne permettent pas de préserver la transparence sur l'extérieur.

I.10.3. Le film de protections solaires :

La pose de films spécifiques sur un vitrage existant, généralement sur sa face interne, permet d'augmenter les performances du vitrage seul. Ils ont pour effet d'augmenter la réflexion globale du vitrage et par conséquent, ils limitent les apports énergétiques au sein des locaux.

L'avantage de ce procédé est l'extrême facilité d'application puisqu'il suffit d'appliquer ces films directement sur le vitrage. Le gain observé sur le facteur solaire est intéressant. La pose d'un film solaire permet de réduire de plus de 50 % le facteur solaire du vitrage nu.

Par contre, ils ont plusieurs inconvénients :

- réduire considérablement la transmission lumineuse des baies vitrées, et par conséquent engendrer une surconsommation d'éclairage artificiel,
- ne pas permettre une modulation du contrôle solaire selon les besoins hiver / été différents,
- ne pas résoudre entièrement le contrôle de l'éblouissement, ce qui peut obliger des protections complémentaires de type stores intérieurs.

Ils sont donc à recommander plutôt dans des locaux climatisés, pour réduire les consommations du froid, et plutôt lorsque les besoins d'éclairage naturel sont limités, cas des locaux informatiques par exemple.

I.10.4. Les protections extérieures :

Les protections extérieures sont de loin les plus efficaces en confort d'été parce qu'elles évitent l'effet de serre derrière le vitrage, fixes ou mobiles, elles doivent être bien ventilées.

I.10.5. Les protections intérieures :

Les protections intérieures type stores ou rideaux même opaques sont assez peu efficaces sur le plan thermique. En effet, lorsque le rayonnement solaire a traversé le vitrage, il se trouve partiellement piégé et chauffe l'air entre la vitre et la protection (effet de serre).

Ces protections intérieures sont surtout utiles pour lutter contre l'éblouissement. Elles doivent être associées à des protections extérieures.

La couleur des protections intérieures opaques doit être claire pour gagner en efficacité.

I.11. LES DIFFERENTS TYPES DE FAÇADES :

Trois principaux types de façades peuvent constituer les habitats:

Façade à simple vitrage ce sont les façades traditionnelles équipées d'un simple vitrage avec ou sans protection solaire intérieure ou extérieure, les **Façades à double vitrage** sont des façades doublées à l'intérieur ou à l'extérieur par un deuxième verre, une cavité, d'une largeur de quelques centimètres remplis d'un gaz tel que l'air, l'argon ou le krypton cette cavité peut contrôler les apports thermiques et solaires.

Un troisième type de façades qu'on peut rencontrer est **les doubles façades ventilées** la principale différence entre une double façade ventilée et une façade à double vitrage, intégrant ou non une protection solaire, réside dans la ventilation intentionnelle contrôlée de la ventilation de la cavité, malgré ceci on peut agir sur la ventilation entre le verre et la protection dans le cas d'une façade à double vitrage tout en améliorant la position et les dimensions de la protection solaire, actuellement un grand nombre d'étude concernant ce type de façades, voir [27], [28], [29], et [30] .

I.11.1. La ventilation entre le verre et la protection solaire :

Il existe de nombreux concepts pour la ventilation des fenêtres à doubles vitrages, une différenciation doit cependant être faite entre l'ensemble des concepts imaginables et les concepts de façades réellement appliqués dans la pratique.

On retrouve dans la littérature, de nombreuses classifications, la plupart de ces classifications sont essentiellement basées sur les caractéristiques géométriques des façades.

La classification élaborée ici prend en compte le type le plus important dans le cas d'une tel façade c'est la ventilation naturelle ;

La ventilation fait référence aux forces motrices à l'origine de la ventilation de l'espace situé entre le verre et la protection solaire. Tous les concepts de la façade à double vitrage est caractérisé par un seul type de ventilation c'est **la ventilation naturelle**.

La ventilation naturelle repose sur les différences de pression sans l'aide de composants motorisés de mise en mouvement de l'air, les deux 'moteurs' de la ventilation naturelle sont les différences de pression créées par le tirage thermique et par l'effet du vent.

On définit le tirage thermique (ou effet cheminée) par le phénomène lié à la montée de l'air chaud plus léger que l'air froid. Le concept de tirage thermique exprime le fait que l'air entre le verre et la protection plus chaud que l'air extérieur a tendance à s'évacuer au sommet de celle-ci. Une augmentation du tirage thermique entraîne, une augmentation du débit de ventilation au sein de l'espace, cette augmentation de tirage thermique est fonction des dimensions de l'espace et la position de la protection par rapport au vitrage et conduit à des différents modes de la ventilation naturelle.

Il est important de souligner que les performances de la ventilation naturelle sont variables dans le temps en fonction des conditions météorologiques (vent et différence de température).

I.11.2. Différents modes de la ventilation naturelle :

Le mode de ventilation fait référence à l'origine et à la destination de l'air circulant entre le verre et la protection solaire. Le mode de ventilation est indépendant du type de ventilation dans le cas de la fenêtre à double vitrage.

Toutes les façades à double vitrage ne sont pas susceptibles d'adopter tous les modes de ventilation décrits ci dessous.

A un instant donné, une façade à double vitrage est caractérisée par un seul mode de ventilation naturelle. Cependant, une façade peut adopter plusieurs modes de ventilation à différents moments selon que certains composants intégrés à la protection solaire (par exemple en cas de présence d'ouvrants dans les protections intérieures ou extérieures figure (1.9).

Il y a lieu de distinguer 4 principaux modes de ventilation suivants figure (1.10) :

1. Rideau d'air extérieur,

Dans ce mode de ventilation, l'air introduit entre la protection et le verre provient de l'extérieur et est directement rejeté vers l'extérieur. La ventilation d'espace entre la protection et le verre forme de ce fait un rideau d'air enveloppant la façade extérieure.

2. Rideau d'air intérieur,

L'air provient de l'intérieur du local et est repris vers l'intérieur du local, la ventilation entre la protection et le verre forme de ce fait un rideau d'air enveloppant la façade intérieure.

3. Alimentation en air,

La ventilation de la façade est réalisée avec de l'air extérieur. Cet air est ensuite amené vers l'intérieur du local ou dans le système de ventilation. La ventilation de la façade permet ainsi d'alimenter le bâtiment en air.

4. Evacuation de l'air,

L'air provient de l'intérieur du local et est évacué vers l'extérieur. La ventilation de la façade permet ainsi d'évacuer l'air du bâtiment.



Figure 1.9 : Exemple d’ouvrant motorisé dans une double façade ventilée naturellement permettant le passage d’un mode de ventilation à un autre.

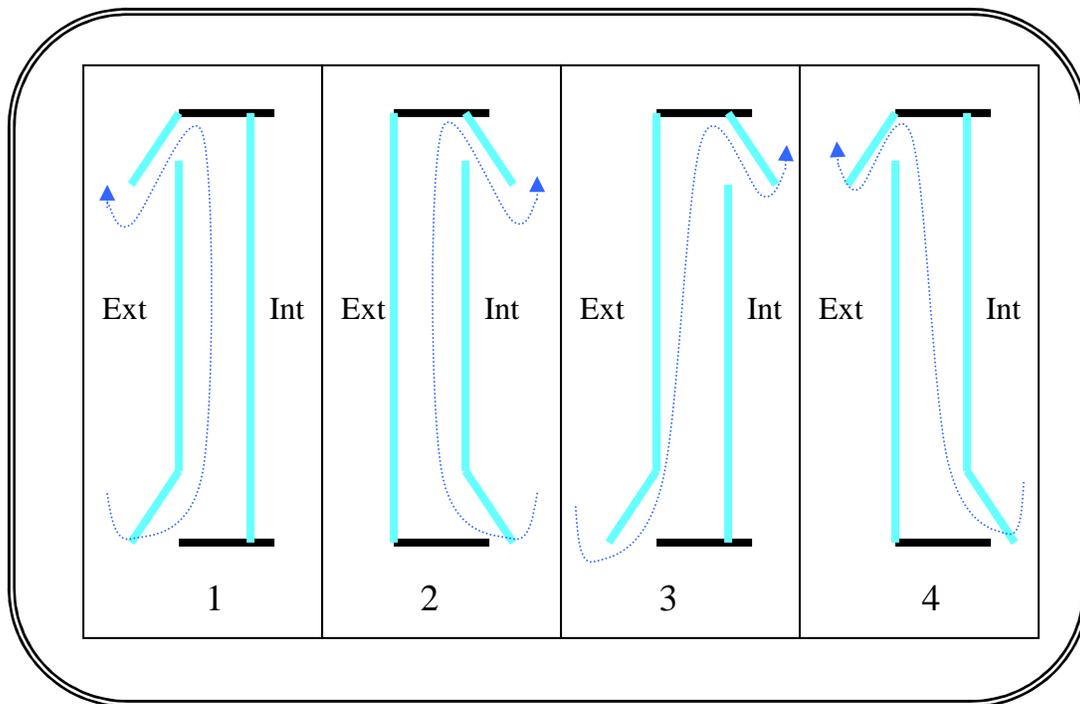


Figure 1.10 : Les quatre principaux modes de ventilation

Dans cette étude on a procédé aux deux premiers modes de ventilation c'est à dire le mode rideau d'air extérieur et le mode rideau d'air intérieur, qui nous semble les plus intéressants, reste au lecteur d'avoir l'effet des autres modes.

Dans le chapitre 4 (formulation mathématique), on a décrit la méthode de calcul des différents paramètres tel que la vitesse de l'air, la température des faces et les coefficients de frottements, la norme *iso 15099* regroupe le modèle mathématique pour les calculs de ces paramètres dans le cas d'un système de "vitrage avec protection solaire".

On peut voir à travers les différents articles, que cette norme est très utilisée dans les travaux de recherche, d'autres études montrent une comparaison entre cette norme et d'autres méthodes du calcul [31], dont on peut remarquer une grande rapproche entre ces méthodes.

I.12. LES DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENT :

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.

Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite.

Les rayonnements électromagnétiques se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde.

La figure (1.11), donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde.

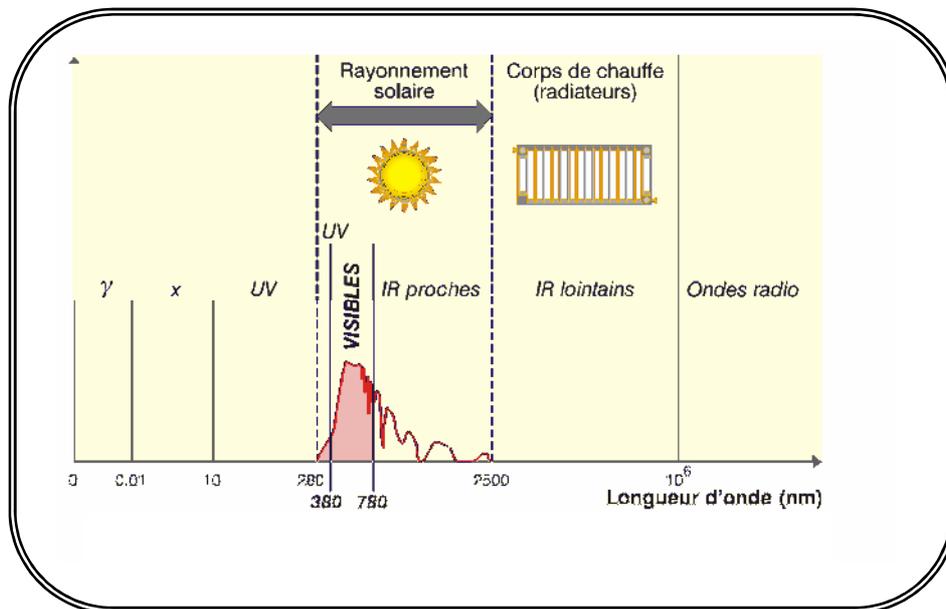


Figure 1.11 : Classification des divers rayonnements électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde.

Le rayonnement solaire, ayant comme origine le soleil, ne correspond qu'à une partie du spectre des ondes électromagnétiques figure (1.11). Le soleil dégage autour de lui une énergie de 66 millions de W/m^2 , produite par des réactions nucléaires en chaîne. Seule une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Elle vaut $1353 W/m^2$ et est appelée constante solaire. L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que cette valeur car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure (1.12) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des

conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

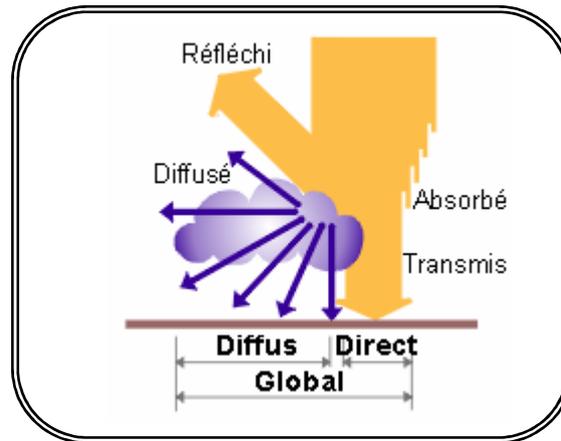


Figure 1.12 : Les composants du rayonnement solaire

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

I.12.1. Azimut :

L'azimut solaire est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil.

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'**azimut géographique**, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation.

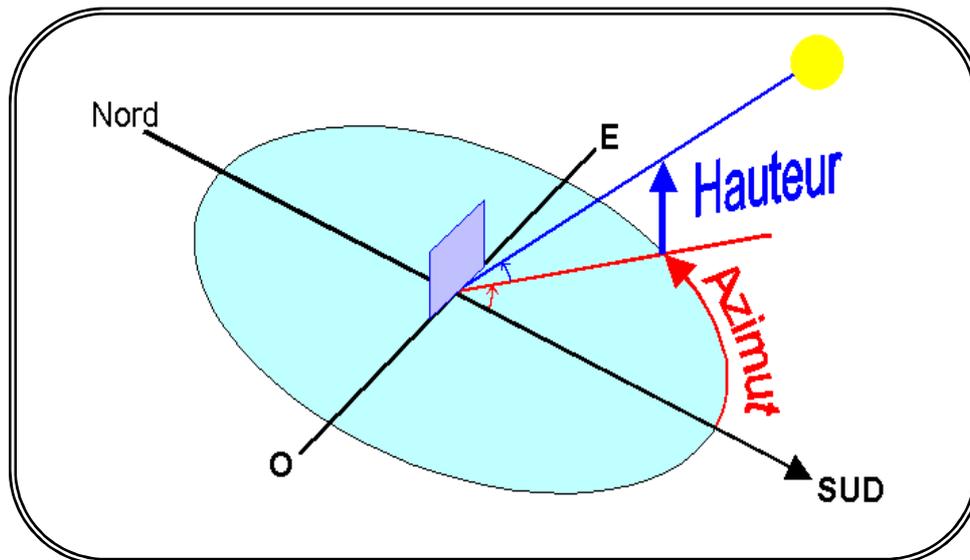


Figure 1.13 : Position du soleil

I.12.2. Déclinaison :

La déclinaison solaire est l'angle formé par la droite reliant la terre au soleil et le plan équatorial (positif vers le nord). La déclinaison est égale à zéro aux équinoxes et varie de $+23,45^\circ$ (22 juin) à $-23,45^\circ$ (22 décembre).

Les équinoxes sont les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial : sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales. *L'équinoxe d'automne* intervient vers le 22 septembre et *l'équinoxe de printemps* vers le 22 mars, dans l'hémisphère Nord. Dans l'hémisphère Nord, le *solstice d'été* (vers le 21 juin) est la période au cours de laquelle la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître (maximum 16 h 8 min). Le *solstice d'hiver* (vers le 21 décembre) est la période au cours de laquelle cette durée cesse de décroître (minimum 8h 12min). Les saisons sont inversées dans l'hémisphère Sud.

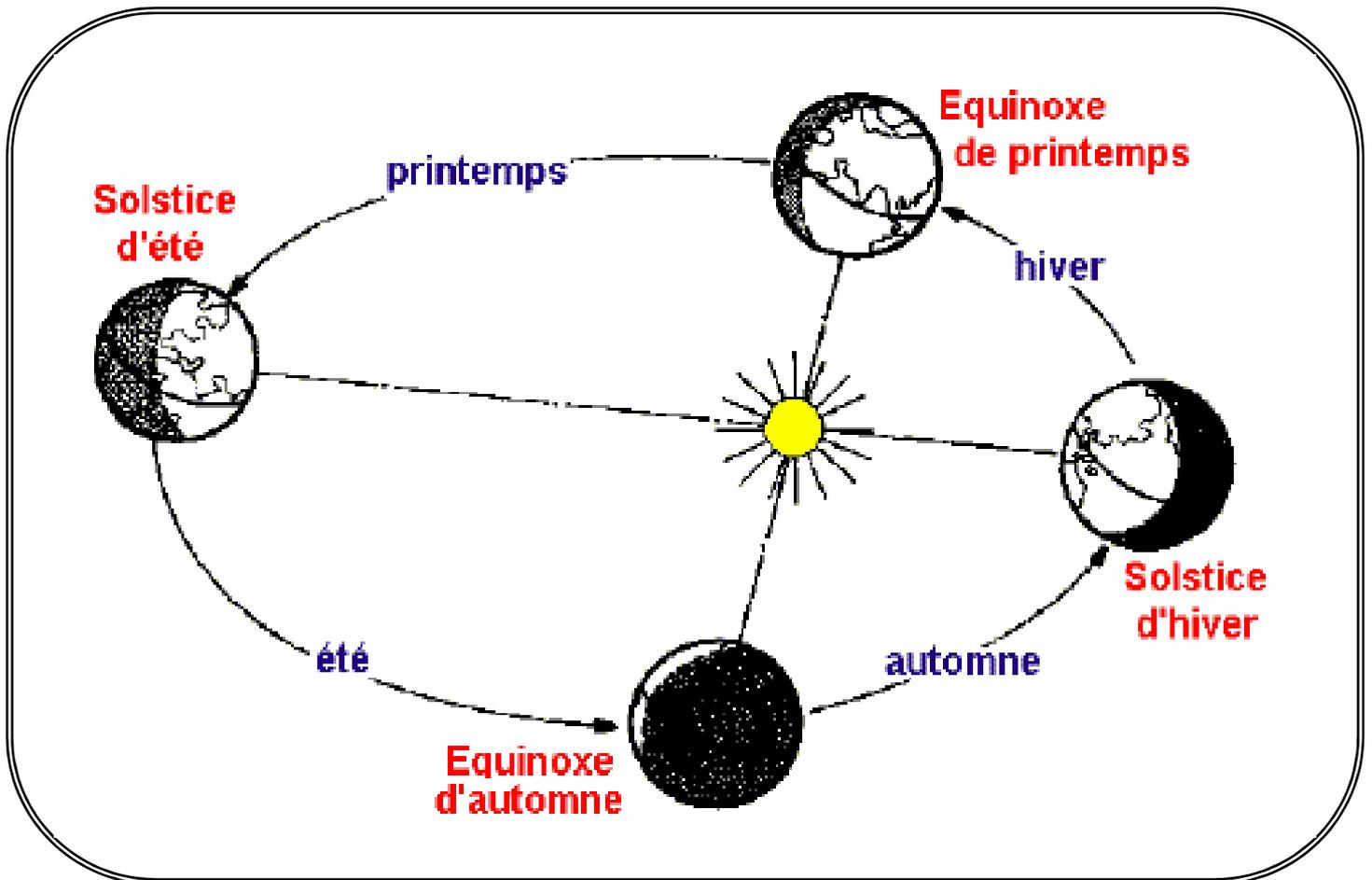


Figure 1.14 : Evolution des saisons

I.12.3. Hauteur solaire :

L'hauteur solaire est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation.

Le *Zénith* est le point le plus élevé de l'hémisphère céleste, se trouvant directement à la verticale de l'observateur.

I.12.4. Heure solaire :

L'*heure solaire* est l'heure de la journée déterminée par le mouvement apparent du Soleil, égale à 12h00 au midi vrai. Pour obtenir l'heure légale, il faut lui additionner l'équation du temps, la correction de longitude et éventuellement l'heure d'été.

Le *midi vrai* ou midi solaire est l'heure locale à laquelle le soleil passe au méridien du point d'observation.

L'angle horaire du Soleil est l'angle formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai.

La Terre est sur une orbite elliptique et sa vitesse au cours de l'année n'est pas constante.

I.12.5. L'équation du temps :

Indique la correction qui permet de passer du temps solaire vrai (du jour) au temps solaire moyen. Cette correction varie de + ou - 16 minutes au cours de l'année. Cela veut dire que le Soleil peut passer au méridien avec 16 minutes d'avance ou de retard par rapport au temps moyen.

Le fuseau horaire est une bande de 15° de longitude de large s'étendant du pôle nord au pôle sud, permettant de décomposer le globe terrestre en 24 tranches horaires. Chaque fuseau est centré sur un méridien multiple de 15° . Le méridien d'origine est celui de Greenwich, qui définit le Temps Universel. Ce fuseau occupe les longitudes $+7,5^\circ$ à $-7,5^\circ$. Chaque pays utilise en principe l'heure du fuseau le plus proche en longitude.

L'heure légale est le temps moyen du fuseau horaire de rattachement, augmenté éventuellement de l'heure d'été. C'est l'heure de la montre.

Un diagramme solaire permet de visualiser l'azimut et l'hauteur du soleil suivant les heures de la journée et les saisons. La superposition des masques aux trajectoires du soleil sur le diagramme solaire, permet l'implantation d'un bâtiment à l'endroit le plus favorable.

I.12.6. Équateur :

L'équateur est une ligne fictive de séparation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, définie par un plan perpendiculaire à l'axe des pôles.

Le méridien est le plan du lieu passant par l'axe des pôles.

La latitude est l'éloignement par rapport à l'équateur, mesuré en degrés d'arc le long du méridien du lieu (en $^\circ\text{N}$ ou en $^\circ\text{S}$)

La longitude est l'éloignement par rapport au méridien d'origine, mesuré en degrés d'arc le long de l'équateur (en $^\circ\text{E}$ ou en $^\circ\text{O}$).

Pour le calcul des différentes composantes du rayonnement solaire on trouve dans la littérature des différents modèles et normes, cependant dans la pratique il est plus convenable d'estimer le rayonnement solaire global sur un plan incliné par le modèle de LIU JORDAN, bien sûr il existe des études [32], [33], et [34], qui montrent des méthodes en détail pour le calcul des différents composants du rayonnements solaire.

➤ **Equations utilisée pour le calcul des composants du rayonnement solaire :**

L'heure solaire (ω) :

$$\omega = 15 * (TSV - 12) \quad (1.1)$$

Déclinaison solaire (δ) :

$$\delta = 23.45 \sin \{ [360(284 + N)]/365 \} \quad (1.2)$$

N : nombre de jours de l'année.

Hauteur du soleil (β) :

$$\sin \beta = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega \quad (1.3)$$

L : latitude du lieu.

L'azimut solaire (ϕ) :

$$\sin \phi = \frac{\sin \beta * \sin L - \sin \delta}{\cos \beta * \cos L} \quad (1.4)$$

Angle d'incidence (θ) :

$$\cos \theta = \cos \beta * \cos \gamma * \sin \Sigma + \sin \beta * \cos \Sigma \quad (1.5)$$

Tel que :

(γ) : L'angle horizontal d'impact.

(ψ) : L'azimut du mur (l'orientation de la surface).- Annexe1 : tableau A.1-

$$\gamma = \phi - \psi$$

Pour une surface horizontal ($\Sigma = 0^\circ$) donc

$$\cos \theta = \sin \beta \quad (1.6)$$

Pour une surface vertical ($\Sigma = 90^\circ$) donc

$$\cos \theta = \cos \beta * \cos \gamma \quad (1.7)$$

Rayonnement solaire direct normal (E_{DN}) :

$$E_{DN} = \frac{A}{\exp(B/\sin \beta)} \quad (1.8)$$

Tel que :

A : Coefficient de l'apparition du rayonnement solaire en fonction de la masse d'air (W/m^2).

B : Coefficient d'extinction atmosphérique, Annexe1 : tableau.A.2-.

Rayonnement solaire diffus de la part du sol (I_r):

$$I_r = E_{DN} (C + \sin \beta) \rho_g \frac{1 - \cos \psi}{2} \quad (1.9)$$

ρ_g : est la réflectivité de la terre (l'albédo), sa valeur type est de 0.2.

Rayonnement diffus (I_{dif})

D'abord on définit le rapport du rayonnement solaire diffus de la part du ciel (Y) :

pour $\cos \theta > -0.2$ On a:

$$Y = 0.55 + 0.437 \cos \theta + 0.313 \cos^2 \theta \quad (1.10)$$

pour $\cos \theta \leq -0.2$ On a:

$$Y = 0.45 \quad (1.11)$$

Pour une surface verticale on a :

$$I_{dif} = CYE_{DN} \quad (1.12)$$

Pour les autres surfaces on a :

$$I_{dif} = CE_{DN} \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \quad (1.13)$$

C : constante tient compte de la nature du ciel, Annexe1 : tableau.A.2-.

Rayonnement solaire direct (I_{dir}):

$$I_{dir} = \frac{A}{\exp(B / \sin \beta)} * \cos \theta \quad (1.14)$$

Rayonnement global (I_{gl}) : Le rayonnement solaire global incident à un instant donné sur un plan quelconque est défini par la somme du rayonnement direct (I_{dir}), rayonnement diffus (I_{dif}) et le rayonnement diffus de la part du sol (I_r) :

$$I_{gl} = I_{dir} + I_{dif} + I_r \quad (1.15)$$

Les aspects d'apport d'énergie et de lumière sont souvent indissociables, leur origine se trouvant dans le rayonnement solaire. Le présent chapitre aborde dans un premier temps les aspects énergétiques et les aspects optiques des verres, pour ensuite étudier le mécanisme du rayonnement solaire absorbé par chaque surface du verre.

II.1. LES MECANISMES DU TRANSFERT DE CHALEUR :

La figure (2.1), montre le transfert de chaleur à travers la vitre d'une fenêtre qui se déroule selon trois mécanismes combinés : la conduction, la convection et la rayonnement.

II.1.1. La conduction :

La conduction est le moyen par lequel la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides. La vitesse de progression du flux de chaleur à travers un corps, sa conductivité thermique, dépend de l'aptitude de ses molécules et de ses électrons à recevoir et à transmettre la chaleur.

II.1.2. La convection :

On définit la convection comme l'échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact, le déplacement de chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre. Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones chaudes vers les zones froides. Lorsque les molécules d'un fluide froid, tel que l'eau ou l'air, viennent au contact d'une paroi chaude, une partie de l'énergie de vibration animant les molécules superficielles du solide se communique aux molécules voisines du fluide. La quantité de chaleur ainsi transmise est proportionnelle à la différence de température entre paroi et fluide.

II.1.3. La radiation :

Tous les matériaux rayonnent sans arrêt de l'énergie dans toutes les directions, à la suite du mouvement continu de vibration de leurs molécules situées en surface. Alors que le rayonnement solaire comporte essentiellement des radiations de courtes longueurs d'onde émises à très hautes températures, le rayonnement thermique terrestre que nous ressentons comme échange radiatif de chaleur est principalement constitué de grandes longueurs d'onde et de l'infrarouge lointain, émises à une température bien inférieure.

L'intensité du rayonnement thermique émise par un corps dépend non seulement de sa température de surface mais aussi de son émissivité. D'une façon générale, la plupart des corps sont de bons émetteurs de rayonnement thermique, c'est-à-dire qu'ils rayonnent facilement de la chaleur sous forme d'énergie radiante infrarouge. L'émissivité d'un corps mesure son aptitude à émettre un rayonnement thermique. La plupart des verres ordinaires ont une émissivité de 0,9 environ, ce qui signifie qu'ils rayonnent 90% du maximum théorique d'énergie radiante correspondant à une température donnée.

Habituellement, les surfaces brillantes finement polies des métaux émettent un rayonnement thermique faible. Cela signifie qu'elles rayonnent très peu de chaleur à une température donnée.

Le passage de chaleur au travers d'une fenêtre résulte d'une interaction complexe entre ces trois modes de transfert de chaleur. C'est pour cette raison que la conduction, la convection et la radiation ne sont pas discutées séparément.

On utilise deux variables permettant de caractériser l'énergie transférée au travers d'un vitrage. Il s'agit du coefficient d'échange thermique globale U ($W/m^2.K$), aussi appelé U-value ou U-factor, et du facteur solaire du vitrage FS .

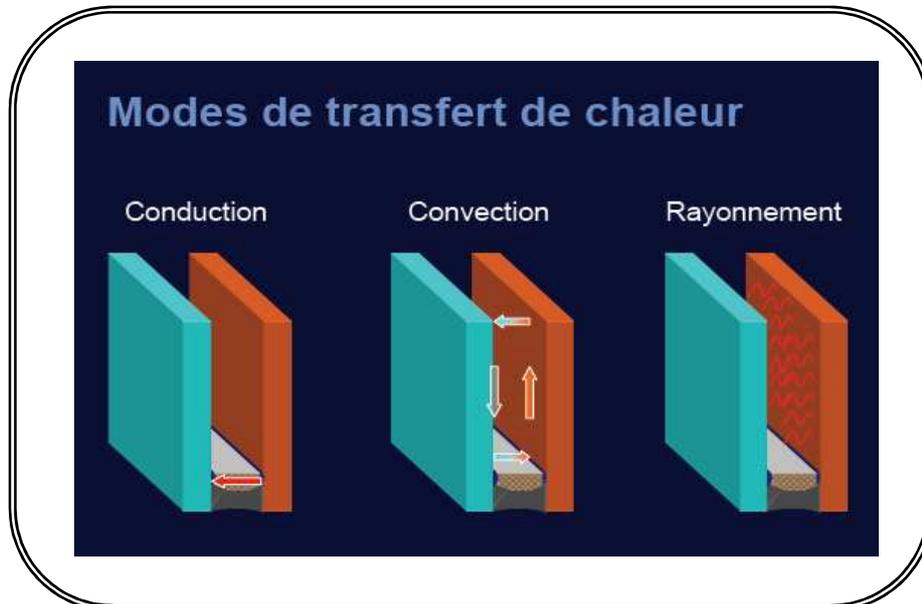


Figure 2.1 : Modes de transfert de chaleur.

II.2. LES FACTEURS CARACTERISANT LES ECHANGES THERMIQUES A TRAVERS UN VITRAGE :

II.2.1. coefficient d'échange thermique global U :

Quand il existe une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, de la chaleur est gagné ou perdue à travers le système de vitrages, la capacité d'un système de vitrages résistant à ce transfert de chaleur dépend de son coefficient de conductivité thermique globale U ($W/m^2.K$).

Le coefficient U d'un système de vitrage exprime la quantité de chaleur traversant le système en régime permanent, par unité de temps, pour 1 mètre carré de surface et pour 1°C de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, figure (2.2).

Le coefficient U dépend des conditions climatiques comme par exemple la vitesse du vent, la température extérieure et intérieure, la position du vitrage (verticale ou horizontale), du coefficient de conductibilité thermique k ($W/m.K$) du vitrage lui-même.

Le coefficient U d'un système de vitrage dépend aussi du nombre de couches de verre, du dimension (d) séparant ces couches de verres, du type de gaz qui remplit ces espaces et de la présence d'éventuelles couches déposées sur le verre.

En général, quand on parle du coefficient U d'un système de vitrage, on se réfère au coefficient U mesuré ou calculé au centre de celui-ci. Le calcul du coefficient U d'un système de vitrage suppose que les flux de chaleur soient perpendiculaires au plan de celle-ci.

On définit le coefficient d'échange thermique global U par l'équation suivante :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \sum_{j=1}^N \frac{e_j}{k_j} + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{1}{h_{c,j}} + \frac{1}{h_{int}}} \quad (2-1).$$

Tel que :

$h_{ext/int}$: Le coefficient du transfert de chaleur pour la surface extérieure/intérieure

($W/m^2. K$).

N : nombre de couches du système de vitrage.

k : conductibilité thermique du verre ($W/m. K$).

h_c : Le coefficient du transfert de chaleur de la cavité ($W/m^2. K$).

e : L'épaisseur du verre (m).

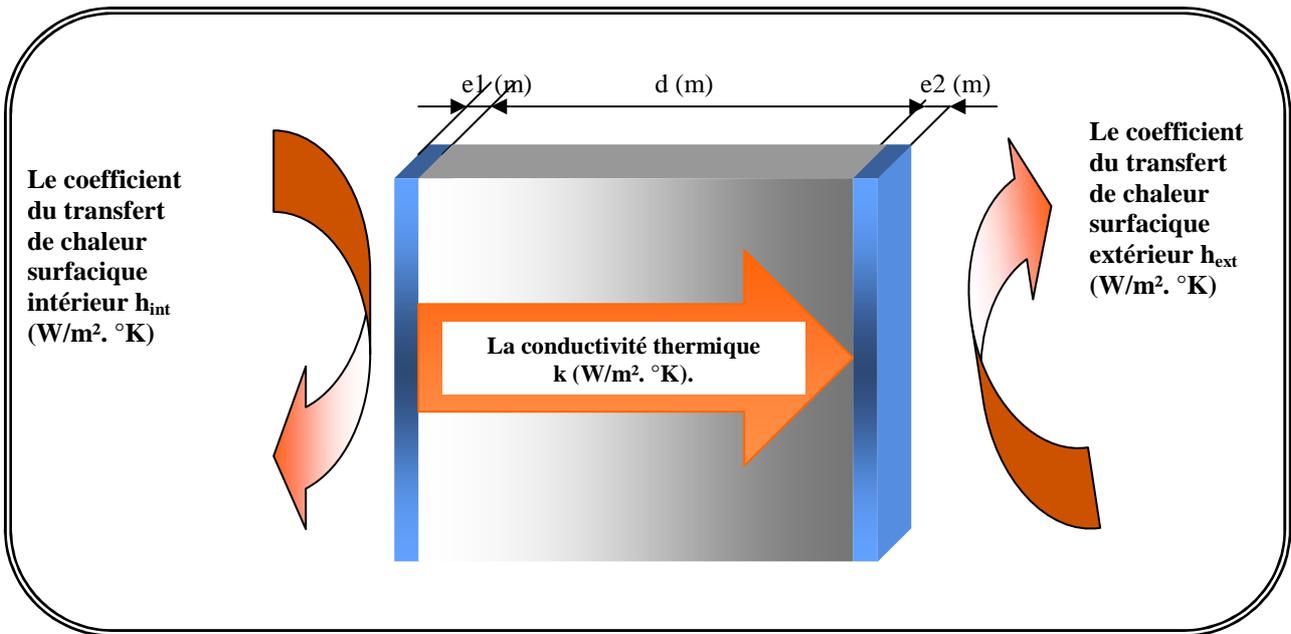


Figure 2.2 : Le coefficient de conductivité global U .

II.2.2. Le facteur solaire d'un vitrage (FS) :

Le second facteur caractérisant les performances solaires d'un système de vitrage est sa capacité à contrôler le passage du rayonnement solaire au travers du vitrage. Il s'agit du facteur solaire du vitrage.

Quand un rayonnement solaire frappe un vitrage, une partie de celui-ci est réfléchiée, une partie est transmise directement à travers le vitrage et une partie est absorbée par le vitrage. La partie absorbée par le vitrage est ensuite partagée en une partie qui est réémise par le vitrage vers l'intérieur et une partie réémise vers l'extérieur.

Le facteur solaire du vitrage est défini par la fraction du rayonnement solaire qui rentre à l'intérieur du local à travers le système de vitrage sur le rayonnement incident, figure (2.3).

La détermination de ce facteur nécessite l'étude du bilan thermique de la vitre, on calcule le facteur solaire pour un simple et double vitrage, par l'analogie électrique présentée dans la figure (2.4), on obtient par égalité :

$$(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) = (T_{\text{ext}} - T_{1,\text{ext}}) + (T_{1,\text{ext}} - T_{1,\text{int}}) + (T_{1,\text{int}} - T_{2,\text{ext}}) + (T_{2,\text{ext}} - T_{2,\text{int}}) + (T_{2,\text{int}} - T_{\text{int}}) \quad (2-2)$$

Ensuite en remplace dans le circuit équivalent :

$$(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) = q_5 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) - q' (R_1) - q'' (R_1 + R_2 + R_3) \quad (2-3)$$

En remplaçant par les valeurs des résistances on obtient l'équation (2-4) :

$$(T_{ext} - T_{int}) = q_5 \left(\frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{1}{h_c} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{1}{h_{int}} \right) - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)I_{gl}}{h_{ext}} - \frac{\alpha_2 I_{gl} e_1}{k_1} - \frac{\alpha_2 I_{gl}}{h_c}$$

Où : α_1, α_2 sont les coefficients d'absorption pour le verre extérieur et intérieur du système respectivement, le terme multiplier par q_5 dans l'équation (2-4) représente l'inverse du coefficient de conductivité thermique globale U , donc l'équation (2-4) devient :

$$q_5 = [(T_{ext} - T_{int})U] + \left[\frac{\alpha_1 I_{gl}}{h_{ext}} U \right] + \left[\alpha_2 I_{gl} \left(\frac{U}{h_{ext}} + \frac{Ue_1}{k_1} + \frac{U}{h_c} \right) \right] \quad (W/m^2) \quad (2-5)$$

On pose :

$$\eta_1 = \left(\frac{U}{h_{ext}} \right) \quad \text{Et} \quad \eta_2 = \frac{U}{h_{ext}} + \frac{Ue_1}{k_1} + \frac{U}{h_c}$$

On obtient :

$$q_5 = (T_{ext} - T_{int})U + \alpha_1 I_{gl} (\eta_1) + \alpha_2 I_{gl} (\eta_2) \quad (W/m^2) \quad (2-6)$$

L'équation (2-6) représente une partie du flux de chaleur pénétrant à l'intérieur, le premier terme de cette équation est le flux de chaleur dû à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur.

Les termes $(\alpha_1 I_{gl} \eta_1)$ et $(\alpha_2 I_{gl} \eta_2)$ de l'équation ci-dessus représentent la quantité de chaleur retransmis vers l'intérieur après l'absorption du rayonnement solaire par les deux verres, en anglais c'est « inward fraction ». Des études expérimentales **13]**, ont été réalisées afin de déterminer la quantité exacte de ce terme, un grand rapprochement entre les résultats réalisés au cours de ces expériences et le calcul analytique.

Finalement l'expression du flux total est la somme du flux transmis directement à l'intérieur et le flux retransmis après absorption :

$$q = q_5 + T_{total} I_{gl} \quad (W/m^2) \quad (2-7)$$

Tel que T_{total} est la transmittivité total du système de vitrage, elle sera défini dans le paragraphe suivant.

En remplaçant l'équation (2-6) dans l'équation (2-7) on obtient l'expression du flux total :

$$q = U(T_{ext} - T_{int}) + \alpha_1 I_{gl}(\eta_1) + \alpha_2 I_{gl}(\eta_2) + T_{total} I_{gl} \quad (W/m^2) \quad (2-8)$$

Le flux de chaleur dû au rayonnement solaire est le terme de l'équation (2-8) sans le terme du flux de chaleur dû à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur c'est-à-dire :

$$q_{solaire} = \alpha_1 I_{gl}(\eta_1) + \alpha_2 I_{gl}(\eta_2) + T_{total} I_{gl} \quad (W/m^2) \quad (2-9)$$

Finalement le facteur solaire d'un double vitrage comme c'était indiqué au début de ce paragraphe est :

$$FS = \alpha\eta_1 + \alpha_2\eta_2 + T_{total} \quad (2-10)$$

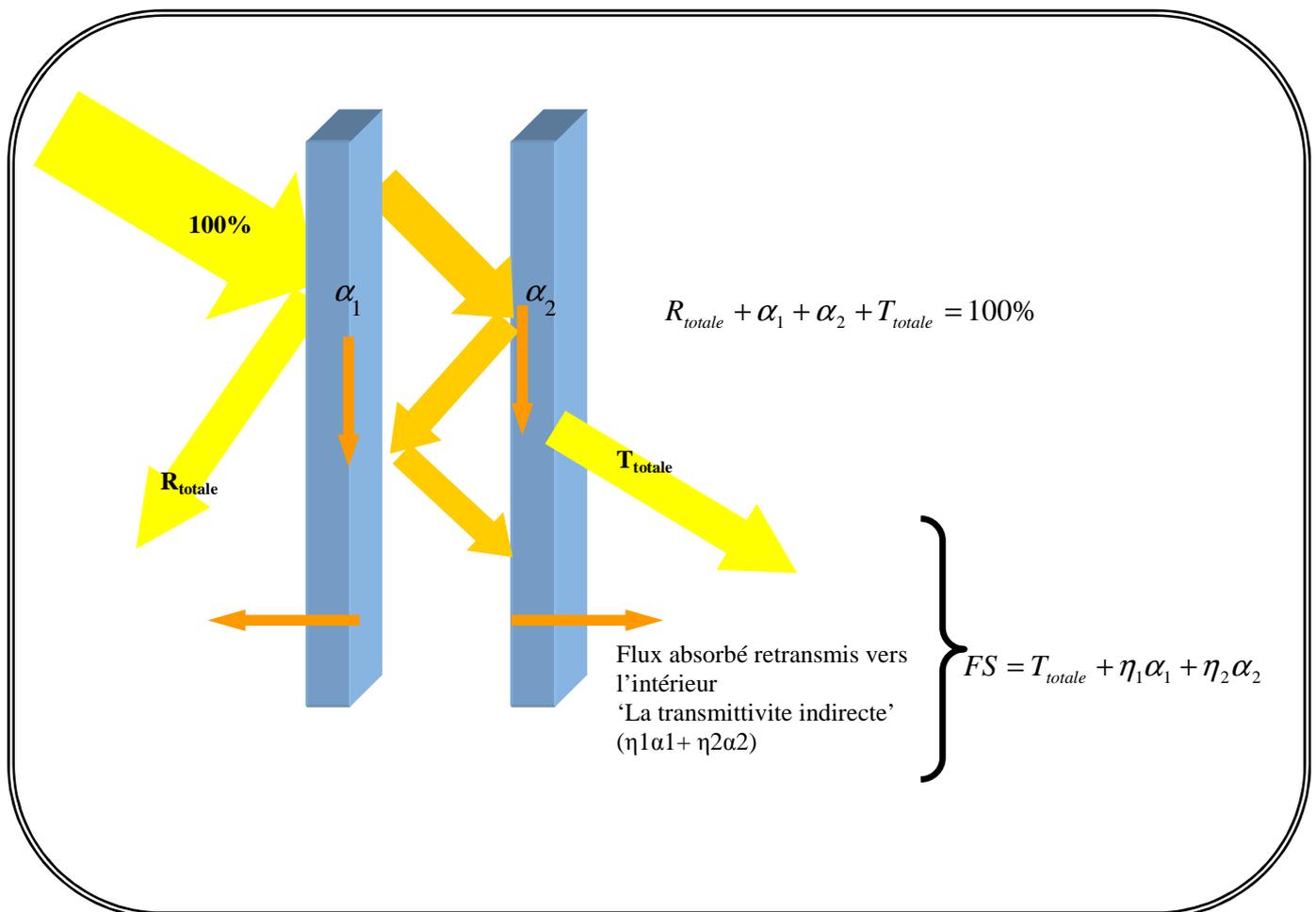


Figure 2.3 : Le facteur solaire (FS) d'un double vitrage.

