

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département :.....

Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم:.....

المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

**Doctorat en sciences en : Architecture**

**Spécialité (Option) : Architecture**

**Optimisation des performances thermiques et lumineuses des systèmes de contrôle solaire dans un climat chaud et sec.**

Présentée par :

**MAGRI ELOUADJERI - DJENANE Sahar**

Soutenue publiquement le : 24/10/2023.

**Devant le jury composé de :**

Mr. ZEMMOURI Nouredine Professeur

Mme. BOUSSOUALIM Aicha Professeur

Mr. AIT HADDOU Hassan Professeur

Mme SRITI Leila Professeur

Mme ABDOU Saliha Professeur

Président Université de Biskra

Rapporteur EPAU (Alger)

Co-directeur ENSA, Montpellier

Examineur Université de Biskra

Examineur Université de Constantine

*"L'important, ce n'est pas la destination,  
mais le voyage en lui-même"*

*Robert Louis Stevenson*

*"On fait la science avec des faits, comme  
on fait une maison avec des pierres ; mais une  
accumulation de faits n'est pas plus une  
science qu'un tas de pierres n'est une maison"*

*Henri POINCARÉ  
(La science et l'hypothèse, 1902)*

*Aux étoiles qui éclairent ma vie,  
Qui luisent toujours sur mon âme  
Mes filles Roua et Ythar*

*A ma source de tendresse  
Mes chers parents*

*A ma source de courage  
Moussadék*

## Remerciements

*En premier lieu, je remercie Dieu, tout puissant, de m'avoir donné le courage, la force et la patience pour surmonter toutes les difficultés et mener cette thèse à son terme.*

*Après toutes ces années de recherche, je suis absolument convaincue que la thèse ne pourra pas être un travail solitaire. En effet, cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien de nombreuses personnes.*

*Mes remerciements les plus sincères vont à ma directrice de Thèse Madame **BOUSSOUALIM Aïcha**, Professeur à l'École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, pour avoir accepté d'encadrer cette thèse, pour avoir su donner l'impulsion initiale et pour toutes les remarques constructives qu'elle a pu émettre et qui m'ont permis de mener à bien mes travaux de recherche. Qu'elle soit aussi remerciée pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'elle m'a prodigués. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie depuis ma thèse de magistère.*

*Un énorme merci également à mon co-directeur de thèse, Monsieur **AIT HADDOU Hassan**, Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, pour avoir accepté de co-encadrer ce travail, m'avoir permis de mener mes travaux de recherche au sein du LIFAM et pour m'avoir guidé et accompagné durant mon séjour au LIFAM.*

*J'adresse également mes remerciements à Monsieur **ZEMMOURI Noureddine**, professeur à l'université de Biskra, pour avoir participé au jury de thèse et avoir accepté d'en être le président. Je le remercie infiniment pour son aide et la gentillesse qu'il a manifestée à mon égard durant cette thèse.*

*Je tiens à remercier Madame **SRITI Leïla**, Professeur à l'Université de Biskra, et Madame **ABDOU Salîha**, Professeur à l'Université de Constantine, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer à mon jury de thèse.*

*Je remercie également les membres du LIFAM, notamment Madame **VILLEMUR Frédérique**, Maître de conférences à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, pour avoir accepté de m'accueillir au sein du LIFAM, et Madame **Hélène KLUNDER**, chargée de la gestion administrative de la recherche-chargée de mission, pour sa disponibilité et son efficacité.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **André DE HERDE**, Professeur à la Faculté d'architecture de l'Université catholique de Louvain, pour m'avoir ouvert les portes du laboratoire "Architecture et climat" et pour le temps qu'il a consacré pour discuter mon travail. Je tiens tout particulièrement à saluer Madame **Marie EVRARD**, responsable du centre de documentation, pour sa gentillesse sans limite, et Madame **Marie-Hélène DEHUT**, secrétaire au laboratoire, pour sa disponibilité.*

*Je souhaite également témoigner ma gratitude à mon mari Monsieur **DJENANE Moussadak** pour ses encouragements, ses multiples conseils et pour son soutien affectif sans faille. C'est grâce à lui que j'ai pu achever ce travail chronophage.*

*Merci également à **mes parents** pour m'avoir soutenu durant ces années et avoir cru en moi en espérant qu'ils seront fiers de leur fille. Merci à toute ma famille pour sa présence, **mes frères et sœurs** qui n'ont cessé de m'encourager, je tiens à remercier également **ma belle-mère** pour son soutien durant toutes ces années.*

*Mille mercis à tous mes amies et collègues qui m'ont supporté et soutenu dans les moments heureux et malheureux en assurant le soutien affectif à ce travail doctoral.*

*Merci à tous ceux que j'ai oubliés ici mais qui comptent pour moi, j'espère qu'ils ne m'en tiendront pas rigueur ! ... Sans vous tous, tout ceci n'aurait pas été possible...*

*Sahar **MAGRI ELOUADJERI-DJENANE***

## Résumé

Ce travail de recherche propose d'étudier l'effet thermique et lumineux des dispositifs de protection solaire par rapport aux conditions des climats chauds et secs afin d'en optimiser les performances. Cette thèse contribue à la recherche dans ce domaine à travers des investigations sur l'impact de ces dispositifs sur la consommation énergétique, le confort thermique et la performance de l'éclairage naturel dans les bâtiments. La partie expérimentale porte sur l'étude de l'impact d'un certain nombre de paramètres de conception sur les performances des protections solaires. Ces paramètres sont la disposition et l'inclinaison des lamelles ainsi que l'espacement entre les lamelles. Des configurations, serviront de support à la simulation numérique, ont été obtenues à travers la combinaison de ces paramètres.

Trois logiciels de simulation ont été utilisés : TRNSYS 17, RADIANCE 1.2 et DAYSIM 3.1. Cette étude paramétrique avait pour but d'évaluer les performances des configurations géométriques par rapport à un ensemble de critères. Ces critères sont la température de l'air (en hiver et en été), l'éclairage naturel (l'illuminance, sDA, FLJ, UFLJ) ainsi que la consommation énergétique (pour le chauffage et la climatisation).

Dans ce travail, nous proposons également un outil d'aide à la conception des protections solaires pouvant être utilisé dans les phases initiales de la conception architecturale. Pour le développer, nous nous sommes basés sur les résultats de l'étude paramétrique et l'analyse multicritère qui permet de classer les différentes configurations géométriques évaluées dans l'étude paramétrique.

**Mots-clés :** Protection solaire extérieure fixe, climat chaud et sec, confort thermique, éclairage naturel, consommation énergétique, simulation numérique, RADIANCE 1.2, DAYSIM 1.3, TRNSYS 17, analyse multicritère, outil d'aide à la conception, Ghardaia.

## ملخص

يقترح هذا البحث دراسة التأثير الحراري والضوئي لكاسرات الشمس في المناخ الحار والجاف من أجل تحسين أدائها. تساهم هذه الرسالة في البحث في هذا المجال من خلال الاستقصاء حول تأثير كاسرات الشمس على استهلاك الطاقة والرفاهية الحرارية والإضاءة الطبيعية في المباني. يتعلق الجزء التجريبي بتقييم عدد من متغيرات التصميم على أداء كاسرات الشمس. تتمثل هذه المتغيرات في تموضع ودرجة ميلان الصفائح وكذلك التباعد بينها. تحصلنا من خلال المزج بين هذه المتغيرات على التكوينات الهندسية التي ستيتم استعمالها في المحاكاة الرقمية.

تم استخدام ثلاثة برامج محاكاة: TRNSYS 17 و RADIANCE 1.2 و DAYSIM 3.1. الغرض من هذه الدراسة هو تقييم أداء التكوينات الهندسية حسب معايير مختلفة. تتمثل هذه المعايير في درجة حرارة الهواء (في الشتاء والصيف) ، الإضاءة الطبيعية (شدة الإضاءة ، sDA ، FLJ ، UFLJ) واستهلاك الطاقة (للتدفئة وتكييف الهواء).

في هذا العمل، نقترح أيضًا أداة للمساعدة في تصميم كاسرات الشمس والتي يمكن استخدامها في المراحل الأولى للتصميم المعماري. لتطوير هذا البرنامج، اعتمدنا على نتائج الدراسة الحدودية وطريقة التحليل متعدد المعايير الذي يسمح بتصنيف التكوينات الهندسية المختلفة التي تم تقييمها سابقًا.

الكلمات المفتاحية: كاسرات شمس خارجية ثابتة، مناخ حار وجاف، رفاهية حرارية، إضاءة طبيعية، استهلاك الطاقة، محاكاة رقمية، RADIANCE 1.2، DAYSIM 1.3، TRNSYS 17، تحليل متعدد المعايير، أداة دعم التصميم.

## *Abstract*

This research proposes to study the thermal and luminous effect of solar shading devices in hot and dry climate in order to optimize their performances. It contributes to this field of research through investigations on the impact of those devices on energy use, thermal comfort, and daylighting in buildings. The experimental part of our research focus on the impact of design parameters on solar protection performance. These parameters are the disposition and the inclination of the slats, as well as the spacing between them. Geometrical configurations, which will serve as support for the numerical simulation, have been obtained through the combination of these parameters.

Three simulation software were used: TRNSYS 17, RADIANCE 1.2 and DAYSIM 3.1. This parametric study's object was to evaluate the performance of geometrical configurations according to different criteria. These criteria are the air temperature (in winter and summer), daylighting (illuminance, sDA, FLJ, UFLJ) and energy consumption (for heating and air-conditioning).

In this work, we also propose a designing solar protection tool that may be used during the early stages of building design. For its development, we based on the results of the parametric study and the multi-criteria analysis, which allows for the classification of the geometric configurations.

Key-words: external solar shading, hot and dry climate, thermal comfort, daylighting, energy consumption, numerical simulation, RADIANCE 1.2, DAYSIM 3.1, TRNSYS 17, multi-criteria analysis, Design help tool, Ghardaia.

## Sommaire

REMERCIEMENTS .....	4
RESUME .....	I
ملخص .....	II
ABSTRACT .....	III
SOMMAIRE .....	IV
TABLE DES ILLUSTRATIONS .....	VIII
INDEX DES TABLEAUX.....	XIII
<b>1 PARTIE INTRODUCTIVE.....</b>	<b>1</b>
INTRODUCTION GENERALE .....	1
1.1 PROBLEMATIQUE .....	3
1.2 HYPOTHESES .....	4
1.3 OBJECTIFS.....	5
1.4 METHODOLOGIE ET ORGANISATION DU MANUSCRIT .....	5
<b><u>PREMIERE PARTIE : "EXPLORER" LE CONTROLE SOLAIRE</u></b>	
<b><u>EN ARCHITECTURE.....</u></b>	<b>7</b>
<b>2 CHAPITRE II : PROBLEMATIQUE DU CONTROLE SOLAIRE EN ARCHITECTURE</b>	<b>8</b>
INTRODUCTION.....	8
2.1 LE RAYONNEMENT SOLAIRE : ASPECTS GEOMETRIQUES .....	8
2.1.1 La relation Terre-Soleil .....	9
2.1.2 Représentations graphiques de la course solaire.....	14
2.2 LE RAYONNEMENT SOLAIRE : ASPECT ENERGETIQUE ET LUMINEUX .....	18
2.2.1 Puissance du rayonnement solaire : facteurs influents.....	19
2.2.2 Composition du rayonnement solaire.....	20
2.2.3 Intensité du rayonnement solaire .....	20
2.2.4 Rayonnement solaire et matériaux .....	23
2.3 LE CONTROLE SOLAIRE : EVOLUTION HISTORIQUE.....	25
2.4 LES ECHELLES DU CONTROLE SOLAIRE .....	29
2.4.1 L'échelle urbaine .....	29
2.4.2 L'échelle du bâtiment.....	33

2.4.3 L'échelle de l'ouverture et de ses différentes composantes .....	37
2.5 CONCLUSION .....	38
<b>3 CHAPITRE III : LA PROTECTION SOLAIRE DANS LE BATIMENT, CONCEPTION ET PERFORMANCES .....</b>	<b>40</b>
INTRODUCTION.....	40
<b>3.1 TYPOLOGIES DE PROTECTION SOLAIRE .....</b>	<b>40</b>
3.1.1 Protection solaire interne .....	41
3.1.2 Protection solaire externe.....	41
3.1.3 Protection solaire mobile / dynamique .....	43
<b>3.2 CONCEPTION DES PROTECTIONS SOLAIRES : METHODES ET OUTILS .....</b>	<b>44</b>
3.2.1 Outils graphiques : Diagramme solaire et abaque des masques.....	44
3.2.2 Méthode de dimensionnement .....	46
<b>3.3 PARAMETRES DE CONCEPTION DES PROTECTIONS SOLAIRES .....</b>	<b>51</b>
3.3.1 La profondeur des lamelles .....	51
3.3.2 L'espacement entre les lamelles .....	51
3.3.3 Le rapport entre espacement et profondeur des lamelles .....	52
3.3.4 L'angle d'inclinaison .....	53
<b>3.4 IMPACT DES PROTECTIONS SOLAIRES .....</b>	<b>53</b>
<b>3.5 EVALUATION DES PERFORMANCES DES PROTECTIONS SOLAIRES.....</b>	<b>56</b>
3.5.1 Les études expérimentales .....	57
3.5.2 Les simulations numériques.....	60
CONCLUSION .....	63
<b><u>DEUXIEME PARTIE : "ÉVALUER" LES PERFORMANCES THERMIQUES ET LUMINEUSES DES PROTECTIONS SOLAIRES DANS LES CLIMATS ARIDES.....</u></b>	<b>64</b>
<b>4 CHAPITRE IV : PREPARATION DE LA SIMULATION .....</b>	<b>65</b>
INTRODUCTION.....	65
<b>1.1 IDENTIFICATION DES PARAMETRES A CONSIDERER.....</b>	<b>66</b>
1.1.1 Modèle et conditions de simulation .....	66
1.1.2 Dimensionnement des protections solaires.....	68
1.1.3 Typologie des cas d'étude .....	70
<b>1.2 OUTILS ET CONDITIONS DE SIMULATION .....</b>	<b>75</b>
1.2.1 Analyse thermique .....	75
1.2.2 Analyse de l'éclairage naturel.....	76
<b>1.3 CONCLUSION .....</b>	<b>79</b>
<b>5 CHAPITRE V : ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION .....</b>	<b>80</b>
INTRODUCTION.....	80

<b>1.4 L'ORIENTATION SUD .....</b>	<b>82</b>
1.4.1 Impact sur la température de l'air.....	82
1.4.2 Impact sur la performance énergétique .....	87
1.4.3 Impact sur la performance lumineuse.....	93
<b>1.5 L'ORIENTATION EST .....</b>	<b>104</b>
1.5.1 Impact sur la température de l'air .....	104
1.5.2 Impact sur la performance énergétique .....	107
1.5.3 Impact sur la performance lumineuse.....	110
<b>1.6 L'ORIENTATION OUEST .....</b>	<b>117</b>
1.6.1 Impact sur la température de l'air .....	117
1.6.2 Impact sur la performance énergétique .....	120
1.6.3 Impact sur la performance lumineuse.....	123
<b>1.7 L'ORIENTATION NORD.....</b>	<b>130</b>
1.7.1 Impact sur la température de l'air .....	130
1.7.2 Impact sur la performance énergétique .....	133
1.7.3 Impact sur la performance lumineuse.....	136
<b>1.8 SYNTHESE .....</b>	<b>143</b>
5.1.1 Indicateurs influant les performances des protections solaires.....	143
5.1.2 Evaluation des configurations par rapport aux différents critères .....	154
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>159</b>

## **TROISIEME PARTIE : "PROPOSER" UN OUTIL D'AIDE A LA CONCEPTION DES PROTECTIONS SOLAIRES..... 161**

<b>6 CHAPITRE VI : LES OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION.....</b>	<b>162</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>162</b>
<b>6.1 L'AIDE MULTICRITERE A LA DECISION (PROBLEMATIQUE DE LA DECISION MULTICRITERE).....</b>	<b>163</b>
6.1.1 Généralités.....	164
6.1.2 L'évolution de l'analyse multicritères .....	165
6.1.3 Etapes d'une analyse multicritère.....	166
6.1.4 Problématiques de l'approche multicritère d'aide à la décision .....	169
6.1.5 Approches méthodologiques des méthodes d'analyse multicritère.....	171
6.1.6 Méthodes d'analyse multicritère.....	173
<b>6.2 LES OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION .....</b>	<b>179</b>
6.2.1 Classification des outils d'aide à la conception .....	179
6.2.2 Cas des protections solaires.....	181
<b>6.3 CONCLUSION .....</b>	<b>191</b>
<b>7 CHAPITRE VII : PRO-SOL UN PROTOTYPE D'OUTIL D'AIDE A LA CONCEPTION DES PROTECTIONS SOLAIRES .....</b>	<b>192</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>192</b>

<b>7.1 CARACTERISTIQUES DE L'OUTIL PROPOSE</b> .....	<b>192</b>
<b>7.2 L'ARCHITECTURE DU LOGICIEL "PRO-SOL" D'AIDE A LA CONCEPTION DES PROTECTIONS SOLAIRES</b> .....	<b>193</b>
7.2.1 Le langage de programmation .....	193
7.2.2 Diagramme de séquence (d'activité) .....	194
7.2.3 Besoins et supports .....	197
7.2.4 Maquette informatique de "Pro-Sol" .....	201
<b>7.3 DESCRIPTION DE LA NAVIGATION ET FONCTIONNEMENT DE PRO-SOL</b> .....	<b>202</b>
7.3.1 Ecran d'accueil .....	203
7.3.2 L'onglet "Ville" .....	203
7.3.3 L'onglet "données" .....	204
7.3.4 L'onglet "Analyse multicritère" .....	205
7.3.5 L'onglet "Dimensionnement" .....	206
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>207</b>
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>208</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>213</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>230</b>
<b>A. LOGICIELS DE SIMULATION</b> .....	<b>231</b>
1. TRNSYS .....	231
2. RADIANCE 2.0.....	234
<b>B. RESULTATS DE SIMULATION POUR L'ECLAIRAGE</b> .....	<b>236</b>
3. Orientation Sud .....	236
4. Orientation Est.....	243
5. Orientation Ouest.....	246
6. Orientation Nord.....	249
<b>C. LES EQUATIONS NUMERIQUES</b> .....	<b>253</b>
1. La protection horizontale .....	253
2. La protection verticale .....	258

## Table des illustrations

Figure 1 : La structure de la thèse .....	6
Figure 2 : Mouvements de la terre autour du soleil. Source : (Kanmogne, et al., 2012) .....	9
Figure 3 : Plans de coupe montrant les angles de déclinaison, à l'équinoxe (en haut) et au solstice (en bas) (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur) .....	10
Figure 4 : Variation annuelle de la déclinaison (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur) .....	10
Figure 5 : La latitude d'un point (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur) .....	11
Figure 6: La position des cinq tropiques .....	12
Figure 7 : Les angles de position solaire (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur) .....	12
Figure 8 : Trajectoire apparente du soleil pour l'hémisphère Nord (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur) .....	14
Figure 9 : Types de diagramme horizontal (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur) .....	16
Figure 10 : Projection cylindrique. Source : (Jan, 1983) (reproduit par l'auteur) .....	16
Figure 11 : Projection de Waldram à gauche, diagramme de Waldram à droite (Teller, 2004) ...	17
Figure 12 : Projection cylindrique améliorée des altitudes (Oh, et al., 2000) reproduit par l'auteur .....	17
Figure 13 : Diagramme solaire cylindrique équidistant (PassivAct, 2015) .....	18
Figure 14 : Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire (Bardou & Arzoumanian, 1978) .....	18
Figure 15 : Masse atmosphérique traversée par le rayonnement en fonction de la latitude (Bardou & Arzoumanian, 1978) .....	19
Figure 16 : Masse atmosphérique traversée à midi et au couchant (Bardou & Arzoumanian, 1978) .....	19
Figure 17 : Spectre du rayonnement solaire (Kanmogne, et al., 2012) .....	20
Figure 18: Les composants du rayonnement solaire (Mazria, 1979) (reproduit par l'auteur) .....	21
Figure 19 : direction du rayonnement et puissance disponible (Mazria, 1979) (reproduit par l'auteur) .....	22
Figure 20 : variation des apports énergétiques en fonction de la hauteur et de l'azimut (Bardou & Arzoumanian, 1978) .....	22
Figure 21: l'insolation reçue sur différents plans par rapport à l'insolation horizontale. (Izard, 1979) .....	23

Figure 22 : Propriétés radiatifs des principaux matériaux (Chatelet, et al., 1994).....	24
Figure 23 : Réorganisation héliothermique d'un quartier à Paris. (Rey, et al., 1928).....	25
Figure 24: à gauche : immeuble sis au 26, rue Vavin, Paris, bâti en 1912, à droite : immeuble 13, rue des Amiraux, Paris, bâti entre 1922-1927. Les deux immeubles conçus par l'architecte Henri sauvage. Source (Laget, 2014).....	27
Figure 25 : Les loggias brise-soleil de l'unité d'habitation de Marseille. (Photo : Paul kozlowski 1997, <a href="http://www.fondationlecorbusier.fr/">http://www.fondationlecorbusier.fr/</a> ).....	28
Figure 26 : Schéma pour la détermination de l'ensoleillement (Boesiger, 1994).....	28
Figure 27: Angle d'obstruction présenté dans la méthode LT (Baker, et al., 1995).....	31
Figure 28 : Représentation des masques urbains sur un diagramme solaire (Beckers, 2004).....	32
Figure 29 : L'enveloppe solaire tel que définie par Ralph Knowles. Source : (Knowles, 2003)....	33
Figure 30 : Exemple de bâtiments basés sur le principe de self-shading.....	35
Figure 31 : l'immeuble de bureaux Distrito C, Madrid architecte : Rafael de La-Hoz. ( <a href="https://www.archdaily.com/20158/">https://www.archdaily.com/20158/</a> ).....	36
Figure 32: Auto-protection d'un immeuble de grande hauteur (Ling, 2005).....	37
Figure 33 : Type de protections solaires selon Yüceer. (Yüceer, 2012).....	42
Figure 34 : Les différents types de protection solaire selon Olgyay. (Olgyay, 1963).....	42
Figure 35: Diagramme solaire pour la latitude 30° Nord, à gauche projection sphérique, à droite projection cylindrique (Auteur).....	45
Figure 36 : L'abaque des masques, à gauche projection sphérique, à droite projection cylindrique (Auteur).....	45
Figure 37: Zone de surchauffe représentée sur le digramme solaire sphérique à droite et cylindrique à gauche (Auteur).....	47
Figure 38 : Représentation de l'angle d'occultation vertical et horizontal (Matusiak, 2006).....	48
Figure 39 : Superposition de l'abaque des masques avec le diagramme solaire pour identifier les angles d'occultation.....	48
Figure 40: Les limites verticales d'une protection solaire (Auteur).....	49
Figure 41 : Etablissement des masques urbains (Beckers, 2004).....	50
Figure 42 : Modèle expérimentale utilisé par Cuevas et al. (2010).....	57
Figure 43 : Les deux cellules utilisées dans l'étude expérimentale de Serra, et al. (2010).....	58
Figure 44 : Chambres expérimentales extérieures utilisées par Al Touma et Ouahrani (2017) ...	59
Figure 45 : Types de protection solaire étudiés par Freewan (2014).....	60
Figure 46 : Modèle de simulation.....	67
Figure 47 : Température de l'air de la ville de Ghardaïa (Capderou, 1986).....	67

Figure 48: La période de surchauffe pour la ville de Ghardaïa .....	68
Figure 49: Représentation de la période de surchauffe sur le diagramme solaire pour la latitude 32° correspondant à la ville de Ghardaïa .....	69
Figure 50: L'abaque des masque (à gauche) l'abaque des masques superposé sur le diagramme solaire pour calculer les angles d'occultation (à droite).....	69
Figure 51: Le cas de référence .....	70
Figure 52 : Structure du chapitre Analyse des résultats .....	81
Figure 53 : La température de l'air calculée pour l'orientation Sud en mois de janvier .....	84
Figure 54: Présentation des températures de l'air calculées pour l'orientation Sud en mois de janvier selon l'angle d'inclinaison des lamelles.....	85
Figure 55: La température de l'air calculée pour l'orientation Sud en mois de juillet .....	87
Figure 56 : Consommation énergétique annuelle pour le chauffage, le cas de la disposition verticale.....	89
Figure 57 : Consommation énergétique annuelle pour le chauffage, le cas de la disposition horizontale.....	90
Figure 58 : Consommation énergétique annuelle pour la climatisation, le cas de la disposition verticale.....	91
Figure 59 : Consommation énergétique annuelle pour la climatisation, le cas de la disposition horizontale.....	92
Figure 60: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'espacement entre les lamelles.....	106
Figure 61: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'angle d'inclinaison .....	106
Figure 62 : Consommation énergétique annuelle du chauffage pour l'orientation Est.....	108
Figure 63 : Consommation énergétique annuelle de la climatisation pour l'orientation Est.....	109
Figure 64: La température de l'air calculée pour l'orientation Ouest pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'espacement entre les lamelles.....	119
Figure 65: La température de l'air calculée pour l'orientation Ouest pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'angle d'inclinaison .....	119
Figure 66 : Consommation énergétique annuelle du chauffage pour l'orientation Ouest.....	121
Figure 67 : Consommation énergétique annuelle de la climatisation pour l'orientation Ouest.	122
Figure 68: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'espacement entre les lamelles.....	132

Figure 69: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'angle d'inclinaison .....	133
Figure 70 : Consommation énergétique annuelle du chauffage pour l'orientation Nord.....	134
Figure 71 : Consommation énergétique annuelle de la climatisation pour l'orientation Nord..	135
Figure 72 : Le rayonnement solaire direct pour les cas ; à gauche sans protection, à droite avec protection.....	144
Figure 73 : La quantité du rayonnement solaire direct calculée pour le 21 décembre .....	145
Figure 74 : Le coefficient de protection solaire .....	146
Figure 75 : Le coefficient de protection calculé pour le 21 décembre.....	147
Figure 76 : Schéma montrant le rayonnement réfléchi par les lamelles .....	147
Figure 77 : Le rayonnement réfléchi par les lamelles calculé pour l'orientation Sud, à gauche : le 21 décembre, à droite : le 21septembre. Les configurations non présentées dans le graphe ont un RRL de 0%.....	148
Figure 78 : Le rayonnement réfléchi par les lamelles calculé pour l'orientation Nord en période d'été (le 21juin).....	148
Figure 79 : Schéma montrant le rayonnement réfléchi par le sol .....	149
Figure 80 : Le rayonnement réfléchi par le sol calculé pour l'orientation Sud. A gauche : le 21 septembre, à droite : le 21 décembre .....	149
Figure 81 : Représentation graphique de la pénétration du rayonnement solaire.....	150
Figure 82 : La pénétration du rayonnement solaire calculée le 21 décembre pour l'orientation Sud .....	150
Figure 83 : Représentation graphique de la perméabilité visuelle .....	151
Figure 84 : La perméabilité visuelle calculée pour l'orientation Sud.....	152
Figure 85 : La perméabilité visuelle pour l'orientation Nord .....	153
Figure 86 : Evaluation des configurations par rapport aux différents critères, le cas de l'orientation Sud.....	156
Figure 87 : Les notes attribuées à chaque configuration .....	156
Figure 88 : Evaluation des configurations géométriques, de l'orientation Sud, par rapport aux trois critères.....	158
Figure 89 : Structure de l'analyse multicritère (Recchia, et al., 2011) reproduit par l'auteur .....	167
Figure 90 : Illustration des différentes problématiques de l'analyse multicritère (Ginting, 2000) .....	170
Figure 91 : Problématique d'aide à la décision (Doumpos & Zopounidis, 2004).....	170
Figure 92 : Zones de préférence et d'indifférence (Caillet, 2003).....	176

Figure 93 : Vue du logiciel SOLIMAC (Siret, 1997) .....	182
Figure 94 : Interface du prototype de logiciel Réflexions solaires et visuelles (SVR) (Houpert, 2003) .....	183
Figure 95 : L'interface de l'outil Daylight Design Variation Book .....	184
Figure 96 : Exemple de feuille d'entrée des données LUMcalcul (Demers & Potvin, 2004).....	185
Figure 97 :L'héliodon .....	186
Figure 98 : Extrait du manuel Sun Wind & Light (Brown & DeKay, 2000).....	188
Figure 99 : L'interface du programme SHADESIGN .....	189
Figure 100 : Les différents modules du programme WINSHAD. De gauche à droite : Le module d'analyse climatique, le module de génération et le module de l'optimisation (Kabre, 1999) .....	190
Figure 101 : Visualisation des résultats sur AutoCAD (Kabre, 1999) .....	190
Figure 102: schématisation du diagramme de séquences de Pro-Sol.....	195
Figure 103 : Diagramme de séquences du le prototype Pro-Sol établi avec Astah_UML.....	196
Figure 104 : Fiches techniques contenant la situation géographique, les coordonnées (latitude et longitude), les températures de l'air, le diagramme solaire et les angles d'occultation optimaux .....	200
Figure 111 : Maquette informatique IHM du logiciel Pro-Sol.....	202
Figure 112: Ecran d'accueil du logiciel Pro-Sol .....	203
Figure 113 : L'onglet " Ville" de l'interface du logiciel Pro-Sol .....	204
Figure 114 : Interface du logiciel Pro-Sol, l'onglet "données" .....	205
Figure 115 : Interface du logiciel Pro-Sol, l'onglet "Analyse multicritère" .....	206
Figure 116 : Ecran des résultats .....	206
Figure 117 : l'interface de Simulation Studio.....	232
Figure 118 : l'interface de TRNBuild.....	233
Figure 119 : Modélisation du modèle 3D dans le plugin Trnsys3d pour Google SketchUp .....	233
Figure 120 : Visualisation des résultats sur le traceur en ligne (online plotter) type 65 c.....	234
Figure 105 : Le cas de l'angle d'inclinaison $\beta = 90^\circ$ .....	253
Figure 106 : Le cas de l'angle d'inclinaison $\beta < 90^\circ$ .....	254
Figure 107 : Le cas de l'angle d'inclinaison $\beta > 90^\circ$ .....	255
Figure 108 : Le cas d'une façade inclinée .....	256
Figure 109 : La prise en compte des masques urbains, le cas de $\alpha \geq \gamma$ .....	257
Figure 110: La prise en compte des masques urbains, le cas de $\alpha \leq \gamma$ .....	257

## *Index des tableaux*

Tableau 1: Puissances de rayonnement solaire (W/m <sup>2</sup> ).....	20
Tableau 2 : Angles d'occultation pour la ville de Ghardaïa .....	70
Tableau 3: Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Sud.....	71
Tableau 4: Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Est .....	72
Tableau 5: Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Ouest.....	73
Tableau 6 : Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Nord.....	74
Tableau 7: Paramètres de simulation pour le modèle utilisé dans TRNSYS 17 .....	75
Tableau 8. Paramètres de simulation utilisés pour RADIANCE 2.0 et DAYSIM 3.....	76
Tableau 9: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Décembre pour l'orientation Sud.....	95
Tableau 10: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Juin pour l'orientation Sud.....	97
Tableau 11: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel DA <sub>500</sub> et l'autonomie spatiale sDA <sub>500lx50%</sub> pour l'orientation Sud.....	100
Tableau 12: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Sud. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour FLJ>2 et plus de 0.40 pour l'UFLJ).....	102
Tableau 13: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Décembre pour l'orientation Est ...	110
Tableau 14: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Juin pour l'orientation Est .....	112
Tableau 15: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel DA <sub>500</sub> et l'autonomie spatiale sDA <sub>500lx50%</sub> pour l'orientation Est .....	114
Tableau 16: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Est. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour FLJ>2 et plus de 0.40 pour l'UFLJ).....	115
Tableau 17: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Décembre pour l'orientation Ouest .....	124
Tableau 18: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Juin pour l'orientation Ouest .....	125
Tableau 19: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel DA <sub>500</sub> et l'autonomie spatiale sDA <sub>500lx50%</sub> pour l'orientation Ouest .....	127
Tableau 20: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Ouest. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour FLJ>2 et plus de 0.40 pour l'UFLJ).....	129

Tableau 21: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Décembre pour l'orientation Nord	136
Tableau 22: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Juin pour l'orientation Nord .....	138
Tableau 23: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel $DA_{500}$ et l'autonomie spatiale $sDA_{500 \times 50\%}$ pour l'orientation Nord .....	140
Tableau 24: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Nord. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour $FLJ > 2$ et plus de 0.40 pour l'UFLJ).....	142
Tableau 25 : Structure de la matrice des performances (De Castro, 2005). .....	175

## 1 Partie Introductive

### Introduction générale

**L**a conception de l'enveloppe d'un bâtiment doit accorder plus d'intérêt à l'optimisation des performances thermiques et lumineuses. Parmi les paramètres de conception à étudier, figurent la taille de l'ouverture, son orientation, sa matérialité ainsi que la protection solaire. Cette dernière est une nécessité dans les bâtiments, particulièrement dans les régions à climat chaud et sec. Elle influence directement le confort thermique et visuel ainsi que la consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage. Toutefois, son application pourrait entraîner certains conflits comme celui de la contradiction entre les exigences de confort d'hiver et d'été ou encore celles du confort thermique et lumineux (Magri Elouadjeri, et al., 2015).

L'utilisation de la lumière naturelle peut réduire la consommation de l'électricité utilisée dans l'éclairage et améliorer les conditions d'utilisation de l'espace. D'autre part, l'admission des gains solaires excessifs peut à son tour augmenter la demande énergétique pour la climatisation. C'est pourquoi le choix du dispositif de protection solaire est une question importante dans la conception des bâtiments, notamment dans un climat chaud et sec. Une protection solaire optimale doit assurer une protection maximale pendant la période de surchauffe, tout en permettant la pénétration du rayonnement solaire pendant l'hiver (Dubois.M-C, 1997).

De nombreux chercheurs ont étudié l'effet des protections solaires sur le confort thermique, notamment en climat froid, (Tzempelikos, et al., 2010; Datta, 2001; Bessoudo, et al., 2010; Tzempelikos, et al., 2007). Cependant, peu d'études ont été réalisées dans les régions à climat chaud (Freewan, 2014; Ossen, et al., 2005; Al Touma & Ouahrani, 2017)

Certaines recherches se sont concentrées sur l'effet des protections solaires sur l'éclairage naturel (Dubois, 2003; Wong & Djoko, 2004; Freewan, et al., 2009; Kim & Kim, 2009; Wong & Djoko, 2004), le confort thermique (Datta, 2001; Bessoudo, et al., 2010) ainsi que la consommation énergétique (Al Touma & Ouahrani, 2017; Ouahrani & Al touma,

2018; Alzoubi & Al-Zoubi, 2010; Kim, et al., 2012; Nielsen, et al., 2011; Ossen, et al., 2005; Palmero-Marrero & Oliveira, 2014; Hammad & Abu-Hijleh, 2010). D'autres recherches ont exploré à la fois l'effet lumineux et thermique des protections solaires (Tzempelikos & Roy, 2004; David, et al., 2011; Magri Elouadjeri, et al., 2015; Freewan, 2014; Bader, 2011; Bader, 2011; Tzempelikos, et al., 2007).

Il est à noter que l'étude des protections solaires en vue d'en optimiser leurs performances à la fois thermiques et lumineuses est parmi les sujets les moins abordés.

Ce travail de recherche propose donc d'étudier l'effet thermique et lumineux des dispositifs de contrôle solaire par rapport aux conditions des climats chauds et secs afin d'en optimiser les performances. Cette thèse contribue à la recherche dans ce domaine à travers des investigations sur l'impact des paramètres de conception des protections solaires extérieures fixes sur la consommation énergétique, sur les températures et sur les niveaux d'éclairage à l'intérieur des bâtiments.

La partie expérimentale de cette recherche porte sur l'étude de cette catégorie de dispositifs de contrôle solaire. Une étude paramétrique des performances thermiques et lumineuses de ce dispositif sera effectuée à travers la simulation numérique moyennant des modèles appropriés. Trois logiciels ont été utilisés ; TRNSYS 17, RADIANCE 1.2 et DAYSIM 3.1.

Dans ce travail, nous proposons également un outil d'aide à la conception des protections solaires pouvant être utilisée dès les premières phases du processus de conception architecturale. Il est à noter que l'utilisation des outils d'analyse quantitative et qualitative du projet est rare pendant les premières étapes de conception architecturale. Pourtant, les décisions prises lors de ces phases de la conception ont un impact significatif sur le comportement des bâtiments en termes de confort et de consommation énergétique. D'où l'importance de disposer d'un outil accessible et facile à manipuler pouvant assister le concepteur, dès les premières phases de conception, dans ses choix afin d'optimiser les performances du bâtiment.

Le développement de cet outil est basé sur l'analyse multicritère permettant de classer les différentes configurations géométriques simulées par rapport aux critères considérés, à savoir la température de l'air (en hiver et en été), l'éclairage naturel (l'illuminance, sDA, FLJ, UFLJ) ainsi que la consommation énergétique (pour le chauffage et la climatisation).

## 1.1 Problématique

Le secteur du bâtiment représente environ 36% de la consommation énergétique mondiale (IEA, 2019), ce taux dépasse même les 40% en Europe (Bellia, et al., 2013). D'autre part, ce même secteur est responsable d'environ 50 % des émissions de dioxyde de carbone (NEF, 2016). Ces chiffres sont alarmants par rapport à la crise énergétique et le changement climatique que nous connaissons actuellement. L'efficacité énergétique des bâtiments est désormais une priorité de la politique énergétique aux niveaux régional et international (Pérez-Lombard, et al., 2008). Pour faire face à cette situation, les concepteurs adoptent des stratégies passives, notamment au niveau de l'enveloppe architecturale. Cette dernière affecte directement la consommation énergétique puisqu'elle est responsable de plus de 40 % des pertes de chaleur en hiver et de surchauffe en été (Barozzi, 2016) générant des charges thermiques supplémentaires très importantes. Ces charges augmentent significativement avec l'augmentation des surfaces vitrées qui laissent traverser le rayonnement solaire directe à l'intérieur du bâtiment. Le contrôle du rayonnement solaire est l'une des stratégies passives qui permet d'optimiser le confort et la performance énergétique des bâtiments. La protection solaire influence directement le confort thermique et visuel ainsi que la consommation énergétique pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage (Magri Elouadjeri, et al., 2021). Son utilisation peut produire des conflits tels que la contradiction entre les exigences d'été et d'hiver, et entre le confort thermique et le confort lumineux (Magri Elouadjeri, et al., 2015). C'est pourquoi le choix de ces dispositifs est une question importante dans la conception des bâtiments, en particulier en climat chaud et sec. Une protection solaire optimale doit assurer une protection maximale pendant la période de surchauffe, tout en permettant la pénétration du rayonnement solaire pendant l'hiver (Dubois.M-C, 1997).

Relativement au contexte des régions chaudes et sèches, la plupart des travaux sur le sujet se penchent plutôt sur l'effet thermique des dispositifs de protection solaire. Il s'agit dans la plupart des cas de répondre au souci du confort d'été par rapport aux paramètres climatiques les plus contraignants (rayonnement solaire). Rares sont les recherches qui étudient la conception des protections solaires par rapport à la double question du confort thermique et lumineux sous ces latitudes.

D'une part, la présente recherche propose d'étudier les paramètres de conception des dispositifs de protection solaire, afin d'optimiser leur double performance thermique et lumineuse, dans le cas d'une région à climat chaud et sec. Les questions posées à cet effet concernent les points suivants :

- L'utilisation des dispositifs de contrôle solaire peut-elle résoudre les problèmes de confort thermique et visuel à l'intérieur des bâtiments notamment dans les régions à climat chaud et sec ? Si oui, comment ? et quels sont les paramètres à prendre en considération dans leur conception ?
- Comment optimiser les performances à la fois thermiques et lumineuses de ces dispositifs ?

D'autre part, nous proposons un outil d'aide à la conception des protections solaires pour assister les architectes, notamment ceux qui ne sont pas conscient du problème de contrôle solaire ou utilisent des formes au hasard pour régler ce type de problème. Donc :

- Est-il possible de générer de la connaissance pour la conception des dispositifs de contrôle solaire de manière à être directement utilisable dans la phase d'esquisse ? Comment ?
- Quel outil d'aide doit-on développer afin qu'il soit utilisable par les architectes dès les premières phases du processus de conception ?

## 1.2 Hypothèses

La présente recherche s'appuie sur l'hypothèse d'une possible optimisation des performances thermiques et lumineuses des dispositifs de contrôle solaire par le biais d'un bon choix de paramètres de conception (forme, dimension, orientation, position, matérialité) permettant de les utiliser dans des conditions d'extrême chaleur et de ciel à forte luminosité. Nous supposons également que l'utilisation des dispositifs de contrôle solaire permettrait :

- L'augmentation de la quantité de la lumière pénétrant dans les espaces.
- La répartition uniforme de la lumière.
- La diminution des apports solaires, source d'inconfort pendant l'été.
- La réduction de l'indice d'éblouissement.
- Et la réduction de la consommation énergétique pour l'éclairage et le refroidissement.

Nous pensons également qu'il est possible d'élaborer, à partir des résultats obtenus par l'étude paramétrique, un outil d'aide à la conception et au choix des protections solaires utilisable dès les premières phases du processus de conception.

### 1.3 Objectifs

L'objectif de cette recherche est d'abord d'énoncer et de déterminer les paramètres de conception, relatifs aux dispositifs de protection solaire, permettant l'optimisation de leurs performances énergétiques, thermiques et lumineuses dans le cas d'un climat chaud et sec.

Notre objectif serait à même d'esquisser un outil d'aide à la conception des protections solaires pouvant guider les architectes à effectuer des choix, formels et dimensionnel, adéquats permettant de répondre aux exigences de confort thermique et lumineux.

### 1.4 Méthodologie et organisation du manuscrit

Cette recherche est structurée en trois grandes parties selon notre processus de travail ; EXPLORER, EVALUER et PROPOSER (Figure 1). Chaque partie est composée de deux chapitres :

- Dans la première, nous avons exploré, à travers un état de l'art, la question du contrôle solaire en architecture particulièrement dans les régions à climat chaud et sec. Notre objectif est de comprendre le phénomène, identifier les différents systèmes de contrôle solaire, leurs comportements, les outils permettant leur évaluation ainsi que la proposition d'une typologie des dispositifs de contrôle solaire. Nous pouvons dire, d'ores et déjà, que la littérature sur cette question n'en est qu'à ses débuts.
- Nous consacrons la deuxième partie à l'évaluation de l'effet thermique et lumineux des dispositifs de contrôle solaire et l'impact de certains paramètres de conception sur ces deux ambiances. Des géométries représentatives ont servi de support pour l'étude paramétrique moyennant la simulation numérique. Ce travail de simulation a nécessité le couplage de trois outils ; TRNSYS17 pour la simulation thermique et RADIANCE 2.1 et DAYSIM 3.1 pour l'éclairage naturel.
- La troisième partie quant à elle est consacrée à l'élaboration d'un outil d'aide à la conception des protections solaires, en se basant sur les résultats de simulation obtenus dans la deuxième partie. Ces résultats ont été analysés avec la méthode de l'analyse multicritère permettant de classer les géométries étudiées par rapport aux différents critères.

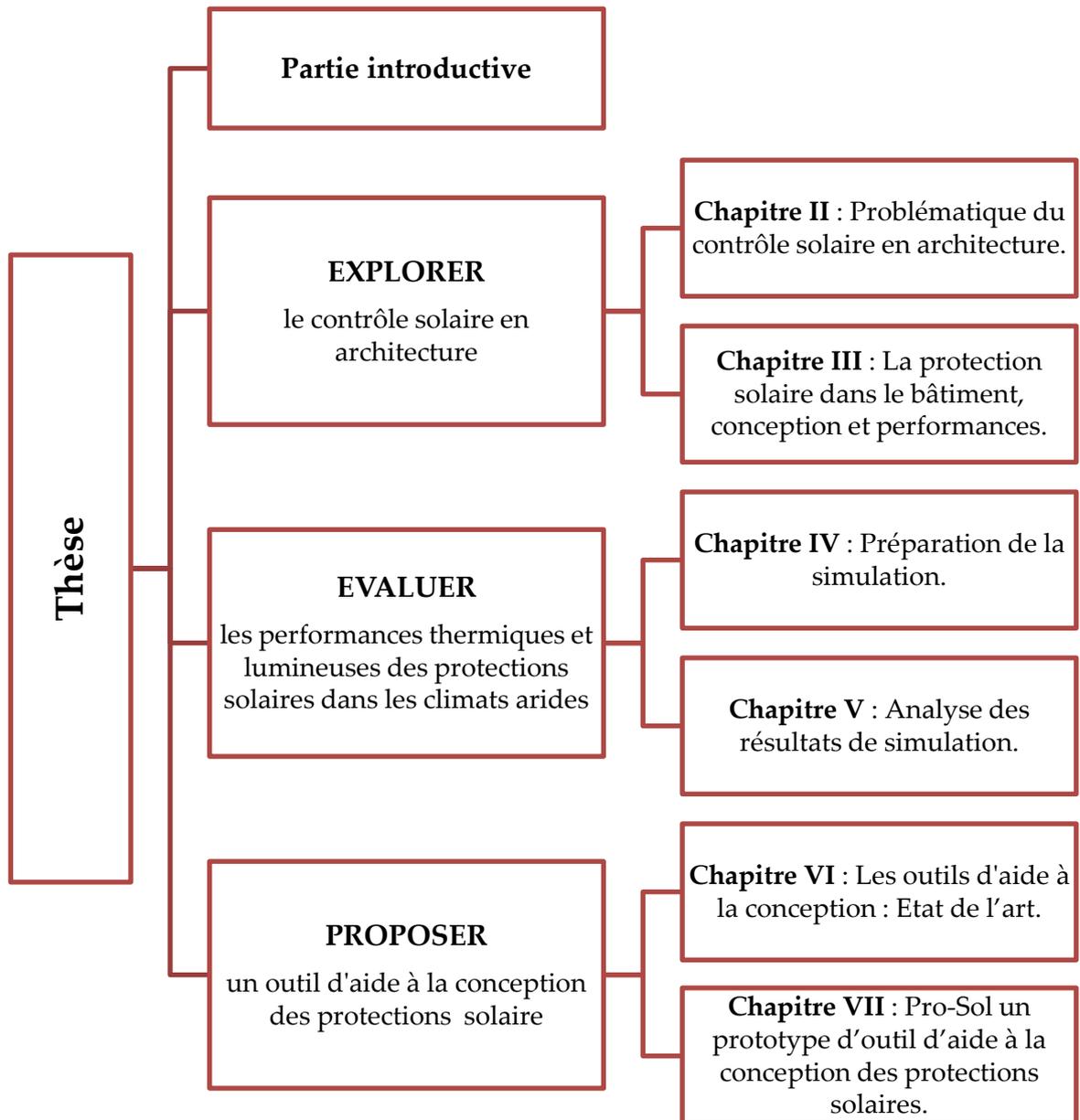


Figure 1 : La structure de la thèse

*Première partie : "EXPLORER" le  
contrôle solaire en architecture*

## 2 Chapitre II : Problématique du contrôle solaire en architecture

### Introduction

L'enseillement est un facteur climatique très important dans la conception architecturale. Si le captage solaire permet d'économiser l'énergie pour le chauffage durant les périodes froides de l'année, il n'est pas apprécié dans les périodes chaudes, notamment dans les régions à climat chaud, où il engendre plutôt une augmentation de la quantité d'énergie utilisée pour le refroidissement. Plusieurs études ont montré que la protection solaire réduit substantiellement l'énergie utilisée pour le refroidissement et l'éclairage en réduisant la température de l'air et en diminuant le risque d'éblouissement. Cependant, ils ont un impact négatif sur les charges de chauffage car ils réduisent les apports solaires utiles pendant l'hiver (Szokolay, 1996; Bader, 2011). Les solutions à apporter au contrôle solaire diffèrent selon les zones géographiques et climatiques considérées (Datta, 2001).

Ce chapitre, sera consacré aux les différents aspects relatifs au contrôle solaire, en présentant, tout d'abord, des connaissances sur la géométrie solaire qui sont, sans aucun doute, à la base du dimensionnement des dispositifs solaires. Nous abordons également la dimension historique du contrôle solaire en essayant de montrer l'évolution de la question de l'enseillement en architecture et des dispositifs de contrôle solaire. La dernière partie de ce chapitre, traite les différentes échelles du contrôle solaire, à savoir le tissu urbain, le bâtiment et la fenestration, en présentant, au niveau de chaque échelle, les solutions à apporter par rapport à la problématique du contrôle solaire.

### 2.1 Le rayonnement solaire : aspects géométriques

L'évaluation de la disponibilité du rayonnement solaire et de son contrôle sont des éléments très importants dans la conception architecturale. La connaissance des aspects géométriques du rayonnement solaire est à la base du dimensionnement de tout dispositif solaire. Il s'agit de comprendre le mouvement apparent du soleil, donc sa position qui est définie par les angles de hauteur et d'azimut en utilisant le temps solaire.

Nous présentons donc dans cette partie les différentes notions relatives à la géométrie solaire, notamment la relation terre-soleil et les différentes représentations graphiques de la course solaire.

## 2.1.1 La relation Terre-Soleil

### 2.1.1.1 Vue Héliocentrique

La terre tourne autour du soleil sur une orbite légèrement elliptique (Wald, 2020). La distance terre-soleil est d'environ 150 millions de km, variant entre 152 millions de km (à l'aphélie, le 1er juillet) et 147 millions de km (au périhélie, le 1er janvier) (Szokolay, 1996). Le tour complet prend 365,24 jours (365 jours 5 h 48 '46" plus précisément) et comme l'année civile est de 365 jours, un ajustement est nécessaire : un jour supplémentaire tous les quatre ans (l'année bissextile). Ce mouvement est schématisé sur la Figure 2.

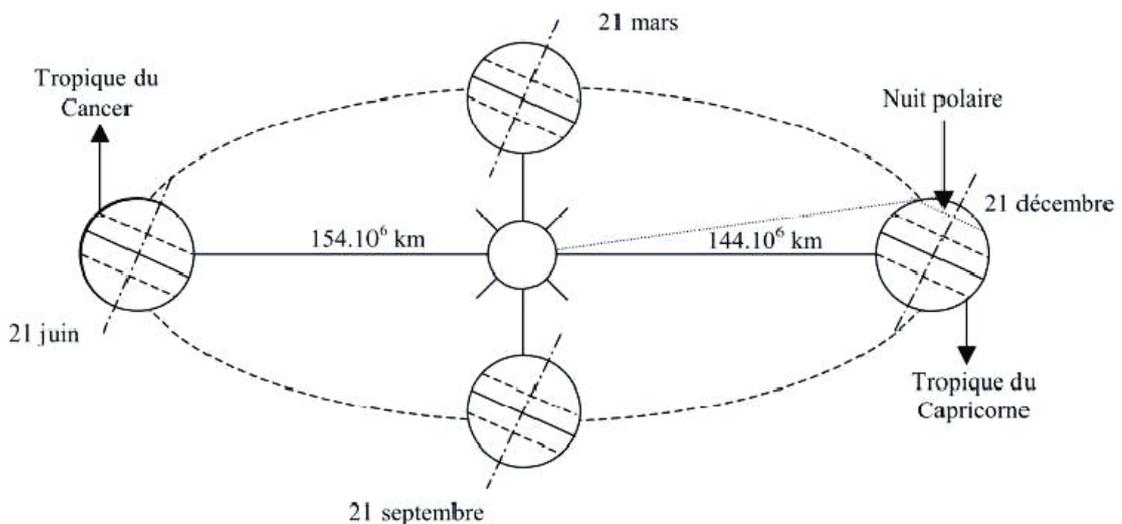


Figure 2 : Mouvements de la terre autour du soleil. Source : (Kanmogne, et al., 2012)

La Terre tourne sur elle-même autour de l'axe des pôles incliné de  $23,45^\circ$  par rapport à la normal au plan de l'écliptique créé par le mouvement de révolution (Figure 3) gardant l'orientation "Nord-Sud". La déclinaison solaire  $\delta$  est l'angle formé entre le plan de l'équateur et la ligne terre-soleil, elle varie entre de  $+23,45^\circ$  au solstice d'été à  $-23,45^\circ$  au solstice d'hiver (Wald, 2020; Szokolay, 1996) (Figure 3).

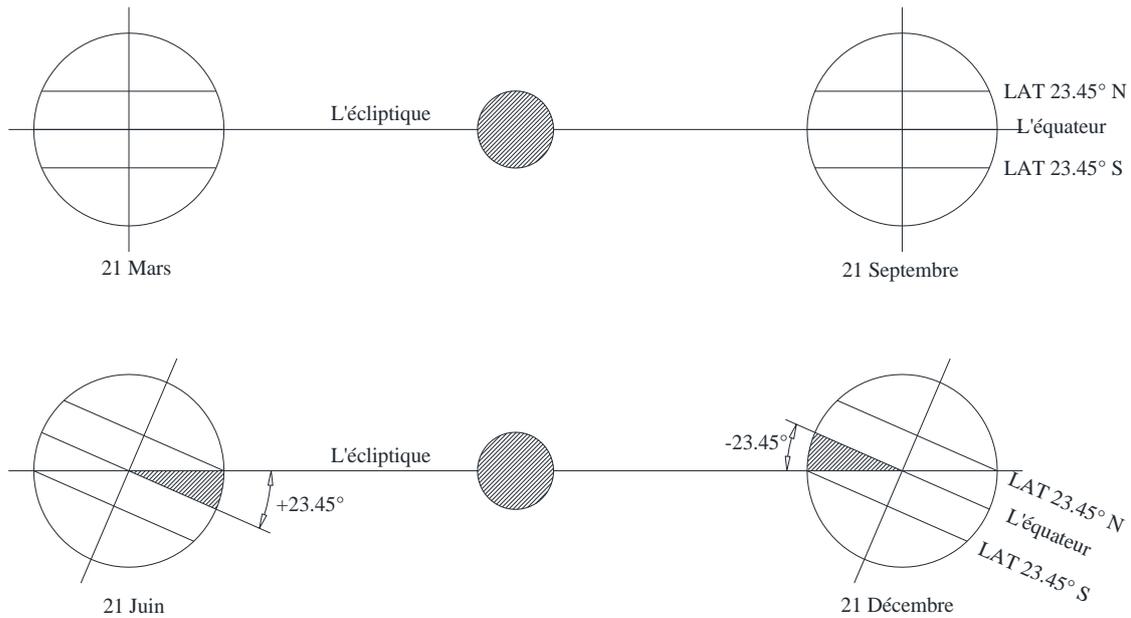


Figure 3 : Plans de coupe montrant les angles de déclinaison, à l'équinoxe (en haut) et au solstice (en bas) (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur)

Le jour de l'équinoxe (environ 22 mars et 21 septembre), l'axe Terre-Soleil se situe dans le plan de l'équateur, donc la déclinaison est de 0°. La variation de la déclinaison solaire  $\delta$  montre une courbe sinusoïdale tel que présenté dans la Figure 4.

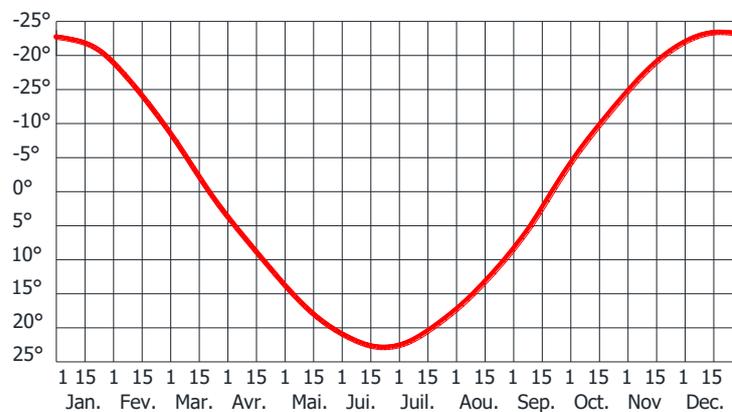


Figure 4 : Variation annuelle de la déclinaison (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur)

Plusieurs méthodes permettent de calculer la déclinaison soleilaire " $\delta$ ", citons à titre d'exemple :

- L'équation de Campbell & Norman (Campbell & Norman, 1998) :

$$\sin \delta = 0.39785 \sin[278.97 + 0.9856] + 1.9165 \sin(365.6 + 0.9856)]$$

- La méthode de Bechers & al. (Beckers, et al., 2008) :

$$\delta = \frac{180}{\pi} \sin^{-1} \left[ \sin \pi \frac{23.45}{180} \sin \frac{2\pi}{365.25} (J - 81) \right]$$

- et la formule de Desmond Fletcher (Beckers, et al., 2008) :

$$\delta = 23.45^\circ \sin(0,980^\circ (j+284))$$

Où "J" est le numéro du jour de l'année du calendrier.

La latitude (LAT) d'un point est l'angle formé entre le plan de l'équateur et la ligne reliant le centre au point considéré (Szokolay, 1996). Les points ayant la même latitude forment le cercle de latitude (Figure 5).

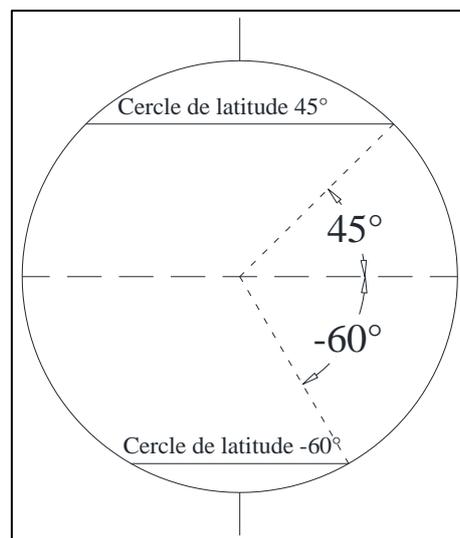


Figure 5 : La latitude d'un point (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur)

La latitude de l'équateur est  $0^\circ$ , celle du pôle nord est  $+90^\circ$  et celle du pôle sud  $-90^\circ$ . Par la convention adoptée, les latitudes sud sont considérées comme négatives. Les latitudes extrêmes où le soleil atteint le zénith au milieu de l'été sont le tropique du Cancer (LAT :  $+23,45^\circ$ ) et le tropique du Capricorne (LAT :  $-23,45^\circ$ ) (Szokolay, 1996).

Le cercle arctique (LAT :  $66,5^\circ$ ) marque la position extrême où le soleil est au-dessus de la ligne de l'horizon durant toute la journée au milieu de l'été (soleil de minuit). Cependant, au milieu de l'hiver, le soleil reste au-dessous de l'horizon. Cette situation s'inverse pour le cercle antarctique (LAT :  $-66,5^\circ$ )

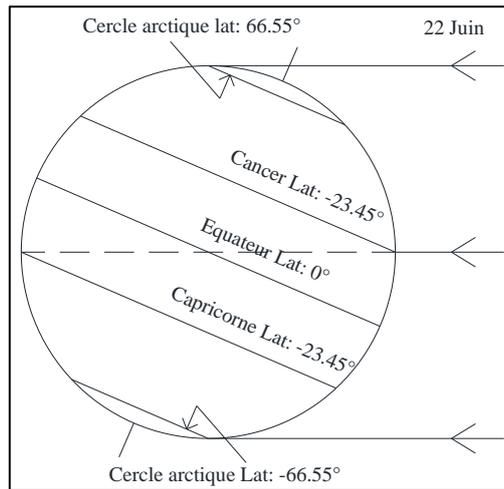


Figure 6: La position des cinq tropiques

### 2.1.1.2 Vue lococentrique

La représentation lococentrique est un modèle simplifié, considérant le point de localisation sur la surface de la terre comme le centre du monde, et le cercle de l'horizon plat en représentant le ciel par une voûte hémisphérique (Figure 7). Dans ce système, la position du soleil est définie par la hauteur " $\beta$ " (altitude) et l'azimut "Az" en utilisant le temps solaire (Lechner, 2008).

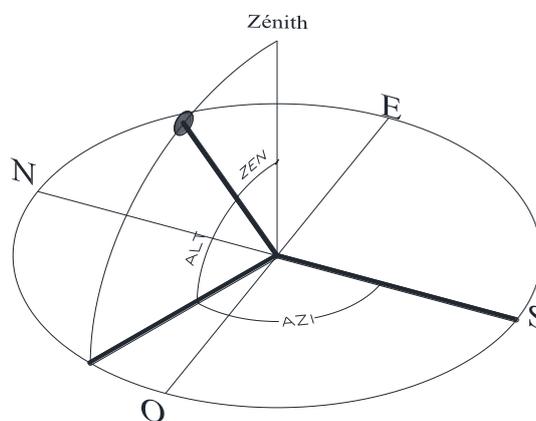


Figure 7 : Les angles de position solaire (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur)

La hauteur est l'angle mesuré dans le plan vertical, entre la direction du soleil et le plan horizontal ( $0^\circ$  pour l'horizon,  $90^\circ$  pour le zénith et  $-90^\circ$  pour le Nadir). Tandis que l'azimut est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la droite reliant la terre au soleil avec la direction du sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud). Cet angle est mesuré dans le sens trigonométrique pour l'hémisphère Sud et dans le sens des aiguilles d'une montre pour l'hémisphère nord (Szokolay, 1996).

D'autres conventions sont adoptées pour les angles d'azimut (Campbell & Norman, 1998):

- Mathématique :  $0^\circ$  pour le sud et les angles augmentent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ ,
- Boussole :  $0^\circ$  pour le nord et les angles augmentent de  $0$  à  $360$  "dans le sens des aiguilles d'une montre, et
- Astronomique :  $0^\circ$  pour le sud, les angles positifs de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  dans le sens des aiguilles d'une montre et les angles négatifs de  $0$  à  $-180^\circ$  dans le sens contraire.

L'altitude et l'azimut dépendent de l'heure du jour, de la latitude du site et de la période de l'année. L'altitude  $\beta$  et le zénith  $\psi$  sont liés par l'équation  $\beta = 90 - \psi$ . Elle est calculée à partir de l'équation établi par Szokolay (1996):

$$\cos \psi = \sin \beta = \sin \varnothing \sin \delta + \cos \varnothing \cos \delta \cos[15(t - t_0)]$$

Szokolay (1996) donne également l'équation permettant de calculer l'angle d'azimut du soleil :

$$\cos Az = \frac{-(\sin \delta - \cos \psi \sin \varnothing)}{\cos \varnothing \sin \psi}$$

Où  $\Phi$  est la latitude,  $\delta$  est la déclinaison solaire,  $t$  est le temps, et  $t_0$  est l'heure du midi solaire. La terre tourne à une vitesse de  $360^\circ$  par 24 heures, donc le facteur "15" convertit les heures en degrés. Temps,  $t$  est en heures (heure locale standard), allant de 0 à 24.

### 2.1.1.3 Le temps solaire

La circonférence de la terre de  $360^\circ$  représente 24h en termes de temps. De ce fait, une heure représente  $15^\circ$  de longitude et 4 minutes représentent  $1^\circ$  de longitude. Ainsi, le temps solaire n'est pas le même que le temps légal en un même lieu. Ils ne coïncident qu'au point de référence de chaque fuseau. Le temps solaire "Ts" est calculé par l'équation suivante (Alhalel & Seigne, 2001):

$$T_s = T_L + 4 (L_R - L)$$

Où :

- $T_L$  est le temps légal
- $L_R$  est la longitude de référence correspondant au temps légal  $T_L$
- Et  $L$  est la longitude du lieu considéré.

## 2.1.2 Représentations graphiques de la course solaire

La représentation en perspective du mouvement apparent du soleil sur la voûte céleste (Figure 8) est claire, mais elle n'est pas pratique. Seule une représentation sur un diagramme bidimensionnel des mouvements solaires pourra être un outil facile et pratique permettant de définir la position du soleil (hauteur et azimut) à n'importe quel moment de l'année. Plusieurs représentations graphiques ont été développées. Elles sont classées, d'une manière générale, en deux grands groupes, selon la projection de l'hémisphère, sur une surface verticale cylindrique ou sur un plan horizontal.

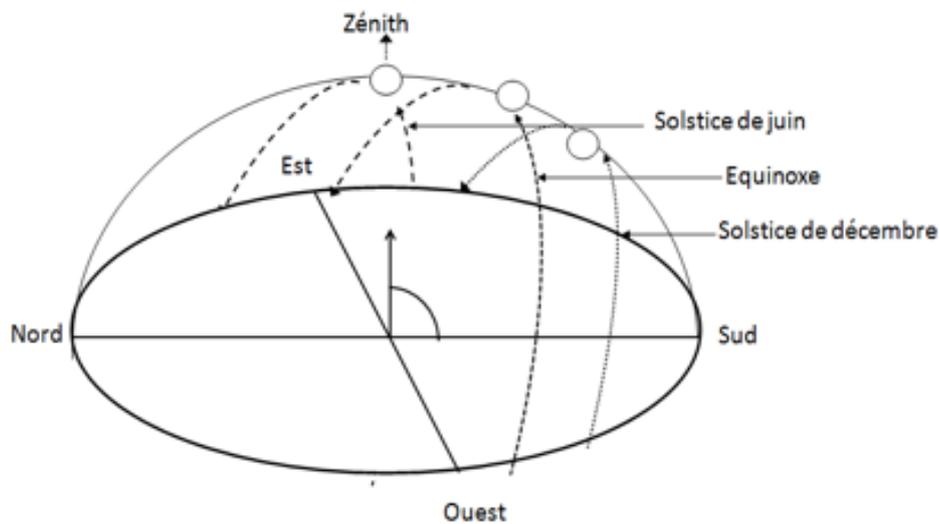


Figure 8 : Trajectoire apparente du soleil pour l'hémisphère Nord (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur)

Toutes ces représentations sont basées sur des modèles mathématiques permettant de représenter la course solaire en deux dimensions.

### 2.1.2.1 La projection horizontale ou sphériques

Les projections horizontales ou dites sphériques utilisent un plan parallèle au cercle d'horizon pour projeter l'hémisphère. Les projections les plus utilisées sont la projection équidistante, orthographique, stéréographique, gnomonique. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients par rapport aux autres (Oh, et al., 2000; Olgyay & Olgyay, 1957). (Figure 9).

- **La projection équidistante** présentée dans la Figure 9-a a été développée par Irving F. Hand en 1948 (Olgyay & Olgyay, 1957), c'est la méthode la plus utilisée

pour construire un diagramme de trajet solaire et un rapporteur de masque d'ombrage. Dans cette méthode, les lignes d'altitude solaire ne sont pas géométriquement projetées mais sont équidistantes, contrairement aux autres méthodes de projection. Cette méthode permet aux utilisateurs de tracer à la fois les angles d'altitude solaire faible et élevé avec la même précision visuelle.

- **La projection orthogonale** (ou parallèle) (Figure 9-b) a été développée pour la première fois par Molesworth en 1902 et modifiée par Waldram en 1933 (Olgyay & Olgyay, 1957), c'est une projection exacte de l'hémisphère sur un tracé circulaire en 2D. Même si cette méthode est géométriquement correcte, elle donne une mauvaise résolution pour les faibles altitudes, les cercles d'altitude sont très rapprochés à l'horizon et largement espacés près du zénith. Cependant, elle présente l'avantage d'être directement comparé à des photos fish-eye (Olgyay & Olgyay, 1957; Oh, et al., 2000) .
- **La projection stéréographique** ou radiale (Figure 9-c), c'est la méthode la plus utilisée. Elle est notamment décrite par (Atkinson, 1912) et présentée par plusieurs auteurs (Phillips, 1948; Petherbridge, 1969; Koenigsberger, et al., 1973; Olgyay & Olgyay, 1957). Cette projection utilise comme centre le point théorique du nadir. Elle est notamment utilisée pour représenter les trajectoires solaires en mettant en valeur l'horizon, ce qui est utile pour représenter des masques urbains. Cependant la lecture des angles d'altitude solaire supérieurs à  $60^\circ$  est difficile puisque les cercles représentant les angles d'altitude solaires se rapprochent vers le zénith.
- **La projection gnomonique** (Figure 9-d), provient des horloges et des cadrans solaires utilisés depuis des milliers d'années. Dans cette projection, la position de l'observateur est au centre de projection. Le plan de projection est parallèle au cercle d'horizon et tangent à la voûte céleste au niveau de l'azimut du lieu. Cette projection est caractérisée par une distorsion de la représentation ; les objets proches de l'horizon sont trop agrandis alors que ceux proches du zénith sont très réduits, ainsi l'horizon s'étend à l'infini et il est impossible d'afficher toutes la voute céleste notamment les hauteurs faibles, correspondant au levé et coucher de soleil. En raison de cette impossibilité d'afficher la totalité de la voûte céleste, cette méthode est rarement utilisée par souci de simplicité et est souvent utilisée pour construire des études d'ombres et pour construire des cadrans solaires.

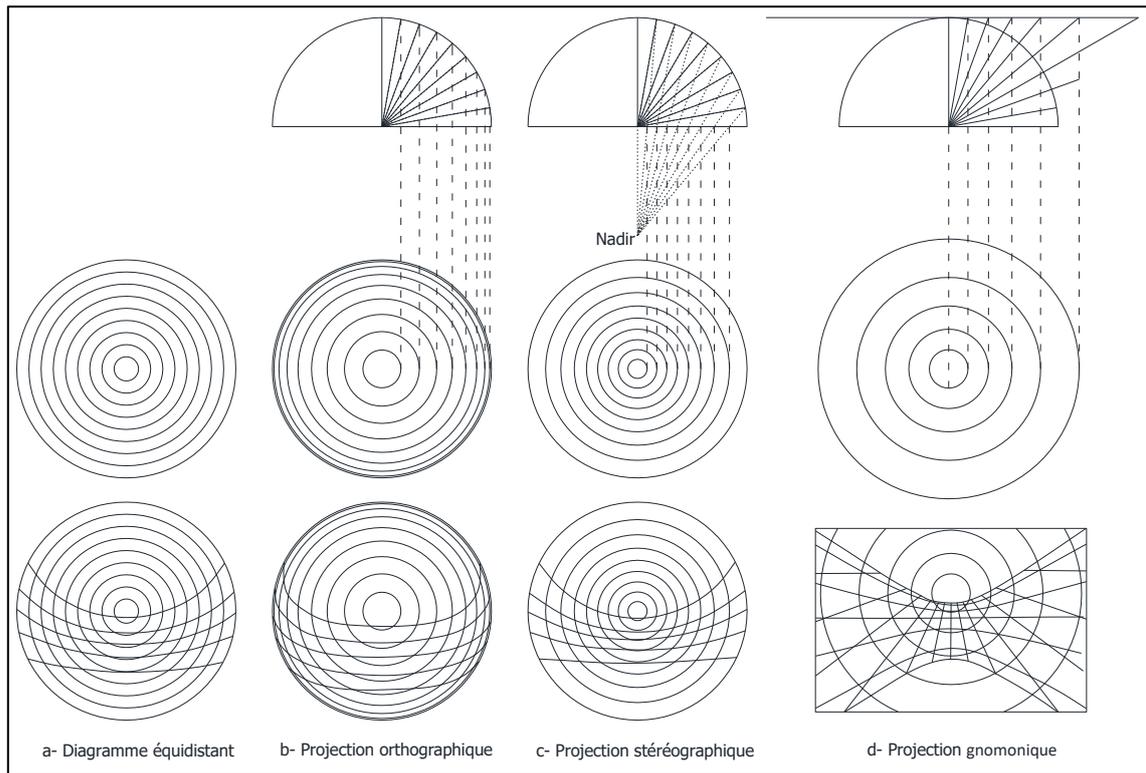


Figure 9 : Types de diagramme horizontal (Szokolay, 1996) (reproduit par l'auteur)

### 2.1.2.2 La projection verticale ou cylindrique

Les trois méthodes présentées ci-dessus, projettent la voûte du ciel sur un plan horizontal, créant un diagramme circulaire. Une autre méthode popularisée par Edward Mazria (Mazria, 1979) consiste à utiliser une projection cylindrique, c'est-à-dire à projeter l'hémisphère sur une surface cylindrique verticale, semblable aux projections Mercator du globe terrestre (Figure 10). Ce cylindre est découpé et déployé pour avoir une représentation rectangulaire, les azimuts sont représentés sur les axes verticaux et les hauteurs sont les azimuts sur les axes horizontaux. Plusieurs auteurs ont utilisé cette projection pour visualiser l'horizon du site avec les masques solaire (Duffie & Beckman, 2013; Bennett, 1978). Cette représentation a l'avantage de présenter les points proches de l'horizon de manière très précise (Szokolay, 1996).

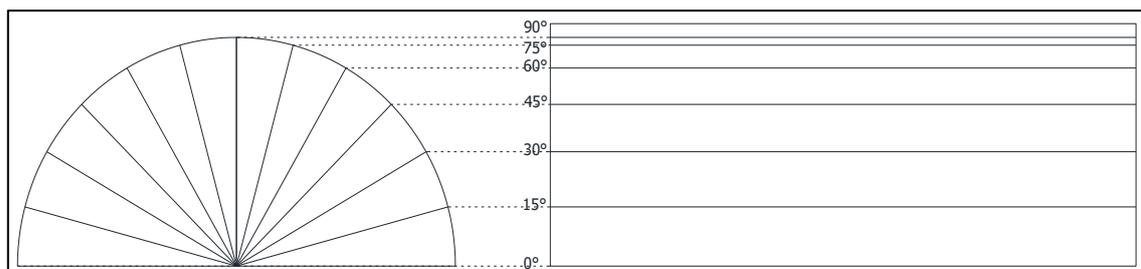


Figure 10 : Projection cylindrique. Source : (Jan, 1983) (reproduit par l'auteur)

Le diagramme de Waldram est une modification de la projection cylindrique (Figure 11), présentant une échelle horizontale proportionnelle à  $1 - \cos(2 \cdot \text{ALT})$ . Cette représentation est très utile pour l'étude de la fenestration, des surfaces verticales, du champ normal (horizontal) de la vision humaine, de la lumière diffuse et de la radiation solaire (Teller, 2004). Elle permet également de présenter les masques et les fenêtres sans déformation.

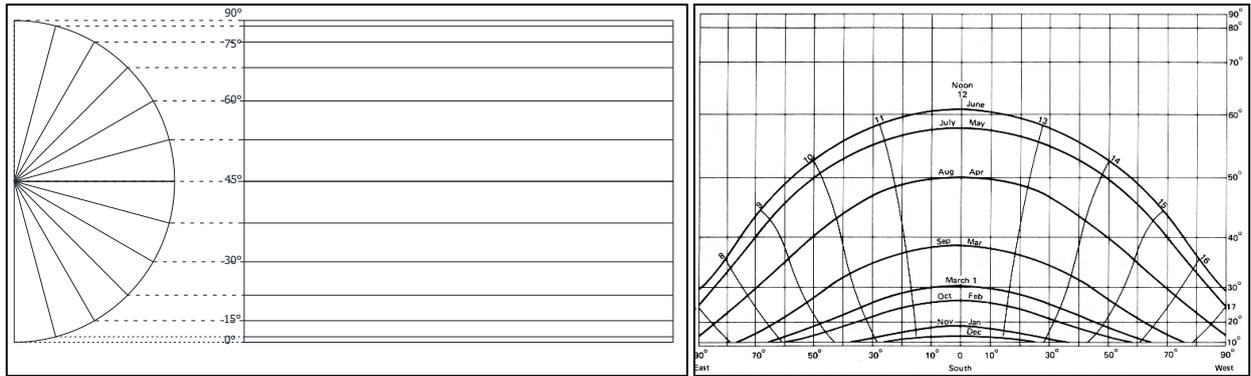


Figure 11 : Projection de Waldram à gauche, diagramme de Waldram à droite (Teller, 2004)

Une amélioration peut être apportée en projetant les altitudes comme indiqué sur la Figure 12. L'espacement des lignes d'altitude diminuerait encore, mais pas aussi radicalement que dans la méthode présentée ci-dessus.

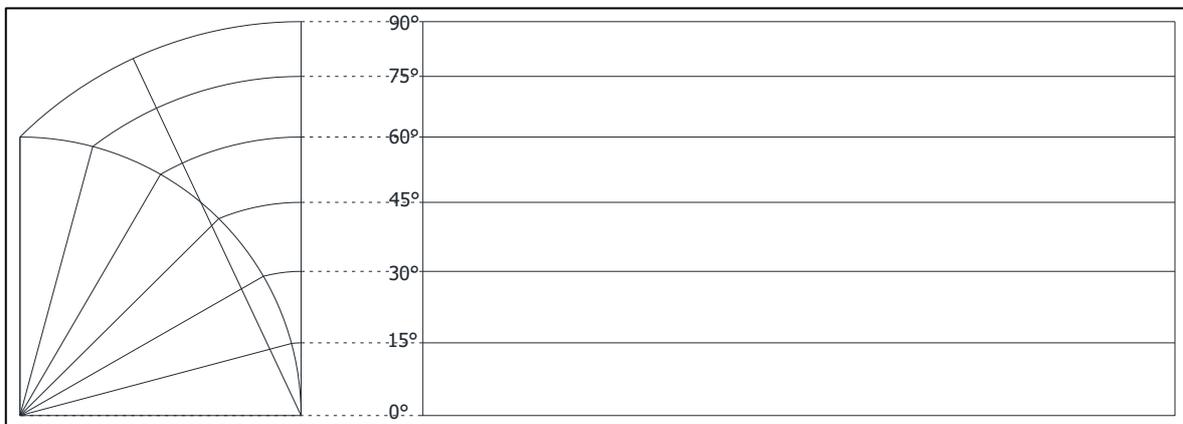


Figure 12 : Projection cylindrique améliorée des altitudes (Oh, et al., 2000) reproduit par l'auteur

Certains auteurs utilisent la version verticale de la représentation équidistante, où les lignes horizontales d'altitude sont équidistantes. La trajectoire du soleil est tracée sur une grille x-y équidistante d'angles solaires où les valeurs de l'axe y représentent les angles d'altitude solaire et les valeurs de l'axe des abscisses représentent l'azimut solaire (Figure 13).

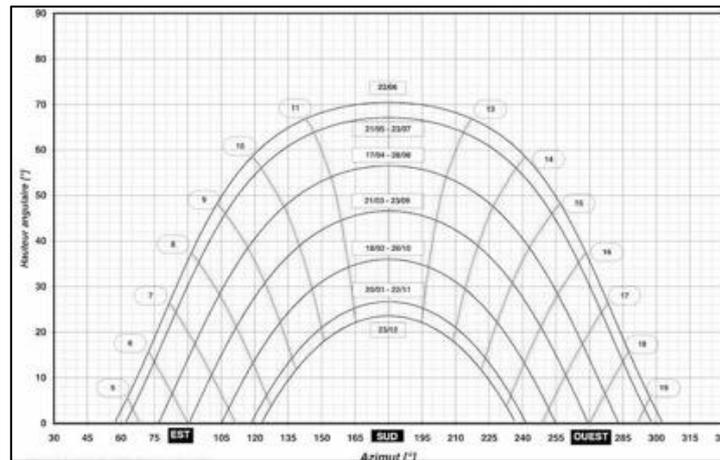


Figure 13 : Diagramme solaire cylindrique équidistant (PassivAct, 2015)

## 2.2 Le rayonnement solaire : aspect énergétique et lumineux

Après avoir présenté les aspects géométriques de rayonnement solaire, il est nécessaire de comprendre ses aspects énergétiques et lumineux qui sont aussi importants pour la conception des systèmes de contrôle solaire.

Le soleil dégage une énergie énorme, d'environ 66 millions de  $W/m^2$ . Seulement une fraction d'une valeur de  $1353 W/m^2$  atteint les limites de notre atmosphère, c'est la constante solaire. Cette valeur diminue significativement en traversant l'atmosphère, environ 6 % de ce rayonnement est réfléchi vers l'espace, et 15% est absorbée par l'atmosphère (Figure 14). Cette diminution augmente avec l'augmentation de la couche d'atmosphère (Bardou & Arzoumanian, 1978).

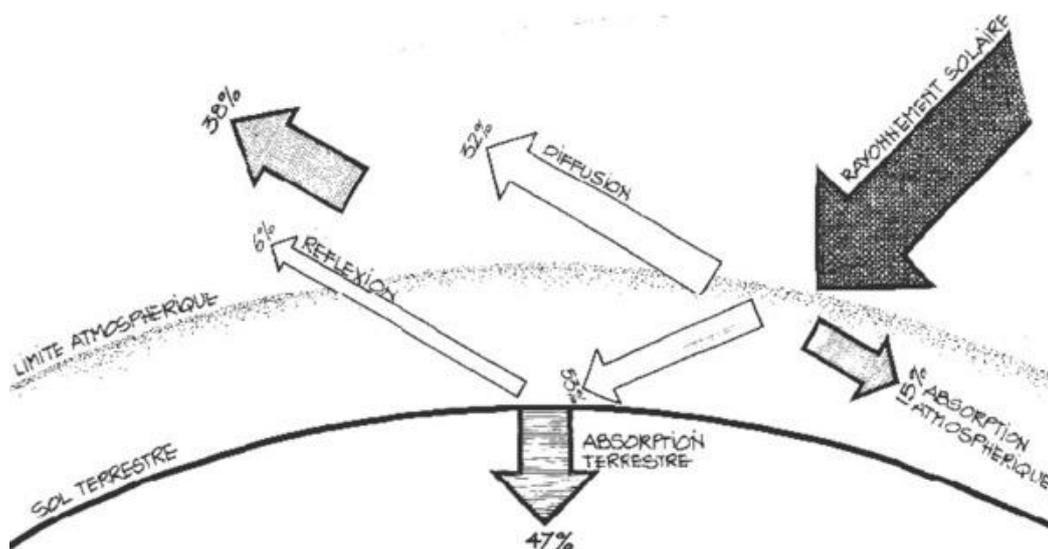


Figure 14 : Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire (Bardou & Arzoumanian, 1978)

### 2.2.1 Puissance du rayonnement solaire : facteurs influents

L'énergie que nous transmet le soleil dépend de l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve, et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 Watts/m<sup>2</sup>. Le parcours du rayonnement dans l'atmosphère varie en fonction du lieu considéré et sa latitude. Plus le lieu est proche des pôles plus la masse atmosphérique traversée est grande, et donc le flux énergétique est moins puissant (Figure 15).

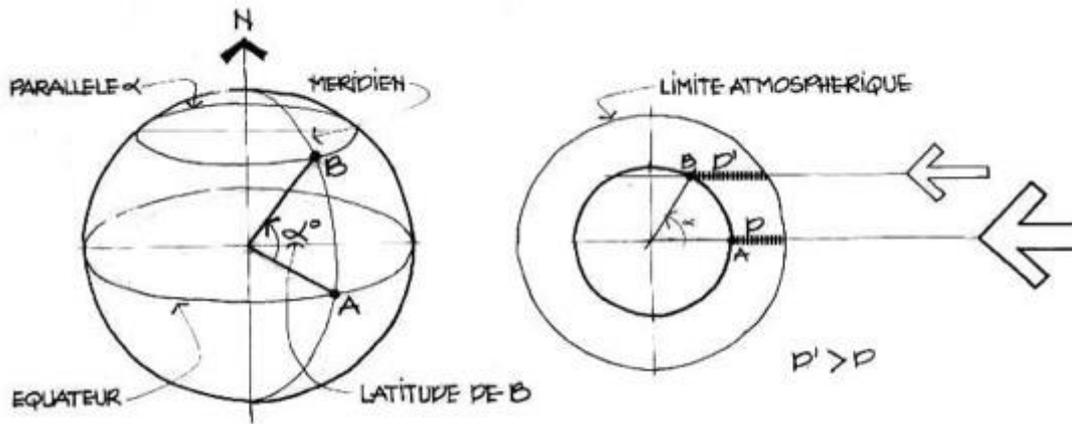


Figure 15 : Masse atmosphérique traversée par le rayonnement en fonction de la latitude (Bardou & Arzoumanian, 1978)

Ce parcours dépend également du moment de la journée et donc de la position du soleil. Au coucher du soleil, l'épaisseur atmosphérique augmente et la puissance du rayonnement tend vers des valeurs proches de zéro. (Figure 16)

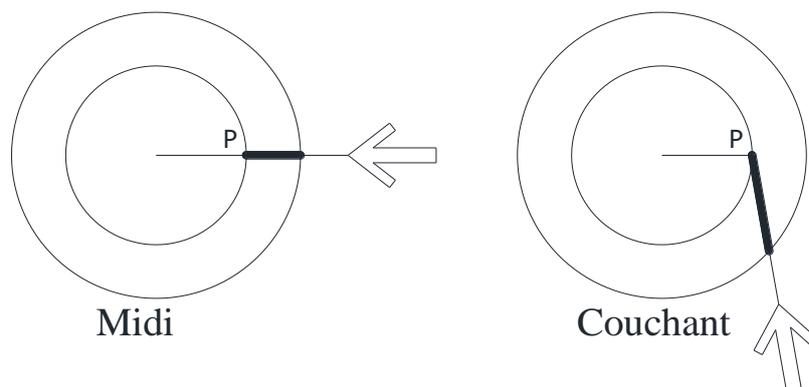


Figure 16 : Masse atmosphérique traversée à midi et au couchant (Bardou & Arzoumanian, 1978)

Le rayonnement solaire est diffusé et atténué en traversant l'atmosphère. Cela dépend principalement du type de ciel, comme le montre le **Tableau 1** :

Tableau 1: Puissances de rayonnement solaire (W/m<sup>2</sup>)

Type de ciel	Clair	Moyen	Couvert
Direct	900	350	0
Diffus	100	150	100
Global	1000	500	100

## 2.2.2 Composition du rayonnement solaire

Selon Bardou et Arzoumanian (1978), le rayonnement solaire est dévisé en deux parties ; partie visible et invisible. La partie visible d'une longueur d'onde moyenne (380 à 780 nm) ; représente 44% de l'énergie (594 W/m<sup>2</sup>). Cependant, la partie invisible constitue 56% de l'énergie, dont 53% (715 W/m<sup>2</sup>) sont des rayons infrarouges de grandes longueurs d'ondes (780 à 2500 nm) porteurs essentiels de l'énergie thermique et 3% (40 W/m<sup>2</sup>) des rayons ultraviolets de courtes longueurs d'ondes (280 à 380 nm) (Figure 17).

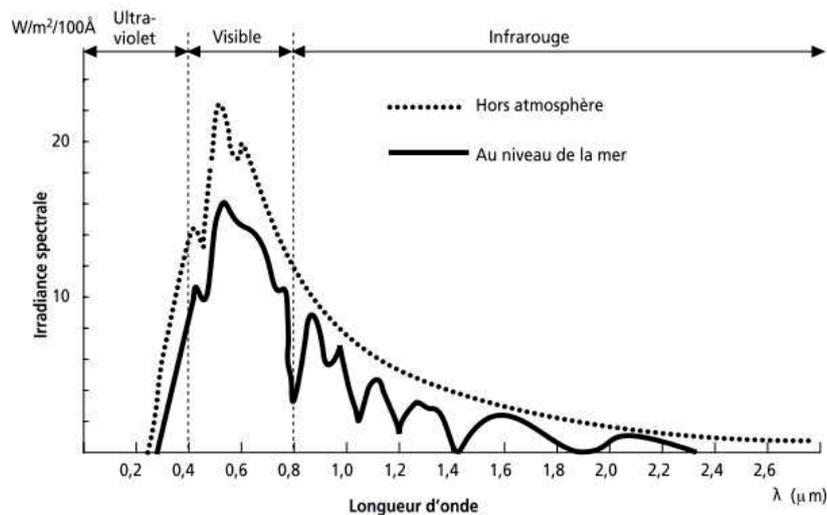


Figure 17 : Spectre du rayonnement solaire (Kanmogne, et al., 2012)

## 2.2.3 Intensité du rayonnement solaire

Le transfert de chaleur par rayonnement se fait sans support matériel. Cependant lorsque le rayonnement solaire atteint les surfaces des objets, il subit certaines transformations en fonction des propriétés de ces surfaces. Selon Mazria (1979), la densité de flux incident (W/m<sup>2</sup>) atteignant une paroi, provient de trois composantes (Figure 18) :

- **La composante directe** est le flux solaire frappant directement la paroi lorsqu'elle est exposée au soleil. Ce flux dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'incidence qui dépend de la direction du rayon solaire et de

l'inclinaison et l'orientation de la paroi. Le flux est très important lorsqu'il est normal à la paroi, il diminue lorsque l'angle d'incidence diminue. Cette composante peut être nulle par temps couvert.

- **La composante diffuse** est flux en provenant du ciel considéré comme étant isotrope, c'est-à-dire qu'il est le même pour toutes les parties du ciel. Dans ce cas, la composante diffuse dépend uniquement de l'inclinaison de la paroi. Cette hypothèse d'isotropie est valable plutôt pour un ciel couvert. Dans le cas d'un ciel clair, le flux diffus est plus important dans la zone du ciel proche du soleil.
- **La composante réfléchie** ou **albédo** représente la partie du flux réfléchi par l'environnement proche. Elle dépend de l'albédo des surfaces réfléchissantes et de l'inclinaison de la paroi.

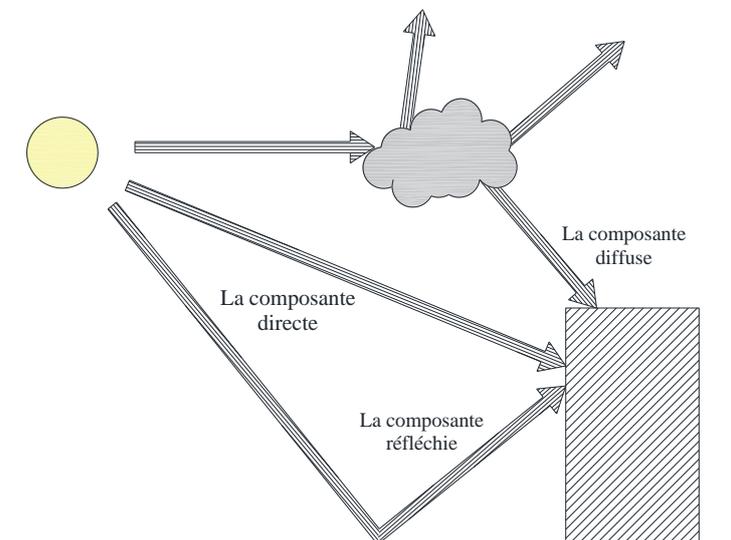


Figure 18: Les composants du rayonnement solaire (Mazria, 1979) (reproduit par l'auteur)

Les rayons du soleil élèvent la température d'un bâtiment de deux manières différentes :

- Lorsque le rayon solaire atteint l'enveloppe externe d'un bâtiment, l'énergie absorbée augmente la température des surfaces qui provoquent un flux de chaleur conduit vers l'intérieur du bâtiment à travers les murs et le toit.
- Lorsque le rayon solaire arrive sur une fenêtre, la presque totalité de l'énergie traverse le verre vers l'intérieur. Cette fraction de rayonnement solaire est absorbée par les parois internes qui à leur tour s'échauffent restituent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde (supérieure à 2500 nm). D'autre part, le verre qui est opaque à ce rayonnement le piège à l'intérieur de l'espace ce qui augmente la température et produit un effet de serre.

L'apport énergétique du rayonnement solaire sur une paroi dépend de l'angle d'incidence. Il est plus important lorsque le flux est normal à la paroi (Figure 19). C'est la surface perpendiculaire au rayonnement solaire qui compte. Elle correspond à la surface irradiée multipliée par le Cosinus de l'angle d'incidence (Mazria, 1979).

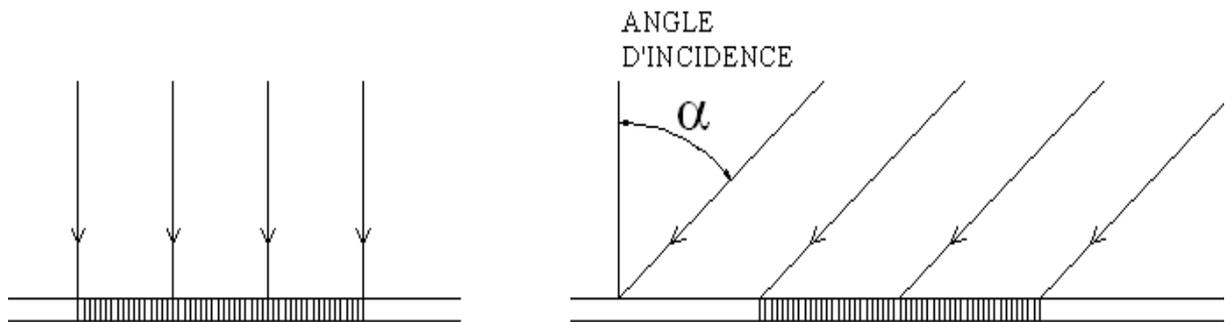


Figure 19 : direction du rayonnement et puissance disponible (Mazria, 1979) (reproduit par l'auteur)

L'angle d'incidence dépend de la position du soleil, c'est-à-dire sa hauteur et de son azimut. (Figure 20)

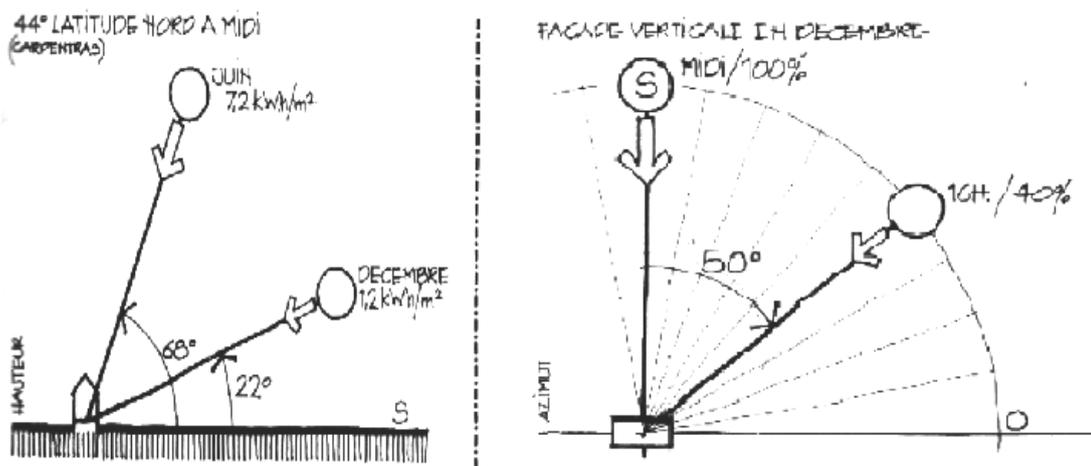


Figure 20 : variation des apports énergétiques en fonction de la hauteur et de l'azimut (Bardou & Arzoumanian, 1978)

Il dépend également de l'inclinaison et l'orientation de la paroi. En hiver, la façade sud reçoit la quantité du rayonnement la plus importante, contrairement aux orientations est et ouest. Cette situation est inversée en été (Figure 21). Par conséquent, les ouvertures orientées sud ont la meilleure capacité de régulation passive en comparaison avec les autres orientations. La période pendant laquelle la puissance est maximale change avec l'orientation des ouvertures (Weber, et al., 1991).

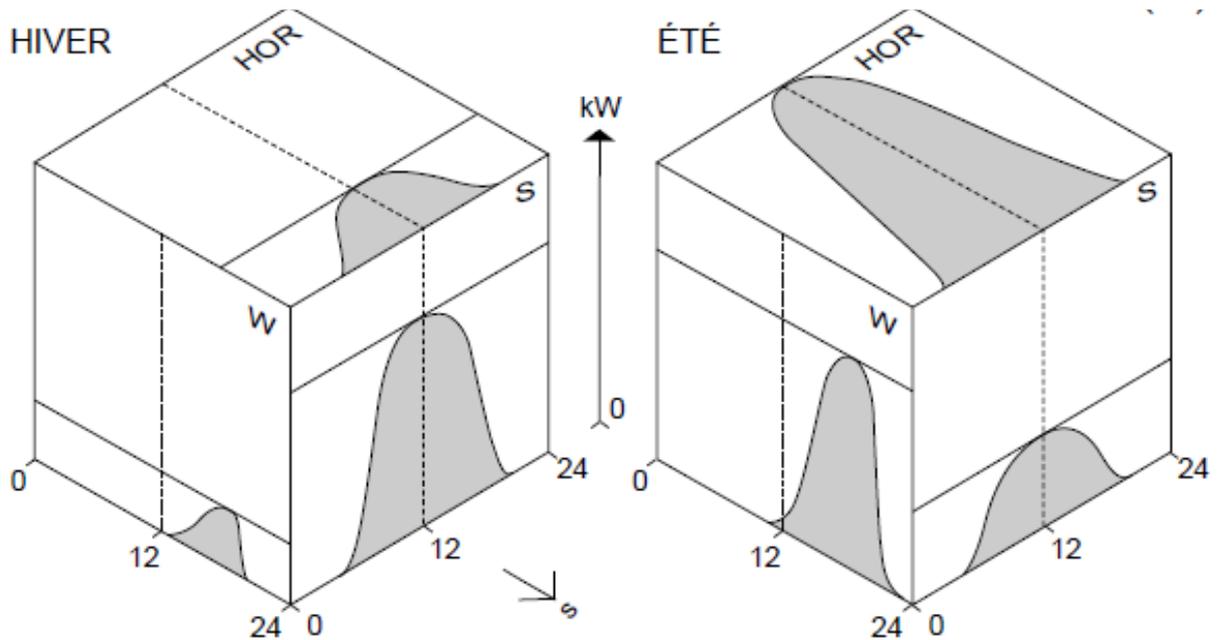


Figure 21: L'insolation reçue sur différents plans par rapport à l'insolation horizontale. (Izard, 1979)

## 2.2.4 Rayonnement solaire et matériaux

Le flux solaire absorbé dépend du facteur d'absorption des surfaces. Pour les parois opaques, ce coefficient est de 1. La température de la paroi augmente par l'absorption du rayonnement solaire qui se transforme en chaleur. Cette chaleur est transférée par la suite selon trois modes d'échanges, par conduction à l'intérieur de la paroi, par convection avec l'air environnant et par rayonnement vers les parois voisines (Mazria, 1979).

Le flux solaire transmis se produit avec les parois transparentes. Pour les surfaces vitrées, la partie du flux transmis suit sa course vers l'intérieur du bâtiment sans changer de direction. Dans le cas des parois transparentes, la somme des coefficients de transmission, d'absorption et de réflexion est de 1. Ces coefficients dépendent de l'angle d'incidence du rayon solaire (Mazria, 1979).

Les matériaux ne se comportent pas la même manière par rapport au rayonnement solaire. Par exemple, le verre est transparent au rayonnement solaire visible et non pas au rayonnement thermique. Le rayonnement solaire transmis par le vitrage est piégé à l'intérieur de l'espace produisant un effet de serre (Givoni, 1978).

En générale, les matériaux peuvent être classés en quatre groupes selon leurs propriétés radiatives : les corps noirs, les matériaux sélectifs froids, les matériaux réflecteurs et les matériaux sélectifs chauds. Nous pouvons, constater à travers Figure 22, que la plupart des matériaux de

construction sont des " corps noirs " pour le rayonnement de grande longueur d'onde ; mais leur comportement vis-à-vis du rayonnement solaire est déterminé par la couleur de leur surface (Chatelet, et al., 1994).

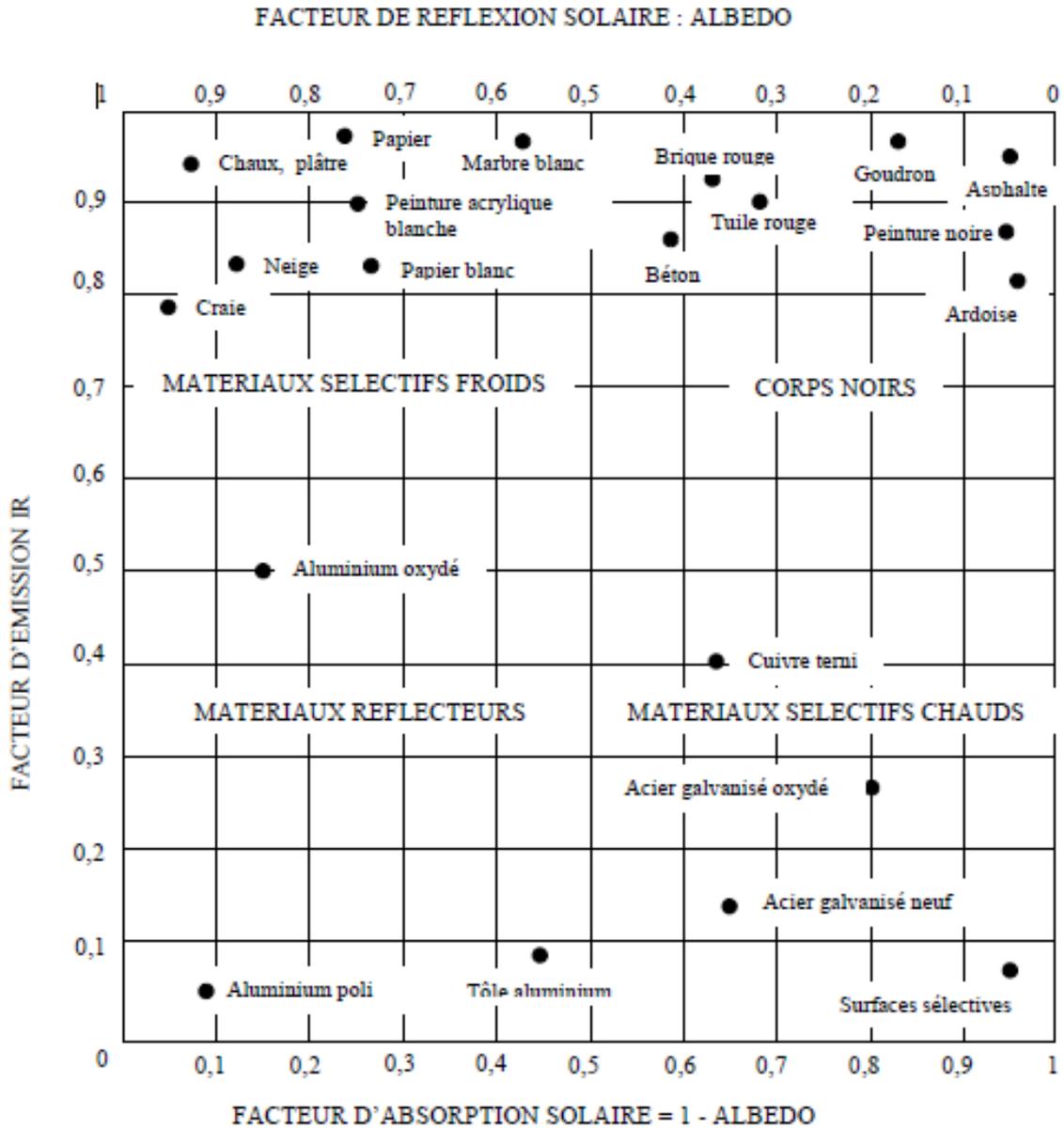


Figure 22 : Propriétés radiatives des principaux matériaux (Chatelet, et al., 1994)

## 2.3 Le contrôle solaire : évolution historique

Depuis la deuxième moitié du dix-neuvième siècle, suite aux maladies épidémiques qu'ont connu les villes européennes, la question du contrôle solaire préoccupait les chercheurs tels que Pasteur et Koch qui considèrent l'ensoleillement comme facteur microbicide (Siret & Harzallah, 2006). Le soleil devient un paramètre indispensable pour toutes conceptions architecturales et urbaines et l'optimisation de l'accès au soleil devient le principal objectif pour les architectes et les urbanistes. Dans cette période la question des surchauffes était placée au second plan (Siret & Harzallah, 2006).

En 1928 A. Rey, J. Pidoux et C. Barde ont proposé la théorie héliothermique, supposée assurer une optimisation solaire des formes urbaines (Rey, et al., 1928). Pour eux une orientation se situant autour de 20° par rapport à l'axe nord-sud est considérée comme optimale, en décalant la façade Est vers le Sud et la façade Ouest vers le Nord (Siret & Harzallah, 2006; Siret, 2012) (Figure 23).

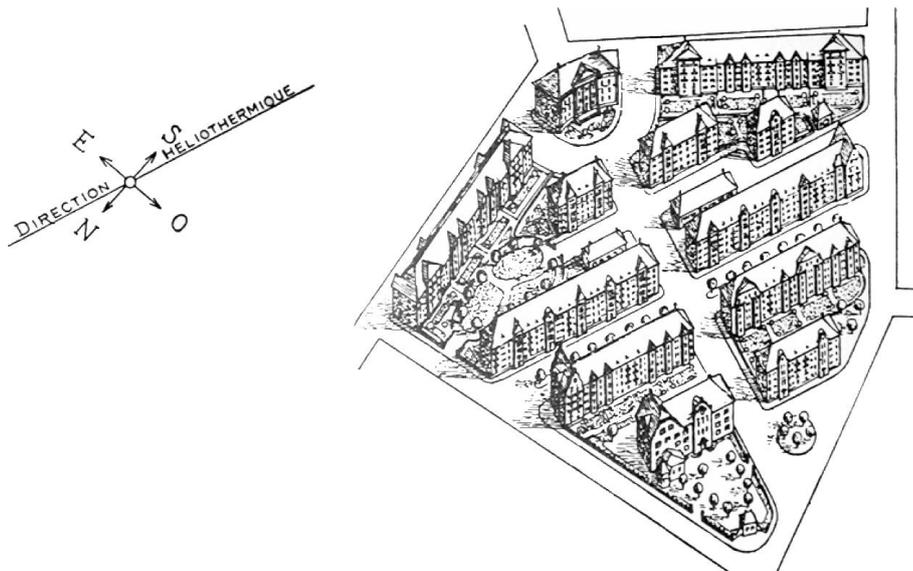


Figure 23 : Réorganisation héliothermique d'un quartier à Paris. (Rey, et al., 1928)

Le Corbusier a popularisé la théorie de Rey, en l'utilisant dans plusieurs projets urbains, notamment la Ville radieuse en 1930, le plan pour la rive gauche de l'Escaut à Anvers en 1933 et le projet de l'unité d'habitation de Marseille, en 1945 (Siret & Harzallah, 2006).

La théorie héliothermique a été critiquée au début des années 1940 notamment par Gaston Bardet (Bardet, 1943). Selon lui, le fait de ne considérer que la durée d'insolation et la température moyenne ayant régné pendant cette période est « *physiquement vide de sens* », puisqu'il est impossible de multiplier une température par une durée. Cette théorie ignorait totalement les

variations des radiations et les heures d'intensité maximale, ce qui est « *à la fois faux et simpliste* ». L'axe héliothermique permet de réaliser la "symétrie thermique" uniquement en été, cependant l'écart de températures entre les deux façades est amplifié aux autres périodes. L'axe héliothermique conduit à un déséquilibre thermique en faveur de la façade sud-est. Ceci a été confirmé par Amina Harzallah et al (2005), qui ont montré à travers des simulations numériques, que l'axe héliothermique ne permet pas de réguler les écarts de températures entre la façade Est et Ouest, et que la symétrie thermique n'est assurée qu'en été. Cette théorie manque de rigueur scientifique, son objectif principal était de résoudre les problèmes sanitaires urbains (Siret & Harzallah, 2006).

D'autre part, Felix Marboutin considère que l'axe Nord-Sud est le plus défavorable, et que l'exposition et la direction des rues les plus favorables font avec le méridien un angle compris entre 60° et 75° (Siret & Harzallah, 2006). Plusieurs théories ont été développées et préconisent différentes orientations des rues ; le docteur Clement recommande des orientations diagonales comprises entre 15° et 20° pour les latitudes comprises entre l'équateur et 30°, Paul Juillerat délimite quant à lui deux éventails d'angles, l'un compris entre 0 et 45° et l'autre, proposé également par Raymond Unwinn, allant jusqu'à 60° ainsi que le docteur Clément, l'architecte américain William Atkinson, Knibbs, Broadhurst, le docteur Adrien Proust, l'architecte Henri Provensal, le docteur Courmont et André Hermant qui préconisent une orientation diagonale à 45° (Harzallah, 2007).

En plus de l'orientation des bâtiments et des rues, plusieurs théories relatives aux gabarits des voies ont été développées pour contrôler l'ensoleillement en précisant le rapport optimal entre la hauteur de la façade et la largeur de la rue. Parmi ces théories, nous avons celle prônant une largeur des rues égale à la hauteur des façades ( $L = H$ ), une autre recommande une largeur des rues égale à une fois et demie la hauteur des façades ( $L = 3/2 H$ ). Marboutin, quant à lui, conseille une largeur des rues égale à trois fois la hauteur des façades ( $L = 3H$ ) tandis que Leroux propose différents rapports H/L selon la latitude (Harzallah, 2007).

La question de l'ensoleillement est également reliée à la densité. Puisque la densité peut influencer sur le rapport des logements vis-à-vis de l'ensoleillement. L'architecte français Roger Ginsburger, a prouvé que l'aération et l'ensoleillement sont considérablement améliorés en diminuant la densité et recommande ainsi le remplacement le système de parcelle et de cour par des barres parallèles.

L'architecte et urbaniste allemand Walter Gropius s'est intéressé à l'impact de l'implantation des bâtiments et la densité sur l'ensoleillement. Il recommande lui aussi, une

disposition en barres parallèles plutôt qu'une implantation en îlots fermés disposant de cours fermées (Garry, 1990).

Certains architectes ont mis en avant la configuration des façades des bâtiments pour optimiser l'accès au soleil. Parmi les différentes propositions faites en ce sens, les immeubles à gradins proposés par Henri Sauvage en 1912 en s'inspirant des sanatoriums construits en Allemagne (Minaert, 2001). Le profil de la rue est élargi progressivement de bas en haut, favorisant ainsi le renouvellement d'air et l'ensoleillement des étages inférieurs (Siret & Harzallah, 2006) (*Figure 24*).



*Figure 24: à gauche : immeuble sis au 26, rue Vavin, Paris, bâti en 1912, à droite : immeuble 13, rue des Amiraux, Paris, bâti entre 1922-1927. Les deux immeubles conçus par l'architecte Henri Sauvage. Source (Laget, 2014)*

Les architectes se trouvent par la suite confrontés à la question de la maîtrise du flux solaire afin de lutter contre les surchauffes provoqués par l'utilisation des murs rideau. La réflexion sur cette question a donné naissance au brise-soleil. Un dispositif proposé par Le Corbusier pour maîtriser l'ensoleillement sur les façades vitrées. Ce dispositif prend plusieurs formes : des jalousies pivotantes, des casiers accrochés aux façades, des lames obliques et des éléments verticaux (Siret & Harzallah, 2006).

Citons l'exemple des loggias brise-soleil de l'unité d'habitation de Marseille (1946-1950) conçu pour laisser pénétrer le soleil en hiver et le bloquer en été. En été, ces loggias permettent de protéger la moitié seulement de la façade ouest et en hiver, plus de la moitié est à l'ombre (*Figure 25*).



Figure 25 : Les loggias brise-soleil de l'unité d'habitation de Marseille. (Photo : Paul kozlowski 1997, <http://www.fondationlecorbusier.fr/>)

Le Corbusier recherche alors une nouvelle méthode pour déterminer l'ensoleillement. I. Xenakis, ingénieur dans l'atelier de Le Corbusier, a établi, en janvier 1952, un diagramme solaire sous forme d'abaque synthétique. Ce diagramme permet de tracer les ombres portées pour trois périodes significatives correspondant aux solstices d'hiver et d'été et à l'équinoxe. Ultérieurement, Xenakis a établi un diagramme solaire pour la latitude de Paris (Figure 26). En juin 1956, Talati, collaborateur de Le Corbusier, a établi des diagrammes solaires pour la latitude de Chandigarh en se basant sur celui de Xenakis (Siret & Harzallah, 2006).

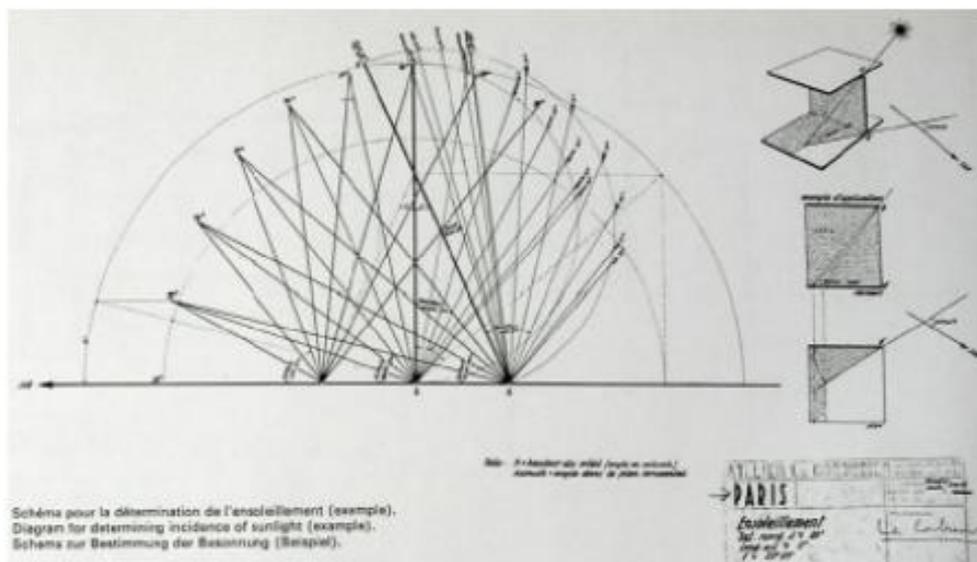


Figure 26 : Schéma pour la détermination de l'ensoleillement (Boesiger, 1994)

Quelques auteurs, tel que Mieczyslaw Twarowski, ont développé la question de l'effet du rayonnement solaire en insistent sur la plastique solaire. Mieczyslaw Twarowski a développé en 1960 la théorie de l'hélioplastique (Twarowski, 1967) qui propose aux concepteurs d'exploiter les opportunités plastiques qu'offre le jeu des ombres et des taches solaires. (Siret, 2014).

Le recours aux énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire a pris plus d'ampleur après premier choc pétrolier au début des années 1970 (Siret, 2013). Ceci a conduit à de nouvelles transformations suivant deux modes de captage solaire en architecture ; le captage passif et le captage actif (Siret, 2011).

## 2.4 Les échelles du contrôle solaire

Le contrôle du rayonnement solaire s'échelonne du tissu urbain à la simple fenêtre dispensant lumière et chaleur à l'intérieur d'une habitation (Djenane, 2008). Il intègre, l'espace urbain à travers sa configuration géométrique, ses matériaux de construction et son organisation (Los, 1981). L'étude d'un bâtiment par rapport au rayonnement solaire a les mêmes enjeux quel que soit le type de climat ou la forme tissu urbain (Vermeulen, 2014). Cependant les pratiques à adopter diffèrent (configuration géométrique, orientation...).

Dans cette section nous évoquons la question du contrôle solaire sur différentes échelles, à savoir : l'échelle urbaine, l'échelle du bâtiment et celle de l'ouverture.

### 2.4.1 L'échelle urbaine

Les espaces urbains sont considérés comme des régulateurs des conditions climatiques. Plusieurs recherches ont été développées dans ce contexte, dans l'objectif de proposer des stratégies de conception appropriées, permettant d'améliorer les conditions thermiques en tenant en compte des paramètres climatiques notamment le rayonnement solaire.

Nous pouvons identifier différents paramètres et indicateurs relatifs à la forme urbaine et contribuant au contrôle de l'ensoleillement. Ces paramètres concernent essentiellement des aspects géométriques du tissu urbain. La littérature dans ce domaine étant très riche.

L'un des paramètres les plus étudiés est **la géométrie de la rue ou le canyon urbain**, caractérisée par le ratio H/L qui est le rapport entre la hauteur de la façade et la largeur de la rue.

Plusieurs auteurs ont abordé cette question dans l'objectif de définir un ratio optimal tenant en considération différents critères (confort thermique, consommation énergétique, effets

thermo-aérauliques, ...) et ce par rapport à différents types de climat (Oke, 1981; Oke, 1988; Oke, et al., octobre 1999; Givoni, 1998; Djenane, 1998).

Un autre paramètre qui caractérise la géométrie de la rue, c'est celui du facteur de vue du ciel ou l'ouverture au ciel qui est inversement proportionnel au ratio H/L. En plus de considérer le rapport H/L, ce concept est défini par les relations entre écrans verticaux et saillies horizontaux permettant une diversité de forme de rue pouvant contribuer à des conditions microclimatiques favorables (Djenane, 1998).

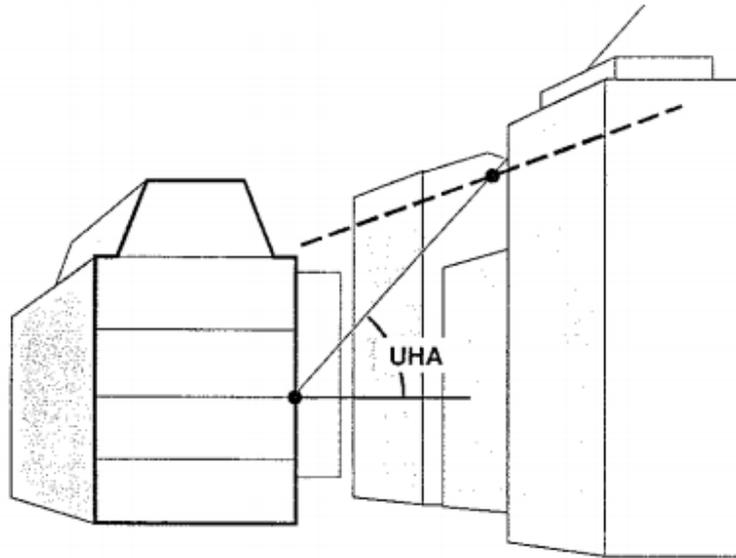
Notons ici que l'impact de ces deux paramètres est fortement lié à l'orientation de la rue qui influence significativement les conditions d'ensoleillement. Les théories concernant l'orientation des rues sont dérivées de l'exposition des façades. Selon Harzallah (Harzallah, 2007) Deux théories principale existent :

- Celle d'une orientation Nord-Sud, ou méridienne, et donc une exposition des façades Est et Ouest, pour répartir de manière égale la chaleur solaire entre les habitations et avoir le plus long temps d'exposition, mais également pour supprimer les problèmes qu'engendre une façade Nord.
- La seconde théorie est l'orientation Est-Ouest, ou équatoriale, et donc une exposition des façades Nord et Sud, pour bénéficier de la meilleure qualité d'exposition sur la façade Sud, mais avec l'inconvénient que la façade Nord ne reçoit quasiment jamais d'ensoleillement.

En plus de ces deux théories, certains ont cherché à explorer une orientation intermédiaire entre l'orientation méridienne et équatoriale, c'est dans ce contexte que sont nées les orientations diagonales, dont le but commun est d'éviter une exposition Nord. Dans ce sens, la plupart des auteurs ont recommandé une orientation à 45°, qui permet de faire bénéficier les quatre façades des rayons solaires et d'éviter une exposition au Nord. Bien entendu, l'impact de l'orientation est lié à la latitude du lieu est au type du climat.

Dans le même contexte, une méthode simple a été développée dans les années 90, permettant d'étudier l'impact de la forme urbaine sur les conditions d'ensoleillement. Elle propose un angle d'obstruction moyen, angle que forme l'horizon avec le contexte urbain (Yannas, 1994; Baker, et al., 1995). Cette méthode a été utilisée dans plusieurs méthodes permettant de

calculer le bilan thermique telles que la méthode LT<sup>1</sup> (Baker, et al., 1995) (*Figure 27*), où l'angle d'obstruction est rapporté à un coefficient utilisé pour calculer les besoins énergétiques selon l'orientation de la façade (Vermeulen, 2014).



*Figure 27: Angle d'obstruction présenté dans la méthode LT (Baker, et al., 1995)*

L'angle d'obstruction ne prend en considération que les bâtiments directement en vis-à-vis (Vermeulen, 2014). Dans la configuration d'un canyon urbain, l'angle d'obstruction dépend de l'angle horizontal considéré (Littlefair, 1998). Les angles d'obstructions formés par les arêtes des géométries urbaines ne sont pas constants. A cet effet Littlefair (1998) considère que les obstructions ont un impact uniquement dans un angle de  $\pm 30^\circ$  de la direction sud tout en fixant un angle d'obstruction maximal à respecter (Vermeulen, 2014).

L'utilisation de projections permet de visualiser avec précision les masques urbains. (Beckers & Beckers, 2014). Citons l'exemple de la projection gnomonique, première projection associée au rayonnement solaire. Comme nous l'avons déjà dit (2.1.2.1), l'inconvénient majeur de cette projection est qu'elle ne permet pas la présentation des hauteurs solaires très faibles. Il est possible de représenter les masques urbains sur le diagramme solaire (*Figure 28*). Le calcul du rayonnement solaire est principalement basé sur un calcul géométrique, tenant en considération les trajectoires solaires et la géométrie urbaine (Vermeulen, 2014). Quelques logiciels axés sur la

---

<sup>1</sup> Lighting and Thermal energy, est une méthode développée dans les années 90, utilisée pour calculer les besoins énergétiques pour le chauffage, la climatisation, la lumière et la ventilation.

conception, tels que Heliodon 2 (Beckers & Masset, 2011) ou Townscope (Teller & Azar, 2001) utilisent les projections comme représentation graphique.

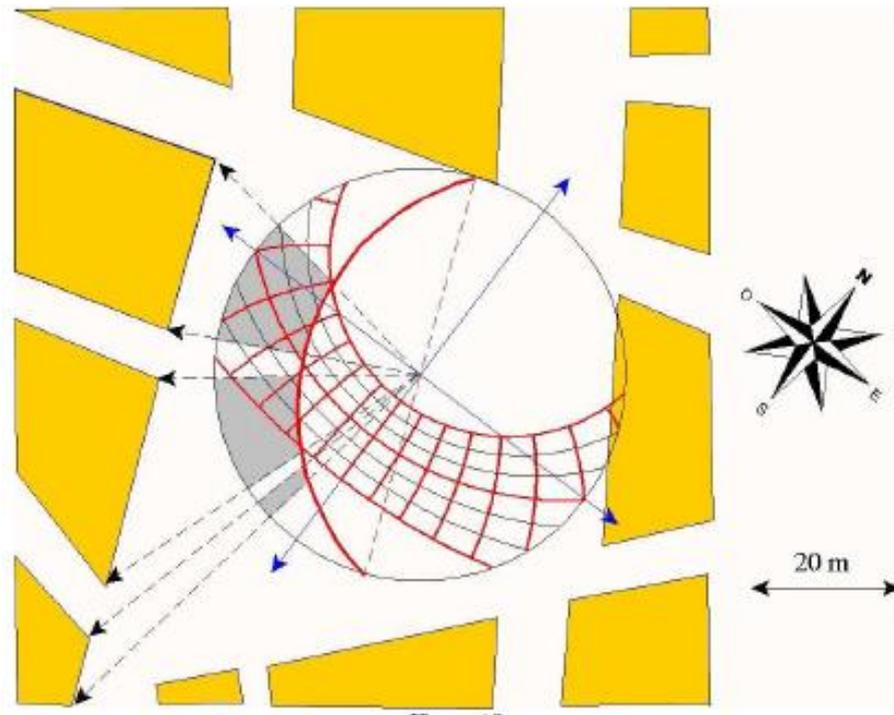


Figure 28 : Représentation des masques urbains sur un diagramme solaire (Beckers, 2004)

Le concept d'enveloppe solaire, développé par Ralph Knowles au début des années 1970, traduit l'exposition au rayonnement solaire à l'échelle urbaine en un problème géométrique simplifié. Elle est basée sur le droit au soleil, le principe suppose que les nouvelles constructions ne doivent pas masquer le soleil aux bâtiments existants durant des périodes définies. L'enveloppe solaire est le volume limite constructible répondant à la condition suscitée, sa forme définitive dépend de la course solaire (la latitude) et d'autre part de la configuration géométrique du tissu. Knowles (1980) a défini un critère d'ensoleillement pouvant être utilisé dans les réglementations d'urbanisme, ayant comme hypothèse que l'utilisation de l'énergie solaire est conditionnée par l'exposition des bâtiments au rayonnement solaire (Vermeulen, 2014).

L'enveloppe solaire « est la surface en trois dimensions en dessous de laquelle toute nouvelle construction respectera cette exposition au soleil des bâtiments alentour » (Vermeulen, 2014). Le volume de l'enveloppe solaire est une pyramide permettant autres parcelles l'accès au soleil pendant des dates précises. Les bâtiments doivent être dessinés à l'intérieur de ces volumes (Figure 29) (Knowles, 2003).

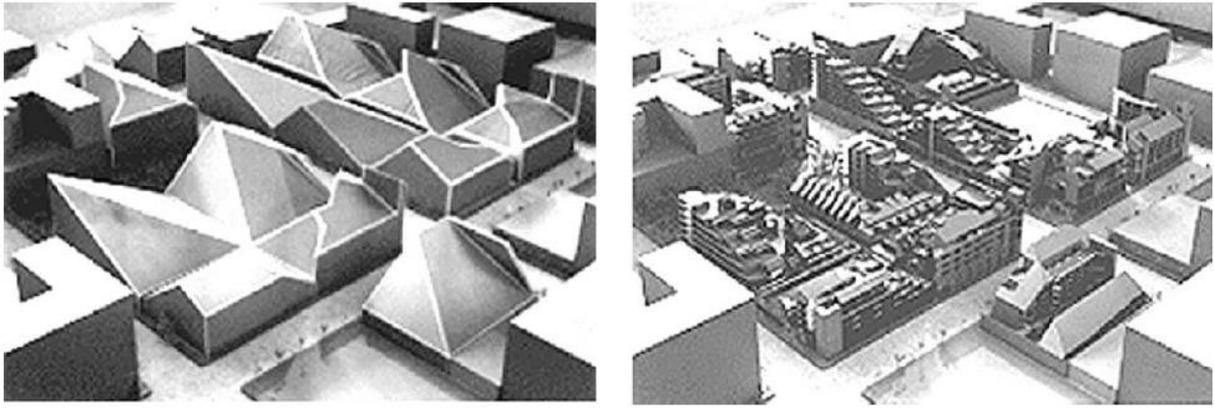


Figure 29 : L'enveloppe solaire tel que définie par Ralph Knowles. Source : (Knowles, 2003)

## 2.4.2 L'échelle du bâtiment

En plus de la forme urbaine, une autre échelle permet de contrôler le rayonnement solaire, c'est celle du bâtiment, dont les conditions d'ensoleillement dépendent non seulement de l'orientation des façades mais aussi de la volumétrie. Selon la latitude du lieu les façades s'exposent différemment au rayonnement solaire, la durée d'ensoleillement et de l'angle d'incidence avec lequel le rayonnement solaire frappe la façade diffèrent. Comme nous l'avons déjà évoqué, à cette orientation s'ajoutent l'effet des masques urbains définis par le gabarit de la rue.