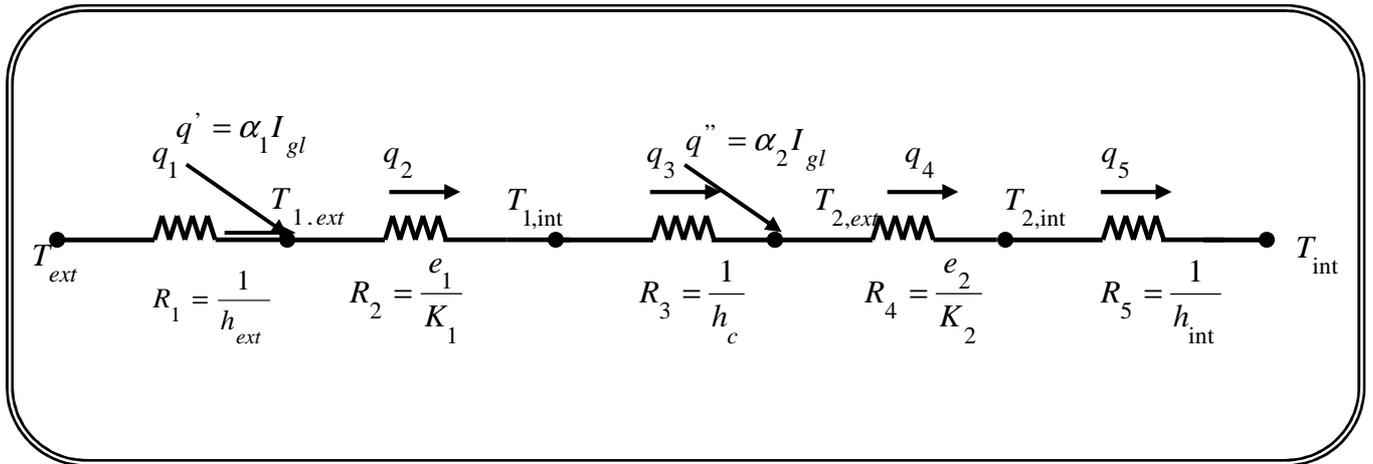


Figure 2.4 : Transfert de chaleur a travers un vitrage et le circuit électrique correspondant.

II.2.3. Le facteur solaire de la protection solaire (SC)

Le facteur de la protection solaire (SC), est un paramètre très important pour comparer et classifier un système de vitrage, l'intérêt de ce facteur est de montrer la variation du facteur solaire d'un système de vitrage par rapport à un système de référence, de cette façon on peut écrire ce qui suit :

$$SC = \frac{FS_{sys\text{-}etudier}}{FS_{reference}} \quad (2-11)$$

$FS_{sys\text{-}etudier}$: Le facteur solaire du système de vitrage à étudier.

$FS_{reference}$: Le facteur solaire du système de référence.

Donc pour calculer le facteur solaire de la protection solaire, il est nécessaire de définir un système de référence et le facteur solaire du système de vitrage à étudier, le système de référence est défini d'après A.S.H.R.A.E [35], comme un système de simple vitrage et dont le verre est de type D.S.A (Double Strength Sheet Glass), d'une épaisseur de 3.175 mm, avec une transmittivité : $\tau = 0.86$, une absorptivité : $\alpha = 0.06$, et une réflectivité $\rho = 0.08$ pour un angle d'incidence normal, les conditions extérieures et intérieures sont aussi défini est données par la fraction suivante: $\frac{U}{h_{ext}} = 0.17$, ce qui donne un facteur solaire du système de référence $FS_{reference} = 0.87$.

Cette méthode nous évitons de définir les propriétés optiques solaires de la protection solaire, qui sont très compliquées à cause de l'effet multiple de la réflexion pour des minces couches, autre méthode est déjà défini dans le premier chapitre.

II.3. PROPRIETES OPTIQUE SOLAIRES DES VERRES :

Depuis des années, de nombreux chercheurs [36], [37], et [38], ont tenté de déterminer les propriétés optiques des verres. Ces propriétés optiques ont été exprimées en termes de transmission et réflexion solaire. Ces études indiquent, d'une façon générale, de quelle manière on doit choisir le verre d'une fenêtre.

Il existe plusieurs types de vitrages, se différenciant par leur transparence par rapport à des différentes parties du spectre. La plupart des verres sont partiellement transparents aux ultraviolets.

Le verre est opaque aux rayonnements infrarouges à grandes longueurs d'onde mais généralement transparent aux infrarouges à courte longueur d'onde.

Les quatre propriétés de base des vitrages qui affectent les transferts d'énergie radiante sont : la transmissivité, la réflectivité, l'absorptivité et l'émissivité.

II.3.1. La transmittivité :

La transmittivité se rapporte au pourcentage de rayonnement qui peut traverser un vitrage, la transmissivité peut être définie pour différents types de lumière ou d'énergie, par exemple, on parle de transmissivité dans le domaine du visible, par rapport aux ultraviolets ou par rapport au spectre solaire total. Chacun de ces termes décrivent une caractéristique différente du vitrage.

La transmissivité dans le domaine du visible décrit la possibilité du vitrage à fournir de l'éclairage naturel et à permettre la vue à travers la fenêtre. Par exemple, un vitrage teinté aura une transmissivité ou un coefficient de transmission lumineuse plus faible qu'un vitrage rayons ultraviolets (*UV*) ou, majoritairement, sous forme d'infrarouges proches.

En effet et dans cette étude on s'intéresse à la transmissivité par rapport à l'entière du spectre solaire afin de décrit comment le vitrage répond à une part plus large du spectre et est plus intéressant pour caractériser la quantité d'énergie solaire transmise par un vitrage.

II.3.2. La réflectivité :

Il y aura toujours une partie du rayonnement solaire qui sera réfléchi à la surface du vitrage. La réflectivité naturelle d'un vitrage dépend de la qualité de la surface du verre, de la présence de couche et de l'angle d'incidence.

Plus l'angle sous lequel les rayons atteignent le vitrage (par rapport à la normale au vitrage) est important, plus la quantité des rayons réfléchis sera importante. Même un vitrage clair réfléchit 50 % ou plus de lumière quand l'angle d'incidence est supérieur à 70°.

Le coefficient de réflexion d'un vitrage peut être augmenté en appliquant différentes couches métalliques sur sa surface. La plupart des couches réfléchissent l'entièreté du spectre.

Cependant, durant ces vingt dernières années, les chercheurs ont développé de nouvelles couches qui peuvent être appliquées sur le verre et réfléchir seulement une partie du spectre. Des couches ayant des coefficients de réflexion variables selon qu'ils s'agissent du rayonnement infrarouge à grande ou courte longueur d'onde permettent de créer des vitrages spécialement adaptés aux climats froids ou aux climats chauds.

II.3.3. L'absorption :

L'énergie qui n'est ni transmise au travers du vitrage ni réfléchi par sa surface, est absorbée. Une fois que le verre a absorbé l'énergie, celle-ci est transformée en chaleur, et augmente la température du verre. Un vitrage de 5 mm d'épaisseur n'absorbe que 4% du rayonnement incident.

Le coefficient d'absorption d'un verre peut être augmenté en ajoutant au verre un produit chimique qui absorbe l'énergie solaire.

Tous les vitrages ont un grand coefficient d'absorption par rapport aux infrarouges de grande longueur d'onde. C'est cette propriété qui est à la base de l'effet de serre.

II.3.4. L'émissivité :

Quand de la chaleur ou de l'énergie solaire est absorbée par un vitrage, elle est réémise par le vitrage, soit par convection d'air le long de sa surface, soit par radiation de la surface du vitrage vers les autres surfaces. La capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative est appelée émissivité.

Les verres, ainsi que les matériaux que l'on trouve habituellement à l'intérieur d'un bâtiment, émettent typiquement des radiations sous forme d'infrarouges de grande longueur d'onde. Cette émission de chaleur radiante représente un des plus importants modes de transfert de chaleur pour un système de vitrage.

Par conséquent, la réduction de la chaleur émise par les verres sous forme de radiation peut améliorer fortement ses propriétés isolantes.

Les vitrages standard ont une émissivité de 0.90 sur l'entièreté du spectre. Cela signifie qu'ils émettent 90 % de l'énergie possible pour un objet à cette température. Cela signifie également qu'en ce qui concerne les rayonnements à grande longueur d'onde qui frappent la surface du verre, 90 % est absorbé et seul 10 % est réfléchi.

Par comparaison, les couches basse-émissivité ont un coefficient d'émissivité de 0.04. Les vitrages sur lesquels on a déposé de telles couches émettront seulement **4 %** de l'énergie possible à cette température et réfléchiront **96 %** du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. Les vitrages possédant une couche à basse émissivité sont également appelés vitrages *LowE* (**CH. I**).

II.3.5. Propriétés optique pour simple vitrage sans couche de revêtement :

Dans cette étude les propriétés optique solaire de chaque face du verre est fonction de l'angle d'incidence, après une bonne lecture dans différentes référence notamment [35], [36], et [37], on peut fournir un algorithme d'approximation de la dépendance angulaire des différentes propriétés optiques solaire (réflectivité, transmissivité et l'absorptivité), pour un simple vitrage sans couche de revêtement, les seules données exigées sont la fréquence d'onde, l'épaisseur de la couche, et l'indice de réfraction.

Les propriétés optiques angulaires d'une couche d'un verre homogène peuvent directement calculées par les équations de **Fresnel**.

La figure (2.5) montre les propriétés optiques totales d'un système de vitrage à une seule couche, chaque face (f , b) est caractérisée par une réflectivité ρ , une transmissivité τ , et une absorptivité α , dans laquelle est une propriété volumétrique du matériel.

En général la transmissivité totale et la réflectivité totale sont les caractéristiques de la surface du matériel avec le milieu adjacent, elles peuvent être différentes pour les deux faces.

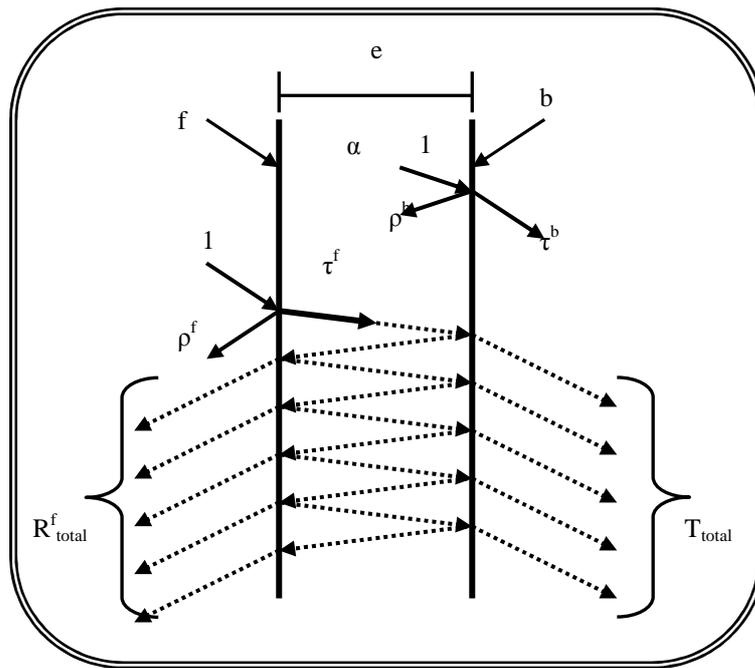


Figure 2.5 : L'effet multiple de la réflexion.

On donne l'indice de réfraction complexe ($n-iK$), l'épaisseur du verre (e), la longueur d'onde (λ), et l'angle d'incidence (θ) on peut calculer la réflectivité $\rho(\theta)$, par l'équation suivante:

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sin(\theta - \phi_r)^2}{\sin(\theta + \phi_r)^2} \right) + \left(\frac{\text{tg}(\theta - \phi_r)^2}{\text{tg}(\theta + \phi_r)^2} \right) \right] \tag{2-12}$$

Où ϕ_r est l'angle de réfraction, la relation entre l'angle d'incidence (θ) et l'angle (ϕ_r), est donné par la loi de Snell's, figure (2.6) :

$$\sin \theta = n \sin \phi_r \tag{2-13}$$

La partie réelle de l'indice de réfraction (n), est définit par le rapport entre les parties réelles des indices des deux milieux :

$$n = \frac{n_1}{n_2} \tag{2-13-a}$$

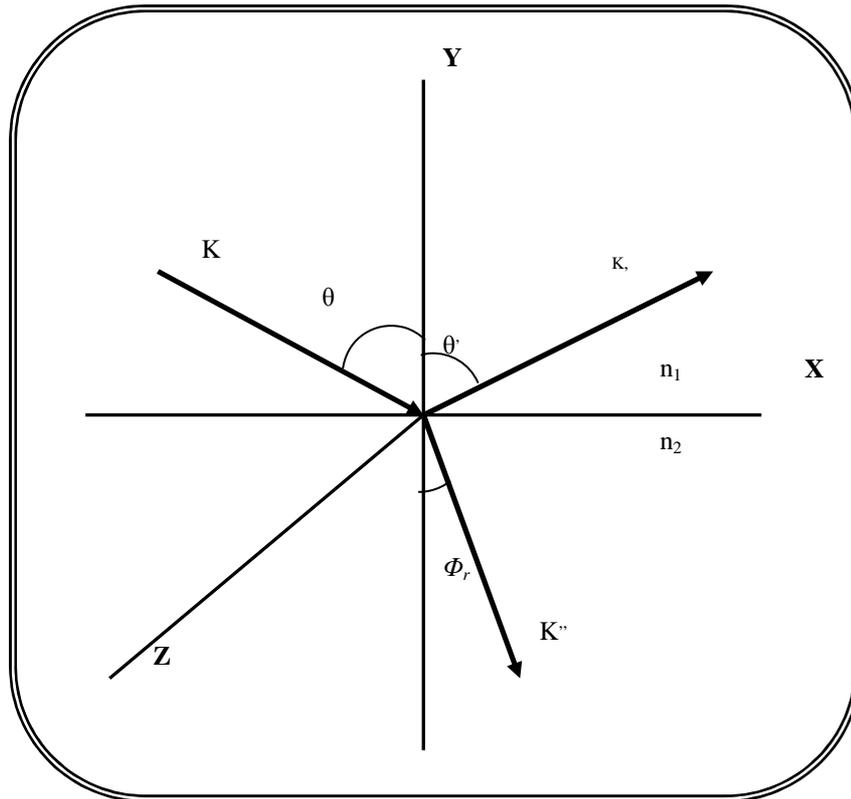


Figure 2.6 : Propriétés Optique d'un simple vitrage

A l'incidence normale l'équation (2-12) devient :

$$\rho_0 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \tag{2-14}$$

La transmittivité $\tau(\theta)$ est donnée par :

$$\tau(\theta) = 1 - \rho(\theta) \tag{2-15}$$

Tenons compte de l'effet multiple de réflexion entre les deux couches montrer sur la figure (2.5), et supposons que la réflectivité sera la même pour les deux faces, on obtient la transmittivité totale et la réflectivité totale :

$$T_{totale}(\theta) = \frac{\tau(\theta)^2 e^{-\alpha e / \cos \phi_r}}{1 - \rho(\theta)^2 e^{-2\alpha e / \cos \phi_r}} \tag{2-16}$$

$$R_{totale}(\theta) = \rho(\theta) + \rho T_{totale}(\theta) e^{-\alpha e / \cos \phi_r} \tag{2-17}$$

L'absorptivité totale est défini à partir de (2-16) et (2-17) :

$$A_{totale}(\theta) = 1 - T_{totale}(\theta) - R_{totale}(\theta) \quad (2-18)$$

Avec α est le facteur d'absorption défini comme suit :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2-19)$$

λ : est la longueur d'onde (m).

II.3.6. Propriétés optique pour simple vitrage avec une couche de revêtement :

En principe les équations dans la section précédente pourraient être utilisées pour le calcul des propriétés de vitrage avec une couche de revêtement, mais ce n'est pas vraiment pratique. Obtenir l'information de base nécessaire au sujet de la structure de couches complexes cela exige des mesures spectrophotométrie à des angles autre que l'angle d'incidence normale. Les instruments pour réaliser telles mesures ne sont pas largement disponibles est ni encore standardisés, afin d'extraire les propriétés de la couche de vitrage avec revêtement [35].

Jusqu'à ce que de telles capacités soient disponibles, une procédure approximative a été développée pour modeler les vitrages avec revêtement [39].

On commence le calcul des propriétés optiques par la définition des valeurs calculées à l'angle d'incidence normale. Si la transmittivité est supérieure à 0.645 le verre avec revêtement est substitué à un verre clair sans revêtement, si la transmittivité est inférieure ou égale à 0.645 le verre est substitué à un verre de bronze sans revêtement, pour les de verres de référence précédents (verre claire et le verre de bronze), la transmittivité et la réflectivité sont déterminées par un polynôme d'ordre quatre.

Donc la transmittivité et la réflectivité à tout angle d'incidence est rapproché à ceux de l'angle d'incidence normale par :

$$T_{totale}(\theta) = T(0)T_{REF}(\theta) \quad (2-20)$$

$$\text{Avec : } T_{REF}(\theta) = \sum_{m=0}^4 (TA)_m \cos^m \theta \quad (2-21)$$

Dans le cas d'un vitrage avec revêtement on ne peut pas considérer que les réflectivités des deux faces sont les mêmes, donc on a :

$$R^i_{totale}(\theta) = [1 - R_{REF}(\theta)] + R_{REF}(\theta) \quad (i = f, b) \quad (2-22)$$

Les indices f, b : face avant et face arrière respectivement.

$$\text{Avec : } R_{REF}(\theta) = \sum_{m=0}^4 (RA)_m \cos^m \theta - T_{REF}(\theta) \quad (2-23)$$

Et finalement :

L'absorptivité totale est défini à partir de (2-20) et (2-22) :

$$A_{totale}(\theta) = 1 - T_{totale}(\theta) - R_{totale}(\theta) \quad (2-24)$$

Le tableau (2.1) définit les coefficients (TA) et (RA) des équations:

Condition		M				
		0	1	2	3	4
$T(0) > 0.645$	TA	-0.0015	3.355	-3.840	1.460	0.0288
	RA	0.999	-0.563	2.043	-2.532	1.054
$T(0) \leq 0.645$	TA	-0.002	2.813	-2.341	-0.05725	0.599
	RA	0.997	-1.868	6.513	-7.862	3.225

Table2.1 : Coefficients du Polynôme pour le Calcul du verre avec revêtement.

II.3.7. Propriétés optique pour système à multi couches de verre :

Après la définition des propriétés optiques totales (solaire), pour un système a simple vitrage et pour différents types de revêtement (avec revêtement et sans revêtement), il faut généraliser la procédure pour le cas d'un système à multi couches, on prend en considération l'effet multiple de réflexion entre chaque couche du système, la notation des propriétés totales du systèmes et sous-systèmes est illustrée dans la figure (2-7).

La transmittivité et la réflectivité du système sont déterminés en utilisant des équations itératives qui prennent en considération l'effet multiple de réflexion entre chaque couche,

Pour un système de N couches de verres on trouve :

$$T_{i,j} = \frac{T_{i,j-1} T_{j,j}}{1 - R_{j,j}^f R_{j-1,i}^b} \quad (2-25)$$

$$R_{i,j}^f = R_{i,j-1}^f + \frac{T_{i,j-1}^2 R_{j,j}^f}{1 - R_{j,j}^f R_{j-1,i}^b} \quad (2-26)$$

$$R_{j,i}^b = R_{j,j}^b + \frac{T_{j,j}^2 R_{j-1,i}^b}{1 - R_{j-1,i}^b R_{j,j}^f} \quad (2-27)$$

$$A_j^f = \frac{T_{1,j-1} (1 - T_{j,j} - R_{j,j}^f)}{1 - R_{j,N}^f R_{j-1,1}^b} + \frac{T_{1,j} R_{j+1,N}^f (1 - T_{j,j} - R_{j,j}^b)}{1 - R_{j,N}^f R_{j-1,1}^b} \quad (2-28)$$

Dans l'équation précédente $T_{i,j} = 1$ et $R_{i,j} = 0$ si $i < 0$ ou $j > N$

On s'intéresse à un système à double vitrage ($N=2$) les équations précédentes se réduisent à :

$$T_{1,2} = \frac{T_{1,1} T_{2,2}}{1 - R_{2,2}^f R_{1,1}^b} \quad (2-29)$$

$$R_{1,2}^f = R_{1,1}^f + \frac{T_{1,1}^2 R_{2,2}^f}{1 - R_{2,2}^f R_{1,1}^b} \quad (2-30)$$

$$R_{2,1}^b = R_{2,2}^b + \frac{T_{2,2}^2 R_{1,1}^b}{1 - R_{1,1}^f R_{2,2}^f} \quad (2-31)$$

$$A_1^f = (1 - T_{1,1} - R_{1,1}^f) + \frac{T_{1,1} R_{2,2}^f (1 - T_{1,1} - R_{1,1}^b)}{1 - R_{2,2}^f R_{1,1}^b} \quad (2-32)$$

$$A_2^f = \frac{T_{1,1} (1 - T_{2,2} - R_{2,2}^f)}{1 - R_{2,2}^f R_{1,1}^b} \quad (2-33)$$

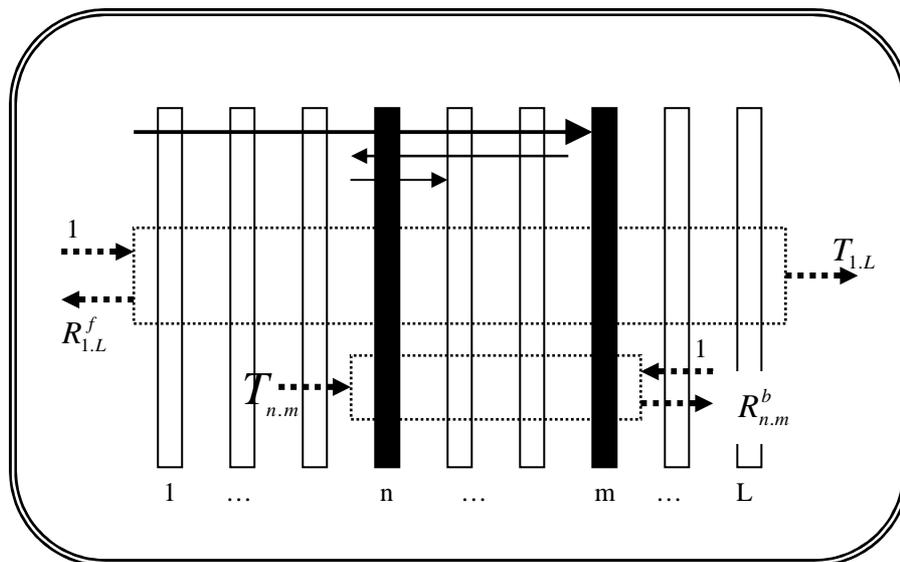


Figure 2.7 : Notation d'un système et sous-systèmes multi couches.

On peut aussi calculer la transmittivité et la réflectivité du système à multi couche par un algorithme appelé : algorithme itératif de la radiation nette, (Siegel et Howell, 1992) [40], dans ce cas et pour chaque couche du système les valeurs de la transmittivité et la réflectivité sont connues. Le rayonnement solaire est divisé en deux composantes : l'une positive (I_p) et l'autre négative (I_n), figure (2-8).

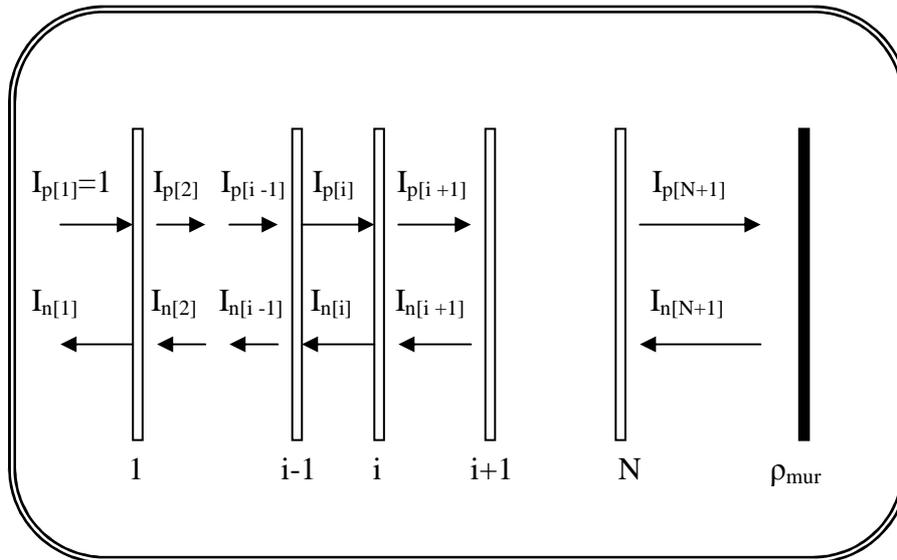


Figure 2.8 : schéma d'un système multi couches et une surface opaque à l'intérieur.

La composante positive pour chaque couche est la fraction du rayonnement solaire transmise plus la fraction réfléchi par la composante négative vers la couche opposite :

$$I_p[i] = I_p[i-1]\tau[2i-2] + I_n[i]\rho[2i-2] \quad (2-34)$$

La composante négative pour la dernière couche est donnée par :

$$I_n[N+1] = I_p[N+1]\rho_{mur} \quad (2-35)$$

Les restes composantes (de $i=1$ à N) sont calculés par :

$$I_n[i] = I_n[2i-1]\tau[i] + I_p[i]\rho[2i-1] \quad (2-36)$$

Supposons que la réflectivité est la même pour les deux faces, l'absorptivité pour chaque couche est la différence entre l'énergie entrante à la couche et l'énergie sortante de la même couche :

$$A[i] = (I_p[i] + I_n[i+1]) - (I_p[i+1] + I_n[i]) \quad (2-37)$$

Ensuite, la transmittivité totale, la réflectivité totale et l'absorptivité totale du système sont calculés par :

$$T_{totale} = I_p[N] - I_n[N] \quad (2-38)$$

$$R_{totale} = I_n[1] \quad (2-39)$$

$$A_{totale} = \sum_{i=1}^N A[i] \quad (2-40)$$

Reste à déterminer les composantes I_p et I_n , ceci conduit à la résolution d'un système de $(2N+1)$ équations, la composante $I_p[1]$ est connue, $I_p[1] = I_{gl}$ est le système s'écrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} I_n[1] = I_n[2]\tau[1] + I_p[1]\rho[1] & (1) \\ I_n[2] = I_n[3]\tau[3] + I_p[2]\rho[3] & (2) \\ \vdots & \vdots \\ I_n[N+1] = I_p[N+1]\rho_{mur} & (N) \\ I_n[i] = I_n[2i-1]\tau[i] + I_p[i]\rho[2i-1] & (N+1) \\ I_p[2] = I_p[1]\tau[2] + I_n[2]\rho[2] & (N+2) \\ I_p[3] = I_p[2]\tau[4] + I_n[4]\rho[3] & (N+3) \\ \vdots & \vdots \\ I_p[i] = I_p[i-1]\tau[2i-2] + I_n[i]\rho[2i-2] & (2N+1) \end{array} \right.$$

Ensuite, on écrit le système d'équations ci-dessus sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix}
 1 & -\tau_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\
 0 & 1 & -\tau_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\rho_3 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -\tau_3 & \dots & \dots & 0 & -\rho_3 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\tau_N & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\
 \dots & 0 & \dots \\
 \dots & -\rho_{2N-1} & 0 \\
 \dots & -\rho_{mur} & I_n[N+1] \\
 0 & 0 & \dots & I_p[2] \\
 \dots & -\rho_2 & 0 & \dots & I_p[3] \\
 \dots & 0 & -\rho_4 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & -\tau_{N-2} & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 0 & \dots & \dots & \dots & \rho_{2N-2} & 0 & \dots & \dots & -\tau_{N-1} & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -\rho_{2N} & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & -\tau_N & 1 \\
 \dots & I_p[N+1] & \dots
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_n[1] \\
 I_n[2] \\
 \dots \\
 I_n[N+1] \\
 I_p[2] \\
 I_p[3] \\
 \dots \\
 I_p[N+1]
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \rho I_p[1] \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 0 \\
 0 \\
 \tau I_p[1] \\
 0 \\
 0 \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 \dots \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

On résout le système matriciel par la méthode de décomposition ($L * U$), on obtient les $(2N+1)$ inconnus (I_p et I_n), et ensuite en calcul les trois propriétés optique pour le système multi couches.

INTRODUCTION :

Les façades se caractérisent souvent par d'importantes surfaces vitrées qui permettent de larges apports de lumière naturelle à l'intérieur du bureau. Cet apport de lumière naturelle contribue au confort visuel des occupants et est important pour leurs équilibres psychologique et physiologique.

C'est pourquoi, il importe de se pencher sur les différents éléments influençant l'apport de lumière naturelle. Ce chapitre s'intéressera ainsi aux différentes gestions de protections solaires, à la surface et à la taille de la baie vitrée et leurs influences sur l'utilisation de l'éclairage artificiel.

En premier lieu, on cite des rappels sur les différentes unités photométriques, ensuite et dans le deuxième paragraphe on a essayé de définir les différentes méthodes de prédiction de la lumière naturelle à l'intérieur des locaux, on s'intéresse spécialement à une seule méthode de calcul et finalement on discutera les résultats obtenus par cette méthode.

III.1. UNITES PHOTOMETRIQUES :

III.1.1. Le flux lumineux :

Le flux lumineux émis par une source lumineuse est la quantité de lumière émise par cette source lumineuse dans toutes les directions de l'espace. Il est quantifié en lumens, de symbole (lm).

III.1.2. L'intensité lumineuse :

L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par une source lumineuse par unité d'angle solide dans une direction donnée. Elle est quantifiée en candela (lumen par stéradian), de symbole (cd).

Celle notion intègre l'aspect directionnel et est par conséquent une grandeur vectorielle. Elle est utilisée pour caractériser des sources ponctuelles ou de petites dimensions (on parle de l'intensité lumineuse d'une lampe mais pas du ciel).

III.1.3. L'éclairage :

L'éclairage reçu sur une surface équivaut à la quantité de lumière qui arrive sur celle surface. C'est le rapport du flux lumineux reçu à l'aire de cette surface.

Il est exprimé en lux (ou lm/m^2), de symbole (lux).

Les valeurs d'éclairage rencontrées varient très fort. Elles varient de 0,2 *lux* sous une nuit de pleine lune à 100.000 *lux* sous le soleil en été.

III.1.4. La luminance :

La luminance d'une surface est le rapport de l'intensité lumineuse de cette surface dans la direction d'observation à la surface apparente de cette surface dans la direction considérée.

Elle est exprimée en candela par mètre carré, de symbole cd/m^2 .

Comme pour la notion d'intensité lumineuse, c'est une grandeur vectorielle qui tient compte de la direction d'observation.

La luminance est une grandeur photométrique fondamentale car c'est à cette dernière et à elle seule que notre œil est sensible (la luminance d'une source est directement liée à l'éclairage rétinien). Elle traduit la sensation visuelle de luminosité créée par une source lumineuse, qu'elle soit principale (lampe, ciel) ou secondaire (toute surface éclairée).

III.1.5. L'angle solide :

L'angle solide d'un cône est le rapport de la surface (S) définie par l'intersection de ce cône avec une sphère, au carré du rayon de celle-ci. Il est quantifié en stéradians, de symbole (sr). Le stéradian est donc l'angle solide qui découpe une surface de $1m^2$ sur une sphère d'un mètre de rayon. La somme des angles solides contenus dans une sphère est de 4π (surface d'une sphère de rayon unitaire).

III.2. EVALUATION DES METHODES SIMPLIFIEES DE PREDETERMINATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL :

De nombreuses recherches ont été effectuées dans le monde au sujet de l'éclairage naturel et de la mise au point de méthodes de prédiction afin que les architectes puissent disposer d'un choix de système leur permettant de prédire avec une bonne précision la qualité et la quantité de l'éclairage naturel intérieur. Les travaux [41], [42], [43], [44] et [45], définiront les principes de base et compareront les diverses méthodes employées pour le calcul de l'éclairage du jour.

Outre les 3 manières principales permettant l'étude de l'éclairage à l'intérieur des bâtiments (mesures sur site, simulations informatiques et études sur modèles réduits), [46], [47], [48] et [49], abordées lors de ces dernières années, il existe des approches plus basiques

d'estimation de la disponibilité de l'éclairage naturel qui peuvent être regroupées sous l'appellation générique 'méthodes simplifiées'.

Différentes méthodes simplifiées existent et permettent de calculer l'éclairage intérieur en fonction de l'installation d'éclairage et de l'éclairage naturel.

Citons entre autre, la méthode des diagrammes de Waldran [50], la méthode BRS, la méthode dite de l'estimation simplifiée du FLJ moyen et la norme NBN L13-002 pour les calculs liés à la présence de la lumière naturelle, la norme NBN L14-002 pour les calculs sous éclairage artificiel, ainsi que la méthode dite « méthode d'estimation de l'éclairage moyen sur un plan de travail » [51].

III.2.1. La méthode des diagrammes de Waldran :

Cette méthode est basée sur un système de projections du ciel sur une grille dont chaque élément représente une contribution (équivalente) du ciel pour l'éclairage du point considéré. Différents diagrammes existent pour différents types de ciels permettant ainsi des calculs pour différentes conditions extérieures.

III.2.2. La méthode B.R.S :

La méthode B.R.S est basée sur l'emploi de disques appelés « daylight protractor disks » qui s'applique à la bonne échelle sur les vues en coupe des bâtiments, permettent de déterminer la composante directe de l'éclairage naturel. Différents disques existent offrant la possibilité de calculer les éclairages naturels sous différents types de ciel.

III.2.3. La méthode du facteur du jour (FLJ) :

La méthode dite de l'estimation simplifiée du FLJ, permet un calcul du facteur lumière du jour moyen sur base des caractéristiques du vitrage, de sa surface nette, des caractéristiques des parois intérieures et de leurs surfaces.

III.2.4. La norme Belge :

a- La norme belge NBN L13-002 « Eclairage naturel des bâtiments - Prédétermination de l'éclairage naturel pour des conditions de ciel couvert (méthode graphique approchée) » permet le calcul de la composante de l'éclairage due à l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments en fonction de la contribution directe du ciel et des réflexions lumineuses (composante directe, composante externe réfléchie et composante interne réfléchie) pour des conditions de ciel couvert.

b-La norme belge NBN L14-002-AL 'Méthodes de prédétermination des éclairagements, des luminances et des indices d'éblouissement en éclairage artificiel d'espaces clos' permet quant à elle le calcul point par point des éclairagements sous éclairage artificiel.

III.2.5. La méthode de l'éclairage moyen sur un plan de travail :

La méthode dite « méthode d'estimation de l'éclairage moyen sur un plan de travail » est une méthode d'estimation simplifiée de l'éclairage intérieur sur un plan de travail qu'on peut le définir au dessus du sol, et les différentes parois de la pièce tel que le plafond, la fenêtre, le sol et les autres murs. Sur la base des caractéristiques du vitrage, de sa surface nette, des caractéristiques des parois intérieures et de leurs surfaces et des caractéristiques des immeubles entourant la façade on peut déterminer les différentes composantes de la lumière à l'extérieur, nous nous pencherons ici plus spécifiquement sur cette méthode.

III.3. DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL. :

III.3.1. La luminance du soleil, du ciel et du sol :

La lumière du soleil sur la façade d'une fenêtre, est fonction de l'angle d'incidence θ donné par (1.5), rappelons que (β) est la hauteur du soleil, (ϕ) l'azimut du soleil, et (ψ) la direction de la façade, une première évaluation de la luminance du sol (E_g) sous la fenêtre est donnée par la figure (3-1) :

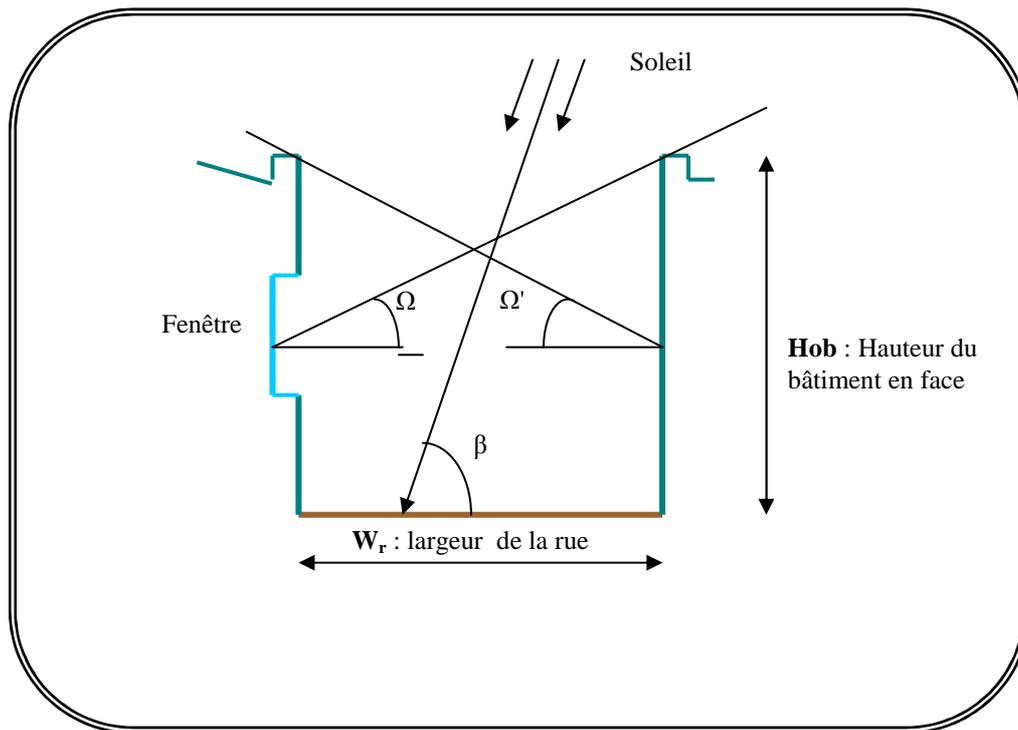


Figure 3.1: Angle d'obstruction et l'altitude solaire.

$$E_g = E_{dh} + E_{sn} \sin \beta \quad \text{Lorsque } \cos \theta > 0 \quad (3-1)$$

$$= E_{dh}, \text{ Si } \cos \theta \leq 0 \quad (3-2)$$

De la même façon, la luminance sur le sol et sous la façade des bâtiments en face est :

$$E'_g = E_{dh} + E_{sn} \sin \beta \quad \text{Lorsque } \cos \theta < 0 \quad (3-3)$$

$$= E_{dh}, \text{ Si } \cos \theta \geq 0 \quad (3-4)$$

Tel que E_{dh} et E_{sn} sont les luminances du ciel et du soleil respectivement, si les valeurs mesurées de la luminance du ciel (E_{dh}), et la luminance solaire (E_{sn}), ne sont pas disponibles pour le site, des valeurs approximatives peuvent être dérivées de l'expression suivante.