Le volume est un facteur important sur l'efficacité énergétique. Les bâtiments de plus grand volume ont tendance à être plus efficaces. Les bâtiments plus hauts et plus étroits sont plus économes en énergie (Tzikopopoulos, et al., 2005). La compacité, qui est le rapport entre surface de l'enveloppe et le volume ( $E/V$ ), a un impact sur les performances énergétiques des bâtiments. Plus le rapport  $E/V$  est faible, plus le bâtiment est compact, et donc la surface de l'enveloppe soumise au rayonnement solaire est moins importante ce qui réduit les déperditions thermiques.

Monténégro et al. (2012), ont étudié les performances visuelles, thermiques et énergétiques de neuf typologies de bâtiments avec différent rapport  $E/V$  pour des climats froids (Montréal, QC, Canada) et tempérés (Santiago, Chili). Ils ont constaté que les typologies avec un faible rapport enveloppe/volume présentent les meilleures performances. Su (Su, 2013) a aussi montré que la consommation énergétique en hiver augmente lorsque le rapport entre la surface du bâtiment et son volume est élevé. Par conséquent, il suggère que la minimisation du nombre de bâtiments isolés et l'augmentation de la hauteur et du volume des bâtiments pourraient économiser de l'énergie en hiver.

Beaucoup de recherche ont porté sur les effets de la forme du bâtiment sur la consommation d'énergie (Ratti, et al., 2003) (Van denDobbelsteen, et al., 2007). Ils ont montré que la forme du bâtiment peut avoir un impact significatif sur les performances thermiques. Zhang (2017) a montré que la forme en H est la meilleure en termes de performances thermiques permettant d'économiser la consommation énergétique jusqu'à 13,6% de et d'améliorer le confort thermique de 3,8 %.

La volumétrie porte également sur les décrochements qui créent des ombres sur les façades du bâtiment et l'inclinaison des façades modifiant ainsi l'angle d'incidence. C'est dans ce contexte que le concept de "l'autoprotection" ou "self-shading" a été développé par Capeluto (2003) qui suggère une enveloppe de bâtiment auto-protégée pour le contrôle du rayonnement solaire. C'est un concept opposé au concept de l'enveloppe solaire développé par Knowles (1980) qui s'applique à l'échelle urbaine. Il s'agit de générer la forme du bâtiment de telle sorte que les façades du bâtiment soient auto-protégées pendant la période de surchauffe.

Selon Capeluto, les bâtiments ayant un "Self-shading ont une meilleure performance énergétique (Capeluto, 2003). La quantité de chaleur traversant l'enveloppe du bâtiment est proportionnelle à la surface des murs extérieurs (Lam, et al., 2005). La stratégie du "self-shading" permet d'éliminer le rayonnement solaire direct pour minimiser la consommation énergétique pour le refroidissement, cependant la quantité de lumière naturelle pénétrant à l'intérieur du bâtiment peut être réduite.

Plusieurs exemples illustrent ce concept en adoptant une structure pyramidale inversée pour réaliser des façades auto-protégées pendant une certaine période. D'autres exemples adoptent la structure de la pyramide inversée à gradins gardant les fenêtres en position verticale (Figure 30). Les façades de ces bâtiments agissent comme un bouclier contre le rayonnement solaire et l'empêche de pénétrer dans le bâtiment. Il faut dire qu'un bâtiment à géométrie pyramidale inversée augmente la surface du toit. Par conséquent, des solutions de conception supplémentaires devraient être envisagées, en évitant les murs très inclinés, tels que la combinaison de murs inclinés avec des fenêtres profondes.



Tempe city Hall, Arizona (Michael et Kemper Goodwin).



Diamond building à Putrajaya Malaisie (NR Architect of Kuala Lumpur)



Connecticut Building à North Haven Connecticut (Ellenzweig Associates Inc.)



Boston city hall (Kallmann, McKinnell, Knowles)

Figure 30 : Exemple de bâtiments basés sur le principe de self-shading

L'application de la stratégie du self-shading en utilisant des murs inclinés permet de réduire les gains solaires ce qui réduit significativement la consommation énergétique pour le refroidissement (Kandar, et al., 2019). Lavafpour (2015) a étudié l'impact de différents angles d'inclinaison de la façade Sud ( $95^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $115^\circ$  et  $125^\circ$ ) il a été constaté que l'utilisation d'une façade sud inclinée à  $115^\circ$  réduit considérablement les risques de surchauffe. Dans le même contexte Kandar (2019) a étudié l'impact de différentes valeurs du ratio SSP (Self-Shading Projection) correspondant au rapport entre la projection du mur incliné et la hauteur verticale du bâtiment. Autrement dit, c'est la tangente de l'angle que forme le mur incliné avec la verticale. Kandar (2019) a montré que l'angle d'inclinaison optimal de l'auto-protection est basé sur un SSP de 45%. Ce ratio correspond à un angle d'inclinaison de  $114^\circ$  ce qui confirme les résultats obtenus par Lavafpour (2015). Il est à noter que l'angle d'inclinaison optimal dépend de la zone géographique considérée. Selon Zerefosa (2012) les bâtiments de forme prismatique consomment moins d'énergie que les bâtiments à angles droits. Les résultats montrent un écart de consommation énergétique annuel moyen de 7,88% en faveur de l'enveloppe prismatique du bâtiment.

La protection des murs par des éléments de protection est l'une des stratégies pour minimiser l'impact direct du rayonnement solaire sur les façades (Chia, 2008). Citons l'exemple

de l'immeuble de bureaux "Distrito C" de Madrid (Figure 31) dont la façade a été conçue avec des panneaux saillants agissant comme des pare-soleil, tout en attribuant au bâtiment un caractère esthétique unique (Kandar, et al., 2019).



Figure 31 : l'immeuble de bureaux Distrito C, Madrid architecte : Rafael de La-Hoz.

[\(https://www.archdaily.com/20158/\)](https://www.archdaily.com/20158/)

Capeluto (2003) et Chia (2008) ont suggéré certaines formes de façades pour les immeubles de grande hauteur. Le concept d'auto-protection a été appliqué pour les bâtiments de faible et moyenne hauteur (Capeluto, 2003). Des études ont été effectuées sur l'application de ce concept sur les bâtiments de grande hauteur (Ling, 2005). Il est à noter que les murs verticaux des immeubles de grande hauteur reçoivent 86,6 % de l'ensoleillement annuel (Ling, 2005). La forme auto-protégée est l'un des moyens possibles pour minimiser l'impact du rayonnement solaire sur les immeubles de grande hauteur (Capeluto, 2003). Cependant l'inclinaison des façades sur une hauteur très importante augmente la distance de la projection des murs inclinés. Par ailleurs, Ling (2005) propose une forme de bâtiment de grande hauteur utilisant le concept du self-shading (Figure 32).

Pour la conception d'un bâtiment auto-protégé, il faut déterminer, en fonction des conditions climatiques, la période dans laquelle une protection est nécessaire (Capeluto, 2003). Plusieurs méthodes, ayant comme outils les diagrammes solaires, ont été développées pour générer des formes de bâtiments permettant une auto-protection.

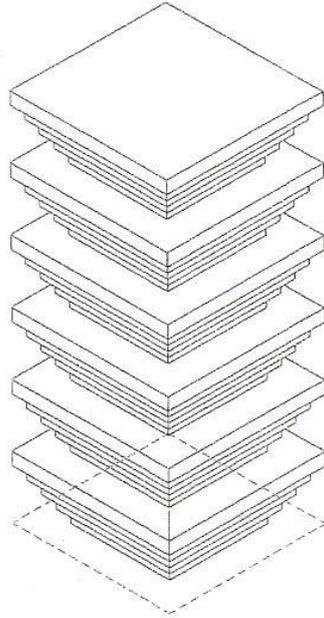


Figure 32: Auto-protection d'un immeuble de grande hauteur (Ling, 2005)

### 2.4.3 L'échelle de l'ouverture et de ses différentes composantes

La quantité des apports solaires dépend des paramètres de conception des fenêtres. L'orientation, les dimensions, la protection solaire ainsi que le type du vitrage influencent directement la quantité du rayonnement solaire qui pénètre dans le bâtiment. Le choix de ces paramètres se fait dans l'objectif de réduire autant que possible ces apports en été tout en permettant une pénétration solaire en hiver.

L'orientation de la fenêtre influence directement la quantité du rayonnement solaire. Les fenêtres orientées au nord ont un apport solaire très faible. Les apports solaires dans le cas de l'orientation sud sont plus importants en hiver tandis que pour les orientations est et ouest ils sont les mêmes toute l'année. Il est préférable donc d'avoir des fenêtres orientées vers le nord et le sud pour minimiser l'impact du rayonnement solaire (Harimi, et al., 2011).

Selon l'orientation de la fenêtre, ses dimensions déterminent la quantité des apports solaires qui pénètrent à l'intérieur des bâtiments. La taille de la fenêtre est généralement définie par le ratio WWR qui est le rapport entre la surface de la fenêtre et celle du mur (Lam, et al., 2005). Des études ont montré qu'un WWR de 25 % est considéré comme optimum pour obtenir à la fois l'éclairage et le refroidissement dans les immeubles de bureaux (Nikpour, et al., 2012; Zain-Ahmed, et al., 2002).

Un contrôle solaire peut être assuré par l'utilisation d'une protection solaire appropriée qui empêche le rayonnement solaire pendant l'été tout en permettant sa pénétration pendant l'hiver. Sa configuration dépend des conditions climatiques et la latitude du lieu considéré mais également de l'orientation de la fenêtre à protéger. En général, les protections solaires externes sont plus performantes que les protections internes (Datta, 2001; Valladares-Rendón, et al., 2017). Nous détaillons cette question dans le chapitre suivant.

Le type de vitrage influence également la quantité du rayonnement solaire traversant une fenêtre. C'est le facteur solaire qui définit le comportement du vitrage par rapport au rayonnement solaire. Lorsque le rayonnement solaire frappe un vitrage, une partie de ce rayonnement est réfléchi, une partie est transmise à travers le vitrage et une partie est absorbée par le vitrage. Le facteur solaire d'un vitrage est la fraction du rayonnement solaire qui traverse le vitrage sur le rayonnement incident (Carmody, et al., 1996).

Nous pouvons citer quatre propriétés pouvant affecter les transferts d'énergie radiante :

- La transmissivité correspond au pourcentage de rayonnement solaire traversant le vitrage.
- La réflectivité est le rayonnement solaire réfléchi, elle dépend de la surface du verre, du nombre de couche ainsi que l'angle de l'incidence. Plus l'angle d'incidence est important plus la partie du rayonnement solaire réfléchi sera importante (Rosenfeld, 1996).
- L'absorption quant à elle représente la quantité du rayonnement solaire absorbée par le verre et transformée en chaleur en augmentant sa température.
- Et enfin l'émissivité qui est la capacité du vitrage à émettre de la chaleur (Carmody, et al., 1996) .

## **2.5 Conclusion**

Nous avons présenté à travers ce premier chapitre les différents aspects relatifs à la problématique du contrôle solaire en architecture.

Dans la première partie, nous avons mis en évidence des connaissances sur la géométrie solaire. Ces connaissances sont indispensables pour le dimensionnement des dispositifs de protection solaire.

Par la suite, un aperçu historique, nous a permis de montrer l'évolution de la problématique d'ensevelissement en architecture et des dispositifs de contrôle solaire notamment

---

au XXe siècle. Depuis les théories hygiénistes au début du siècle, marquées notamment par la théorie héliothermique présentée par Augustin-Rey et celle des immeubles à gradins de H. Sauvage, jusqu'à la préoccupation énergétique au début des années 1970, passant par l'invention du brise-soleil par Le Corbusier, suite aux problèmes de surchauffe posés par l'utilisation des murs rideaux.

Enfin, nous avons montré les différentes échelles du contrôle solaire. A l'échelle urbaine, nous avons identifié les différents paramètres et indicateurs contribuant au contrôle de l'ensoleillement. Ces paramètres concernent essentiellement des aspects géométriques du tissu urbain. Le bâtiment constituait la deuxième échelle. Sa géométrie et son orientation influence directement les conditions d'ensoleillement. La dernière échelle, quant à elle, concerne l'ouverture, par ses dimensions, son orientation, ainsi que les caractéristiques de ses différents composants (le vitrage et la protection solaire).

Nous abordons dans le chapitre suivant la question des protections solaires. Nous présentons les différentes typologies de protection solaire en essayant de comprendre les principes de base de leur conception. Nous mettons également l'accent sur les différents paramètres de conception ainsi que leur impact sur les performances thermique, lumineuse, énergétique et environnementale.

### **3 Chapitre III : La protection solaire dans le bâtiment, conception et performances**

#### **Introduction**

**L**a protection solaire est l'une des stratégies de refroidissement passif ayant pour objectif de contrôler le rayonnement solaire afin de minimiser la surchauffe et de contrôler l'éblouissement. Aujourd'hui, avec l'augmentation de l'utilisation de grandes surfaces vitrées, la conception de protection solaire appropriée devient de plus en plus cruciale. Dans ce chapitre nous étudions les différentes questions relatives aux protections solaires en mettant l'accent sur les recherches effectuées dans le domaine, ces connaissances sont nécessaires avant d'entreprendre la partie pratique.

Nous avons structuré ce chapitre en trois parties. La première sera consacrée à la présentation des différentes typologies de protection solaire. Dans la deuxième partie nous abordons les différentes méthodes et outils de dimensionnement ainsi que les paramètres de conceptions de ces dispositifs. Enfin, en nous appuyant sur les études effectuées dans le domaine, nous abordons dans la dernière partie de ce chapitre l'impact thermique, lumineux et énergétique des protections solaires, ainsi que les outils d'évaluation de leurs performances.

#### **3.1 Typologies de protection solaire**

Bellia (2014) et Kirimtata et al. (2016), mettent en évidence la complexité de la classification des dispositifs de protection solaire et proposent une classification simple basée sur leur emplacement et leur mobilité.

Les protections solaires sont groupées, selon leur emplacement, en deux catégories principales : protections solaires internes et externes. Selon leur mobilité, nous distinguons des protections fixes ou mobiles (manuel ou automatique). De nombreux paramètres entrent en jeu dans le choix de la protection solaire. Le type, la taille et l'emplacement d'une protection solaire dépendent principalement de la quantité de rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi

(Lechner, 2008) qui dépend à son tour d'un certain nombre de paramètres liés au bâtiment (orientation et taille des ouvertures) et au site (latitude, conditions climatique et masques urbains).

### 3.1.1 Protection solaire interne

Les protections solaires intérieures permettent de réguler la quantité de lumière naturelle et éliminer les risques d'éblouissement, mais elles ne suffisent pas pour réduire les apports solaires car elles n'empêchent pas le rayonnement solaire direct de traverser la fenêtre. Les couches de vitrage absorbent la chaleur et la transmettent à l'intérieur de l'espace. En conséquence, les dispositifs de protection solaire internes ne devraient pas être définis comme des dispositifs de protection car ces derniers sont destinés à empêcher la chaleur de pénétrer dans l'espace. Ils devraient plutôt être classés comme dispositifs de contrôle de l'éblouissement (Bader, 2011).

### 3.1.2 Protection solaire externe

Selon Lechner (2008), les protections solaires externes sont plus efficaces et ont le plus d'effet sur l'esthétique d'un bâtiment. Dans le cas d'une protection externe, le rayonnement solaire direct peut être contrôlé efficacement car il est bloqué avant même qu'il chauffe la surface ou qu'il pénètre à l'intérieur de l'espace.

Il existe plusieurs types de protection solaire externe qui sont classés, selon l'orientation des lamelles, en trois grandes catégories (Figure 33) :

- La protection horizontale : c'est le dispositif le plus répandu, il existe sous plusieurs formes ; tels que les auvents, des lamelles ou des stores (Bader, 2011). Ce type de protection est adapté aux orientations Sud et zénithale.
- La protection verticale : utilisée dans le cas de l'orientation Est et Ouest, est considérée comme l'une des protections solaires les plus efficaces. Elle répond aux besoins énergétiques, aux exigences de confort thermique et lumineux et elle permet une vue sur l'extérieur (Bauer & Molse, 2007).
- La protection mixte ou nid d'abeille (eggcrate) : Ce type de protection solaire est utilisé dans le cas des ouvertures orientées sud-ouest et sud-est.

Il est à noter que le choix d'un type de protection solaire, parmi ces trois catégories, dépend essentiellement de l'orientation de la fenêtre à protéger. Plusieurs études ont montré que les protections solaires extérieures sont plus efficaces que celles placées à l'intérieurs (Kim & Kim, 2009; Datta, 2001; Yüceer, 2012).

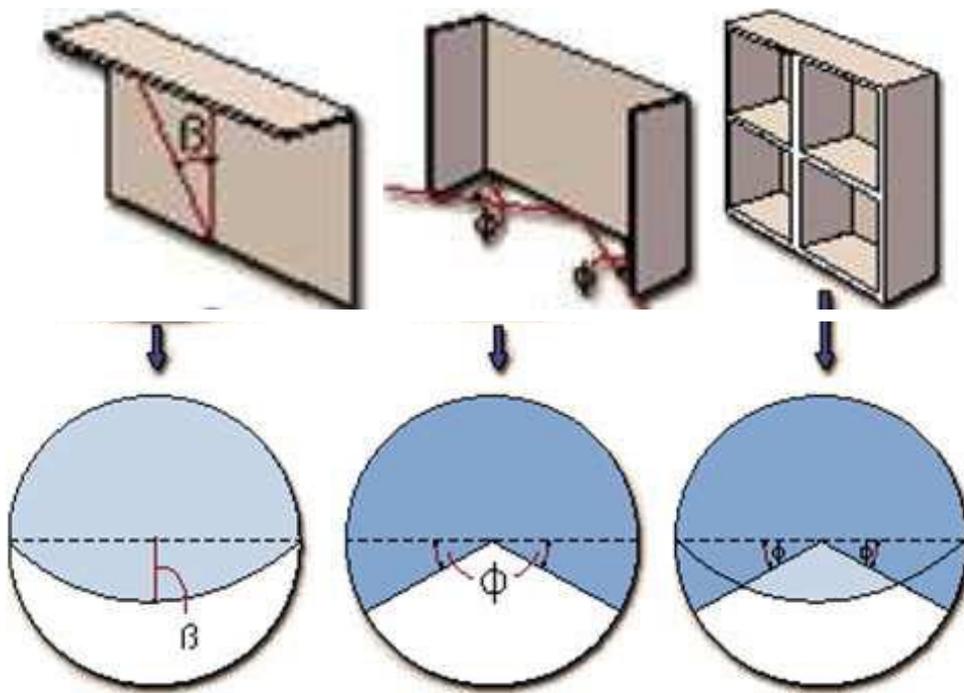


Figure 33 : Type de protections solaires selon Yüceer. (Yüceer, 2012)

Comme le montre la Figure 34, Olgyay (1963) propose plusieurs configurations pour les trois catégories citées ci-dessus en utilisant des lamelles avec différentes inclinaisons.

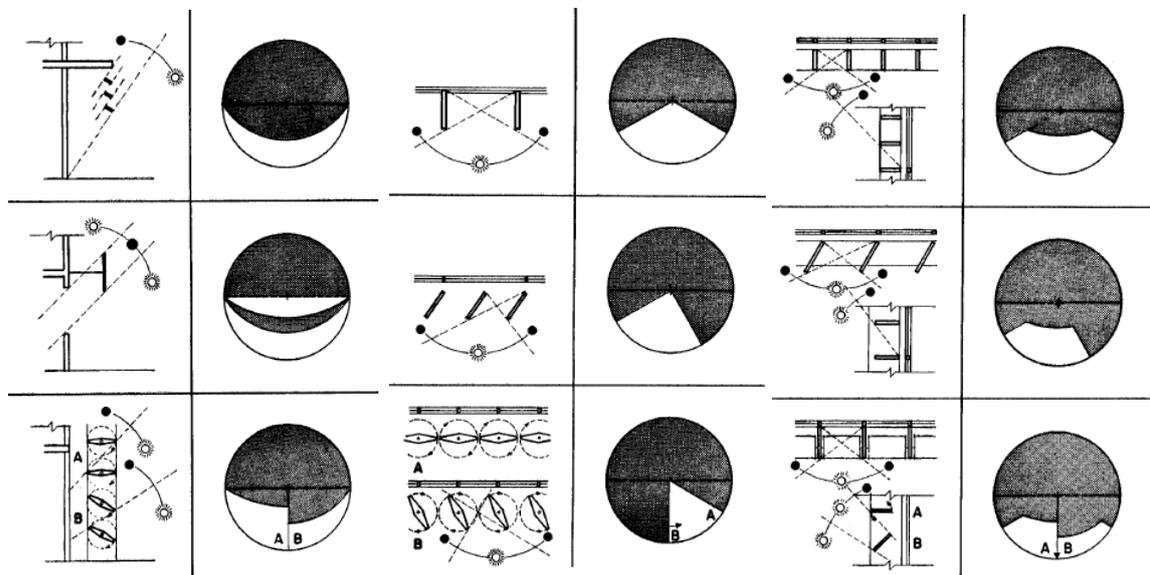


Figure 34 : Les différents types de protection solaire selon Olgyay. (Olgyay, 1963)

### 3.1.3 Protection solaire mobile / dynamique

Les dispositifs de protection solaire peuvent être statiques ou dynamiques. Les résultats de l'étude menée par (Nielsen, et al., 2011) indiquent que, dans le climat danois, les dispositifs de protection solaire dynamique fonctionnent mieux que les dispositifs fixes en termes de consommation énergétique, la réduction de surchauffe, l'éclairage naturel et la vue vers l'extérieur. Wither (2013) et Liu (2014) confirment également que l'utilisation de protection solaire dynamique améliore la performance des bâtiments.

Des recherches ont étudié l'impact des protections dynamiques sur la consommation d'énergie et le confort des occupants. Les résultats montrent que l'utilisation des protections dynamiques diminue la demande énergétique pour le refroidissement et l'éclairage (Athienitis & Tzempelikos, 2002; Grynning, et al., 2014; Tzempelikos, et al., 2007). Elles permettent une économie d'énergie de 15% pour le refroidissement et jusqu'à 50% pour l'éclairage artificiel (Lee, et al., 1998). Lollini & al. (2010), ont démontré que ce type de protection réduit également la demande énergétique globale. D'autre part, Koo & al. (2010), a prouvé que les protections dynamiques améliorent les conditions d'éclairage naturel dans les bâtiments. Cependant la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration du confort des occupants par rapport à la capacité des protections dynamiques à s'adapter aux changements saisonniers ne peuvent être réalisées que grâce à un processus intégré (Lee, et al., 1998; Nielsen, et al., 2011). Par exemple, l'amélioration des conditions de l'éclairage naturel peut réduire la consommation énergétique pour l'éclairage artificiel, mais aussi augmenter les gains solaires et donc affecter la demande énergétique pour le refroidissement (Johnson, et al., 1984; Tzempelikos, et al., 2007).

Comme plusieurs études précédentes l'ont montré, le contrôle automatique de protection est essentiel pour réaliser le potentiel d'économie d'énergie et les avantages de l'éclairage naturel des dispositifs de protection solaire (Kim, et al., 2007). Les stratégies de contrôle doivent, en outre, être adaptées pour fonctionner dans leur climat désigné. Le contrôle manuel devrait être évité du point de vue économie d'énergie, car les utilisateurs ont tendance à laisser les stores ouverts ou fermés indépendamment de ce qui est optimal en termes de refroidissement, de chauffage et de d'éclairage naturel (Reinhart & Voss, 2003; Nielsen, et al., 2011). Meerbeek et al (2014) ont également montré la complexité de l'interaction entre le contrôle automatique de protection solaire extérieure mobile et le comportement des utilisateurs.

## 3.2 Conception des protections solaires : méthodes et outils

Les systèmes de protection solaire ont été utilisés depuis longtemps comme moyens architecturaux destinés à contrôler l'ensoleillement pour améliorer les conditions environnementales à l'intérieure des bâtiments. Dans ce sens, différentes formes et dispositifs architecturaux ont été mis en œuvre; tel que la façade épaisse (L. Kahn, J. L. Sert, Le Corbusier), les débords de toit (F. L. Wright, R. Neutra, M. Breuer), ou encore les brises soleil (Le Corbusier, O. Niemeyer). Le dimensionnement de ces dispositifs était établi afin de répondre à des considérations plutôt d'ordre esthétique, leur impact sur les conditions thermiques et d'éclairage à l'intérieur du bâtiment n'a pas été pris en considération.

Dans le dimensionnement des protections solaires, il s'agit plutôt de résoudre un problème d'ordre géométrique. Les méthodes de calcul s'appuient essentiellement sur des connaissances de la géométrie solaire qui sont à la base de l'établissement des outils graphiques. Plusieurs études ont été développées dans ce sens, Olgyay et Olgyay (1957) ont fourni un cadre théorique pour le dimensionnement des protections solaire. Ainsi, au cours des dernières années, des méthodes plus avancées pour générer des protections solaires optimales ont été proposées par Arumi-Noé (1996), Kabre (1999), Kaftan (2001) et Marsh (2003).

Nous présentons ci-dessous les outils et la méthode permettant de dimensionner les protections solaires.

### 3.2.1 Outils graphiques : Diagramme solaire et abaque des masques

Plusieurs outils ont été développés pour le dimensionnement des protections solaires, ces outils sont de type graphique (Twarowski, 1967), (Lavigne, et al., 1994) ou numériques simplifiés (AUDIENCE, 1999). Les outils graphiques utilisés dans le dimensionnement des protections solaires sont le diagramme solaire et l'abaque des masques.

Le diagramme solaire, déjà présenté dans la section 2.1.2, nous informe de la position du soleil (hauteur et azimut) à un moment donné. Il dépend de la latitude de la zone géographique considérée. Les deux types de diagramme, sphérique ou cylindrique, peuvent être utilisés dans le dimensionnement des protections solaires, les résultats obtenus sont les mêmes (Figure 35).

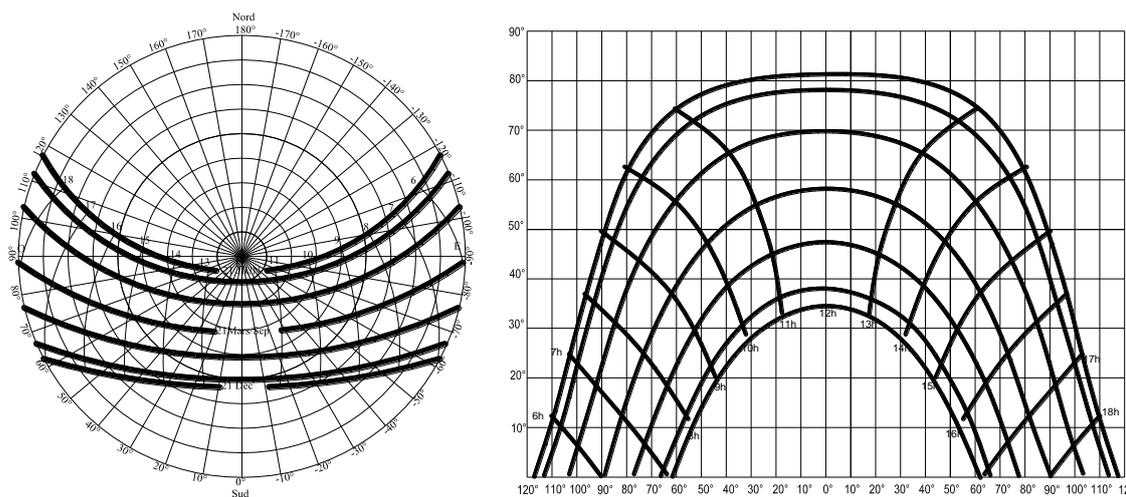


Figure 35: Diagramme solaire pour la latitude 30° Nord, à gauche projection sphérique, à droite projection cylindrique (Auteur)

L'abaque des masques permet de calculer les angles d'occultation verticaux et horizontaux. Il se présente sous forme de deux réseaux ; réseau de courbes en arches servant à étudier les avancées horizontales et un réseau de rayon, pour le cas d'une projection sphérique ou de lignes verticales pour une projection cylindrique, permettant d'étudier les avancées verticales (Figure 36). La superposition de cet abaque au diagramme solaire, permet de déterminer avec précision les heures et les jours pendant lesquels la fenêtre est protégé du rayonnement solaire direct. De la même manière, on peut dimensionner et choisir la forme d'une protection solaire de manière à protéger une fenêtre pendant une période donnée.

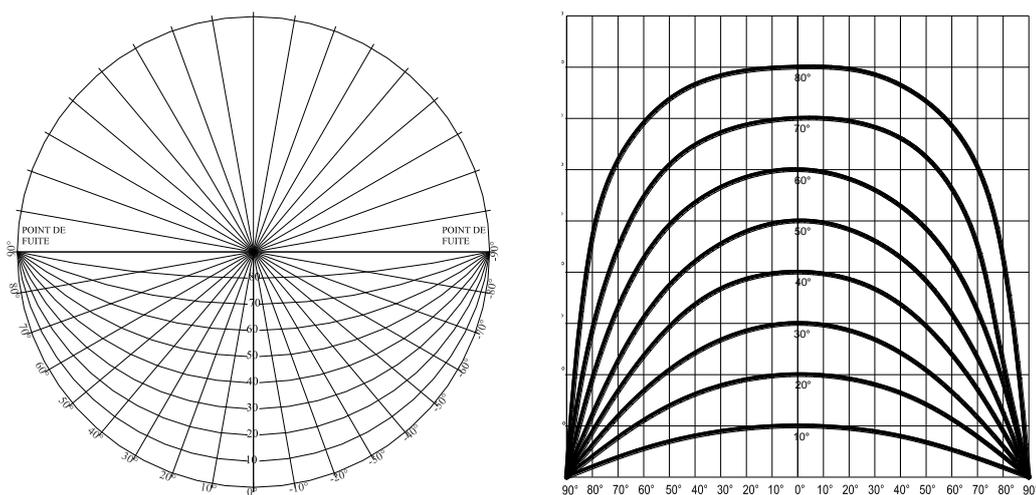


Figure 36 : L'abaque des masques, à gauche projection sphérique, à droite projection cylindrique (Auteur)

### 3.2.2 Méthode de dimensionnement

Le dimensionnement d'une protection solaire repose essentiellement sur le calcul des angles d'occultation optimaux horizontaux et verticaux. Il s'agit des limites horizontales et verticales d'une protection solaire, calculées afin d'empêcher la pénétration du rayonnement solaire pendant la période de surchauffe, période pendant laquelle la température de l'air dépasse la température de confort fixée à 27°. La transmission solaire durant cette période doit être égale à 0. Les angles d'occultation optimaux dépendent de la position du soleil (hauteur et azimut) et donc de la latitude de la zone géographique considérée. Ils dépendent aussi de l'orientation des ouvertures à protéger.

Dans ses travaux sur la géométrie solaire et la conception des systèmes de protection, Szokolay (1996) a identifié trois étapes de base à prendre en compte :

- Tout d'abord, il faut identifier **la période de surchauffe**, c'est-à-dire les dates et heures auxquelles l'ombrage doit être fourni. Cela peut être considéré comme le moment où la température moyenne est supérieure à la limite de confort inférieure,
- Ensuite, en utilisant le diagramme solaire approprié et le rapporteur (l'abaque des masques), calculer les **angles d'occultation horizontaux (HSA)** et **verticaux (VSA)** nécessaires.
- Et enfin **dimensionner** le dispositif par rapport aux dimensions de la fenêtre et les angles d'occultation.

Nous présentons, ci-dessous, en détail les différentes étapes de cette méthode.

#### 3.2.2.1 La zone de surchauffe

En se basant sur les températures de l'air enregistrées pour la zone étudiée, nous pouvons identifier la période de surchauffe pendant laquelle les températures dépassent 27°C. Cette période doit être ensuite transposée sur le diagramme solaire (Figure 37) afin de déterminer la hauteur solaire (H) et l'azimut solaire (Az) qui serviront à définir l'angle de profils critique (AP) ou angle d'occultation qui permet de dimensionner en coupe la protection solaire.

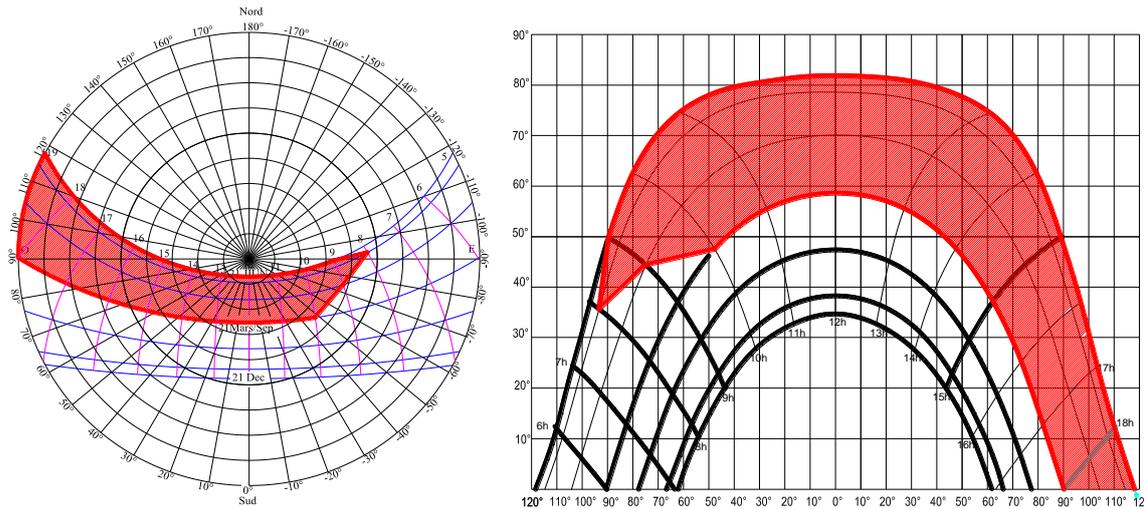


Figure 37: Zone de surchauffe représentée sur le digramme solaire sphérique à droite et cylindrique à gauche (Auteur)

### 3.2.2.2 Angles d'occultation optimaux horizontaux et verticaux

Lors de la conception d'une protection solaire, les angles d'occultation optimaux horizontaux et verticaux doivent être calculés. Ils dépendent de la position du soleil pendant la période de surchauffe et de l'orientation de la fenêtre. Les angles d'occultation sont mesurés perpendiculairement à la façade, il s'agit de convertir les angles solaires en angles fictifs, une pour le plan vertical et l'autre pour de le plan horizontal.

L'angle d'occultation horizontal (HSA) permet de dimensionner les dispositifs de protection verticaux. Il correspond à la différence entre l'azimut et l'orientation de la façade (Matusiak, 2006) (Figure 38).

$$HSA = AZ - \alpha$$

- HSA : L'angle d'occultation horizontal.
- AZ : L'azimut
- $\alpha$  : L'orientation de la façade.

L'angle d'occultation vertical (VSA) quant à lui est utilisé pour dimensionner les protections horizontales. Le VSA est l'angle que forme le plan qui passe par les deux coins inférieurs de la fenêtre et le soleil avec le plan horizontal (Szokolay, 2008; Matusiak, 2006) (Figure 38). Il est calculé par la formule suivante :

$$VSA = \arctan(\tan \text{altitude} / \cos HSA)$$

- ALT : La hauteur du soleil
- VSA : L'angle d'occultation vertical.
- HSA : L'angle d'occultation horizontal.
- $\alpha$  : L'orientation de la façade.

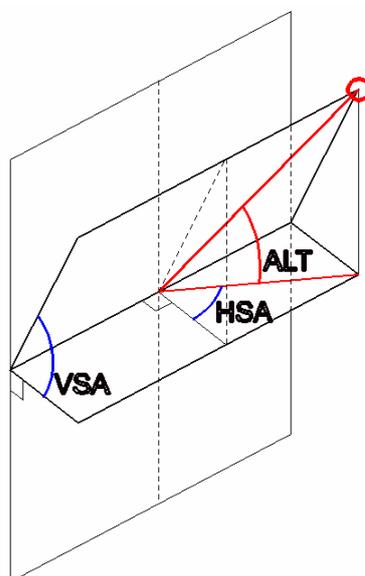


Figure 38 : Représentation de l'angle d'occultation vertical et horizontal (Matusiak, 2006)

Ces deux angles permettent également de définir la pénétration du soleil et la tache solaire au niveau du sol ou sur le plan de travail. Leur présentation graphique se fait par l'abaque des masques. Superposé au diagramme solaire correspondant à la latitude du lieu considéré et selon l'orientation de la façade, cet abaque permet d'identifier les deux angles d'occultation (Figure 39).

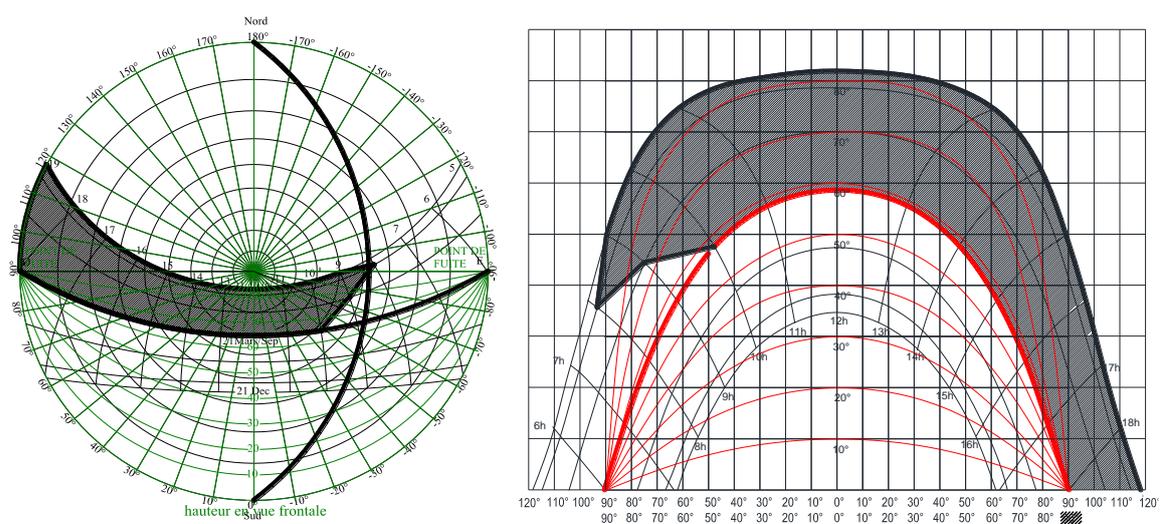


Figure 39 : Superposition de l'abaque des masques avec le diagramme solaire pour identifier les angles d'occultation

### 3.2.2.3 Les limites horizontales et verticales

Après avoir déterminé les angles d'occultation optimaux, il est possible de procéder au dimensionnement des protections solaires horizontales et verticales. Comme nous l'avons déjà précisé, les angles d'occultation horizontaux permettent de dimensionner les protections verticales tandis que les angles d'occultation verticaux sont utilisés pour dimensionner les protections horizontales.

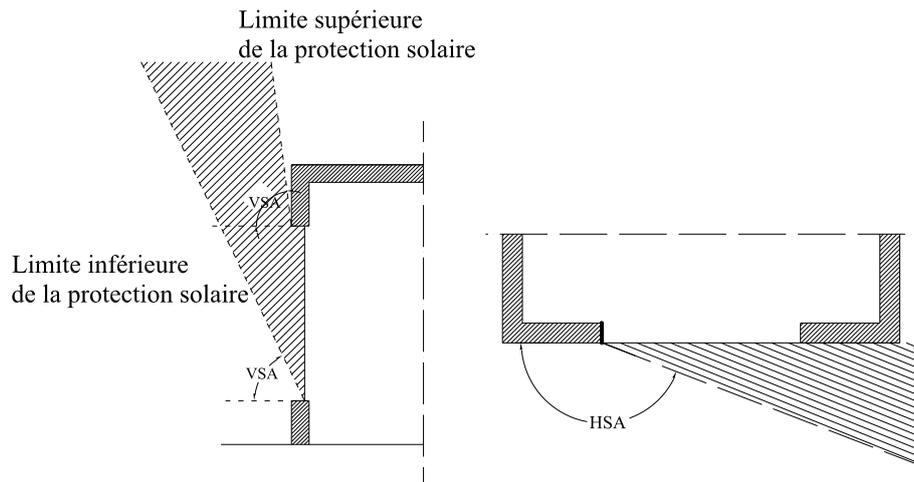


Figure 40: Les limites verticales d'une protection solaire (Auteur)

### 3.2.2.4 Ombres portées par des bâtiments voisins

Une partie du rayonnement solaire peut être masquée par les bâtiments voisins, c'est pourquoi il faut les prendre en considération lors du dimensionnement des protections solaires. Ces effets de masques peuvent être obtenus également à l'aide des diagrammes solaires. Szokolay (1996) a fourni une description complète de la méthode de prise en compte de ces masques (Figure 41), dont les étapes principales sont :

- Recueillir toutes informations disponibles telles que les plans de masse, les coupes, les élévations de tous les bâtiments environnants existants et à venir,
- Sélectionner les points critiques dans l'environnement qui peuvent conduire à de possibles effets de masques,
- Déterminer les azimuts de chaque point sélectionné sur un diagramme solaire,
- Déterminer les distances entre les points sélectionnés et les bâtiments voisins ainsi que leur hauteur, et enfin calculer les altitudes des tous les bâtiments voisins par rapport aux points.

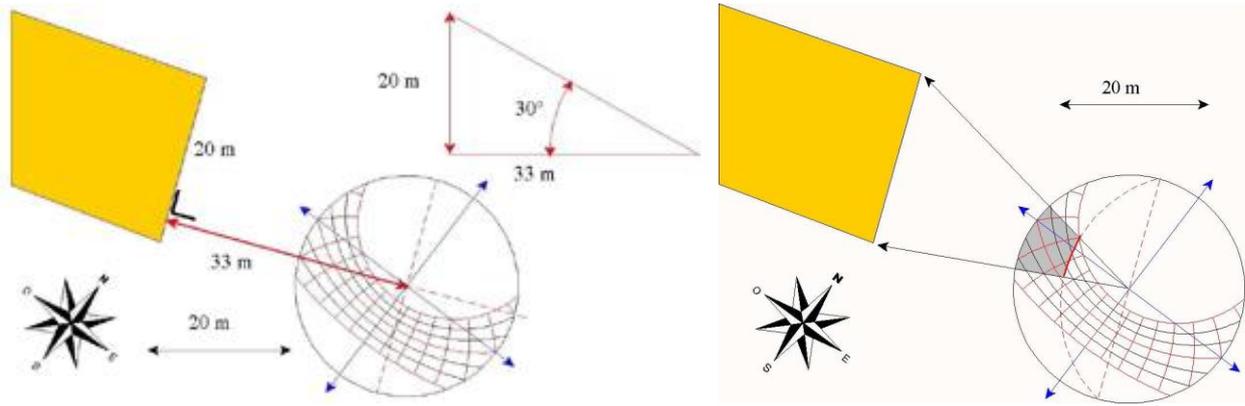


Figure 41 : Etablissement des masques urbains (Beckers, 2004)

Pour un calcul précis des protections solaires, il faut superposer dans un même digramme les masques urbains et la zone de surchauffe. La partie commune entre les deux ne sera pas prise en considération lors du calcul des angles d'occultation optimaux.

### **3.3 Paramètres de conception des protections solaires**

Plusieurs études ont été menées pour évaluer les performances des protections solaires par rapport à certains paramètres de conception. Ces paramètres sont généralement d'ordre géométrique à savoir : l'espacement entre les lamelles, leur profondeur, leur inclinaison, le rapport entre l'espacement et la profondeur des lamelles ou encore la forme des lamelles. Ces paramètres doivent être pris en compte lors de la conception d'une protection solaire.

#### **3.3.1 La profondeur des lamelles**

La profondeur des lamelles est l'un des paramètres de conception qui ont un impact sur les performances des protections solaires. Dans une étude d'optimisation des protections solaire, Bagheri Sabzevar & Erfan (2021) ont démontré que la consommation énergétique augmente en diminuant la profondeur. Ils ont démontré que la meilleure profondeur, de point de vue énergétique, est de 5 cm pour l'orientation sud, 35 cm pour l'ouest et 25 cm pour l'est. Cependant, il est à noter que l'effet de la profondeur est lié à l'espacement et l'angle d'inclinaison des lamelles.

Ossen & al. (Ossen, et al., 2005) ont étudié l'impact de la profondeur des protections solaires sur l'éclairage naturel et la consommation énergétique des bâtiments dans un climat chaud et humide. Six profondeurs ont été prises en considération, elles varient entre 0,73m et 2,92m, la hauteur de la fenêtre a été fixée à 1,82m. Ils ont démontré que, pour toutes les orientations, l'éclairage moyen au niveau du plan de travail et les charges de refroidissement diminuent en augmentant la profondeur des protections solaires cependant la consommation. D'autre part, Freewan, et al. (2009) ont démontré que la modification de la profondeur des lamelles modifie légèrement les niveaux d'éclairage tant que le rapport espacement/largeur est maintenu. Ils ont également démontré que l'utilisation d'une petite profondeur augmente le niveau d'éclairage près de la fenêtre et inversement le diminue au fond de la pièce. Cependant le facteur de lumière du jour diminue en augmentant la profondeur des lamelles (Freewan, et al., 2009; Chou, 2004) .

#### **3.3.2 L'espacement entre les lamelles**

De nombreuses recherches ont étudié l'impact de l'espacement des lamelles sur les performances des protections solaires. Bagheri Sabzevar & Erfan (2021) ont démontré que cet impact est plus important dans le cas de l'orientation sud et que la consommation d'énergie augmente en augmentant l'espacement. Ces auteurs recommandent un espacement de 10 cm pour les orientations sud et est et 15 cm pour l'orientation ouest.

Une distance élevée entre les lamelles a été adoptée par des recherches dans les climats chauds ; Hammad & Abu-Hijleh (2010) recommandent une distance de 0,3 m, tandis que Al-Zoubi (2010) recommande une distance de 0,5 m. Pour les deux études, le rapport entre l'espacement et la largeur des lamelles  $e/l$  est proche de 1 ce qui veut dire que l'angle d'occultation est de 45.

### **3.3.3 Le rapport entre espacement et profondeur des lamelles**

D'autres auteurs ont exploré l'impact du rapport entre espacement et profondeur (largeur) des lamelles. Datta, (Datta, 2001) a réalisé une étude analytique sur des protections solaires avec différentes géométries et inclinaisons dans différentes zones climatiques. Il a considéré trois ratios  $e/l$  (1, 2 et 0,92) et a démontré que la conception optimale dépend strictement de l'emplacement et des conditions météorologiques. Dans les climats froids où les consommations de chauffage sont plus fréquentes que la demande de refroidissement, une fenêtre sans protection est préférable.

Palmero-Marrero et Oliveira (2010) ont mené une étude sur l'impact des protections solaires pour différentes latitudes. Dans cette étude, les besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation ont été quantifiés sous différentes conditions climatiques (Mexico, le Caire, Lisbonne, Madrid et London). Trois cas, avec différents rapports entre espacement et largeur des lamelles, ont été étudiés pour chaque latitude, avec un espacement variant entre 0,23 m et 0,26 m selon la latitude. Les auteurs ont démontré que la demande énergétique annuelle pour le chauffage et la climatisation augmente en diminuant le ratio  $e/l$ .

La même conclusion a été tirée par Nielsen (2011) sur un modèle de simulation avec un espacement vertical d'environ 0,05 m. Dans cette recherche, on a souligné que les aspects contradictoires des besoins énergétiques pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage artificiel devraient être évalués simultanément pour identifier la protection la plus performante. Ils ont également démontré que l'adoption d'une protection solaire dynamique constitue la meilleure alternative de conception.

Ossen & al. (2005) ont étudié l'impact du facteur de projection qui est le rapport entre la largeur de la protection solaire horizontale et la hauteur de la fenêtre. Ils ont démontré que le facteur de projection optimal pour l'éclairage est de 1 pour les orientations est et sud, 1,4 pour l'orientation ouest et 0,4 pour l'orientation nord. Cependant pour la consommation énergétique totale ils recommandent un facteur de projection optimal de 1 pour les orientations nord et sud, 1,2 pour l'orientation ouest et 1,3 pour l'orientation est.

D'autre part les niveaux d'éclairement, l'autonomie de l'éclairage naturel (DA) ainsi que l'indice de l'éclairage naturel utile (UDI) diminuent en augmentant le rapport  $e/l$  (David, et al., 2011).

### **3.3.4 L'angle d'inclinaison**

L'utilisation des protections solaires avec des lamelles inclinées diminue le niveau d'éclairement (Freewan, et al., 2009). Selon Hammad et Abu-Hijleh (2010) et Alzoubi & Al-Zoubi (2010) les niveaux d'éclairement diminuent en changeant l'orientation des lamelles de l'horizontale à l'inclinée. D'autre part, plusieurs recherches ont montré que la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation augmente en réduisant l'angle d'inclinaison des lamelles (Bagheri Sabzevar & Erfan, 2021; Hammad & Abu-Hijleh, 2010; Alzoubi & Al-Zoubi, 2010). Lee, et al. (1998) Considèrent un angle d'inclinaison optimal de  $45^\circ$  pour atteindre une économie d'énergie maximale pour la climatisation et l'éclairage artificiel. Cependant Hammad et Abu-Hijleh (2010) recommandent un angle d'inclinaison de  $-20^\circ$  ( $70^\circ$  par rapport à la vertical) pour la façade orientée sud et de  $20^\circ$  pour les façades orientées est et ouest permettant une économie d'énergie de 31% à 35%.

En prenant en considération le confort thermique et la consommation énergétique, Krstić et al (Krstić, et al., 2019) recommandent des angles d'inclinaison optimale de  $105^\circ$  à  $120^\circ$  pour la façade sud et entre  $45^\circ$  et  $75^\circ$  pour les façades est et ouest.

Datta, (2001) a effectué une étude analytique sur des protections solaires avec différentes inclinaisons. L'impact de quatre inclinaisons a été étudié :  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ . Datta (2001) suggère que l'adoption de lamelles inclinées à  $60^\circ$  est la meilleure solution dans les climats chauds. Cependant Bagheri Sabzevar & Erfan (2021) recommandent un angle d'inclinaison de  $35^\circ$  pour l'orientation sud et  $45^\circ$  pour l'orientation est et ouest. Freewan (2014) a étudié l'impact des protections solaires sur les températures de l'air et l'éclairage naturel, et a démontré que l'angle d'inclinaison optimal pour une orientation ouest varie entre  $45^\circ$  et  $47^\circ$ . Dubois (2003) recommande également un angle d'inclinaison de  $45^\circ$  pour diminuer les risques d'éblouissement tandis que les lamelles horizontales (angle d'inclinaison de  $0^\circ$ ) offrent des niveaux d'éclairement plus élevés.

## **3.4 Impact des protections solaires**

Les études effectuées sur l'impact des protections solaires portent essentiellement sur leur évaluation par rapport à trois types de performances : thermique, lumineuse et énergétique. Vue

les effets contradictoires des protections solaires sur ces différentes performances, des études multicritères ont été également effectuées dans l'objectif d'optimiser ces dispositifs. Plusieurs études ont exploré l'impact des protections solaires sur le confort visuel et thermique (Tzempelikos & Roy, 2004; David, et al., 2011; Freewan, 2014; Tzempelikos, 2008). D'autres études ont évalué la demande énergétique pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage (Nielsen, et al., 2011; Settino, et al., 2020). D'autre part, très peu d'études ont été effectuées pour évaluer l'impact environnemental des protections solaires en considérant le cycle de vie. Toutefois, il est à noter que les performances des protections solaires dépendent du type de protection, son emplacement ainsi que les considérations climatiques (Datta, 2001).

Nous présentons ci-dessous, à travers les recherches antérieures, l'impact des protections solaires sur les performances thermiques, lumineuses et énergétique, en mettant l'accent sur les résultats obtenus.

**Sur les conditions thermiques :** Les travaux sur les performances thermiques des protections solaires sont très abondants. Un grand nombre de recherches ont abordé la question de l'effet thermique (Tzempelikos, et al., 2010; Datta, 2001; Freewan, 2014; Ossen, et al., 2005; Al Touma & Ouahrani, 2017; Bessoudo, et al., 2010; Tzempelikos, et al., 2007; Hammad & Abu-Hijleh, 2010). La plupart de ces recherches ont été effectuées par rapport aux climats froids (Tzempelikos, et al., 2010; Datta, 2001; Dubois & Blomsterberg, 2011; Dubois, 1998; Freewan, et al., 2009; Freewan, 2014; Bessoudo, et al., 2010; Tzempelikos, et al., 2007), celles effectuées dans les climats chauds sont peu abondantes (Freewan, 2014; Ossen, et al., 2005; Al Touma & Ouahrani, 2017; Hammad & Abu-Hijleh, 2010).

Ces études ont montré que les protections solaires affectent significativement les conditions thermiques à l'intérieur des bâtiments. Les protections solaires diminuent la quantité du rayonnement solaire qui traverse la fenêtre et donc diminuent considérablement les températures de l'air et améliorent les conditions de confort thermique en été. Freewan (2014) montre que, dans un climat chaud, une protection solaire avec des lamelles verticales peut réduire la température de l'air de 2.75°C en mois d'août, tandis que l'utilisation des lamelles verticales inclinées réduit la température de l'air de plus de 6.5°C. D'autre part Bessoudo et al (2010) et Tzempelikos et al. (2007) ont montré que les protections solaires améliorent aussi les conditions thermiques dans un climat froid. Des différences de températures de plus de 3,5° ont été enregistrées en été (Ylitalo, et al., 2012).

**Sur les conditions lumineuses :** Certains auteurs ont étudié l'effet des protections solaires sur les niveaux d'éclairage naturel (Dubois, 2003; Wong & Djoko, 2004; Freewan, et al., 2009; Kim & Kim,

2009; Wong & Djoko, 2004; Dubois, 2001). La protection solaire réduit les niveaux d'éclairement près de la fenêtre en diminuant le rayonnement solaire direct, cependant elle contribue à améliorer les niveaux d'éclairement au fond de la pièce et l'uniformité de l'éclairement par la réflexion du rayonnement solaire (Kim & Kim, 2009; Freewan, et al., 2009). Elle diminue également l'autonomie de l'éclairage naturel (DA) et l'indice de l'éclairage naturel utile (UDI) (David, et al., 2011). D'autre part les résultats de la recherche menée par Lim et al (2012) ont mis en évidence que la protection solaire augmente l'uniformité de la lumière et améliore significativement les conditions de confort visuel, mais ne réduise pas les risques d'éblouissement.

**Sur la consommation de l'énergie :** Des études abondantes ont été établies au sujet de l'impact des dispositifs de protection solaire sur l'utilisation d'énergie. Au début la recherche dans ce domaine s'est concentrée sur l'impact des dispositifs de protection solaire sur les charges de refroidissement. Toutes ces études ont prouvé que la protection solaire réduit considérablement l'énergie utilisée pour le refroidissement des bâtiments. Kim & al. (2012) a démontré qu'une protection solaire d'une profondeur de 0.5m réduit la consommation énergétique pour la climatisation de plus de 10%. Cette réduction dépasse 25% lorsque l'angle d'inclinaison est égal à 0°. Dans le cas d'une profondeur de 1.5m, l'économie d'énergie atteint 35%.

D'autres études ont démontré que les protections solaires ont un impact négatif sur les charges de chauffage, car ils réduisent les gains solaires utiles pendant l'hiver (Szokolay, 1996; Dubois.M-C, 1997; Bader, 2011).

Les résultats obtenus par Palmero-Marrero et Oliveira (2014) montrent également que l'utilisation des protections solaire réduit la consommation énergétique pour le refroidissement. Néanmoins un contrôle automatique des protections solaires est nécessaire dans les climats froids afin d'éviter une consommation énergétique élevée pour le chauffage. Le contrôle des protections solaire permet également de réduire la demande énergétique pour le refroidissement jusqu'à 60% (Tzempelikos & Roy, 2004).

Ossen, Ahmad, & Madros (2005) ont conclu que, selon l'orientation de l'ouverture, des économies d'énergie pour le refroidissement de 19% à 31% peuvent être obtenues en adoptant des profondeurs optimales. Dubois (1998) a également montré que la profondeur a un impact significatif sur les charges de refroidissement. De son côté, Gratia (2007) a conclu que le choix judicieux des paramètres de conception des protections solaires (l'emplacement, la taille et la couleur) permet d'économiser jusqu'à 14,1% de la consommation de refroidissement de l'ensemble des bâtiments.

Al Touma & Ouahrani (2017) ont montré que, dans un climat chaud, une protection solaire horizontale avec un angle d'inclinaison de 90° permet d'économiser la demande énergétique totale pour les façades sud et nord jusqu'à 20,6 % et 9,1 % respectivement.

Nielsen et al (2011) ont démontré que la consommation énergétique totale augmente avec l'utilisation des protections solaires (Nielsen, et al., 2011). Selon Dubois (1998) L'utilisation d'un auvent fixe pendant toute l'année augmente la consommation énergétique de 11 kWh/m<sup>2</sup>. D'autre part, une économie d'énergie totale de 12 kWh/m<sup>2</sup> pourrait être obtenue en utilisant un auvent saisonnier simple.

L'attention a été également accordée à l'impact des protections solaires sur l'utilisation de l'énergie pour l'éclairage artificiel. Beaucoup d'investigations ont prouvé que l'énergie utilisée pour l'éclairage artificiel représente une partie importante de la consommation énergétique. L'éclairage artificiel produit également des gains internes de la chaleur, nécessitant une ventilation mécanique et un refroidissement. L'utilisation de l'éclairage naturel a deux avantages : elle réduit la consommation directe de l'électricité pour l'éclairage et réduit indirectement la demande de refroidissement par une réduction de la charge thermique interne (Nielsen, et al., 2011).

Il a été constaté que, même dans un climat froid, les demandes de refroidissement dominent la demande totale d'énergie. Les protections solaires sont essentielles pour réduire la demande énergétique pour le refroidissement, cependant leur utilisation pourrait contribuer à augmenter la consommation énergétique pour le chauffage et l'éclairage artificiel, mais en même temps, cela pourrait être nécessaire afin d'éliminer les risques d'éblouissement (Grynning, et al., 2014; Grynning, et al., 2011).

### **3.5 Evaluation des performances des protections solaires**

L'impact des protections solaires sur la consommation d'énergie, le confort thermique et les performances d'éclairage naturel a été étudié expérimentalement et théoriquement. Bien que les recherches basées sur la simulation numérique sont plus abondantes, certains les considèrent pas très fiables et doivent être validées expérimentalement (Cuevas, et al., 2010). Quelques recherches se sont basées à la fois sur des études expérimentales et numériques. Les études expérimentales avaient comme objectif de valider l'outil de simulation numérique par la comparaison des résultats obtenus pour les deux méthodes.

### 3.5.1 Les études expérimentales

L'analyse de la littérature existante a mis en évidence le manque d'études expérimentales sur les dispositifs de protection solaire visant l'évaluation de divers aspects, tels que la consommation énergétique, l'éclairage naturel et le confort thermique. Les études expérimentales visent essentiellement à mesurer les conditions environnementales intérieures à l'aide des instruments de mesure.

Des études expérimentales sur cette question ont été menées par Cuevas et al. (2010). En construisant un banc d'essai dans le but de comparer différentes protections solaires et de proposer un modèle empirique (Figure 42). Il s'agit d'une chambre climatique de 4,5 m de longueur, 3,2 m de largeur et 2,20 m de hauteur, placée à l'intérieur d'une autre chambre climatique afin d'éliminer l'effet du rayonnement solaire et toutes autres perturbations. Les températures ont été mesurées avec des thermocouples et avec un système d'acquisition de données. Des thermocouples ont été placés sur chaque mur pour mesurer les températures de surface, et un thermocouple au centre de la salle d'essai pour mesurer la température de l'air.

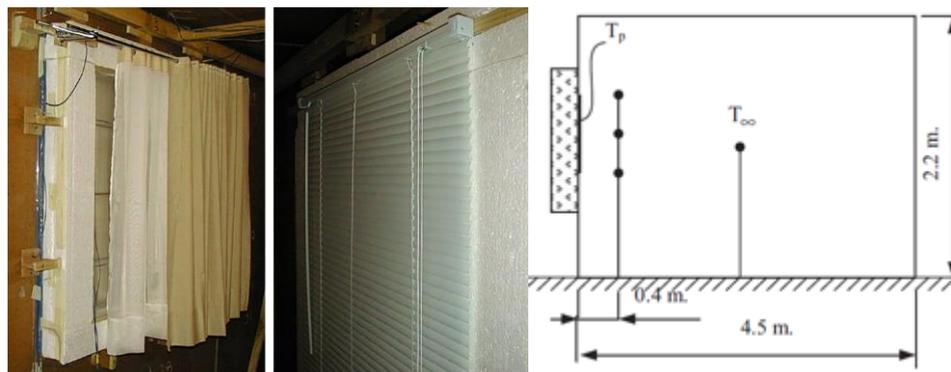


Figure 42 : Modèle expérimentale utilisé par Cuevas et al. (2010)

Machin et al. (1998), ont également mené une étude expérimentale en utilisant un modèle construit afin d'étudier l'effet de protection solaire, avec différents angles d'inclinaisons, sur le coefficient de transfert thermique du vitrage. Serra, et al. (2010), ont réalisé une étude expérimentale sur une façade climatique avec lame d'air ventilée mécaniquement. Le banc d'essai expérimental se compose de deux cellules d'essai identiques ; la première est utilisée comme référence et sa façade reste inchangée pendant toute la campagne de mesure. Alors que l'autre cellule est destinée à accueillir différentes configurations de protection solaire. Les dimensions internes de ces cellules mesuraient 3,6 m de longueur, 1,6 m de largeur et 2,5 m de haut. Elles sont placées sur le toit du laboratoire d'énergétique, à l'École polytechnique de Turin, afin d'être exposées au rayonnement solaire sans aucun effet d'ombre et elles sont dotées de roulettes afin

de pouvoir les faire pivoter facilement pour changer l'orientation de la façade. Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'installation d'un essai TWINS (Testing Window Innovative Systems), pour d'évaluer l'efficacité énergétique et les implications sur le confort thermique.

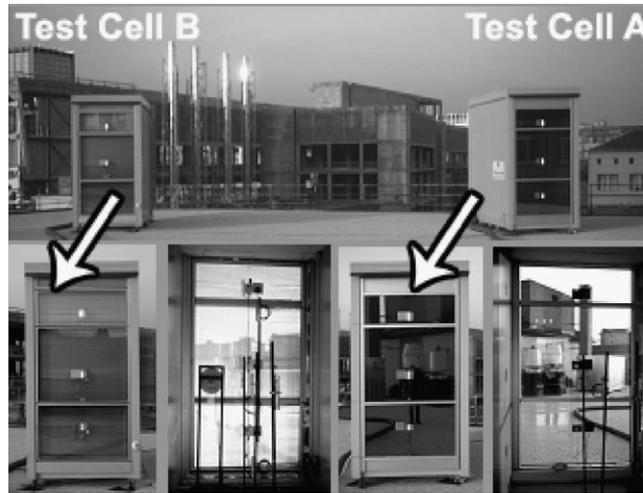


Figure 43 : Les deux cellules utilisées dans l'étude expérimentale de Serra, et al. (2010)

D'autres recherches ont effectué des études expérimentales et comparer leurs résultats avec ceux obtenus par la simulation numérique dans le but de valider l'outil de simulation. Al Touma et Ouahrani (2017) ont effectué une étude expérimentale afin d'évaluer la précision de la simulation dans la modélisation de l'impact des protections solaire et de valider le modèle développé sur le logiciel de simulation dynamique EnergyPlus version 8.5. Les expériences ont été menées dans deux chambres extérieures construites à l'Université du Qatar (Figure 44). Chaque chambre est composée de deux pièces de 2,32m x 3,26m x 2,32m, avec une façade orientée sud. Tous les murs intérieurs des pièces ainsi que le sol et le plafond sont constitués d'une couche d'isolation en polystyrène de 10 cm d'épaisseur ( $U = 0,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) pour un transfert de chaleur minimal. Chaque pièce est équipée :

- D'un thermocouple de type K à différentes hauteurs (0,6 m, 1,2 m et 1,8 m) pour mesurer les températures de surface,
- D'un capteur de température d'air placé au milieu de la pièce à une hauteur de 1,5 m pour les températures de l'air.
- et d'un pyranomètre placé verticalement au milieu de la pièce à une hauteur de 1,1 m pour mesurer les radiations solaires.

La comparaison entre les modèles expérimentaux et de simulation a montré des écarts maximum de 11,8 % et 13,5 % respectivement pour la température de surface et la charge thermique maximale. Après validation, le modèle de simulation a été utilisé pour évaluer les

économies d'énergie annuelles associées à l'utilisation de protection solaires sur les façades orientées sud et nord au Qatar.



Figure 44 : Chambres expérimentales extérieures utilisées par Al Touma et Ouahrani (2017)

Kotey et al. (2009) ont également comparé les résultats de l'expérimentation avec ceux obtenus à l'aide de la simulation avec le logiciel IES-VE (Integrated Environmental Solutions-Virtual Environment). Ils ont constaté que la différence absolue entre les deux méthodes était inférieure à 0,05.

D'autre part des recherches ont effectuée des mesures in situ dans des bâtiments existant en utilisant des instruments permettant de mesurer les paramètres physiques nécessaires pour l'évaluation thermique. Bessoudo et al. (2010), ont effectué des mesures dans un immeuble de bureau à Montréal. La zone d'essai, d'une façade de 10 m de longueur, a été divisée en six sections de fenêtres de 1,5 m de largeur, 4,4 m de hauteur et 2,3 m de profondeur. Chaque section est équipée d'un type de protection solaire et séparée par des rideaux en tissu épais de chaque côté pour former une section expérimentale isolée. Les auteurs ont utilisé un analyseur de climat intérieur permettant de mesurer la vitesse de l'air, l'humidité, la température de l'air et la température radiante moyenne.

Freewan (2014) a également effectué une étude expérimentale dans le but d'étudier l'impact de différents types de protection solaire sur la température de l'air, le niveau d'éclairage et la distribution de l'éclairage dans un bâtiment situé dans le campus de l'université des sciences et technologies en Jordanie. Les mesures ont été effectuées dans quatre bureaux identiques. Le premier bureau sans protection sert de référence tandis que les trois autres bureaux sont équipés chacun d'un type de protection solaire (Figure 45). Les températures de l'air ont été mesurées à l'aide d'un thermomètre et des luxmètres ont été utilisés pour mesurer les niveaux d'éclairage.

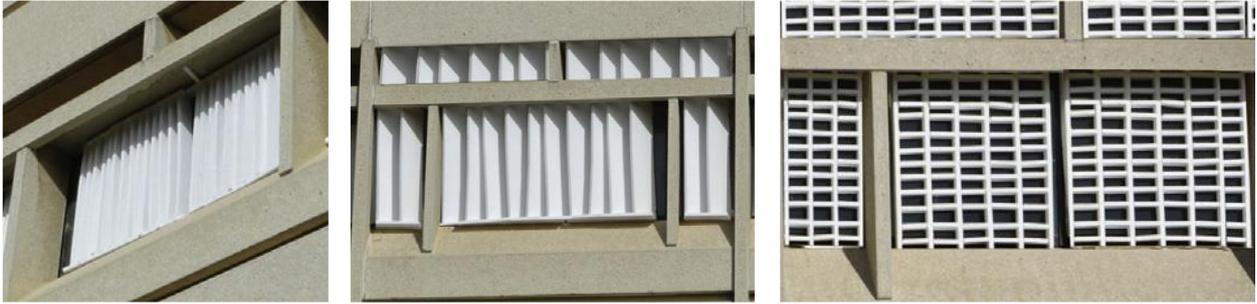


Figure 45 : Types de protection solaire étudiés par Freewan (2014)

D'autre part, l'effet de la protection solaire sur l'éclairage naturel a été étudié expérimentalement par des mesures in situ recueillies dans des bâtiments existants (Yun, et al., 2014) ou des modèles réduits (Claros & Soler, 2001).

Les études expérimentales ont l'avantage de fournir des résultats réels. Cependant le nombre de variantes à évaluer est très réduit. De plus la mise en place des essais nécessite beaucoup de moyen (instruments de mesure, matériaux, différents dispositifs ...) et le temps et le coût de leur préparation sont énorme. Il est à noter également que les conditions limites ne sont pas exactement les mêmes lors des différents essais.

### 3.5.2 Les simulations numériques

La simulation numérique est largement et systématiquement utilisée dans la littérature pour étudier les différentes performances des protections solaires. D'innombrables avantages ont encouragé les chercheurs à opter pour cet outil. Par rapport à l'expérimentation, elle prend moins de temps et produit, selon le logiciel utilisé, des résultats très proches de la réalité. En plus elle est plus rentable en réduisant les dépenses liées à la construction du modèle et l'utilisation des instruments de mesures. Depuis les années 1990, plusieurs logiciels ont été développés, et utilisés dans les recherches sur les protections solaires. De manière générale, ces outils sont classés en quatre catégories :

- **Simulation thermique** : Le logiciel de simulation thermique le plus utilisé est sans doute TRNSYS (Datta, 2001; De Michele, et al., 2015; Palmero-Marrero & Oliveira, 2014; Tzempelikos, et al., 2007). C'est un logiciel capable de modéliser des systèmes énergétiques complexes. Il ne possède pas de bibliothèque standard et fournit aux utilisateurs une méthode simple pour modifier ou ajouter des composants (Kirimtat, et al., 2016). Il est également utilisé pour prédire la consommation énergétique des bâtiments pour le chauffage et la climatisation. (Bodart & De Herde, 2002; Palmero-Marrero &

Oliveira, 2014; De Michele, et al., 2015; Oliveira & Palmero-Marrero, 2010; Bellia, et al., 2013; Ossen, et al., 2005)

- **La simulation de l'éclairage** : Plusieurs logiciels existent permettant d'évaluer les performances lumineuses des protections solaires (Radiance, Superlite, ADELIN, DAYSIM...). Cependant leur fiabilité diffère. Radiance (LBN, s.d.) permet d'estimer, avec précision, les niveaux d'éclairage à l'intérieur des espaces. Il présente des interfaces pour modéliser et traduire la géométrie de l'espace, les données des luminaires et les caractéristiques des matériaux. Il est largement utilisé par les chercheurs notamment dans l'évaluation des performances lumineuses des protections solaires (Freewan, et al., 2009; Vera, et al., 2016; De Michele, et al., 2015; Lim, et al., 2012 ; Freewan, 2014). Grynberg (1989) a montré, à travers une étude comparative avec le logiciel Superlite, que les résultats obtenus avec Radiance sont très proches de ceux obtenus à partir d'un modèle physique. D'autre part, Bodart & De Herde (2002) ont opté pour le logiciel ADELIN. Cependant Wong et Djoko (Wong & Djoko, 2004) ont étudié les performances lumineuses des protections solaires en utilisant le logiciel LIGHTSCAPE développé par Autodesk, INC., États-Unis (Autodesk, Inc, 1999). Il a été démontré que ce logiciel prédit avec précision les performances de l'éclairage naturel en adoptant à la fois les méthodes de radiativité et de lancer de rayons (Shalaby , 2002). D'autres logiciels permettent d'effectuer des simulations dynamiques de l'éclairage naturel, dont le plus fiable est DAYSIM (Reinhart & Walkenhorst, 2001).
- **Simulation de la consommation énergétique** : en plus du logiciel TRNSYS présenté ci-dessus, d'autres logiciels ont été développés afin de calculer la consommation énergétique :
  - **EnergyPlus** un outil très répandu dans le domaine de l'analyse énergétique des bâtiments à travers le monde (Stadler, et al., 2006) combinant les meilleures capacités et fonctionnalités de BLAST et DOE-2 avec de nouvelles fonctionnalités (Fumo, et al., 2010). EnergyPlus permet la modélisation du chauffage, du refroidissement, de l'éclairage, de la ventilation et d'autres flux d'énergie. Plusieurs recherches ont utilisé EnergyPlus afin d'évaluer la performance énergétique des protections solaires (Shen, et al., 2014; Yun, et al., 2014; Vera, et al., 2016; Yi , et al., 2015; Loutzenhiser, et al., 2007; Yao & Yan, 2011; Athienitis & Tzempelikos, 2002; Bellia, et al., 2014).
  - **DOE-2** est un programme d'analyse énergétique des bâtiments développé par le groupe de recherche sur la simulation de *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Il permet d'effectuer une simulation énergétique détaillée, horaire, d'un bâtiment complexe à plusieurs zones et d'estimer la performance

énergétique et le coût de l'exploitation du cycle de vie. L'utilisateur fournit la disposition du bâtiment, l'emplacement géographique et l'orientation du bâtiment, les composants de l'enveloppe et les matériaux de construction, les horaires d'exploitation, les systèmes de conditionnement et le barème des tarifs des services publics, ainsi que les coûts des composants du bâtiment et les données météorologiques. Il offre la possibilité d'établir une prévision des factures de services publics (Associates, s.d.). Il a été utilisé par Ossen et al. (2005).

- **La simulation intégrée** : Des logiciels intégrant des simulations thermiques et d'éclairage naturel ont été également développés, à citer :
  - **iDbuild** développé à l'Université technique du Danemark permet de calculer la demande énergétique totale en tenant compte des besoins énergétiques pour le chauffage, la ventilation, l'eau et l'éclairage artificiel, (Petersen & Svendsen, 2010; Nielsen, et al., 2011). Ce programme se compose de deux parties : une simulation thermique gérée par Building-Calc (Nielsen, 2005) et une simulation de l'éclairage naturel gérée par Light-Calc (Hviid, et al., 2008).
  - **IES-VE** (Integrated Environmental Solutions- Virtual Environment), est un logiciel de simulation largement utilisé dans le processus de conception de bâtiments ainsi que par les chercheurs. En plus de son interface graphique conviviale, il a l'avantage de pouvoir traiter une énorme quantité d'informations en très peu de temps et ses résultats sont très proches de la réalité (Kotey, et al., 2009). Ce logiciel permet une amélioration des performances thermiques pour obtenir des réponses rapides au début de la conception et une analyse détaillée lors des étapes de conception ultérieures (Attia, et al., 2009). De nombreux recherches sur les protections solaires ont opté pour ce programme (Kim, et al., 2012; Al-Tamimi & Fadzil, 2011; Hammad & Abu-Hijleh, 2010).
  - **ESP-r** est un outil de modélisation énergétique intégré permettant de gérer des séries de simulation pour les performances thermiques, visuelles et acoustiques pour les bâtiments. Il fournit une modélisation des flux de chaleur, d'air, d'humidité, de lumière et d'énergie électrique. Il aide les concepteurs à explorer les relations entre la forme, le tissu, le flux d'air, le plan et le contrôle d'un bâtiment. Il contient un gestionnaire de projet central avec des bases de données, un simulateur, des outils d'évaluation des performances, des applications pour la CAO et la génération de rapports (ESP-r, s.d.).

Il est à noter que les simulations numériques ne sont pas sans inconvénients, principalement la nécessité d'un logiciel validé, des machines puissantes ainsi que la maîtrise du logiciel par l'utilisateur.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons établi un état de l'art sur les aspects relatifs aux protections solaires. En premier lieu, nous avons présenté les différentes typologies de protection solaire dont la classification est basée sur leur emplacement (protections solaires internes et externes) et leur mobilité (fixes ou mobiles). Le choix d'une protection solaire dépend de nombreux paramètres liés au bâtiment (orientation et taille des ouvertures) et au site (latitude, conditions climatique et masques urbains).

Nous avons également présenté les méthodes de conception des protections solaires. Ces méthodes s'appuient essentiellement sur des connaissances de la géométrie solaire qui sont à la base de l'établissement des outils graphiques (Diagramme solaire et abaque des masques).

Nous ne pouvions pas aborder la question des protections solaires sans présenter l'ensemble des études effectuées dans ce domaine. Cela nous a aidés à mieux comprendre le contenu de ces recherches notamment les préoccupations liées à notre sujet. Nous avons pu dégager l'ensemble des paramètres de conception des protections solaires ayant une influence sur leurs performances thermiques, lumineuses et énergétique. Ces paramètres sont essentiellement liés à la configuration géométrique des protections solaire, à savoir la profondeur des lamelles, l'espacement entre les lamelles et leur inclinaison. Il est à noter que l'impact de ces paramètres sur les différentes performances dépend principalement des conditions climatiques de la zone étudiée.

Nous avons conclu ce chapitre en présentant les différents outils permettant de prédire le comportement des dispositifs de protection solaire. Notre objectif principal était de comparer ces outils, à travers leurs avantages et inconvénients, pour définir leurs performances et aptitudes dans l'évaluation des protections solaires.

Maintenant que tous les points relatifs aux protections solaires ont été éclaircis, nous entamons la prochaine partie consacrée à l'évaluation des performances thermiques, lumineuses et énergétiques des protections solaires.

*Deuxième partie : "ÉVALUER" les  
performances thermiques et lumineuses  
des protections solaires dans les  
climats arides*

## 4 Chapitre IV : Préparation de la simulation

### Introduction

Comme nous l'avons déjà dit précédemment, l'effet thermique et lumineux d'une protection solaire dépend de plusieurs paramètres. Ici, nous étudions ceux que l'architecte peut manipuler dans les premières phases de conception de ces dispositifs.

Dans cette recherche, nous avons opté pour la simulation numérique car pour les mesures in situ, il est difficile de trouver des cas d'études qui obéissent aux critères que l'on cherche à tester. Nous envisageons une analyse paramétrique en utilisant la simulation numérique et en faisant varier les paramètres agissants sur les performances thermiques et lumineuse d'une protection solaire.

Il est nécessaire de définir les étapes préalables à l'analyse paramétrique permettant la mise en œuvre des différentes simulations :

- Tout d'abord, il est indispensable de fixer les paramètres à étudier et définir, à partir de leurs combinaisons, des configurations géométriques représentatives.
- Ensuite, il est nécessaire de choisir les outils de simulation à utiliser pour évaluer les différentes configurations.

Nous organisons donc ce chapitre en deux parties :

- La première partie est consacrée à l'identification des différents paramètres de conception des protections solaires. La combinaison de ces paramètres donne naissance aux configurations géométriques qui seront évaluées dans la simulation numérique.
- Dans la seconde section, nous abordons les outils de simulation utilisés. L'objectif étant d'étudier deux phénomènes différents ; thermique et lumineux, il est indispensable de faire intervenir deux types d'outils de simulations, simulation thermique et simulation d'éclairage. Le choix a été porté sur le logiciel de simulation thermique dynamique

TRNSYS 17 permettant de calculer les températures de l'air et la consommation énergétique, ainsi que le logiciel RADIANCE 2.0 pour la simulation de l'éclairage. Ce dernier ne permet pas d'effectuer des simulations dynamiques, c'est pourquoi nous avons fait appel à un troisième logiciel, il s'agit du logiciel DAYSIM3.1.

## 1.1 Identification des paramètres à considérer

Dans cette étude, nous cherchons à optimiser les performances thermique et lumineuse des protections solaires. Notre démarche consiste à simplifier les paramètres à considérer en vue d'étudier leurs influences. A travers la recherche bibliographique, nous avons pu déterminer les paramètres de conception des protections solaire qui ont une incidence sur l'ambiance thermique et lumineuse à l'intérieur des espaces. Nous les avons classés en trois groupes de critères qui sont :

- **La géométrie des protections solaires** : angle d'inclinaison, forme, longueur des lamelles et espacement entre les lamelles.
- **Les caractéristiques physiques** : la réflectivité des surfaces.
- **La position par rapport au vitrage** : intérieur, extérieur ou mixte.

Nous évaluons l'impact de ces paramètres sur les conditions thermiques et lumineuses à l'intérieur de l'espace. Les critères d'évaluation pris en compte sont : **la température de l'air, le niveau d'éclairage et la consommation énergétique**. Cette dernière sera calculée pour la climatisation et le chauffage. Nous avons étudié seulement le cas d'une protection solaire extérieure. Il a été déjà démontré que la position la plus favorable d'une protection solaire est la position extérieure (par rapport au vitrage), car celle-ci empêche le rayonnement solaire direct de traverser le vitrage et de provoquer ainsi un effet de serre (Datta, 2001; Lechner, 2008).

### 1.1.1 Modèle et conditions de simulation

Les simulations ont été effectuées sur un modèle de base (Figure 46) de 6 m de profondeur, 4 m de largeur et 3 m de hauteur. Le local est éclairé par une fenêtre latérale d'une surface de 3,6 m<sup>2</sup> (2m\* 1,8 m), centrée horizontalement, soit un ratio fenêtre-mur de 30 % et un ratio fenêtre-sol de 15 %. La pièce a été modélisée comme une zone séparée et aucune obstruction externe n'a été prise en compte.

Dans ces simulations, nous avons pris en considération :

- Quatre orientations : Nord, Sud, Est et Ouest.
- Le type de vitrage : le vitrage simple.
- La réflectance de surface est de 80 %, 60 % et 40 % pour le plafond, les murs verticaux et le sol respectivement.

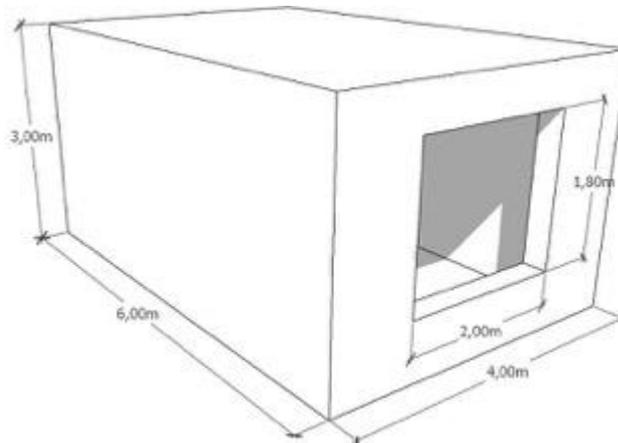


Figure 46 : Modèle de simulation

Nous avons pris comme cas d'étude la ville de Ghardaïa caractérisée par son climat chaud et sec et dont les caractéristiques sont :

- Latitude : 32.23°N,
- Longitude : 3.49°E,
- Altitude : 450m,
- Albédo : 0.30,
- Type de ciel : Ciel clair avec soleil.
- Les données climatiques : température de l'air de la ville de Ghardaia (Figure 47).

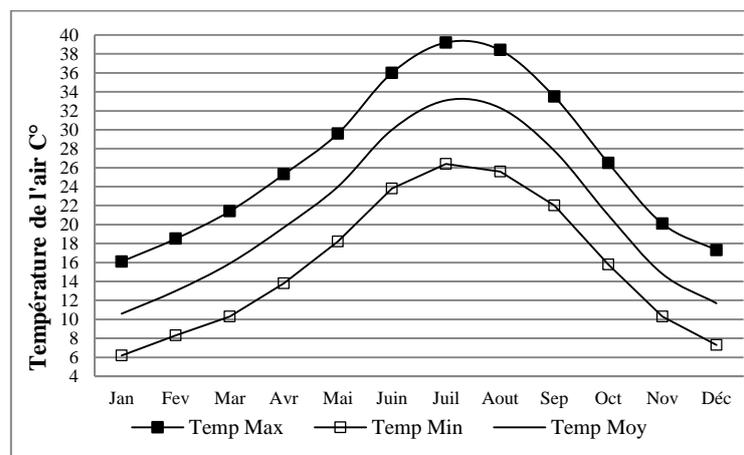


Figure 47 : Température de l'air de la ville de Ghardaïa (Capderou, 1986)

### 1.1.2 Dimensionnement des protections solaires

Avant de définir les valeurs des paramètres de conception (profondeur des lamelles, leur espacement et leur angle d'inclinaison) nous devons procéder au calcul des angles d'occultation optimaux. Il s'agit des limites horizontales et verticales d'une protection solaire, calculées afin d'empêcher la pénétration du rayonnement solaire pendant la période de surchauffe, la transmission solaire durant cette période est égale à 0. Nous nous sommes basés sur la méthode de Szokolay (1996) présentée précédemment.

A partir des températures de l'air, nous pouvons définir la période de surchauffe (Figure 48) correspondant aux températures de l'air supérieures à 27°C. Ces horaires sont ensuite transposés sur le diagramme solaire (Figure 49) afin de déterminer la hauteur solaire (H) et l'azimut solaire (Az) qui serviront ensuite à définir l'angle de profil critique (Ap) ou angle d'occultation. Cet angle permet de dimensionner en coupe la protection solaire.

H	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
6h	6,2	8,3	10,3	13,8	18,2	23,8	26,4	25,6	22	15,8	10,3	7,3
7h	6,4	8,7	10,7	14,1	18,6	24,3	26,7	26	22,3	16,3	10,6	7,5
8h	7,2	9,9	11,3	14,9	19,7	24,9	27,6	26,8	23,1	18,6	11,2	8,2
9h	9,7	12	13,6	17,8	22,5	27,6	30,3	29,5	25,5	21	13,3	10
10h	11,9	14,2	16,72	20,4	24,8	30,8	33,8	33	28,7	22,8	15,9	13,1
11h	13,3	15,7	18,5	22,2	26,4	32,7	35,8	35	30,6	24	17,4	14,5
12h	14,6	17	19,8	23,6	28	34,2	37,3	36,5	31,8	25,2	18,5	15,8
13h	15,4	17,8	20,7	24,7	29	35,2	38,5	37,6	32,7	26	19,4	16,7
14h	16,1	18,5	21,4	25,3	29,6	36	39,2	38,4	33,5	26,5	20,1	17,3
15h	15,8	18,1	21,1	25	29,4	35,6	38,8	38,1	33,3	26,4	20	17,2
16h	15,2	17,6	20,5	24,3	28,6	34,9	38,1	37,3	32,5	25,8	19,3	16,5
17h	14	16,5	19,2	23	27,3	33,5	36,7	36	31,3	24,8	18,5	15,4
18h	12,9	15,3	17,9	21,6	26	32,1	35,1	34,3	29,8	23,7	17	14,2
19h	11,4	13,8	16,2	20	24,6	30,6	33,5	32,7	28,5	22,5	16	13
20h	10,4	12,7	15	18,7	23	29	31,9	31	26,9	21,5	14,5	11,6
21h	9,8	12,1	14,2	17,9	22	28	30,8	29,9	25,9	20,9	13,7	10,8
22h	9,3	11,5	13,7	17,4	21,7	27,6	30,4	29,6	25,6	20,5	13,4	10,4
23h	8,7	10,9	13	17	21,5	27,2	30	29,3	25,4	20,3	13,2	10,3
24h	8,3	10,4	12,6	16,2	20,6	26,3	29	28,3	24,4	19,6	12,3	9,4
1h	8	10	12,3	15,8	20,3	25,8	28,5	27,8	23,8	19,4	12	9
2h	7,5	9,6	11,7	15,3	19,7	25,4	28	27,3	23,5	18,9	11,6	8,6
3h	7,1	9,2	11,3	14,8	19,3	24,9	27,5	26,8	23	18,5	11,3	8,2
4h	6,8	8,9	10,9	14,5	18,9	24,5	27,1	26,4	22,7	17,8	10,9	7,9
5h	6,6	8,6	10,7	14,2	18,5	24,1	26,7	26	22,4	16,5	10,6	7,6

Figure 48: La période de surchauffe pour la ville de Ghardaïa

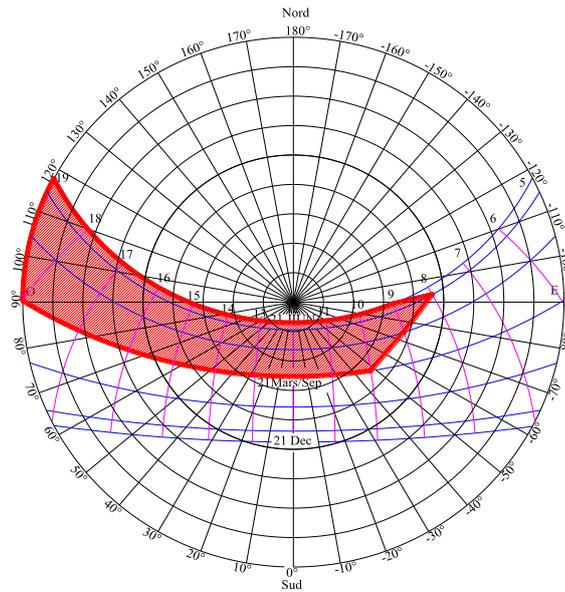


Figure 49: Représentation de la période de surchauffe sur le diagramme solaire pour la latitude  $32^\circ$  correspondant à la ville de Ghardaïa

Les angles d'occultation, verticale et horizontale, sont maintenant obtenus par la superposition de l'abaque des masques avec le diagramme solaire (Figure 50).

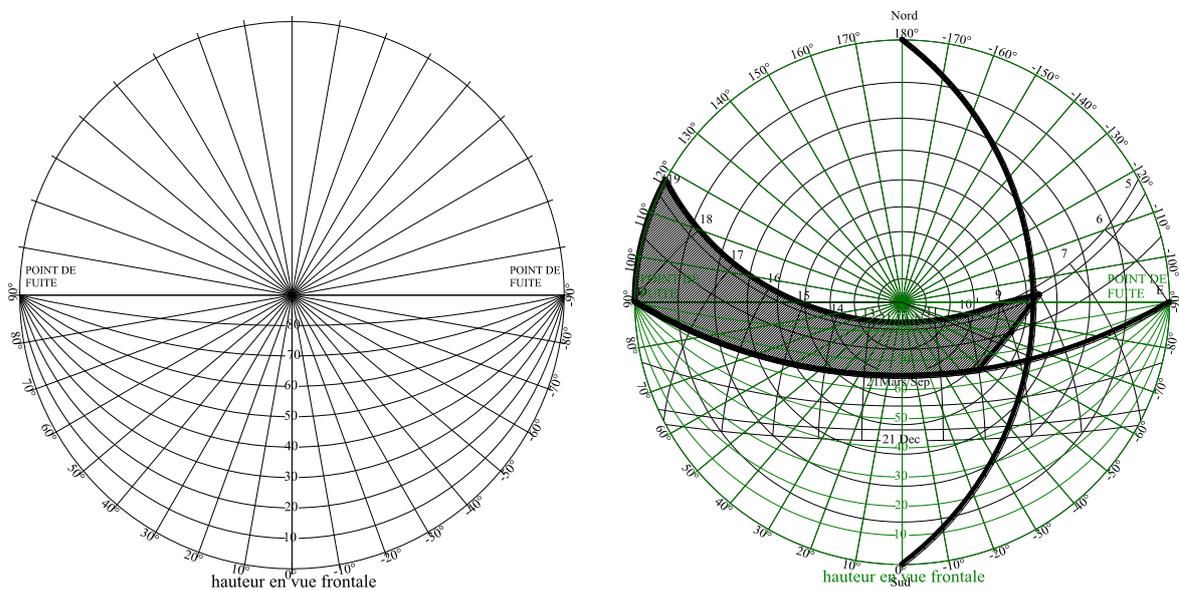


Figure 50: L'abaque des masque (à gauche) l'abaque des masques superposé sur le diagramme solaire pour calculer les angles d'occultation (à droite).

Nous avons récapitulé les angles d'occultation pour les différentes orientations dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-dessous :

Tableau 2 : Angles d'occultation pour la ville de Ghardaïa

		<i>Sud</i>	<i>Est</i>	<i>Ouest</i>	<i>Nord</i>
Angle d'occultation horizontal	<i>Droite</i>	–	<b>90°</b>	–	<b>4°</b>
	<i>Gauche</i>	–	–	<b>118°</b>	<b>28°</b>
Angle d'occultation vertical	<i>Inférieur</i>	<b>64°</b>	–	–	–
	<i>Supérieur</i>	<b>82°</b>	–	–	–

### 1.1.3 Typologie des cas d'étude

Pour toutes les orientations, nous avons pris un cas de référence sans protection solaire (Figure 56) auquel seront comparés les résultats de simulation. Nous présentons ci-dessous les cas de simulation pour les différentes orientations.

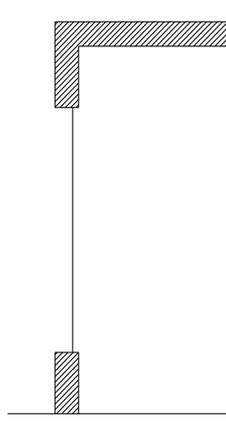


Figure 51: Le cas de référence

**Pour l'orientation Sud**, les paramètres de conception des protections solaires que nous avons étudiés sont :

- La disposition des lamelles (parallèle ou verticale à la façade).
- L'espacement entre les lamelles "e" (H, H/2, H/4, H/8, H/16)
- Et l'angle d'inclinaison des lamelles. Pour la disposition verticale nous avons utilisé trois angles d'inclinaison mesurés par rapport à la façade : horizontale 90°, 60° et 120°. Et pour le cas de la disposition horizontale nous avons utilisé deux angles d'inclinaison : 45° et 120°.

Par combinaison de ces paramètres, nous avons défini une typologie complète que nous présentons dans le Tableau 3 :

Tableau 3: Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Sud

		Espacement entre les lamelles				
		$e = H=1.8m$	$e = H/2=0.9m$	$e = H/4=0.45m$	$e = H/8=0.225m$	$e = H/16=0.112m$
Disposition verticale	60°					
		S.V.1.60	S.V.2.60	S.V.4.60	S.V.8.60	S.V.16.60
	Horizontale 90°					
		S.V.1.90	S.V.2.90	S.V.4.90	S.V.8.90	S.V.16.90
	120°					
		S.V.1.120	S.V.2.120	S.V.4.120	S.V.8.120	S.V.16.120

Disposition horizontale	45°					
		S.H.1.45	S.H.2.45	S.H.4.45	S.H.8.45	S.H.16.45
	120°					
		S.H.1.120	S.H.2.120	S.H.4.120	S.H.8.120	S.H.16.120

Pour l'orientation Est, dont l'angle d'occultation horizontale est de 90°, nous avons pris en considération deux paramètres (Tableau 4) :

- L'espacement entre les lamelles "e" (L, L/2, L/4, L/8, L/16)
- Et l'angle d'inclinaison des lamelles. 30° et 45°.

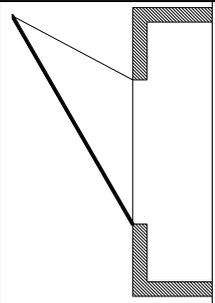
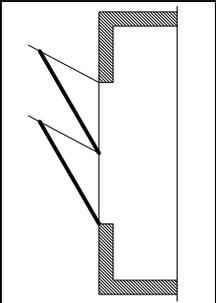
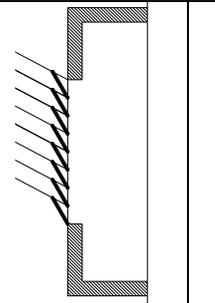
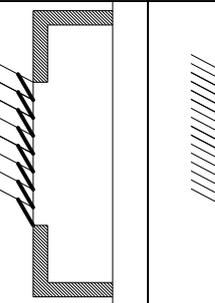
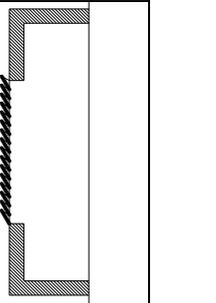
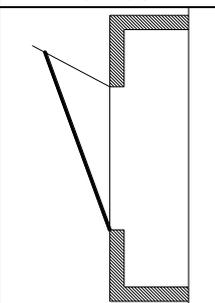
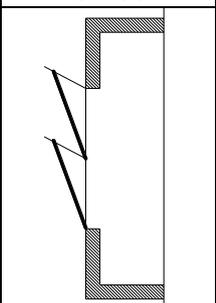
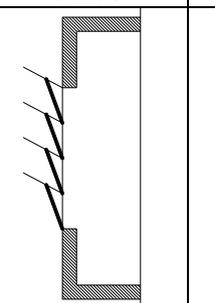
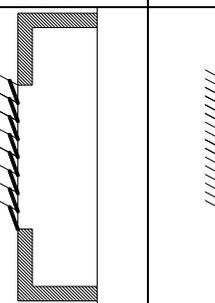
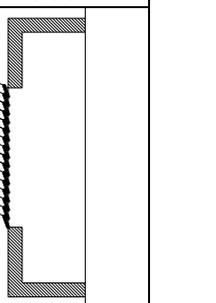
Tableau 4: Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Est

		Espacement entre les lamelles				
		e = L=2m	e = L/2=1m	e = L/4=0.5m	e = L/8=0.25m	e = L/16=0.125m
Angle d'inclinaison	30°					
		E.1.30	E.2.30	E.4.30	E.8.30	E.16.30
	45°					

N 	Espacement entre les lamelles				
	$e = L=2m$	$e = L/2=1m$	$e = L/4=0.5m$	$e = L/8=0.25m$	$e = L/16=0.125m$
	E.1.45	E.2.45	E.4.45	E.8.45	E.16.45

Pour l'orientation Ouest, dont l'angle d'occultation horizontale est  $118^\circ$ , nous avons étudié les mêmes paramètres pris en considération pour l'orientation Est mais avec des valeurs différentes pour l'angle d'inclinaison des lamelles ( $20^\circ$  et  $30^\circ$ ) (Tableau 5).

Tableau 5: Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Ouest

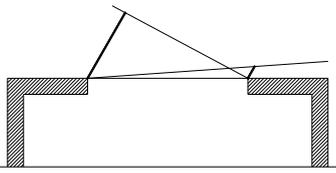
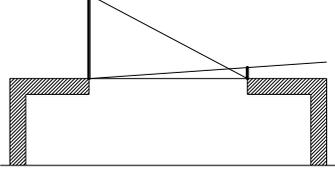
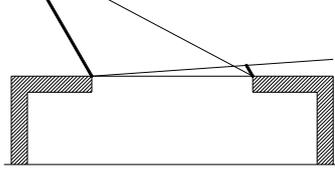
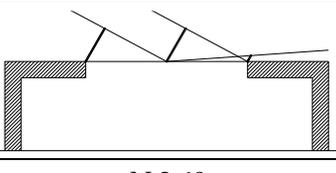
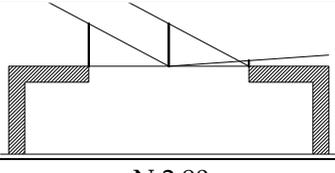
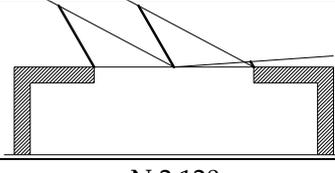
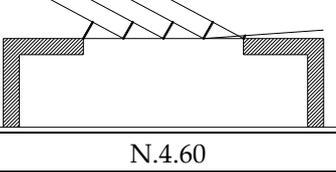
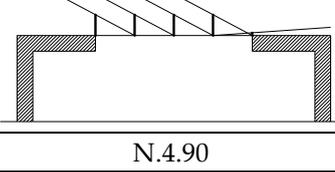
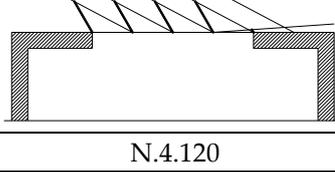
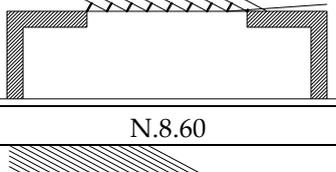
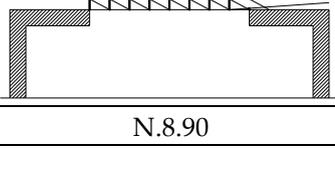
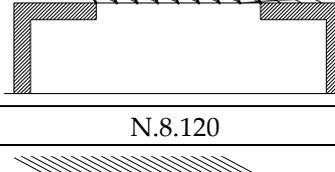
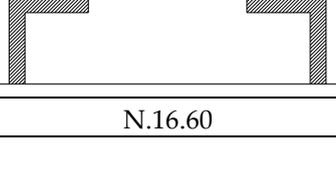
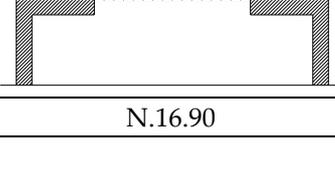
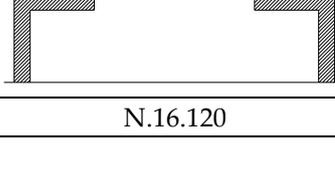
N 	Espacement entre les lamelles				
	$e = L=2m$	$e = L/2=1m$	$e = L/4=0.5m$	$e = L/8=0.25m$	$e = L/16=0.125m$
Angle d'inclinaison $30^\circ$					
	O.1.30	O.2.30	O.4.30	O.8.30	O.16.30
Angle d'inclinaison $20^\circ$					
	O.1.20	O.2.20	O.4.20	O.8.20	O.16.20

Dans le cas de l'orientation Nord, nous avons considéré deux angles d'occultation horizontale.  $4^\circ$  et  $28^\circ$  qui correspondent respectivement au côté droit et côté gauche de la fenêtre vue de l'intérieur (

Tableau 6). Les paramètres de conception étudiés pour cette orientation sont :

- L'espacement entre les lamelles "e" (L, L/2, L/4, L/8, L/16)
- Et l'angle d'inclinaison des lamelles ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $120^\circ$ ) ces angles sont calculés par rapport à la façade, dans le sens trigonométrique.

Tableau 6 : Les configurations géométriques étudiées pour l'orientation Nord

		Angle d'inclinaison		
		60°	90°	120°
Espacement entre les lamelles	e = L=2m			
		N.1.60	N.1.90	N.1.120
	e = L/2=1m			
		N.2.60	N.2.90	N.2.120
	e = L/4=0.5m			
		N.4.60	N.4.90	N.4.120
	e = L/8=0.25m			
		N.8.60	N.8.90	N.8.120
	e = L/16=0,125m			
		N.16.60	N.16.90	N.16.120

Nous avons réalisé au total 64 simulations thermiques avec TRNSYS 17, 384 simulations d'éclairage avec RADIANCE 2.0 et 64 simulations avec DAYSIM 3.1. Vu le nombre considérable des cas à simuler (64 cas), nous avons utilisé un système de codification pour faciliter leur identification. C'est un code alphanumérique présenté comme suit :

- A : Orientation ; S, E, O et N
- B : Installation des lamelles ; V (verticale) et H (horizontale).
- XX : l'espacement entre les lamelles ; 1-H, 2-H/2, 4-H/4, 8-H/8 and 16-H/16.
- YY : l'inclinaison des lamelles ; 60-60°, 90-90°, 120-120°...

## 1.2 Outils et conditions de simulation

### 1.2.1 Analyse thermique

Nous avons utilisé le logiciel de simulation TRNSYS 17 pour calculer les températures de l'air, les gains solaires et la demande énergétique pour le refroidissement et le chauffage. TRNSYS est un code de calcul dynamique, basé sur un système modulaire, permettant de simuler des systèmes thermiques et de résoudre un large système d'équations. L'environnement TRNSYS permet d'établir les liens entre les entrées et sorties des différents sous programmes. Le problème est défini par un système d'équations pour lesquelles chaque sous programmes ou module permet d'écrire des entrées et des sorties. Ce programme permet de définir une multitude de connections avec ce système de modules appelés "Type" qui définissent chacun une portion du problème (Beckman, et al., 1994). Nous présentons ce logiciel en détail en annexe A.

Une simulation thermique dynamique a été réalisée durant toute l'année. Pour la température de l'air, sont présentés seulement les résultats obtenus pour le mois de janvier et juillet correspondant respectivement au mois le plus froid et le plus chaud. Les résultats de simulation ont été comparés au cas de référence sans protection solaire. Le Tableau 7 résume tous les paramètres de simulation :

Tableau 7: Paramètres de simulation pour le modèle utilisé dans TRNSYS 17

Climat et géométrie	
Données climatiques	Ghardaïa
Surface du local	24 m <sup>2</sup>
Volume du local	72 m <sup>3</sup>
Période de simulation	
Période	Janvier à Décembre
Nombre d'heures	8760 h
Températures Set-Point	
Set-point pour le chauffage	20 °C
Set-point pour la climatisation	26 °C
Caractéristiques des murs	
Epaisseur (cm)	30
Coefficient de transfert de chaleur (W/m <sup>2</sup> .K)	0.962
Capacité thermique (kJ/kg K)	0.79
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	720
Surface en contact avec l'extérieur (m <sup>2</sup> )	84
Caractéristiques du toit	
Epaisseur (cm)	20
Capacité thermique (kJ/kg K)	0.65
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	2500

Caractéristiques de la dalle	
Epaisseur (cm)	20
Capacité thermique (kJ/kg K)	0.79
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	2500
Caractéristiques de la fenêtre	
Orientation	South- Est- Nord- Ouest
Rapport fenêtre mur	30%
Longueur	2 m
Hauteur	1.8 m
Valeur U (W/m <sup>2</sup> K)	5.74
Valeur G	87%
Propriétés des protections solaires	
Couleur	Blanche
Dimensions	Voir Tableau 3, Tableau 4, Tableau 5 et Tableau 6
Matériaux	Aluminium
Réfectance	85%
Absorption	15%
Transmission	00%

Les simulations thermiques ont été effectuées pour toute l'année à l'aide du logiciel TRNSYS 17. L'objectif était de calculer les températures de l'air, les gains solaires ainsi que la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation. Dans la partie analyse des résultats, nous présentons seulement les résultats obtenus pour les mois de janvier et de juillet, correspondant respectivement au mois le plus froid et le plus chaud. Il est à noter que les températures set-point utilisées pour calculer la demande énergétique sont : 20°C pour le chauffage et 26°C pour le refroidissement.

### 1.2.2 Analyse de l'éclairage naturel

Les configurations géométriques proposées ont été évaluées par rapport à l'éclairage naturel via deux logiciels avancés, Desktop Radiance 2.0 (LBL, 1994) et DAYSIM 3.1, qui sont très efficaces pour simuler les performances d'éclairage naturel (Reinhart & Walkenhorst, 2001). Ces deux logiciels sont présentés en détail dans l'annexe A. Les paramètres de simulation sont présentés en détail dans le Tableau 8.

Tableau 8. Paramètres de simulation utilisés pour RADIANCE 2.0 et DAYSIM 3

Climat	
Ciel	CIE Clair
Location	Ghardaïa
Latitude	32.23° N

Longitude	3.49° E
Altitude	450 m
Turbidité	3
Dimensions du local	
Surface	24 m <sup>2</sup>
Volume	72 m <sup>3</sup>
Période de simulation pour RADIANCE 2.0	
Temps	21 Juin 21 Décembre
Heures	8 h, 12 h, 16 h
Période de simulation pour DAYSIM 3.1	
Temps	Annuel
Heures	8 h à 18 h
Propriétés des surfaces	
Réflectance des murs	60%
Réflectance du sol	40%
Réflectance du plafond	80%
Propriétés de la fenêtre	
Orientation	Sud, Est, Ouest et Nord
Longueur	2 m
Hauteur	1.8 m
Niveau du plan de travail	0.8 m
Grille	
Taille	24 × 16
Espacement	0.25 m
Propriétés du vitrage	
Type	Verre clair
Transmission	86%
Réflectance	5%
Propriétés des protections solaires	
Couleur	Blanche
Dimensions	Voir Tableau 3, Tableau 4, Tableau 5 et Tableau 6
Matériaux	Aluminium
Réflectance	85%
Absorption	15%
Transmission	00%

Nous avons effectué les simulations de l'éclairage naturel pour deux jours de l'année : le 22 juin (solstice d'été) et le 21 décembre (solstice d'hiver), correspondant à la hauteur maximale et minimale du soleil, pour ces deux journées, nous avons choisi trois moments (8h00, 12h00, 16h00) pour mesurer les paramètres statiques de l'éclairage naturel à l'aide de Desktop Radiance 2.0. D'autre part des simulations dynamiques, durant toute l'année, ont été effectuées à l'aide de DAYSIM 3.1. Les calculs sont faits au niveau d'un plan de travail situé à une hauteur de 0,8 m, une grille de 24x16 a été utilisée pour les calculs d'éclairage naturel.

Nous avons évalué plusieurs paramètres relatifs à l'éclairage naturel, à savoir :

- **L'éclairement** maximal et minimal. En se basant sur les normes BS 8206-2 : 2008 (2008), le seuil du niveau d'éclairement est de 500 lx dans au moins 75% de la surface, et pour minimiser les problèmes d'éblouissement, il faut minimiser le pourcentage de surface ayant des niveaux d'éclairement dépassant 3000 lux (Michael, et al., 2017). Ce même niveau d'éclairement a été fixé par Mardaljevic et al. (2011; 2006) comme seuil d'éblouissement.
- **Le facteur de lumière du jour (FLJ)** considéré comme indicateur statique de la performance de l'éclairage naturel, il exprime le rapport entre l'éclairement horizontal interne en un point et l'éclairement horizontal extérieur sous un ciel couvert CIE (Moon & Spencer, 1942). Selon les normes BS 8206-2 :2008 (2008) et CIBSE (1999) , pour le facteur de lumière du jour moyen, une valeur minimale de 2 % est requise pour les espaces de travail dans au moins 75 % de la surface.
- **Le facteur d'uniformité de la lumière du jour (UDF)** exprime le degré d'homogénéité de la répartition de l'éclairage, défini comme le rapport entre le FLJ minimum et la valeur moyenne du FLJ ( $UDF = FLJ_{min}/FLJ_{moyen}$ ). Le seuil de 0,40 a été fixé par la méthode d'évaluation des bâtiments durables BREEAM 2.08 pour atteindre un environnement de travail favorable (Iversen, et al., 2013). D'autre auteur considère l'uniformité comme étant le rapport entre l'éclairement minimal et maximal dans la pièce (Ganga A & Benny, 2017).
- **Autonomie de l'éclairage naturel** "Daylight Autonomy DA", qui est un indicateur dynamique de l'éclairage naturel proposé par l'Association Suisse des Electriciens en 1989 et amélioré par Christoph Reinhart entre 2001 et 2004 (Reinhart & Walkenhorst, 2001). L'autonomie de l'éclairage naturel (DA) est définie comme étant le pourcentage de temps occupé au cours de l'année où un seuil d'éclairement minimum de 500 lx est maintenu par l'éclairage naturel (Harberl & Kota, 2009), tandis que l'autonomie spatiale de l'éclairage naturel "spatial Daylight Autonomy sDA" décrit le pourcentage de la surface où l'éclairement est au-dessus de 500 lx pour 50 % des heures occupées (Heschong, et al., 2012). Selon LEED v4 (USGBC, 2020), un sDA de 55 % est considéré comme acceptable tandis qu'un sDA de plus de 75 % est préférable. Le calcul de ces deux paramètres a été effectué à l'aide du logiciel DAYSIM 3.1.

### 1.3 Conclusion

Les informations présentées dans la première partie de ce manuscrit, nous ont permis de mettre en évidence certains paramètres de conception des protections solaires qui semblent avoir un impact sur les conditions thermiques et lumineuses à l'intérieur des bâtiments.

Dans ce chapitre nous avons défini tous les conditions et paramètres de simulation à prendre en compte lors de l'évaluation des performances thermique et lumineuse des protections solaires. Nous avons présenté également, pour chaque orientation, les configurations géométriques qui serviront de support à l'étude paramétrique.

Pour mener à bien cette étude, le choix a été porté sur la simulation numérique. L'objectif étant d'étudier deux phénomènes différents (thermique et lumineux), pour cela nous avons choisi d'utiliser trois outils de simulations ; TRNSYS 17 pour le calcul thermique dynamique et RADIANCE 1.02 et DAYSIM3.1 pour la simulation de l'éclairage. Ces trois logiciels sont décrits en détail dans l'annexe A. Nous avons consacré la dernière partie de ce chapitre à la présentation des conditions de simulation pour chaque logiciel.

Maintenant que tous les paramètres de simulations sont définis, nous pouvons procéder à l'évaluation des différentes configurations. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

## 5 Chapitre V : Analyse des résultats de simulation

### Introduction

**N**ous consacrons ce chapitre à la présentation et l'analyse des résultats de simulation thermique et d'éclairage naturel obtenus pour chaque orientation. Les résultats de la simulation thermique sont présentés sous forme de graphes, montrant les températures de l'air pour les mois de Janvier et Juillet, respectivement le mois le plus froid et le plus chaud de l'année, ainsi que la consommation énergétique annuelle pour le chauffage et la climatisation.

Cependant, les résultats de simulation de l'éclairage sont présentés sous forme d'image indiquant les niveaux d'éclairement pour le mois de Décembre et le mois de Juin à midi, ainsi que l'autonomie d'éclairage naturel "DA" et l'autonomie spatiale "sDA". Les autres résultats de simulation de l'éclairage sont présentés dans l'annexe B. Nous avons également présenté, sous forme de tableaux, les valeurs du facteur de la lumière du jour (FLJ) et l'uniformité la lumière du jour (UDF).

L'analyse des résultats est basée sur une évaluation comparative permettant de comprendre le comportement thermique et lumineux des protections solaires en modifiant les paramètres de conception.

Ce chapitre est structuré en cinq sections principales. Les quatre premières sections correspondent chacune à une orientation (N, S, E, O) et est divisée en trois parties (Figure 52) :

- La première est consacrée à l'étude de l'impact des différentes configurations géométriques des protections solaires sur les températures de l'air (en mois de janvier et juillet).

- Dans la deuxième nous étudions l'impact sur la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation.
- La troisième partie quant à elle est consacrée à étudier l'impact sur les performances lumineuses (l'illuminance, l'autonomie et l'uniformité).

La dernière section est consacrée à une synthèse récapitulant l'ensemble des conclusions.

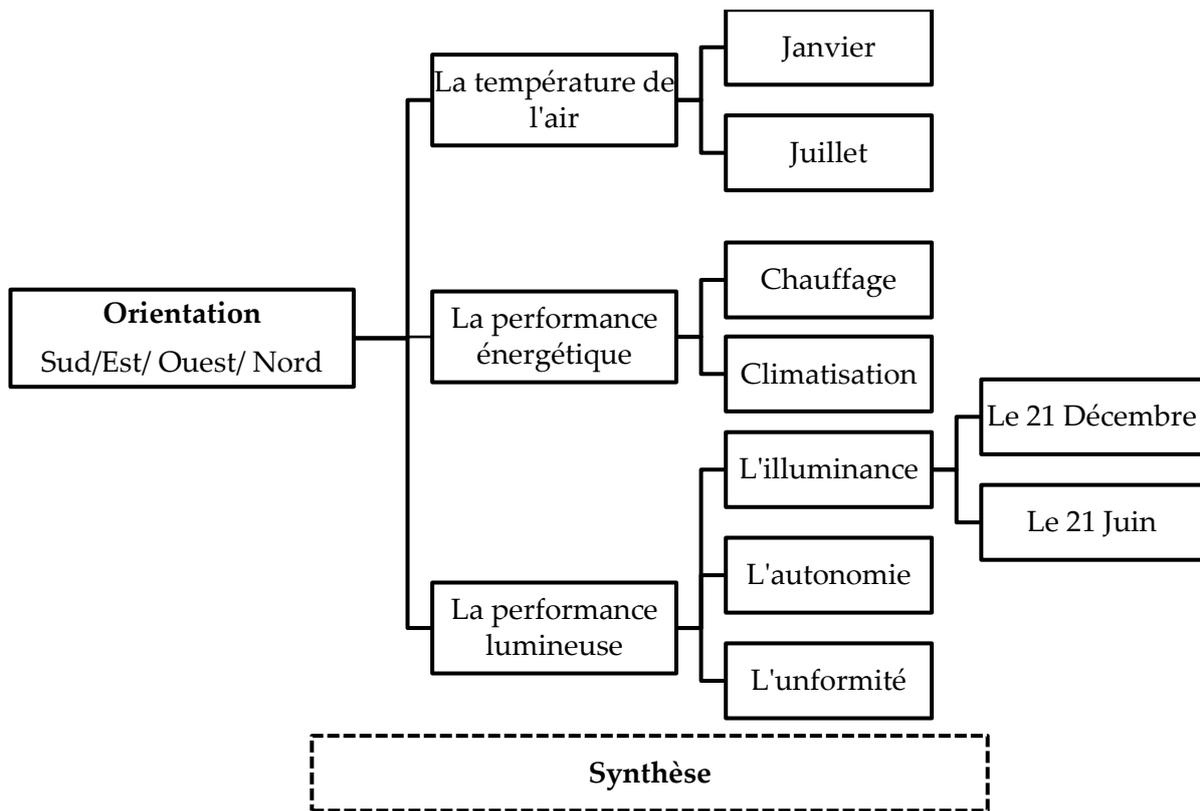


Figure 52 : Structure du chapitre Analyse des résultats

## 1.4 L'orientation Sud

Dans cette section nous présentons les résultats de simulation thermique et d'éclairage naturel obtenus pour l'orientation Sud. L'objectif est d'étudier l'impact de trois paramètres de conception : **la disposition des lamelles (Horizontale ou Verticale), l'inclinaison des lamelles et l'espacement entre les lamelles.**

### 1.4.1 Impact sur la température de l'air

**En période d'hiver (Janvier)**, les résultats de simulation présentés dans la Figure 53 montrent que l'utilisation des dispositifs de protection solaire réduit la température de l'air jusqu'à 3,5°C par rapport au cas de référence (sans protection solaire). Les graphes présentés dans la Figure 53 nous permettent de comparer les résultats afin d'étudier l'effet de l'inclinaison des lamelles selon les différents espacements.

**Dans le cas de disposition verticale des lamelles** ; nous remarquons que :

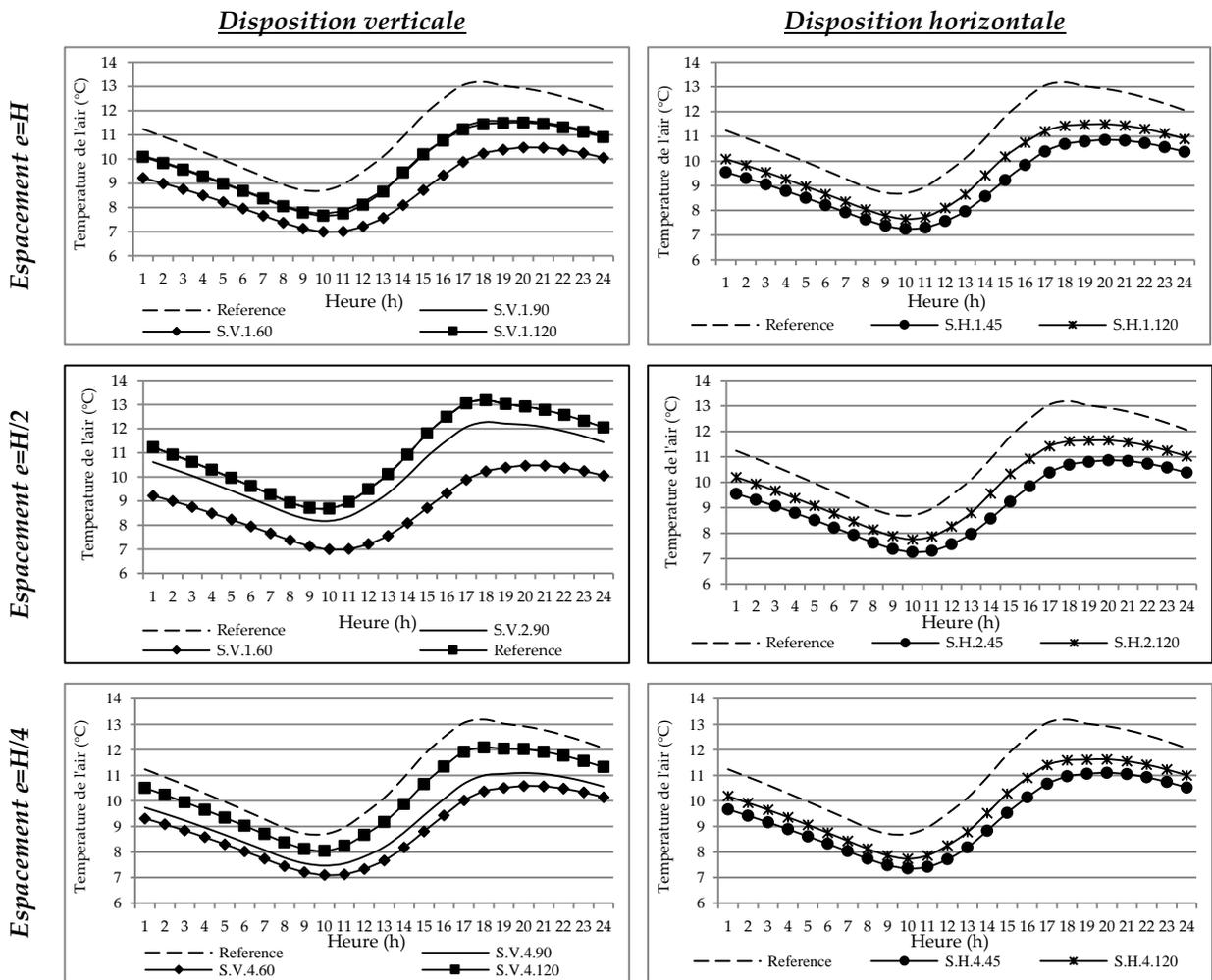
- ⊙ Les configurations avec un angle d'inclinaison de 60° enregistrent les températures de l'air les plus faibles, avec des écarts de température dépassant 3°C entre 15h et 17h,
- ⊙ Tandis que les configurations avec un angle d'inclinaison de 120° offrent les températures les plus élevées, quel que soit l'espacement entre les lamelles. L'écart maximal de température, mesuré à 16h, varie de 1,16°C (pour le cas S.V.4.120) à 2,9°C (pour le cas S.V.16.120).
- ⊙ Les inclinaisons 120° et 90° offrent les mêmes températures de l'air pour les espacements entre les lamelles  $e=H$  et  $e=H/2$ .
- ⊙ L'effet de l'inclinaison des lamelles est négligeable dans le cas de l'espacement  $e=H/16$ , l'écart de température est presque le même pour les trois inclinaisons étudiées, ceci est expliqué par les courbes de température très rapprochées.

Nous pouvons dire, de manière générale, que la température de l'air est positivement corrélée avec l'inclinaison des lamelles.

**Dans le cas d'une disposition horizontale des lamelles**, nous remarquons que :

- Les configurations avec un angle d'inclinaison de 120° offrent les températures d'air les plus élevées quel que soit l'espacement entre les lamelles, l'écart maximal de température est de 3,5°C pour le cas S.H.16.45 et 2,66°C pour les autres cas.
- Tandis que les configurations avec un angle d'inclinaison de 45° enregistrent des températures d'air plus faibles, dont l'écart maximal de température, enregistré à 17h, varie entre 2,67°C et 3,5°C.

Ces résultats sont expliqués par le fait que le rayonnement solaire pénètre entre les lamelles inclinées à 120° en hiver où la hauteur du soleil est au-dessous de l'angle d'occultation optimale (64°) contrairement aux lamelles inclinées à 45° qui bloquent le rayonnement.



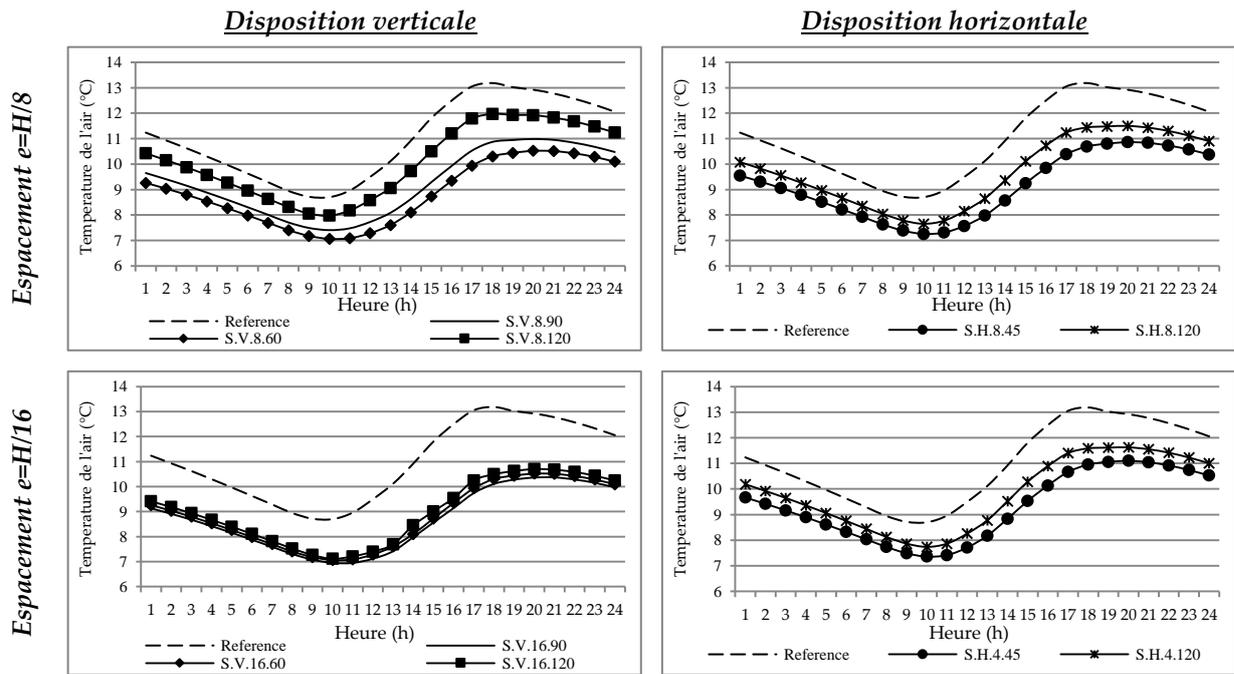


Figure 53 : La température de l'air calculée pour l'orientation Sud en mois de janvier

Dans la Figure 54 nous avons présenté les résultats de simulation regroupés selon l'angle d'inclinaison des lamelles, ceci nous permet d'étudier l'effet de l'espacement entre les lamelles selon l'angle d'inclinaison.