Des formules plus détaillées qui tiennent compte des différents paramètres influant sur l'atmosphère sont donnés par [51].

$$E_{dh} = 800 + 15500 \sqrt{\sin \beta} \quad (Lux) \quad (3-5)$$

$$E_{sn} = 127500 \exp\left(\frac{-0.21}{\sin \beta}\right) \quad (Lux) \quad (3-6)$$

Une évaluation plus exacte de la luminance du sol peut être obtenue si la fraction, p_{sg} , de la surface ensoleillée du sol peut être calculé. Alors la luminance du sol est :

$$E_g = E'_g = E_{dh} + p_{sg} E_{sn} \sin \beta \quad (3-7)$$

Supposons une rue de largeur W_r , a des façades parallèles droites, et une façade d'hauteur H_{ob} , comme indiqué sur la Figure (3-1), le sol sera ensoleillé quand :

$$H_{ob} \frac{\cos|\phi - \psi|}{\tan \beta} < W_r$$

Tel que:

$$p_{sg} = 1 - \frac{H_{ob} \cos|\phi - \psi|}{W_r \tan \beta} \quad (3-8)$$

III.3.2. Luminance du ciel et du soleil sur les façades verticales :

Le soleil brille sur la façade de la fenêtre quand $\cos \theta > 0$, équation (3-1) ou (3-7). Il brillera sur la fenêtre elle-même quand elle n'est pas obstruée par les bâtiments opposés. Si la façade et la fenêtre forment avec l'horizontal un angle Ω au-dessus de cet horizontal, Figure (3-1), le soleil sera visible au centre de la fenêtre quand $\tan \beta \geq \text{tg} \Omega \cos(\phi - \psi)$.

Avec plus d'obstructions compliquées (l'obstruction c'est le bâtiment en face), la présence de la lumière du soleil sur la fenêtre peut être trouvée avec les diagrammes dits « diagramme de la trajectoire du soleil ».

La luminance directe de la lumière du soleil sur la fenêtre dans le plan de la façade plane est défini par :

$$E_{vs} = E_{sn} \cos \theta \quad (3-9)$$

Quand $\cos \theta < 0$ la lumière du soleil tombe librement sur les façades parallèles des bâtiments opposés, on aura une luminance directe du soleil sur ces façades :

$$E'_{vs} = -E_{sn} \cos \theta \quad (3-10)$$

Une partie de la luminance diffusée du ciel sur la fenêtre est bloquée par les bâtiments obstruant. Si le ciel est supposé a une luminance uniforme, la luminance diffusée du ciel sur les surfaces verticales est donc :

$$E_{dw} = E_{dh} \left(\frac{1}{2} - cf_{\Omega} \right) \quad (3-11)$$

Où cf_{Ω} , est un facteur de configuration dépend des dimensions et de la forme de l'obstruction :

$$cf_{\Omega} = \frac{\sin \Omega}{2} \quad (3-12)$$

Donc, si les rayons tombant sur une rue sont approximativement horizontaux, la luminance directe totale du soleil sur la fenêtre plane est :

- Lorsque la fenêtre est ensoleillée on a :

$$E_{ws} = E_{dh} \frac{1 - \sin \Omega}{2} + E_{sn} \cos \theta \quad (3-13)$$

- Dans le cas contraire :

$$E_{ws} = E_{dh} \frac{1 - \sin \Omega}{2} \quad (3-14)$$

De la même façon la luminance directe du soleil sur une façade qui est en face la fenêtre est :

- Lorsque la fenêtre est ensoleillée

$$E'_{ws} = E_{dh} \frac{1 - \sin \Omega'}{2} - E_{sn} \cos \theta \quad (3-15)$$

- Dans le cas contraire :

$$E'_{ws} = E_{dh} \frac{1 - \sin \Omega'}{2} \quad (3-16)$$

Où Ω' est l'angle de l'horizon vu d'un point sur la façade opposée à la hauteur de la fenêtre.

III.3.3. Luminance reflétée par le sol sur les surfaces verticales :

Si le sol est pris pour agir comme un plan uniforme semi infini avec une réflectivité diffuse ρ_g (l'albédo), la luminance de la lumière du sol sur la fenêtre plane est :

$$E_{wg} = \frac{1}{2} E_g \rho_g \quad (3-17)$$

De la même façon, la luminance sur la façade opposée due à la réflectivité du sol est:

$$E'_{wg} = \frac{1}{2} E'_g \rho_g \quad (3-18)$$

Quand la fenêtre située à haut niveau au-dessus de la rue, la valeur de ρ_g devrait être estimée avec une grande exactitude.

Si les réflectivités de la fenêtre de la façade et la façade opposé à cette fenêtre sont ρ , et ρ' , (**CH.II**), on peut considérer une inter réflectivité entre ces deux façades, la luminance sur la fenêtre due à l'inter réflectivité entre les deux façades est :

$$E_{w0} = \frac{(E'_{ws} + E'_{wg})R_\omega R'_\omega + (E'_{ws} + E'_{wg})R'_\omega}{1 - R_\omega R'_\omega} \quad (3-19)$$

Où R_w , est le rapport entre la luminance sur la façade opposée et la luminance réflétee due à celle-ci sur la façade de la fenêtre; R'_w est le rapport réciproque. Ces valeurs sont approximativement le produit des facteurs de configuration et les réflectivités :

$$R_\omega = cf_\Omega \rho', R'_\omega = cf'_\Omega \rho \quad (3-20)$$

Où cf'_Ω est le facteur de configuration qui définit les obstructions vues de la façade opposée.

Si les deux côtés de la rue sont de la même hauteur et les façades ont la même réflectivité (3-20) devient :

$$E_{w0} = \frac{(E'_{ws} + E'_{wg})(0.5\rho \sin \omega)^2 + (E'_{ws} + E'_{wg})(0.5\rho \sin \Omega)}{1 - (0.5\rho \sin \Omega)^2} \quad (3-21)$$

L'usage de cette configuration des facteurs traite l'inter réflectivité entre des façades de même niveau que la fenêtre. C'est plus exact pour les fenêtres qui ont des hauteurs près du sol que celle qui ont des hauteurs loin du sol (fenêtres situées dans des étages supérieures).

III.3.4. Transmittivité du système de la fenêtre :

Trois composantes de la luminance sur la face externe de la fenêtre ont été trouvés, la luminance directe du soleil et du ciel E_{ws} ; du sol E_{wg} , et d'obstructions au-dessus de l'horizon E_{w0} . Quand le système de vitrage est équipé par des protections solaires, la lumière directe du soleil est exclue, il est nécessaire, d'introduire la transmittivité totale du système (verre + protection solaire), [52].

Par conséquent il faut estimer la luminance des rayons incidents sur chaque composant de la pièce, plafond, murs et le plan de travail de la pièce, qui est le paramètre principal pour

définir le confort visuel des occupants à l'intérieur des pièces. Ceux-ci sont inscrits sur la figure (3-2), et leurs valeurs typiques sont données dans l'annexe A : tableau A.3,

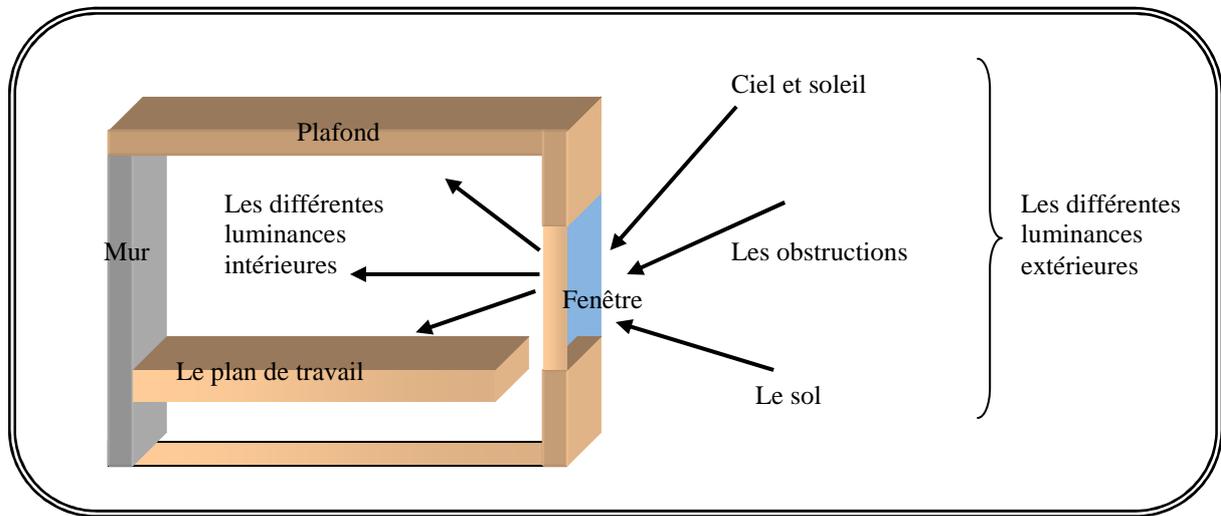


Figure 3.2: Différentes composantes de la transmittivité de la fenêtre.

Les facteurs de transmittivité typiques donnés ci-dessous sont basés sur un angle d'obstruction de 30°, il est supposé que la pièce à l'intérieur est de 6 m de largeur, de 8 m de longueur, une hauteur de 3 m et une fenêtre équipée d'un simple vitrage. Même pour des dimensions plus grandes que celles indiquées ci-dessus, une variation de 10% est enregistré [53].

Donc on définit la luminance directe dans la pièce :

Soit A_w la surface de la fenêtre, A_c la surface du plafond, A_v des parois au-dessus du plan de travail (à l'exception de la fenêtre), et A_p la surface du plan de travail lui-même, la luminance directe moyenne sur ces surfaces est donnée par :

$$\text{Plafond} \quad : \quad E_{ci} = \frac{A_w}{A_c} [E_{ws} t_{sc} + E_{w0} t_{0c} + E_{wg} t_{gc}] \quad (3-22)$$

$$\text{Autres parois} \quad : \quad E_{vi} = \frac{A_w}{A_v} [E_{ws} t_{sv} + E_{w0} t_{0v} + E_{wg} t_{gv}] \quad (3-23)$$

$$\text{Plan de travail} \quad : \quad E_{pi} = \frac{A_w}{A_p} [E_{ws} t_{sp} + E_{w0} t_{0p} + E_{wg} t_{gp}] \quad (3-24)$$

Et la luminance totale dans la pièce due à l'inter-réflexivité est approximativement :

$$E_r = \frac{E_{ci} A_c \rho_c + E_{vi} A_v \rho_v + E_{pi} A_p \rho_p}{A_{TOT} (1 - \rho_{moy})} \quad (3-25)$$

A_{TOT} : est la surface totale dans la pièce (plafond, fenêtre, paroi et plan de travail).

ρ_{moy} : est la réflectivité moyenne de toutes les surfaces de la pièce, l'équation (3-25) devient plus exacte si les réflectivités deviennent constante, la forme de la pièce et symétrique.

Finalement la luminance sur chaque surface de la pièce est :

$$\text{Plafond} \quad : \quad E_c = E_{ci} + E_r \quad (3-26)$$

$$\text{Paroi de la fenêtre} \quad : \quad E_{vw} = E_r \quad (3-27)$$

$$\text{Autres parois} \quad : \quad E_v = E_{vi} + E_r \quad (3-28)$$

$$\text{Plan de travail} \quad : \quad E_p = E_{pi} + E_r \quad (3-29)$$

A la fin de cette description, un organigramme regroupe les étapes de calcul, est présenté sur la figure (3-3).

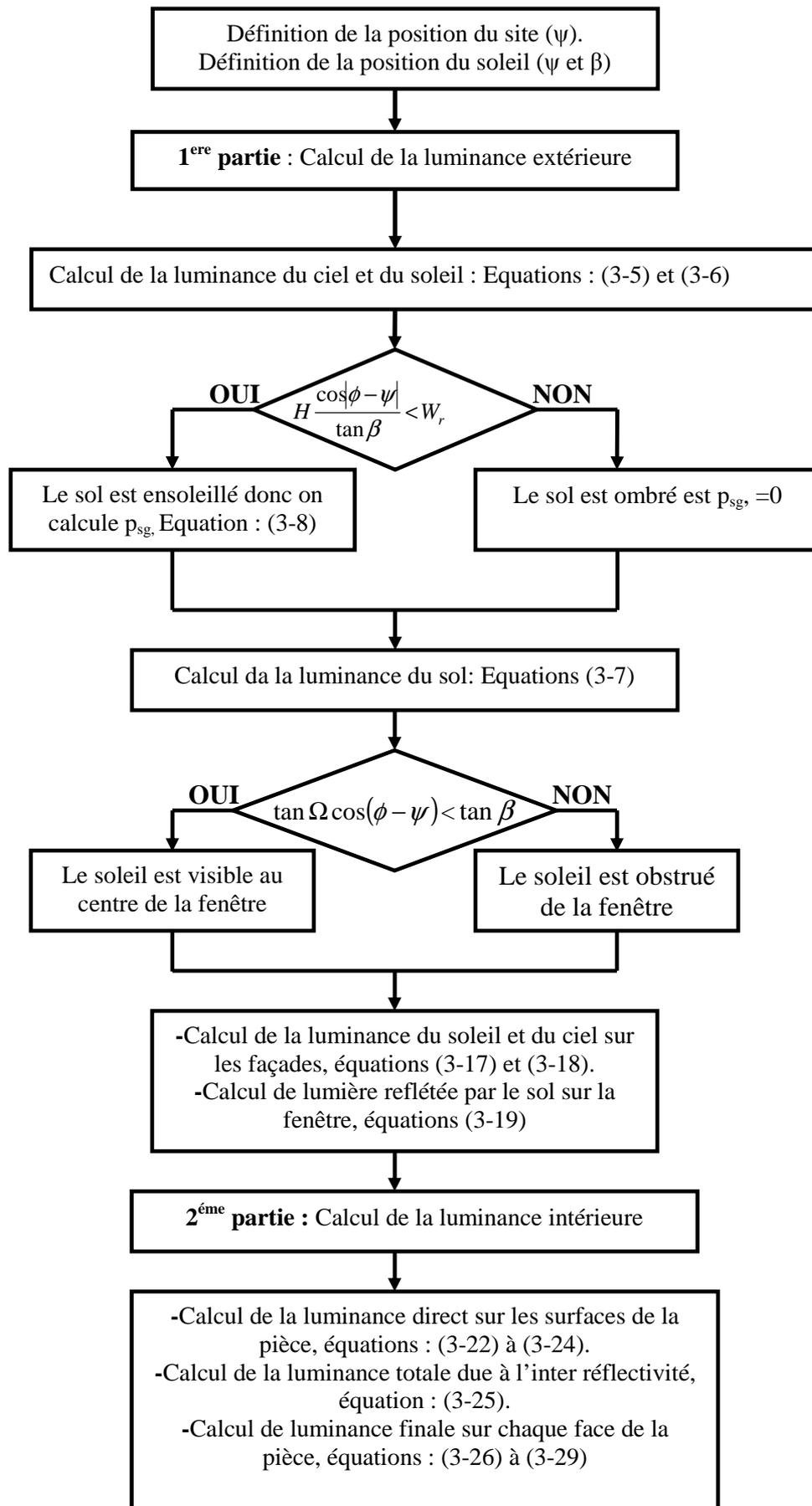


Figure 3.3 : L'organigramme de calcul : méthode de l'éclairage moyen sur un plan de travail.

III.4. INTENSITES DE L'ECLAIRAGE INTERIEUR RECOMMANDE :

Le choix d'une intensité appropriée pour l'éclairage intérieur dépend de la tâche spécifique à effectuer dans la pièce considérée. Des valeurs d'éclairage minimal sont recommandées pour toute une série de travaux [42], [49] et [50]. Il est souhaitable que la lumière d'une pièce ne tombe pas au-dessous de l'intensité recommandée, encore que dans certains cas le minimum puisse s'avérer insuffisant, dans tous ce qui suit on parle d'une luminance intérieure minimale de **380 lux**. Pour une gestion efficace de la lumière naturelle, il faut agir sur l'éclairage artificiel lorsque l'éclairement naturel est de **300Lux** seulement, cependant la mise en place de la protection solaire doit être avant que l'éclairement intérieur atteint sa valeur minimale (**380 lux**), donc on prend une valeur supérieure à la valeur recommandée, cette valeur est fixée à **400 lux**.

III.5 DESCRIPTION DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS :

La tâche à effectuer dans le présent travail consiste à prédire l'éclairage intérieur naturel pour différentes configurations de façades, figures (3-4) et (3-5). En premier lieu, le verre (la baie) dans la façade est sans protection solaire, située horizontalement en différentes partie du mur, (haute, basse et centrale), la surface de la baie varie de 10% de la surface totale de la façade jusqu'au on obtient la surface optimale pour laquelle l'éclairement intérieur est suffisant pour le confort visuelle des occupants. La deuxième configuration consiste a mettre une protection solaire et la détermination de l'emplacement de la protection solaire en fonction de la hauteur de la vitre.

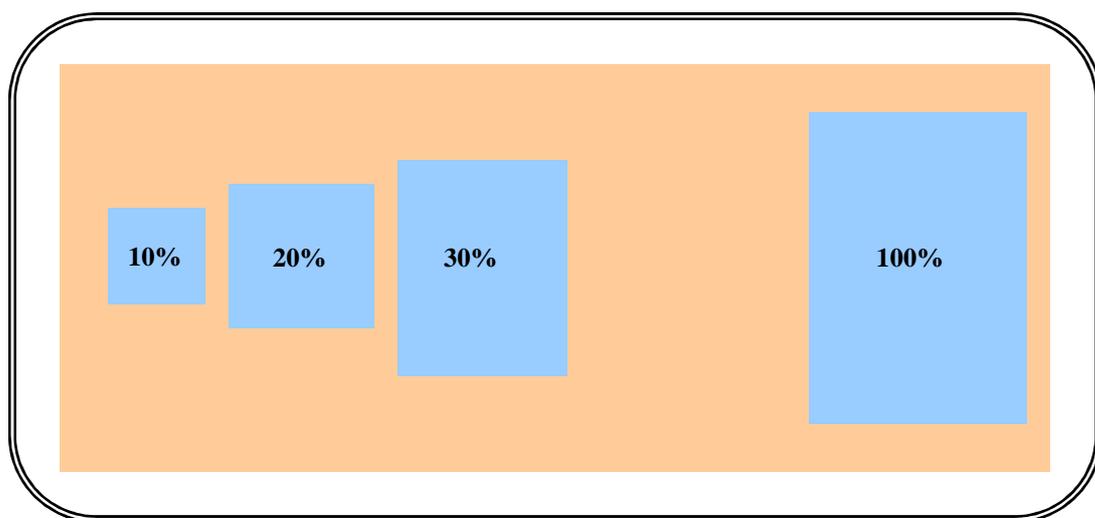


Figure 3.4 : Configuration (I) : Variation de la taille de la surface vitrée.

Examinons la figure (3-6) correspondante à la configuration (I), dans une rue de largeur W_r et une façade de hauteur H_{ob} . Les différentes positions de la baie vitrée influent directement sur l'angle Ω , angle d'obstruction et la position de la fenêtre éloignée du plan de travail où il faut déterminer l'éclairage nécessaire pour le confort visuel. Donc à chaque position de la fenêtre, il faut déterminer cet angle. Pour la configuration (II) l'angle d'obstruction reste le même quelque soit la position de la fenêtre et seule la taille de la surface vitrée influe sur l'éclairage intérieur.

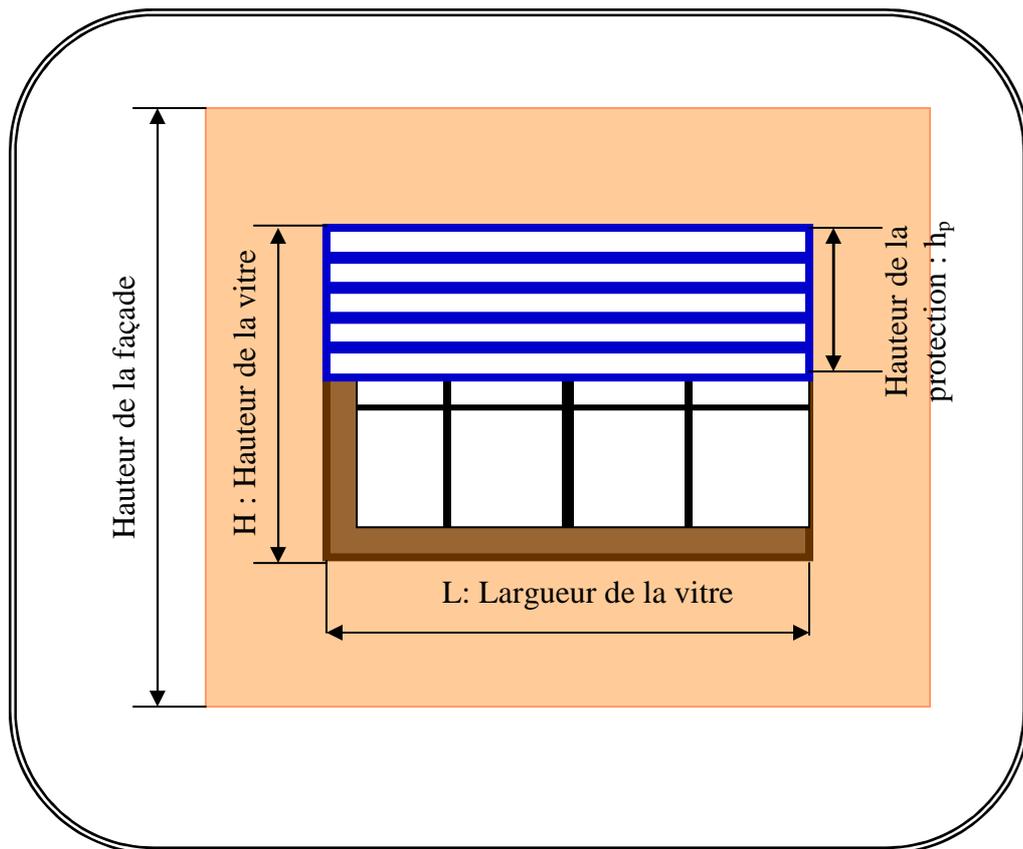


Figure 3.5 : Configuration II : La mise en place de la protection solaire.

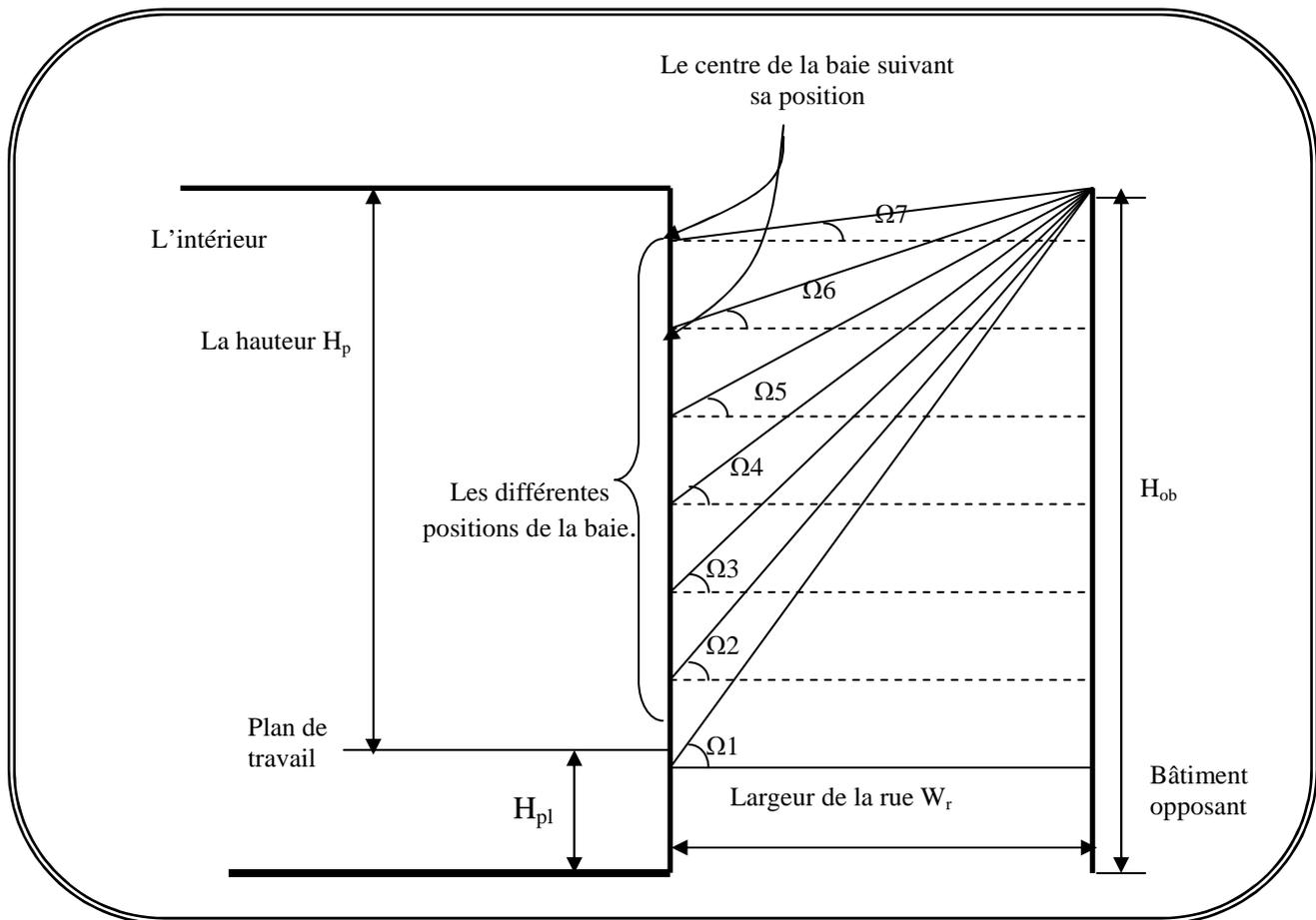


Figure 3.6 : Schématisation des différentes positions de la baie

III.5.1. DETERMINATION DE L'ANGLE D'OBSTRUCTION :

Sur la figure (3-6) on définit:

Haut : Hauteur de la façade.

Larg : Largeur de la façade.

H : Hauteur de la vitre.

L : Largeur de la vitre.

H_{pl}: Hauteur du plan de travail.

Y : Distance entre le centre de la vitre et le sol.

X : La distance qui définit la position de la vitre sur la façade.

$$\tan \Omega = \frac{H_{ob} - Y}{W_r} ;$$

$Y = Haut - (H / 2) - X$, donc l'angle d'obstruction est:

$$\tan \Omega = \frac{H_{ob} - \left(Haut - \frac{H}{2} - X \right)}{W_r} \tag{3-30}$$

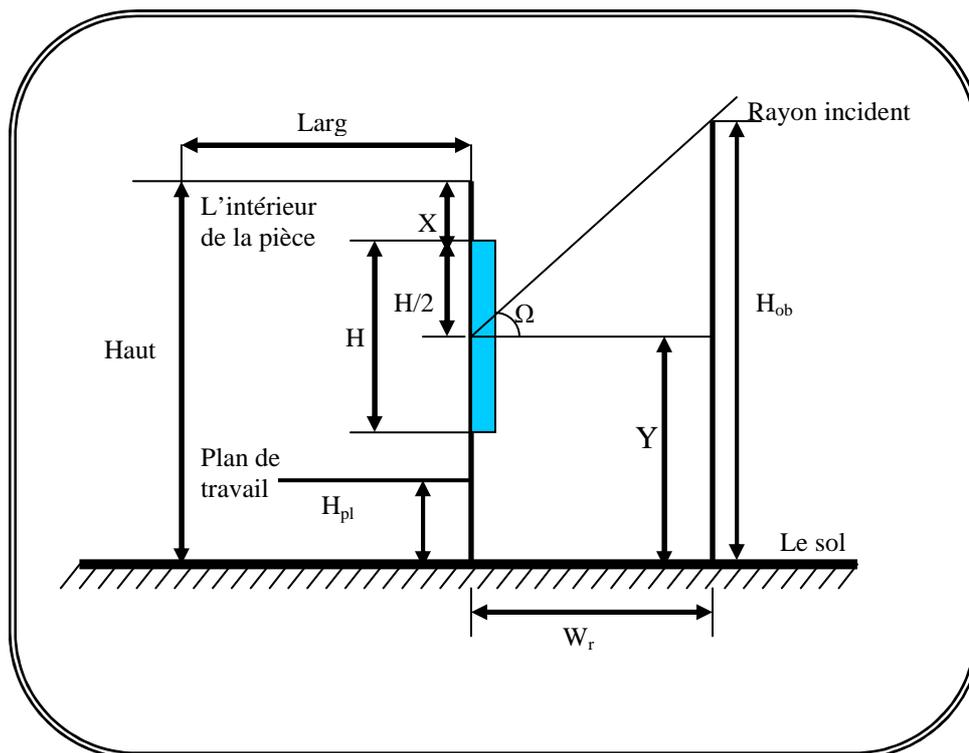


Figure 3.7 : Détermination de l'angle d'obstruction.

Pour les deux configurations précédentes on a choisi une façade d'hauteur : $haut = 4 \text{ m}^2$ et de largeur $larg = 5 \text{ m}^2$, la hauteur du bâtiment opposé $= 8 \text{ m}^2$.

Pour telle situation, le programme réalisé en langage Pascal contient une procédure de calcul de toutes les composantes de la luminance extérieure et intérieure. Nous discuterons les résultats obtenus dans le paragraphe suivant.

III.6. RESULTATS ET DISCUSSION DE L'ECLAIREMENT INTERIEUR :

Sur la figure (3.8) on constate que la taille de la baie dans la façade influence sur la distribution de l'éclairage intérieur dans le local :

En hiver et lorsque la taille de la fenêtre est suffisamment petite, les façades orientées vers le *nord* manquent d'éclairage à l'intérieur ce qui nécessite une importante surface vitrée afin d'obtenir un éclairage suffisant, par contre en été cette orientation bénéficiera d'un éclairage le petit matin et en soirée et la taille de la façade vitrée nécessaire pour assurer un éclairage suffisant et relativement diminuer par rapport à l'hiver, pour la direction *est* et pendant l'hiver les remarques concernant l'influence de la taille de la surface vitrée sur l'éclairage est qu'au matin on peut avoir un éclairage suffisant pour une petite surface seulement, cependant au soir la même taille de la surface n'est pas suffisante

d'éclairer le plan de travail, ce qui nécessite une augmentation de la taille de la surface vitrée, pour la direction *ouest* le matin on se trouve dans une situation d'assurer une importante surface vitrée alors au soir c'est le contraire,

La direction *sud* est la direction la plus favorable puisque la taille de la surface vitrée nécessaire afin d'assurer un éclairage suffisant est relativement petite et ceci pendant toute la journée, ce qui facilite le contrôle et la gestion des protections solaires et l'éclairage artificiel.

La figure (3.9), montre la période de l'utilisation de l'éclairage artificiel pour les quatre directions cardinales pour une surface vitrée sans protection solaire, on analyse cette figure on déduit qu'il est possible de contrôler l'éclairage intérieur lorsque la façade est équipée d'une protection solaire, donc l'idée est de mettre en place des protections solaire sans influence sur la durée de l'utilisation de l'éclairage artificiel, sur la figure (3.10) on montre que la durée de l'utilisation de l'éclairage artificiel dans le cas d'une surface vitrée équipée d'une protection solaire est la même si la protection a respectée les positions indiquées sur la figure (3.11), ce mode de gestion de l'éclairage intérieur est réalisé si la protection solaire est équipée d'un système motorisé.

Les résultats ci-dessous ont été comparées avec [51], qui a supposé une surface vitrée de $9m^2$ et il a estimé l'éclairage sur le plan de travail à $780Lux$, cette valeur est proche à nos résultats puisque sur les graphes de la figure (3.8) : la surface de $9m^2$ correspondante à 40% de la surface choisit dans notre étude ainsi que la valeur de l'éclairage est de $935 Lux$, une petite différence entre les deux valeurs ($780 Lux$ et $935 Lux$) est dû au choix des sites et de la position des bâtiments en face.

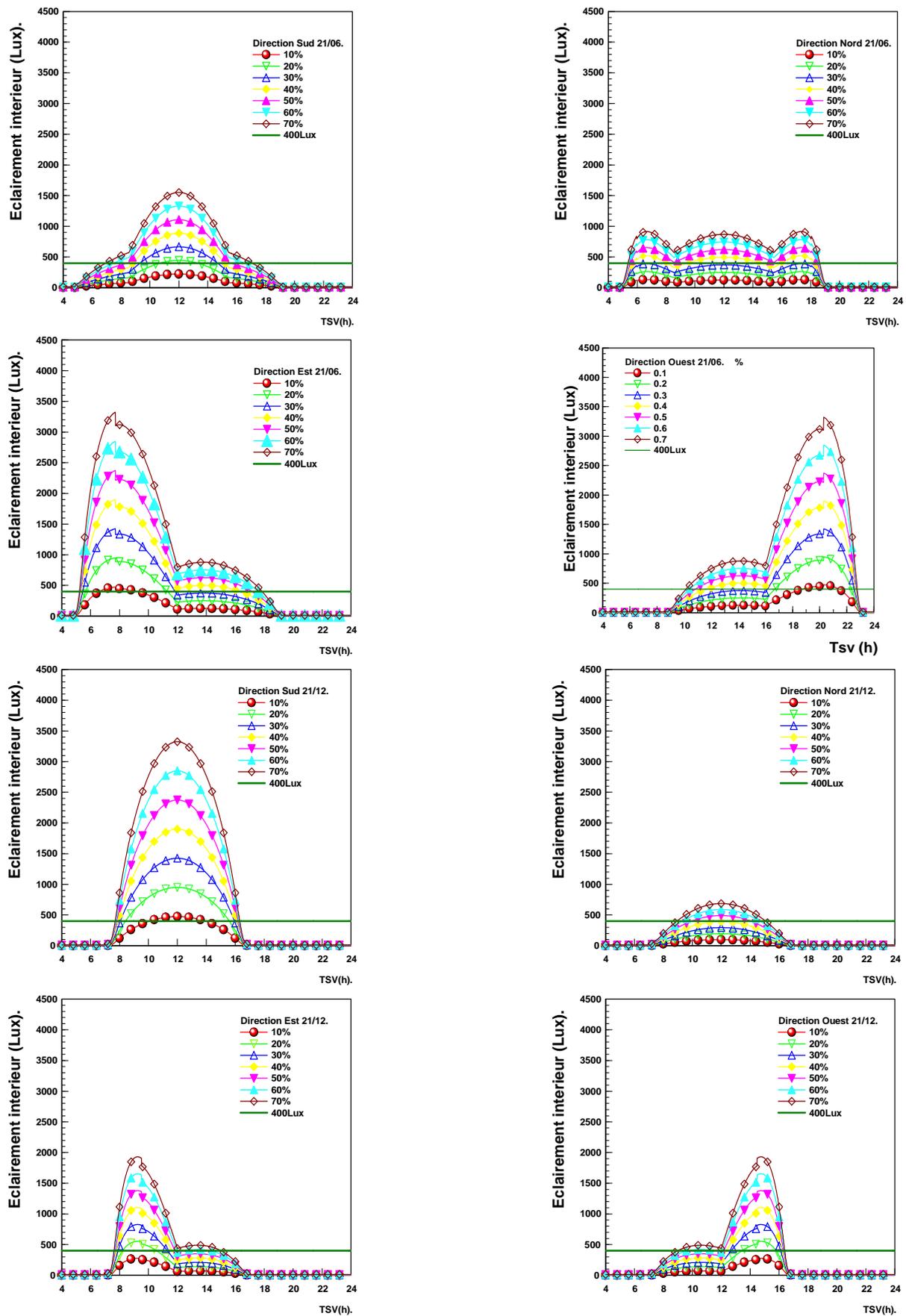


Figure 3.8 : Variation de l'éclairage intérieur en fonction de la taille de la surface vitrée. Surface totale = 20m²

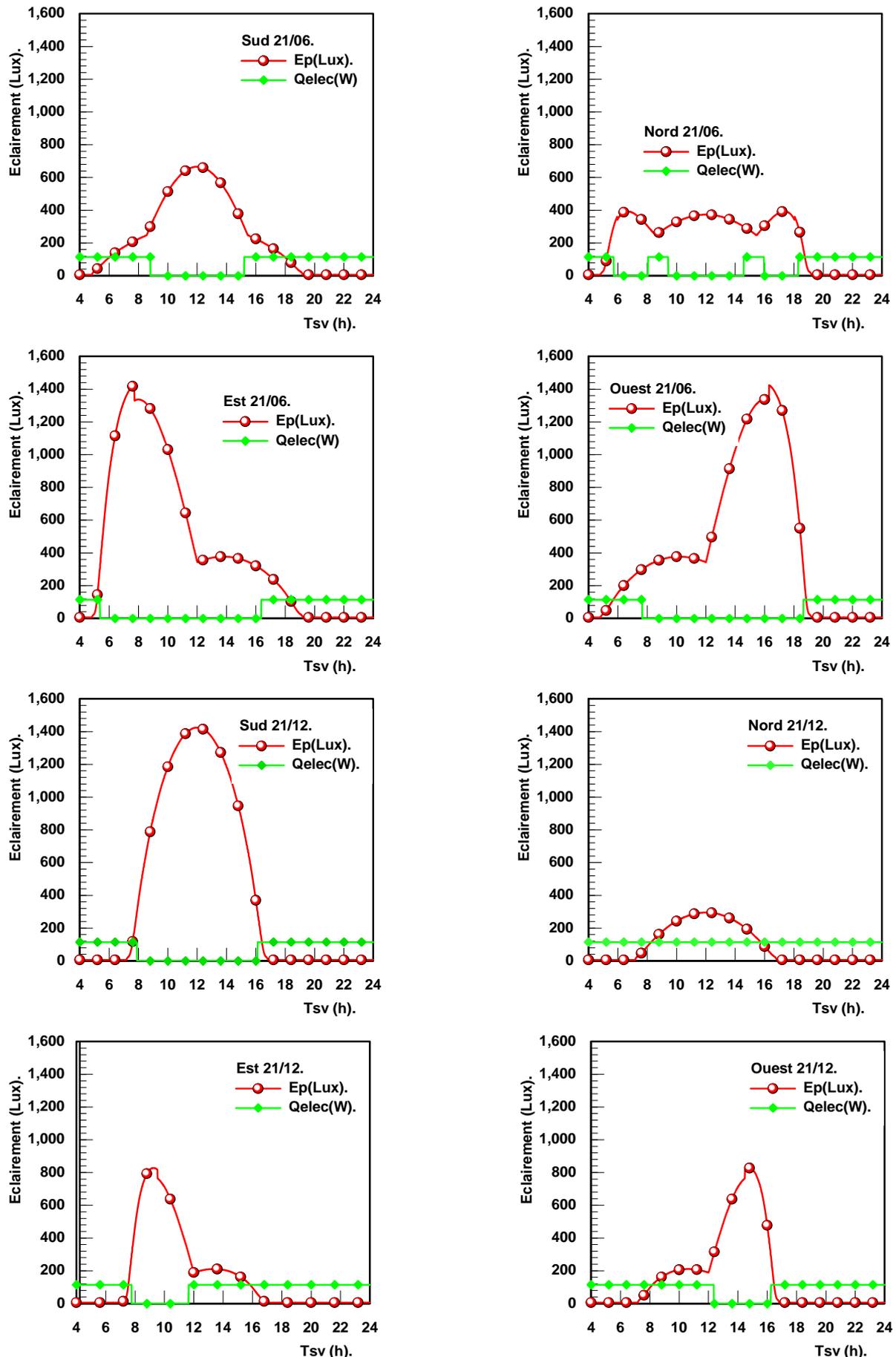


Figure 3.9 : Variation de l'éclairage intérieur. Ep : Eclairage intérieur sur le plan de travail et Qelec est l'énergie dû à l'éclairage artificiel.