- L'effet de l'espacement entre les lamelles est négligeable dans le cas de l'inclinaison 60°. l'écart de température est presque le même pour les trois inclinaisons étudiées, ceci est expliqué par les courbes de température superposées.
- L'espacement  $e=H/2$  enregistre les températures de l'air les plus élevées. L'écart de température par rapport au cas de référence ne dépasse pas 1,3°C pour les angles d'inclinaison 90° et 120°. Cet écart augmente pour dépasser 3°C dans le cas de l'angle d'inclinaison 60°.
- L'espacement  $e=H/16$  enregistre toujours les températures de l'air les plus faibles. L'écart maximal de température, enregistré à 16h, dépasse 3°C.
- L'écart de température par rapport au cas de référence augmente avec la diminution de l'espacement des lamelles sauf pour le cas d'un auvent ( $e=H$ ) qui présente des températures inférieures à celles enregistrées dans le cas d'un espacement  $e=H/2$ .

Nous pouvons dire, de manière générale, que la température de l'air est positivement corrélée avec l'espacement entre les lamelles.

Dans le cas de disposition horizontale des lamelles ; nous remarquons que

- L'espacement  $e=H/16$  enregistre les températures de l'air les plus faibles pour les deux inclinaisons étudiées. L'écart maximal de température, enregistré à 17h, est de  $2,64^{\circ}\text{C}$  dans le cas de l'inclinaison  $120^{\circ}$  et il atteint  $3,5^{\circ}\text{C}$  pour l'inclinaison  $45^{\circ}$ .
- Tandis que les autres espacements ont le même comportement lorsque l'inclinaison est de  $45^{\circ}$ , car ils enregistrent les mêmes températures de l'air. Ceci est expliqué par la superposition des courbes de température correspondant aux quatre cas. L'écart maximal de température est de  $2,67^{\circ}\text{C}$ .
- Les différences entre ces quatre cas sont négligeables dans le cas de l'inclinaison  $120^{\circ}$ . Les écarts de température varient entre  $1,63^{\circ}\text{C}$  et  $1,84^{\circ}\text{C}$ . Néanmoins nous pouvons constater de manière générale que les températures de l'air diminuent en diminuant l'espacement entre les lamelles.

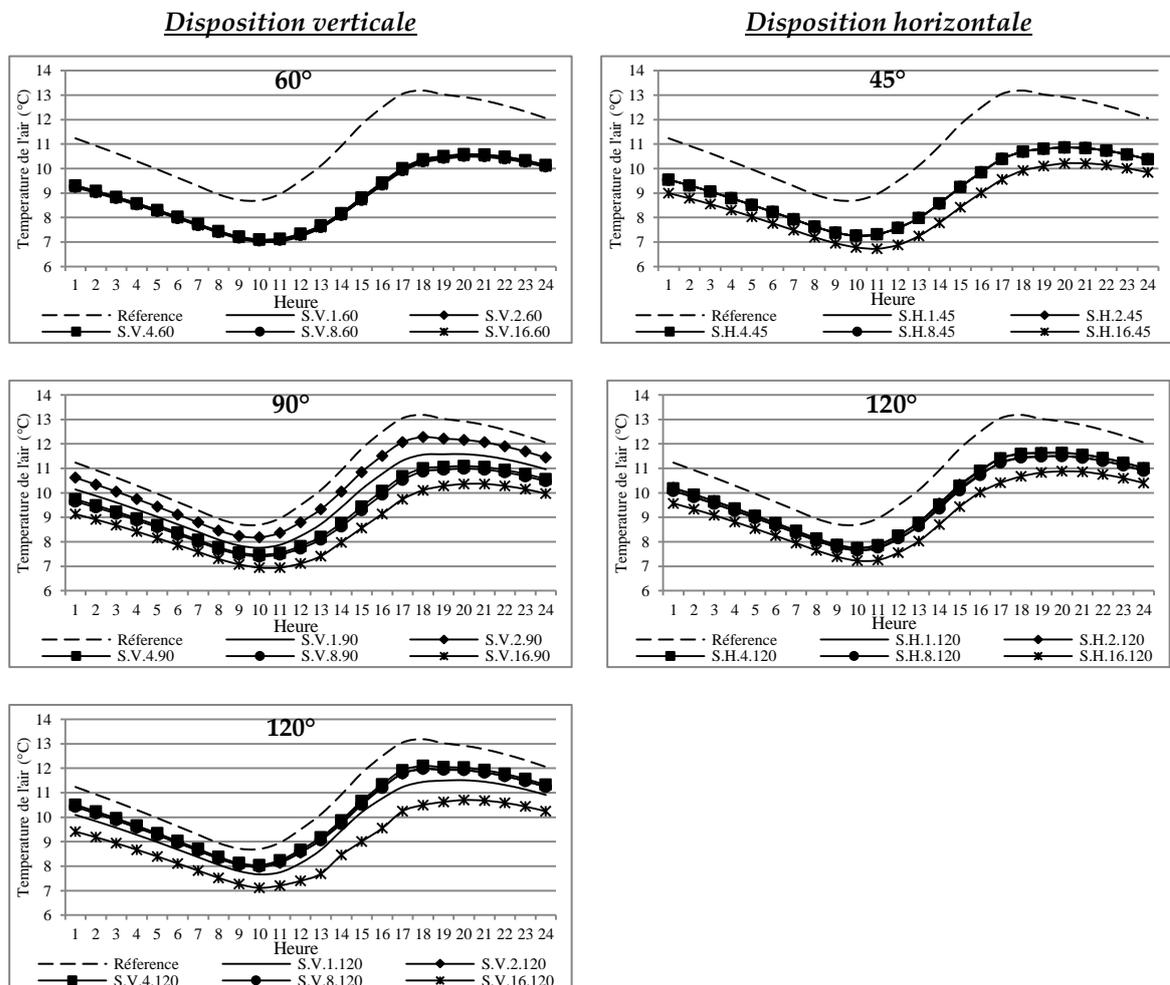
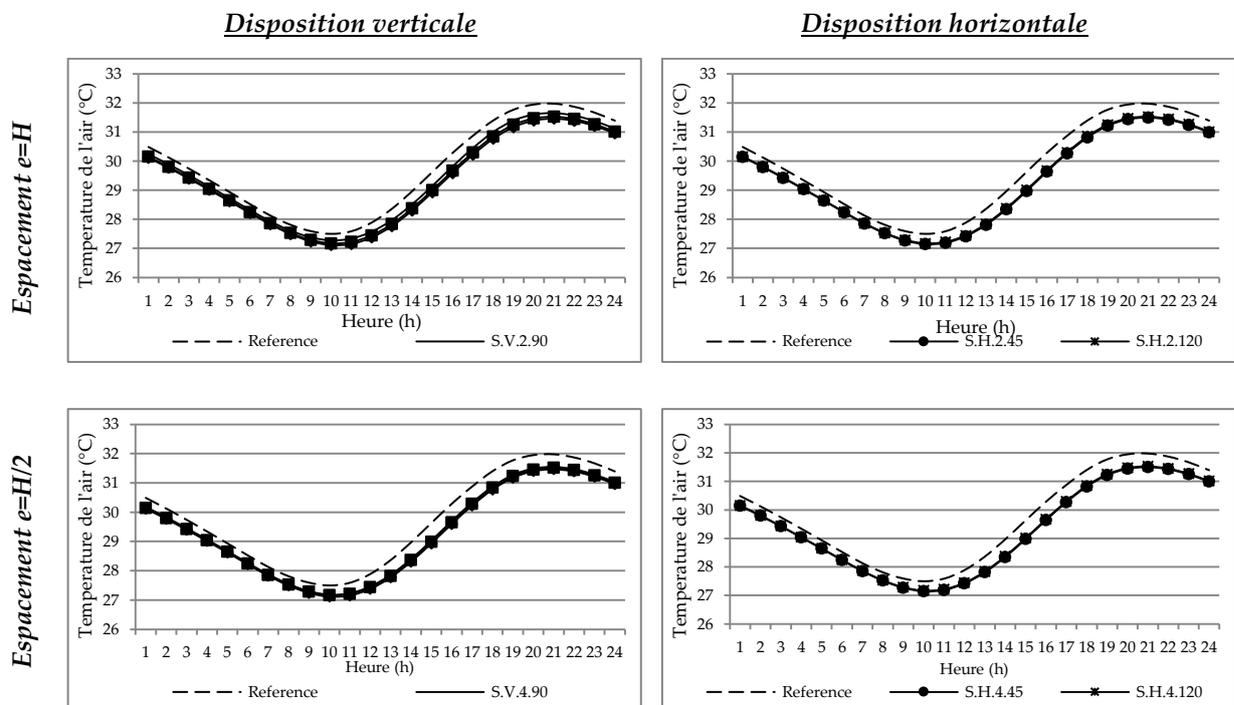


Figure 54: Présentation des températures de l'air calculées pour l'orientation Sud en mois de janvier selon l'angle d'inclinaison des lamelles

**En période d'été (Juillet)** (Figure 55), les résultats de simulation montrent que :

- Pour les deux dispositions (horizontale et verticale), toutes les configurations étudiées présentent le même comportement thermique, les températures de l'air diffèrent très peu. Ceci est expliqué par les courbes de température très rapprochées.
- L'impact de ces configurations est négligeable puisque l'écart maximal de température, calculé par rapport au cas de référence, varie entre 0,5°C et 0,8°C seulement.
- Les configurations ayant un angle d'inclinaison de 60° offrent les températures de l'air les plus faibles.
- Les configurations ayant un espacement  $e=H/16$  offrent toujours les températures de l'air les plus faibles.
- La température de l'air est positivement corrélée avec l'espacement et l'inclinaison des lamelles.

Nous pouvons dire que l'impact des paramètres étudiés (disposition, inclinaison et espacement des lamelles) est négligeable en période d'été. Cela peut être expliqué par le fait que la quantité de rayonnement solaire direct pénétrant dans l'espace est nulle en période de surchauffe pour toutes les configurations.



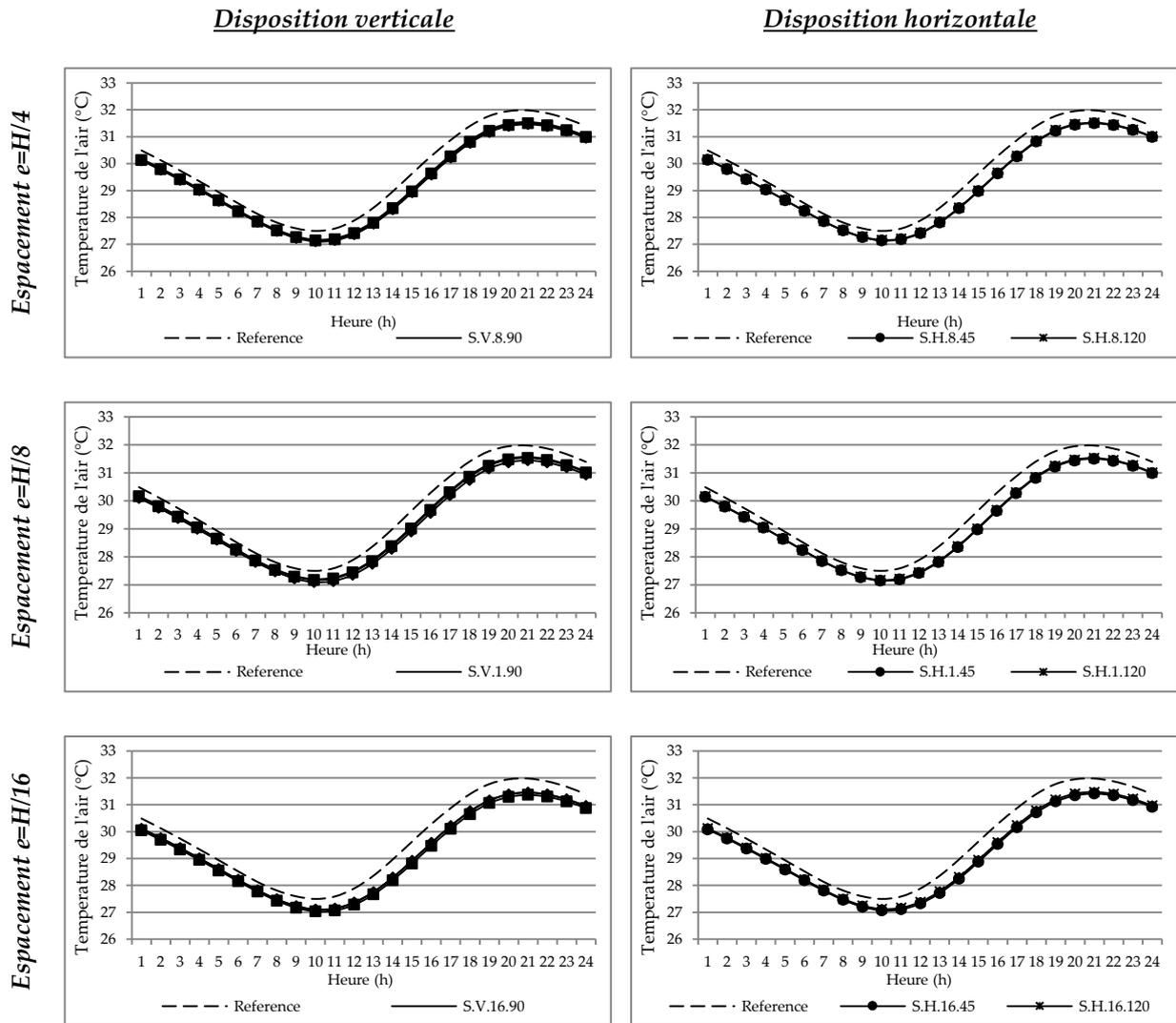


Figure 55: La température de l'air calculée pour l'orientation Sud en mois de juillet

## 1.4.2 Impact sur la performance énergétique

### 1.4.2.1 Consommation énergétique annuelle pour le chauffage

Dans le cas de disposition Verticale des lamelles : Nous pouvons observer à partir des graphes, présentés dans la Figure 56, que l'utilisation des protections solaires augmente les charges de chauffage requis pour toutes les configurations en comparaison avec le cas de référence, ceci est dû principalement à la réduction de la pénétration solaire en hiver par la protection solaire. La comparaison des résultats obtenus nous permet d'étudier l'impact de l'espacement et l'inclinaison des lamelles.

#### 1. L'impact de l'espacement entre les lamelles :

- Dans le cas de l'inclinaison  $60^\circ$ , l'impact de l'espacement est négligeable car les cinq configurations, correspondant aux différents espacements, enregistrent des augmentations de la demande énergétique peu variées. Cette augmentation varie de 34,7% pour le cas S.V.16.60 et 36,8% pour le cas S.V.1.60.
- Dans le cas de l'inclinaison  $90^\circ$ , l'impact de l'espacement est plus significatif. La demande énergétique pour le chauffage augmente de 12% pour le cas S.V.2.90 jusqu'à 38,3% pour le cas S.V.16.90. Il est à noter que, contrairement à l'inclinaison  $60^\circ$ , les charges de chauffage, dans le cas de l'inclinaison  $90^\circ$ , sont corrélées négativement avec l'espacement des lamelles.
- Dans le cas de l'inclinaison  $120^\circ$ , la demande énergétique diminue avec la diminution de l'espacement mais à partir de l'espacement  $e=H/4$  elle commence à augmenter. L'augmentation des charges de chauffage varie de 20% pour le cas S.V.4.120 à plus de 37% pour le cas S.V.16.120.

## 2. L'impact de l'angle d'inclinaison des lamelles : nous remarquons que

- Dans le cas des espacements  $e=H$  et  $e=H/2$  :
  - L'inclinaison  $60^\circ$ , offre les charges de chauffage les plus élevées, en augmentant la consommation énergétique jusqu'à 36,81%.
  - L'inclinaison  $90^\circ$  quant à elle offre les charges les plus faibles, l'augmentation de la consommation varie entre 12% et 21% seulement correspondant relativement à l'espacement  $e=H/2$  et  $e=H$ .
  - L'inclinaison  $120^\circ$  quant à elle offre une augmentation comprise entre 21% et 25%.
- Lorsque l'espacement  $e=H/4$  et  $e=H/8$ , cette situation change, la consommation énergétique est négativement corrélée avec l'inclinaison des lamelles, nous enregistrons une augmentation de 20% à 21% lorsque l'inclinaison est de  $120^\circ$ , jusqu'à 36% dans le cas de l'inclinaison  $60^\circ$ .
- Dans le cas de l'espacement  $e=H/16$  l'écart entre les trois inclinaisons est minime, nous enregistrons une augmentation de la demande énergétique variant de 34,67% pour l'inclinaison  $60^\circ$  et 38,30% pour l'inclinaison  $90^\circ$ .

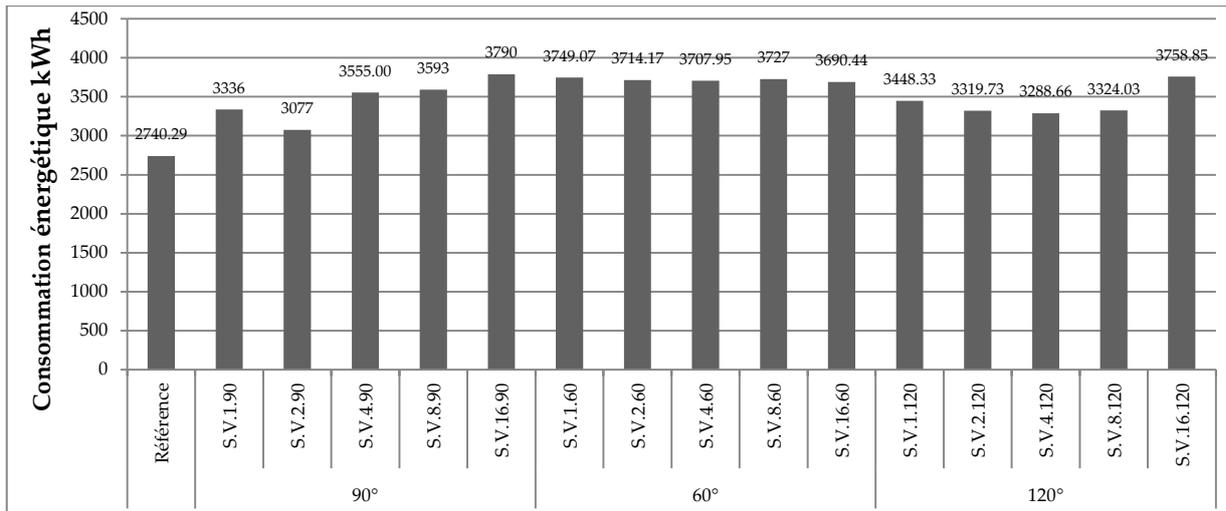


Figure 56 : Consommation énergétique annuelle pour le chauffage, le cas de la disposition verticale

**Dans le cas de disposition Horizontale des lamelles** : Les graphes dans la Figure 57, montrent que l'utilisation des protections solaires avec disposition horizontale augmente les charges de chauffage jusqu'à 39,5% par rapport au cas de référence. La comparaison des résultats obtenus nous permet d'étudier l'impact de l'espacement et l'inclinaison des lamelles.

Nous pouvons observer à partir des graphes, présentés dans la Figure 57, que l'utilisation des protections solaires augmente les charges de chauffage requis pour toutes les configurations en comparaison avec le cas de référence, ceci est dû au fait que la quantité du rayonnement solaire direct pénétrant dans l'espace diminue en utilisant la protection solaire.

1. L'impact de l'espacement, nous pouvons constater, de manière générale, que :

- Dans le cas des lamelles inclinées à 45° l'impact de l'espacement est négligeable, nous enregistrons une augmentation des charges de chauffage d'environ 32,50% pour toutes les configurations, sauf le cas de l'espacement  $e=H/16$  dont l'augmentation dépasse 39%.
- Cependant, l'impact de l'espacement est plus significatif dans le cas de l'inclinaison 120°. L'augmentation des charges de chauffage varie de 24,34% et 32,59%.
- Les charges de chauffage augmentent en diminuant l'espacement des lamelles.

2. L'impact de l'inclinaison des lamelles, nous pouvons constater que, quel que soit l'espacement des lamelles, c'est toujours l'inclinaison 45° qui enregistre les charges de chauffage les plus élevées. La différence de la consommation énergétique pour le chauffage entre les deux inclinaisons dépasse 170 kWh dans les cas de l'espacement

$e=H/8$  et 223 kWh dans les cas de l'espacement  $e=H/2$ , correspondant respectivement à une différence de l'augmentation des charges entre les deux inclinaisons de 6% à 8%.

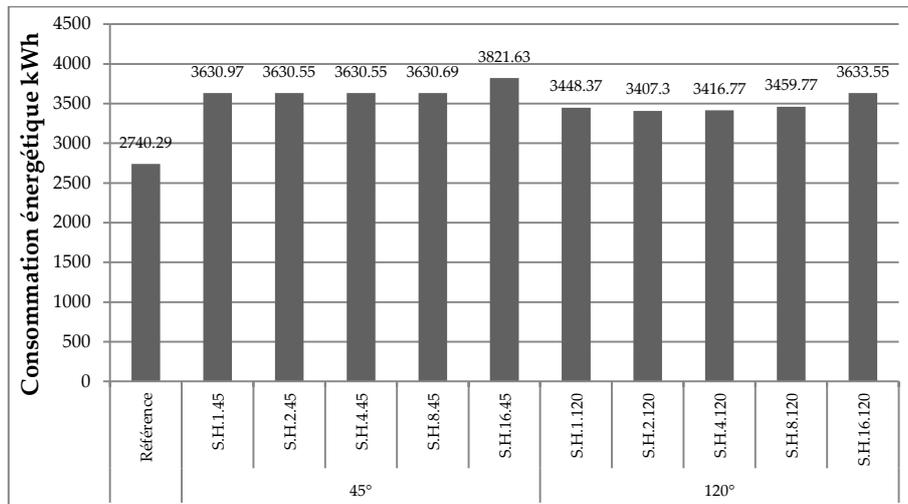


Figure 57 : Consommation énergétique annuelle pour le chauffage, le cas de la disposition horizontale

### 1.4.2.2 Consommation énergétique annuelle pour la climatisation

A partir des graphes présentés dans la Figure 58 et la Figure 59, nous pouvons constater :

- D'une part, que l'impact de la protection solaire sur les charges de climatisation est moins important en comparaison avec l'impact sur les charges de chauffage ; L'économie d'énergie par rapport au cas de référence ne dépasse pas 20%.
- D'autre part, les différentes configurations présentent presque le même comportement. Nous enregistrons un écart ne dépassant pas 90 kWh entre les différents cas. Ceci est dû principalement au fait que, durant la période de surchauffe, la quantité du rayonnement solaire direct pénétrant dans l'espace est nulle pour toutes les configurations.

*Dans le cas de disposition verticale des lamelles :*

- L'impact de l'espacement entre les lamelles : afin d'étudier l'effet de l'espacement des lamelles, nous avons comparé les résultats obtenus par rapport à chaque inclinaison, nous avons constaté que :
  - Lorsque l'inclinaison des lamelles est de 60°, nous pouvons constater que les cinq configurations, correspondant aux différents espacements, ont le même comportement, nous enregistrons une économie d'énergie variant de 18,28%

pour le cas S.V.16.60 et 18,94 pour le cas S.V.1.60. Donc l'impact de l'espacement est négligeable dans le cas de l'inclinaison 60°.

- Dans le cas de l'inclinaison 90°, l'impact de l'espacement est plus significatif. L'économie de l'énergie pour la climatisation varie de 11,88% (S.V.2.90) à 18,84% (S.V.16.90). Nous pouvons constater que, les charges de climatisation, dans le cas de l'inclinaison 90°, sont corrélées positivement avec l'espacement des lamelles.
- Pour l'inclinaison 120°, l'économie de l'énergie varie entre 16,96% pour le cas S.V.1.120 et 20,67% pour le cas S.V.16.120. Il est à noter que, la consommation énergétique pour la climatisation est aussi corrélée positivement avec l'espacement des lamelles, elle diminue avec la diminution de l'espacement.
- L'impact de l'inclinaison des lamelles : la comparaison des résultats obtenus par rapport à chaque espacement nous permet d'étudier l'effet de l'inclinaison. Nous avons constaté que :
  - Quel que soit l'espacement entre les lamelles, l'angle d'inclinaison 90° offre toujours la consommation énergétique la plus élevée. Elle dépasse 910 kWh pour le cas S.V.2.90 avec une économie d'énergie de 11,88% seulement.
  - Tandis que l'angle d'inclinaison 60° offre la consommation énergétique la plus faible. Elle ne dépasse pas 845 kWh pour tous les espacements correspondant à une économie d'énergie qui dépasse 18%.

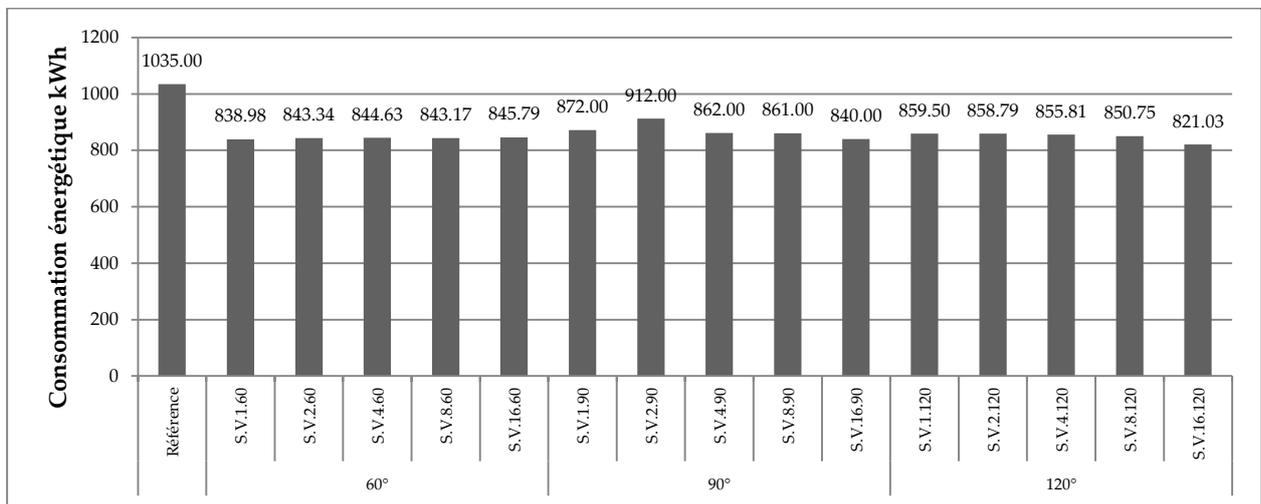


Figure 58 : Consommation énergétique annuelle pour la climatisation, le cas de la disposition verticale

Dans le cas de la disposition horizontale des lamelles : nous pouvons constater que :

- C'est toujours l'espacement  $e=H/16$  qui offre la consommation énergétique la plus faible, permettant les économies d'énergie les plus élevées, jusqu'à 19%.
- L'espacement  $e=H$  enregistre des valeurs de consommation énergétique maximales. L'économie d'énergie varie de 16,96% dans le cas de l'inclinaison  $120^\circ$  et 17,60% pour l'inclinaison  $45^\circ$ .
- La consommation énergétique pour la climatisation est positivement corrélée avec l'espacement des lamelles, pour les deux inclinaisons étudiées.
  - Dans le cas de l'inclinaison  $45^\circ$  l'économie d'énergie varie de 17,60% pour le cas S.H.1.45 et 19,53% pour le cas S.H.16.45.
  - Pour l'inclinaison  $120^\circ$ , ces valeurs varient entre 16,95% pour le cas S.H.1.120 et 18,19% pour le cas S.H.16.120.
- Nous pouvons constater également que, quel que soit l'espacement entre les lamelles, c'est l'inclinaison  $45^\circ$  qui offre la consommation énergétique la plus faible par rapport à l'inclinaison  $120^\circ$ . Cependant il est à noter que, la différence de consommation énergétique entre les deux inclinaisons, est négligeable, car elle est de 14 kWh seulement dans le cas de l'espacement  $e=H/16$  et ne dépasse pas 7 kWh dans le cas de l'espacement  $e=H$

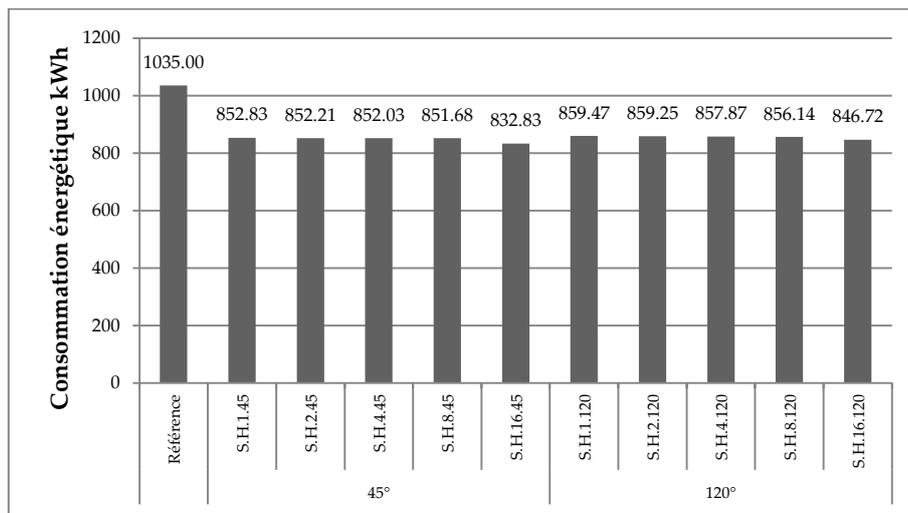


Figure 59 : Consommation énergétique annuelle pour la climatisation, le cas de la disposition horizontale

### 1.4.3 Impact sur la performance lumineuse

#### 1.4.3.1 Le niveau d'éclairement

**En période d'hiver (21 décembre à 12h) :** Dans le Tableau 9, nous présentons les résultats obtenus des simulations de l'éclairement pour le 21 Décembre à 12h00. Ces résultats montrent que toutes les configurations géométriques ont un impact significatif sur le niveau d'éclairement minimal en le réduisant de plus de 47% par rapport au cas de référence. Cependant l'effet sur l'éclairement maximal est négligeable, la réduction ne dépasse pas 9% pour tous les cas en comparaison avec le cas de référence. Nous constatons également que, le niveau d'éclairement est au-dessus du niveau requis (500lx) dans plus de 75% de la surface du plan de travail pour toutes les configurations étudiées.

La comparaison horizontale permet d'étudier l'impact de l'espacement par rapport aux différentes inclinaisons :

#### **Dans le cas de la disposition verticale des lamelles :**

- Dans le cas de l'inclinaison 60°, nous pouvons constater que, l'espacement  $e=H$  enregistre l'éclairement minimal le plus faible (483 lx) avec une réduction de plus de 47% par rapport au cas de référence. Le niveau d'éclairement minimal augmente en diminuant l'espacement entre les lamelles ensuite il diminue à partir de l'espacement  $H/4$ . D'autre part l'éclairement maximal diminue de seulement 5% ( $e=H/16$ ) à 9% ( $e=H$ ).
- Pour l'inclinaison 90°, les mêmes remarques pourront être faites, c'est toujours l'espacement  $e=H$  qui enregistre l'éclairement minimal le plus faible (572 lx), réduit de presque 38% en comparaison avec le cas de référence. Aussi le niveau d'éclairement augmente en diminuant l'espacement entre les lamelles ensuite il diminue à partir de l'espacement  $H/4$ . Les niveaux d'éclairement maximal diminuent de moins de 7% par rapport au cas de référence.
- Pour l'inclinaison 120°, le comportement est différent. L'espacement  $e=H$  offre le niveau d'éclairement minimal le plus élevé (753 lx) dont la réduction est de 18% seulement par rapport au cas de référence. Nous pouvons constater que l'éclairement minimal est positivement corrélé avec l'espacement. L'impact sur l'éclairement maximal est négligeable, il est réduit de moins de 4% par rapport au cas de référence.

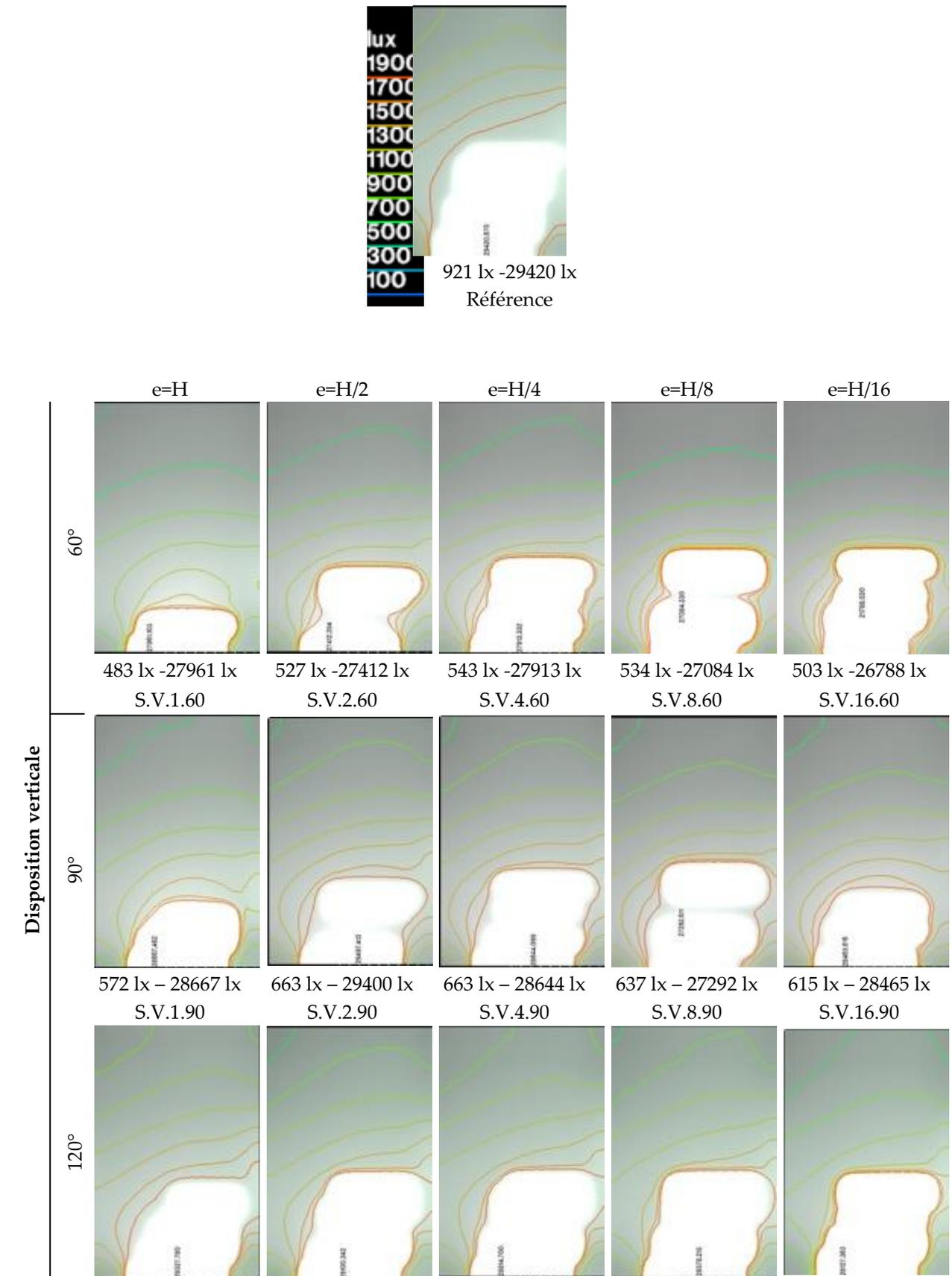
**Dans le cas de la disposition horizontale des lamelles :**

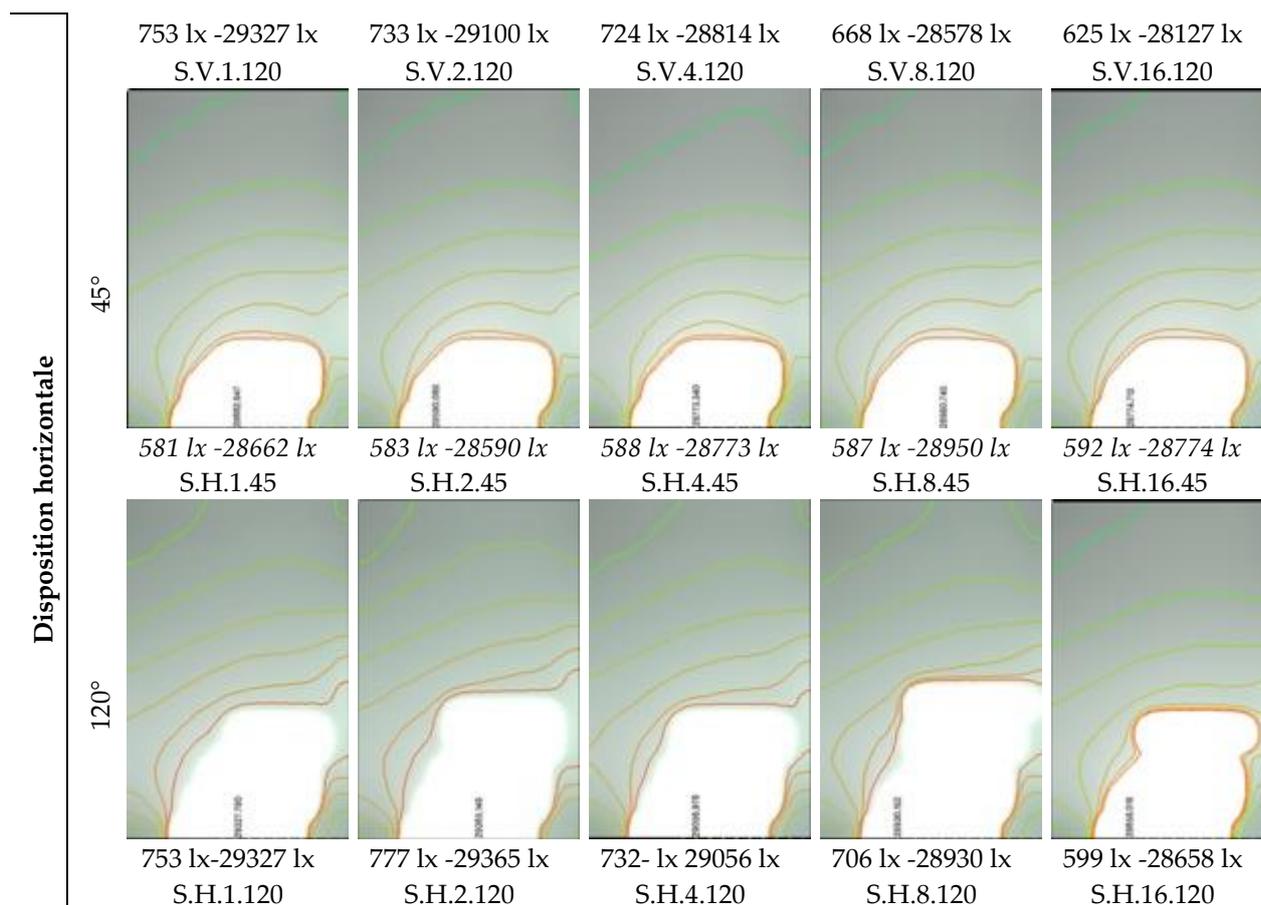
- Pour l'inclinaison  $45^\circ$ , les cinq espacements enregistrent presque le même niveau d'éclairage minimal et maximal. Cependant l'impact sur l'éclairage minimal est plus significatif, il diminue de 35,79% ( $e=H/16$ ) à 36,98% ( $e=H$ ) par rapport au cas de référence et il est négativement corrélé avec l'espacement. Alors que l'éclairage maximal est réduit de moins de 3% par rapport au cas de référence.
- Cependant pour l'inclinaison  $120^\circ$ , c'est l'espacement  $e=H/2$  qui offre le niveau d'éclairage minimal le plus élevé (777 lx). Alors que l'espacement  $e=H/16$  offre le niveau d'éclairage minimal le plus faible (589 lx). D'autre part le niveau d'éclairage maximal est réduit de 2% seulement par rapport au cas de référence. Il est à noter que les niveaux d'éclairage, minimal et maximal, sont positivement corrélés avec l'espacement entre les lamelles.

La comparaison verticale permet d'étudier l'impact de l'inclinaison par rapport aux différents espacements :

- Dans le cas d'une disposition verticale : nous pouvons constater que :
  - C'est toujours l'inclinaison  $120^\circ$  qui enregistre les valeurs d'éclairage minimal et maximal les plus élevées, elles dépassent 600 lx et 28000 lx respectivement.
  - L'inclinaison  $60^\circ$  enregistre les valeurs d'éclairage minimal et maximal les plus faibles pour les cinq espacements.
  - Quel que soit l'espacement des lamelles, le niveau d'éclairage augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison.
- Dans le cas d'une disposition horizontale : c'est toujours les cas avec un angle d'inclinaison de  $120^\circ$  qui enregistrent les valeurs d'éclairage minimal les plus élevées. Ces résultats montrent que l'impact des différentes configurations étudiées sur les niveaux d'éclairage maximal est insignifiant. Les niveaux d'éclairage maximal dépassent les 28500 lx dans tous les cas avec une réduction de moins de 3% par rapport au cas de référence.

Tableau 9: Résultats de simulation de l'éclairage, le 21 Décembre pour l'orientation Sud





### En période d'été (21 juin)

Les résultats, présentés dans le Tableau 10, montrent que les différentes configurations réduisent significativement le niveau d'éclairage maximal, il diminue de plus de 88% par rapport au cas de référence, restant au-dessus de l'éclairage requis (500lx) mais ne dépasse pas 3000 lx limitant ainsi les risques d'éblouissement. Pour l'éclairage minimal, bien que la réduction par rapport au cas de référence soit insignifiante (moins de 42%) les niveaux d'éclairage minimal sont au-dessous de l'éclairage requis (500lx) pour tous les cas étudiés même pour le cas de référence (412 lx).

Dans le cas de la disposition verticale, nous remarquons que :

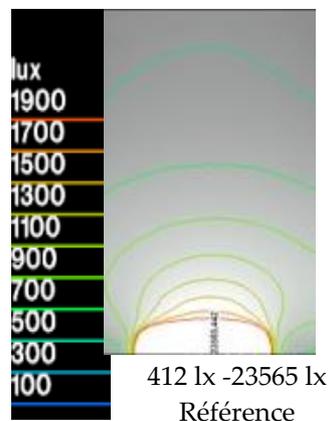
- L'éclairage maximal diminue de plus de 95%.
- L'éclairage maximal augmente en augmentant l'angle d'inclinaison pour l'espacement  $e=H$  (le cas d'un auvent). Alors que pour les autres espacements c'est l'angle d'inclinaison  $90^\circ$  qui offre les valeurs les plus élevées.

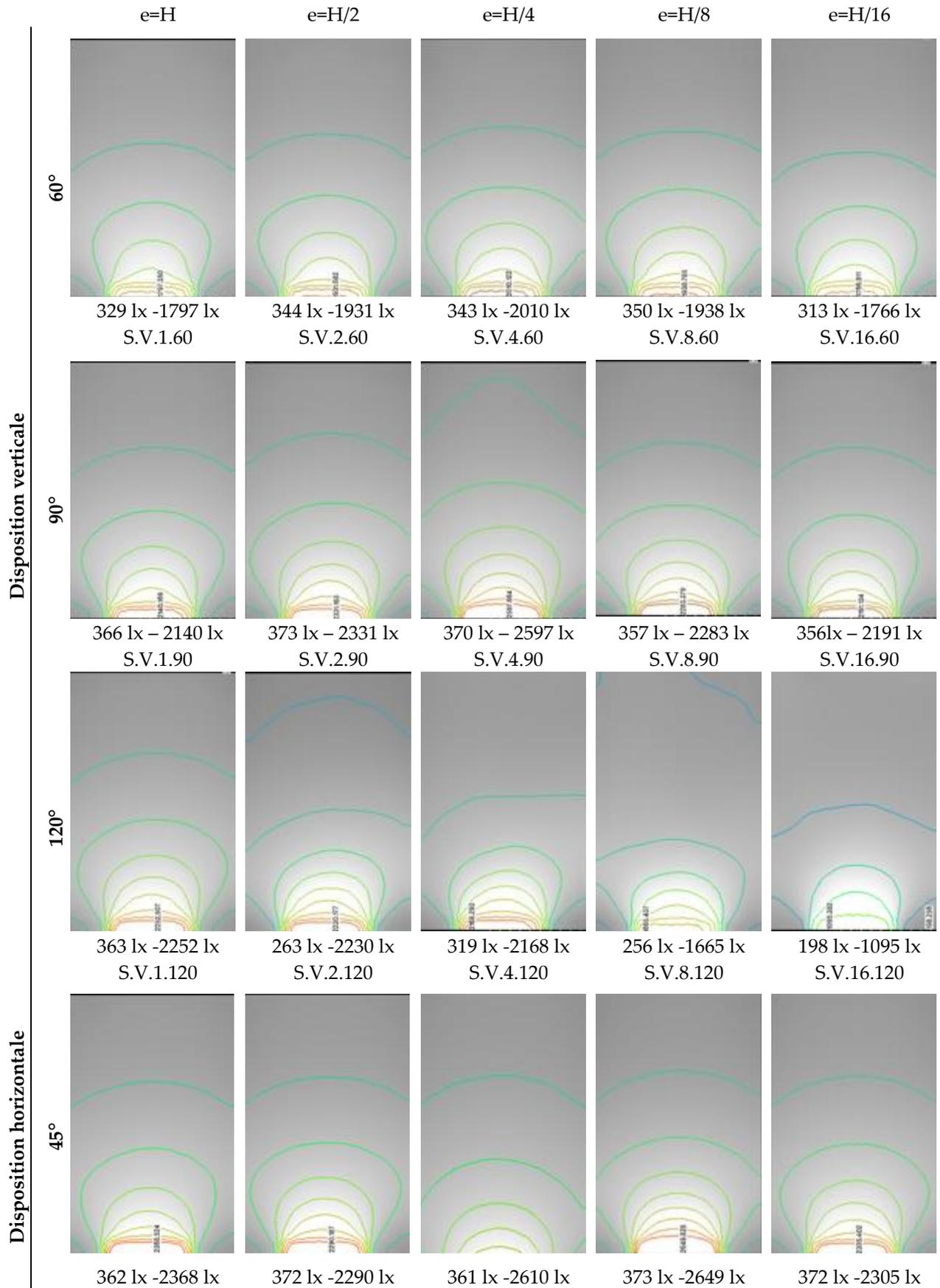
- Quel que soit l'espacement entre les lamelles, c'est toujours l'angle d'inclinaison  $90^\circ$  qui enregistre les valeurs d'éclairement minimal les plus élevées.
- L'éclairement maximal diminue en diminuant l'espacement dans le cas de l'inclinaison  $120^\circ$ , cependant pour les deux inclinaisons ;  $90^\circ$  et  $60^\circ$  l'éclairement maximal augmente en diminuant l'espacement jusqu'à l'espacement  $e=H/4$  ensuite il diminue.
- Les valeurs d'éclairement maximal les plus faibles sont enregistrées pour les cas avec un espacement  $e=H/16$ .
- De manière générale, l'éclairement diminue en diminuant l'espacement.

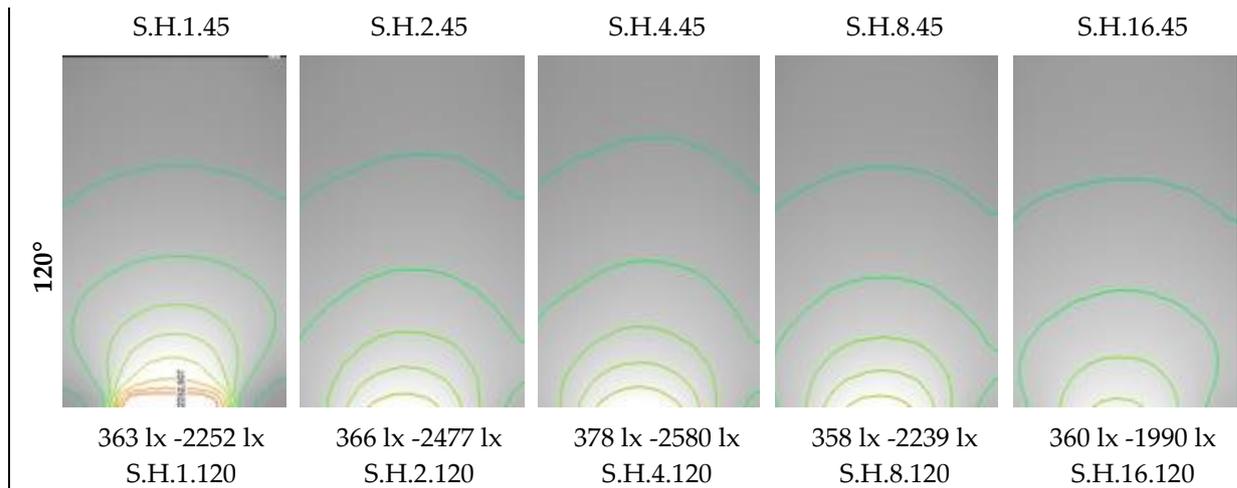
#### Dans le cas de disposition horizontale :

- L'impact sur l'éclairement minimal est négligeable. Par exemple, dans le cas de l'inclinaison  $120^\circ$  nous enregistrons un écart de l'éclairement minimal, entre les différents espacements, ne dépassant pas 20 lx. Cet écart est encore moins important pour l'inclinaison  $45^\circ$ , il ne dépasse pas 12 lx. La diminution de l'éclairement minimal par rapport au cas de référence est de 8% à 12% seulement.
- Cependant l'impact sur l'éclairement maximal est beaucoup plus important. Nous enregistrons une diminution de plus de 88%.

Tableau 10: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Juin pour l'orientation Sud







### 1.4.3.2 L'autonomie de l'éclairage

Les résultats de l'autonomie de l'éclairage (Daylight autonomie), présentés dans le Tableau 11, montrent que le  $sDA_{500,50\%}$  a été significativement réduit en comparaison avec le cas de référence mais il reste au-dessus de la valeur acceptable (55%) pour tous les cas sauf les deux cas S.V.1.60 S.V.2.60 qui enregistrent respectivement un  $sDA_{500,50\%}$  de 48.46% et 54.04%.

Dans le cas de la **disposition verticale**, nous pouvons constater que :

- Pour les deux inclinaison  $60^\circ$  et  $90^\circ$ , le  $sDA_{500,50\%}$  augmente en diminuant l'espacement entre les lamelles, un écart de  $sDA_{500,50\%}$  d'environ 10% est enregistré entre l'espacement  $e=H$  et  $e=H/16$ .
- Pour l'inclinaison  $120^\circ$  les cinq cas enregistrent presque le même  $sDA_{500,50\%}$ , il varie entre 62.43% pour le cas S.V.16.120 et 63.56% pour le cas S.V.2.120, l'écart ne dépasse pas 1,2%.
- Dans le cas de l'espacement  $e=H$  et  $e=H/2$ , le  $sDA_{500,50\%}$  augmente en augmentant l'angle d'inclinaison. Pour les autres espacements l'angle  $90^\circ$  enregistre le  $sDA_{500,50\%}$  le plus élevé alors que l'angle  $60^\circ$  enregistre les valeurs les plus faibles. L'écart de  $sDA_{500,50\%}$  est d'environ 14% dans le cas de l'espacement  $e=H$  et il ne dépasse pas 9% dans le cas des autres espacements.

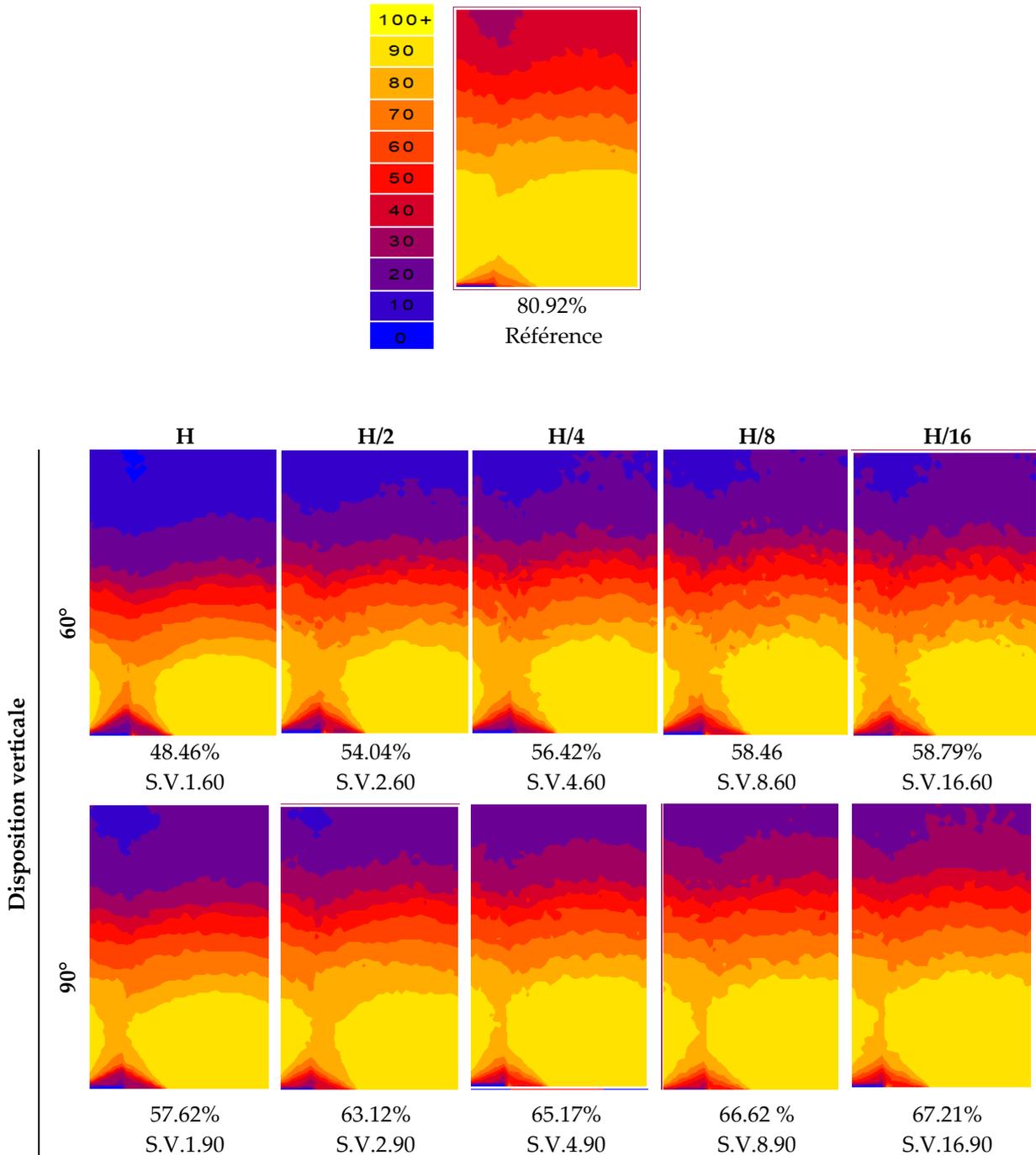
Dans le cas de la **disposition horizontale**, nous pouvons constater également que

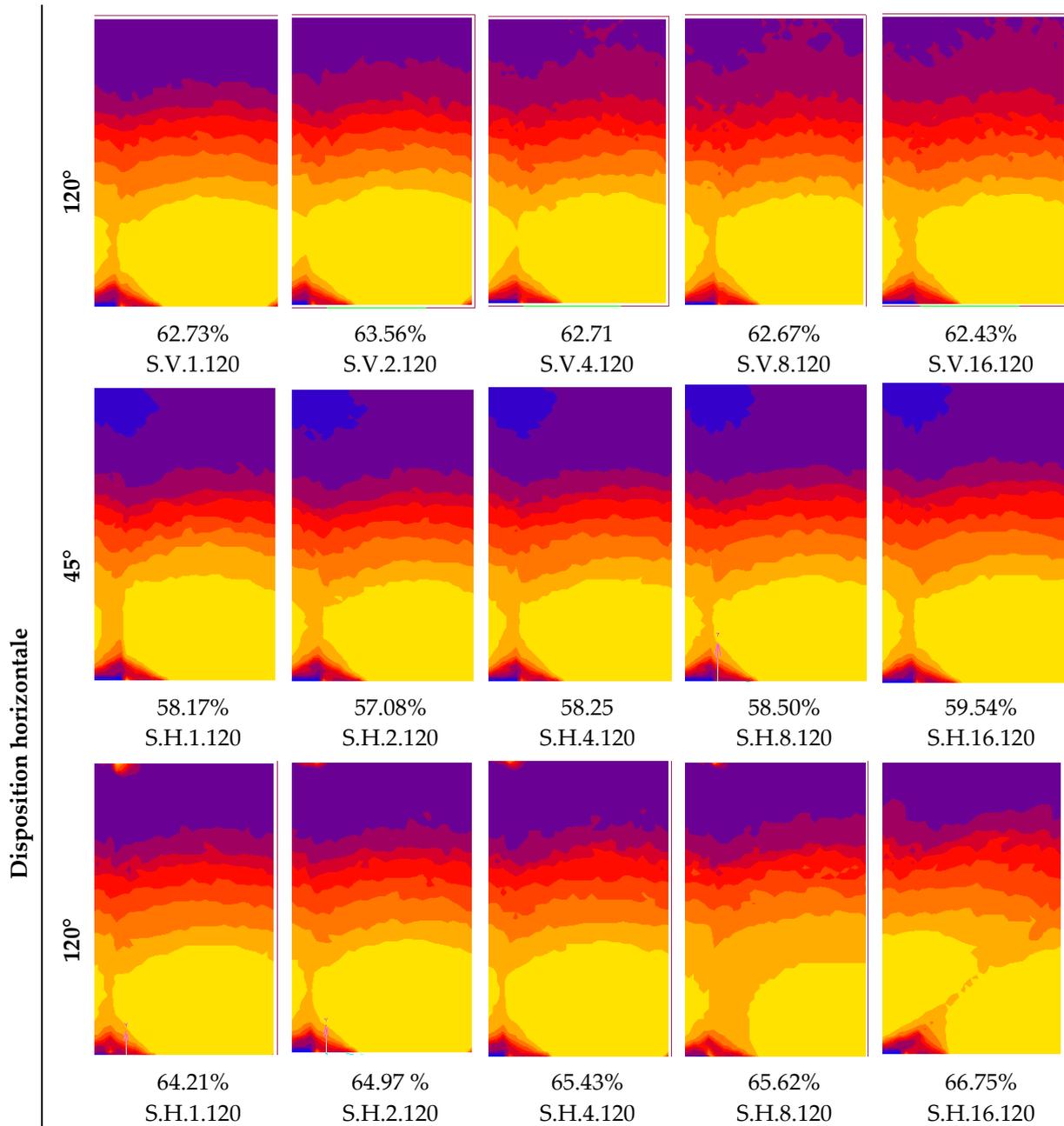
- Le  $sDA_{500,50\%}$  augmente en diminuant l'espacement entre les lamelles, et ce pour les deux inclinaisons  $120^\circ$  et  $45^\circ$ . Sauf que l'écart enregistré entre l'espacement  $H$  et  $H/16$  ne dépasse pas 2,5%.

- Le sDA500 50% enregistré pour l'angle 120° est toujours supérieur à celui enregistré pour l'angle 45° avec un écart d'environ 7%.

Tableau 11: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel  $DA_{500}$  et l'autonomie spatiale

$sDA_{500 \times 50\%}$  pour l'orientation Sud





### 1.4.3.3 Facteur de lumière du jour "FLJ" et l'uniformité "UFLJ"

Les résultats de simulation du facteur de lumière du jour "FLJ" et de l'uniformité "UFLJ", présentés dans le Tableau 12, montrent que :

- Par rapport au cas de référence, toutes les configurations améliorent l'uniformité, tandis que les valeurs du facteur de lumière du jour minimal, maximal et moyen sont diminuées.

- Le pourcentage de la surface du plan de travail avec un FLJ dépassant 2% est au-dessous du seuil recommandé (75%) pour toutes les configurations, seul le cas de référence qui est au-dessus de ce seuil, enregistrant une valeur de 79%.
- De manière générale, les FLJ maximal et moyen sont en corrélation positive avec l'espacement des lamelles, contrairement aux FLJ min,  $FLJ > 2\%$  et l'uniformité qui augmentent en diminuant l'espacement des lamelles.

***Dans le cas de la disposition verticale*** : Nous pouvons constater que :

- Dans le cas de l'inclinaison  $60^\circ$ , l'uniformité est au-dessus du seuil recommandé (0.40) pour tous les espacements. Cependant l'uniformité est au-dessous du seuil pour l'espacement  $e=H/2$  dans le cas de l'inclinaison  $90^\circ$ , et pour les deux espacements  $e=H$  et  $e=H/2$  dans le cas de l'inclinaison  $120^\circ$ .
- L'uniformité diminue en diminuant l'angle d'inclinaison.

***Dans le cas de la disposition horizontale*** : Nous constatons que :

- L'effet de l'espacement des lamelles est négligeable dans le cas de l'angle d'inclinaison  $45^\circ$ , les cinq espacements offrent la même valeur de l'UFLJ (0.35), pour les autres paramètres les différences sont minimales.
- Dans le cas de l'angle d'inclinaison  $120^\circ$  l'impact de l'espacement est plus au moins important avec de faibles variations. L'UFLJ varie de 0.38 pour les espacements  $H/8$  et  $H/16$  et 0.40 pour les espacements  $H$  et  $H/2$ .
- L'angle d'inclinaison  $120^\circ$  offre des valeurs de UFLJ et  $FLJ > 2\%$  supérieures à celles enregistrées pour l'angle  $45^\circ$ , contrairement aux valeurs du FLJ (minimal, maximal et moyen) qui sont plus élevées dans le cas de l'angle  $45^\circ$ .