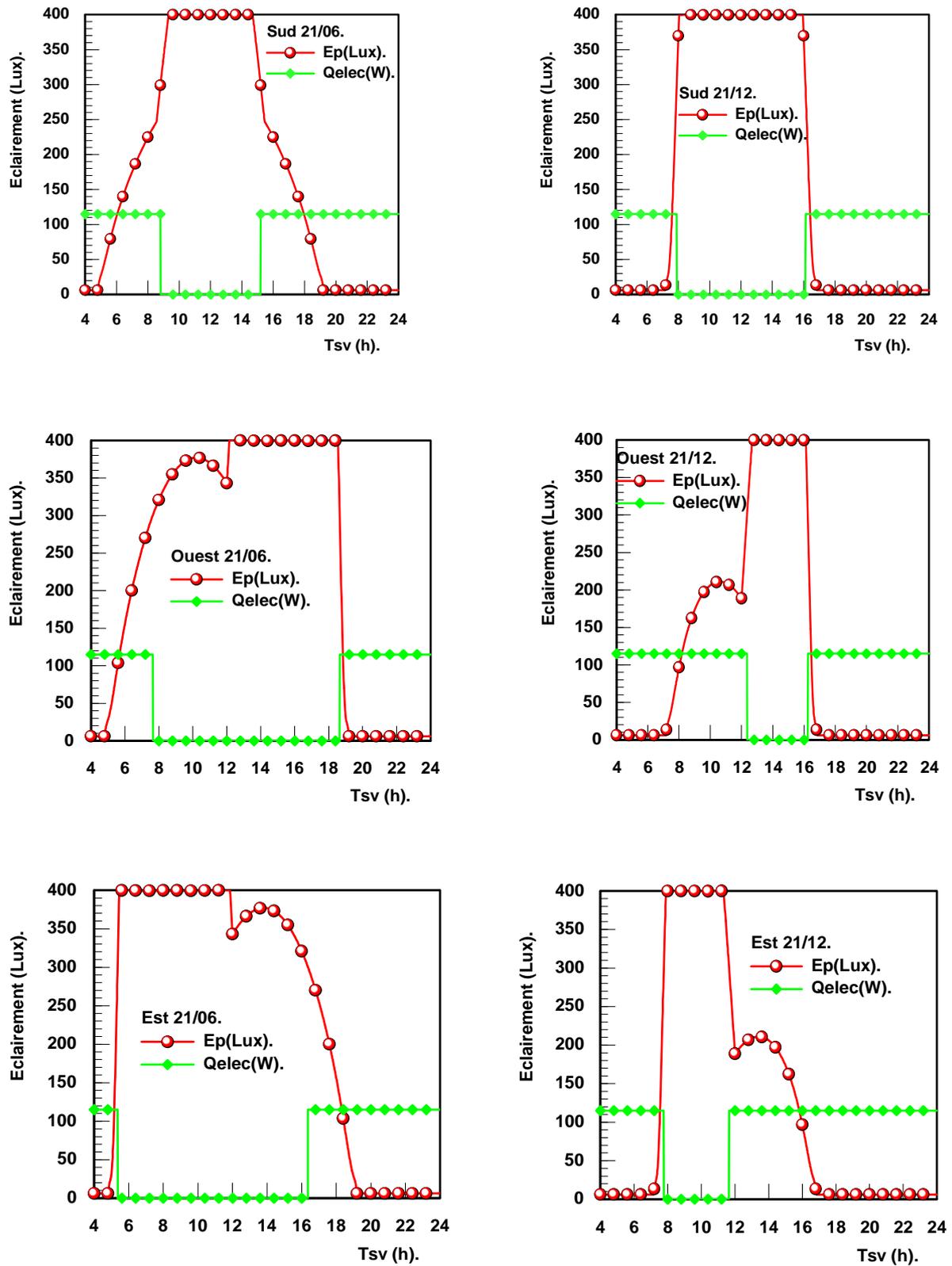


Figure 3.10 : L'influence de la protection solaire sur l'éclairage intérieur.

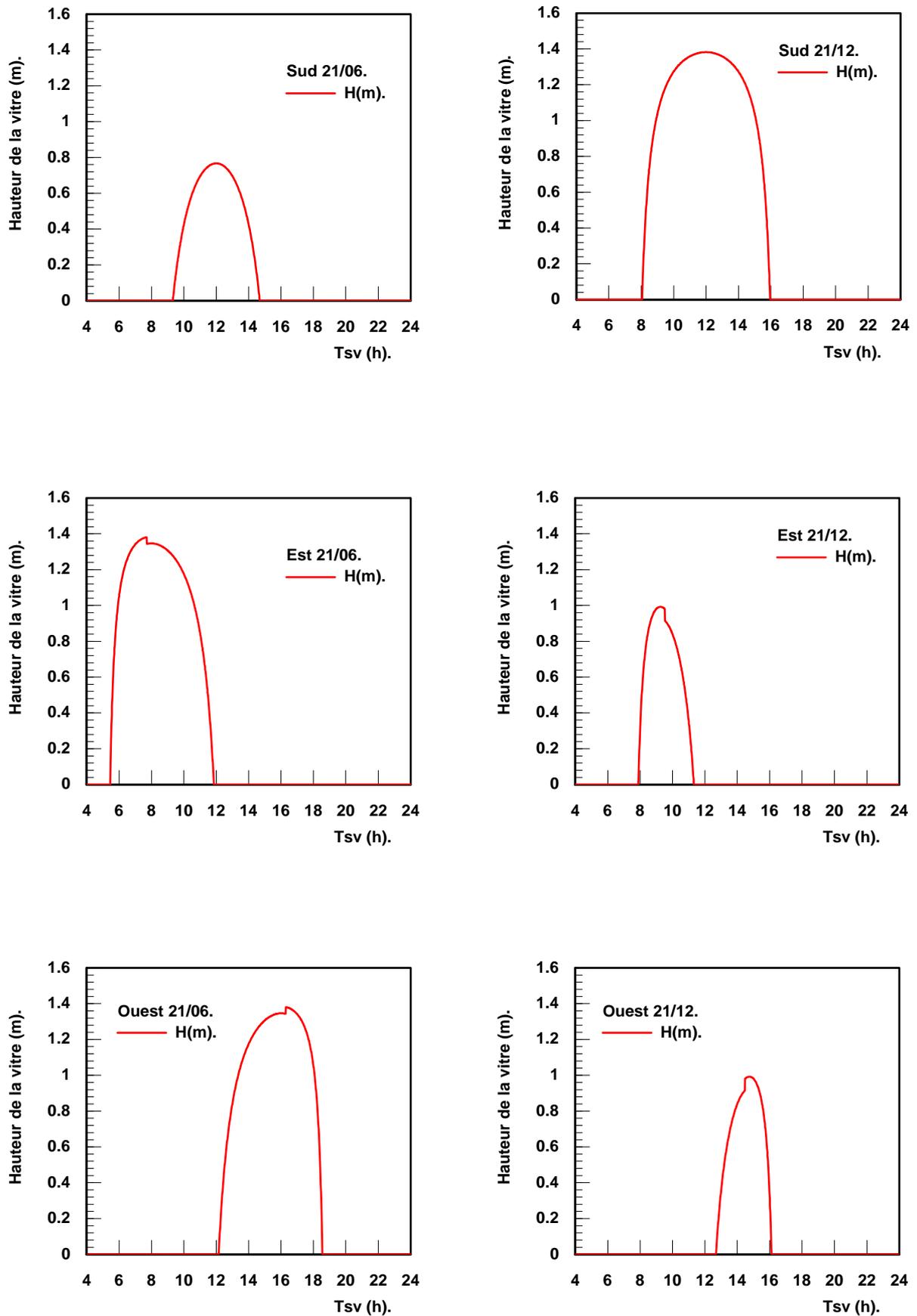


Figure 3.11 : Position de la protection solaire en fonction de la hauteur de la vitre.

Après avoir étudié les paramètres influents sur les verres, tel que les propriétés optiques solaires dans le *chapitre II* et l'éclairage intérieur dans le *chapitre III*, dans le présent chapitre nous discuterons le flux de chaleur total pénétrant vers l'intérieur d'un local à travers un système de vitrage et son influence sur le bilan thermique.

Nous intéressons à un système de simple ou de double vitrage avec et sans protection solaire, suivant le cas a étudié la protection peut être porté à l'extérieure ou à l'intérieure. On discutera aussi l'effet de la ventilation naturelle entre le verre et la protection solaire, l'effet des gaz dans la cavité dans le cas du double vitrage, l'effet de l'épaisseur des verres, ainsi que l'effet de la taille de la surface vitrée.

Commençons par la description du local et son système de vitrage.

IV.1. DESCRIPTION DU LOCAL :

Le local est un bureau situé à la ville de Batna, de Longueur : *Long*, Largeur : *Larg* et Hauteur : *Haut*, équipé d'une façade vitrée. La partie vitrée est de hauteur : *H*, largeur *W* et d'épaisseur *e*, cette façade sera orientée vers les quatre directions cardinales : *sud*, *nord*, *est* et *ouest*.

IV.1.1. Coefficient du transfert de chaleur pour la surface extérieure et intérieure :

Le coefficient thermique total d'un système de vitrage est dû au transfert de chaleur convectif et radiatif entre les surfaces exposées et l'environnement.

Les coefficients du transfert de chaleur h_{ext} et h_{int} des surfaces du vitrage extérieures et intérieures combinent les effets convectif et radiatif.

La vitesse du vent et l'orientation du bâtiment sont très importants pour la détermination de h_{ext} . Ce coefficient a été longtemps étudié et beaucoup de corrélations ont été proposées pour h_{ext} qui est fonction de vitesse du vent. Cependant, aucune étude universelle n'a été acceptée, mais on peut se limiter pour des faibles vitesses du vent à l'étude de (*Klems 1989*) qui montre considérablement la différence entre les valeurs utilisées par d'autres études.

Les coefficients du transfert convectifs sont déterminés habituellement à une température standard et des conditions de la vélocité de l'air sur chaque côté.

La vitesse du vent est d'environ de 0.2 m/s pour un climat calme, conditions de la convection libre, et de plus de 29 m/s pour les conditions de la tempête.

La valeur standard de $20 \text{ W/m}^2.K$, correspond à une vitesse du vent de 6.7 m/s , c'est une valeur qui représente les conditions climatique hivernales.

Pour une vitesse du vent au voisinage de zéro, h_{ext} varie avec l'air extérieur, la température de la surface et l'orientation de la verticale. À faible vitesse du vent, le coefficient du transfert de chaleur de la surface totale est faible, on admit la valeur de $6.8 \text{ W/m}^2.K$ (Yazdanian et Klems 1993).

Pour la convection naturelle à la surface intérieure d'un système de fenêtrage vertical, le coefficient h_{int} dépend de l'air intérieur, de la température de la surface du verre et de l'émissivité de cette surface.

IV.1.2. Température extérieure :

Pour le calcul des différents flux dans les habitats est spécialement dans le cas des façades vitrées on trouve dans la littérature [11] et [35] que la température extérieure est considéré constante, dans la présente études on définit la température extérieure pour les deux période comme suit :

La température extérieure de calcul pour l'hiver $T_{\text{ext}} := 0^\circ\text{C}$,

La température extérieure de calcul pour l'été $T_{\text{ext}} := 30^\circ\text{C}$,

IV.2. LA FORMULATION MATHEMATIQUE:

Les températures des faces du verre sont déterminées par deux méthodes différentes, la première est basée sur la résolution de l'équation de la chaleur par l'approximation des différences finies, cependant la deuxième consiste à résoudre à chaque pas du temps, les équations du bilan thermique.

IV.2.1. Méthode des différences finies :

La figure (4-1), montre le transfert de chaleur dans un simple vitrage, dans lequel une partie du rayonnement solaire incident est réfléchié, une partie est transmise directement à travers le vitrage et une partie est absorbée par le vitrage. La quantité absorbée augmente l'énergie interne du verre et donc sa température augmente aussi. En outre le verre de la fenêtre perd ou gagne de la chaleur de l'ambiance intérieur et extérieur par conduction, convection et rayonnement, l'équation de la chaleur peut être écrite pour le cas bidimensionnel comme suit:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C_p \rho_v} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho_v C_p} Q[i]_{Abs} \quad (4-1)$$

Tel que :

ρ_v : Masse volumique (W/m^3).

C_p : Chaleur spécifique, $\left(\frac{J}{Kg.K}\right)$

k : Conductibilité thermique du verre ($W/m. K$).

T : Température des faces du verre (K).

$Q_{Abs}[i]$: Chaleur absorbée par le verre, (W/m^2), dans le cas ($i=1$), le flux est défini par :

$$Q_{Abs}[1] = I_{gl} A_{total} \tag{4-2}$$

A_{total} : est défini par l'équation (2-40).

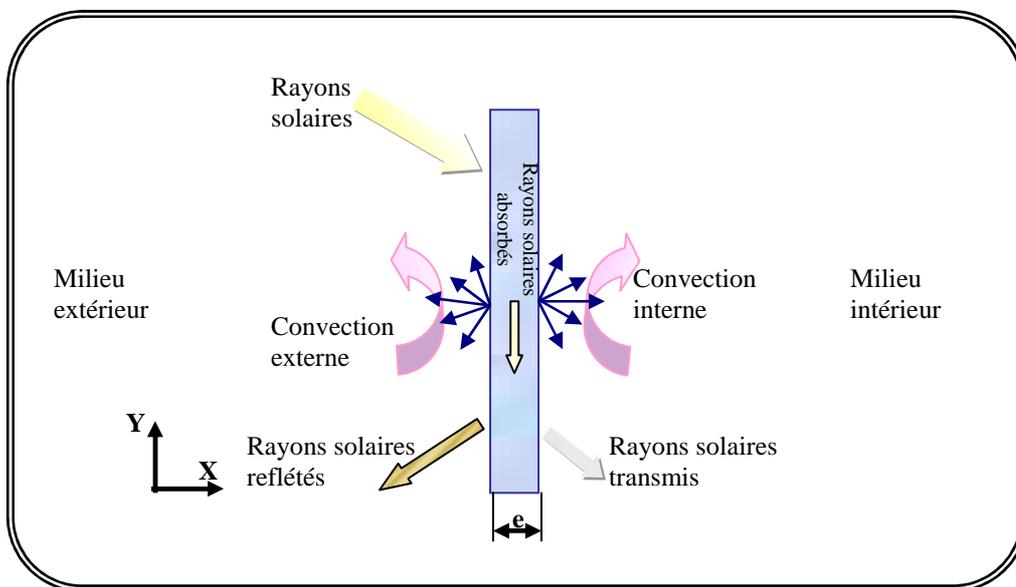


Figure 4.1: Transfert de chaleur a travers un simple vitrage.

IV.2.1.1. Les conditions aux limites :

Les extrémités inférieures et supérieures du verre, ($Y= 0$ et $Y=H$), sont considérées adiabatique, donc aucun échange de chaleur avec les locaux au dessus et au dessous du local.

Les conditions aux limites pour les frontières verticales, qui sont en contact avec l'intérieur et l'extérieur, ($X=0$ et $X=e$), sont obtenues par le bilan thermique suivant :

Pour Les extrémités inférieures et supérieures :

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial T}{\partial Y} = 0, \text{ (Parois adiabatiques)} \tag{4-3}$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \textit{Pour la surface extérieure :} \\
 & q_{X=0} = -k \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{X=0} = h_{ext} (T_{X=0} - T_{ext}) + \sigma \mathcal{E} (T_{X=0}^4 - T_{ext}^4) \quad (4-4) \\
 & \textit{Pour la surface intérieure :} \\
 & q_{X=e} = -k \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{X=e} = h_{int} (T_{int} - T_{X=e}) + \sigma \mathcal{E} (T_{int}^4 - T_{X=e}^4) \quad (4-5)
 \end{aligned} \right\} \text{Flux imposé, (Condition de Newman).}$$

IV.2.1.2. Solution numérique

Le modèle mathématique représenté par l'équation de la chaleur en régime transitoire à deux dimensions et avec le terme source (absorption du rayonnement solaire dans le milieu interne), est résolu par la méthode implicite en utilisant un schéma aux différences finies centrées. Le domaine de discrétisation du verre est divisé en *k* intervalles le long de la direction *X* et *m* intervalles le long de la direction *Y*, la Figure. (4-2).

Les équations des points intérieurs du domaine sont obtenues par la discrétisation de l'équation (4-1) et les équations des points situés sur les frontières sont obtenues par la discrétisation des équations du bilan thermique, équations (4-4) et (4-5).

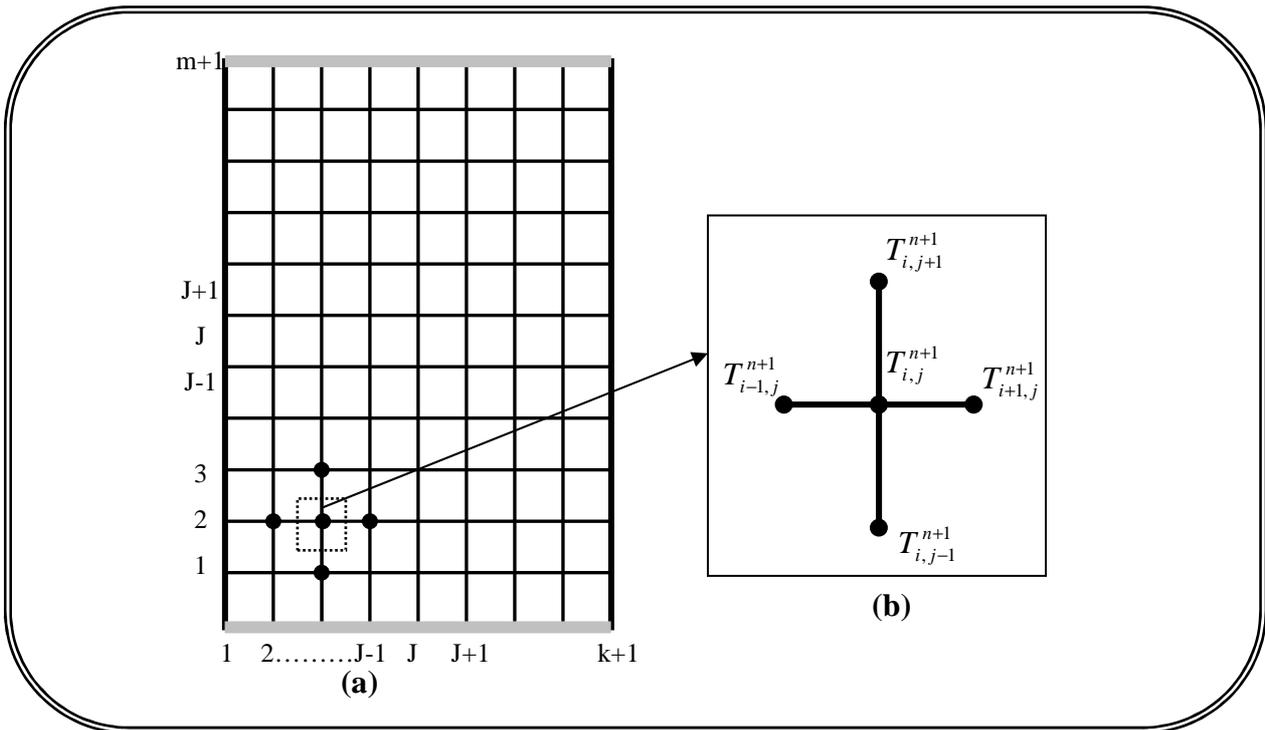


Figure 4.2 : Schéma du maillage centré.

- : Nœud de la température.
- (a) : La grille du volume de contrôle.
- (b) : Localisation de la température $T_{i,j}^{n+1}$ dans une maille au temps $n+1$.

IV.2.1.3. Discrétisation des équations.

a). Discrétisation de l'équation de la chaleur :

Rappelons que les dérivées centrées sont :

Première dérivée : $\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{\Delta x}$;

Deuxième dérivée : $\frac{\partial^2 f_{i,j}^{n+1}}{\partial x^2} = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{\Delta x^2}$;

De cette manière on remplace dans l'équation (4-1) devient :

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{k}{\rho_v c_p} \left[\frac{T_{i+1,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] - \frac{1}{\rho_v c_p} \left(\frac{I_{i+1,j}^{n+1} - I_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{k}{\rho_v c_p} \left[\frac{T_{i+1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - 2T_{i,j}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) + \frac{T_{i,j+1}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] - \frac{1}{\rho_v c_p} \left(\frac{I_{i+1,j}^{n+1} - I_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \right) \\ \frac{T_{i,j}^n}{\Delta t} &= \frac{T_{i,j}^{n+1}}{\Delta t} - \frac{k}{\rho_v c_p} \left[\frac{T_{i+1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - 2T_{i,j}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) + \frac{T_{i,j+1}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] - \frac{1}{\rho_v c_p} \left(\frac{I_{i+1,j}^{n+1} - I_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \right) \\ \frac{T_{i,j}^n}{\Delta t} &= \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2k}{\rho_v c_p} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right] T_{i,j}^{n+1} - \frac{k}{\rho_v c_p} \frac{1}{\Delta x^2} [T_{i+1,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}] - \frac{k}{\rho_v c_p} \frac{1}{\Delta y^2} [T_{i,j+1}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}] - \frac{1}{\rho_v c_p} \left(\frac{I_{i+1,j}^{n+1} - I_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \right) \\ \frac{\rho_v c_p}{k} \frac{T_{i,j}^n}{\Delta t} &= \left[\frac{\rho_v c_p}{k \Delta t} + 2 \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right] T_{i,j}^{n+1} - \frac{1}{\Delta x^2} T_{i+1,j}^{n+1} - \frac{1}{\Delta x^2} T_{i-1,j}^{n+1} - \frac{1}{\Delta y^2} T_{i,j+1}^{n+1} - \frac{1}{\Delta y^2} T_{i,j-1}^{n+1} + \frac{1}{k} \left(\frac{I_{i+1,j}^{n+1} - I_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} \right) \end{aligned}$$

On pose $\frac{\rho_v c_p}{k \Delta t} = A$,

$$\frac{\rho_v c_p}{k \Delta t} + 2 \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) = B,$$

$$-\frac{1}{\Delta x^2} = C, \quad -\frac{1}{\Delta y^2} = D, \quad \frac{1}{k \Delta x} = E$$

$$AT_{i,j}^n = BT_{i,j}^{n+1} + CT_{i+1,j}^{n+1} + CT_{i-1,j}^{n+1} + DT_{i,j+1}^{n+1} + DT_{i,j-1}^{n+1} + EI_{i+1,j}^{n+1} - EI_{i-1,j}^{n+1} \quad (4-6)$$

b). Discrétisation des Conditions aux limites :

b.1: Condition avec l'extérieur :

Supposons que $T_{ext} > T_{int}$

$$\frac{-k}{\Delta x} (T_{i+1,j} - T_{i-1,j}) = h_{ex} (T_{ex} - T_{1,j}) + \sigma \varepsilon (T_{ex}^4 - T_{1,j}^4)$$

$$\frac{-k}{\Delta x} T_{2,j} + \frac{k}{\Delta x} T_{0,j} = h_{ex} (T_{ex} - T_{1,j}) + \sigma \varepsilon T_{ex}^4 - \sigma \varepsilon T_{1,j}^4$$

$$\frac{-k}{\Delta x} T_{2,j} + \frac{k}{\Delta x} T_{0,j} = T_{ex} (h_{ex} + \sigma \varepsilon T_{ex}^3) - T_{1,j} (h_{ex} + \sigma \varepsilon T_{1,j}^3)$$

On pose : $h_{r1} = \sigma \varepsilon T_{1,j}^3$ On aura : $T_{0,j} = T_{2,j} + \frac{\Delta x}{k} T_{ex} (h_{ex} + \sigma \varepsilon T_{ex}^3) - \frac{\Delta x}{k} (h_{ex} + h_{r1}) T_{1,j}$

On pose :
$$\frac{\Delta x}{k} T_{ex} (h_{ex} + \sigma \varepsilon T_{ex}^3) = \gamma_1$$

$$\frac{\Delta x}{k} (h_{ex} + h_{r1}) = S_1$$

$$T_{0,j} = T_{2,j} + \gamma_1 + S_1 T_{1,j} \tag{4-7}$$

b.2) : Condition avec l'intérieure :

$$\frac{-k}{\Delta x} (T_{N+1,j} - T_{N-1,j}) = h_{int} (T_{N,j} - T_{int}) + \sigma \varepsilon (T_{N,j}^4 - T_{int}^4)$$

$$\frac{-k}{\Delta x} T_{N+1,j} = \frac{-k}{\Delta x} T_{N-1,j} - T_{int} (h_{int} + \sigma \varepsilon T_{int}^4) + T_{N,j} (h_{int} + \sigma \varepsilon T_{N,j}^3)$$

On pose : $h_{r2} = \sigma \varepsilon T_{N,j}^3$

$$\frac{-k}{\Delta x} T_{N+1,j} = \frac{-k}{\Delta x} T_{N-1,j} - T_{int} (h_{int} + \sigma \varepsilon T_{int}^4) + T_{N,j} (h_{int} + h_{r2})$$

$$T_{N+1,j} = T_{N-1,j} + \frac{\Delta x}{k} T_{int} (h_{int} + \sigma \varepsilon T_{int}^4) - \frac{\Delta x}{k} (h_{int} + h_{r2}) T_{N,j}$$

$$\frac{\Delta x}{k} T_{int} (h_{int} + \sigma \varepsilon T_{int}^4) = \gamma_2$$

$$-\frac{\Delta x}{k} (h_{int} + h_{r2}) = S_2$$

$$T_{N+1,j} = T_{N-1,j} + \gamma_2 + S_2 T_{N,j} \tag{4-8}$$

A la fin de cette discrétisation on obtient un système matriciel sous la forme ($A * T = B$), on le résous par la méthode de : la décomposition (LU).

Le flux total est donnée par:

$$Q_{tot} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_{int} (T_{i,m+1} - T_{int}) + \sigma \varepsilon (T_{j,m+1}^4 - T_{int}^4) + T_{total} I_{gl} \tag{4-8-1}$$

IV.2.2. Résolution des équations du bilan thermique des verres :

Supposons un système de N verres, sans protection solaire, donc il y a $2N$ faces et par conséquent $2N$ équations à résoudre, les températures des faces des verres du système sont

déterminées par la résolution du système d'équations du bilan thermique en chaque face et en tous pas du temps, la figure (4.3) montre les variables utilisées pour le double vitrage, ($N=2$).

On donne le bilan thermique pour le cas d'un système de double vitrage sans protection solaire, il est identique à celui d'un simple vitrage ($N=1$).

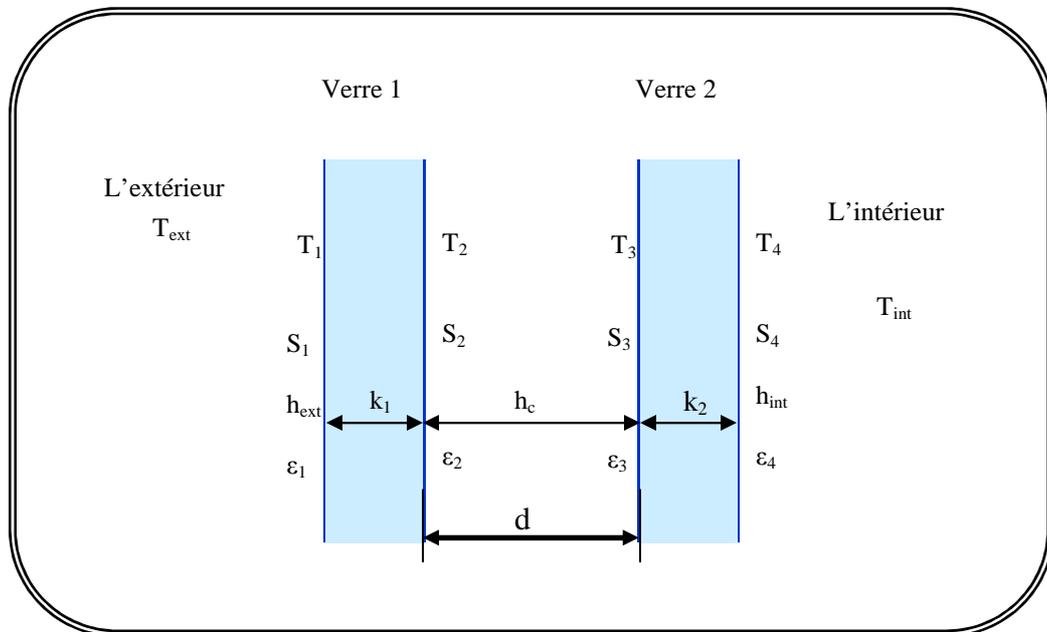


Figure 4.3 : Système avec double vitrage montrant les variables utilisées dans le bilan thermique.

IV.2.2.1. Hypothèses simplificatrices :

Pour construire le bilan suffisamment détaillé et précis, il faut parfois tenir en compte d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Pour cela on suppose :

- les couches de verre sont assez minces (quelques millimètres) afin que le stockage de la chaleur dans le verre et peut être négligeable.
- le flux de chaleur est perpendiculaire aux faces de vitrage et unidimensionnel
- Les faces de chaque verre sont isothermes, généralement c'est une bonne supposition depuis que la conductivité du verre est très grande.
- Le flux absorbé par chaque couche du verre peut être répartie également sur les deux faces de la couche.

IV.2.2.2. Les équations du bilan thermique pour le double vitrage :

Supposons que le flux entrant est positif, le flux sortant est négatif. On a quatre équations pour le système à double vitrage :

$$\varepsilon_1 \sigma (T_{ext}^4 - T_1^4) + \frac{k_1}{e_1} (T_2 - T_1) + h_{ext} (T_{ext} - T_1) + S_1 = 0 \quad (4-9)$$

$$\frac{k_1}{e_1} (T_1 - T_2) + h_c (T_3 - T_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (T_3^4 - T_2^4) + S_2 = 0 \quad (4-10)$$

$$\frac{k_2}{e_2} (T_4 - T_3) + h_c (T_2 - T_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (T_2^4 - T_3^4) + S_3 = 0 \quad (4-11)$$

$$\varepsilon_4 \sigma (T_{int}^4 - T_4^4) + \frac{k_2}{e_2} (T_3 - T_4) + h_{int} (T_{int} - T_4) + S_4 = 0 \quad (4-12)$$

$[S]_i$: Dans les équations (4.9) à (4.12), est le flux de chaleur dû au rayonnement solaire absorbée par le verre (i), il supposé uniforme le long de la couche du verre et pour des besoins du calcul du bilan thermique il est divisé également entre les deux faces de la couche, est donné par :

$$S_i = \frac{1}{2} A[i]I_{gl}. \quad (W/m^2) \quad (4-13)$$

$A[i]$: Absorption thermique de la couche du verre, défini par l'équation (2-37).

IV.2.2.3. Convection naturelle dans les cavités vitrées :

Le mouvement du fluide qui se produit dans les cavités vitrées est dû à la différence de la température entre l'environnement intérieur et extérieur, trois paramètres caractérisant le mouvement du fluide dans la cavité, le rapport (Ag) qui est le rapport entre la hauteur (H) de la cavité et l'écartement entre les deux verres (d), le nombre de *Prandtl* (Pr) et le nombre de *Rayleigh* (Ra).

IV.2.2.4. Détermination du coefficient du transfert convectif entre le deux verres h_c :

On définit les nombres adimensionnels et les différentes propriétés des gaz qui seront traité dans la cavité :

➤ **Le nombre Rayleigh:**

$$Ra = \frac{\rho_{gaz}^2 d^3 g \beta_{gaz} C_{p_{gaz}} \Delta T}{\mu_{gaz} k_{gaz}} \quad (4-14-1)$$

Tel que :

ΔT : Différence de température dans la cavité (K).

$$\beta_{gaz} = \frac{1}{T_m} (1/K) \quad (4-14-3)$$

T_m : Température moyenne du gaz de la cavité :

$$T_m = \frac{1}{2}(T_2 + T_3) \quad (4-14-2)$$

➤ **Propriétés thermophysiques des gaz : (C_p, k, ρ et μ)_{gaz}**

Les gaz dans la cavité sont supposés des gaz parfait, donc la masse volumique est définie comme suit :

$$\rho_{gaz} = \frac{P \times M}{R \times T_m}$$

ρ_{gaz} : Masse volumique (Kg/m^3).

$R = 8.314$ ($j/mol.k$).

M : Masse molaire donnée dans l'annexe (A) : tableau (A-5).

Dans l'annexe (A) les tableaux (A-6) à (A-8) donnent les différentes constantes pour le calcul de la viscosité dynamique, la chaleur spécifique à pression constante et la conductivité thermique.

μ_{gaz} : Viscosité dynamique du gaz ($kg/m.s$).

$C_{p_{gaz}}$: Chaleur spécifique à pression constante ($J/kg.K$).

k_{gaz} : Conductivité thermique ($W/m.K$).

➤ **Le nombre de Grashof (Gr) :**

$$Gr = \frac{\beta_{gaz} g \rho_{gaz}^2}{\mu_{gaz}} (T_2 - T_3) d^3 \quad (4-14-4)$$

➤ le nombre de Prandtl (Pr)

$$Pr = \frac{C_{p_{gaz}} \mu_{gaz}}{k_{gaz}} \quad (4-14-5)$$

➤ Le coefficient du transfert de la chaleur par convection naturelle ayant rapport directement avec le nombre de Nusselt :

$$\text{Et } h_c = \frac{k_{gaz} Nu}{d} \quad (4-16)$$

Il existe plusieurs corrélations traitant le problème du mouvement dans les cavités, *Eckert et Carlson (1961)*, *Jakob (1967)*, *Yin. (1978)* et [55]. Ces corrélations ont la forme générale suivante:

$$Nu = c(Gr)^a \left(\frac{H}{d} \right)^d \quad (4-17)$$

Les cités ci-dessus, sont données dans l'annexe : tableau A-9.

Depuis (1980) d'autres chercheurs ont proposé d'autres types de corrélation qui sont différentes de celles de la loi des puissances simple. *Raithby et Wong (1981)*, ont développé une corrélation basée sur les résultats numériques, en utilisant la méthode des différences finies, pour des cavités verticales rempli d'air. Leur corrélation est valide pour les rapports allant de 2 à 80 et Ra allant de 10^3 à 10^5 . Les études expérimentales *Elsherbiny, Raithby et Hollands (1982)* sur les cavités rectangulaires à différents angles, ont permis d'avoir six corrélations [56].

Une corrélation améliorée a été développée plus tard par *Wright (1996)* et utilisée dans la norme de calcul (ISO 15099), [11]. L'avantage de cette norme est l'utilisation de plusieurs angles d'inclinaison de la cavité avec un rapport de cavité très élevé [57].

Cette corrélation définit le nombre de *Nusselt* en fonction du nombre de *Rayleigh Ra* et du ratio A_g de la cavité, tel que:

$$A_g = \frac{H}{d} \quad (4-18-1)$$

$$Nu = \text{Max}[Nu_1, Nu_2] \quad (4-18-2)$$

$$Nu_1 = 0.0673838 Ra^{1/3} \quad Ra > 5.10^4 \quad (4-18-3)$$

$$Nu_1 = 0.028154 Ra^{0.4134} \quad 10^4 < Ra \leq 5.10^4 \quad (4-18-4)$$

$$Nu_1 = 1 + 1.7596678.10^{-10} Ra^{2.2984755} \quad (4-18-5)$$

$$Nu_2 = 0.242 \left[\frac{Ra}{A_g} \right] \quad (4-18-6)$$

On s'intéresse dans cette étude à deux types de corrélations, la première est celle de **Jacob 1967** rapport de la cavité allant de : 3.2 à 42.2), tandis que la deuxième corrélation correspond à la norme (ISO 15099).

IV.2.2.5. méthode de résolution du système d'équations du bilan

thermique :

Le système d'équations du bilan thermique, (équations (4-9) à (4-12)), est résolu par la méthode suivante :

a) Linéarisation des équations :

Pour l'équation (4-9), on pose :

$$h_{r,ext} = \varepsilon_1 \sigma T_{ext}^3 ; \quad h_{r,1} = \varepsilon_1 \sigma T_1^3 ;$$

On aura :

$$\begin{aligned} \text{de (4-9)} \Leftrightarrow h_{r,ext} T_{ext} - h_{r,1} T_1 + \frac{k_1}{e_1} T_2 - \frac{k_1}{e_1} T_1 + h_{ext} T_{ext} - h_{ext} T_1 + S_1 &= 0 \\ \Leftrightarrow -T_1 \left(h_{r,1} + \frac{k_1}{e_1} + h_{ext} \right) + T_2 \left(\frac{k_1}{e_1} \right) &= -T_{ext} (h_{r,ext} + h_{ext}) - S_1 \end{aligned} \quad (4-19)$$

De même pour les équations (4-10), (4-11) et (4-12), on pose

$$h_{r,3} = \frac{\sigma \varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} T_3^3, \quad h_{r,2} = \frac{\sigma \varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} T_2^3,$$

$$h_{r,int} = \varepsilon_4 \sigma T_{int}^3, \quad h_{r,4} = \varepsilon_4 \sigma T_4^3,$$

On obtient :

$$T_1 \left(\frac{k_1}{e_1} \right) - T_2 \left(\frac{k_1}{e_1} + h_c + h_{r,2} \right) + T_3 (h_c + h_{r,3}) = -S_2 \quad (4-20)$$

$$T_2 (h_c + h_{r,2}) - T_3 \left(\frac{k_2}{e_2} + h_c + h_{r,3} \right) + T_4 \left(\frac{k_2}{e_2} \right) = -S_3 \quad (4-21)$$

$$T_3 \left(\frac{k_2}{e_2} \right) - T_4 \left(h_{r,4} + \frac{k_2}{e_2} + h_{int} \right) = -T_{int} (h_{r,int} + h_{int}) - S_4 \quad (4-22)$$

b) Ecriture du système d'équations (équation (4-19) à (4-22)), sous la forme matricielle

$$\mathbf{AxT=B}.$$

c) Pour le premier pas de calcul on définit une température afin de calculer h_r .

d) On cherche la solution $\mathbf{T=A^{-1}B}$ par la décomposition (LU).

e) Recalcul de h_r , en utilisant la solution de l'étape d.

f) Recalcul de la solution $\mathbf{T=A^{-1}B}$, en utilisant la nouvelle valeur de h_r .

On répète les étapes d, e et f jusqu'à ce que la condition de convergence soit vérifiée :

➤ Condition de convergence : $\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} |\Delta\theta_i| < 0.001$.

La méthode converge après 6 à 8 itérations.

IV.3. LES EQUATIONS DU BILAN THERMIQUE POUR LE DOUBLE VITRAGE AVEC UNE PROTECTION SOLAIRE :

Pour calculer la température de la surface intérieure du vitrage dans le cas d'un système avec des protections solaires intérieures ou extérieures, on tient compte de l'absorption du rayonnement solaire incident par les différentes couches du système (verre + protection), du rayonnement solaire réfléchi par celles-ci.

Le bilan thermique tient aussi compte de la convection provenant de la circulation d'air dans le canal (écartement) situé entre le verre et la protection solaire et de l'échange radiatif entre les différentes faces.

La figure (4-4) représente les variables utilisées pour le bilan thermique, le problème en considération est simplifié à trois plaques parallèles de hauteur H , largeur W et d'épaisseur e . Les équations du bilan thermique sont différentes de celles du double vitrage sans protection, deux nouvelles équations sont ajoutées, une pour chaque face de la protection.

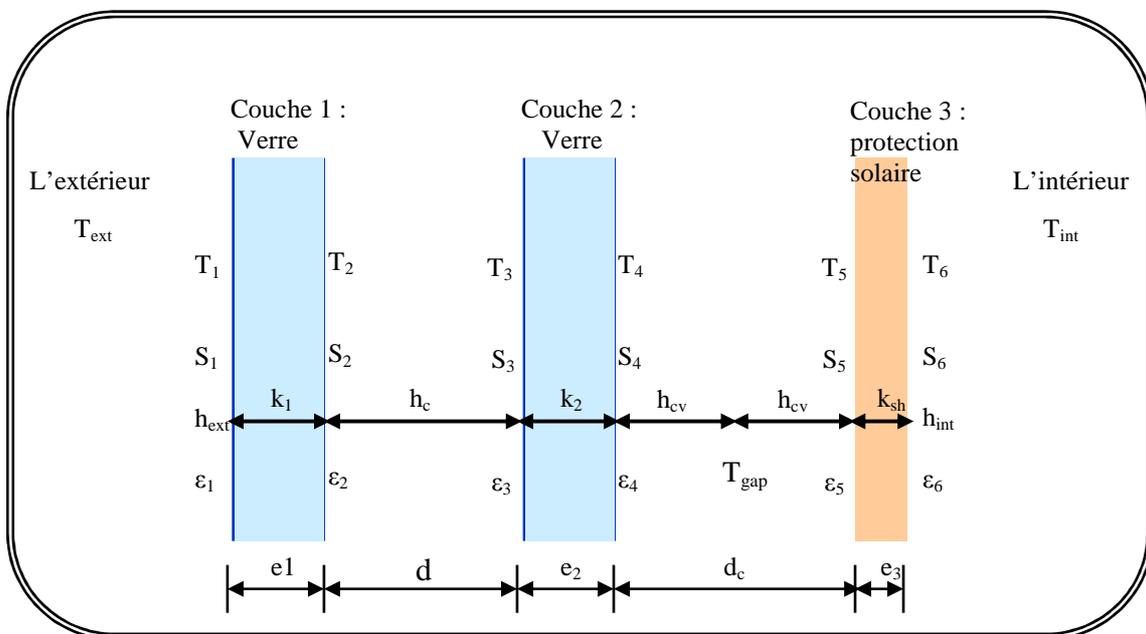


Figure 4.4 : Système avec deux couches de verre et une protection solaire intérieure montrant les variables utilisées dans le bilan

On suppose toujours que le flux entrant est positif, le flux sortant est négatif, on obtient pour le système du double vitrage avec une protection intérieure les six équations suivantes :

$$\varepsilon_1 \sigma (T_{ext}^4 - T_1^4) + \frac{k_1}{e_1} (T_2 - T_1) + h_{ext} (T_{ext} - T_1) + S_1 = 0 \quad (4-23)$$

$$\frac{k_1}{e_1} (T_1 - T_2) + h_c (T_3 - T_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (T_3^4 - T_2^4) + S_2 = 0 \quad (4-24)$$

$$\frac{k_2}{e_2} (T_4 - T_3) + h_c (T_2 - T_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (T_2^4 - T_3^4) + S_3 = 0 \quad (4-25)$$

$$\frac{k_2}{e_2} (T_3 - T_4) + h_{cv} (T_{gap} - T_4) + \sigma \frac{\varepsilon_4 \varepsilon_5}{1 - (1 - \varepsilon_4)(1 - \varepsilon_5)} (T_5^4 - T_4^4) + S_4 = 0 \quad (4-26)$$

$$h_{cv} (T_{gap} - T_5) + \frac{k_{sh}}{e_3} (T_6 - T_5) + \sigma \frac{\varepsilon_4 \varepsilon_5}{1 - (1 - \varepsilon_4)(1 - \varepsilon_5)} (T_4^4 - T_5^4) + S_5 = 0 \quad (4-27)$$

$$\varepsilon_5 \sigma (T_{int}^4 - T_6^4) + k_{sh} (T_5 - T_6) + h_{int} (T_{int} - T_6) + S_6 = 0 \quad (4-28)$$

Tel que:

T_5 et T_6 les températures de la protection intérieure.

k_{sh} : Conductibilité thermique de la protection ($W/m \cdot K$).

e_3 : Epaisseur de la protection (m).

d_c : Espacement entre le verre et la protection (m).

T_{gap} : Température de l'air entre le verre et la protection.

h_{cv} : Coefficient du transfert de chaleur convectif entre l'air et la face adjacente (verre ou protection).

Avant de déterminer les six températures des différentes faces (verre ou protection), il faut d'abord calculer la température (T_{gap}).

Le transfert thermique convectif pour la couche du verre avec l'air est :

$$q_{c,verre} = h_{cv} (T_4 - T_{gap}) \quad (W/m^2) \quad (4-29)$$

La chaleur correspondante pour la couche de la protection et l'air est :

$$q_{c,sh} = h_{cv} (T_5 - T_{gap}) \quad (W/m^2) \quad (4-30)$$

Le coefficient du transfert de chaleur par convection est donné par :

$$h_{cv} = 2h_c + 4V \quad (W/m^2K) \quad (4-31)$$

Tel que:

h_c : Coefficient du transfert de chaleur par convection dans la cavité donné par l'équation (4-16).

V : Vitesse moyenne de l'air dans le canal (m/s).

IV.3.1. Détermination du profil de la température :

Le profil de la température figure(4-5), dans le canal dépend de la vitesse de l'air dans le canal, du coefficient du transfert de chaleur convectif des deux faces (h_{cv}) et de la distance h tel que : $h : H_0 \rightarrow H$:

H_0 : Hauteur caractéristique, (longueur de pénétration de la température) en (m), elle est défini par :

$$H_0 = \frac{\rho_{air} C_{p,air} d_c}{2h_{cv}} V \quad (4-31)$$

$$T_{gap}(h) = T_{moy} - (T_{moy} - T_{gap,int}) e^{-h/H_0} \quad (4-32)$$

T_{moy} : Température moyenne des deux faces défini par:

$$T_{moy} = \frac{T_{verre} + T_{prot}}{2} = \frac{T_4 + T_5}{2} \quad (4-33)$$

$T_{gap,int}$: Température d'entrée de l'air.

A la sortie la température est données par :

$$T_{gap,ext} = T_{moy} - (T_{moy} - T_{gap,int}) e^{-H/H_0} \quad (4-34)$$

La température moyenne de l'air est données par :

$$T_{gap} = \frac{1}{H} \int_0^H T_{gap}(h) dh = T_{moy} - \frac{H_0}{H} (T_{gap,ext} - T_{gap,int}) \quad (4-35)$$

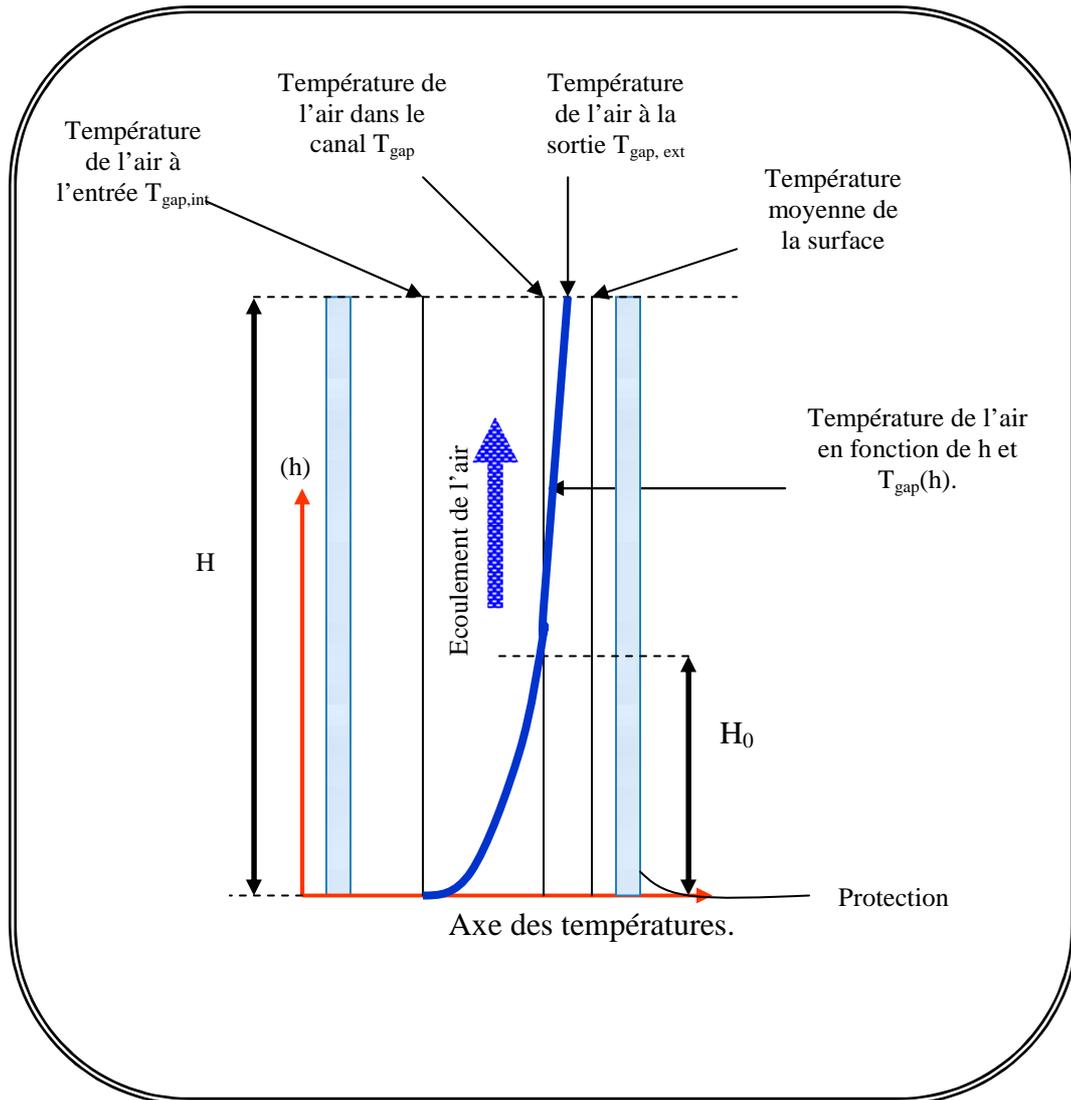


Figure 4.5 : Variation de température de l'air dans le canal.

IV.3.2. Equation de la différence des pressions :

Les variables utilisées dans cette analyse sont montrées dans la figure (4-6), l'équation de perte de charge pour l'écoulement de l'air à l'intérieur du canal est donnée comme suit:

$$\Delta p_T = \Delta p_B + \Delta p_{HP} + \Delta p_Z \tag{4-36}$$

Δp_T : est la différence de pression entre l'air de l'intérieur et l'air du canal, en (Pa), elle est définie par :

$$\Delta p_T = \rho_0 T_0 g H \sin \Sigma \frac{|T_{gap} - T_{gap,in}|}{T_{gap} T_{gap,in}} \tag{4-37}$$

où :

ρ_0 : Densité de l'air à T_0 (kg/m^3).

T_0 : Température de référence (283K).

g : Accélération de la gravité (m/s^2).

Σ : Angle d'inclinaison de la fenêtre (dans ce cas elle est verticale : $\Sigma = 90^\circ$).

Le terme Δp_B est la pression due à l'accélération de la vitesse de l'air (loi de Bernoulli). Elle est donnée par :

$$\Delta p_B = \frac{\rho_{air}}{2} v^2 \quad (4-38)$$

ρ_{air} : Densité de l'air dans le canal évaluée à T_{gap} (kg/m^3).

Le terme Δp_{HP} : représente la diminution de la pression due au frottement de l'air avec la face du verre et de la protection. Supposant que l'écoulement est laminaire, il est donné par la loi Hagen Poiseuille pour un écoulement entre deux plaques parallèles [*Munson 1998*]:

$$\Delta p_{HP} = 12\mu_{air} \frac{H}{d_c^2} v \quad (4-39)$$

Le terme Δp_Z est les pertes de charge à l'entrée et à la sortie :

$$\Delta p_Z = \frac{\rho_{air} v^2}{2} (Z_{int} - Z_{ext}) \quad (4-40)$$

Le facteur des pertes de charge à l'entrée, Z_{int} , et à la sortie Z_{ext} , sont donnés par :

$$Z_{int} = \left(\frac{A_{gap}}{0.66A_{eqt,int}} - 1 \right) \quad (4-41)$$

$$Z_{out} = \left(\frac{A_{gap}}{0.60A_{eqt,out}} - 1 \right) \quad (4-42)$$

$A_{eqt,int}$: Surface équivalente de l'ouverture à l'entrée (m^2).

$A_{eqt,out}$: Surface équivalente de l'ouverture à la sortie (m^2).

A_{gap} : Surface horizontale totale du canal (m^2).

$$A_{gap} = d_c W \quad (4-43).$$

Si $T_{gap} > T_{gap,int}$:

$$A_{eqt,int} = A_{bas} + \frac{A_{sommel}}{2(A_{bas} + A_{sommel})} (A_l + A_r + A_h) \quad (4-43-1)$$

$$A_{eqt,ext} = A_{sommel} + \frac{A_{bas}}{2(A_{bas} + A_{sommel})} (A_l + A_r + A_h) \quad (4-43-2)$$

Si $T_{gap} \leq T_{gap,int}$:

$$A_{eqt,int} = A_{sommel} + \frac{A_{bas}}{2(A_{bas} + A_{sommel})} (A_l + A_r + A_h) \quad (4-43-3)$$

$$A_{eqt,ext} = A_{bas} + \frac{A_{sommel}}{2(A_{bas} + A_{sommel})} (A_l + A_r + A_h) \quad (4-43-4)$$

Les surfaces des ouvertures à travers lequel l'écoulement de l'air se produit, sont montrées dans la figure (4-7) :

A_{bas} : Surface du bas de l'ouverture (m^2).

A_{sommel} : Surface du sommet de l'ouverture (m^2).

A_l : Surface de l'ouverture droite (m^2).

A_r : Surface de l'ouverture gauche (m^2).

A_h : Surface totale d'ouvertures (trous) dans la surface de la protection afin que l'air pénètre à travers la protection, (ces ouvertures sont distribuées uniformément sur la protection).

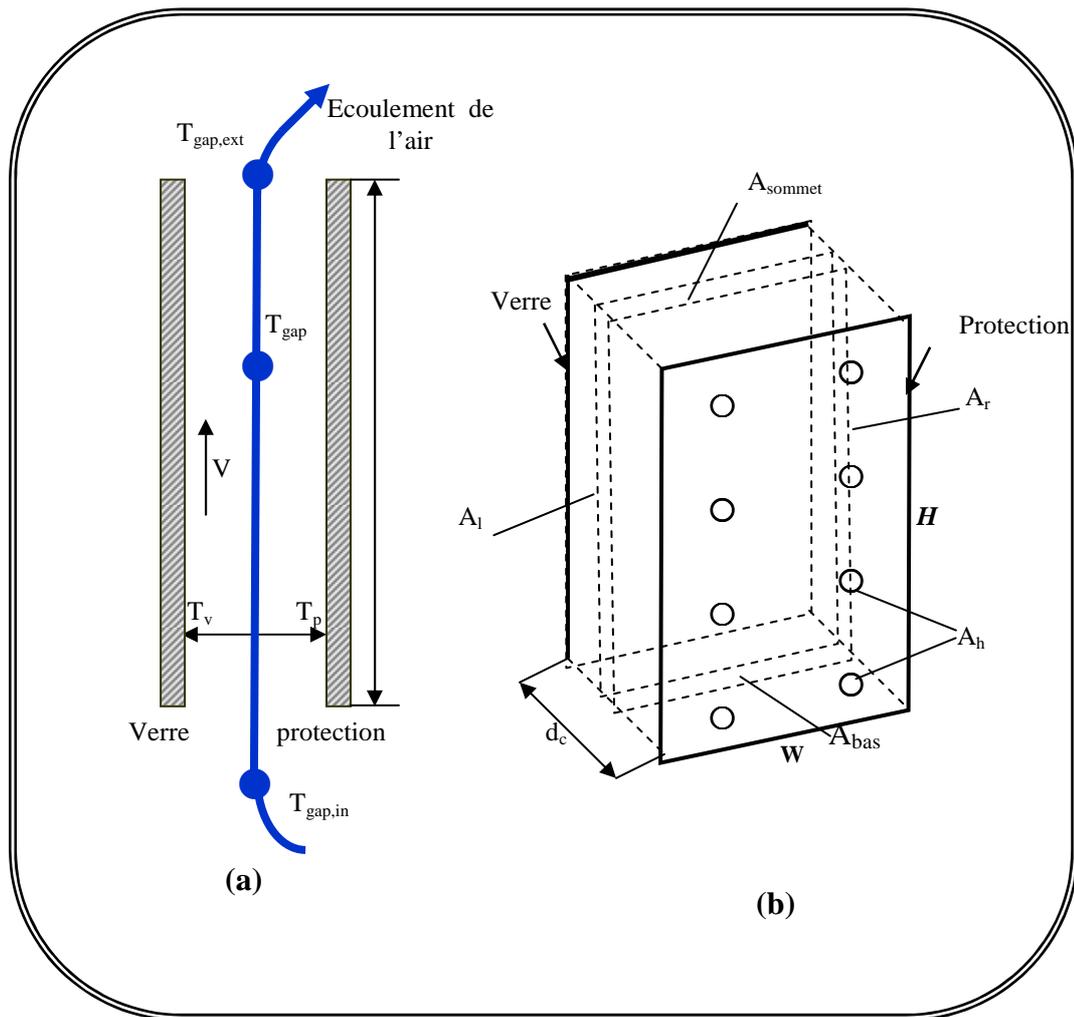


Figure 4.6 : (a)Section verticale. (b) vue perspective de la couche du verre et de la protection intérieure, montre les variables utilisées dans l'analyse de l'écoulement de l'air dans le canal. Les surface de l'ouverture A_{bas} , A_{sommet} , A_r , A_l et A_h sont montrées schématiquement.

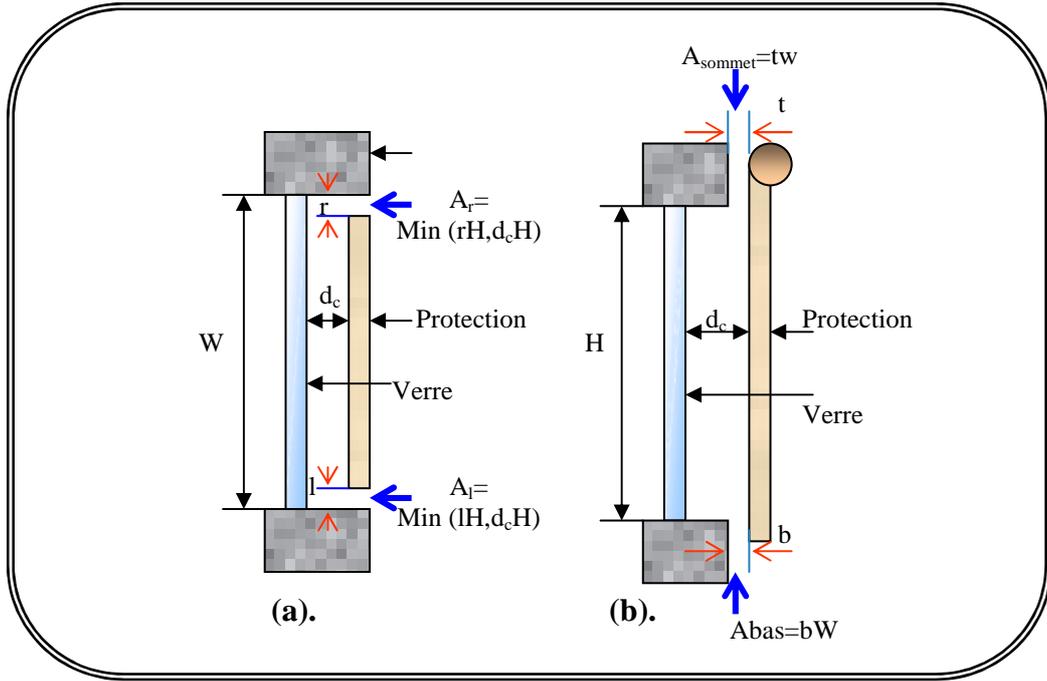


Figure 4.7 : Exemples d'ouvertures pour un verre de hauteur H et largeur W protégé par une protection intérieure. (a) section Horizontale avec les ouvertures sur le côté gauche et le côté droits (vue supérieure). (b) section Verticale avec les ouvertures au sommet et au bas (vue de côté).

IV.3.3. Expression de la vélocité de l'air dans le gap :

Remplaçant les équations (4-37) à (4-40) dans l'équation (4-36) on obtient l'équation suivante :

$$\frac{\rho V^2}{2} (1 + Z_{\text{int}} + Z_{\text{ext}}) + \frac{12\mu H}{s^2} V - \rho_0 T_0 g H \sin \phi \frac{|T_{\text{gap,int}} - T_{\text{gap}}|}{T_{\text{gap,int}} T_{\text{gap}}} = 0 \quad (4-44)$$

La résolution de cette équation donne :

$$V = \frac{\left[\left(\frac{12\mu_{\text{air}} H}{d_c^2} \right) + \frac{2\rho_{\text{air}}^2 (1 + Z_{\text{int}} + Z_{\text{ext}}) \rho_0 T_0 g H \sin \phi |T_{\text{gap,int}} - T_{\text{gap}}|}{T_{\text{gap,int}} T_{\text{gap}}} \right]^{1/2} - \frac{12\mu_{\text{air}} H}{d_c^2}}{\rho_{\text{air}} (1 + Z_{\text{int}} + Z_{\text{ext}})} \quad (4-45)$$

Tel que : $V = 0$ Si $T_{\text{gap,int}} = T_{\text{gap}}$

La solution de la température, la vitesse et les différentes pressions dans le canal est donnée par l'algorithme suivant :

Pour démarrer la procédure on pose :

$$T_{gap} = \frac{\left[\left(\frac{T_v + T_p}{2} \right) + T_{gap,int} \right]}{2}$$

Ensuite on utilise la valeur d'itération précédente.

- Calcul de h_c , h_{cv} , la vitesse de l'air V , T_{moy} , $T_{gap,ext}$ par les équations (4-16), (4-45), (4-31), (4-33) et (4-34) respectivement.
- Les valeurs de T_{gap} et h_{cv} sont déterminées pour les utiliser dans les équations du bilan thermique afin de trouver les nouvelles valeurs des températures des différentes faces du système (verre+protection). Ensuite ces températures sont utilisées pour obtenir les nouvelles valeurs de T_{gap} et h_{cv} jusqu'à ce que le processus itératif converge.

Finalement pour la résolution du système des équations (4-23) à (4-28), on procède comme suit :

La linéarisation :

On pose :

$$h_{r,ext} = \varepsilon_1 \sigma T_{ext}^3$$

$$h_{r,1} = \varepsilon_1 \sigma T_1^3$$

$$h_{r,2} = \frac{\sigma \varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} T_2$$

$$h_{r,3} = \frac{\sigma \varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} T_3$$

$$h_{r,4} = \frac{\sigma \varepsilon_4 \varepsilon_5}{1 - (1 - \varepsilon_4)(1 - \varepsilon_5)} T_4^3$$

$$h_{r,5} = \frac{\sigma \varepsilon_4 \varepsilon_5}{1 - (1 - \varepsilon_4)(1 - \varepsilon_5)} T_5^3$$

$$h_{r,int} = \varepsilon_5 \sigma T_{int}^3$$

$$h_{r,6} = \varepsilon_5 \sigma T_6^3$$

On aura donc le système d'équations suivant :

$$-T_1 \left(h_{r,1} + \frac{k_1}{e_1} + h_{ext} \right) + \left(\frac{k_1}{e_1} \right) T_2 = -T_{ext} (h_{r,ext} + h_{ext}) - S_1 \quad (4-46).$$

$$T_1 \left(\frac{k_1}{e_1} \right) - T_2 \left(\frac{k_1}{e_1} + h_c + h_{r,2} \right) + T_3 (h_c + h_{r,3}) = -S_2 \quad (4-47).$$

$$T_4 \left(\frac{k_2}{e_2} \right) + T_2 (h_c + h_{r,2}) - T_3 \left(h_c + h_{r,3} + \frac{k_2}{e_2} \right) = -S_3 \quad (4-48).$$

$$T_3 \left(\frac{k_2}{e_2} \right) - T_4 \left(\frac{k_2}{e_2} + h_{cv} + h_{r,4} \right) + T_5 (h_{r,5}) = -h_{cv} T_{gap} - S_4 \quad (4-49).$$

$$-T_5 (h_{cv} + \frac{k_{sh}}{e_3} + h_{r,5}) + T_6 (k_{sh}) + T_4 h_{r,4} = -h_{cv} T_{gap} - S_5 \quad (4-50).$$

$$T_5 \left(\frac{k_{sh}}{e_3} \right) - T_6 \left(h_{r,6} + \frac{k_{sh}}{e_3} + h_{int} \right) = -T_{int} (h_{r,int} + h_{int}) - S_6 \quad (4-51).$$

Après la linéarisation du système on procède de la même manière que pour le double vitrage sans protection.

IV.3.4. Le flux de chaleur dans le canal.

Le gain ou (perte) du flux convectif dans le canal entre le verre et la protection est donné par :

$$q_v = HW [h_{cv} (T_{verre} - T_{gap}) + h_{cv} (T_{prot} - T_{gap})] = 2h_{cv} HW (T_{moy} - T_{gap}) \quad (4-52).$$

(T_{verre} et T_{gap} dans le bilan thermique sont mentionnées par T_4 et T_5).

L'équation (4-52) peut être exprimé aussi par :

$$q_v = \dot{m} C_p (T_{gap,ext} - T_{gap,int}) \quad (4-53).$$

Le débit est donnée par :

$$\dot{m} = \rho A_{gap} v \quad (4-54).$$

Forme des systèmes matriciels :

Cas du double vitrage sans protection :

$$\begin{bmatrix} -((k_1/e_1)+h_{r,1}+h_{ext}) & (k_1/e_1) & 0 & 0 & 0 \\ (k_1/e_1) & -((k_1/e_1)+h_{r,2}+h_c) & (h_c+h_{r,3}) & 0 & 0 \\ 0 & (h_c+h_{r,2}) & -((k_2/e_2)+h_{r,3}+h_c) & (k_4/e_4) & 0 \\ 0 & 0 & (k_2/e_2) & -((k_2/e_2)+h_{r,4}+h_{int}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_{ext}(h_{r,ext}+h_{ext})-S_1 \\ -S_2 \\ -S_3 \\ -T_{int}(h_{r,int}+h_{int})-S_4 \end{bmatrix}$$

Cas du double vitrage avec protection :

$$\begin{bmatrix} -((k_1/e_1)+h_{r,1}+h_{ext}) & (k_1/e_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (k_1/e_1) & -((k_1/e_1)+h_{r,2}+h_c) & (h_c+h_{r,3}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (h_c+h_{r,2}) & -((k_2/e_2)+h_{r,3}+h_c) & (k_2/e_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (k_2/e_2) & -((k_2/e_2)+h_{r,4}+h_{c,v}) & h_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{r,4} & -((k_{sh}/e_3)+h_{r,5}+h_{c,v}) & (k_{sh}/e_{sh}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (k_{sh}/e_3) & -((k_{sh}/e_{sh})+h_{r,6}+h_{int}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_{ext}(h_{r,ext}+h_{ext})-S_1 \\ -S_2 \\ -S_3 \\ -h_{cv}T_{gap}-S_4 \\ -h_{cv}T_{gap}-S_5 \\ -T_{int}(h_{r,int}+h_{int})-S_6 \end{bmatrix}$$

V.1. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

V.1.1. Effet de l'épaisseur :

Dans cette configuration le rayonnement solaire incident est calculé chaque minute, la température extérieure comme c'était indiqué (*Ch.IV*) est constante, la façade est orientée vers la direction sud, le résultat obtenu est une comparaison pour un verre clair pour différentes épaisseurs 3, 5, et 7mm,

Les figures (5.1), (5.2), (5.3) et (5.4), donnent le flux de chaleur total, le flux solaire, le flux dû à la différence de température entre l'extérieure et l'intérieure et le facteur solaire.

On remarque que l'épaisseur du verre n'offre qu'une résistance négligeable à la transmission de chaleur due au rayonnement solaire entre l'intérieur et l'extérieur, ceci est dû à la nature du verre claire qui est un verre à faible absorptivité, cependant on constate une variation importante sur le flux thermique (flux dû à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur), cette variation influe aussi sur le flux total, la cause de cette variation est la conductivité thermique du verre qui est suffisamment faible pour qu'un gradient notable de températures s'établisse dans l'épaisseur du verre (figure : 5.5 et 5.6), l'existence de ce gradient découle des variations des échanges de chaleur aux faces du verre.

Ces résultats sont comparés avec les résultats [58], montrés dans les figures (5.1.1, 5.2.1 et 5.3.1), On peut constater qu'un grand rapprochement entre les deux résultats.

Le coefficient total du transfert de chaleur (U_{global}) est présenté dans la figure (5.7). Ce coefficient consiste principalement dans les résistances superficielles de ses faces ($1/h_{ext}$ et $1/h_{int}$).

Afin de comparer nos résultats avec celle obtenus par [58], le facteur solaire est calculé pour un rayonnement solaire incident=600 W/m².

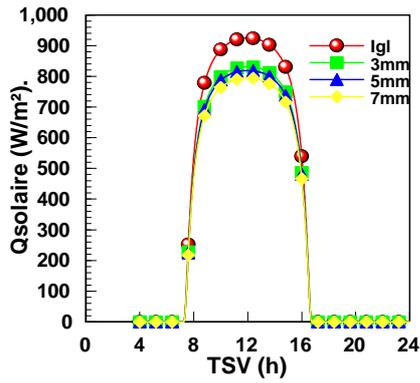


Figure 5.1 : Flux solaire (W/m^2).

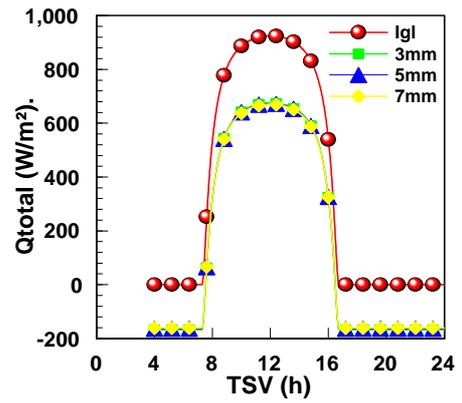


Figure 5.2 : Flux total (W/m^2).

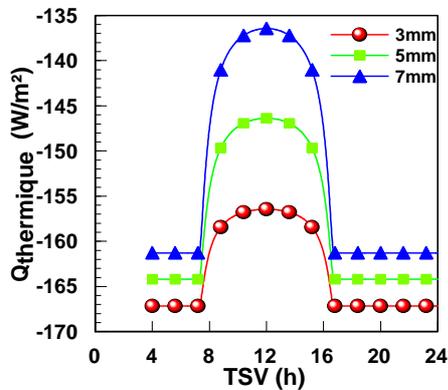


Figure 5.3 : Flux thermique (W/m^2).

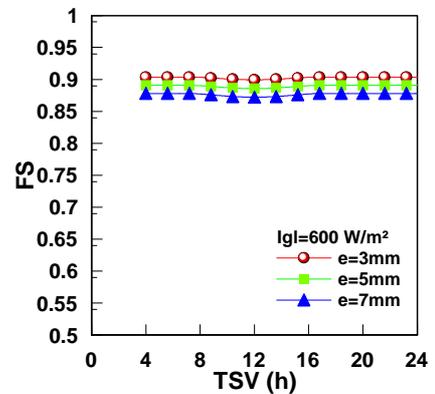


Figure 5.4 : Facteur solaire

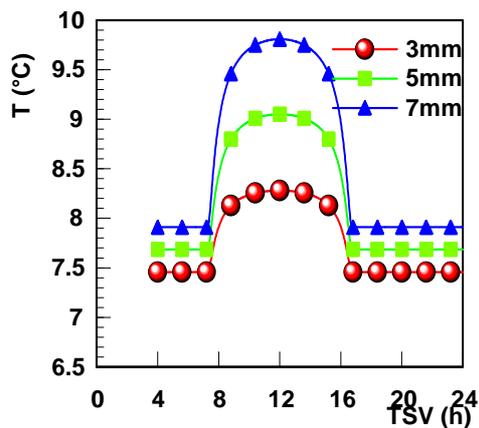


Figure 5.5 : Température de la face intérieure ($^{\circ}C$).

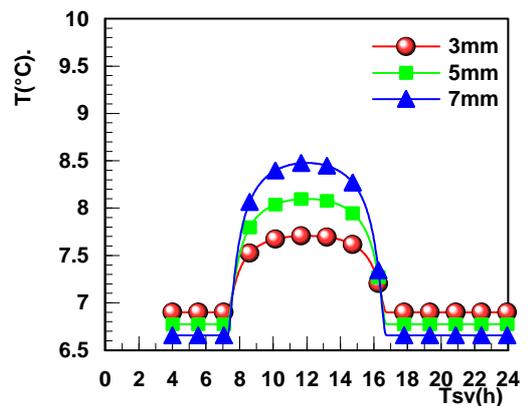


Figure 5.6 : Température de la face extérieure ($^{\circ}C$).

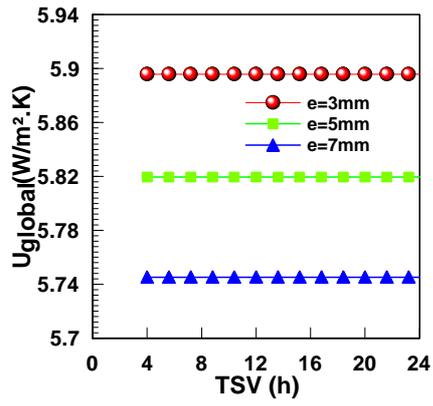


Figure 5.7 : Coefficient du transfert de chaleur global ($w/m^2 \cdot ^\circ K$).

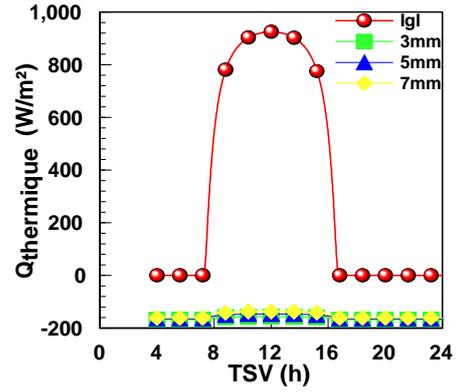


Figure 5.3.1.1 : Flux thermique en fonction du rayonnement solaire (W/m^2).

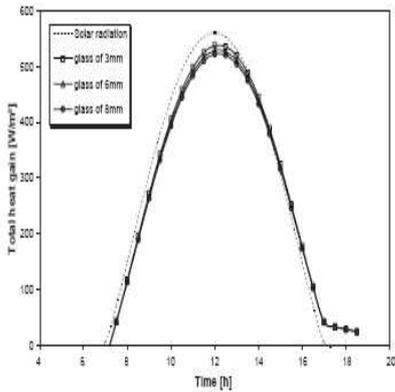


Figure 5.1.1 : Flux total (W/m^2).

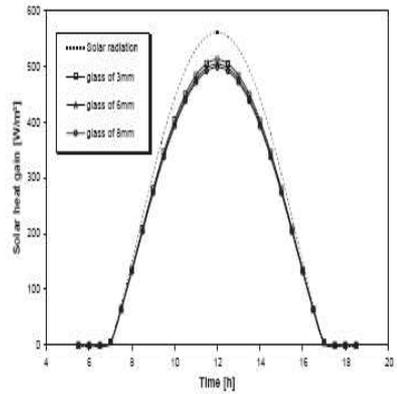


Figure 5.2.1 : Flux solaire (W/m^2).

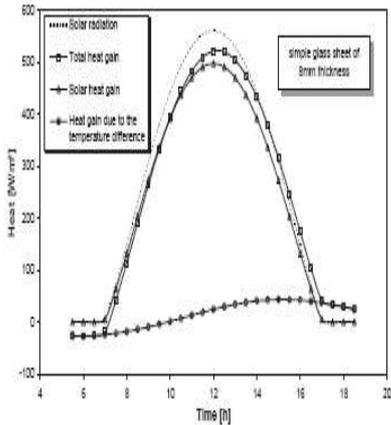


Figure 5.3.1 : Flux thermique (W/m^2).

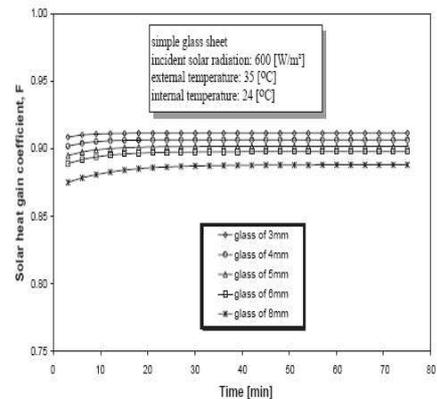


Figure 5.4.1 : Facteur solaire.

V.1.2.Effet de la direction :

Dans cette partie on prend un verre claire d'épaisseur $e=5mm$, sans protection solaire, la journée d'étude choisit est le 21 juin c'est-à-dire la période estivale.

Pour voir l'effet de la direction on présente les différents flux de chaleur pour chaque direction : Sud, Nord, Est et Ouest:

Sur les figures (5.8), (5.9), (5.10) et (5.11), et pour chaque direction cardinale on constate :

Au nord

La façade orientée au Nord bénéficie pendant l'été, d'un rayonnement direct au petit matin et en soirée car le soleil est bas.

A l'Est

La façade orientée à l'Est bénéficie du soleil le matin. L'exposition solaire y est très élevée en été, elle est supérieure à l'orientation sud, ce qui est peu intéressant.

A l'Ouest

La façade orientée à l'Ouest, en été, est exposée à un rayonnement solaire intense qui s'additionne aux températures déjà élevées en fin de journée, il devient difficile de contrôler les surchauffes.

Au Sud

La façade orientée au Sud bénéficie d'un ensoleillement maximal en hiver figure (5.1) et minimal en été figure (5.9). En effet, en hiver, le soleil bas (30°), (tableau 5.1), pénètre profondément dans la maison tandis qu'en été, la hauteur solaire est plus élevée (78°), (tableau 5.2), et la pénétration du soleil est donc moins profonde.

Le Sud est l'orientation qui permet le meilleur contrôle passif de l'ensoleillement. Les apports solaires sur la surface verticale (fenêtre) sont également nettement inférieurs au Sud car ils sont diminués par un **facteur égal au cosinus de l'angle d'incidence**.

Le facteur solaire et le coefficient total du transfert de chaleur (U_{total}), sont présentés dans les figures (5.10) et (5.11), dont la remarque principale est : la nécessité de la mise en place de la protection solaire est obligatoire afin de diminuer le facteur solaire en été et de l'augmenter en hiver.

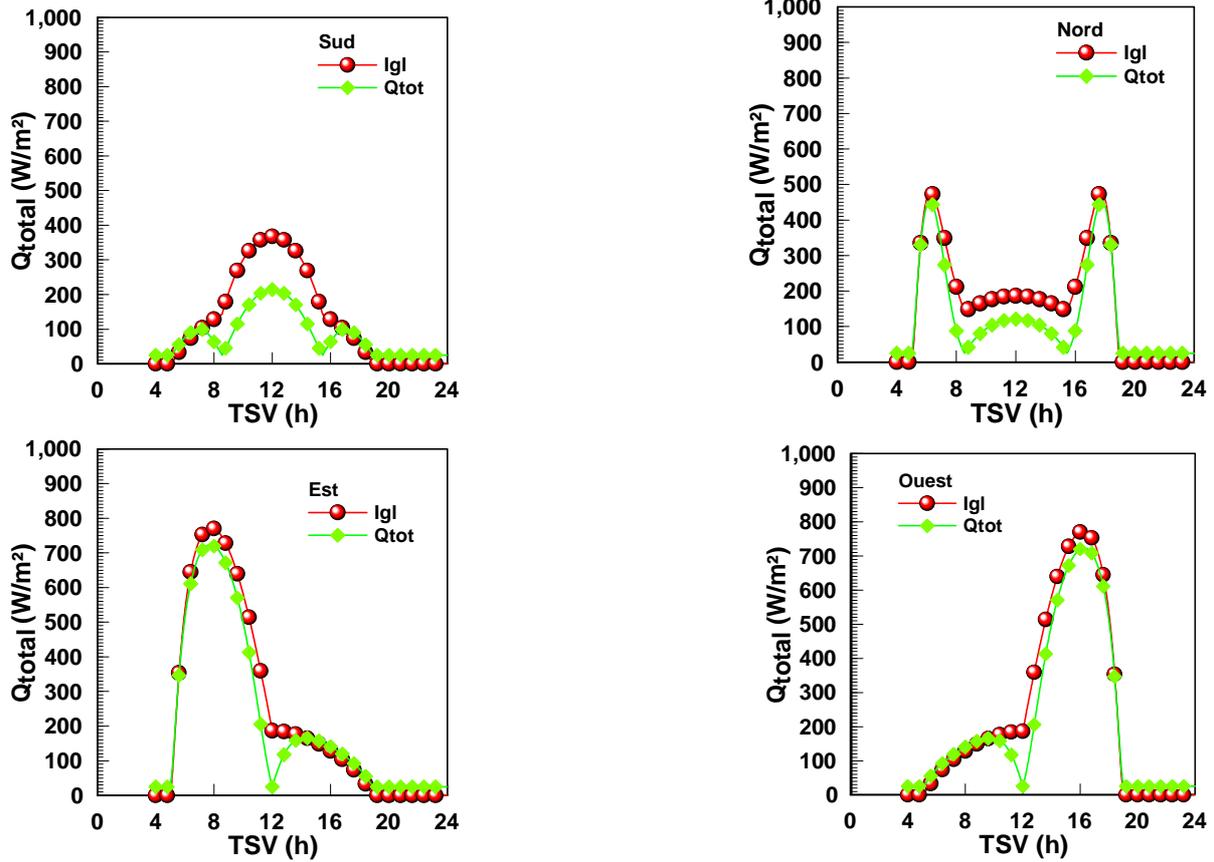


Figure 5.8 : flux total d'un verre sans protection solaire : (21/06).

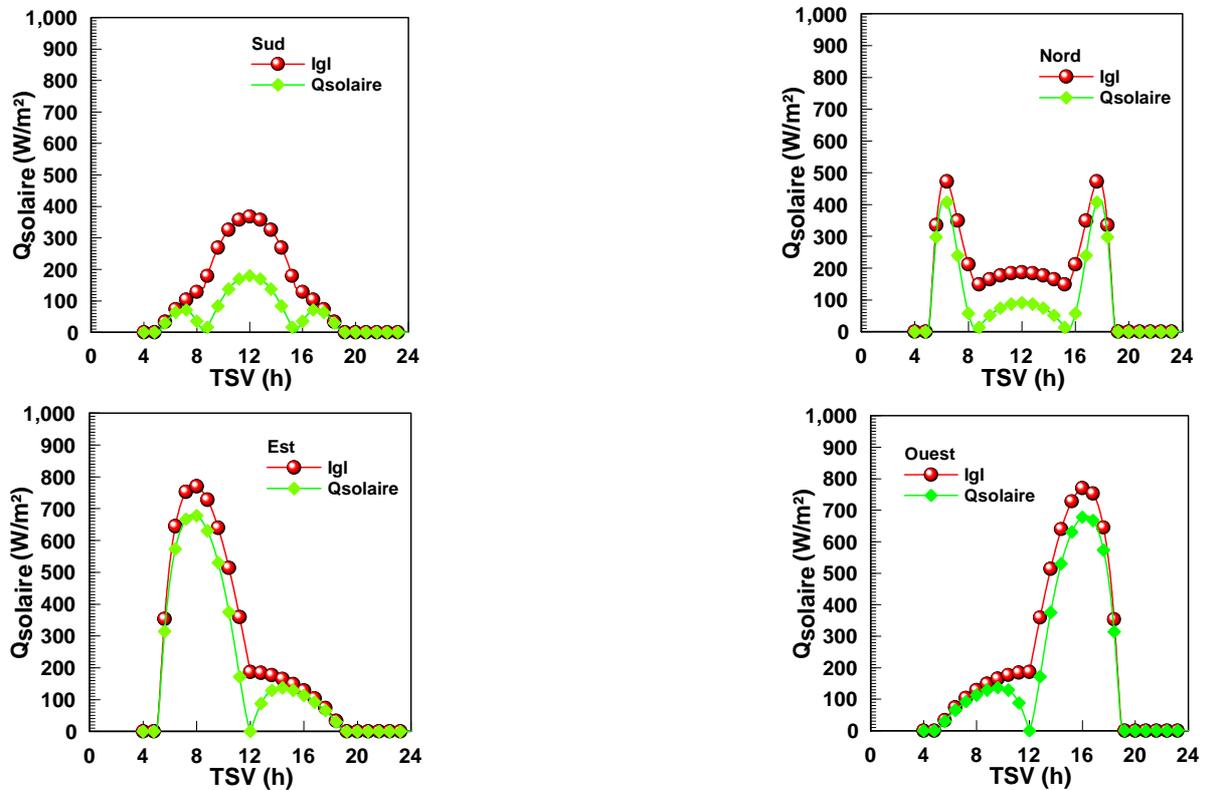


Figure 5.9 : Flux solaire d'un verre sans protection solaire : (21/06).