Tableau 12: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Sud. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour  $FLJ > 2$  et plus de 0.40 pour l'UFLJ)

	Cas	FLJ minimal	FLJ maximal	FLJ moyen	FLJ > 2%	l'uniformité UFLJ FLJ min/ FLJ moy
Disposition verticale $60^\circ$	Référence	1.43	25.13	4.44	<b>79</b>	0.32
	S.V.1.60	1.16	16.39	2.72	43.84	<b>0.43</b>
	S.V.2.60	1.18	14.37	2.65	49.29	<b>0.44</b>
	S.V.4.60	1.27	10.92	2.61	54.12	<b>0.49</b>
	S.V.8.60	1.28	7.31	2.59	57.00	<b>0.49</b>
	S.V.16.60	1.34	8.43	2.58	54.29	<b>0.52</b>

	Cas	FLJ minimal	FLJ maximal	FLJ moyen	FLJ > 2%	l'uniformité UFLJ FLJ min/ FLJ moy	
Disposition horizontale	90°	S.V.1.90	1.26	15.26	3.00	59.17	<b>0.42</b>
		S.V.2.90	1.28	20.63	3.51	65.29	0.36
		S.V.4.90	1.31	12.09	3.26	70.21	<b>0.40</b>
		S.V.8.90	1.35	9.19	2.98	67.25	<b>0.45</b>
		S.V.16.90	1.41	9.85	3.01	68.88	<b>0.47</b>
	120°	S.V.1.120	1.22	16.32	3.18	62.05	0.38
		S.V.2.120	1.24	15.03	3.17	60.88	0.39
		S.V.4.120	1.29	13	3.22	64.29	<b>0.40</b>
		S.V.8.120	1.32	11.68	3.30	67.12	<b>0.40</b>
		S.V.16.120	1.33	11.12	3.32	67.54	<b>0.40</b>
	45°	S.H.1.45	1.20	20.35	3.42	56.04	0.35
		S.H.2.45	1.21	20.44	3.44	56.50	0.35
		S.H.4.45	1.22	20.120	3.120	56.67	0.35
		S.H.8.45	1.22	20.46	3.120	56.83	0.35
		S.H.16.45	1.22	20.47	3.120	56.75	0.35
	120°	S.H.1.120	1.28	16.21	3.17	63.71	<b>0.40</b>
		S.H.2.120	1.24	16.15	3.13	59.12	<b>0.40</b>
		S.H.4.120	1.21	15.92	3.11	58.07	0.39
		S.H.8.120	1.18	16.29	3.08	57.38	0.38
		S.H.16.120	1.18	16.22	3.12	58.00	0.38

## 1.5 L'orientation Est

Nous présentons dans cette section, les résultats de simulation obtenus pour l'orientation Est. L'objectif est d'étudier l'impact de deux paramètres de conception ; l'inclinaison des lamelles (30° et 45°) et l'espacement entre les lamelles.

### 1.5.1 Impact sur la température de l'air

Les résultats de simulation pour les mois janvier et juillet sont d'abord présentés dans la Figure 60, permettant de comparer, selon l'espacement entre les lamelles, l'effet de l'inclinaison sur les températures de l'air. Ces mêmes résultats sont ensuite présentés dans la Figure 61, afin de comparer, selon l'angle d'inclinaison, l'effet de l'espacement sur les températures de l'air.

**Pour le mois de janvier**, Ces résultats indiquent que :

- Les configurations étudiées enregistrent un écart de température de l'air par rapport au cas de référence entre 0.7°C (8h00) et 1.8°C (12h00).
- Les deux inclinaisons étudiées (30° et 45°) présentent le même comportement pour tous les espacements. Ceci est expliqué par les courbes de température superposées ; l'écart de température enregistré entre les deux inclinaisons ne dépasse pas 0,02°C, où l'angle d'inclinaison 45° enregistre des températures plus élevées que celles enregistrées pour l'angle 30°. Bien que les différences soient négligeables, nous pouvons dire que les températures de l'air augmentent en augmentant l'angle d'inclinaison.
- Les cinq espacements présentent le même comportement, l'écart de température entre les deux espacements  $e=H$  et  $e=H/16$  ne dépasse pas 0,05°C. Il est à noter que, malgré les différences minimales entre les configurations, les températures de l'air sont en corrélation positive avec l'espacement des lamelles.

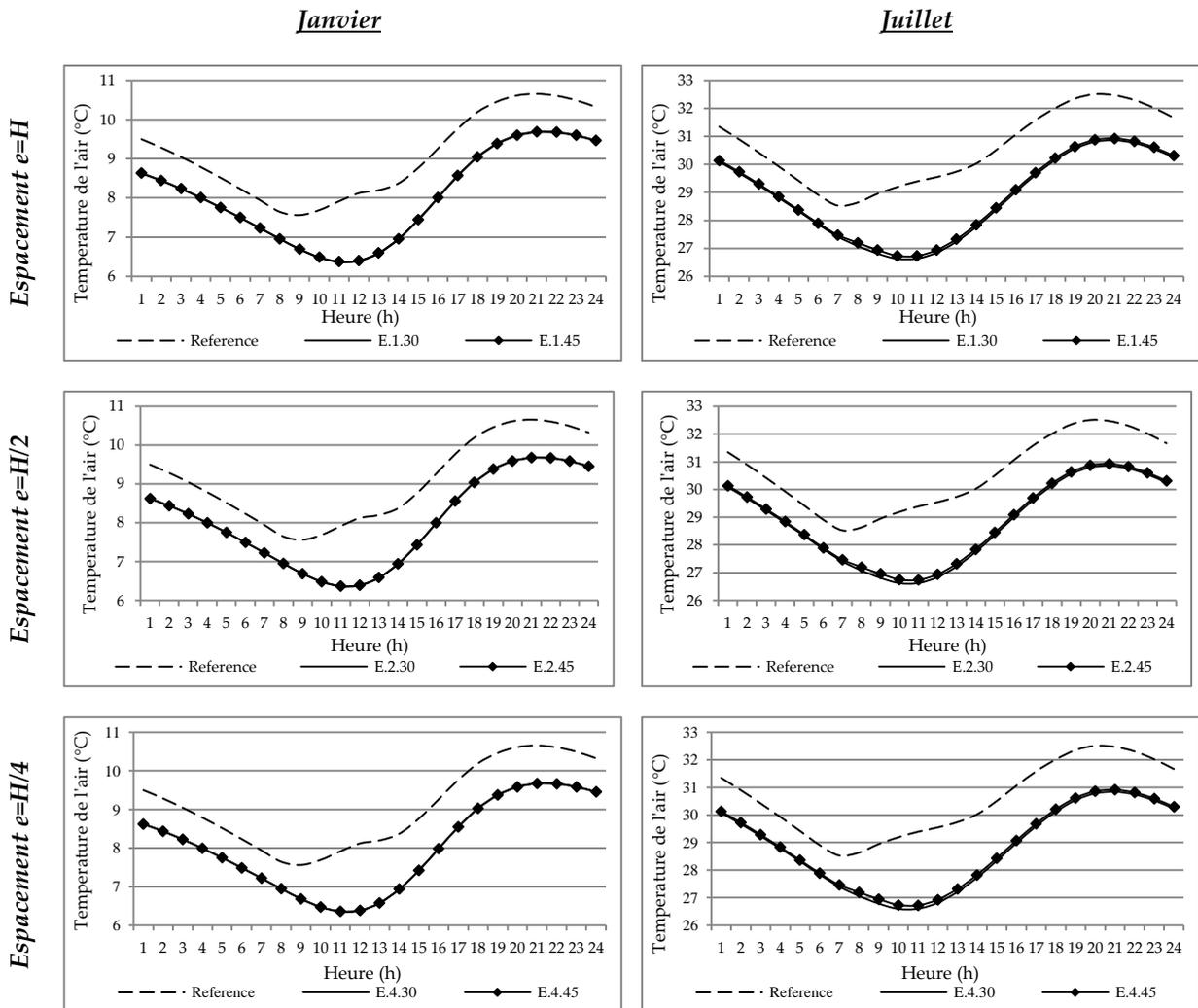
**Pour le mois de juillet**, les résultats montrent que :

- La protection solaire diminue considérablement les températures de l'air par rapport au cas de référence. Nous enregistrons des écarts de température entre 1°C (6h00) et 2,9°C (11h00).
- Les deux inclinaisons étudiées (30° et 45°) présentent le même comportement pour tous les espacements. Ceci est expliqué par les courbes de température très rapprochées ; l'écart de température enregistré entre les deux inclinaisons ne dépasse pas 0,16°C, c'est l'angle

d'inclinaison 45° qui enregistre des températures les plus élevées. Bien que les différences soient négligeables, nous pouvons dire que les températures de l'air augmentent en augmentant l'angle d'inclinaison.

- Les cinq espacements présentent le même comportement, l'écart de température entre les deux espacements  $e=H$  et  $e=H/16$  ne dépasse pas 0,2°C. Malgré les différences minimales entre les configurations, les températures de l'air sont en corrélation positive avec l'espacement des lamelles.

Nous constatons que toutes les configurations étudiées ont le même comportement. L'impact de l'espacement et de l'angle d'inclinaison des lamelles est négligeable dans le cas de l'orientation Est, Cela est dû au fait que, durant toute l'année, l'azimut est faible par rapport à l'angle d'occultation optimal, ce qui empêche la pénétration du rayonnement solaire.



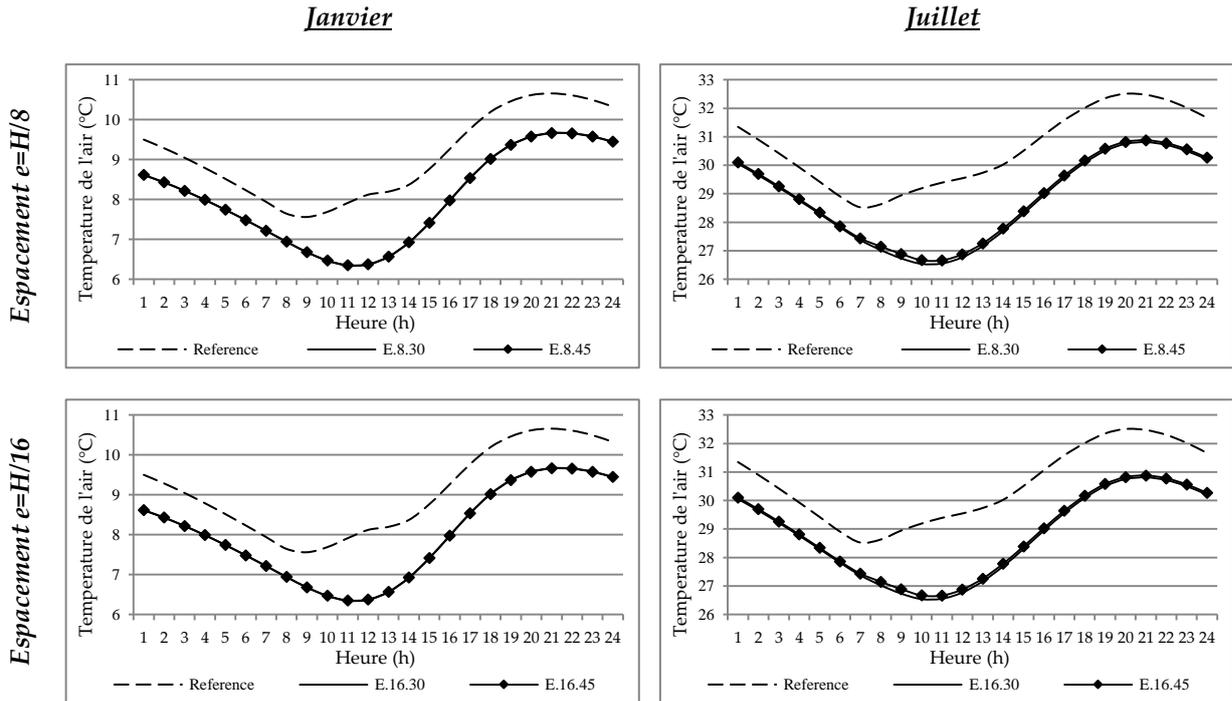


Figure 60: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'espacement entre les lamelles

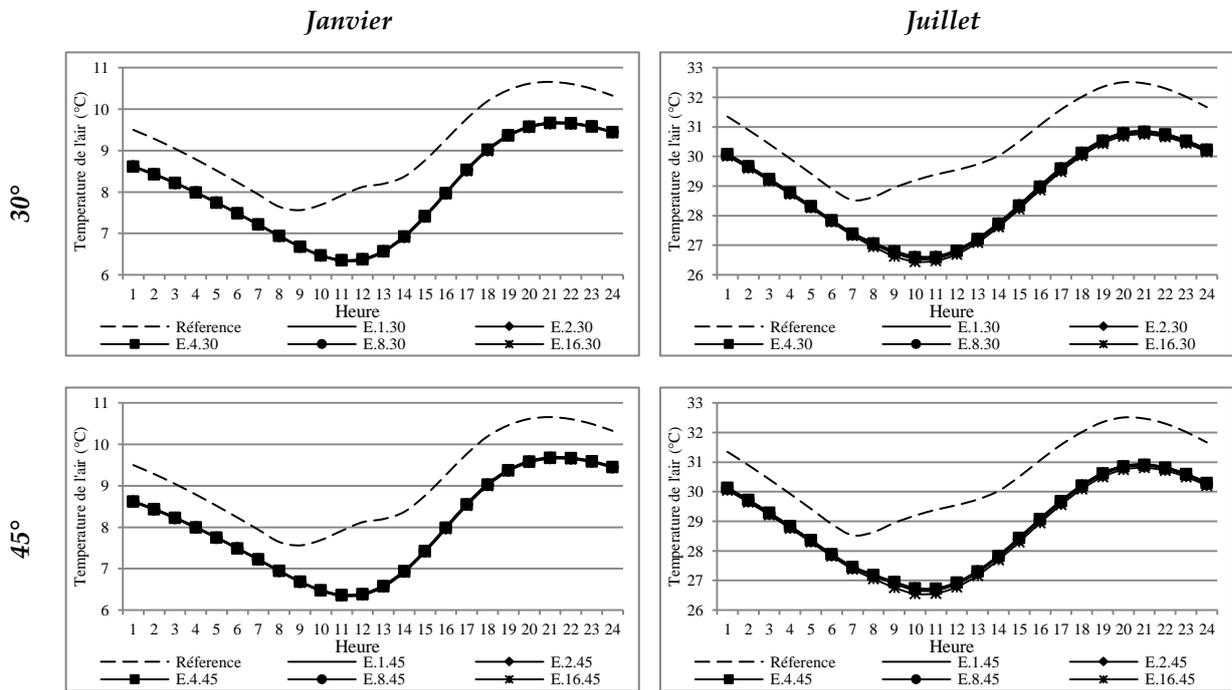


Figure 61: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'angle d'inclinaison

## 1.5.2 Impact sur la performance énergétique

### 1.5.2.1 Consommation énergétique annuelle pour le chauffage

Nous pouvons observer à partir du graphe, présenté dans la Figure 62 , que l'utilisation des protections solaires augmente les charges de chauffage requis pour toutes les configurations en comparaison avec le cas de référence, ceci est dû principalement à la réduction de la pénétration solaire en hiver par la protection solaire. Cette augmentation varie entre 21,8% et 22,8%. La comparaison des résultats obtenus nous permet d'étudier l'impact de l'espacement et l'inclinaison des lamelles.

- L'impact de l'espacement entre les lamelles :
  - Dans le cas de l'inclinaison 30°, l'impact de l'espacement est négligeable car les cinq espacements enregistrent des augmentations de la demande énergétique peu variées. Cette augmentation varie de 21,1% pour le cas E.1.30 et 22,8% pour le cas E.16.30.
  - Dans le cas de l'inclinaison 45°, l'impact de l'espacement est aussi négligeable. La demande énergétique pour le chauffage augmente de 21,8% pour le cas E.1.45 et 22,6% pour le cas E.16.45.
  - Il est à noter que, pour les deux inclinaisons, les charges de chauffage sont corrélées négativement avec l'espacement entre les lamelles.
  
- L'impact de l'angle d'inclinaison des lamelles : nous remarquons que
  - L'inclinaison 30° enregistre toujours les valeurs de consommation énergétique pour le chauffage les plus élevées en comparaison avec l'inclinaison 45°.
  - Il est à noter que la différence entre les deux inclinaisons est très faible, elle varie entre 6 kWh dans le cas de l'espacement  $e=H/16$  et 10kWh pour l'espacement  $e=H$ .
  - Les charges de chauffage sont corrélées négativement avec l'inclinaison des lamelles.

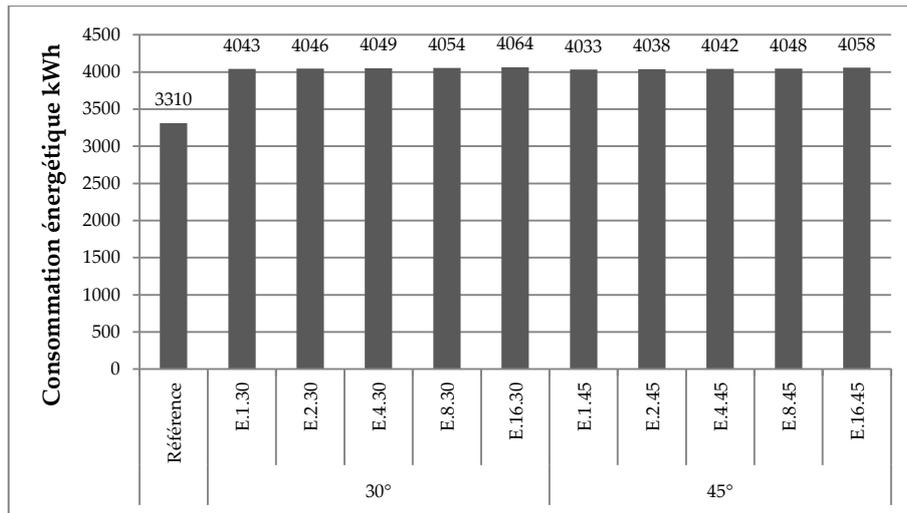


Figure 62 : Consommation énergétique annuelle du chauffage pour l'orientation Est

### 1.5.2.2 Consommation énergétique annuelle pour la climatisation

A partir du graphe présenté dans la Figure 63 nous pouvons constater que :

- L'impact de la protection solaire sur les charges de climatisation est plus significatif en comparaison avec l'impact sur les charges de chauffage ; L'économie d'énergie par rapport au cas de référence varie entre 35,8% et 38,5%.
- D'autre part, les différentes configurations présentent presque le même comportement. Ceci est dû principalement au fait que, durant la période de surchauffe, la quantité du rayonnement solaire direct pénétrant dans l'espace est nulle pour toutes les configurations.

*L'impact de l'espacement entre les lamelles* : afin d'étudier l'effet de l'espacement des lamelles, nous avons comparé les résultats obtenus par rapport à chaque inclinaison, nous constatons que :

- Lorsque l'inclinaison des lamelles est de 30°, nous pouvons constater que les cinq espacements ont presque le même comportement, nous enregistrons une économie d'énergie variant de 36,7% pour le cas E.1.30 et 38,5% pour le cas E.16.30.
- Dans le cas de l'inclinaison 45°, l'impact de l'espacement est aussi peu significatif. Nous enregistrons une économie de l'énergie pour la climatisation variant de 35,8% (E.1.45) à 37,7% (E.16.45).

- Nous pouvons constater que, pour les deux inclinaisons, les charges de climatisation, sont corrélées positivement avec l'espacement des lamelles.

*L'impact de l'inclinaison des lamelles* : la comparaison des résultats obtenus par rapport à chaque espacement nous permet d'étudier l'effet de l'inclinaison. Nous constatons que :

- Quel que soit l'espacement entre les lamelles, l'angle d'inclinaison 45° offre toujours la consommation énergétique la plus élevée en comparaison avec l'inclinaison 30°.
- Cependant les différences de charge de climatisation entre les deux inclinaisons sont minimes, elles ne dépassent pas 12kWh.

Nous pouvons constater que, pour les cinq espacements, les charges de climatisation, sont corrélées positivement avec l'espacement des lamelles.

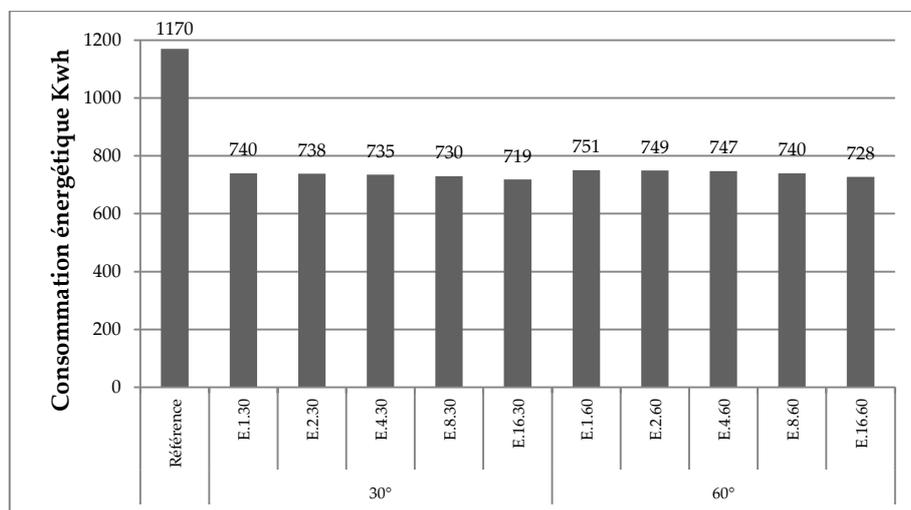


Figure 63 : Consommation énergétique annuelle de la climatisation pour l'orientation Est

### 1.5.3 Impact sur la performance lumineuse

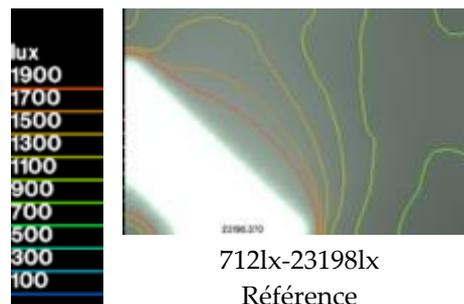
#### 1.5.3.1 Le niveau d'éclairement

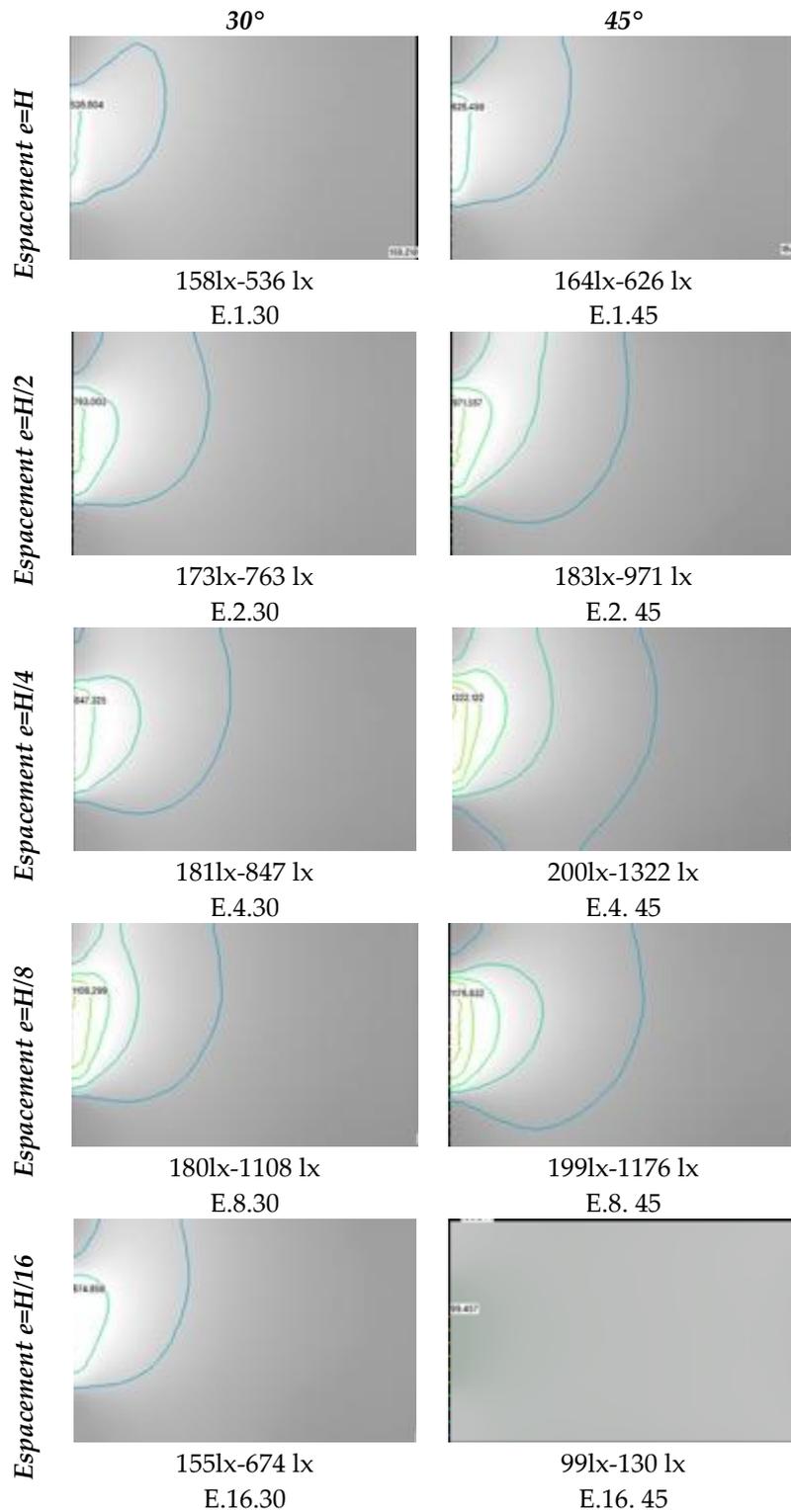
**En période d'hiver (21 décembre à 12h) :** Les résultats obtenus des simulations de l'éclairement pour le 21 Décembre à 12h00 (Tableau 13) montrent que toutes les configurations géométriques ont un impact significatif sur le niveau d'éclairement minimal en le réduisant de plus de 70% par rapport au cas de référence. L'impact sur le niveau d'éclairement maximal est aussi significatif, il est réduit de plus de 94% par rapport au cas de référence. Nous constatons également que, le niveau d'éclairement est au-dessous du niveau requis (500lx) dans plus de 75% de la surface du plan de travail pour toutes les configurations étudiées.

La comparaison horizontale des résultats permet d'étudier l'impact de l'inclinaison des lamelles par rapport aux différents espacements. Tandis que la comparaison verticale permet d'étudier l'impact de l'espacement entre les lamelles par rapport aux différentes inclinaisons. Nous constatons que :

- Pour tous les espacements étudiés, l'angle d'inclinaison 30° enregistre des niveaux d'éclairement, minimal et maximal, plus faibles que l'inclinaison 45°.
- Les niveaux d'éclairement, minimal et maximal, augmentent en diminuant l'espacement entre les lamelles, mais à partir de l'espacement H/4, correspondant à une distance de 0,5m, les niveaux d'éclairement commencent à diminuer.

Tableau 13: Résultats de simulation de l'éclairement, le 21 Décembre pour l'orientation Est





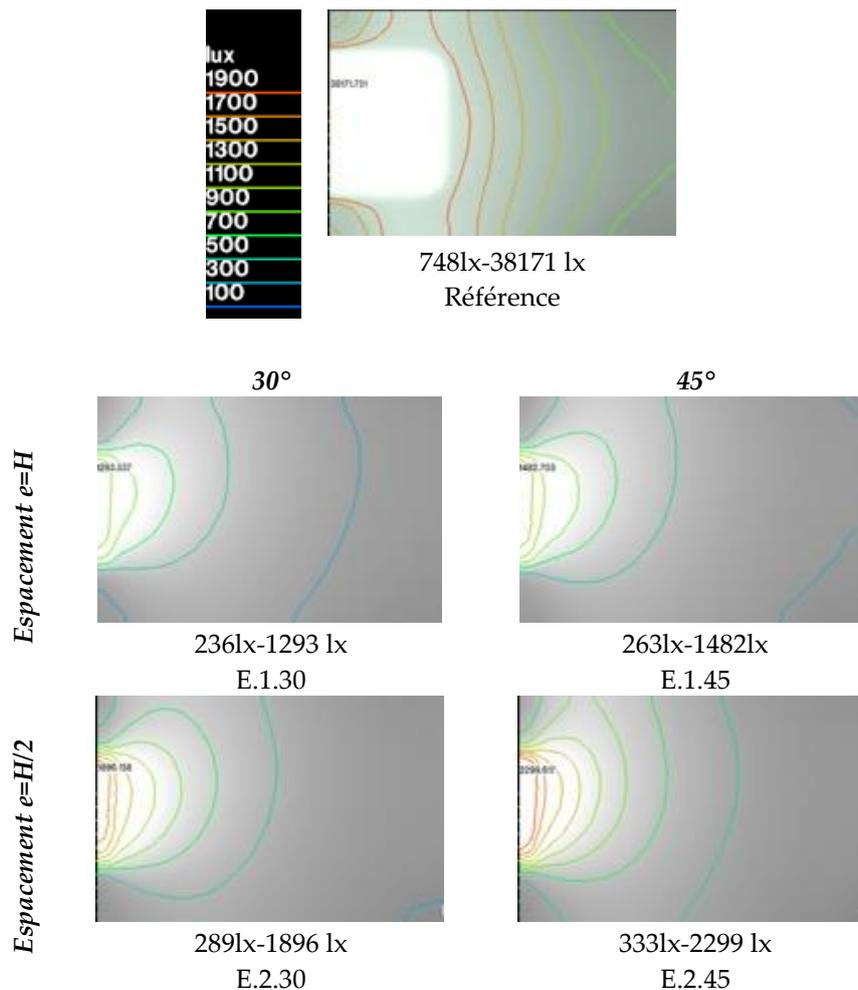
**En période d'été (21 juin à 12h) :** Les résultats obtenus des simulations de l'éclairage pour le 21 juin à 12h00 (Tableau 14) montrent que toutes les configurations géométriques ont un impact significatif sur le niveau d'éclairage minimal en le réduisant de plus de 64% par rapport au cas de référence. L'impact sur le niveau d'éclairage maximal est aussi significatif, il est réduit de

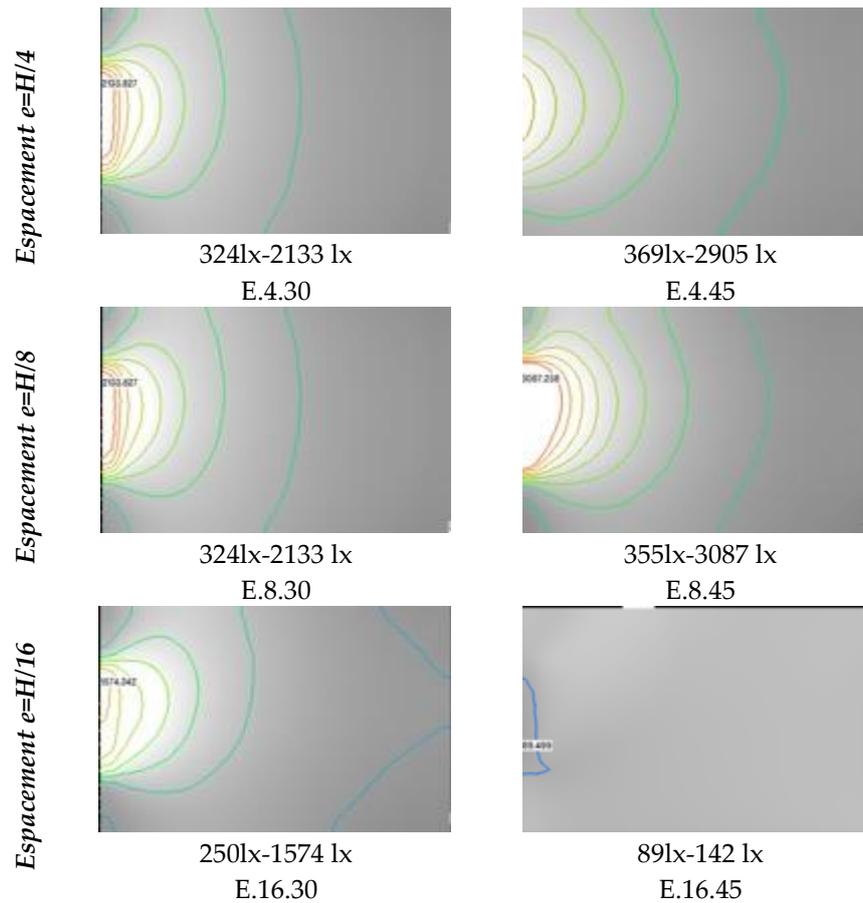
plus de 96% par rapport au cas de référence. Nous constatons également que, le niveau d'éclairage est au-dessous du niveau requis (500lx) dans plus de 75% de la surface du plan de travail pour toutes les configurations étudiées.

La comparaison horizontale des résultats permet d'étudier l'impact de l'inclinaison des lamelles par rapport aux différents espacements. Tandis que la comparaison verticale permet d'étudier l'impact de l'espacement entre les lamelles par rapport aux différentes inclinaisons. Nous constatons que :

- Pour tous les espacements étudiés, l'angle d'inclinaison 30° enregistre des niveaux d'éclairage, minimal et maximal, plus faibles que l'inclinaison 45°.
- Les niveaux d'éclairage, minimal et maximal, augmentent en diminuant l'espacement entre les lamelles, mais à partir de l'espacement H/4, correspondant à une distance de 0,5m, les niveaux d'éclairage commencent à diminuer.

Tableau 14: Résultats de simulation de l'éclairage, le 21 Juin pour l'orientation Est





### 1.5.3.2 L'autonomie de l'éclairage

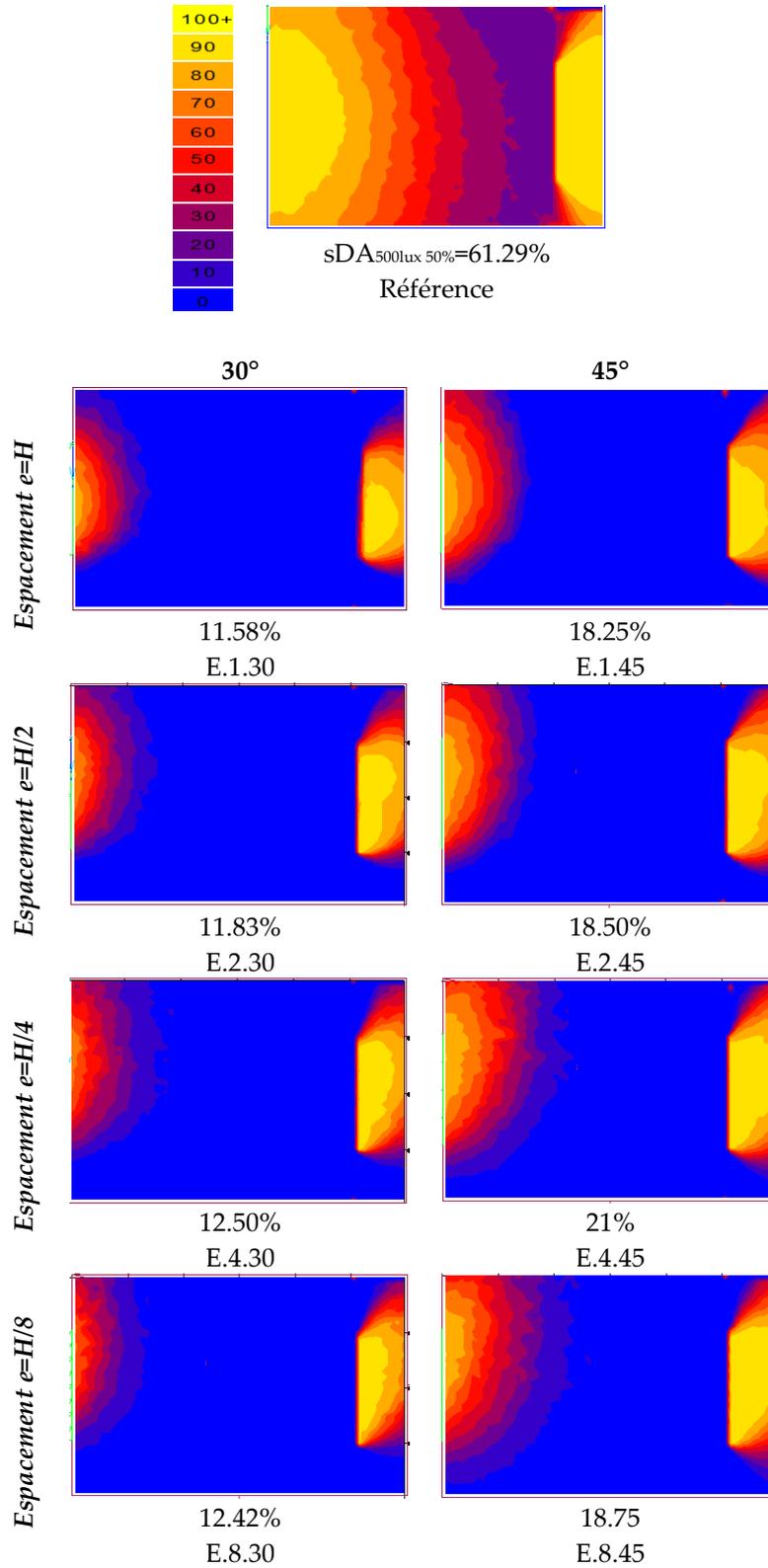
*Les résultats de l'autonomie de l'éclairage (Daylight autonomy), présentés dans le*

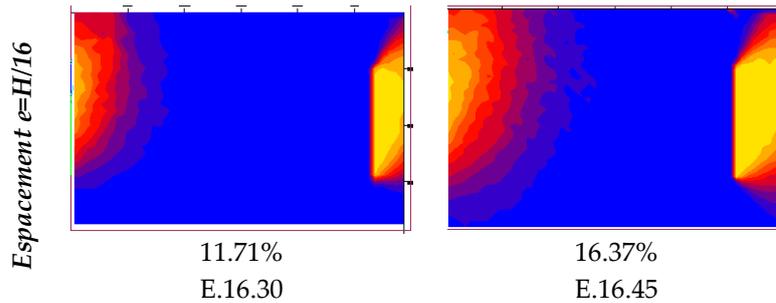
Tableau 15, montrent que le  $sDA_{500,50\%}$  a été significativement réduit en comparaison avec le cas de référence. Il est au-dessous de la valeur acceptable (55%) pour toutes les configurations variant entre 11,58% (E.1.30) et 21% (E.4.45) tandis que le cas de référence enregistre un  $sDA_{500,50\%}$  de 61.29%. Nous pouvons constater, à travers la comparaison des résultats, que :

- Pour les deux inclinaisons 30° et 45°, le  $sDA_{500,50\%}$  augmente en diminuant l'espacement entre les lamelles, jusqu'à l'espacement  $e=H/4$  ( 0.5m) qui enregistre la valeur maximal, puis il diminue en diminuant l'espacement.
- Pour tous les espacements étudiés, l'angle d'inclinaison 45° offre des valeurs de  $sDA_{500,50\%}$  plus élevées que celles enregistrées pour l'inclinaison 30°.

Tableau 15: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel  $DA_{500}$  et l'autonomie spatiale

$sDA_{500 \times 50\%}$  pour l'orientation Est





### 1.5.3.3 Facteur de lumière du jour "FLJ" et l'uniformité "UFLJ"

Les résultats de simulation du facteur de lumière du jour "FLJ" et de l'uniformité "UFLJ", présentés dans le Tableau 16, montrent que, par rapport au cas de référence, toutes les configurations améliorent l'uniformité, elle est au-dessus du seuil recommandé (0.40), tandis que les valeurs du facteur de lumière du jour minimal, maximal et moyen sont diminuées. D'autre part, le pourcentage de la surface du plan de travail avec un FLJ dépassant 2% est au-dessous du seuil recommandé (75%) pour toutes les configurations, seul le cas de référence qui est au-dessus de ce seuil, enregistrant une valeur de 80.51%.

Nous pouvons constater à travers la comparaison des résultats que :

- L'impact de l'espacement entre les lamelles est négligeable dans le cas de l'angle d'inclinaison 30°. Les différences pour le FLJ >2% et l'uniformité sont minimales ; Les FLJ > 2% varie entre 17.67 et 18,96 alors que l'uniformité varie entre 0.63 et 0.64. Cet impact est plus significatif dans le cas de l'angle d'inclinaison 45°. Le FLJ >2% varie entre 19.54 (E.1.45) et 26,46 (E.4.45). Tandis que l'uniformité varie entre 0.57 (E.4.45) et 0.62 (E.1.45).
- Quel que soit l'espacement entre les lamelles, l'angle d'inclinaison 45° enregistre des valeurs de FLJ >2% plus élevées que celles enregistrées pour l'inclinaison 30°. Contrairement à l'uniformité, où l'inclinaison 30° enregistre les valeurs les plus élevées.

Tableau 16: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Est. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour FLJ >2 et plus de 0.40 pour l'UFLJ)

Cas	FLJ minimal	FLJ maximal	FLJ moyen	FLJ > 2%	Uniformité du FLJ min/ FLJ moy
Référence	1.49	24.81	4.51	<b>80.51</b>	0.33
E.1.30	1.14	6.11	1.77	18.96	<b>0.64</b>
E.2.30	1.12	10.04	1.78	17.92	<b>0.63</b>
E.4.30	1.13	9.72	1.80	18.62	<b>0.63</b>
E.8.30	1.13	8.39	1.79	18.28	<b>0.63</b>

<u>E.16.30</u>	1.14	6.86	1.79	17.67	<b>0.64</b>
E.1.45	1.11	10.51	1.80	19.54	<b>0.62</b>
E.2.45	1.12	11.39	1.88	22.04	<b>0.60</b>
E.4.45	1.17	11.93	2.04	26.46	<b>0.57</b>
E.8.45	1.13	10.32	1.94	23.42	<b>0.58</b>
E.16.45	1.12	9.10	1.94	23.33	<b>0.58</b>

## 1.6 L'orientation Ouest

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation obtenus pour l'orientation Ouest. L'objectif est d'étudier l'impact de deux paramètres de conception ; l'inclinaison des lamelles (20° et 30°) ainsi que l'espacement entre les lamelles.

### 1.6.1 Impact sur la température de l'air

Les résultats de simulation pour les mois janvier et juillet sont d'abord présentés selon l'espacement entre les lamelles (Figure 64), permettant de comparer, l'effet de l'inclinaison sur les températures de l'air. Ces mêmes résultats sont ensuite présentés selon l'angle d'inclinaison (Figure 64), afin de comparer l'effet de l'espacement sur les températures de l'air.

**Pour le mois de janvier**, Ces résultats indiquent que :

- Les configurations étudiées enregistrent un écart de température de l'air par rapport au cas de référence entre 0,8°C (9h00) et 2°C (18h00).
- Les deux inclinaisons étudiées (20° et 30°) présentent le même comportement pour tous les espacements. Ceci est expliqué par les courbes de température superposées ; l'écart de température enregistré entre les deux inclinaisons ne dépasse pas 0,01°C, où l'angle d'inclinaison 30° enregistre des températures plus élevées que celles enregistrées pour l'angle 20°. Bien que les différences soient négligeables, nous pouvons dire que les températures de l'air augmentent en augmentant l'angle d'inclinaison.
- Les cinq espacements présentent le même comportement, les écarts de température ne dépassent pas 0,01°C. Il est à noter que, malgré les différences minimales entre les configurations, les températures de l'air sont en corrélation positive avec l'espacement des lamelles.

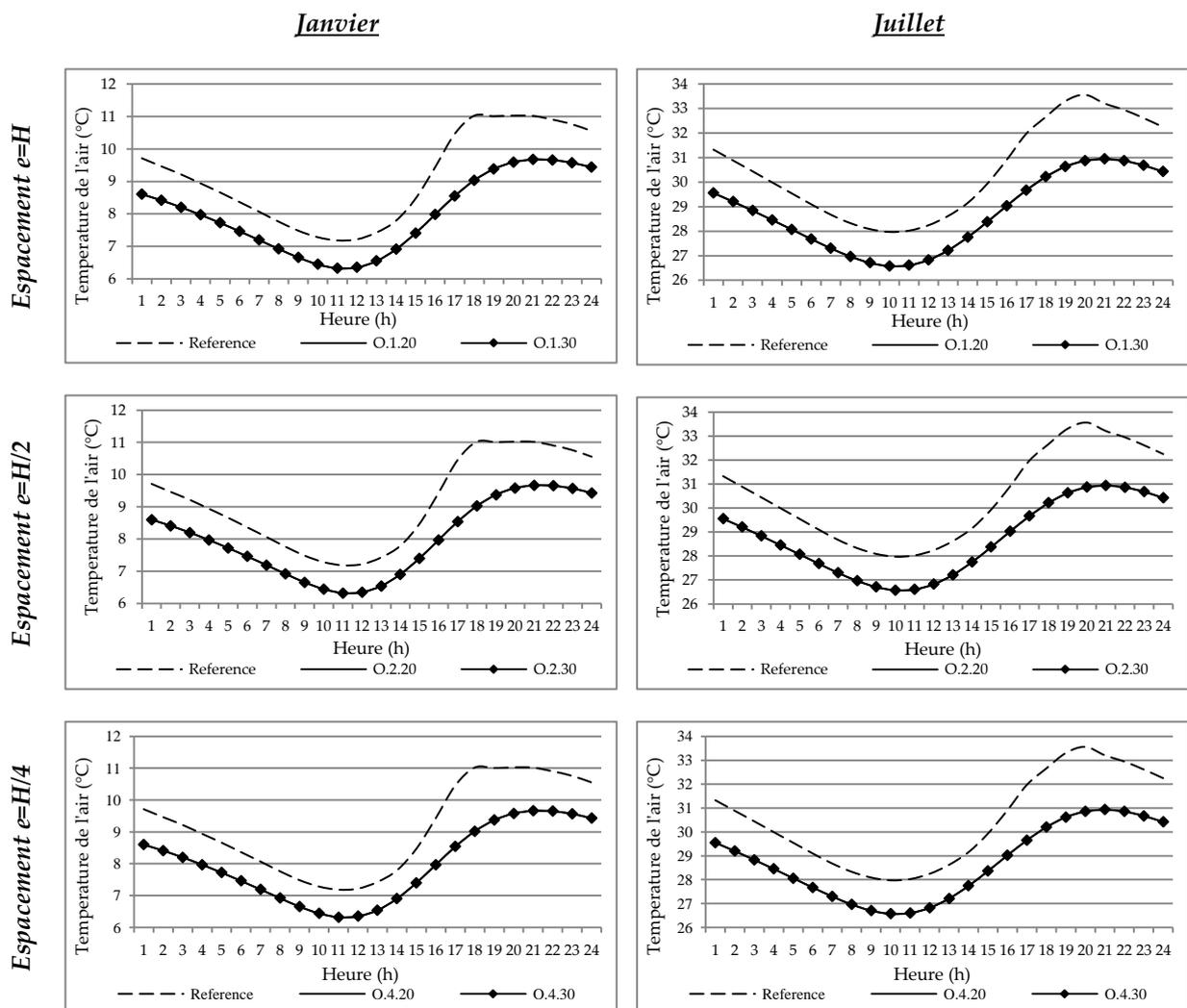
**Pour le mois de juillet**, les résultats montrent que :

- La protection solaire diminue considérablement les températures de l'air par rapport au cas de référence. Nous enregistrons des écarts de température entre 1,3°C (12h00) et 2,7°C (20h00).
- Les deux inclinaisons étudiées (20° et 30°) présentent le même comportement pour tous les espacements. Ceci est expliqué par les courbes de température très rapprochées ; l'écart de température enregistré entre les deux inclinaisons ne dépasse pas 0,02°C, c'est l'angle

d'inclinaison 30° qui enregistre des températures les plus élevées. Bien que les différences soient négligeables, nous pouvons dire que les températures de l'air augmentent en augmentant l'angle d'inclinaison.

- Les cinq espacements présentent le même comportement, l'écart de température entre les deux espacements  $e=H$  et  $e=H/16$  ne dépasse pas 0,1°C. Malgré les différences minimales entre les configurations, les températures de l'air sont en corrélation positive avec l'espacement des lamelles.

Nous constatons que, comme pour l'orientation Est, toutes les configurations étudiées ont le même comportement. L'impact de l'espacement et de l'angle d'inclinaison des lamelles est négligeable dans le cas de l'orientation Ouest, Cela est dû au fait que, durant toute l'année, l'azimut est inférieur à l'angle d'occultation optimal, ce qui empêche la pénétration du rayonnement solaire.



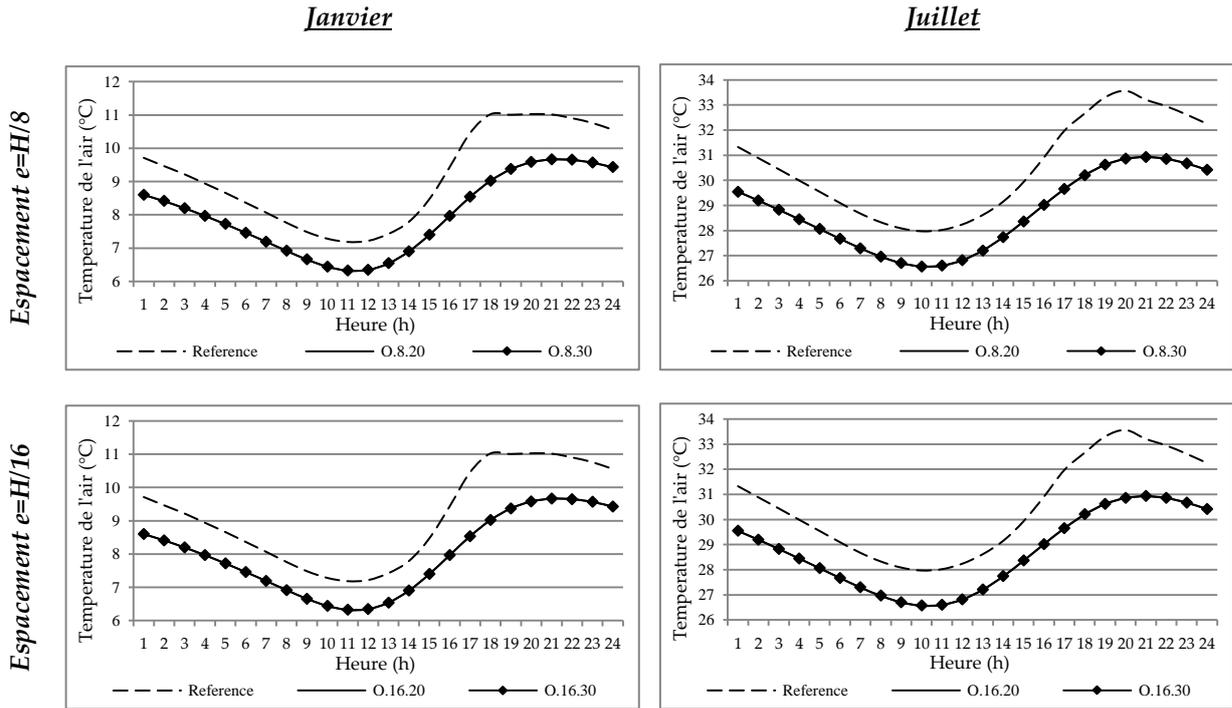


Figure 64: La température de l'air calculée pour l'orientation Ouest pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'espacement entre les lamelles

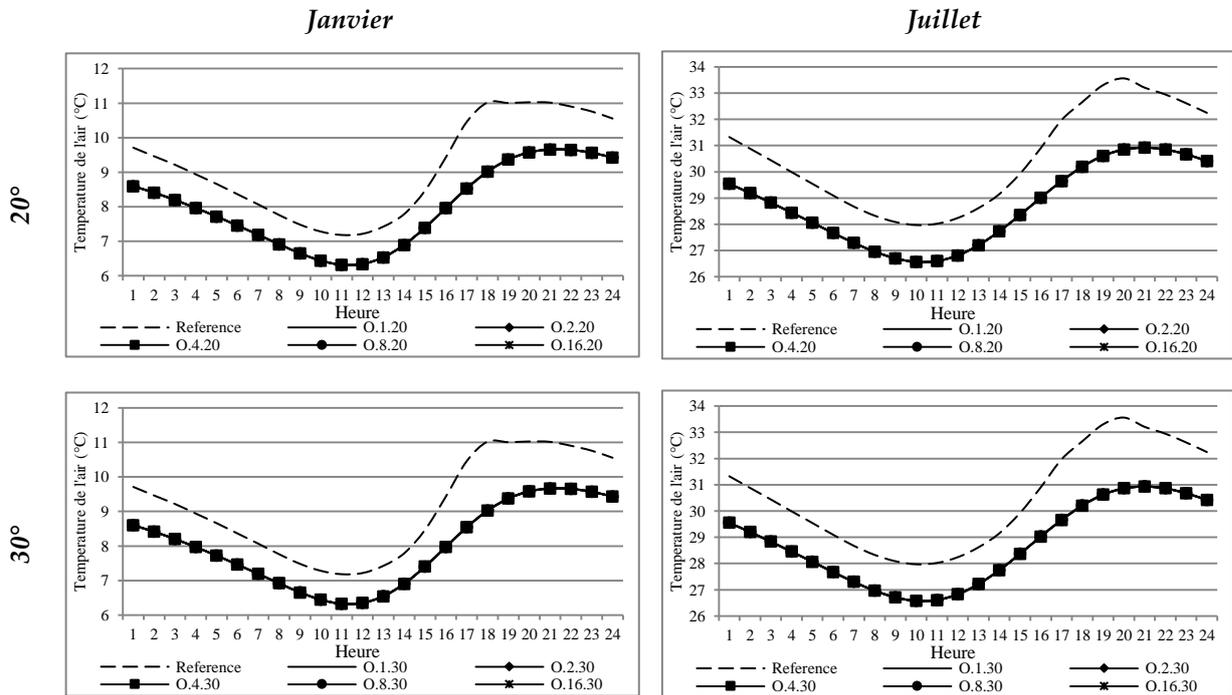


Figure 65: La température de l'air calculée pour l'orientation Ouest pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'angle d'inclinaison

## 1.6.2 Impact sur la performance énergétique

### 1.6.2.1 Consommation énergétique annuelle pour le chauffage

Nous pouvons observer à partir du graphe, présenté dans la Figure 66, que l'utilisation des protections solaires augmente les charges de chauffage requis en comparaison avec le cas de référence, ceci est dû principalement à la réduction de la pénétration solaire en hiver par la protection solaire. Cette augmentation ne dépasse pas 19%. L'analyse comparative des résultats nous permet d'étudier l'impact de l'espacement et l'inclinaison des lamelles :

- L'impact de l'espacement entre les lamelles :
  - Pour les deux angles d'inclinaison étudiés (20° et 30°), l'impact de l'espacement est négligeable car les cinq espacements enregistrent des valeurs de demande énergétique très rapprochées. Nous enregistrons des augmentations variant de 18,6% (O.1.20) à 19% (O.16.20) pour les cas avec une inclinaison de 20°. Pour les cas avec une inclinaison de 30° les augmentations varient entre 18,5% (O.1.30) et 18,7% (O.16.30).
  - Il est à noter que, pour les deux inclinaisons, les charges de chauffage sont corrélées négativement avec l'espacement entre les lamelles.
  
- L'impact de l'angle d'inclinaison des lamelles :
  - L'inclinaison 20° enregistre les valeurs de consommation énergétique pour le chauffage les plus élevées en comparaison avec l'inclinaison 60° et ce pour tous les espacements étudiés.
  - Cependant, il est à noter que la différence entre les deux inclinaisons est très faible, elle ne dépasse pas 5 kWh.
  - Les charges de chauffage sont corrélées négativement avec l'inclinaison des lamelles.

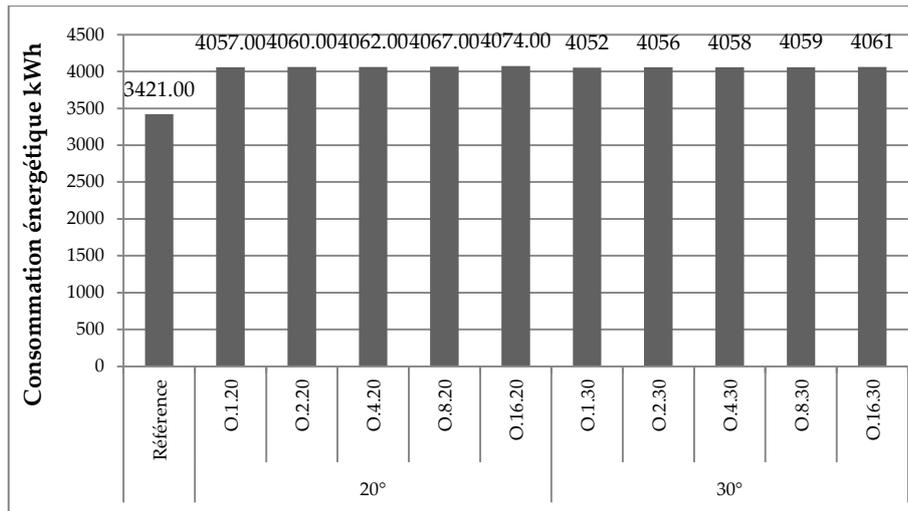


Figure 66 : Consommation énergétique annuelle du chauffage pour l'orientation Ouest

### 1.6.2.2 Consommation énergétique annuelle pour la climatisation

A partir du graphe présenté dans la Figure 67, nous constatons que :

- L'impact de la protection solaire sur les charges de climatisation est plus significatif en comparaison avec l'impact sur les charges de chauffage ; l'économie d'énergie par rapport au cas de référence varie entre 41,4% et 42,2%.
- D'autre part, les différentes configurations présentent presque le même comportement. Ceci est dû principalement au fait que, l'angle d'occultation optimale permet une protection totale (100%) durant la période de surchauffe, la quantité du rayonnement solaire direct pénétrant dans l'espace est nulle pour toutes les configurations.

*L'impact de l'espacement entre les lamelles* : afin d'étudier l'effet de l'espacement des lamelles, nous avons comparé les résultats obtenus par rapport à chaque inclinaison, nous constatons que :

- Pour les deux inclinaisons, les cinq espacements ont presque le même comportement, nous enregistrons une économie d'énergie variant de 41,6% (O.1.20) et 42,3% (O.16.20) pour l'inclinaison 20° et de 41,4% (O.1.30) et 42,2% (O.16.30) pour l'inclinaison 30°.
- Pour les deux inclinaisons, les charges de climatisation, sont corrélées positivement avec l'espacement des lamelles.

*L'impact de l'inclinaison des lamelles* : la comparaison des résultats obtenus par rapport à chaque espacement nous permet d'étudier l'effet de l'inclinaison. Nous constatons que :

- Quel que soit l'espacement entre les lamelles, l'angle d'inclinaison 30° offre toujours la consommation énergétique la plus élevée en comparaison avec l'inclinaison 20°.
- Cependant les différences de charge de climatisation entre les deux inclinaisons sont minimes, elles ne dépassent pas 3kWh.

Nous pouvons constater que, pour les cinq espacements, les charges de climatisation, sont corrélées positivement avec l'angle d'inclinaison des lamelles.

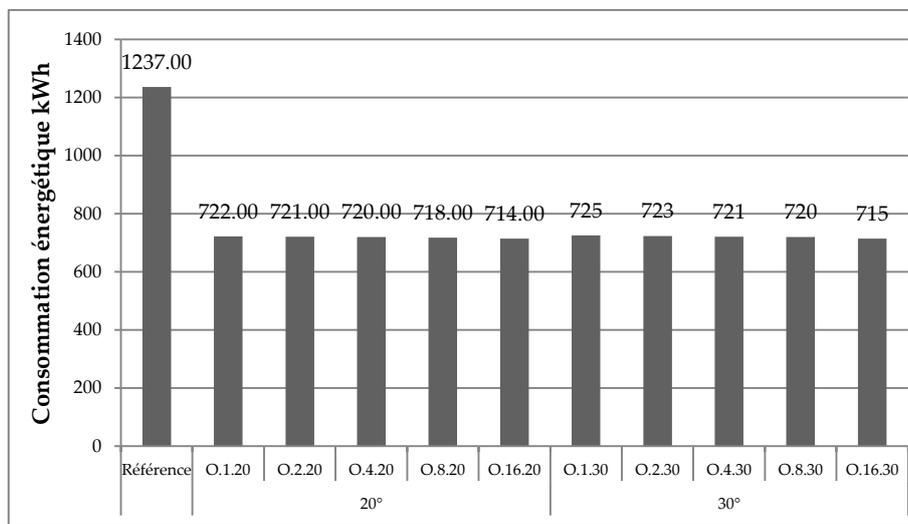


Figure 67 : Consommation énergétique annuelle de la climatisation pour l'orientation Ouest

### 1.6.3 Impact sur la performance lumineuse

#### 1.6.3.1 Le niveau d'éclairement

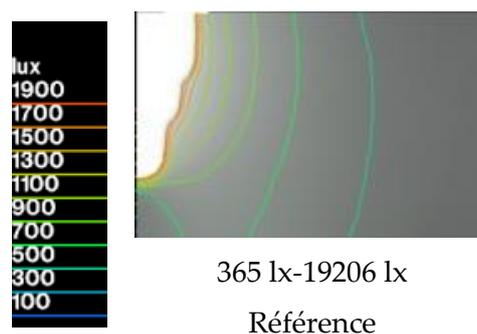
**En période d'hiver (21 décembre à 12h) :** Les résultats de simulation de l'éclairement pour le 21 Décembre à 12h00 (Tableau 17) montrent que toutes les configurations géométriques réduisent significativement les niveaux d'éclairement. En comparaison avec le cas de référence, les niveaux d'éclairement minimal et maximal sont respectivement diminués jusqu'à 72% et 98%.

Nous constatons également que le niveau d'éclairement est au-dessous du niveau requis (500lx) dans toute la surface du plan de travail pour toutes les configurations étudiées.

La comparaison horizontale des résultats permet d'étudier l'impact de l'inclinaison des lamelles par rapport aux différents espacements. Tandis que la comparaison verticale permet d'étudier l'impact de l'espacement entre les lamelles par rapport aux différentes inclinaisons. Nous constatons que :

- Pour tous les espacements étudiés, l'angle d'inclinaison 20° enregistre des niveaux d'éclairement, minimal et maximal, plus faibles que l'inclinaison 30°.
- Les niveaux d'éclairement, minimal et maximal, diminuent en diminuant l'espacement entre les lamelles.

Nous pouvons dire que, pour l'orientation ouest, le niveau d'éclairement est en corrélation positive avec l'angle d'inclinaison et l'espacement entre les lamelles.