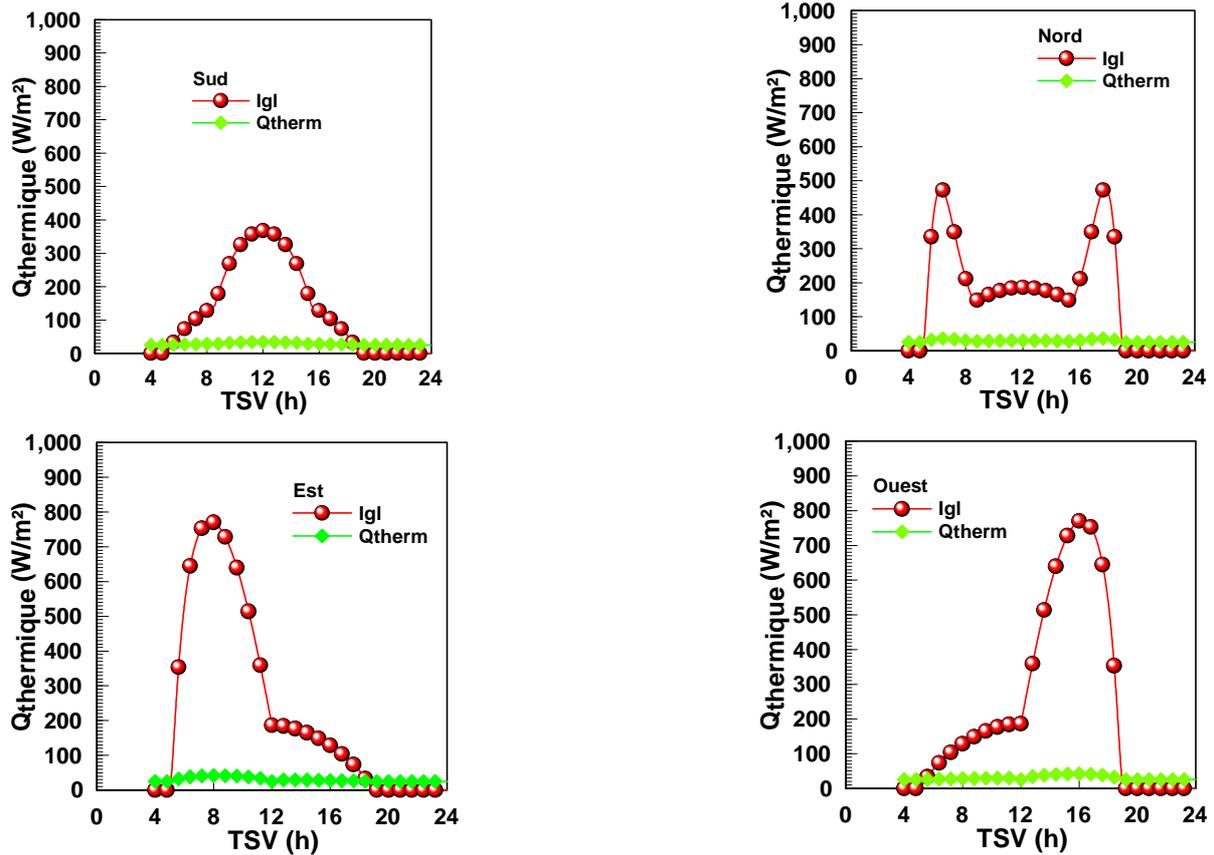


Figure 5.10 : flux dû à la différence de températures entre l'intérieur et l'extérieur pour un verre sans protection :(21/06).

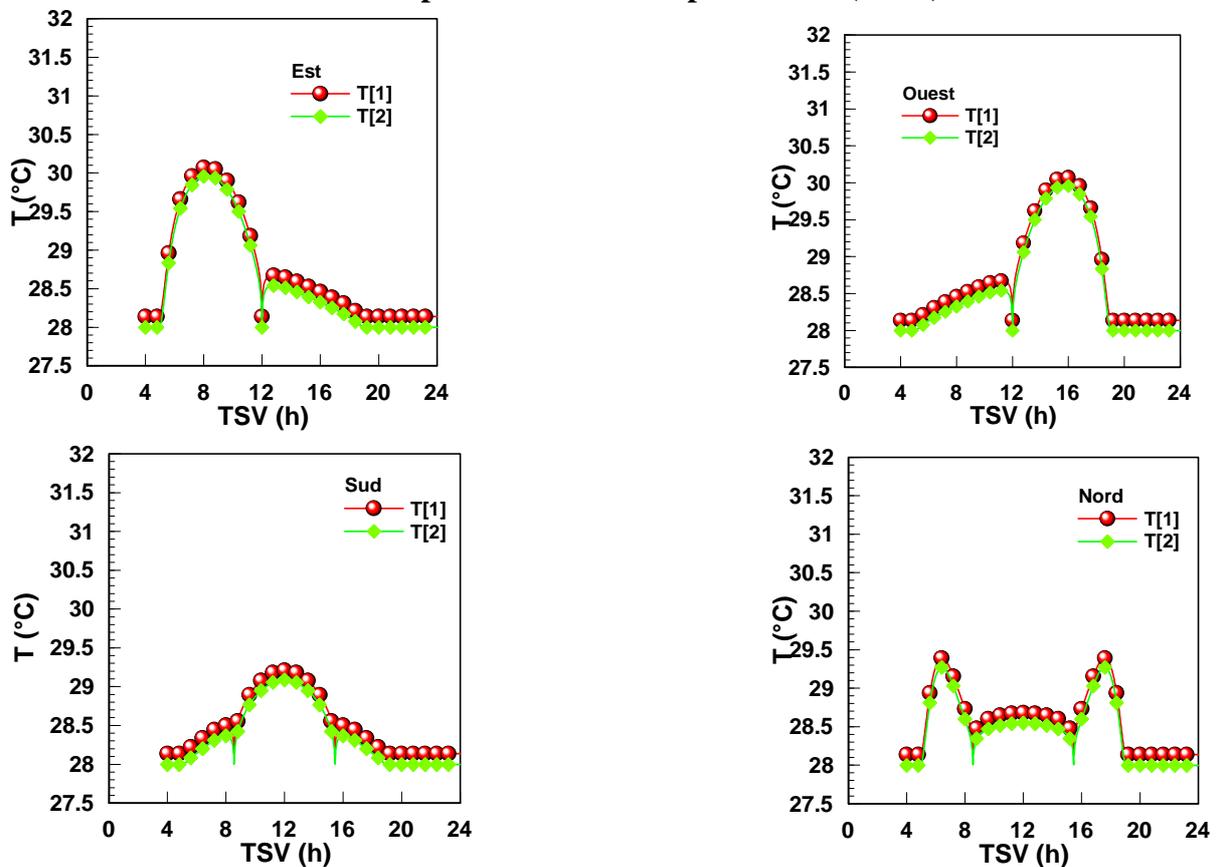


Figure 5.11 : température des faces d'un verre sans protection solaire :(21/06).
(1) : Température extérieure, (2) : Température intérieure

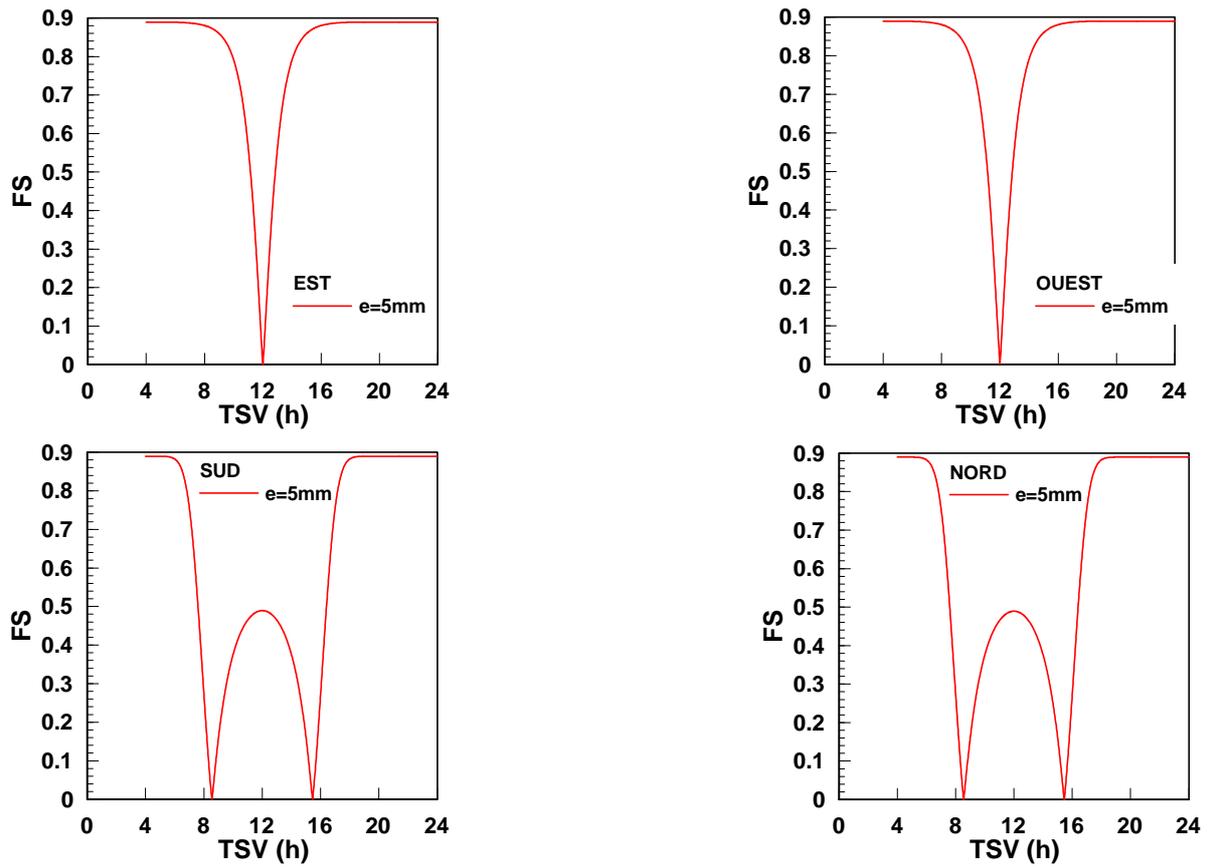


Figure 5.12 : facteur solaire d'un verre sans protection solaire : (21/06).

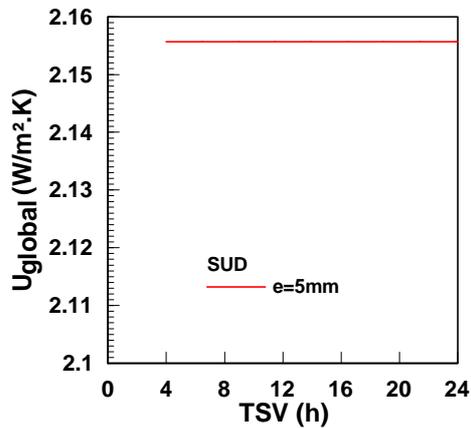


Figure 5.13 : U_{global} d'un verre sans protection solaire : (21/06).

V.1.3.Effet des protections solaires :

En premier lieu on a étudié l'effet de l'écartement entre la protection solaire et le verre, on a choisi un verre simple d'épaisseur $e=5mm$, pour la direction cardinale la plus favorable qui est la direction Sud et on a varié l'écartement à partir de $5mm$ jusqu'au $18mm$,

On remarque clairement sur les figures (5.14) et (5.15), lorsque l'écartement entre la protection et le verre augmente les températures de l'air entre le verre et la protection diminuent, cette diminution de température aura un effet considérable sur le flux total si la circulation de l'air est importante, c'est à dire dans le cas de la ventilation mécanique, ce mode de ventilation a été étudié par [29]. Dans la présente étude seulement l'effet de la ventilation naturelle est étudié.

A) Les protections intérieures :

Les protections intérieures sont assez peu efficaces sur le plan thermique. En effet, lorsque le rayonnement solaire a traversé le vitrage, il se trouve partiellement piégé et chauffe l'air entre la vitre et la protection. Ces protections intérieures sont surtout utiles pour contrôler l'éclairage intérieur. Elles doivent être associées à des protections extérieures.

B) Les protections extérieures:

Les graphes montrent clairement que les protections extérieures sont de loin les plus efficaces en confort d'été (le 21 Juin), parce qu'elles évitent l'effet de serre derrière le vitrage.

Sur la figure (5.15.a) on remarque que le flux dû au rayonnement solaire est considérablement diminué,

On plus on constate que les apports solaires sont maximums sur la face Sud en hiver, mais par contre, ils sont maximum sur la face Est en début de journée et sur la face Ouest vers 16h00. Ces gains solaires en été provoquent des surchauffes.

Les façades verticales orientées au Sud offrent donc la meilleure capacité de régulation passive puisque celles-ci sont optimales dans le captage en hiver et que durant l'été elles captent moins de rayonnement solaire que celles orientées vers l'Est ou l'Ouest.

Finalement et pour être efficace devant une baie, une protection solaire doit être placée à l'extérieur de celle-ci. Une position à l'intérieur n'a pour effet que de réduire les flux lumineux: la chaleur est intégralement transmise par "effet de serre".

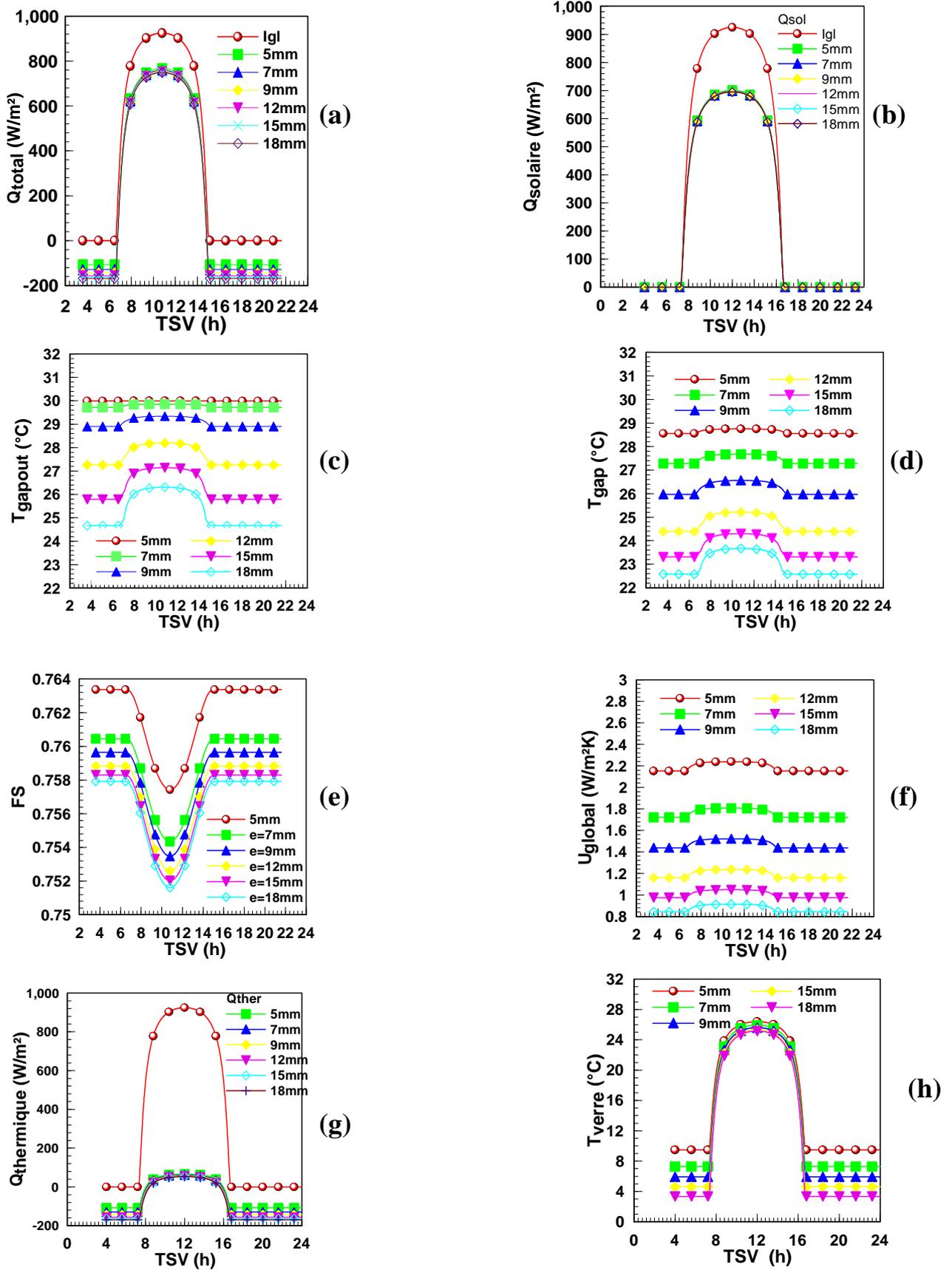


Figure 5.14 : Effet de l'écartement entre le verre et la protection intérieure : Direction : Sud, (21 Décembre).

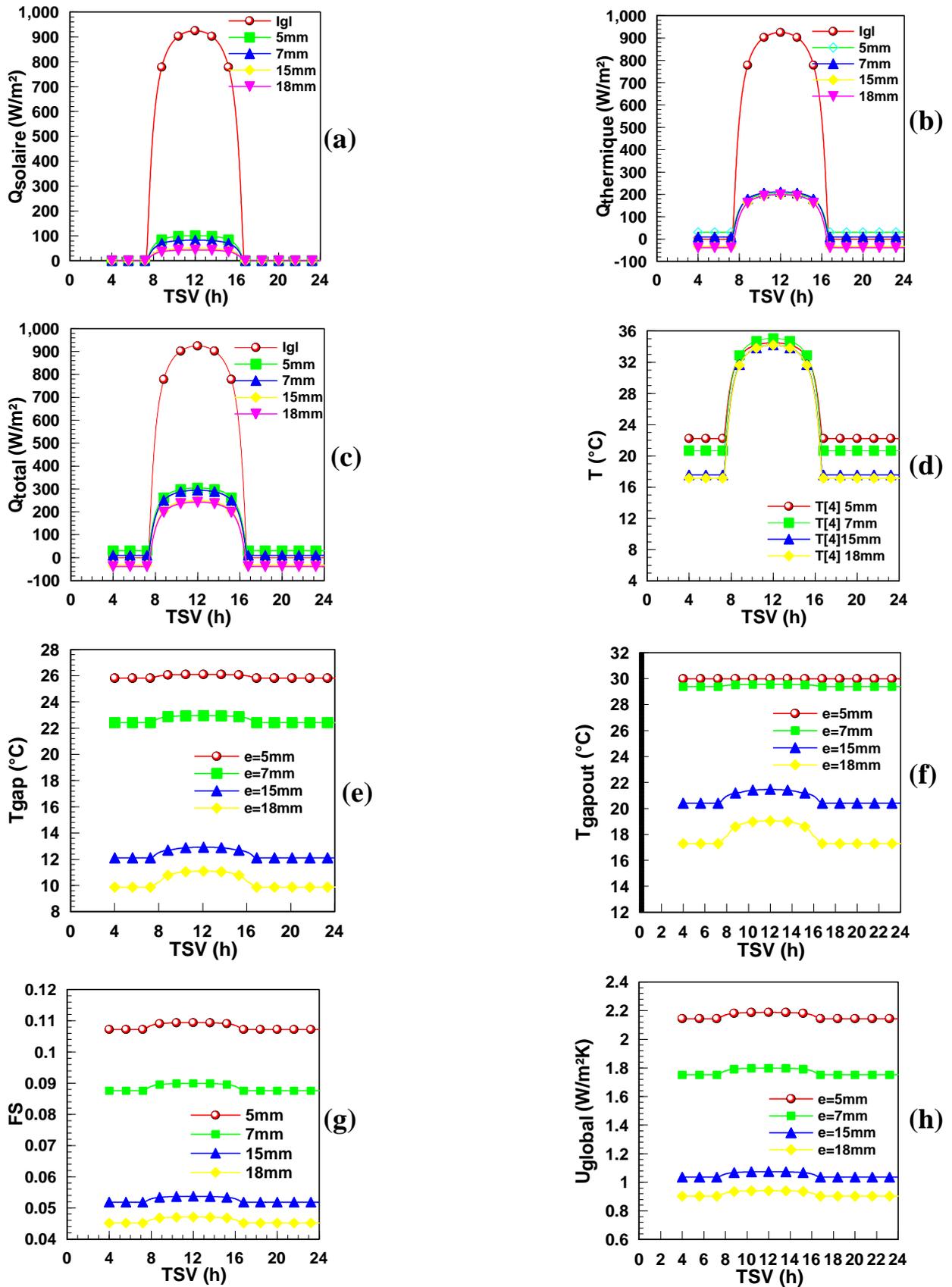
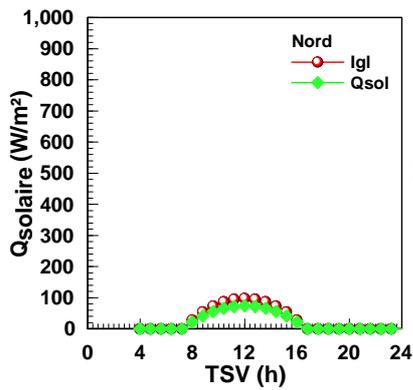
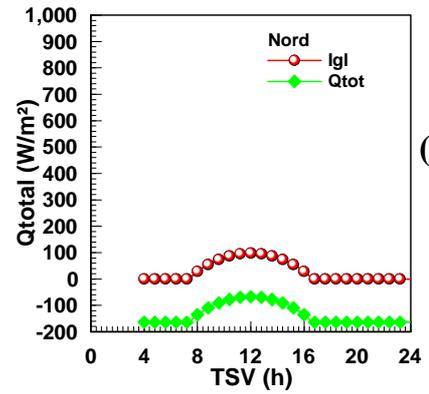


Figure 5.15 : Effet de l'écartement entre le verre et la protection extérieure:
Direction : Sud, (21 Décembre).

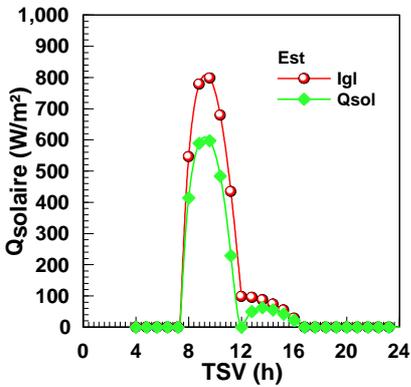
PROTECTION SOLAIRE INTERIEURE (21 DECEMBRE) :



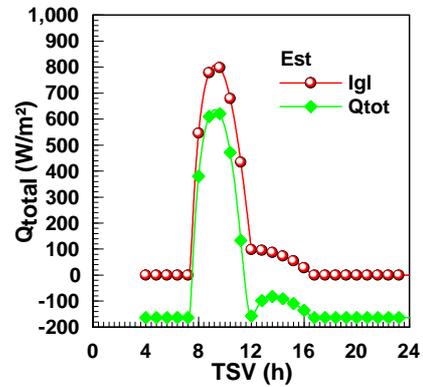
(a)



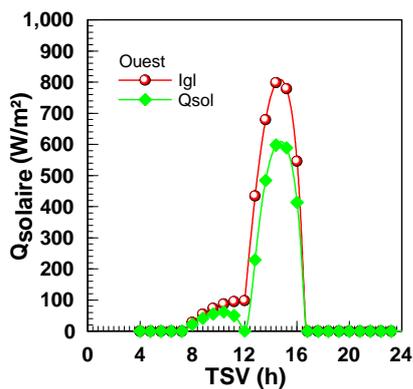
(b)



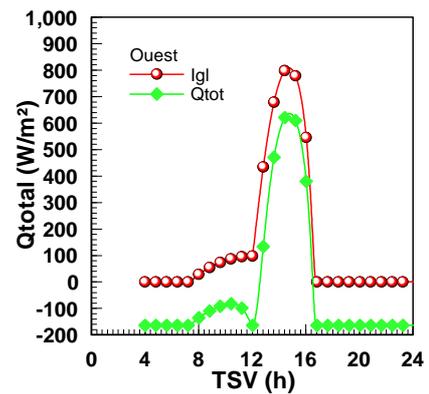
(c)



(d)

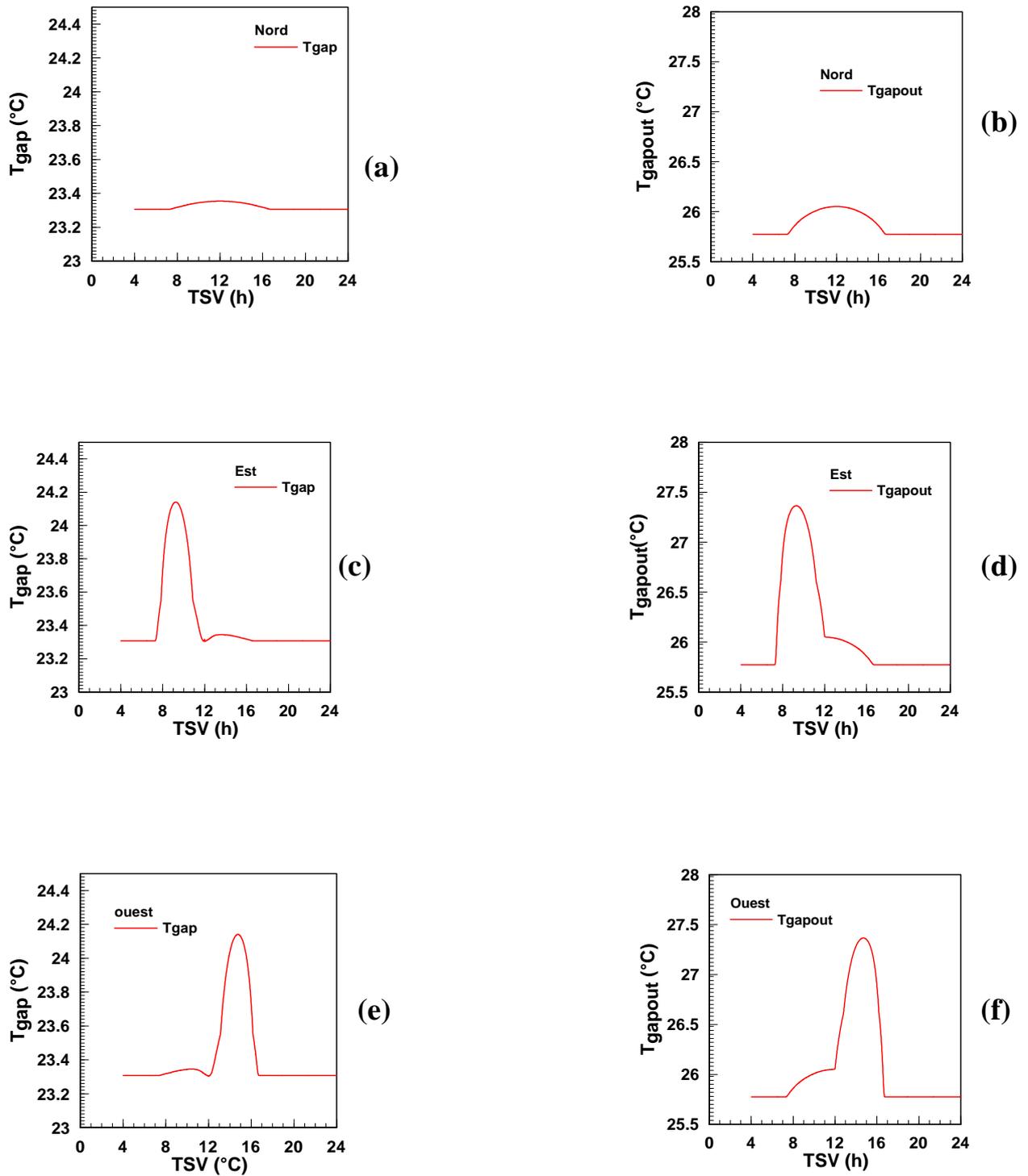


(e)



(f)

Figure 5.16 : Flux solaire et total d'un verre clair avec protection solaire intérieure, écartement entre le verre et la protection=15mm : (21 Décembre).



**Figure 5.17 : Températures de l'air entre le verre et la protection
Écartement entre le verre et la protection intérieure=15mm : (21 Décembre).**

Tgap : Température de l'air entre le verre et la protection.

Tgapout : Température de l'air à la sortie.

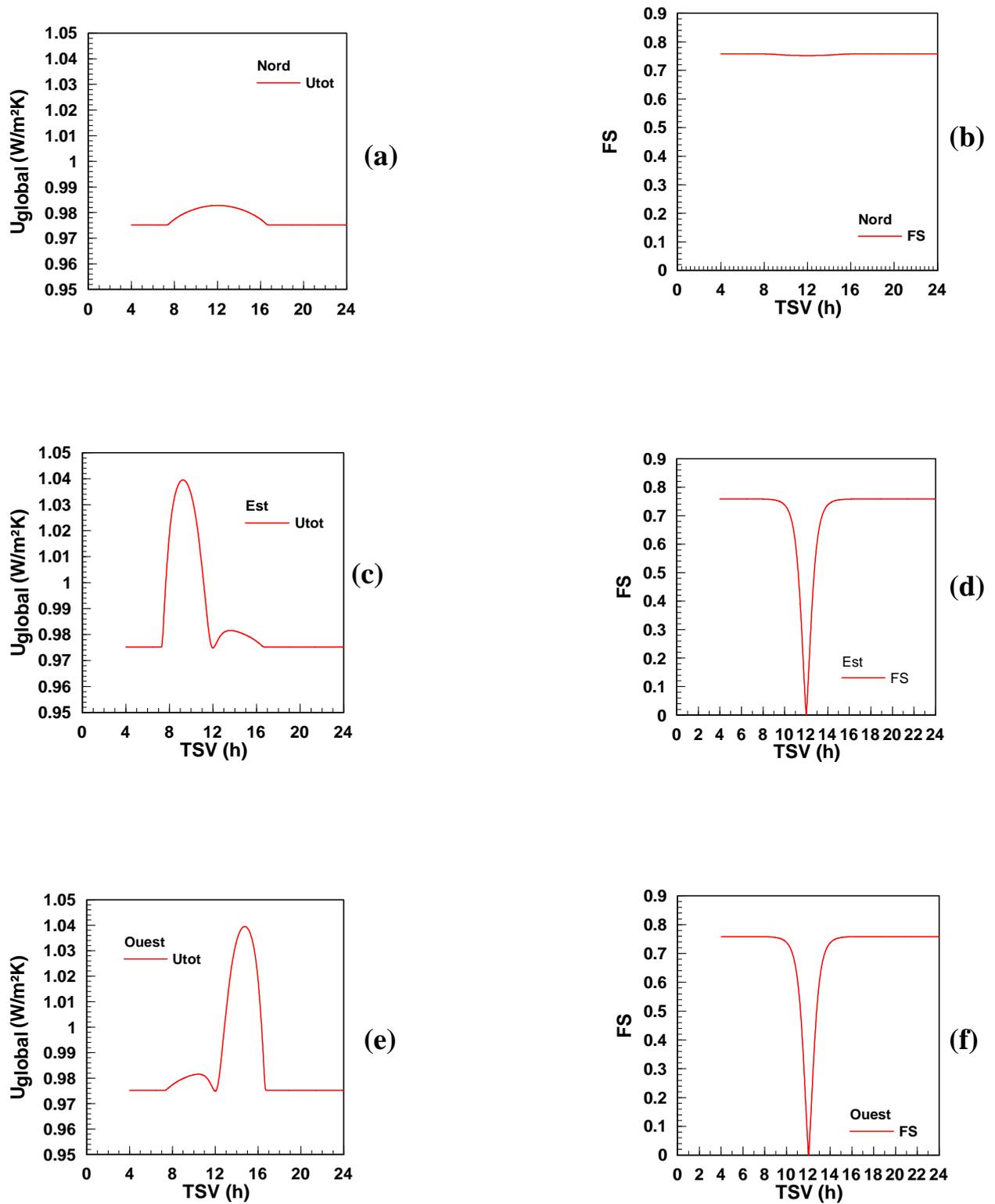


Figure 5.18 : Facteur solaire et le coefficient global du transfert de chaleur, écartement entre le verre et la protection intérieure =15mm : (21 Décembre).

PROTECTION SOLAIRE EXTERIEURE (21 DECEMBRE):

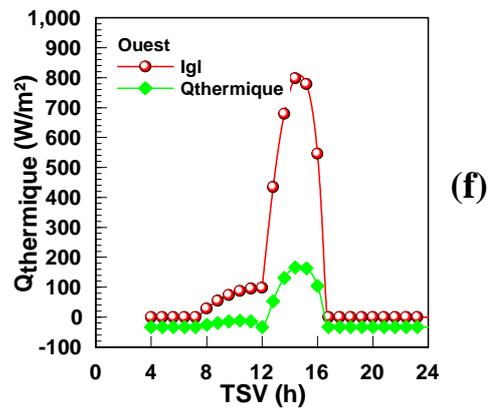
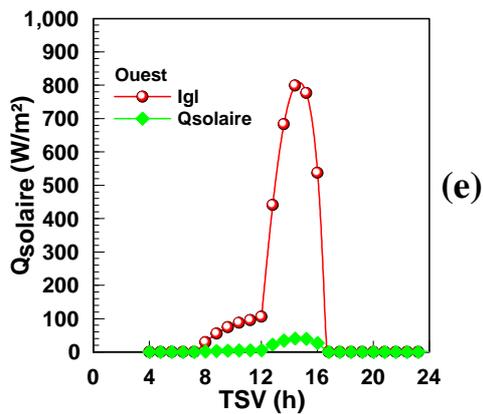
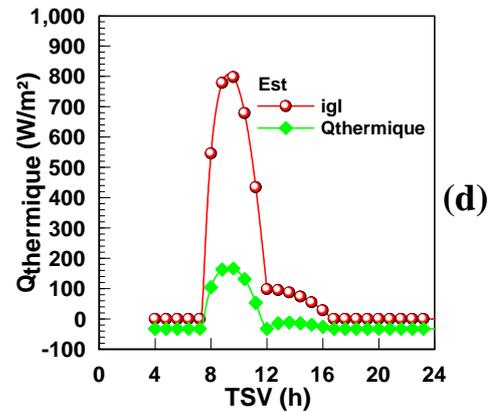
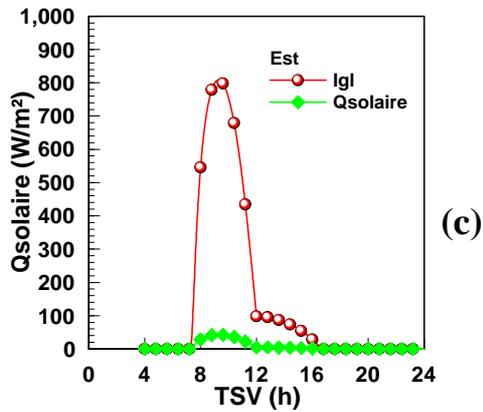
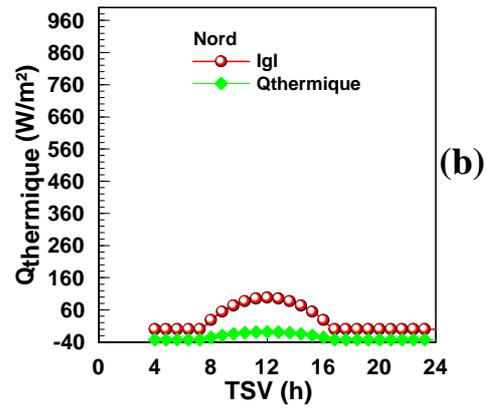
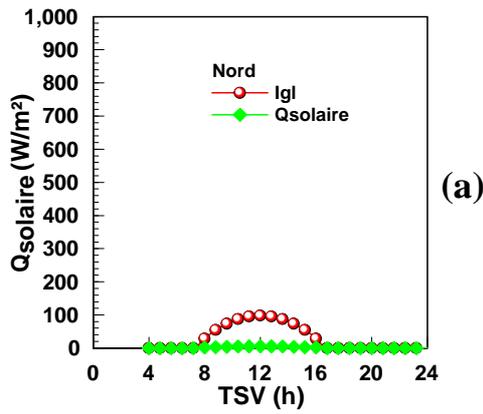


Figure 5.19 : Flux solaire et thermique d'un verre clair avec protection solaire extérieure, écartement entre le verre et la protection=15mm : (21 Décembre).

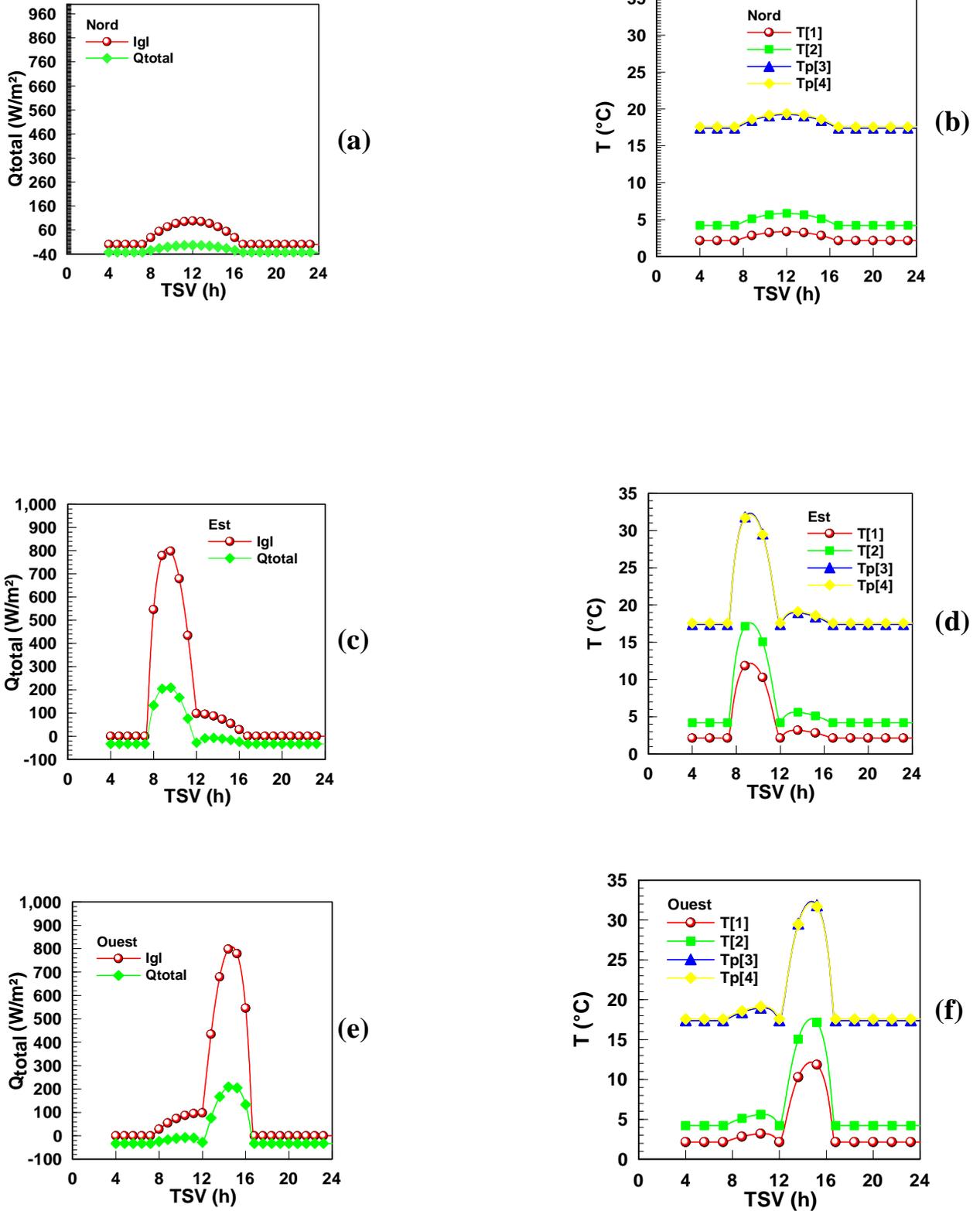


Figure 5.20 : Flux total et températures: protection solaire extérieure, écartement entre le verre et la protection=15mm : (21 Décembre).

T [1] et T [2] : Températures des deux faces du verre.

Tp[1] et Tp[2] : Températures des deux faces de la protection solaire extérieure.

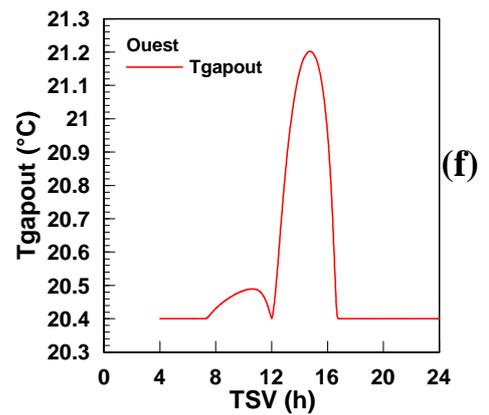
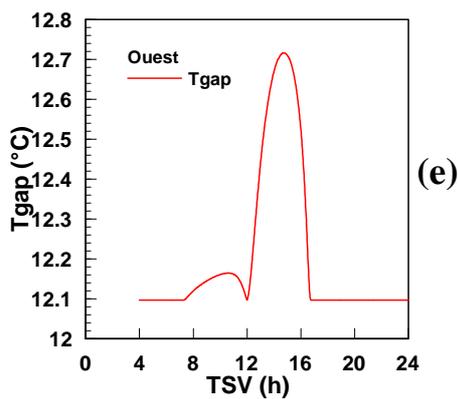
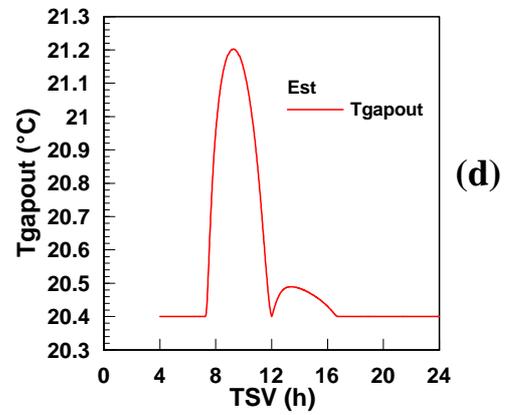
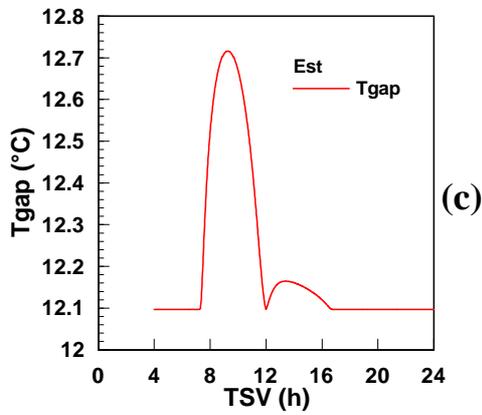
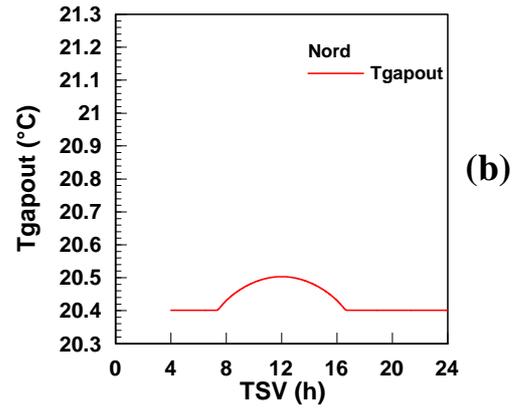
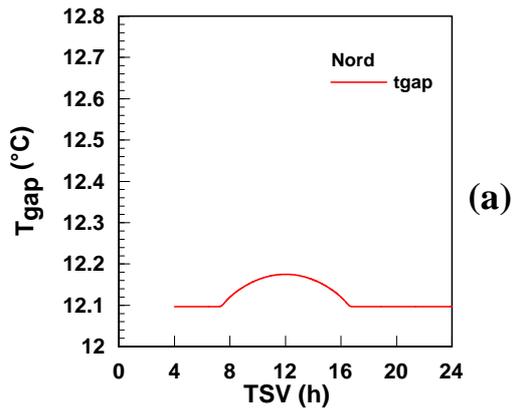


Figure 5.21 : Températures de l'air entre le verre et la protection extérieure, écartement entre le verre et la protection =15mm : (21 Décembre).

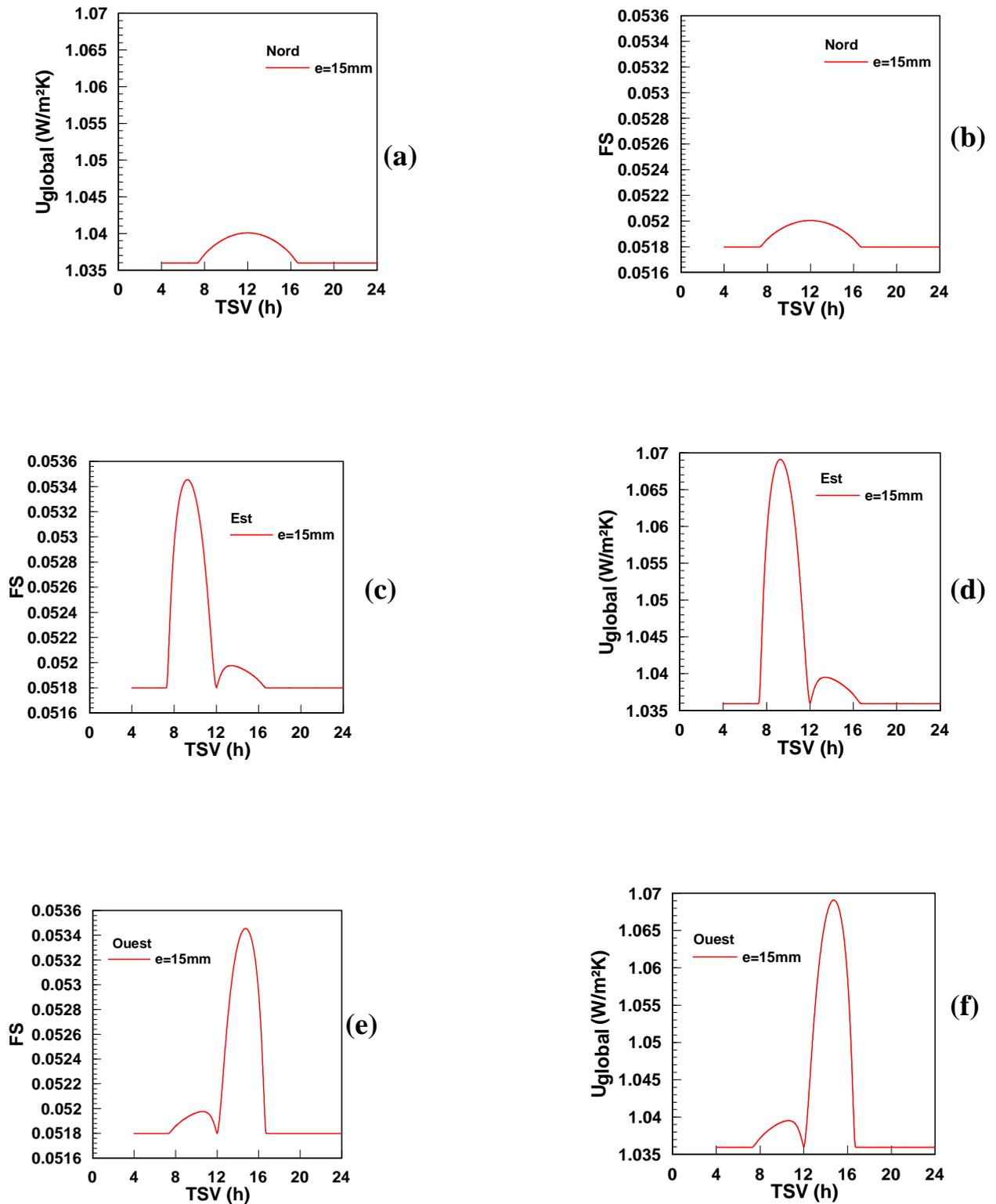


Figure 5.22 : Facteur solaire et le coefficient global du transfert de chaleur, écartement entre le verre et la protection extérieure =15mm : (21 Décembre).

PROTECTION SOLAIRE INTERIEURE (21 JUIN) :

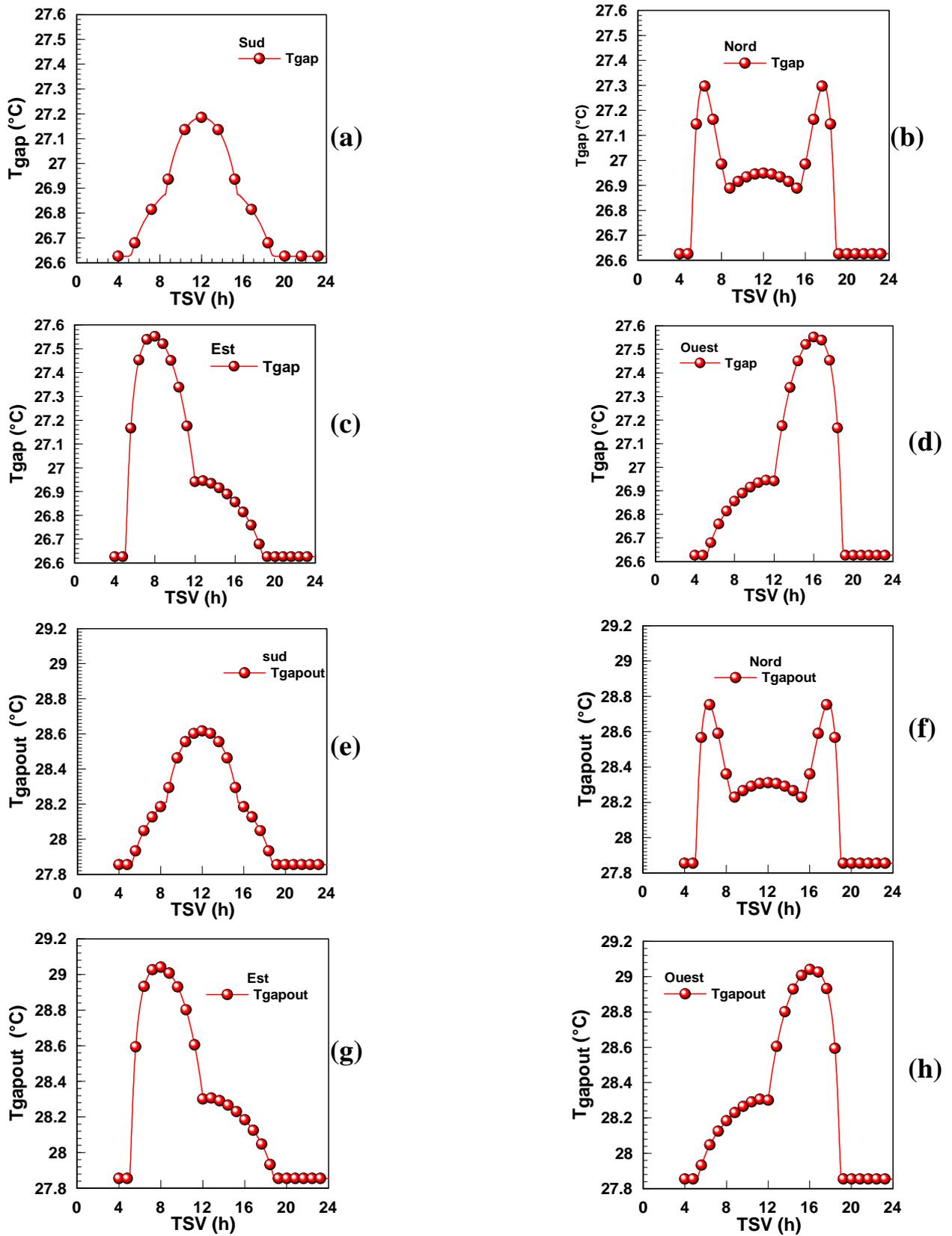


Figure 5.23 : Températures de l'air entre le verre et la protection
Écartement entre le verre et la protection intérieure=15mm : (21 Juin).

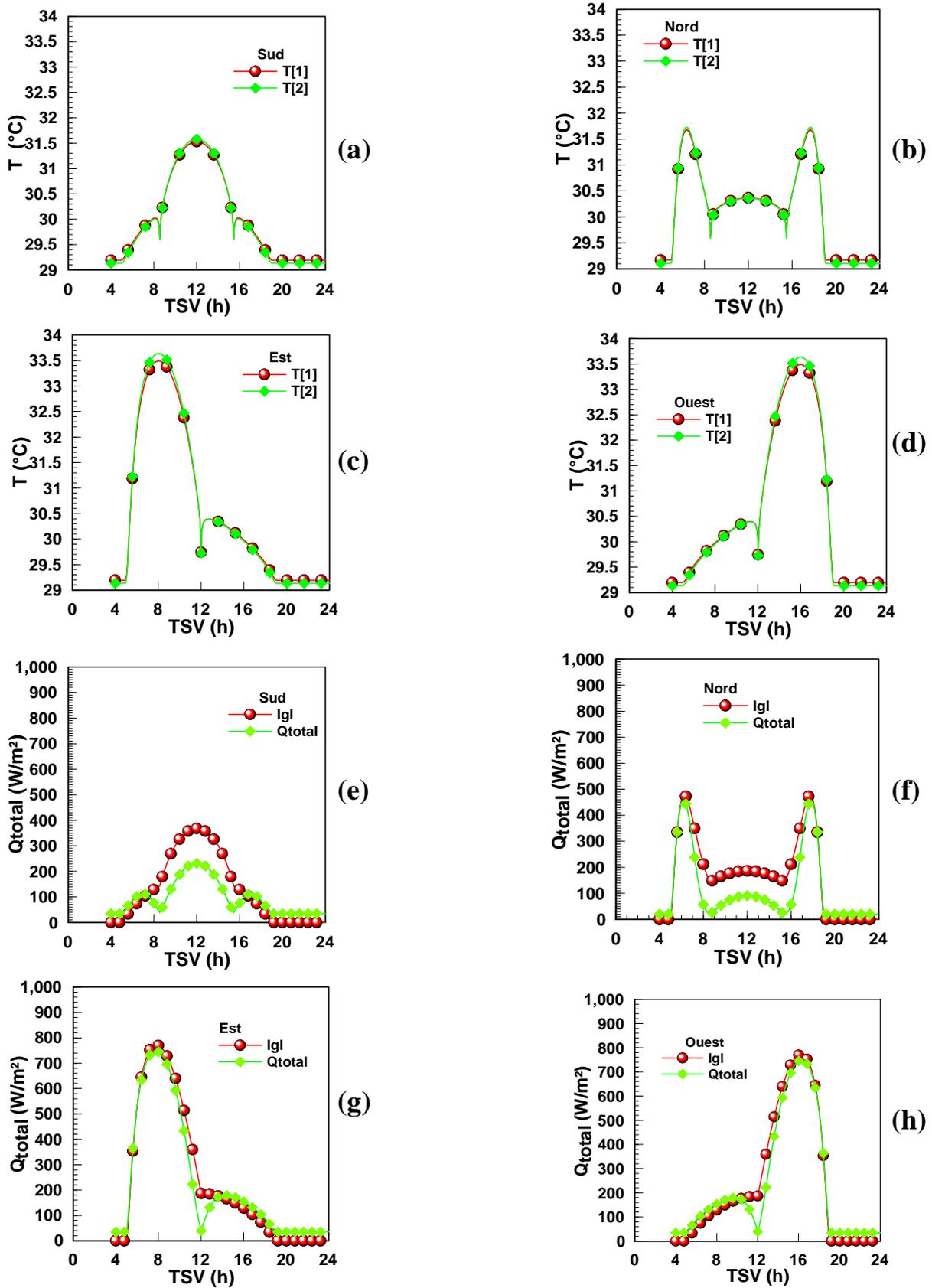


Figure 5.24 : Flux total et températures: protection solaire intérieure, écartement entre le verre et la protection=15mm : (21 Juin).

T [1] et T [2] : Températures des deux faces du verre.

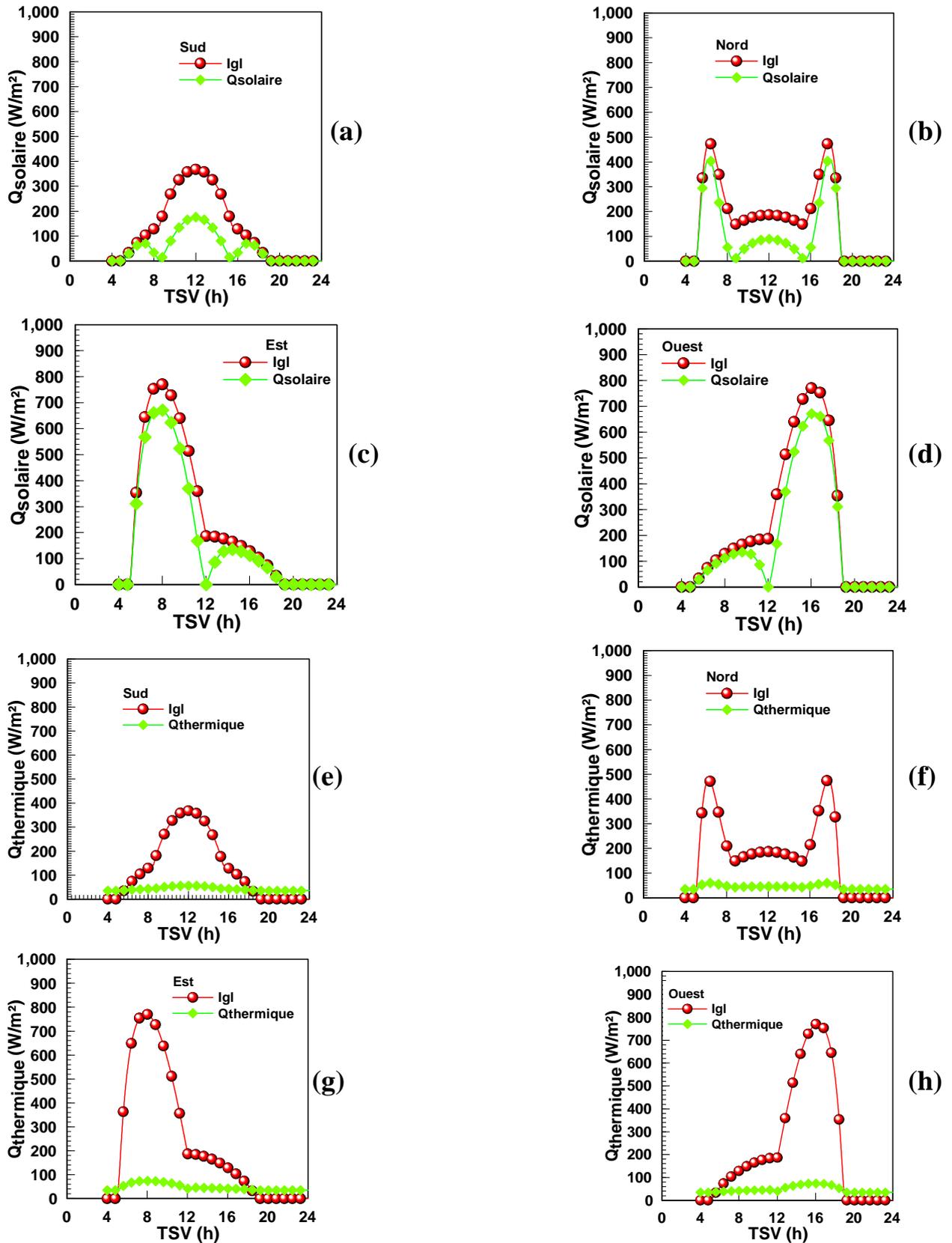


Figure 5.25 : Flux solaire et thermique d'un verre clair avec protection solaire intérieure, écartement entre le verre et la protection=15mm : (21 Juin).

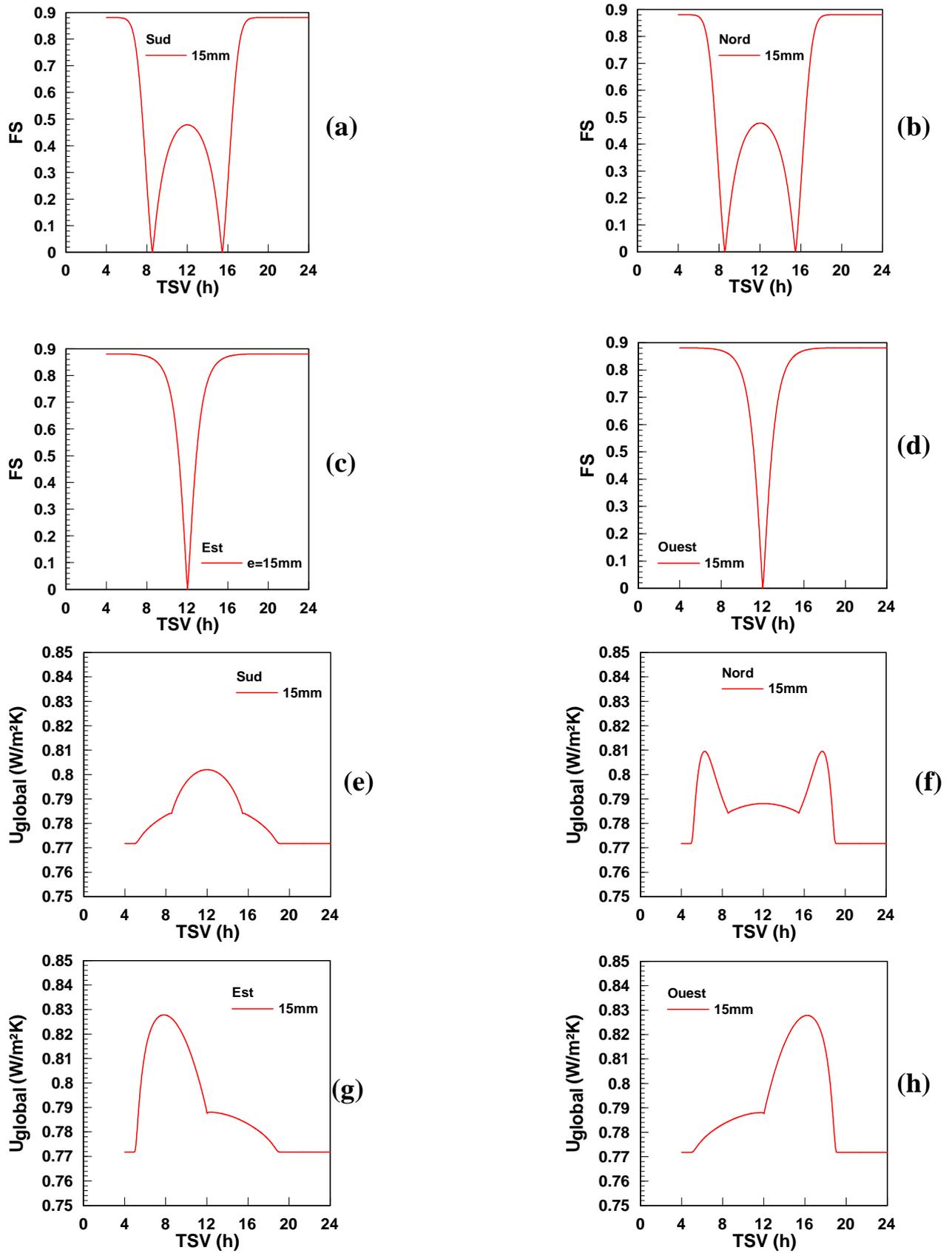


Figure 5.25 : Facteur solaire et le coefficient global du transfert de chaleur, écartement entre le verre et la protection intérieure =15mm : (21Juin).

PROTECTION SOLAIRE EXTERIEURE (21 JUIL) :

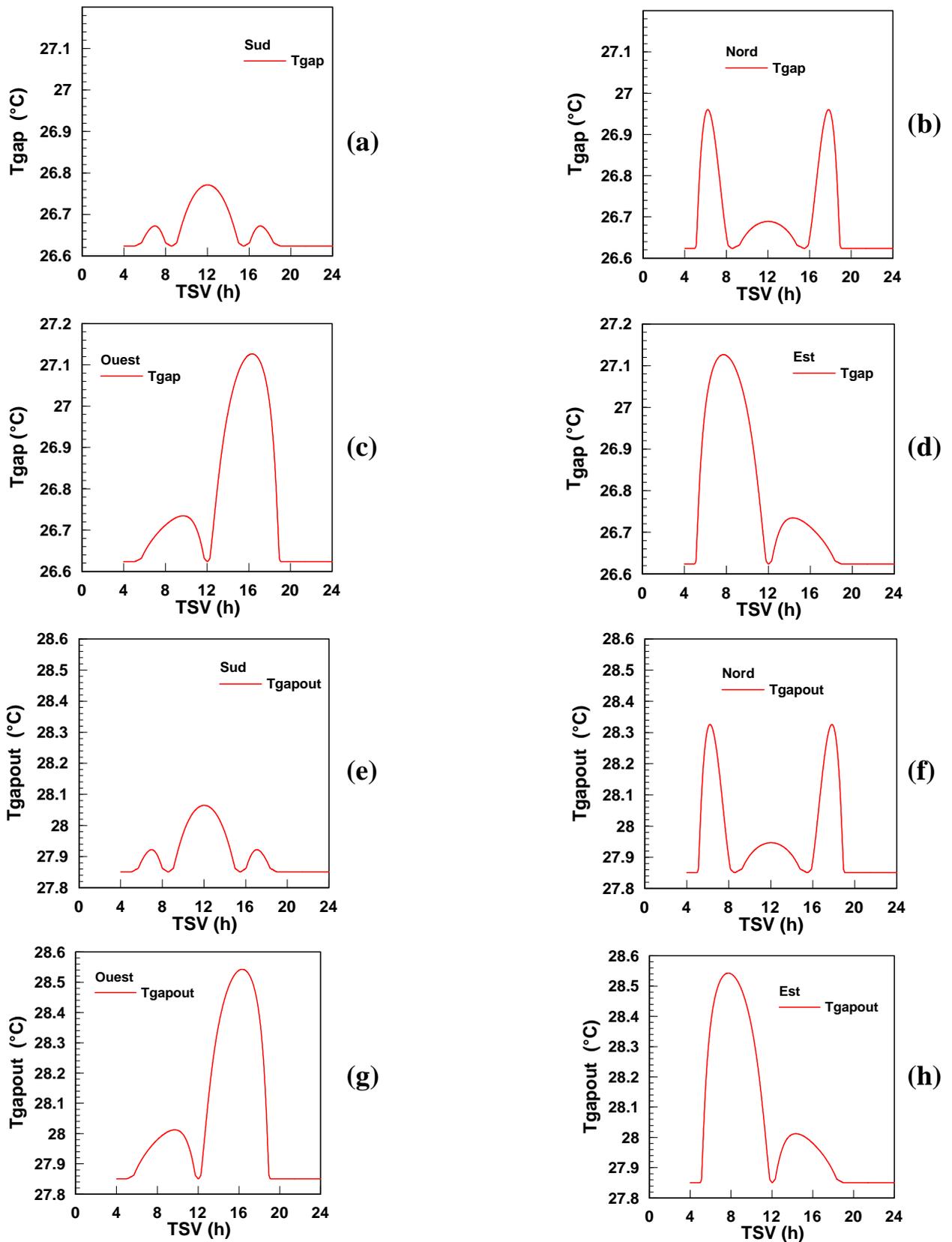


Figure 5.26 : Températures de l'air entre le verre et la protection
Écartement entre le verre et la protection extérieure=15mm : (21 Juin).

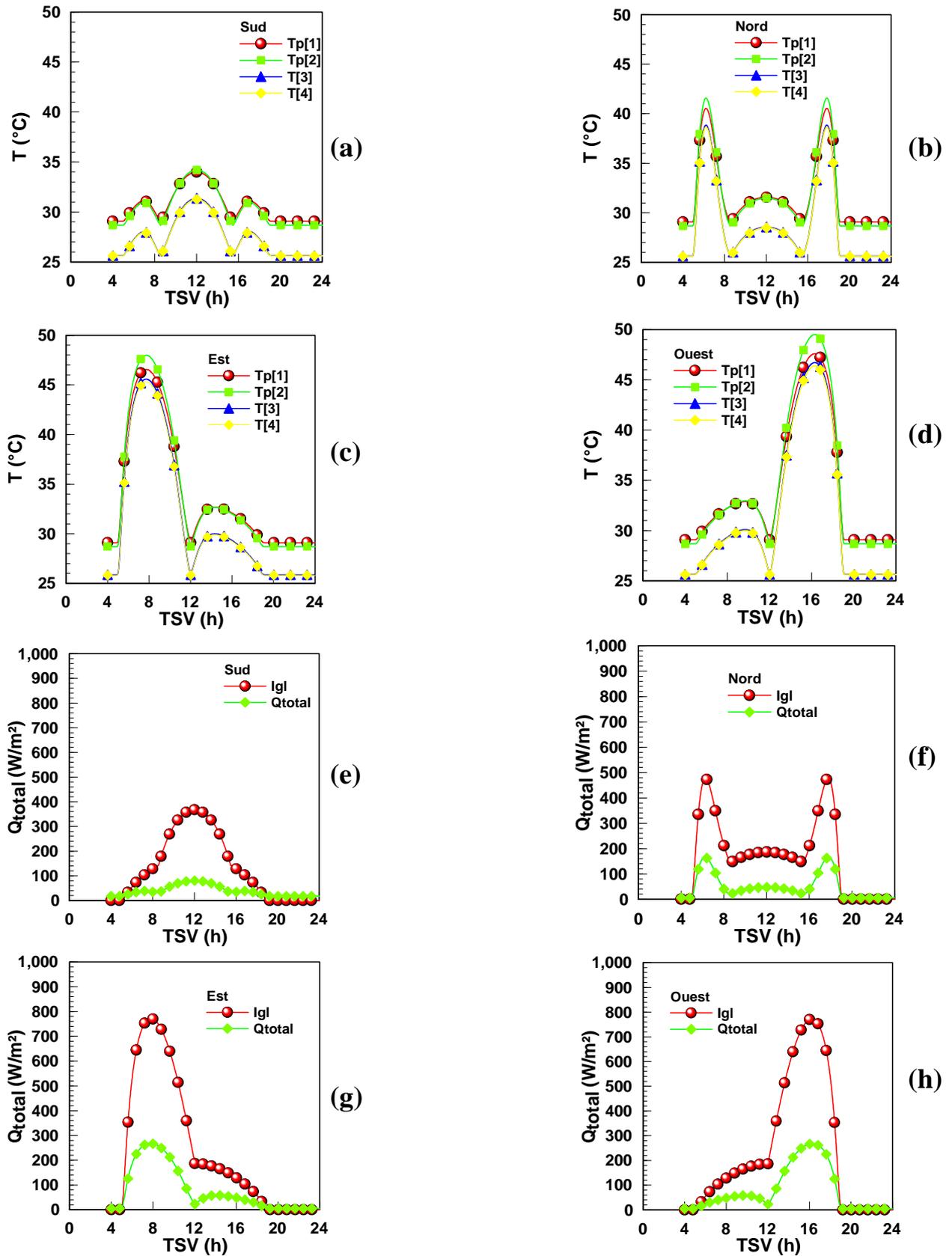


Figure 5.27 : Flux total et températures: protection solaire extérieure, écartement entre le verre et la protection=15mm : (21 Juin).
 T [1] et T [2] : Températures des deux faces du verre.

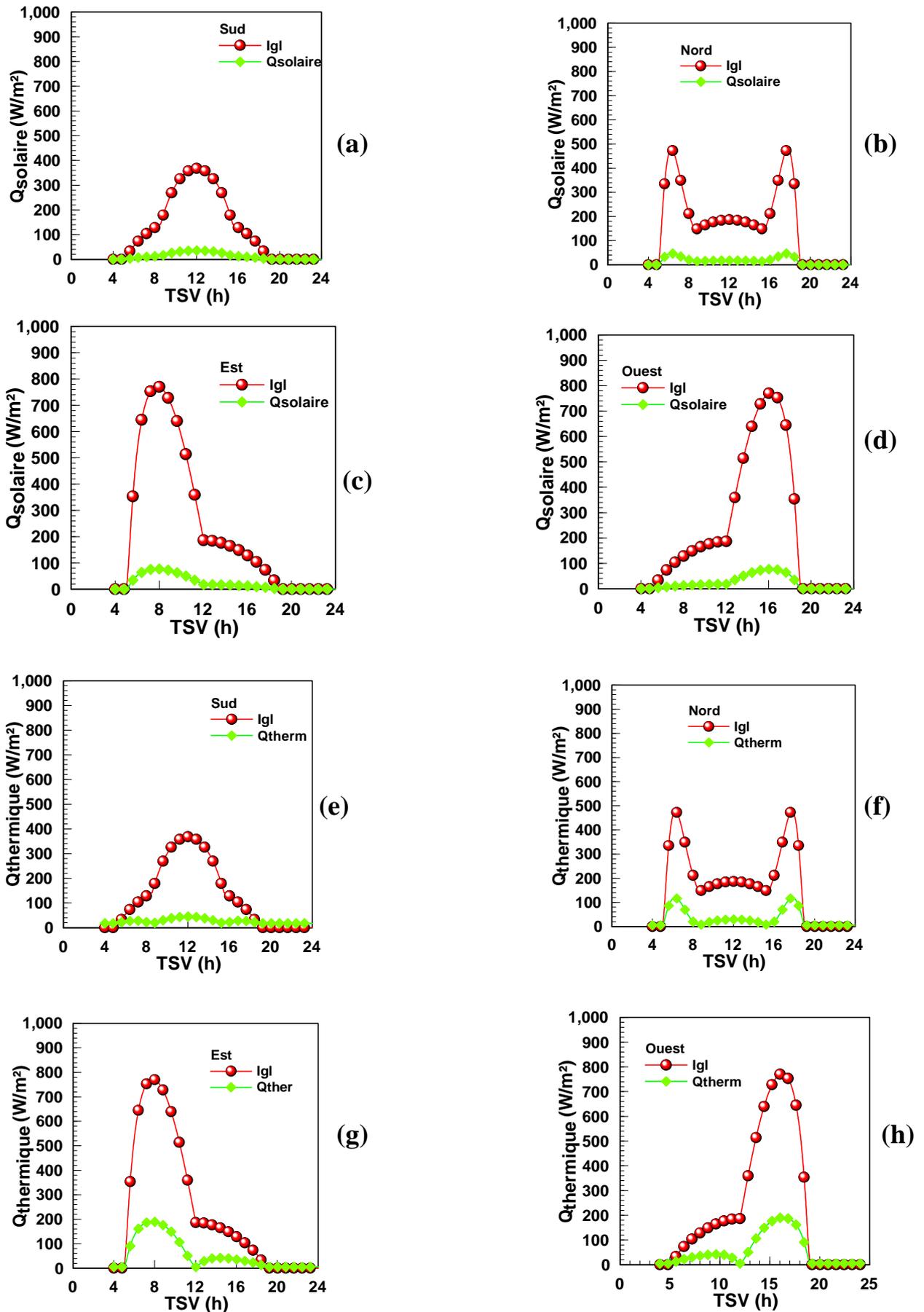


Figure 5.28 : Flux solaire et thermique d'un verre clair avec protection solaire extérieure, écartement entre le verre et la protection=15mm : (21 Juin).

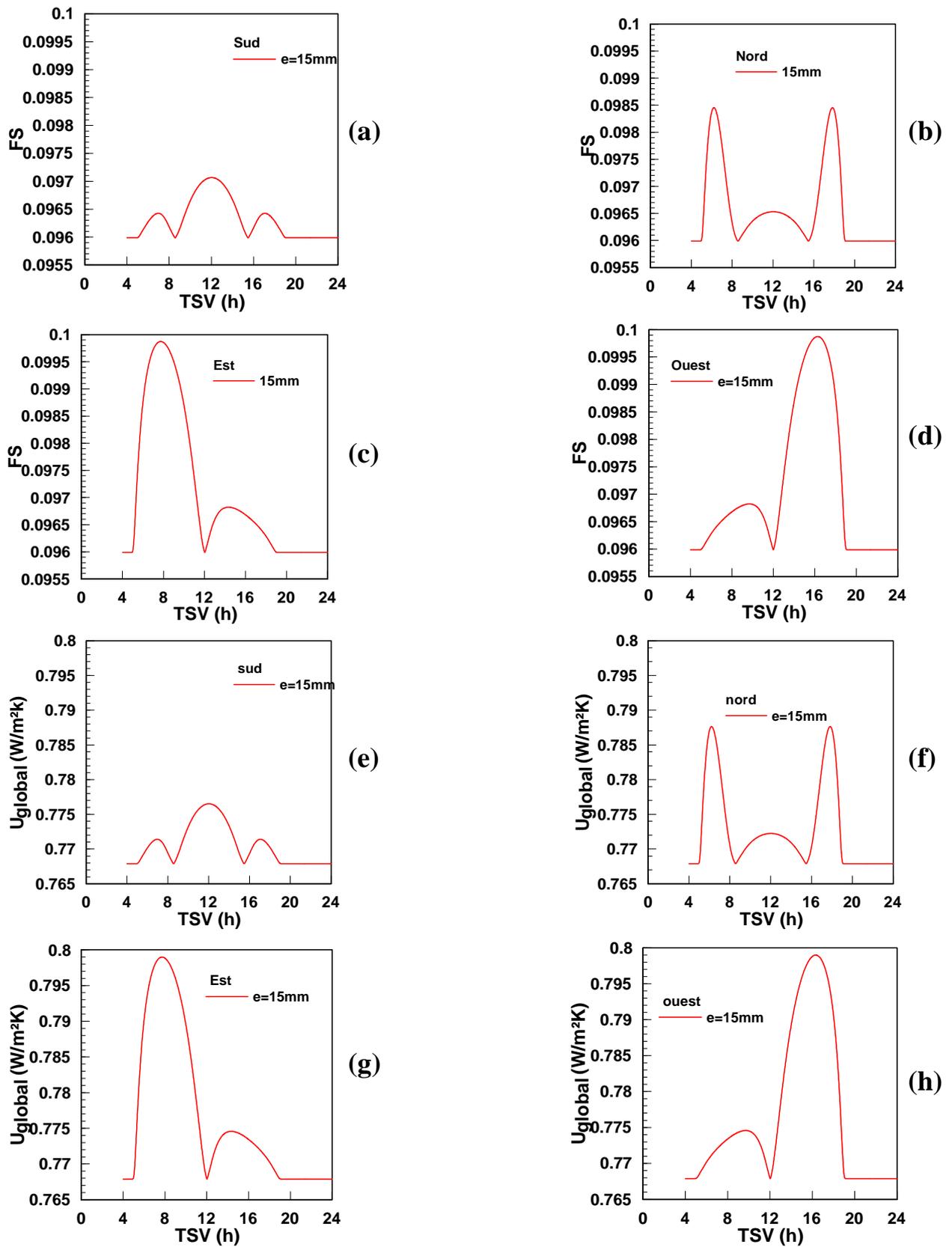


Figure 5.29 : Facteur solaire et le coefficient global du transfert de chaleur, écartement entre le verre et la protection extérieure =15mm : (21Juin).

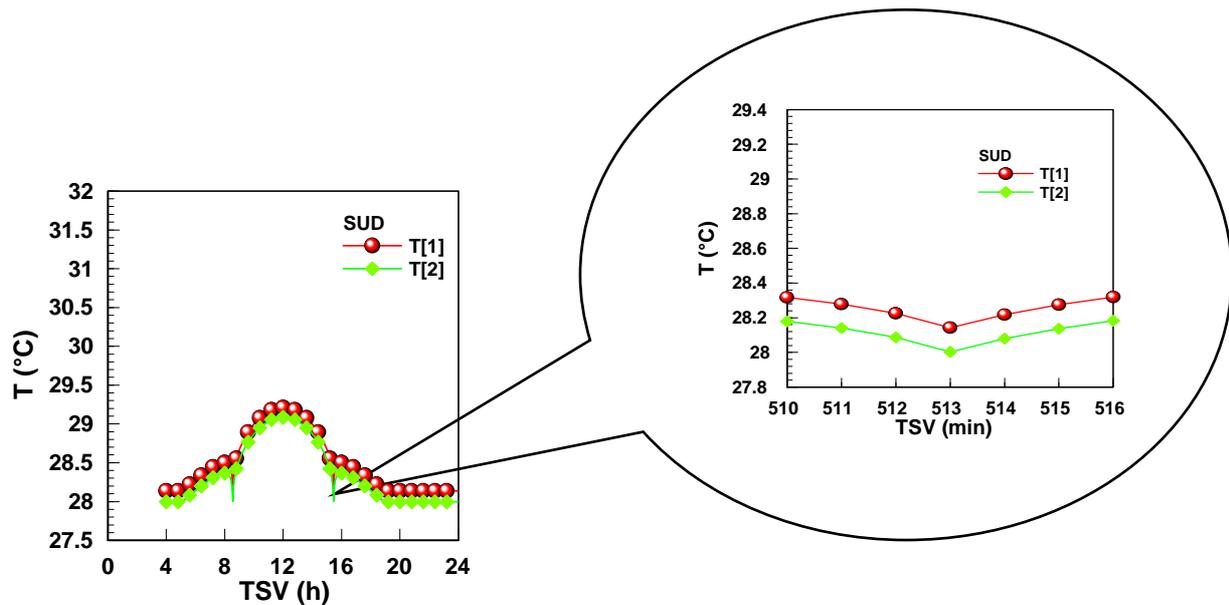


Figure 5.30 : Température des faces du verre.