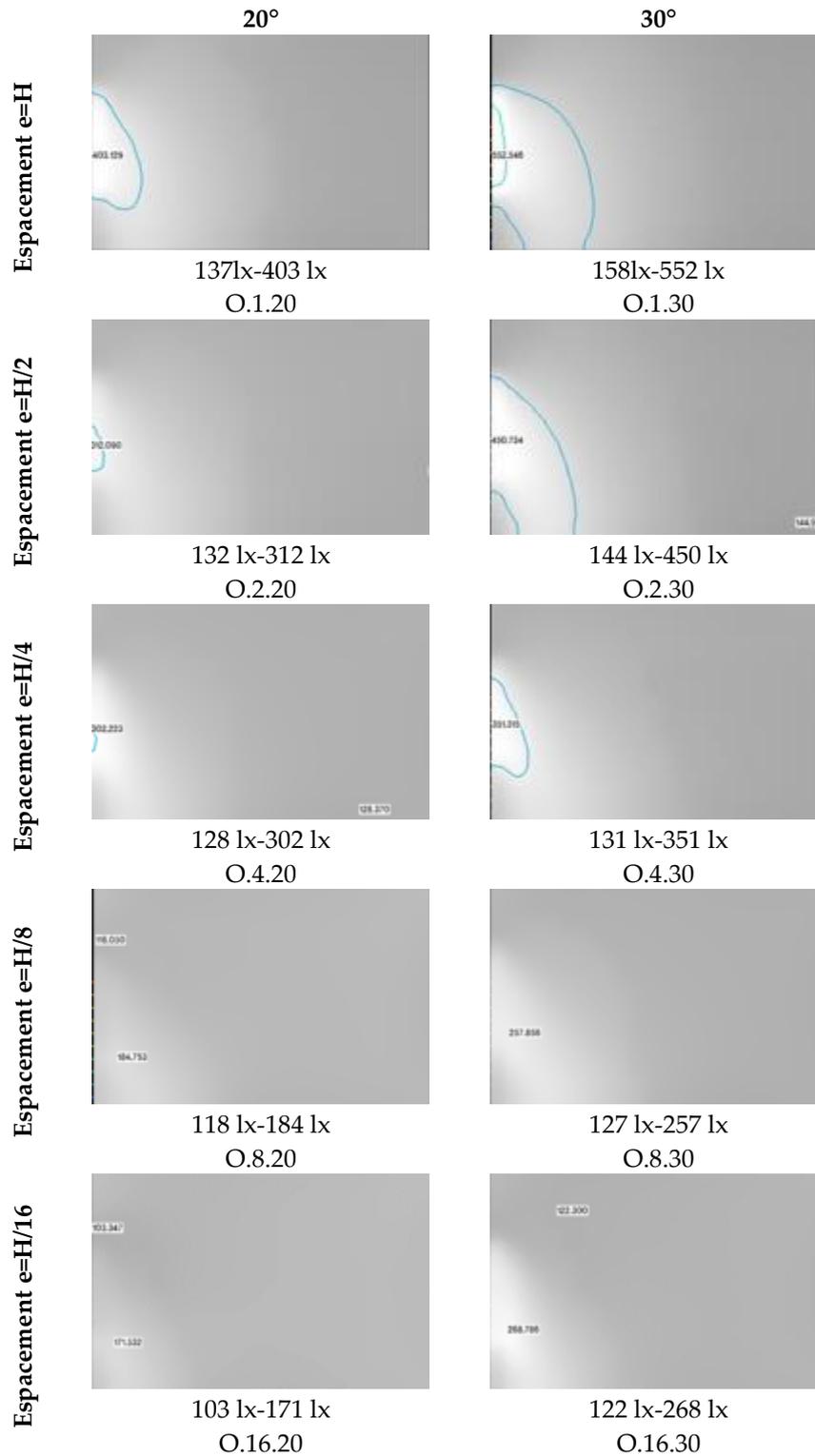


Tableau 17: Résultats de simulation de l'éclairément, le 21 Décembre pour l'orientation Ouest

**En période d'été (21 juin à 12h) :** Les résultats obtenus des simulations de l'éclairément pour le 21 juin à 12h00 (Tableau 18) montrent également que toutes les configurations géométriques

ont un impact significatif sur les niveaux d'éclairage. Par rapport au cas de référence, l'éclairage minimal est réduit de plus de 71% et l'éclairage maximal est réduit jusqu'à 99%.

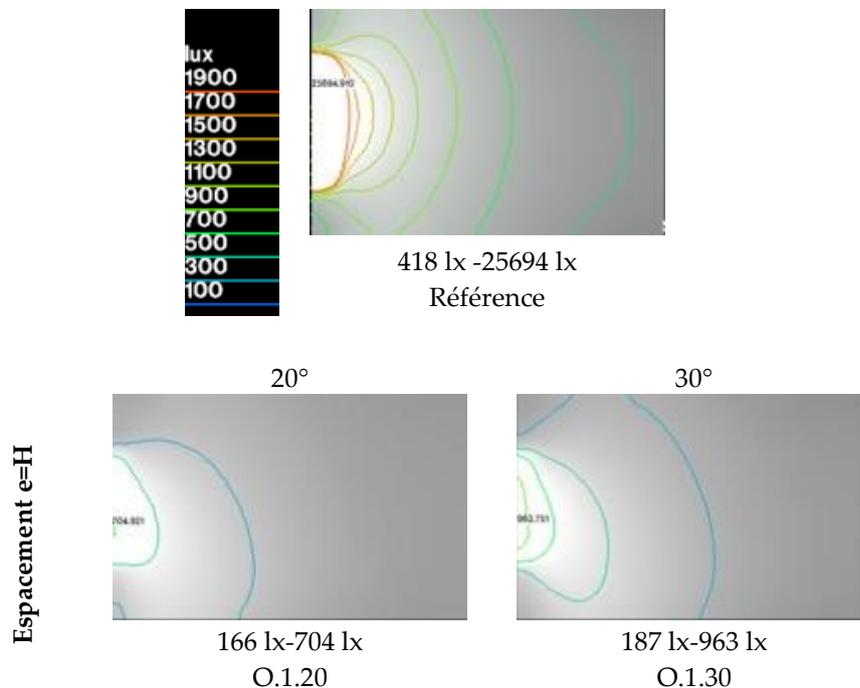
Nous constatons également que le niveau d'éclairage est au-dessous du niveau requis (500lx) dans plus de 80% de la surface du plan de travail pour toutes les configurations étudiées.

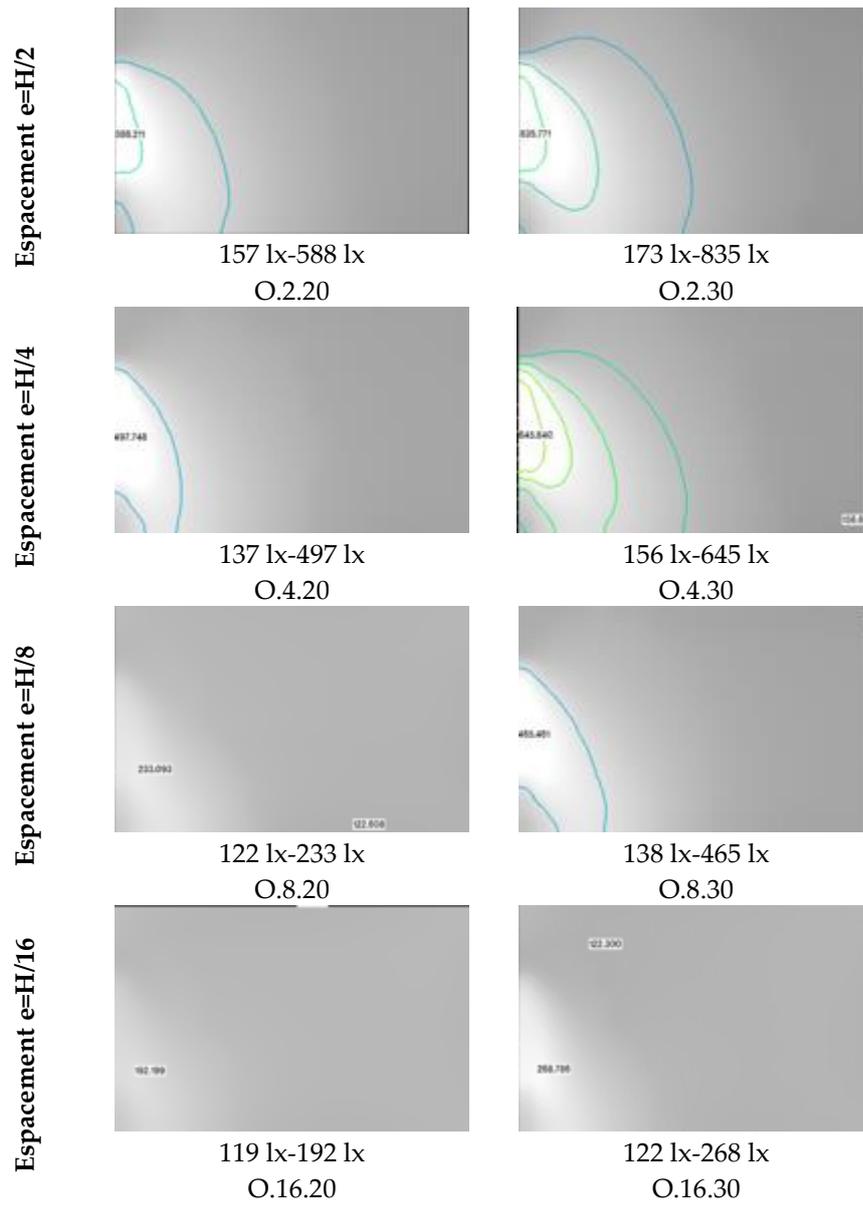
La comparaison horizontale des résultats permet d'étudier l'impact de l'inclinaison des lamelles par rapport aux différents espacements. Tandis que la comparaison verticale permet d'étudier l'impact de l'espacement entre les lamelles par rapport aux différentes inclinaisons. Nous constatons que :

- L'angle d'inclinaison 20° enregistre toujours des niveaux d'éclairage, minimal et maximal, plus faibles que l'inclinaison 30°.
- Les niveaux d'éclairage, minimal et maximal, diminuent en diminuant l'espacement entre les lamelles.

Il est à noter que le niveau d'éclairage est en corrélation positive avec l'angle d'inclinaison et l'espacement entre les lamelles.

Tableau 18: Résultats de simulation de l'éclairage, le 21 Juin pour l'orientation Ouest



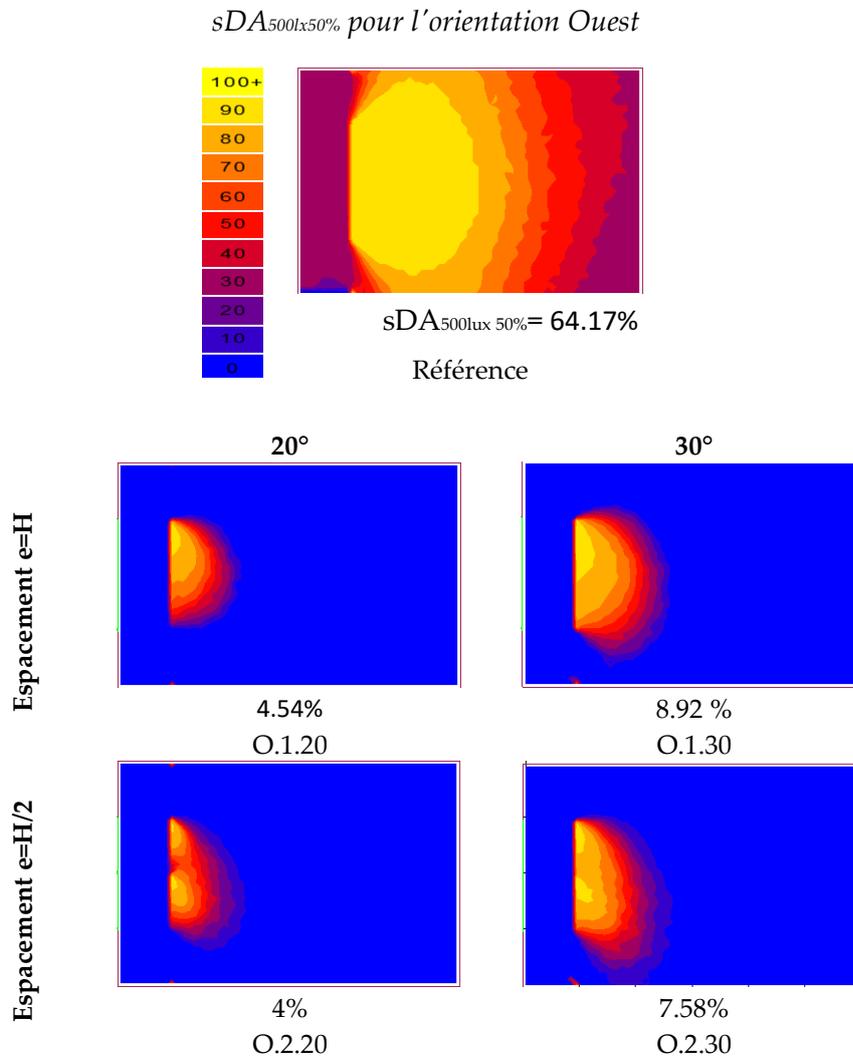


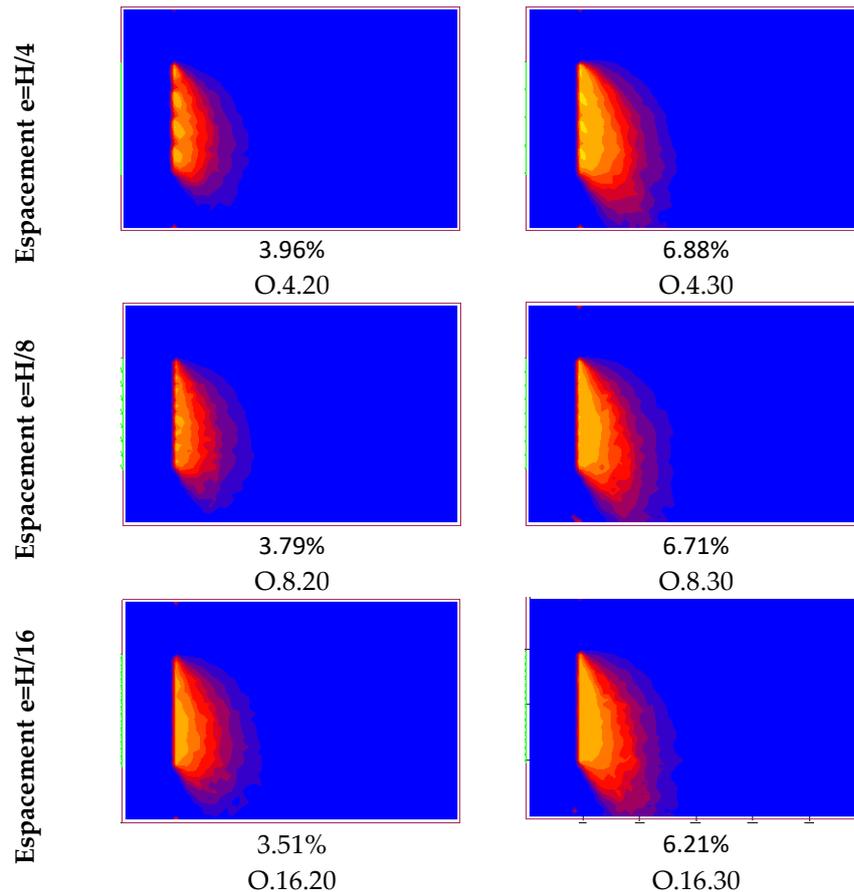
### 1.6.3.2 L'autonomie de l'éclairage

Les résultats de l'autonomie de l'éclairage, présentés dans le Tableau 19, montrent que le  $sDA_{500\ 50\%}$  a été significativement réduit en comparaison avec le cas de référence. Il est au-dessous de la valeur acceptable (55%) pour toutes les configurations. Nous avons enregistré des valeurs variant entre 3,51% (O.16.20) et 8,92% (O.1.30) tandis que le cas de référence enregistre un  $sDA_{500\ 50\%}$  de 64,17%. Nous pouvons constater, à travers la comparaison des résultats, que :

- Pour les deux inclinaisons 20° et 30°, le  $sDA_{500,50\%}$  diminue en diminuant l'espacement entre les lamelles.
- Pour tous les espacements étudiés, l'angle d'inclinaison 30° offre des valeurs de  $sDA_{500,50\%}$  plus élevées que celles enregistrées pour l'inclinaison 20°.

Tableau 19: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel  $DA_{500}$  et l'autonomie spatiale





### 1.6.3.3 Facteur de lumière du jour "FLJ" et l'uniformité "UFLJ"

Les résultats de simulation du facteur de lumière du jour "FLJ" et de l'uniformité "UFLJ", présentés dans le Tableau 20, montrent que, pour le cas de référence, le pourcentage de la surface avec un FLJ dépassant 2% est de 78.75%, tandis que l'UDF n'a pas atteint le seuil de 0,40, il est d'environ 0,33. D'autre part, le pourcentage de la surface du plan de travail avec un FLJ dépassant 2% est significativement diminué, il est au-dessous du seuil recommandé (75%) ne dépassant pas 11 pour toutes les configurations. Cependant l'uniformité du FLJ est améliorée pour toutes les configurations, elle est au-dessus du seuil recommandé (0.40).

Nous pouvons constater à travers la comparaison des résultats que :

- L'impact de l'espacement entre les lamelles est négligeable. Les différences pour le FLJ >2% et l'uniformité sont minimales ; dans le cas de l'inclinaison 20° Les FLJ > 2% varie entre 6,96 et 8,04 et l'uniformité varie entre 0.74 et 0.75. Cependant, dans le cas de l'inclinaison 30°, le FLJ >2% varie entre 8.42 et 10.58 et l'uniformité varie entre 0.71 et 0.73. Il est à noter que le FLJ >2% augmente en diminuant l'espacement entre les lamelles.

- Quel que soit l'espacement entre les lamelles, l'angle d'inclinaison 30° enregistre des valeurs de FLJ >2% plus élevées que celles enregistrées pour l'inclinaison 20°. Contrairement à l'uniformité, où l'inclinaison 20° enregistre les valeurs les plus élevées.

Tableau 20: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Ouest. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour FLJ>2 et plus de 0.40 pour l'UFLJ)

Cas	FLJ minimal	FLJ maximal	FLJ moyen	FLJ > 2%	Uniformité du FLJ min/ FLJ moy
Référence	1.45	25.13	4.44	<b>78.75</b>	<b>0.33</b>
O.1.20	1.14	6.39	1.52	6.96	<b>0.75</b>
O.2.20	1.14	5.68	1.53	7.5	<b>0.75</b>
O.4.20	1.12	5.57	1.52	7.75	<b>0.74</b>
O.8.20	1.14	4.89	1.54	7.79	<b>0.74</b>
O.16.20	1.14	4.47	1.53	8.04	<b>0.75</b>
O.1.30	1.10	6.28	1.52	8.42	<b>0.72</b>
O.2.30	1.11	6.25	1.52	8.62	<b>0.73</b>
O.4.30	1.11	5.96	1.54	9.38	<b>0.72</b>
O.8.30	1.12	5.66	1.58	10.58	<b>0.71</b>
O.16.30	1.12	5.42	1.58	10.58	<b>0.71</b>

## 1.7 L'orientation Nord

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation obtenus pour l'orientation Ouest. Cette partie permet d'étudier l'impact de deux paramètres de conception ; l'inclinaison des lamelles (60°, 90° et 120°) ainsi que l'espacement entre les lamelles.

### 1.7.1 Impact sur la température de l'air

Les résultats de simulation pour les mois janvier et juillet sont d'abord présentés selon l'espacement entre les lamelles (Figure 68), permettant de comparer, l'effet de l'inclinaison sur les températures de l'air. Ces mêmes résultats sont ensuite présentés selon l'angle d'inclinaison (Figure 69), afin de comparer l'effet de l'espacement sur les températures de l'air.

**Pour le mois de janvier**, Ces résultats indiquent que :

- L'impact de la protection solaire est négligeable dans le cas de l'orientation Nord, les configurations étudiées enregistrent un écart de température de l'air par rapport au cas de référence ne dépassant pas 0.3°C (17h00).
- Les trois inclinaisons étudiées (60°, 90° et 120°) présentent le même comportement pour tous les espacements. Ceci est expliqué par les courbes de température superposées ; l'écart de température enregistré entre les deux inclinaisons ne dépasse pas 0,05°C.
- Les cinq espacements présentent le même comportement, les écarts de température entre les espacements  $e=H$  et  $e=H6$  sont d'environ 0,15°C pour l'inclinaison 60° et ne dépassent pas 0,1°C pour les inclinaisons 90° et 120°. Il est à noter que, malgré les différences minimales entre les configurations, les températures de l'air sont en corrélation positive avec l'espacement des lamelles.

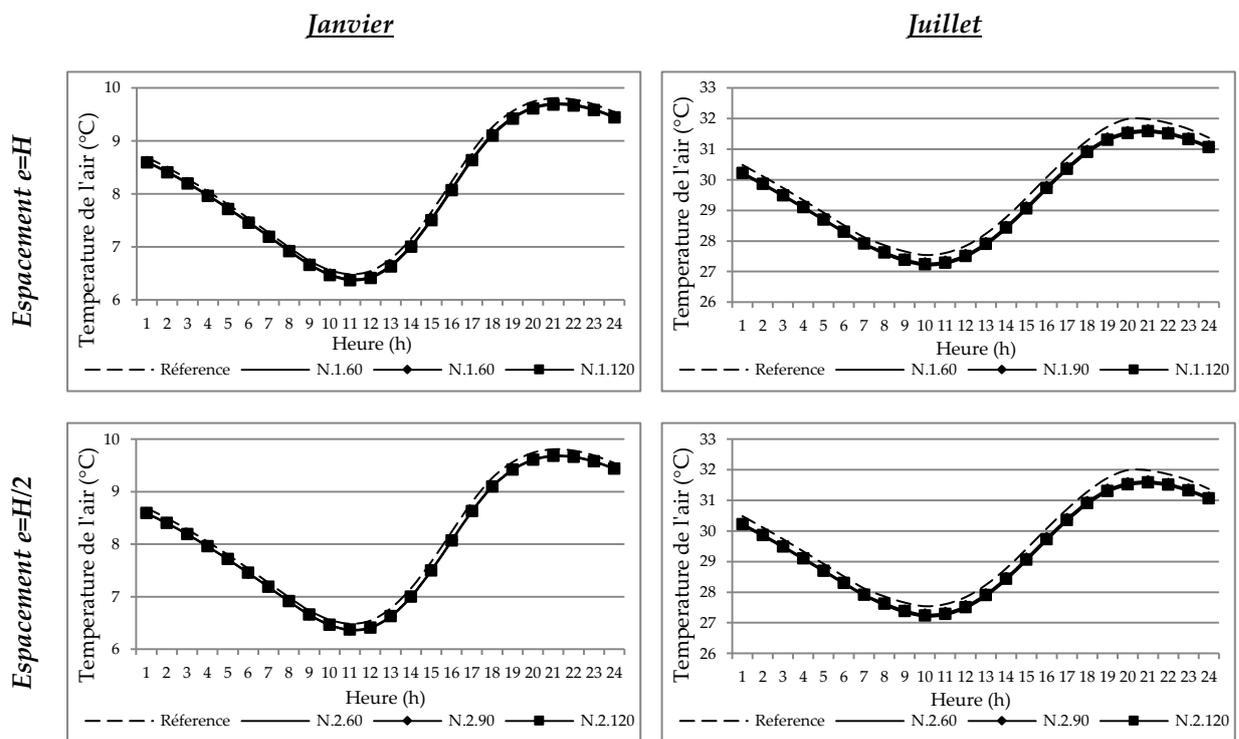
**Pour le mois de juillet**, les résultats montrent que :

- L'effet de la protection solaire est aussi négligeable pour la période d'été. Nous enregistrons des écarts de température par rapport au cas de référence ne dépassant pas 0,6°C.
- Les trois inclinaisons étudiées présentent le même comportement pour tous les espacements. Ceci est expliqué par les courbes de température très rapprochées ; l'écart de température enregistré ne dépasse pas 0,07°C, l'angle d'inclinaison 90° enregistre des

températures les plus élevées tandis que l'angle 60° enregistre des températures les plus faibles.

- Les cinq espacements présentent le même comportement, l'écart de température entre les deux espacements  $e=H$  et  $e=H/16$  est d'environ 0,3 °C dans le cas de l'inclinaison 60°, et 0,2°C dans le cas des deux inclinaisons 90° et 120°. Malgré les différences minimes entre les configurations, les températures de l'air sont en corrélation positive avec l'espacement des lamelles.

Nous constatons que, l'effet des protections solaire est négligeable pour l'orientation Nord, et ce en hiver et en été. Nous constatons également que l'impact de l'espacement et de l'angle d'inclinaison des lamelles est négligeable car toutes les configurations étudiées ont le même comportement. Cela est dû au fait que, durant toute l'année, l'azimut est inférieur à l'angle d'occultation optimal, ce qui empêche la pénétration du rayonnement solaire.



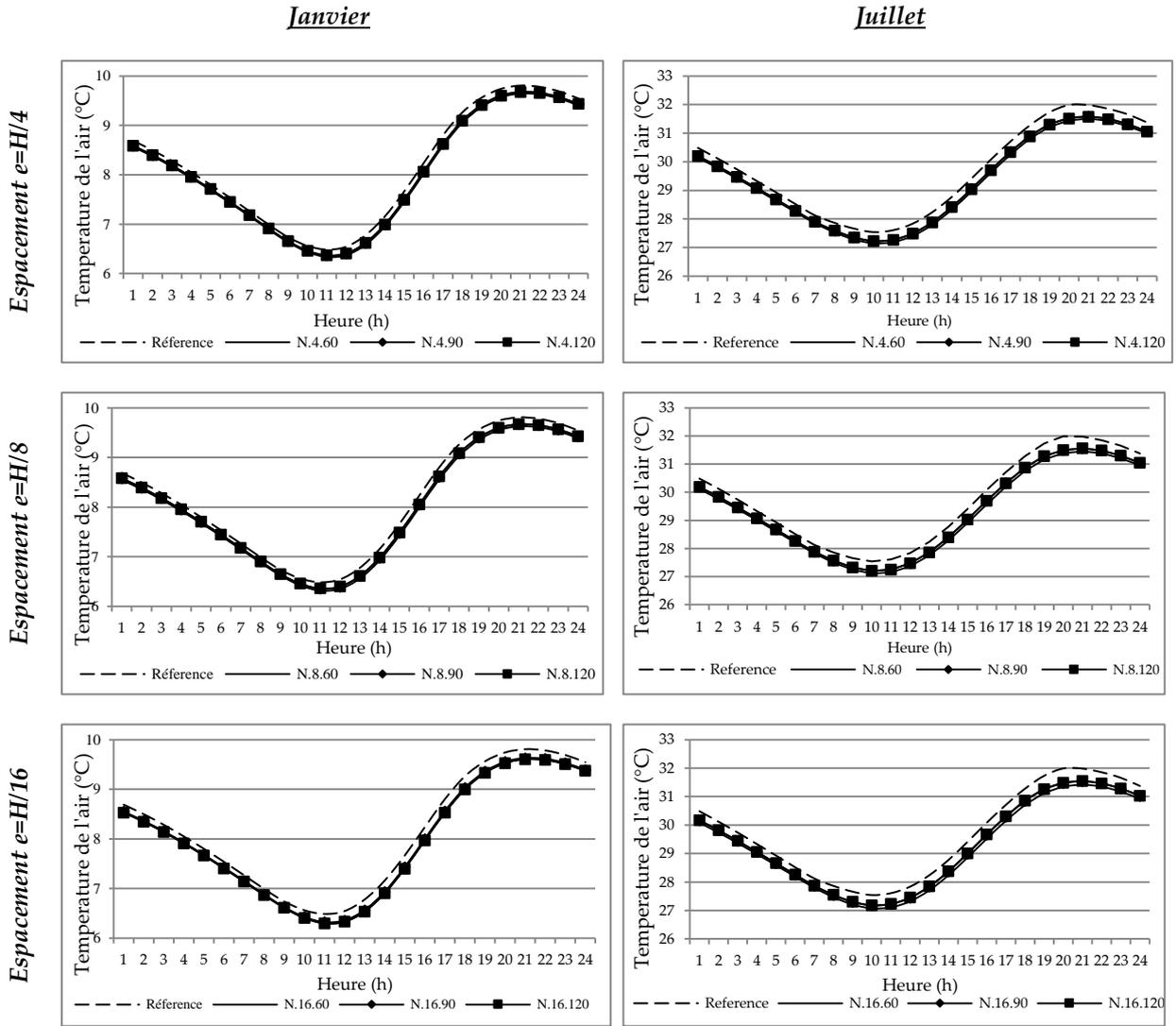
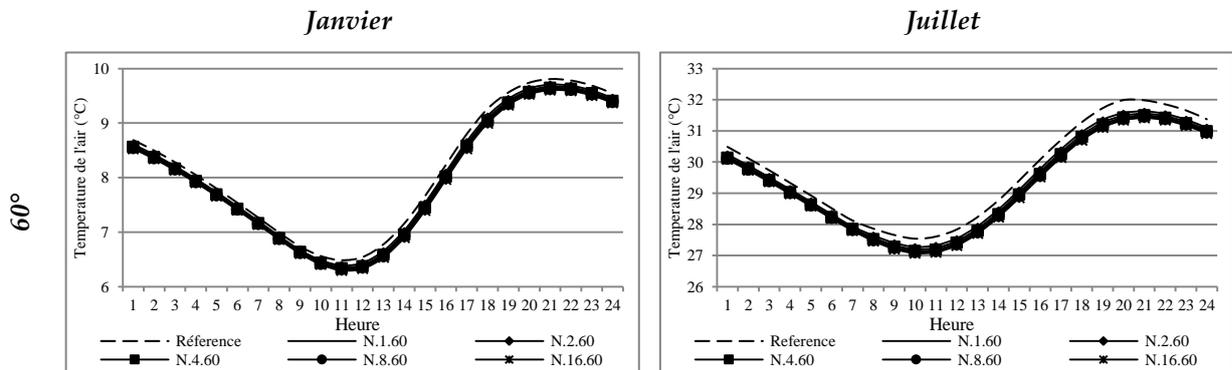


Figure 68: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'espacement entre les lamelles



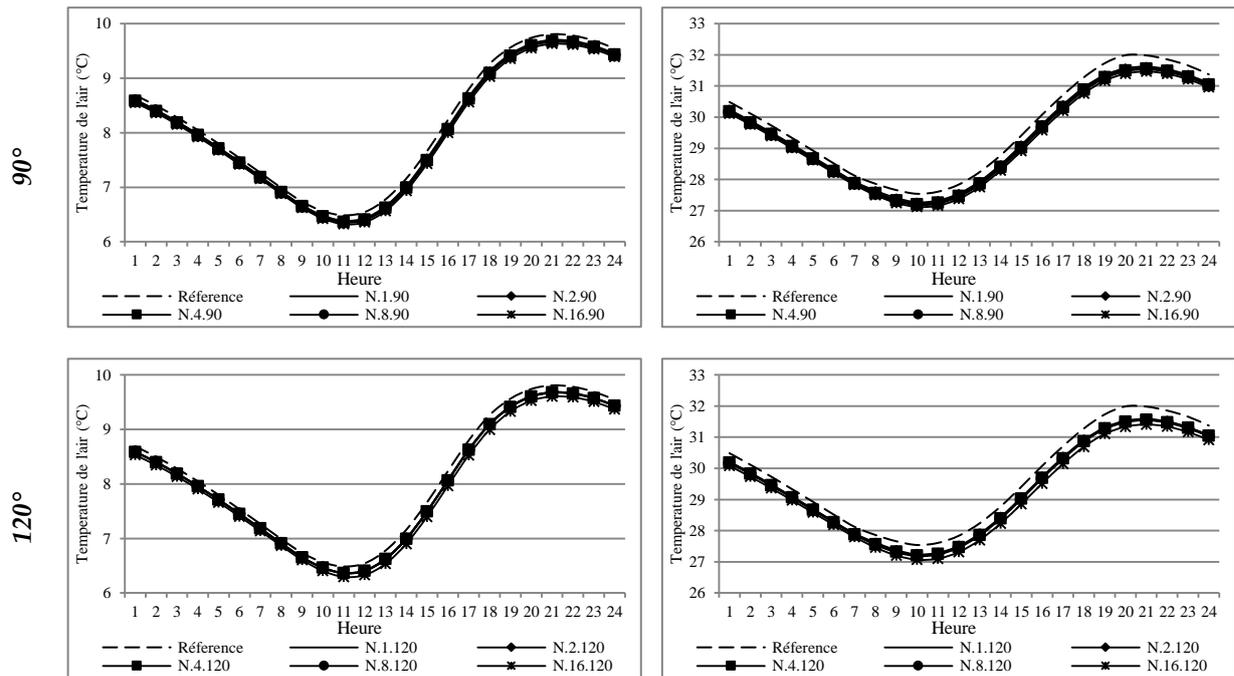


Figure 69: La température de l'air calculée pour l'orientation Est pour les mois de janvier et juillet, présentée selon l'angle d'inclinaison

## 1.7.2 Impact sur la performance énergétique

### 1.7.2.1 Consommation énergétique annuelle pour le chauffage

Nous pouvons observer à partir du graphe, présenté dans la Figure 70, que la protection solaire augmente les charges de chauffage mais son impact est négligeable. La différence par rapport au cas de référence ne dépasse pas 3,2%. Ceci est dû au fait que la quantité du rayonnement solaire direct qui frappe la façade Nord est très faible. La comparaison des résultats obtenus permet d'étudier l'impact de l'espacement et l'inclinaison des lamelles sur les charges de climatisation :

- Pour l'impact de l'espacement entre les lamelles, nous constatons que :
  - Pour les trois inclinaisons, les charges de climatisation augmentent en diminuant l'espacement entre les lamelles. Cependant les variations sont peu significatives. Les différences entre l'espacement  $e=H/16$  et  $e=H$  sont de 59 kWh, 44kWh et 48kWh correspondant respectivement aux angles d'inclinaison 60°, 90° et 120°.

- Il est à noter que les charges de chauffage sont corrélées positivement avec l'espacement entre les lamelles.
- Pour l'impact de l'angle d'inclinaison des lamelles, nous constatons que :
  - Lorsque l'espacement  $e=H$  la consommation énergétique pour le chauffage augmente en augmentant l'angle d'inclinaison.
  - Pour les autres espacements, l'angle d'inclinaison  $90^\circ$  enregistre les valeurs de consommation les plus faibles et l'angle  $120^\circ$  enregistre les valeurs les plus élevés.

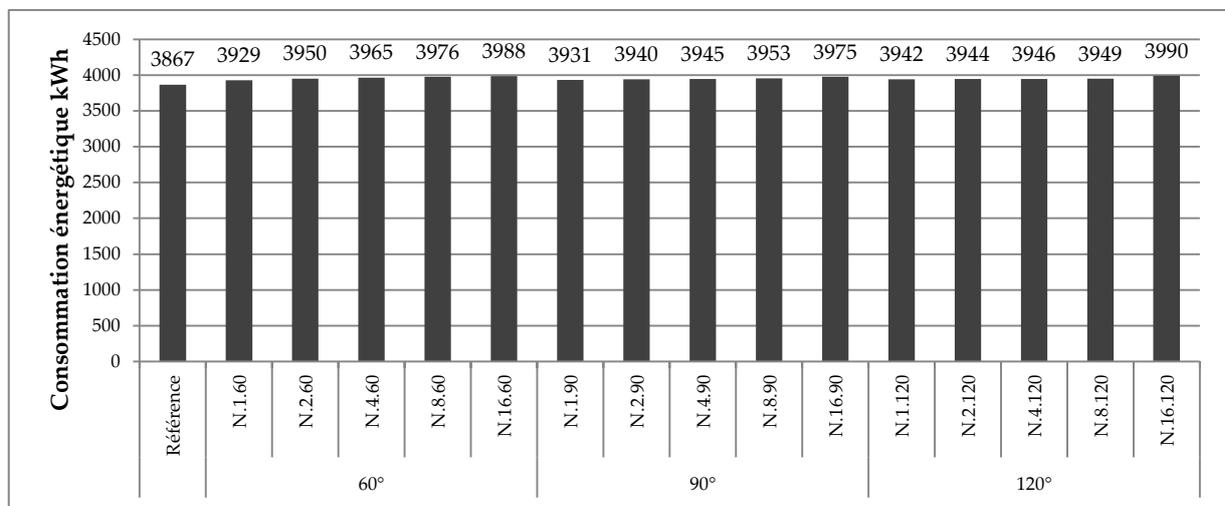


Figure 70 : Consommation énergétique annuelle du chauffage pour l'orientation Nord

### 1.7.2.2 Consommation énergétique annuelle pour la climatisation

Nous pouvons constater à partir de la Figure 71 que l'impact de la protection solaire sur les charges de climatisation est aussi faible ; l'économie d'énergie par rapport au cas de référence ne dépasse pas 12,2%. Ceci est expliqué par le fait que, pour l'orientation Nord, la quantité du rayonnement solaire direct est très faible.

*L'impact de l'espacement entre les lamelles* : afin d'étudier l'effet de l'espacement des lamelles, nous avons comparé les résultats obtenus par rapport à chaque inclinaison, nous constatons que :

- Pour les trois inclinaisons, la consommation énergétique pour la climatisation diminue en diminuant l'espacement entre les lamelles. Cependant les différences entre les différents

espacements sont minimales. Les différences entre l'espacement  $e=H/16$  et  $e=H$  sont de 49 kWh, 38kWh et 41kWh correspondant respectivement aux angles d'inclinaison 60°, 90° et 120°.

- Il est à noter que les charges de chauffage sont corrélées positivement avec l'espacement entre les lamelles.

*L'impact de l'inclinaison des lamelles* : la comparaison des résultats obtenus par rapport à chaque espacement nous permet d'étudier l'effet de l'inclinaison. Nous constatons que :

- Lorsque l'espacement  $e=H$  la consommation énergétique pour la climatisation diminue en augmentant l'angle d'inclinaison.
- Pour les autres espacements, l'angle d'inclinaison 90° enregistre les valeurs de consommation les plus élevées et l'inclinaison 120° enregistre les valeurs les plus faibles.

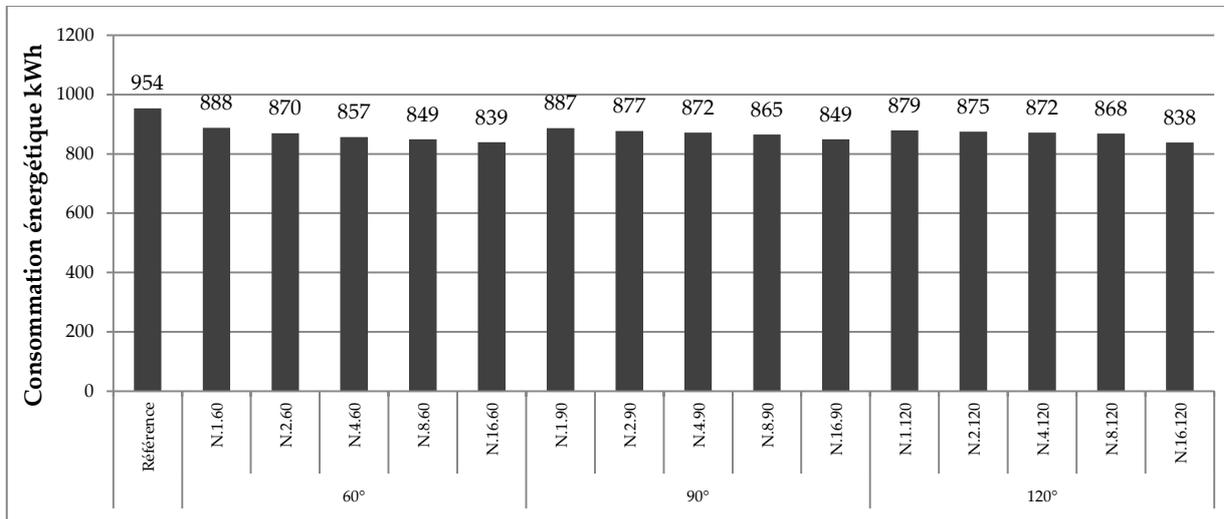


Figure 71 : Consommation énergétique annuelle de la climatisation pour l'orientation Nord

### 1.7.3 Impact sur la performance lumineuse

#### 1.7.3.1 Le niveau d'éclairage

**En période d'hiver (21 décembre à 12h) :** Les résultats de simulation de l'éclairage pour le 21 Décembre à 12h00 (Tableau 21) montrent que l'impact de la protection solaire sur l'éclairage est moins significatif en comparaison avec les deux orientations Est et Ouest. Nous enregistrons une diminution ne dépassant pas 30% pour l'éclairage minimal et d'environ 40% pour l'éclairage maximal.

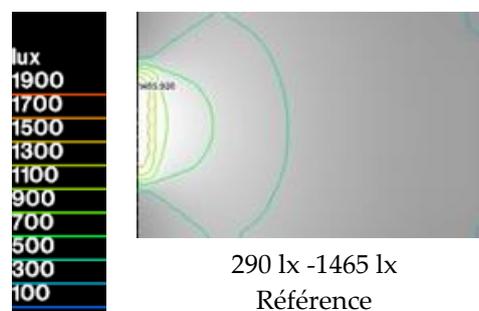
Nous constatons également que la surface du plan de travail avec un niveau d'éclairage supérieur à 500 lx est très faible même pour le cas de référence. Elle est d'environ 40% pour le cas de référence et ne dépasse pas 30% pour les autres configurations.

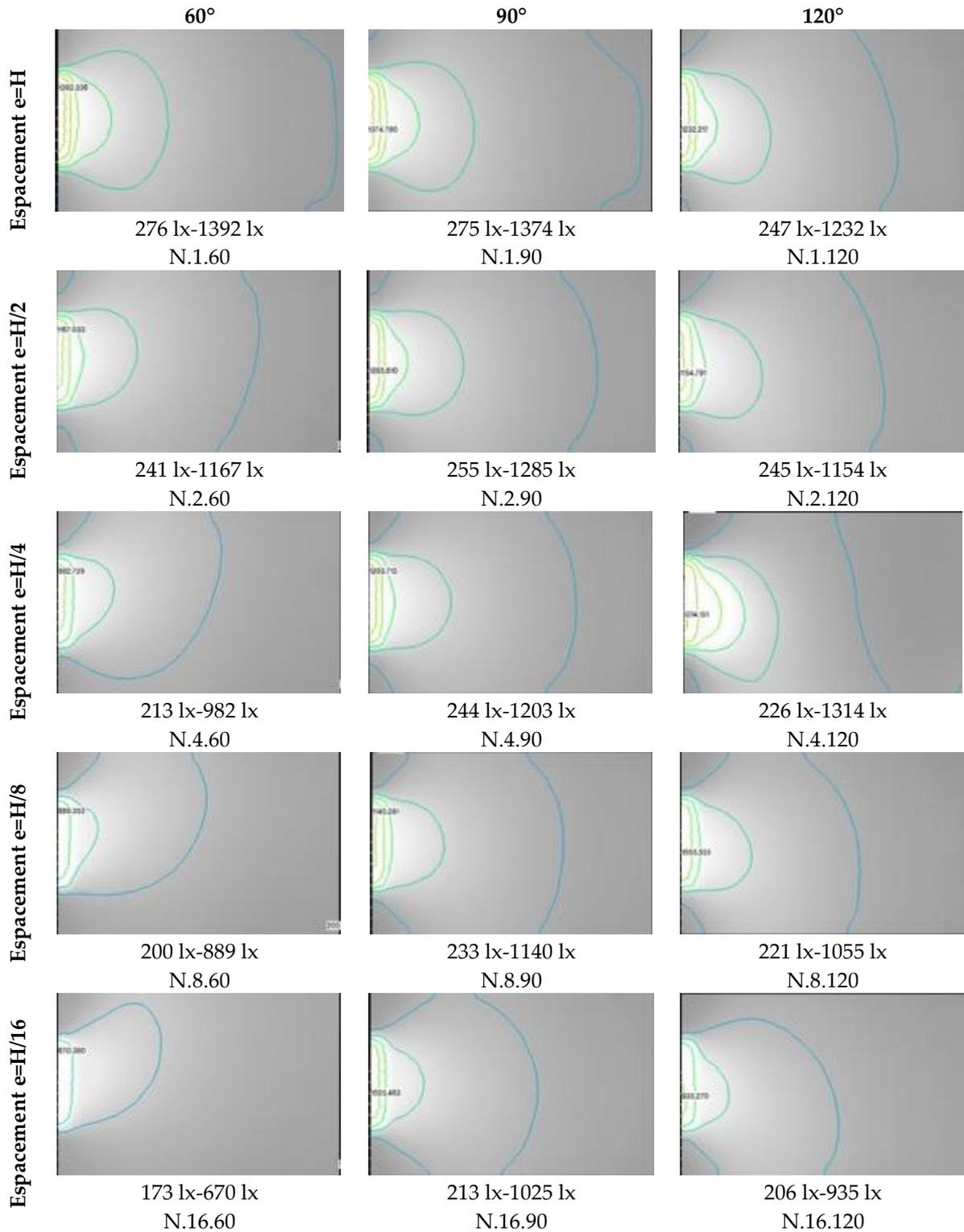
La comparaison horizontale des résultats permet d'étudier l'impact de l'inclinaison des lamelles par rapport aux différents espacements. Nous constatons que :

- Dans le cas de l'espacement  $e=H$ , les niveaux d'éclairage, minimal et maximal, diminuent en augmentant l'angle d'inclinaison.
- Pour les autres espacements, l'inclinaison  $90^\circ$  enregistre les valeurs d'éclairage, maximal et minimal, les plus élevées et l'inclinaison  $60^\circ$  enregistre les valeurs les plus faibles.

La comparaison verticale permet d'étudier l'impact de l'espacement entre les lamelles par rapport aux différentes inclinaisons. Nous constatons que, quel que soit l'angle d'inclinaison, les niveaux d'éclairage, maximal et minimal, diminuent en diminuant l'espacement entre les lamelles.

Tableau 21: Résultats de simulation de l'éclairage, le 21 Décembre pour l'orientation Nord





**En période d'été (21 juin à 12h) :** Les résultats des simulations de l'éclairage pour le 21 juin à 12h00 (Tableau 22) montrent également que l'impact de la protection solaire sur l'éclairage est faible. Nous enregistrons une diminution entre 2% et 40% pour l'éclairage minimal est entre

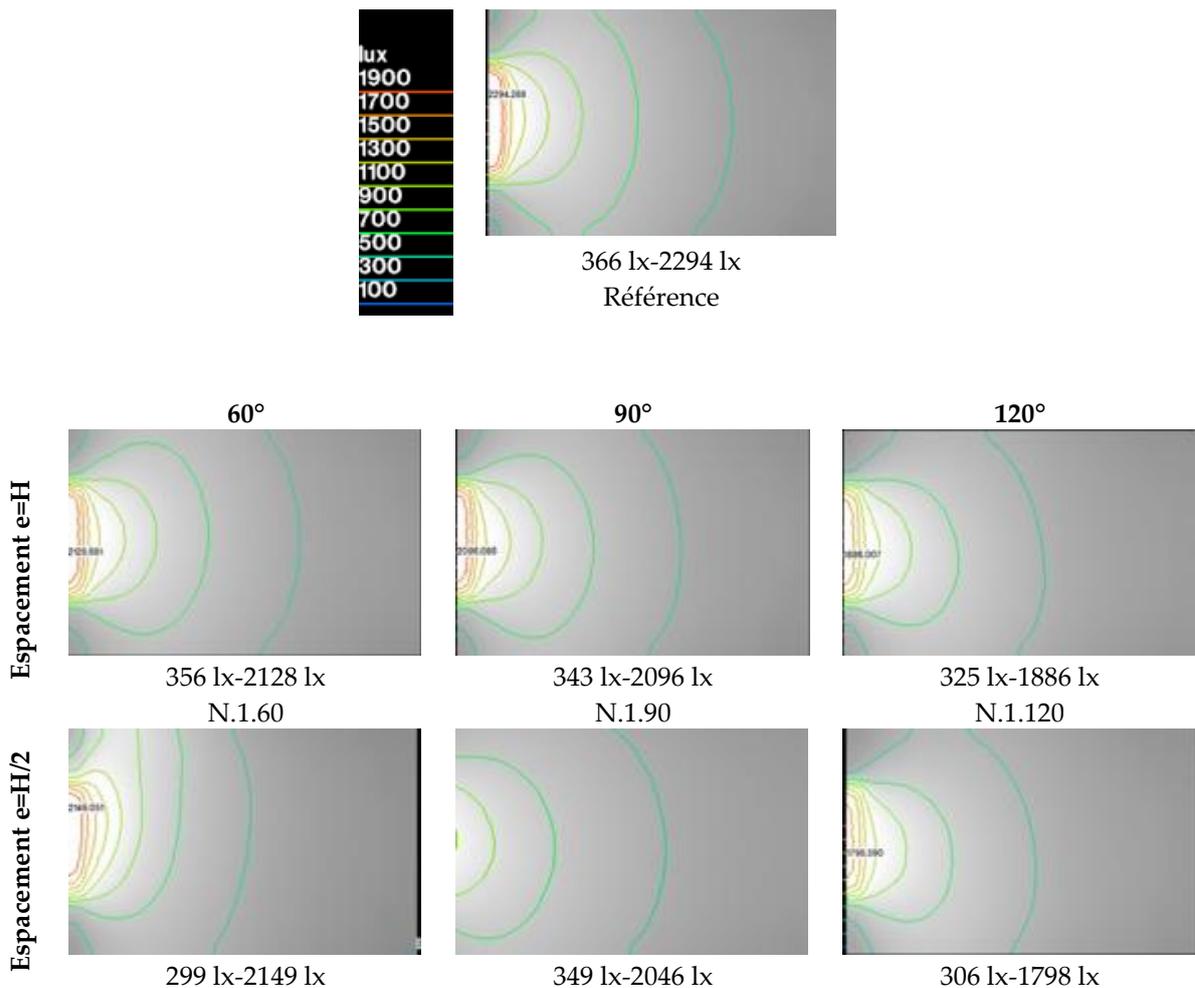
2% et 50% pour l'éclairage maximal. Nous constatons également que de la surface du plan de travail avec un niveau d'éclairage est au-dessus du niveau requis (500lx) ne dépasse pas 65%.

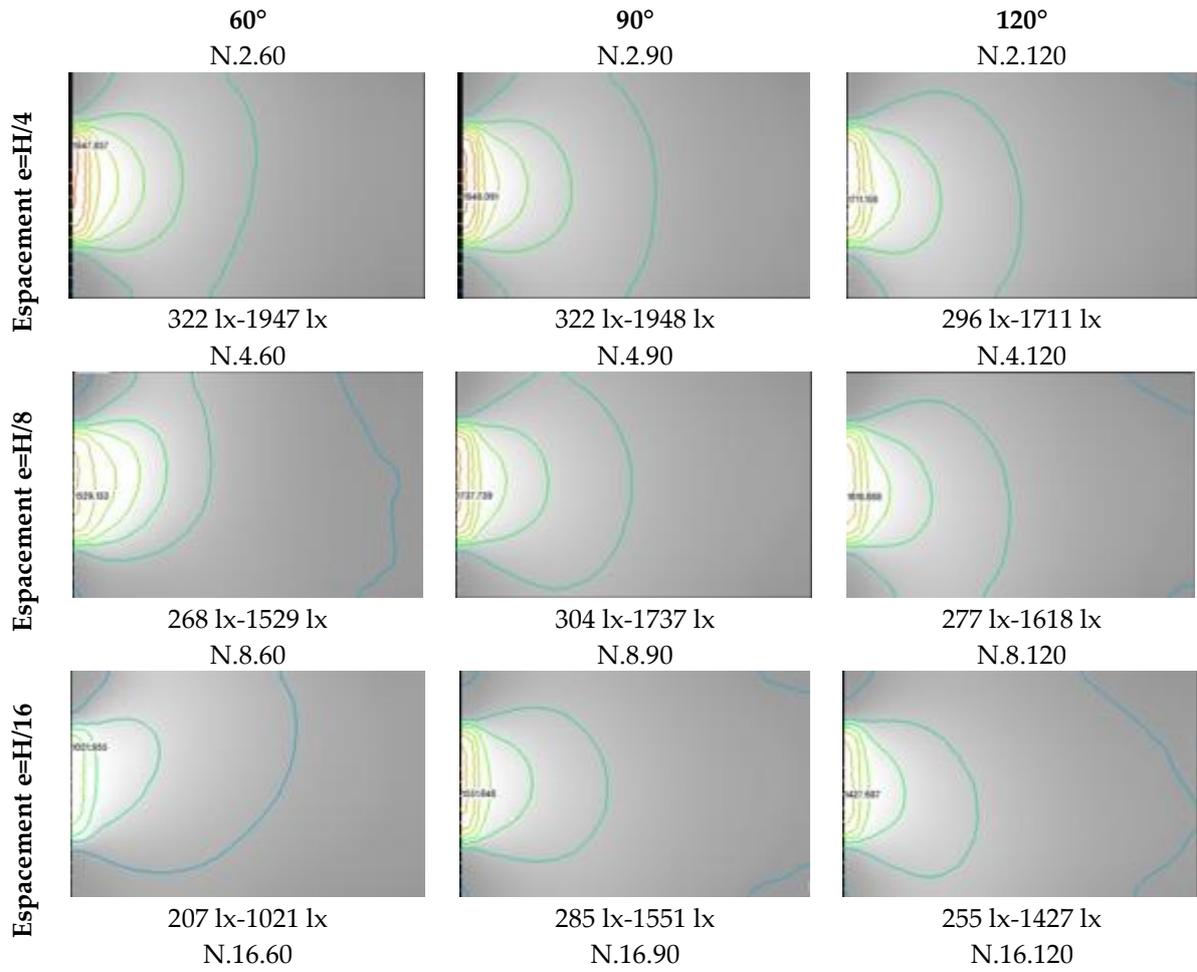
A travers la comparaison horizontale des résultats, nous pouvons étudier l'impact de l'inclinaison des lamelles par rapport aux différents espacements. Nous constatons que :

- Dans le cas de l'espacement  $e=H$ , les niveaux d'éclairage, minimal et maximal, diminuent en augmentant l'angle d'inclinaison.
- Pour les autres espacements, l'inclinaison  $90^\circ$  enregistre les valeurs d'éclairage, maximal et minimal, les plus élevées tandis que l'inclinaison  $60^\circ$  enregistre les valeurs les plus faibles.

La comparaison verticale des résultats montre que les niveaux d'éclairage, maximal et minimal, diminuent en diminuant l'espacement entre les lamelles.

Tableau 22: Résultats de simulation de l'éclairage, le 21 Juin pour l'orientation Nord



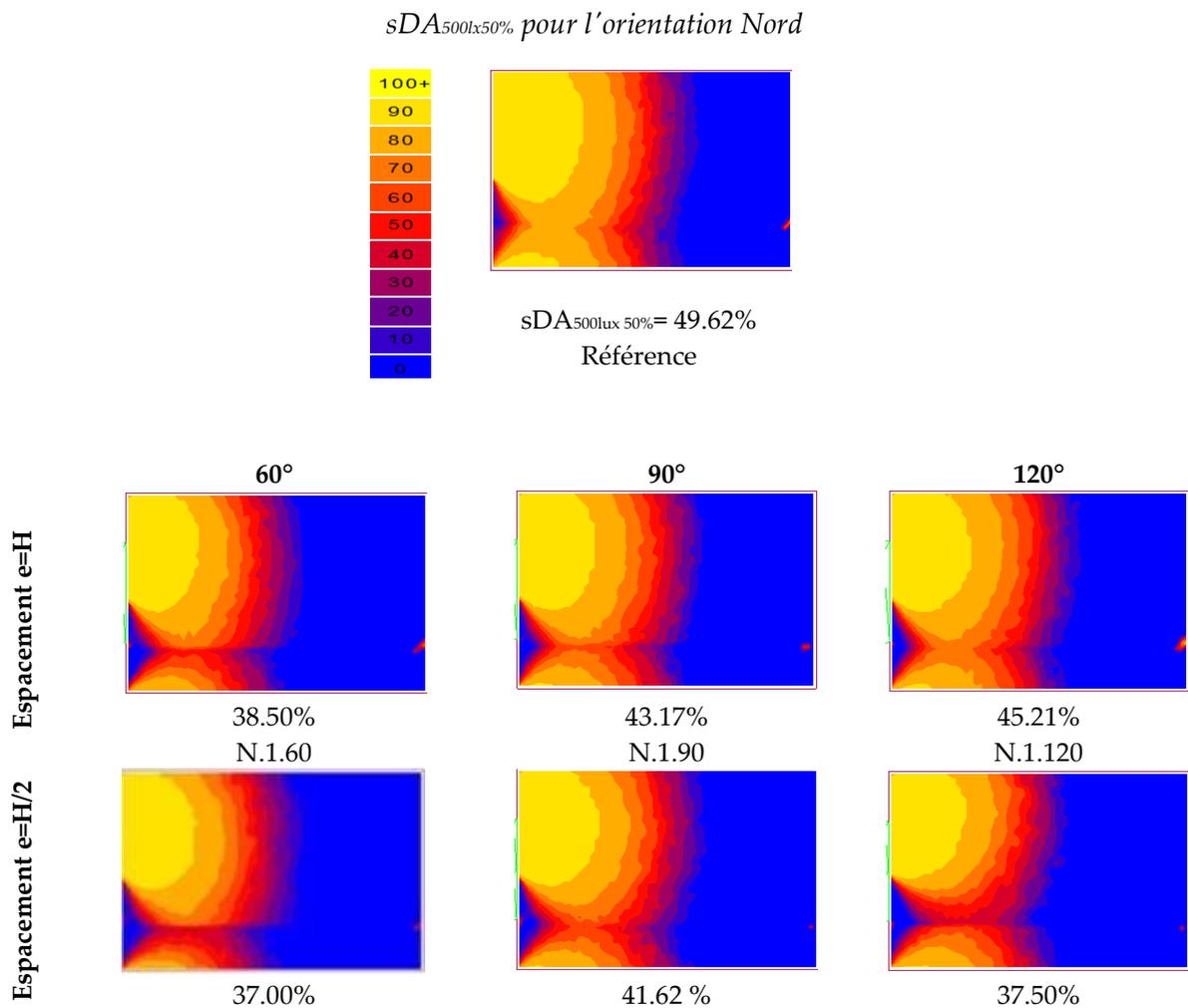


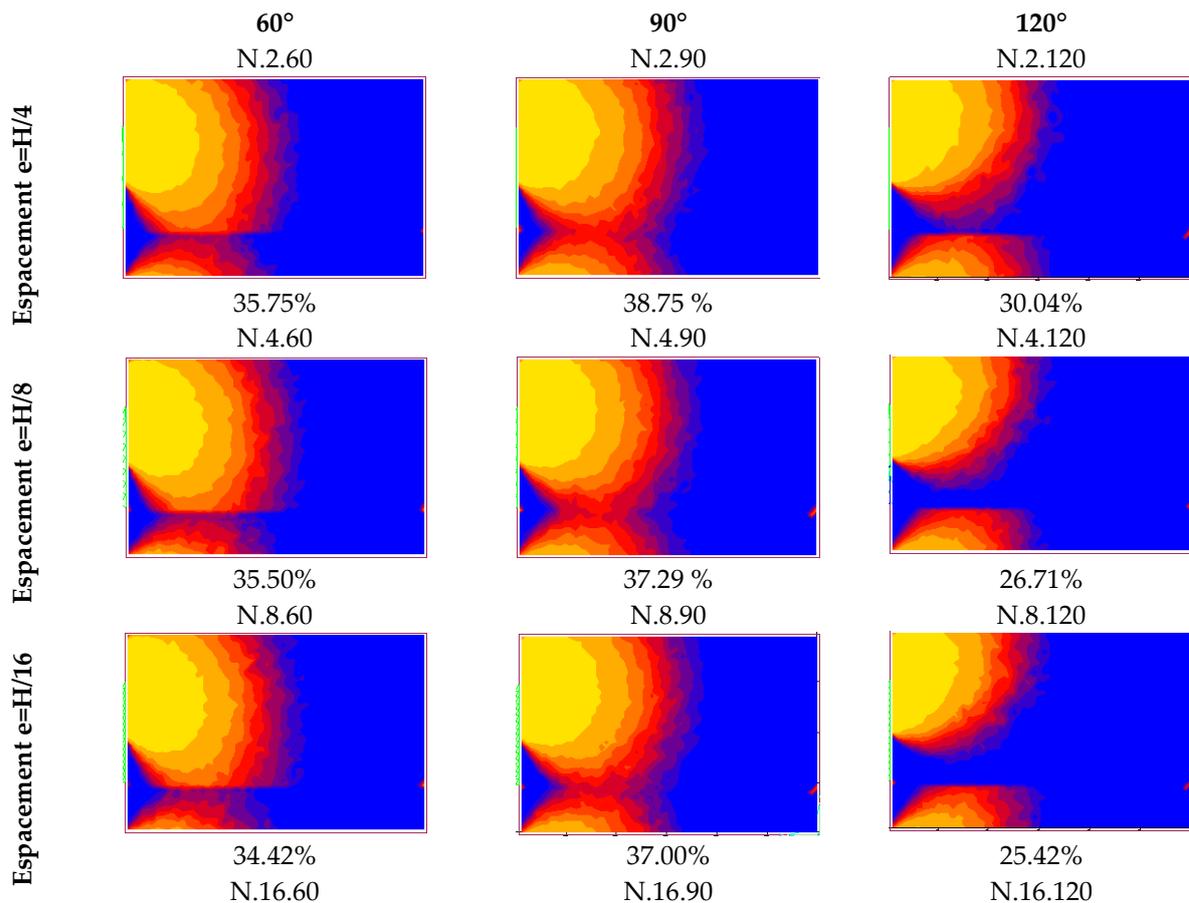
### 1.7.3.2 L'autonomie de l'éclairage

Les résultats de l'autonomie en l'éclairage, présentés dans le Tableau 23, montrent que le  $sDA_{500\ 50\%}$  a été significativement réduit en comparaison avec le cas de référence. Il est au-dessous de la valeur acceptable (55%) pour toutes les configurations ainsi que le cas de référence. Nous avons enregistré des valeurs variant entre 25,42% (N.16.120) et 45,21% (N.1.120) tandis que le cas de référence enregistre un  $sDA_{500\ 50\%}$  de 49,62%. Nous pouvons constater, à travers la comparaison des résultats, que :

- Pour les trois inclinaisons, le  $sDA_{500,50\%}$  diminue en diminuant l'espacement entre les lamelles.
- Pour l'espacements  $e=H$ , le  $sDA_{500,50\%}$  augmente en augmentant l'angle d'inclinaison, cependant pour les autres espacement l'inclinaison  $90^\circ$  enregistre les valeurs de  $sDA_{500,50\%}$  les plus élevées et l'inclinaison  $120^\circ$  enregistre les valeurs les plus faibles.

Tableau 23: Résultats de simulation de l'autonomie en éclairage naturel  $DA_{500}$  et l'autonomie spatiale





### 1.7.3.3 Facteur de lumière du jour "FLJ" et l'uniformité "UFLJ"

Les résultats de simulation du facteur de lumière du jour "FLJ" et de l'uniformité "UFLJ", présentés dans le Tableau 20, montrent que, pour le cas de référence, le pourcentage de la surface avec un FLJ dépassant 2% est de 78.75%, tandis que l'UDF n'a pas atteint le seuil de 0,40, il est d'environ 0,33. D'autre part, le pourcentage de la surface du plan de travail avec un FLJ dépassant 2% est significativement diminué, il est au-dessous du seuil recommandé (75%) ne dépassant pas 11 pour toutes les configurations. Cependant l'uniformité du FLJ est améliorée pour toutes les configurations, elle est au-dessus du seuil recommandé (0.40).

Nous pouvons constater à travers la comparaison des résultats que :

- L'impact de l'espacement entre les lamelles est négligeable. Les différences pour le FLJ >2% et l'uniformité sont minimales ; dans le cas de l'inclinaison 20° Les FLJ > 2% varie entre 6,96 et 8,04 et l'uniformité varie entre 0.74 et 0.75. Cependant, dans le cas de l'inclinaison 30°, le FLJ >2% varie entre 8.42 et 10.58 et l'uniformité varie entre 0.71 et 0.73. Il est à noter que le FLJ >2% augmente en diminuant l'espacement entre les lamelles.

- Quel que soit l'espacement entre les lamelles, l'angle d'inclinaison 30° enregistre des valeurs de FLJ >2% plus élevées que celles enregistrées pour l'inclinaison 20°. Contrairement à l'uniformité, où l'inclinaison 20° enregistre les valeurs les plus élevées.