Sur la figure (5.30), on montre des petites fluctuations de calcul dû au pas du temps choisit pendant le calcul du rayonnement solaire qui a influé sur les résultats ci-dessus, on a choisit un pas de temps égale à une minute.

Il est rare de trouver des résultats montrant clairement le rayonnement solaire pour les quatre directions cardinales pour la région de Batna, les figures (V.B) et (V.C) montrent une comparaison entre nos résultats obtenus pour le rayonnement solaire concernant cette région et les résultats concernant la Belgique, on constate que l'allure des graphes est la même pour les deux régions, cependant les quantités du rayonnement solaire sont différentes ceci est dû à la latitude et la longitude des lieux.

Temps : (h).	Hauteur solaire : (°)	Azimut solaire : (°)
4	0	-126.093
5	1.931	-117.404
6	13.197	-109.561
7	25.013	-102.085
8	37.158	-94.519
9	49.432	-85.926
10	61.528	-74.195
11	72.577	-52.466
12	78.442	0
13	72.577	52.466
14	61.528	74.195
15	49.432	85.926
16	37.158	94.519
17	25.013	102.085
18	13.197	109.561
19	1.931	117.404
20	0	126.093

Tableau 5.1 : Hauteur et azimut solaire pour le 21 Juin.

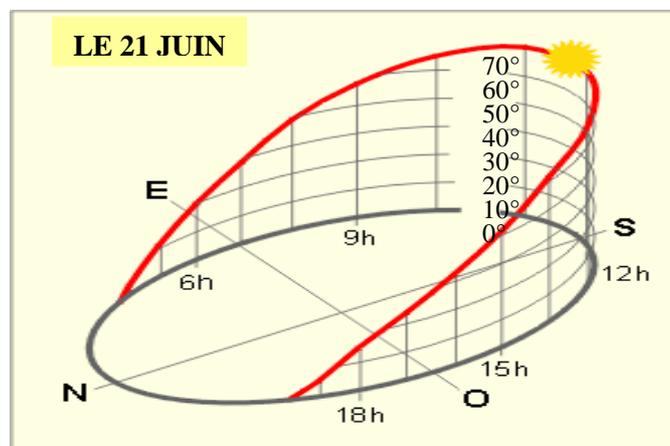


Figure 5.1 : Position du soleil pour le 21 Juin.

Temps : (h).	Hauteur soleil : (°)	Azimut soleil : (°)
7	0	-62.473
8	8.477	-60.896
9	17.642	-53.899
10	24.991	-30.403
11	29.836	-15.886
12	31.542	0
13	29.836	-15.886
14	24.991	-30.403
15	17.642	-53.899
16	8.477	-60.896
17	0	-62.473

Tableau 5.2 : Hauteur et azimut solaire pour le 21 Décembre.

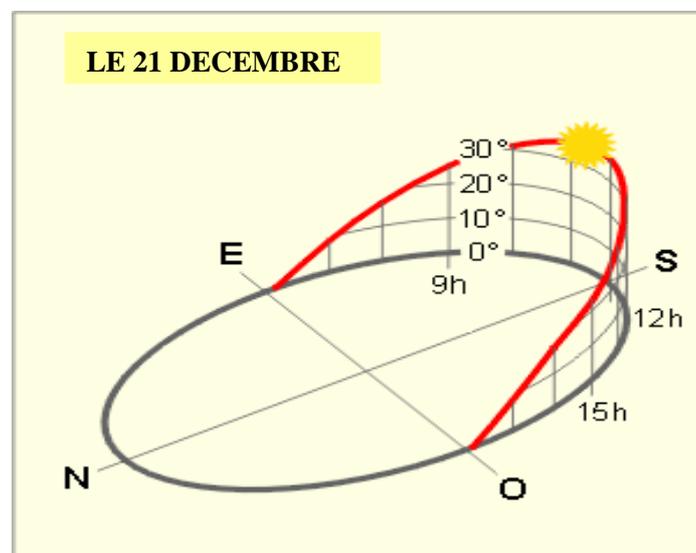


Figure 5.2 : Position du soleil pour le 21 Décembre

Le 21 JUI

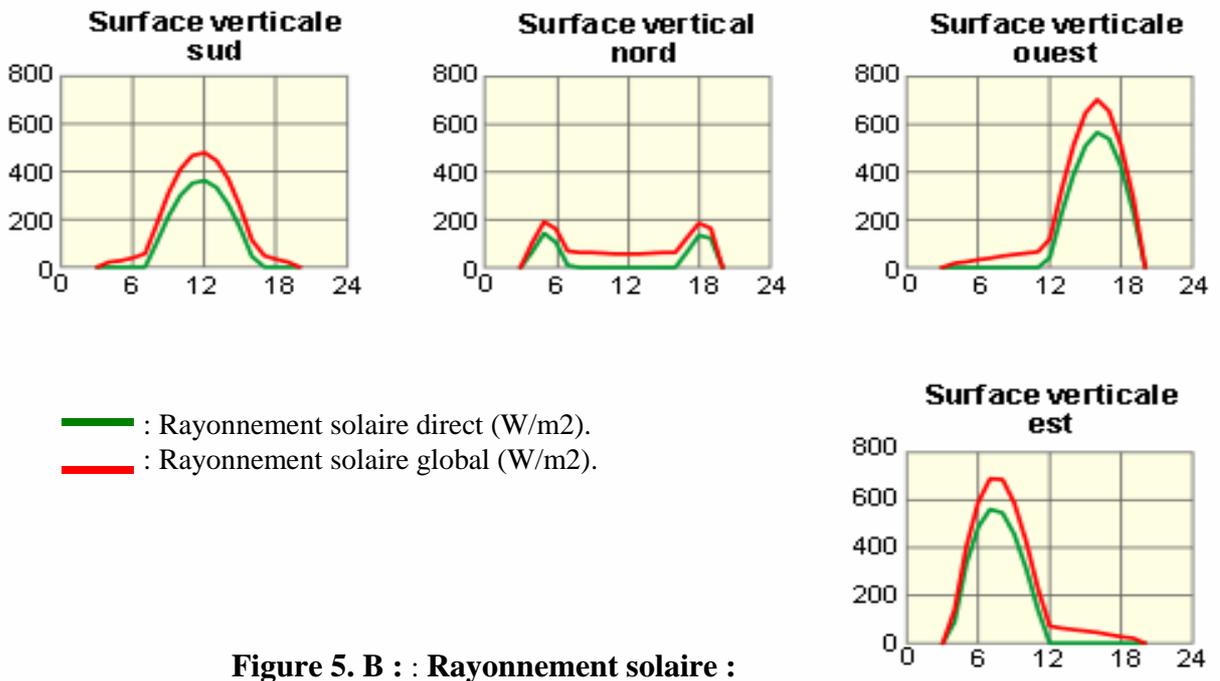


Figure 5. B : : Rayonnement solaire : (21 Juin).

Le 21 DECEMBRE

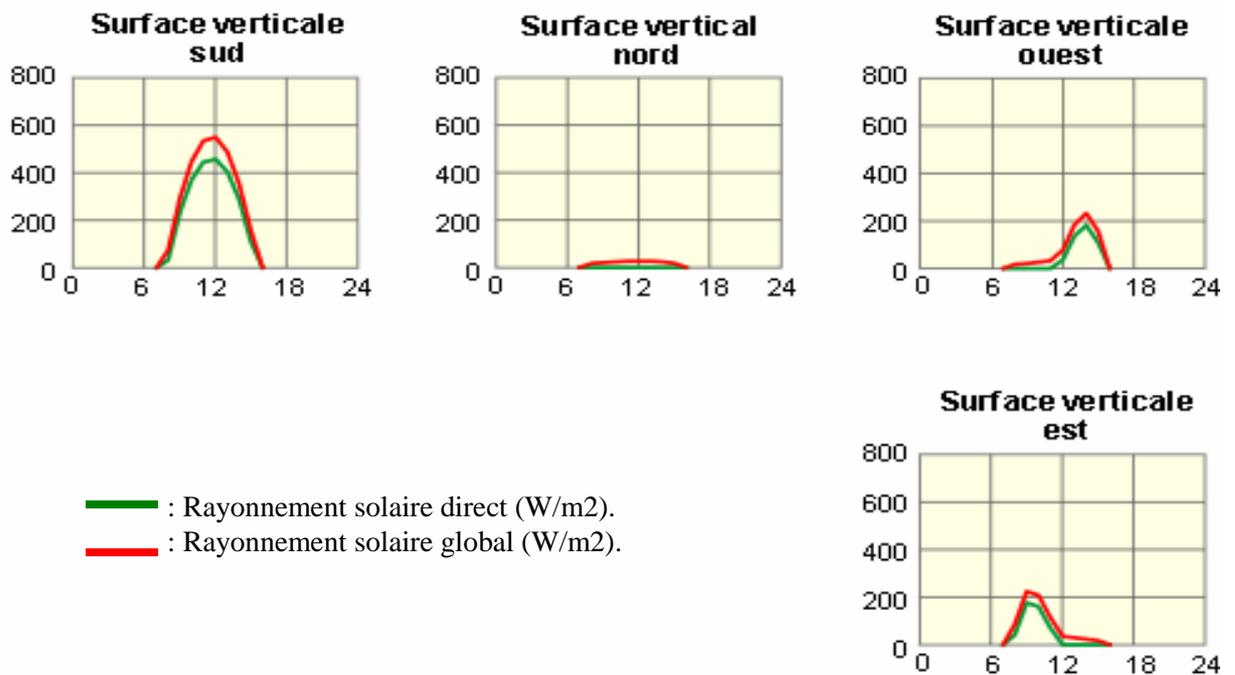


Figure 5.C : Rayonnement solaire : (21 Décembre).

V.1.4. Effet des gaz de remplacement et de l'espace intercalaire :

On fait varier l'espace intercalaire dans le cas d'un double vitrage on obtient de très bons résultats pour le coefficient total du transfert de chaleur figure (5.31), cependant ces valeurs sont insuffisantes pour réduire les apports solaires, donc en remplissant d'argon ou du krypton l'espace entre les deux vitres de fenêtre, on réduit :

- 1) les pertes thermiques par conduction, l'argon étant moins conductible que l'air; et
- 2) les pertes thermiques par convection, l'argon étant plus lourd que l'air et se déplaçant donc moins entre les vitres.

Le krypton a un rendement légèrement supérieur à celui de l'argon et réduit l'espacement optimal des vitres à environ 8 mm. Cette réduction de l'espace entre les vitres permet d'utiliser une moins grande quantité de krypton, qui coûte beaucoup plus cher que l'argon, et de fabriquer des fenêtres à vitrage multiple plus résistantes aux bris causés par les contraintes.

Ces résultats sont comparés avec [35], présentés sur la figure (5.31.1), une petite différence dans les valeurs de U_{global} , ceci est dû au condition intérieure et extérieure, la référence [35] considère la température extérieure = -17°C , en hiver alors dans notre étude on la considère égale 0°C .

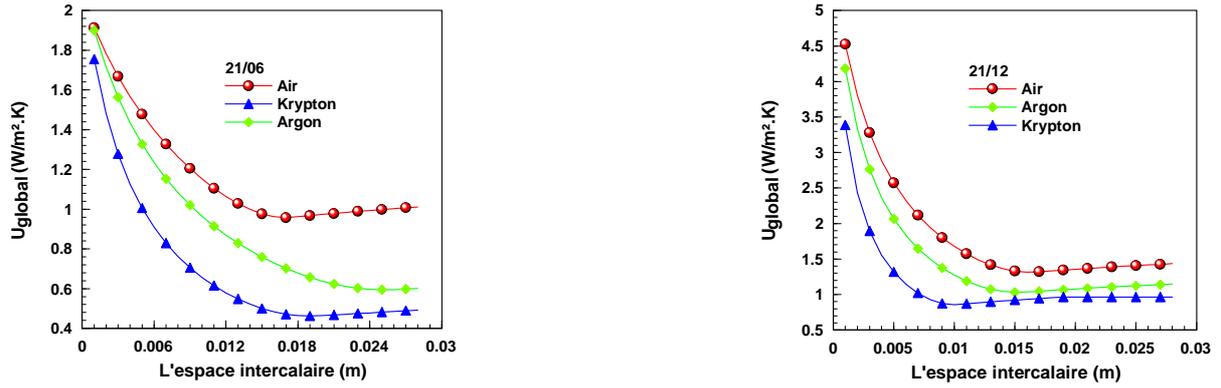


Figure 5.31 : Coefficient global du transfert de chaleur pour le double vitrage.

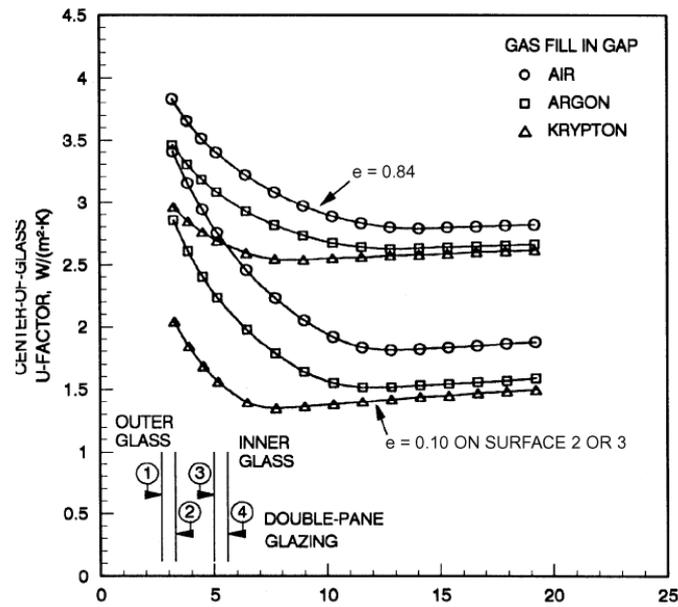


Figure 5.31.1 : Coefficient global du transfert de chaleur pour le double vitrage.

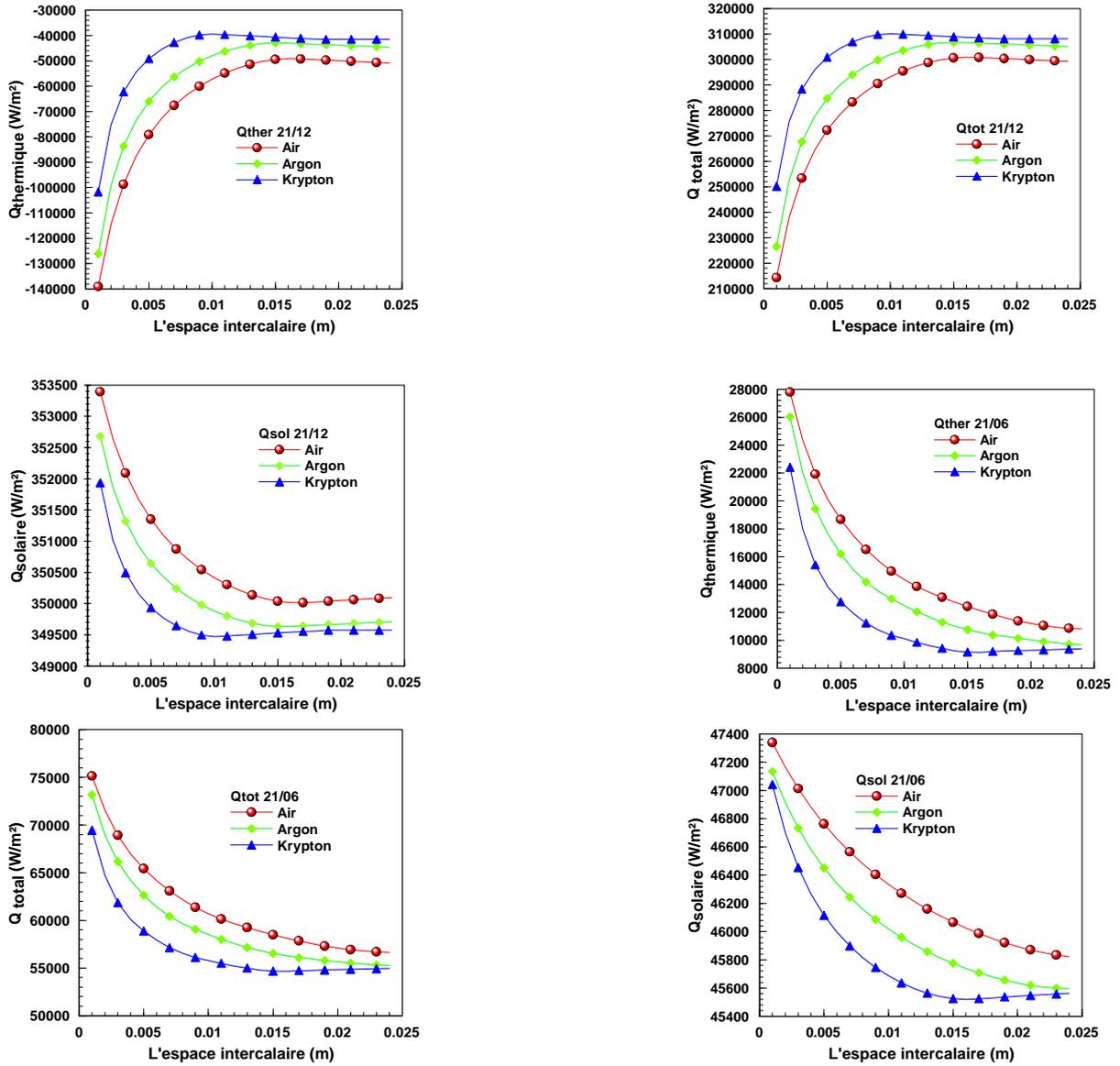


Figure 5.32 : Flux solaire total et thermique d'un double vitrage

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES FUTURES

Les calculs présentés ici n'ont pas la prétention d'être complets. En effet, il est fort probable qu'ils ne mettent pas en évidence tous les paramètres influençant l'efficacité d'un système de vitrage plus protection solaire. Cependant, ils ont l'intérêt de donner, pour un système et un cas particulier, une première piste quant à l'influence de certains paramètres intervenant dans le mode de gestion des protections solaires.

Dans notre cas, nous avons étudié en particulier la température, le rayonnement, l'éclairement et les propriétés optiques des verres pour différents cas.

En ce qui concerne l'influence de la température sur l'efficacité des protections solaires, nous avons remarqué que l'idéal est la protection extérieure, cette proposition est originale et ne correspond pas avec ce qui est réalisé dans la pratique, d'autres études montrent que la solution est de modifier celle-ci en fonction de la saison considérée. Il serait très intéressant de pouvoir approfondir la recherche de ce côté et de tester cette solution en pratique.

En ce qui concerne l'éclairement intérieur à partir duquel la protection solaire peut être descendue, il semble que le critère de *380 Lux* appliqué en pratique puisse se justifier, du moins dans le cas que nous avons étudié ici.

L'originalité du mode de gestion de l'éclairement que nous proposons vient du fait que le bureau est non équipé de conditionnement d'air.

Le nombre de paramètres influençant le choix du vitrage d'un immeuble de bureaux est important : l'orientation de la façade concernée, la configuration de la façade, la valeur des apports solaires, la stratégie de la mise en place des protections solaires et la prise en compte de l'éclairage naturel.

Notre étude est limitée à un cas particulier, pour quatre orientations différentes. Elles montrent seulement qu'il reste beaucoup de travail à faire en ce qui concerne le choix et la

Conclusion générale et perspectives futures

gestion des protections solaires dans les immeubles de bureaux. Elles donnent également un premier aperçu quand à la complexité du problème.

Les résultats de cette étude demandant un très grand nombre de nouvelles simulations, certaines règles universelles, permettant d'établir des solutions pratiques quant au choix du système de vitrage et de leurs protections solaires.

Même si cette méthodologie a été appliquée pour les immeubles de bureaux à la ville de Batna, elle peut être facilement étendue pour d'autres types de bâtiment et également d'autres région et donc d'autres climats. Il est certain que si l'idée était d'étendre l'étude à d'autres bâtiments ou d'autres pays, il suffit de reproduire les mêmes calculs que celles réalisées pour cette étude, en modifiant le fichier rayonnement solaire seulement.

Il existe plusieurs pistes quant à l'extension et la suite de ce travail, la première piste serait l'extension de l'étude à d'autres types de bâtiments et/ou d'autres climats. Nous en avons déjà parlé dans la première partie de cette conclusion.

La seconde piste est la prise en compte des protections solaires en combinaison avec des vitrages. Ces protections seraient soit intégrées dans une façade classique soit dans une façade double peau avec ventilation mécanique.

Une piste intéressante à approfondir se situe également au niveau de la validation des résultats de l'éclairage et pourquoi pas le développement d'un outil de calcul et une validation qui seras d'établir avec des mesures de consommations d'éclairage artificiel, liées à des mesures de disponibilité d'éclairage naturel au moins pour la région de Batna.

Nous voyons donc que ce travail nous a ouvert des perspectives de travail futur et que la difficulté ne sera pas de trouver des pistes de travail mais plutôt de choisir parmi celles-ci, celles qui semblent les plus intéressantes à développer afin de continuer à répondre aux besoins d'un grand nombre de personnes concernées par les aspects de la physique du bâtiment et au-delà de ce point, par l'intégration des principes de développement durable dans le domaine du bâtiment.

Tableau A.1 : L'azimut et l'orientation de la surface.

Orientation	<i>N</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>	<i>SE</i>	<i>S</i>	<i>SW</i>	<i>W</i>	<i>NW</i>
Azimut de la surface	180°	-135°	-90°	-45°	0°	+45°	+90°	+135°

Tableau A.2 : Valeurs des coefficients A, B, C et Déclinaison.

Mois	Equation du temps (min)	Déclinaison δ (°)	A (W/m ²)	B Sans dimension	C Sans dimension
<i>Janvier</i>	-11.2	-20.0	1230	0.142	0.058
<i>Février</i>	-13.9	-10.8	1215	0.144	0.060
<i>Mars</i>	-7.5	0.0	1186	0.156	0.071
<i>Avril</i>	1.1	+11.6	1136	0.180	0.097
<i>Mai</i>	3.3	+20.0	1104	0.196	0.121
<i>Juin</i>	-1.4	+23.45	1088	0.205	0.134
<i>Juillet</i>	-6.2	+20.6	1085	0.207	0.136
<i>Août</i>	-2.4	+12.3	1107	0.201	0.122
<i>Septembre</i>	7.5	0.0	1151	0.177	0.092
<i>Octobre</i>	15.4	-10.5	1192	0.160	0.073
<i>Novembre</i>	13.8	-19.8	1221	0.149	0.063
<i>Décembre</i>	1.6	-23.45	1233	0.142	0.057

Table A.3 : Facteur typique de la transmittivité du system de vitrage (fenêtre).

Eléments de la pièce	Transmittivité due à la lumière du :		
	Soleil et Ciel	Obstacles	Sol
<i>Plafond</i>	$\tau_{sc}=0.00$	$\tau_{oc}=0.00$	$\tau_{gc}=0.50$
<i>Parois à l'Exception de la fenêtre</i>	$\tau_{sv}=0.15$	$\tau_{ov}=0.50$	$\tau_{gv}=0.15$
<i>Plan de travail</i>	$\tau_{sp}=0.45$	$\tau_{op}=0.15$	$\tau_{gp}=0.00$

Tableau A.4 : Propriétés optique de la protection solaire.

Facteur de transmission (τ)		Facteur de réflexion (ρ)			
		<i>Blanc</i>	<i>Pastel</i>	<i>Foncé</i>	<i>Noir</i>
<i>Opaque</i>	0.0	0.7	0.5	0.3	0.1
<i>Moyennement translucide</i>	0.2	0.6	0.4	0.2	0.1
<i>Très translucide</i>	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1

Le facteur d'absorption $\alpha=1-\tau-\rho$, et en prenant comme hypothèse que les facteurs de transmittivité et de la réflectivité de la lumière ont des valeurs égales à celles de l'énergie solaire.

Tableau .A.5 : Masse molaire, [kg/Kmol].

Gaz	M
<i>Air</i>	28,97
<i>Argon</i>	39,948
<i>Krypton</i>	83,80
<i>Xénon</i>	131,30

Tableau A.6 : conductivité thermique, k [W/m·K].

Gaz	Coefficient a	Coefficient b	$K @ 0\text{ °C}$	$k @ 10\text{ °C}$
	W/ (m·K)	W/ (m·K ²)	W/ (m·K)	W/ (m·K)
<i>Air</i>	$2,873 \times 10^{-3}$	$7,760 \times 10^{-5}$	0,0241	0,0249
<i>Argon</i>	$2,285 \times 10^{-3}$	$5,149 \times 10^{-5}$	0,0163	0,0168
<i>Krypton</i>	$9,443 \times 10^{-4}$	$2,826 \times 10^{-5}$	0,0087	0,0090
<i>Xénon</i>	$4,538 \times 10^{-4}$	$1,723 \times 10^{-5}$	0,0052	0,0053

$k = a + b \cdot T.$

Tableau A.7: Viscosité, μ [kg/m·s].

Gaz	Coefficient a	Coefficient b	$\mu @ 0\text{ °C}$	$\mu @ 10\text{ °C}$
	N.s/m ²	N.s/(m ² ·K)	N.s/m ²	N.s/m ²
<i>Air</i>	$3,723 \times 10^{-6}$	$4,94 \times 10^{-8}$	$1,722 \times 10^{-5}$	$1,771 \times 10^{-5}$
<i>Argon</i>	$3,379 \times 10^{-6}$	$6,451 \times 10^{-8}$	$2,100 \times 10^{-5}$	$2,165 \times 10^{-5}$
<i>Krypton</i>	$2,213 \times 10^{-6}$	$7,777 \times 10^{-8}$	$2,346 \times 10^{-5}$	$2,423 \times 10^{-5}$
<i>Xénon</i>	$1,069 \times 10^{-6}$	$7,414 \times 10^{-8}$	$2,132 \times 10^{-5}$	$2,206 \times 10^{-5}$
$\mu = a + b \cdot T.$				

Tableau A.8 : Chaleur Spécifique à pression constante, C_p [J/ (kg·K)].

Gaz	Coefficient a	Coefficient b	$C_p @ 0\text{ °C}$	$C_p @ 10\text{ °C}$
	J/ (kg·K)	J/ (kg·K ²)	J/ (kg·K)	J/ (kg·K)
<i>Air</i>	1002,7370	$1,2324 \times 10^{-2}$	1006,1034	1006,2266
<i>Argon</i>	521,9285	0	521,9285	521,9285
<i>Krypton</i>	248,0907	0	248,0917	248,0917
<i>Xénon</i>	158,3397	0	158,3397	158,3397
$C_p = a + b \cdot T.$				

Tableau A.9 : constantes des corrélations et l'ordre d'application.

Chercheur	c	a	b	Ordre de: Ag	Ordre de : Gr
<i>Jakob (1967)</i>	1	0	0	De 3.12 à 42.2	$Gr \leq 10^4$
<i>Jakob (1967)</i>	0.180	0.250	-0.111	De 3.12 à 42.2	$2 \times 10^4 \leq Gr \leq 2 \times 10^5$
<i>Jakob (1967)</i>	0.065	0.333	-0.111	De 3.12 à 42.2	$2 \times 10^5 \leq Gr \leq 1.1 \times 10^7$
<i>Newell et Schmidt (1970)</i>	0.155	0.315	-0.265	De 2.5 à 20.0	$4 \times 10^3 \leq Gr \leq 1.4 \times 10^5$
<i>Vahl Davis (1968)</i>	0.135	0.315	-0.204	De 2.5 à 35.0	$10^4 \leq Gr \leq 3 \times 10^5$
<i>Yin (1978)</i>	0.210	0.269	-0.131	De 4.9 à 78.7	$1.5 \times 10^3 \leq Gr \leq 7 \times 10^6$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Magali Bodart** : Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique. Thèse de doctorat, Université de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées, Avril 2002.
- [2] **Centre Scientifique et Technique de la Construction** : "Le verre et les produits verriers -les fonctions des vitrages-, Note d'information technique, Belgique, 214, Décembre 1999.
- [3] **M. Rubin**: infrared properties of polyethylene terephthalate films. Lawrence Berkeley, Laboratory university of California, October 1981.
- [4] **M. Rubin**: Optical Properties of Thermochromic VO₂ Coatings for Windows. Lawrence Berkeley, Laboratory university of California, 1984.
- [5] **M. Rubin**: Optical Constants and Bulk Optical Properties of Soda Lime Silica Glasses for Windows. Lawrence Berkeley Laboratory University of California, juin 1984.
- [6] **I. Perez-Grande, J. Meseguer, and G. Alonso**: Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades, Applied Thermal Engineering, Vol: 25, p: 3163–3175 2005.
- [7] **D. Faggembauu, M. Costa, M. Soria, and A. Oliva**: Numerical analysis of the thermal behaviour of glazed ventilated facades in Mediterranean climates, Part II: applications and analysis of results, Solar Energy, Vol.75 N°:1, p: 229-239, 2003.
- [8] **J. H. Klems**: Solar Heat Gain Through Fenestration Systems Containing Shading: Procedures for Estimating Performance from Minimal Data. Lawrence Berkeley, Laboratory university of California 1993.
- [9] **L. Van Dyck and T. Konen**: Energy Conservation through Interior Shading of Windows. Lawrence Berkeley University of California January 1995.
- [10] **J. H. Klems and J. L. Warner**: Measurement of Bidirectional Optical Properties of Complex Shading Devices. Lawrence Berkeley, Laboratory university of California 1992.
- [11] **ISO 15099**: Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices -Detailed Calculations, International Standards Organisation. 2002.
- [12] **M. C. Dubois**: "Solar shading and building energy use: a literature review, Part I, Department of Building Science. Lund University, Sweden, 1997.
- [13] **J. H. Klems and G. O. Kelley**: Calorimetric Measurements of Inward-Flowing Fraction for Complex Glazing and Shading Systems. Lawrence Berkeley, Laboratory university of California 1996.

- [14] **J .H. Klems and J.L. Warner:** Solar Heat Gain Coefficient of Complex Fenestrations with a Venetian Blind for Differing Slat Tilt Angles. Lawrence Berkeley, Laboratory university of California, August 1996.
- [15] **M.C. Dubois:** Solar Shading for Low Energy Use and Daylight Quality in Offices. Energy and Building Design. Lund University Sweden, 2001.
- [16] **Jean NOËL:** Development of numerical shading devices models for the use in building thermal simulation. University of Lyon France July 2004.
- [17] **R. Tobias, H. Hakan and K. Bjorn:** G-values of solar control windows with internal solar shading devices. Energy and Building Design, Lund University, Sweden, 2003.
- [18] **Craig Demmel:** A Study of the Affects of Fenestration and External Shading on Energy Consumption for Commercial Buildings, Iowa State University, 2002.
- [19] **Jorge Herman and Salazar Trujillo:** Solar Performance and Shadow Behaviour in Buildings: Case Study with Computer. Modelling of a Building in Lorena, Spain, 2001.
- [20] **Hidayat Shahida and David Naylorb:** Energy performance assessment of a window with a horizontal Venetian blind. Energy and Buildings, Vol: 37, p836-843: 2005.
- [21] **B. Chen, X. Chen, Y.H. Ding and X. Jia:** Shading effects on the winter thermal performance of the Trombe wall air gap: An experimental study in Dalian .Renewable Energy, Vol: 31, p: 1961-1971, 2006.
- [22] **E. Tillmann and J. Platzner:** Evaluation of overheating protection with sun shading systems. Solar Energy, Vol. 69 (Suppl), N°:1 6, p: 59- 74, 2001.
- [23] **Ping .Ye:** Effect of Venetian blinds on overall heat transfer through window systems: a finite element numerical solution. Queen's University Kingston, Ontario, Canada May, 1997
- [24] **Tobias Rosencrantz:** Performance of Energy Efficient Windows and Solar Shading Devices Evaluation through Measurements and Simulations, Lund University of Technology, Report EBD-T--05/5.2005.
- [25] **A. Breitenbach, S. Lart and J. Rosenfeld:** Optical and thermal performance of glazing with integral Venetian blinds. Energy and Buildings, Vol: 33, p: 433-442: 2001.
- [26] **Bernard Flament :** Vitrage solaire robin sun: Un nouveau vitrage multifonction, INSA de Strasbourg 2006.
- [27] **G. Flamant, S. Pneus and X. Loncour:** Ventilated double facades Real-scale testing of ventilated double facades Energy performance assessment Belgian Building Research Institute (BBRI) December, 2004.

- [28] **Carla Balocco and Massimo Colombari**: Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed facade: Non-dimensional analysis. *Energy and Buildings*, Vol: 38, p: 1-7, 2006.
- [29] **K.A.R. Ismail; J.R. Henriquez**: Simplified model for a ventilated glass window under forced air flow conditions. *Applied Thermal Engineering*, Vol: 26, p: 295–302, 2006.
- [30] **Elisabeth Gratia and Andre De Herde**: The most efficient position of shading devices in a double-skin façade. *Energy and Buildings*, Vol: 39, p: 364–373, 2007.
- [31] **P. Blanus, W. Goss, H. Roth, P. Weitzmann, C. Jensen, S. Svendsen and H.Elmahdy**: Comparison between ASHRAE and ISO thermal transmittance calculation methods *Energy and Buildings*, Vol: 39, p: 374–384, 2007.
- [32] **Perez, R. et al**: An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces Description, performance validation, and site dependency evaluation,. *Solar Energy*, Vol: 36, p: 481-98, 1986.
- [33] **A. Moumni, N. Hamani, N. Moumni et Z. Mokhtari**: Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra. S.I.P.E 8 Universitaire de Bechar–Algérie, Novembre 2006.
- [34] **C.A. Gueymard**: An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar Energy*, Vol: 38, p: 367–386, 1988.
- [35] **A.S.H.R.A.E**: handbook of fundamentals-chapter 30: fenestration. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., U.S.A, 2001.
- [36] **M Rubin, R. Powies and K. von Rottkay**: Models for the Angle-Dependent Optical Properties of Coated Glazing Materials *Solar Energy*, 1999
- [37] **R.A Furler**: Angular dependance of optical properties of homogeneous glasses, Lawrence Berkeley Laboratory University of California, June 1991.
- [38] **K. Paparnichael, J. Klems, and S. Sellcowitz**: Determination and Application of Bidirectional Solar-Optical Properties of Fenestration Systems. Lawrence Berkeley, Laboratory university of California, June 1988.
- [39] **D.K.Arasteh, E.U.Finlayson, C.Huizenga and M.D.Rubin**: WINDOW 4.0: Documentation of Calculation Procedure, Publication LBL-33943, Lawrence Berkeley Laboratory, Energy &Environment Division, Berkeley, September 1993.
- [40] **D. Faggembauu, M. Costa, M. Soria and A. Oliva**: Numerical analysis of the thermal behaviour of glazed ventilated facades in Mediterranean climates, Part I: development and validation of a numerical model applications and analysis of results. *Solar energy* Vol: 75(1), p: 217-228, 2003.

- [41] **M. Michael**: A General Model for the Calculation of Daylighting in Interior Spaces Department of Mechanical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, Energy and Buildings, Vol :5, p:69 -79, 1982.
- [42] **Magali Bodart et Arnaud Deneyer**: Principes de base de l'éclairage naturel et du confort visuel CSTC: Centre Scientifique et Technique de la Construction Division Physique du Bâtiment et Climat Intérieur, Belgique, 2004.
- [43] **Arnaud. Deneyer and Nelly.Moenssens**: Les doubles façades ventilées aspects liés a l'éclairage naturel et au confort visuel. Centre scientifique et technique de la construction Belgique Octobre 2004.
- [44] **R. Sullivan, E.S. Lee and S. Selkowitz**: A Method of Optimizing Solar Control and Daylighting Performance in Commercial Office Buildings. Lawrence Berkeley, Laboratory University of California September 1992
- [45] **M.Bodart and A.Herde**: Global energy savings in offices buildings by the use daylighting Energy and Buildings, Vol: 34, p: 421–429, 2002.
- [46] **M. Karayel, M. Navvab, E. Ne'emman, and S. Selkowitz**: Zenith luminance and sky luminance distributions for daylighting calculations. LBL- 15622, Lawrence Berkeley Laboratory University of California, Berkeley, May 1983.
- [47] **Luis Robledo and Alfonso Soler**: Estimation of global illuminance for clear skies at Madrid, Energy and Buildings, Vol: 31, p: 25–28, 2000.
- [48] **Aris Tsangrassoulis, Mat Santamouris and D. Asimakopoulos**: Theoretical and experimental analysis of daylight performance for various shading systems Energy and Buildings, Vol: 24, p: 223-230, 1996.
- [49] **Kenneth Johnson and Stephen Selkowitz**: Light Guide Design Principles.LBL- 20546 Windows and Lighting Program, Lawrence Berkeley Laboratory Berkeley, Novembre 1986.
- [50] **Marc Fontoyntont, Aris Tsangrassoulis and Afroditi Synnefa**: Sunlight Handbook Chapter 2: Daylighting: 22 April 2004.
- [51] **P. R. TREGENZA**: Mean Daylight Illuminance in Rooms Facing Sunlit Streets Building environment Building and Environment, Vol. 30, p: 83-89, 1995.
- [52] **Azza Nabil, John Mardaljevic**: Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors, Energy and Buildings, Vol: 38, p:905–913, 2006.
- [53] **S. Lee, D.L. Di Bartolo and S.Selkowitz**: The Effect of Venetian Blinds on Daylight. Lawrence Berkeley Laboratory University of California September 1998

- [54] **S. Selkowitz and S. Lee:** Advanced Fenestration Systems for Improved Daylight performance. Lawrence Berkeley Laboratory University of California, March 1998.
- [55] **Arild Gustavsen, Brent T. Griffith and Dariush Arasteh:** Natural Convection Effects in Three-Dimensional Window Frames with Internal cavities. ASHRAE Transactions, Vol. 107 (2) 2001.
- [56] **Peter Graham Ellis:** Development and validation of the invented trombe wall model in energyplus. Thesis of Master of Science in Mechanical Engineering Carleton College, 1995 University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003 Urbana.
- [57] **Yunhua Yang:** Natural Convective flow and heat transfer in vertical and inclined glazing cavities. Master of Science, University of Massachusetts September 2003
- [58] **K.A.R. Ismail and J.R. Henriquez:** Modelling and simulation of a simple glass window. Solar Energy Materials & Solar Cells Vol: 80, p: 355–374, 2003.

ملخص

إننا تخفيض ضياع الحرارة في الشتاء يسمح بتخفيض كلفة التدفئة و تخفيض اكتساب الحرارة في الصيف يخفض كلفة تبريد البيوت المكيفة. صناعة النوافذ لم تطل لتحقيق تقنيات بديلة من أجل تصحيح المردودية الضعيفة للنوافذ العادية. الجهود المبذولة في هذا المجال خلال السنوات الأخيرة لم تكن إلا عبارة عن تحدي أدى إلى إنتاج نافذة ذات مردود طاقتي عالي, من أجل هذا كان اختيار زجاج النوافذ سؤال مطروح عند إنجاز مباني المكاتب, وأهمية تحليله بالتفصيل. في هذه الدراسة تم إنجاز برنامج حساب يعتمد على تحديد الحالة الحرارية و الضوئية لزجاج النوافذ و لحواجزها الشمسية. لقد اخترنا التركيب بين السمات الشمسية و الحرارية لأنه يبدو من المهم لاختيار زجاج النوافذ يتم الأخذ بعين الاعتبار الحالتين السابقتين دون أن ننسى تأثير الإنارة الطبيعية.

Résumé

La réduction des pertes de chaleur en hiver permet d'effectuer des économies de chauffage et la réduction des gains de chaleur en été réduit le coût du refroidissement des maisons climatisées. L'industrie des fenêtres n'a pas tardé à élaborer des technologies de substitution afin de corriger les faiblesses des vitrages ordinaires sur le plan du rendement énergétique. Les efforts réalisés dans ce domaine pendant ces dernières années ont mené à la mise au point de la fenêtre à haut rendement énergétique. Cependant, le choix du vitrage étant une question qui nous semblait essentielle lors de la conception d'un immeuble de bureau, il nous paraissait très intéressant de l'analyser en détail. La présente étude développe un code de calcul qui permet une caractérisation du comportement thermique et optique des fenêtres et de leurs protections solaires. Nous avons choisi de combiner les aspects solaire et thermique car il paraît évident que le choix d'un vitrage devra se faire en tenant compte des deux aspects sans oublier l'effet de l'éclairage naturel.

Abstract

The reduction of heat losses in winter permit to economy the heating and the reduction of heat gains in summer reduce the cost of the cooling in air-conditioned houses. The windows industry did not delay to elaborate substitution technologies in order to correct the weakness of the glazing for energy efficiency. The efforts achieved in this domain during these last years have to set the window of high energy efficiency. However, the choice of the glazing represented an essential question that to us at the conception time of an office building, he appeared us very interesting to analyze it in detail. The present study develops a code of calculation that permit a characterization of the thermal and optic characteristics of the windows and their solar protections. We chose to combine the aspects solar and thermal because it appears evident that the choice of a glazing must while taking into account the two aspects without forgetting the natural lighting effect.