Tableau 24: Facteur de lumière du jour (FLJ) et l'uniformité (UFLJ) pour l'orientation Nord. Les valeurs répondant aux normes internationales d'éclairage sont en gras (plus de 75% pour FLJ>2 et plus de 0.40 pour l'UFLJ)

Cas	DF minimal	DF maximal	DF moyen	DF > 2 %	Uniformity Daylight Factor DFmin/DFmoy
Référence	1.4	25.29	4.44	<b>78.5</b>	<b>0.32</b>
N.1.60	1.33	20.43	2.90	50.08	<b>0.46</b>
N.2.60	1.29	21.11	3.18	58.67	<b>0.41</b>
N.4.60	1.32	20.54	3.33	62.33	<b>0.40</b>
N.8.60	1.33	19.56	3.40	63.33	<b>0.40</b>
N.16.60	1.37	18.33	3.40	62.83	<b>0.40</b>
N.1.90	1.35	20.10	3.17	56.38	<b>0.43</b>
N.2.90	1.42	20.45	3.41	62.00	<b>0.42</b>
N.4.90	1.41	22.21	3.57	64.12	<b>0.39</b>
N.8.90	1.4	21.65	3.63	65.50	<b>0.39</b>
N.16.90	1.35	20.15	3.64	66.17	<b>0.37</b>
N.1.120	1.36	19.41	3.40	65.25	<b>0.40</b>
N.2.120	1.41	20.25	3.47	62.42	<b>0.41</b>
N.4.120	1.31	22.62	3.53	62.58	<b>0.37</b>
N.8.120	1.31	19.70	3.53	62.29	<b>0.37</b>
N.16.120	1.31	19.23	3.54	62.04	<b>0.37</b>

## 1.8 Synthèse

L'analyse des résultats nous a permis l'évaluation comparative de l'impact des différentes configurations géométriques sur les performances ; thermique, lumineuse et énergétique. Dans cette section, nous discutons d'abord la relation entre ces performances et les paramètres de conception afin de comprendre le comportement des protections solaires. N'ayant pas toujours une corrélation entre les résultats et les paramètres de conception, nous supposons que ce comportement dépend d'un certain nombre d'indicateurs résultants de ces mêmes paramètres. Ces indicateurs seront expliqués en détails ci-dessous.

Il est à noter qu'aucune configuration n'améliore à la fois toutes les performances, ceci est expliqué par les contradictions qui existent entre elles, telle que la contradiction entre les performances thermique et lumineuse, la performance thermique en été et en hiver, ou encore entre la consommation énergétique pour la climatisation et le chauffage. Selon les résultats de simulation, lorsque la température de l'air, les niveaux d'éclairage ainsi que les charges de climatisation diminuent, la consommation énergétique pour le chauffage et l'éclairage artificiel augmente, cela crée une situation conflictuelle évidente en compliquant le choix des configurations les plus favorables. Par conséquent, ce choix doit être basé sur une analyse multicritère.

Dans la deuxième partie de cette section, nous présentons également une évaluation des différentes configurations à travers un récapitulatif des résultats obtenus pour les différentes performances.

### 5.1.1 Indicateurs influant les performances des protections solaires

Nous constatons, à travers l'analyse des résultats, que, malgré le fait que les angles d'occultation vertical (VSA) et horizontal (HSA) calculés pour la période de surchauffe étaient fixes, les configurations étudiées n'avaient pas le même comportement thermique et lumineux notamment pour l'orientation Sud. Cela peut s'expliquer par des indicateurs dépendant de paramètres de conception (espacement entre lamelles, angle d'inclinaison des lamelles et leur disposition). Nous avons identifié six indicateurs : la fraction du rayonnement solaire direct, le coefficient de protection, le rayonnement réfléchi par les lamelles, le rayonnement réfléchi par le sol, la pénétration du rayonnement solaire et la perméabilité visuelle.

Les cinq premiers indicateurs dépendent de la position solaire (hauteur et azimut) et des paramètres de conception. Cependant, le dernier, c'est-à-dire la perméabilité visuelle, dépend uniquement des paramètres de conception et ne change pas en changeant la position solaire.

La fraction du rayonnement solaire direct et le coefficient de protection ont un impact sur toutes les performances étudiées tandis que les autres indicateurs influencent seulement les performances lumineuses. Ces indicateurs sont présentés, ci-dessous, graphiquement et mesurés pour différentes configurations géométriques en décembre et juin.

### 5.1.1.1 La fraction du rayonnement solaire direct (RSD)

C'est la quantité du rayonnement solaire direct qui pénètre dans l'espace. Il dépend de la position du soleil et des paramètres de conception des protections solaires. Parmi les six indicateurs, c'est celui qui a le plus d'influence sur les performances des protections solaires. Il est calculé par le rapport entre la surface de la partie ensoleillée de la fenêtre et la surface totale de la fenêtre (Figure 72).

$$RSD = \frac{S_{ef}}{S_f} \times 100 = \frac{h_{ef} \times L_f}{h_f \times L_f} \times 100 = \frac{h_{ef}}{h_f} \times 100$$

Où :

- $S_f$  : La surface de la fenêtre.
- $S_{ef}$  : la surface de la partie ensoleillée de la fenêtre.
- $L_f$  : la largeur de la fenêtre.
- $h_f$  : La hauteur de la fenêtre
- $h_{ef}$  : La hauteur de la partie ensoleillée de la fenêtre.

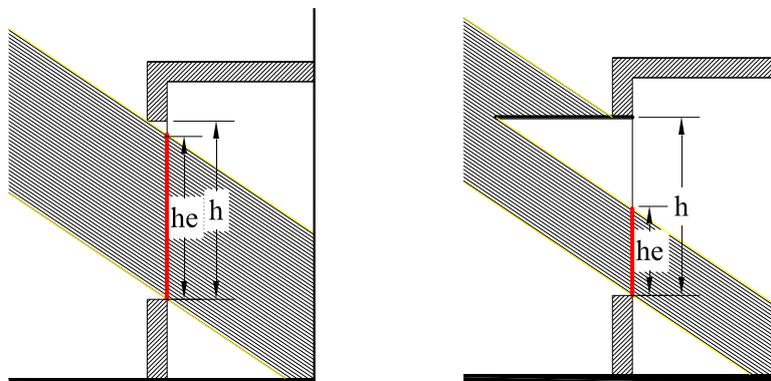


Figure 72 : Le rayonnement solaire direct pour les cas ; à gauche sans protection, à droite avec protection.

### Pour l'orientation Sud :

- En période de surchauffe, le RSD est égal à 0% pour toutes les configurations, car la hauteur du soleil est supérieure à l'angle d'occultation vertical (VSA). Ce qui explique la superposition des courbes de température enregistrées en mois de juin, ainsi que le rapprochement des résultats de la consommation énergétique pour la climatisation.
- En période d'hiver, le RSD augmente car la hauteur du soleil est inférieure à l'angle VSA. IL dépend également des paramètres de conception. Dans le graphe ci-dessous nous présentons les valeurs du RSD, pour chaque configuration, calculées pour le 21 décembre (Figure 73). Nous constatons qu'il existe une corrélation positive entre le RSD et les températures de l'air ainsi que les charges de climatisation. Dans le cas des configurations ayant le même RSD les différences sont dues aux autres indicateurs.

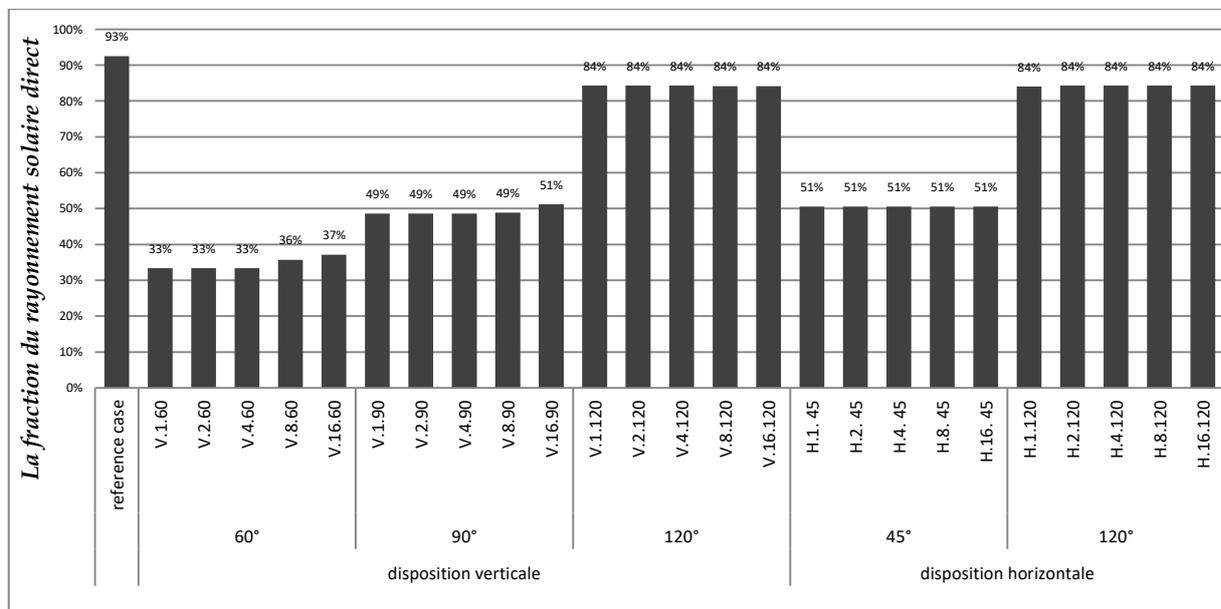


Figure 73 : La quantité du rayonnement solaire direct calculée pour le 21 décembre

Cependant pour **les orientations Est, Ouest et Nord**, le RSD est toujours nul (0%), car l'azimut du soleil est toujours inférieur à l'angle d'occultation horizontal (HSA) ce qui explique le fait que les configurations étudiées pour ces trois orientations présentent presque le même comportement par rapport aux différentes performances.

### 5.1.1.2 Le coefficient de protection (CP)

C'est le rapport entre la surface de la partie protégée de la fenêtre et la surface totale de la fenêtre (Figure 74).

$$CP = \frac{S_{pf}}{S_f} \times 100 = \frac{h_{pf} \times L_f}{h_f \times L_f} \times 100 = \frac{h_{pf}}{h_f} \times 100$$

Où :

- $S_f$  : La surface de la fenêtre.
- $S_{pf}$  : la surface de la partie protégée de la fenêtre.
- $L_f$  : la largeur de la fenêtre.
- $h_f$  : La hauteur de la fenêtre
- $h_{pf}$  : La hauteur de la partie protégée de la fenêtre.

En d'autres termes :

$$CP = 100 - RSD$$

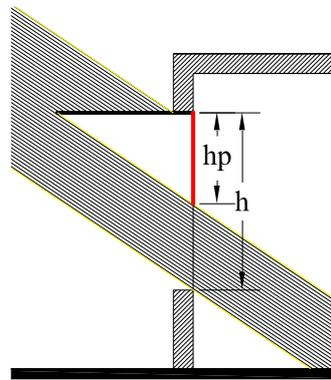


Figure 74 : Le coefficient de protection solaire

**Pour l'orientation Sud :** En période de surchauffe, le CP est égal à 100% pour toutes les configurations, car la hauteur du soleil est supérieure à l'angle d'occultation vertical (VSA). Cependant, en période d'hiver, contrairement au RSD, le CP diminue car la hauteur du soleil est inférieure à l'angle VSA. IL dépend également des paramètres de conception. Dans le graphe ci-dessous nous présentons les valeurs du CP, pour chaque configuration, calculées pour le 21 décembre (Figure 75). Nous constatons qu'il existe une corrélation négative entre le RSD et les

températures de l'air ainsi que les charges de climatisation. Dans le cas des configurations ayant le même CP les différences sont dues aux autres indicateurs.

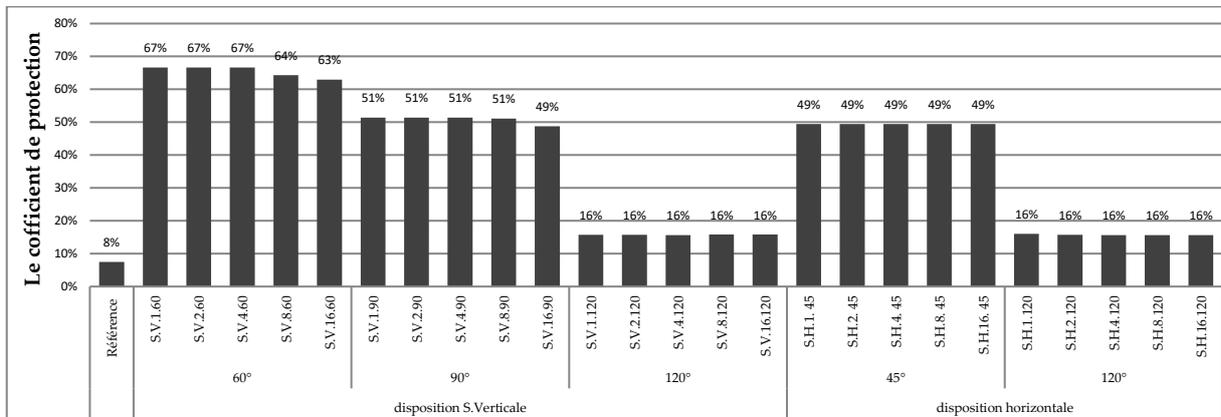


Figure 75 : Le coefficient de protection calculé pour le 21 décembre

### 5.1.1.3 Le rayonnement réfléchi par les lamelles (RRL)

La quantité de rayonnement solaire réfléchi par les lamelles a également un impact sur les performances des protections solaires notamment lorsque le RSD est égale à 0, c'est-à-dire en période de surchauffe. Le RRL est calculé par le rapport entre la quantité de rayonnement solaire réfléchi par les lamelles arrivant sur la fenêtre et la surface de la fenêtre (Figure 76).

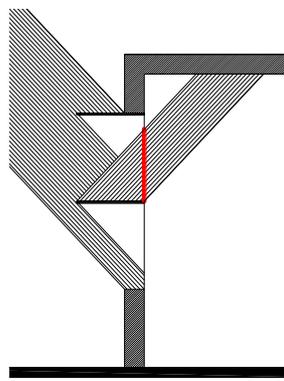


Figure 76 : Schéma montrant le rayonnement réfléchi par les lamelles

Dans la Figure 77 nous présentons les valeurs du rayonnement réfléchi par les lamelles pour l'orientation Sud, calculées pour le 21 décembre correspondant à la hauteur minimale du soleil ainsi que pour le 21 septembre correspondant à une hauteur du soleil égale à l'angle d'occultation optimal. Dans cette période les valeurs du rayonnement réfléchi par les lamelles sont les plus élevées. Les configurations ayant un RRL égal à 0% ne sont pas présentées dans les

deux graphes. Nous pouvons constater que le RRL est négativement corrélé avec l'espacement des lamelles.

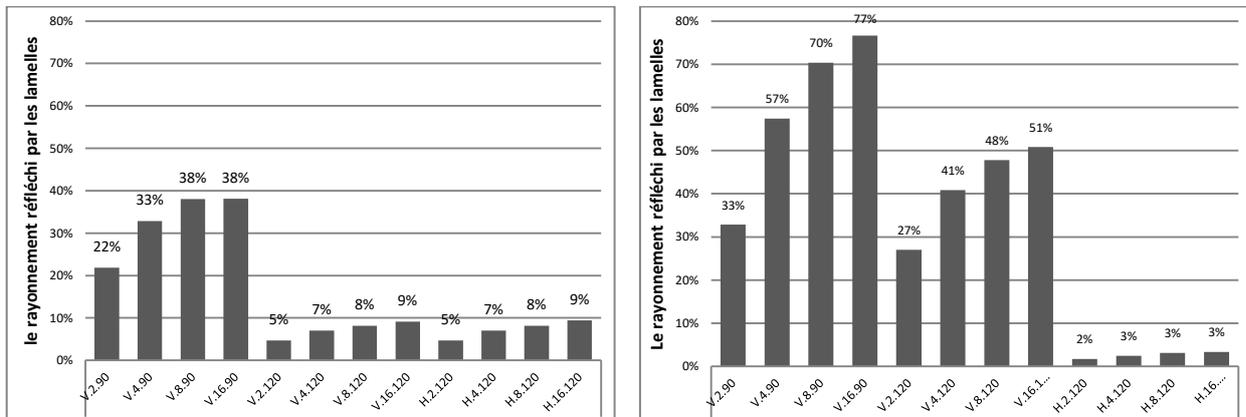


Figure 77 : Le rayonnement réfléchi par les lamelles calculé pour l'orientation Sud, à gauche : le 21 décembre, à droite : le 21 septembre. Les configurations non présentées dans le graphe ont un RRL de 0%

Pour l'orientation Nord, en période d'hiver le RRL est nul, en période d'été est nul pour les deux angles d'inclinaison ; 90° et 120°, alors que pour l'inclinaison 60°, il varie entre 9% et 43% et il est en corrélation positive avec l'espacement entre les lamelles (Figure 78). Le RRL est toujours nul pour les orientations Est et Ouest.

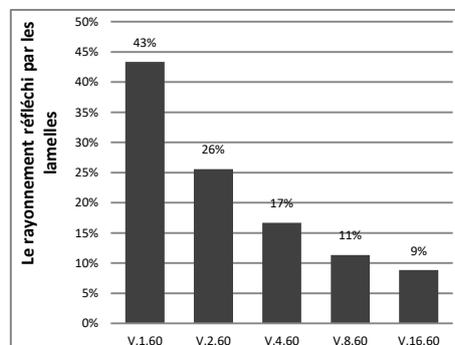


Figure 78 : Le rayonnement réfléchi par les lamelles calculé pour l'orientation Nord en période d'été (le 21 juin)

#### 5.1.1.4 Le rayonnement réfléchi par le sol (RRS)

Le rayonnement solaire réfléchi par le sol peu avoir un impact sur les performances des protections solaires notamment sur les performances lumineuses. C'est le rapport entre la quantité de rayonnement solaire réfléchi par le sol arrivant sur la fenêtre et la surface de la fenêtre. Comme pour le RRL, l'impact du RRS est plus significatif lorsque le RSD est égale à 0%. Il est à

noter que le RRS dépend également des caractéristiques du sol notamment son albédo. Ici l'albédo est le même pour tous les cas, c'est pourquoi nous ne l'avons pas pris en considération.

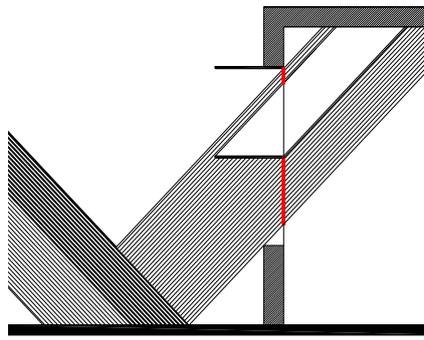


Figure 79 : Schéma montrant le rayonnement réfléchi par le sol

Pour l'orientation Sud, en période d'hiver, dans le cas de de la disposition verticale, le RRS est en corrélation positif avec l'espacement entre les lamelles et en corrélation négative avec l'angle d'inclinaison. Il est constant dans le cas de la disposition horizontale. En période d'été, le RRS est très faible. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus pour l'éclairage justifié le fait que l'espacement  $e=H/4$  enregistre les valeurs maximales dans le cas des deux inclinaisons  $60^\circ$  et  $90^\circ$ .

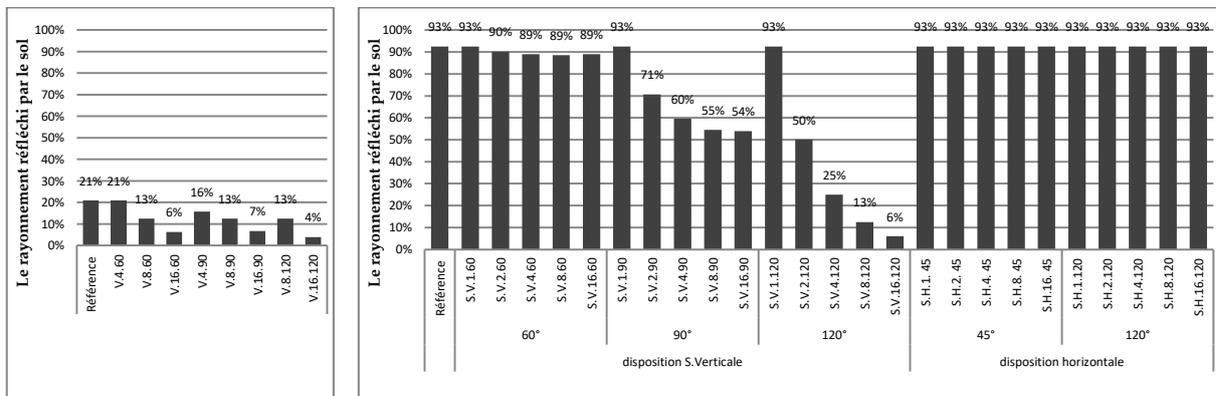


Figure 80 : Le rayonnement réfléchi par le sol calculé pour l'orientation Sud. A gauche : le 21 septembre, à droite : le 21 décembre

### 5.1.1.5 La pénétration du rayonnement solaire (PRS)

La pénétration du rayonnement solaire est le rapport entre la profondeur de la tache solaire, mesurée depuis la façade, et la profondeur de l'espace. Cet indicateur a un effet sur la

performance lumineuse, en déterminant la valeur du niveau d'éclairément minimal et l'uniformité avec lesquels il corrèle positivement.

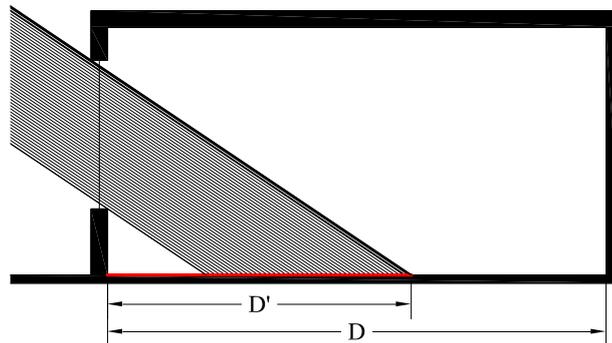


Figure 81 : Représentation graphique de la pénétration du rayonnement solaire

Pour l'orientation sud, la pénétration solaire est nulle en période d'été. Cependant pour la période d'hiver elle varie d'une configuration à une autre. Nous constatons à travers les résultats présentés dans la Figure 82 que la pénétration solaire est positivement corrélée avec l'angle d'inclinaison et l'espacement entre les lamelles. Dans le cas de la disposition horizontale la pénétration est constante pour les configurations avec un angle d'inclinaison de 45°.

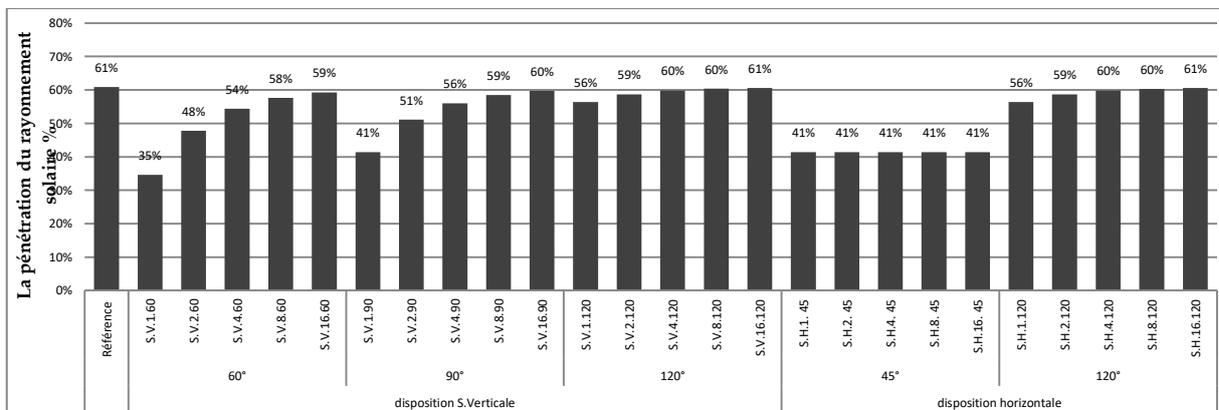


Figure 82 : La pénétration du rayonnement solaire calculée le 21 décembre pour l'orientation Sud

Dans le cas des autres orientations, la pénétration solaire est nulle pour toutes les configurations car le rayonnement solaire est bloqué par les protections solaires.

### 5.1.1.6 La perméabilité visuelle (PV)

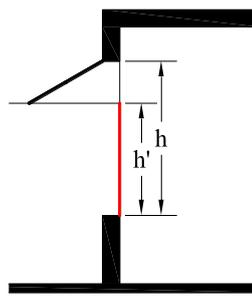
La perméabilité visuelle, est un indice de la vue vers l'extérieur, calculé par le rapport entre la surface de la partie ouverte projetée et la surface de la fenêtre. En d'autres termes, la

perméabilité visuelle est la différence entre la surface de la fenêtre et la surface de la projection de la zone ombragée (Figure 83). Elle dépend uniquement de la configuration géométrique des protections solaires, c'est-à-dire l'espacement entre les lamelles, l'angle d'inclinaison et la disposition des lamelles. La perméabilité visuelle pour le cas de référence est égale à 100%.

$$RSD = \frac{S'}{S} \times 100 = \frac{h' \times L}{S \times L} \times 100 = \frac{h'}{h} \times 100$$

Où :

- S : La surface de la fenêtre.
- S' : la surface de la partie ouverte projetée.
- L : la largeur de la fenêtre.
- h : La hauteur de la fenêtre
- h' : La hauteur de la partie ouverte projetée.



Nous constatons à travers les résultats de la perméabilité visuelle calculés pour l'orientation Sud que (Figure 84) :

- Dans le cas de la disposition verticale, la perméabilité visuelle est constante pour l'angle d'inclinaison 60° et en corrélation positif avec l'espacement lorsque l'inclinaison est 90° et 120°. La perméabilité visuelle est également en corrélation positive avec l'angle d'inclinaison dans le cas de l'espacement e=H cependant pour les autres espacements, l'angle 90° offre les valeurs maximales et l'angle 120° offre les valeurs minimales.
- Dans le cas de la disposition la perméabilité visuelle ne dépend pas de la l'espacement et de l'inclinaison, elle est égale à 100% pour toutes les configurations étudiées.

Nous constatons un ajustement parfait entre la perméabilité visuelle et les niveaux d'éclairément enregistrés en mois de juin (Tableau 10).

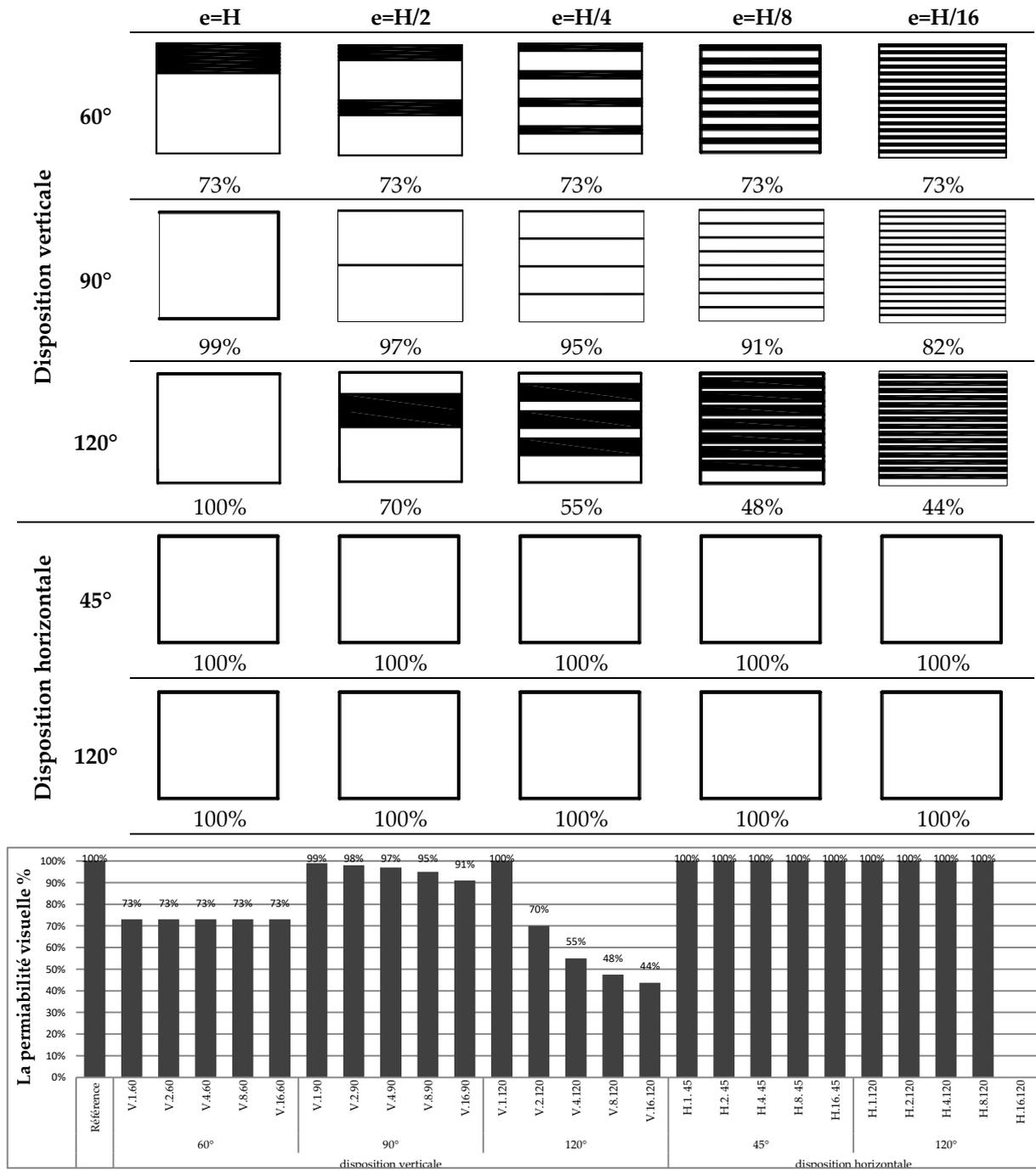


Figure 84 : La perméabilité visuelle calculée pour l'orientation Sud

Les résultats de la perméabilité visuelle présentés dans la Figure 85, montrent que :

- Pour l'inclinaison 60°, la perméabilité visuelle est la même pour tous les espacements.
- Pour les deux inclinaisons 90° et 120°, la perméabilité visuelle est en corrélation positive avec l'espacement des lamelles.
- Pour un espacement  $e=H$ , l'inclinaison 60° offre la perméabilité la plus faible tandis que l'inclinaison 90° enregistre les valeurs les plus élevées.
- Pour les autres espacements, c'est l'inclinaison 120° qui a la plus faible perméabilité alors que l'inclinaison 90° enregistre les valeurs les plus élevées.

Nous constatons, à travers la comparaison des résultats de simulations avec les valeurs de la perméabilité visuelle, que cette dernière est en parfaite corrélation avec les charges de climatisation et de chauffage ainsi qu'avec le  $sDA_{500lx50\%}$ .

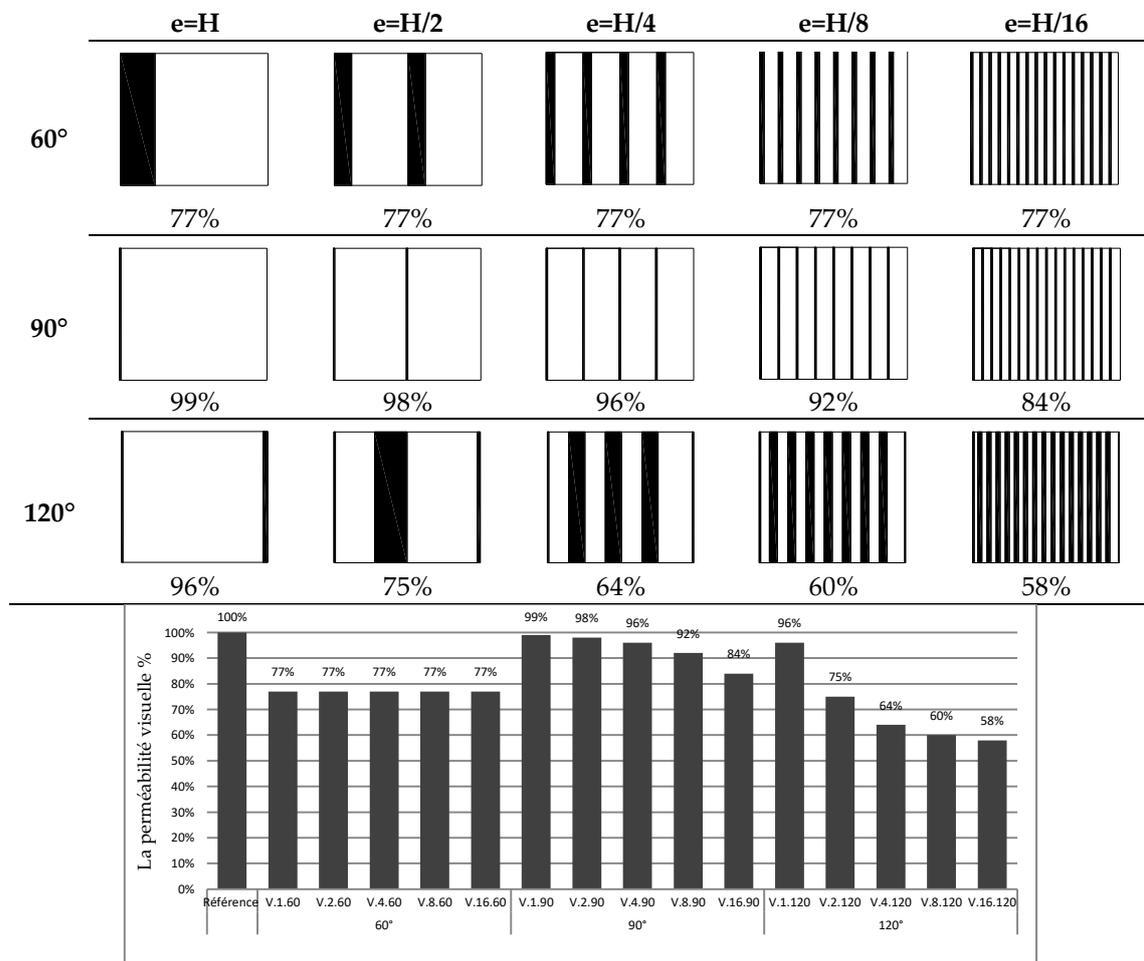


Figure 85 : La perméabilité visuelle pour l'orientation Nord

Pour les deux orientations Est et Ouest la perméabilité visuelle est nulle pour toutes les configurations étudiées, car l'angle d'occultation optimale utilisé (HSA) est de  $90^\circ$  pour l'orientation Est et  $118^\circ$  pour l'orientation Ouest.

### 5.1.2 Evaluation des configurations par rapport aux différents critères

Dans cette partie, nous récapitulons les résultats de simulation afin d'évaluer chaque configuration par rapport aux différents critères d'évaluation. Ensuite nous présentons une deuxième évaluation en tenant en considération trois critères seulement : les charges de climatisation, les charges de chauffage ainsi que le  $sDA_{500lx50\%}$ . Le choix de ces critères est basé sur le fait qu'ils permettent une évaluation dynamique annuelle contrairement aux autres critères qui sont plutôt statique (point in time).

Nous avons choisi de représenter les résultats de simulation sous forme de radar. C'est le type de graphique qui nous permet de visualiser et comparer les résultats des différentes configurations par rapport à plusieurs critères d'évaluation. Afin de pouvoir réaliser ces graphes, les résultats de simulation ont été transposés en note sur 10.

L'analyse des graphes présentés dans la Figure 86 montre que les configurations géométriques ont presque le même comportement puisque leurs surfaces (la partie hachurée) se rapprochent. Nous enregistrons des différences minimales.

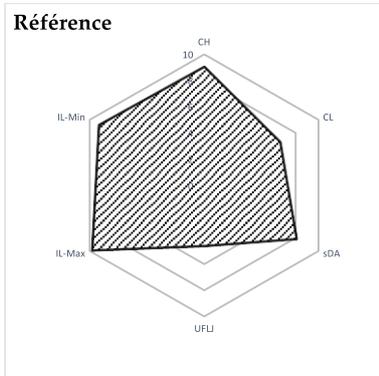
Afin de pouvoir classer les différentes configurations, nous leur avons attribué une note qui est le rapport entre la surface de la partie hachurée et la surface du polygone multiplié par 10.

Les résultats de ce calcul sont présentés dans la Figure 87. La ligne de référence (en rouge) correspond à la note 5/10. Les barres en noire correspondent aux configurations ayant une note supérieure à 5/10 et celles en gris ont une note inférieure à 5/10.

Nous pouvons constater que :

- Toutes les configurations avec un angle d'inclinaison  $60^\circ$  (disposition verticale) et  $45^\circ$  (disposition horizontale) sont au-dessous de la moyenne.
- Les configurations avec un espacement  $e=H/16$  sont au-dessous de la moyenne sauf pour le cas de l'inclinaison  $90^\circ$  (disposition verticale).

- Les configurations avec un espacement  $e=H$  sont au-dessous de la moyenne sauf pour le cas de l'inclinaison  $120^\circ$  (disposition verticale et horizontale).



CH : Consommation énergétique pour le chauffage.  
 CL : Consommation énergétique pour la climatisation.  
 sDA : Spatial Daylight Autonomie  
 UFLJ : Uniformité du facteur de lumière du jour  
 IL-Max : l'illuminance maximale.  
 IL-Min : l'illuminance minimale.

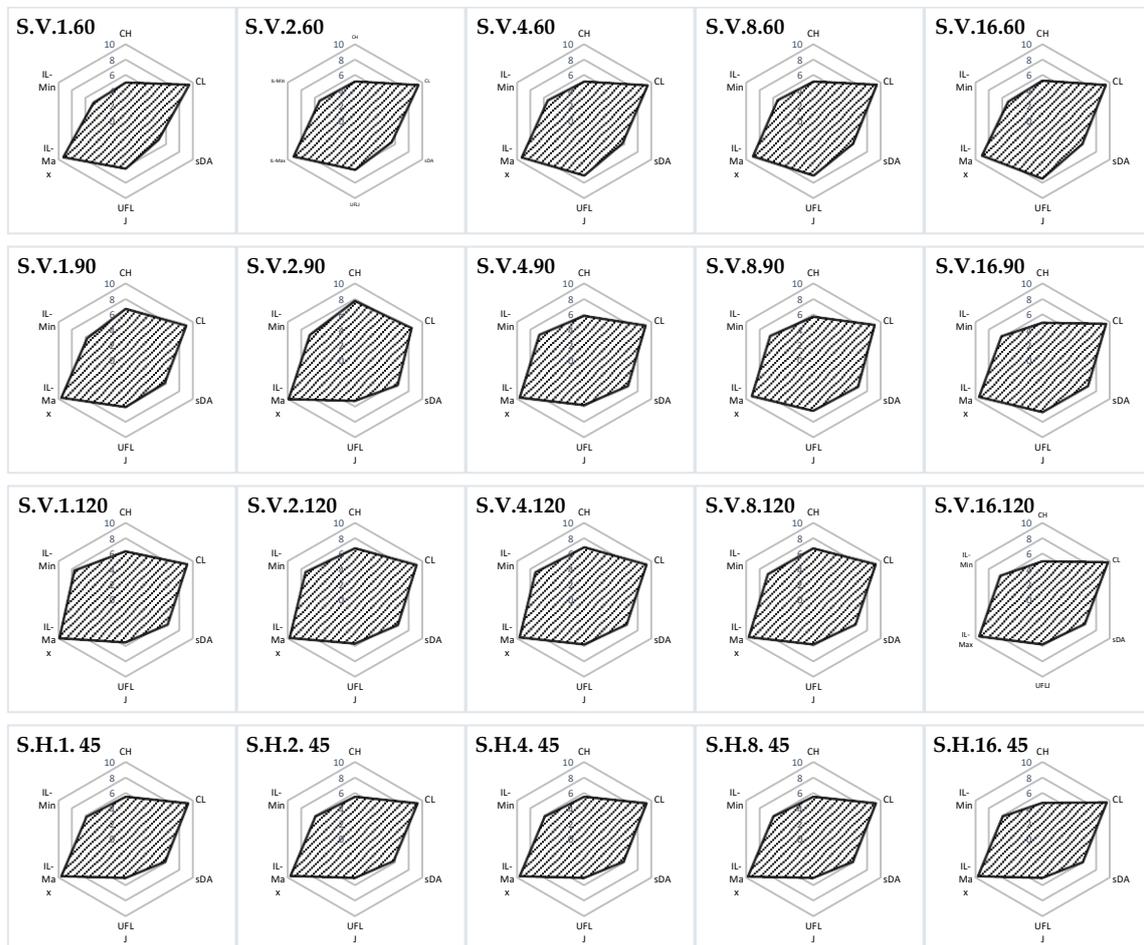




Figure 86 : Evaluation des configurations par rapport aux différents critères, le cas de l'orientation Sud

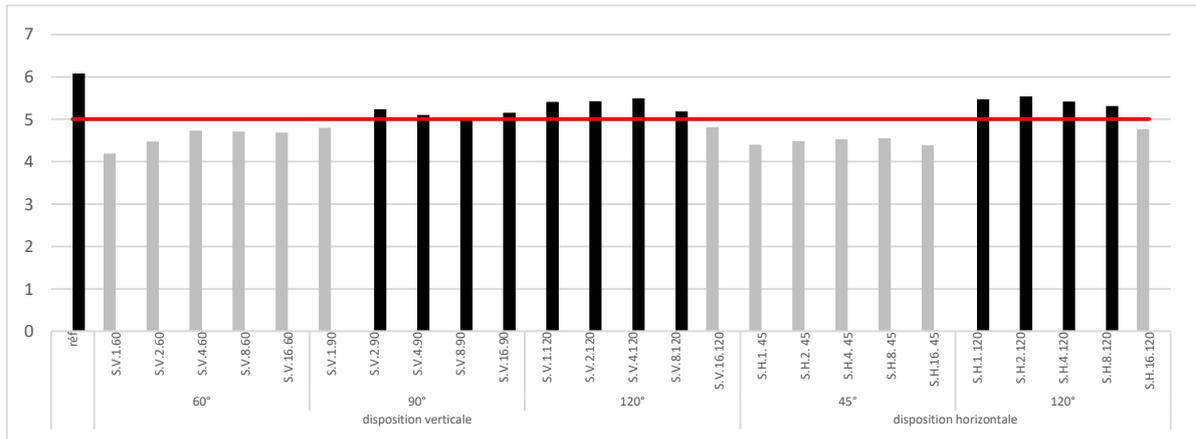


Figure 87 : Les notes attribuées à chaque configuration

Dans la Figure 88, nous présentons l'évaluation des différentes configurations géométrique, pour l'orientation Sud, par rapport aux trois critères. Sur l'axe des abscisses est présentée la consommation énergétique pour le chauffage, la consommation énergétique pour la climatisation est présentée sur l'axe des ordonnées et le sDA est indiqué par la taille des cercles. Les configurations les plus favorables doivent se situées dans la zone en bas à gauche du graphique et avoir un diamètre de cercle important. Nous pouvons constater qu'aucune configuration ne se situe dans la zone favorable.

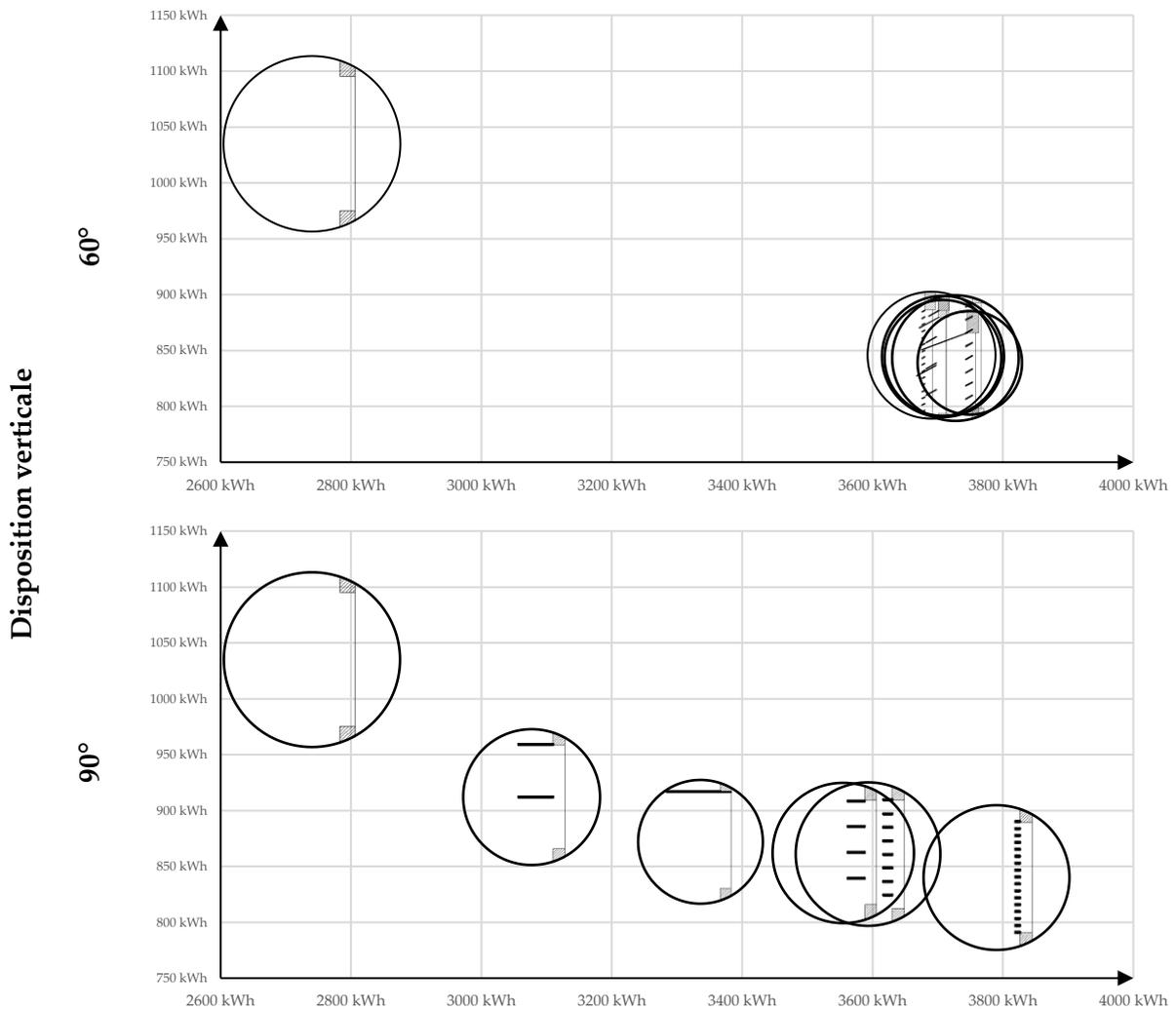
**Dans le cas de la disposition verticale :**

- Pour l'inclinaison 60°, toutes les configurations présentent le même comportement par rapport aux performances énergétiques. Cependant par rapport à l'éclairage les valeurs de sDA500lx50% varient d'une configuration à une autre, ceci est expliqué par la différence des tailles de cercles.
- Pour l'inclinaison 90°, le comportement des différentes configurations change en fonction de l'espacement entre les lamelles. Nous pouvons constater que le cas S.V.2.90 se rapproche de la zone favorable.

- Pour l'inclinaison 120°, les trois espacements H, H/2 et H/4 ont le même comportement en terme de consommation énergétique.

**Dans le cas de la disposition horizontale :**

- Pour l'inclinaison 45° les configurations ont le même comportement à l'exception de celle avec un espacement  $e=H/16$ .
- Pour l'inclinaison 120° les différences entre les configurations sont minimales, elles ont presque le même comportement sauf le cas S.H.16.120 qui consomme plus d'énergie pour la climatisation.



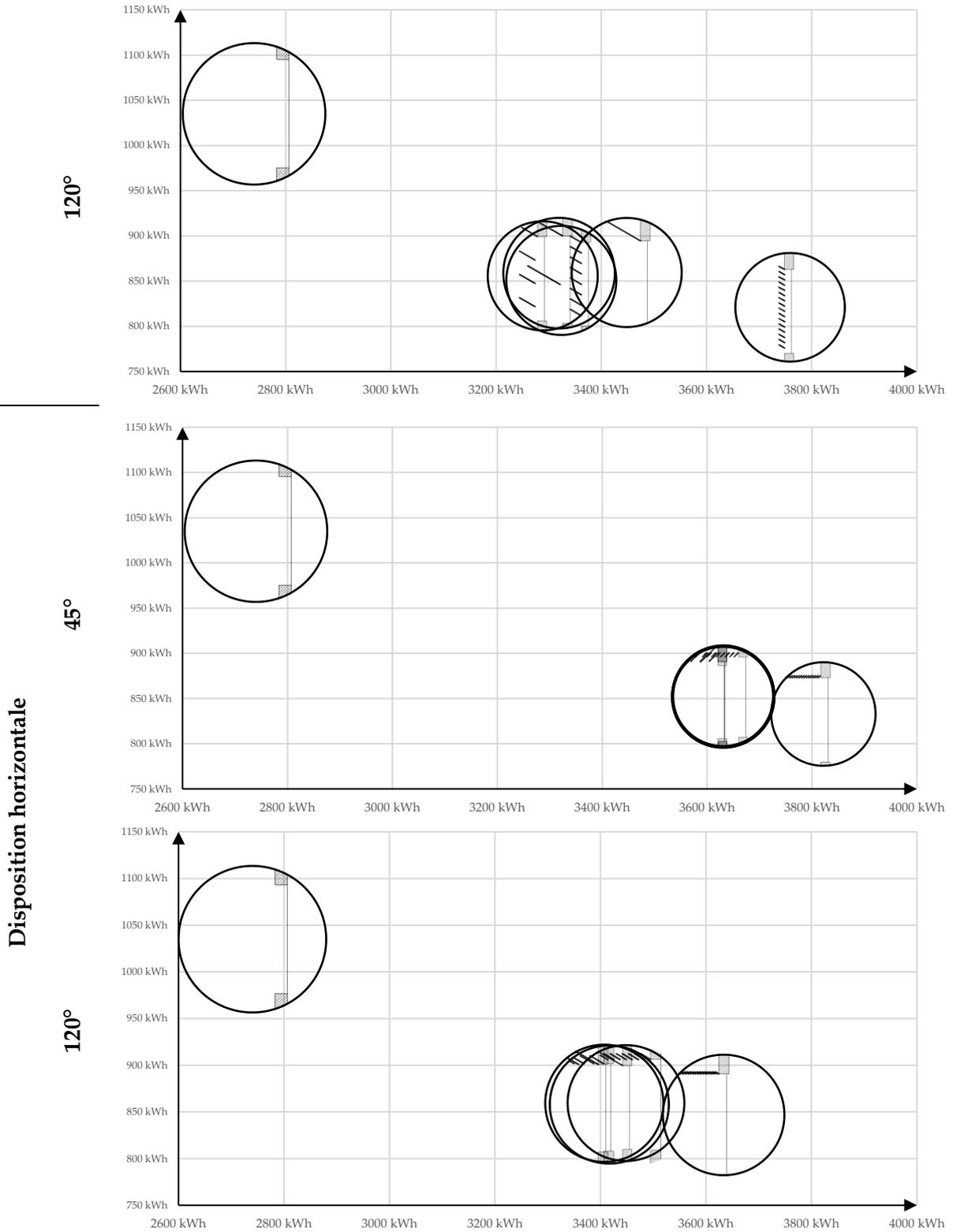


Figure 88 : Evaluation des configurations géométriques, de l'orientation Sud, par rapport aux trois critères

## Conclusion

Nous avons présenté à travers ce chapitre les résultats de simulations réalisées dans le cadre de l'analyse paramétrique. Ces simulations avaient pour objectif d'étudier l'impact des différentes configurations géométriques sur les performances : thermique, lumineuse et énergétique. L'analyse comparative des résultats nous a permis de comprendre, selon les différentes orientations, le comportement des configurations géométriques notamment la relations entre les paramètres de conception et les différents critères d'évaluation (température de l'air, l'illuminance, consommation énergétique etc.).

Nous avons pu constater que l'impact des paramètres de conception varie selon l'orientation et la période considérée. Des différences significatives ont été enregistrées entre les configurations étudiées dans le cas de l'orientation Sud, notamment en période d'hiver, contrairement aux orientations Est, Ouest et Nord, pour lesquelles nous avons constaté le même comportement des configurations géométriques considérées. Il est à noter que l'impact de l'utilisation des protections solaires est négligeable pour l'orientation Nord, les configurations géométriques représentent le même comportement que le cas de référence.

D'autre part, nous avons constaté que les critères d'évaluation ne sont pas toujours en corrélation avec les paramètres de conception. A cet effet nous avons identifié six indicateurs ayant un impact direct sur les performances des protections solaires et qui sont en corrélation (positive ou négative) avec les critères d'évaluation, ces indicateurs sont : la fraction du rayonnement solaire direct, le coefficient de protection, le rayonnement réfléchi par les lamelles, le rayonnement réfléchi par le sol, la pénétration du rayonnement solaire et la perméabilité visuelle. Tous ces indicateurs dépendent de la position solaire (hauteur et azimut) et des paramètres de conception sauf la perméabilité visuelle, qui dépend uniquement des paramètres de conception et ne change pas en changeant la position solaire.

Les résultats de simulation ont montré qu'aucune configuration n'améliore à la fois toutes les performances qui sont contradictoires. Nous constatons une contradiction entre les performances thermique et lumineuse, entre la performance thermique en été et en hiver, ou encore entre la consommation énergétique pour la climatisation et le chauffage. Dans ce contexte, le choix d'une configuration géométrique répondant aux différents critères d'évaluation devient très compliqué et doit être basé sur une analyse multicritère. C'est pourquoi nous avons fait appel à la méthode de l'analyse multicritère qui sera présentée dans le chapitre suivant. Cette analyse

nous permettra non seulement de classer les différentes configurations par rapport aux critères étudiés, mais aussi d'identifier les configurations les plus favorables vis-à-vis de tous ces critères.

Afin que ces résultats soient valorisés de manière à pouvoir les exploiter et qu'ils soient accessibles et directement utilisables par les concepteurs, nous avons jugé utile de les intégrer dans une démarche d'aide à la conception. La partie suivante sera consacrée à l'élaboration d'un outil d'aide à la conception des protections solaires, basé sur l'analyse multicritère, permettant le dimensionnement et le choix de la configuration géométrique la plus favorable.

*Troisième partie : "Proposer" un outil  
d'aide à la conception des protections  
solaires.*

## 6 Chapitre VI : Les outils d'aide à la conception

### Introduction

**L**es outils d'analyse quantitative et qualitative des différentes alternatives de projet sont généralement utilisés dans les phases finales du processus de conception. Ils sont rarement utilisés dans les premières phases de la conception architecturale où les choix pris ont un impact significatif sur le comportement du bâtiment en termes de confort et de consommation d'énergie. C'est pourquoi il est important de disposer, dès le début du processus de conception, d'un (des) outil (s) accessible (s) et facilement assimilable (s) pouvant assister le concepteur dans le choix des meilleures alternatives pour des bâtiments performants en termes de confort et de consommation énergétique.

La protection solaire constitue une partie importante de l'enveloppe du bâtiment et contribue efficacement à contrôler le rayonnement solaire pénétrant à l'intérieur des espaces. Son choix et son dimensionnement impactent directement la consommation énergétique et le confort environnemental des bâtiments. Notons que les effets thermiques et lumineux de la protection solaire dépendent de plusieurs paramètres que l'architecte peut manipuler au tout début de la conception. Même si ce dernier est soucieux de ces effets, il demeure incertain face aux choix formels ou dimensionnels à effectuer. En l'absence de connaissances précises, l'architecte se trouve confronté à un raisonnement architectural qui consiste à introduire une protection solaire pour régler des aspects esthétiques et des incertitudes liées aux conditions thermiques et lumineuses. Loëhnert (2003) et Nielsen (2011) ont démontré que la sélection d'un système de protection solaire ne peut être justifiée qu'en comparant différentes alternatives au début du processus de conception lorsque des décisions concernant la façade sont prises.

Le concepteur doit donc disposer d'un outil lui permettant, en premier lieu, de dimensionner la protection solaire (selon les conditions climatiques, géographiques ainsi que

l'orientation et la taille de la fenêtre) et de faire par la suite des choix quant à la configuration géométrique de ces dispositifs.

Les résultats de l'étude paramétrique ont montré qu'il n'y a pas de configuration, parmi celles étudiées, favorable à la fois de point de vue thermique, lumineux et énergétique. Il s'agit donc d'un problème de décision multicritère, qui doit être intégré dans l'outil d'aide à la conception.

Pour établir l'outil d'aide à la conception des protections solaires, il est question d'abord de se pencher sur les différents aspects relatifs à l'élaboration de ces outils. Le présent chapitre est divisé en deux parties :

- La première aborde la question de l'analyse multicritère. Son objectif est de présenter les problèmes de décisions devant un ensemble d'alternatives et décrire les différentes méthodes d'analyse multicritère utilisée pour le rangement des solutions de projet.
- Quant à la deuxième, elle est consacrée aux différents concepts liés aux outils d'aide à la conception. Il s'agit de lister les types de ces outils en mettant l'accent sur leurs caractéristiques, notamment ceux proposés à la conception des protections solaires. Cet état de l'art nous guidera pour justifier l'approche utilisée dans notre travail.

## **6.1 L'aide multicritère à la décision (Problématique de la décision multicritère)**

Le processus décisionnel multicritère est devenu un véritable défi dans le domaine de la conception architecturale. Ces techniques permettent d'apporter des solutions à des problèmes aux des objectifs multiples et souvent contradictoires (Ait Haddou, 2018). Ces outils ont pour objectif de faciliter la prise de décisions en identifiant la meilleure solution/stratégie. Ainsi dans le domaine de l'architecture, la prise en compte des profils utilisateurs ainsi que leurs évolutions, pour l'aide à la décision constitue actuellement pour le développement des systèmes interactifs d'aide à la décision un enjeu important. Dans le processus de conception architecturale, le concepteur, pour arriver à une solution satisfaisante et efficace, fixe des valeurs, et forme une combinaison d'un ensemble de variables importantes (orientation des façades, surface des fenêtres, forme et taille des bâtiments, etc.). Cette combinaison n'est

qu'une parmi une infinité de possibilités satisfaisantes pour le concepteur qui doit faire un choix parmi plusieurs alternatives possibles (De Castro, 2005).

Ce type de problèmes de décision complexes implique de multiples critères conflictuels qui doivent être combinés pour obtenir une solution idéale.

Pour illustrer cette complexité dans le cadre d'une conception architecturale, nous avons rappelé dans les chapitres précédents que l'utilisation de la protection solaire par exemple, diminue les charges thermiques à l'intérieur du bâtiment et donc réduit la consommation énergétique pour la climatisation, mais aussi elle réduit la quantité de lumière naturelle utilisée pour l'éclairage des espaces intérieurs. C'est pourquoi une méthode basée sur l'analyse multicritère doit être adoptée dans la conception du projet.

### **6.1.1 Généralités**

L'analyse multicritère est un domaine important de la recherche opérationnelle et des sciences de gestion. Elle a été introduite après avoir constaté que les solutions intuitives ne sont pas souvent les plus adaptées et même si elles sont rentables pour un aspect spécifique elles ne pourraient pas l'être pour les autres (Recchia, et al., 2011). Cette méthodologie peut donc être qualifiée d'outil d'aide à la décision car elle n'est pas en mesure d'identifier la bonne solution alors qu'elle est utile pour organiser toutes les informations disponibles, fournir une éventuelle interprétation et vérifier les avantages et les inconvénients associés à toutes les alternatives (Recchia, et al., 2011).

Cette approche peut être appliquée dans de multiples secteurs et chaque fois où des choix doivent être effectués dans un processus de prise de décision. Cependant, des méthodologies peuvent être développées avec un type de détail différent selon le stade et la complexité du processus de prise de décision. En effet, si le processus de décision est effectué en phase de planification, les données disponibles pour chaque scénario hypothétique seront de qualité et quantité inférieures à celles collectées plus tard aux étapes de la conception (c.-à-d. étude de faisabilité). De plus, le secteur spécifique dans lequel le processus de décision est développé, implique un niveau de complexité et un ensemble de critères différents pouvant être appliqués plus ou moins facilement. L'analyse multicritères n'est pas définie de manière unique et de nombreuses techniques ont été développées pour mieux adapter la méthodologie au problème spécifique à résoudre.

Les méthodes d'analyse multicritère sont utilisées afin d'identifier des solutions optimales avec un compromis entre plusieurs objectifs différents et souvent contradictoires. En d'autre terme, elles permettent d'effectuer un choix optimal parmi plusieurs solutions possible en fonction d'un ensemble de critères.

### **6.1.2 L'évolution de l'analyse multicritères**

Selon Zopounidis & Doumpos (2002) l'histoire de l'analyse multicritère remonte à la fin du 18 e siècle, lorsque Jean-Charles de Borda et marquis de Condorcet ont mené des travaux sur les systèmes de vote. Environ un siècle après, Vilfredo Pareto a introduit le concept de *dominance*, qui est fondamental dans la théorie moderne de l'analyse multicritère, ce concept a été ensuite développé par Koopmans en introduisant le concept de l'ensemble efficace qui est défini comme étant « *un ensemble de solutions alternatives non-dominées* » (Doumpos & Zopounidis, 2004).

Au cours des années 1940 et 1950, Von Neumann et Morgenstern ainsi que Savage ont introduit la théorie de l'utilité pour la prise de décision normative, qui a jeté les bases de la théorie de valeur/utilité multi-attributs, l'un des principaux courants méthodologiques de l'analyse multicritère (Zopounidis & Doumpos, 2002). A la fin des années 1960, l'analyse multicritères a également suscité l'intérêt de la recherche opérationnelle européenne. Roy (1985), l'un des pionniers dans ce domaine et fondateur de l'école européenne d'analyse multicritère, a introduit l'approche de la relation de sur-classement (outranking) (Doumpos & Zopounidis, 2004).

Selon Recchia, et al. (2011), le développement de l'analyse multicritère est très récent et a été réalisé au cours des trois dernières décennies dans le but de considérer plusieurs conséquences de solutions proposées de différentes typologies de problèmes.

Nous pouvons distinguer deux grandes écoles pour le développement des approches multicritères, l'aide à la décision multicritère européenne (MCDA) et l'aide à la décision multicritère américaine (MCDM). L'école européenne donne des recommandations, tandis que l'école américaine cherche la solution idéale. De plus, l'école européenne s'intéresse aux méthodes discrètes et aux relations de sur-classement alors que l'école américaine étudie les méthodes de l'utilité multicritère (Roy & Vanderpotten, 1996).

Des méthodes informatiques interactives ont été développées, dans les années 1980, facilitant grandement la communication entre les décideurs. Ces méthodes d'analyse multicritères ont aujourd'hui une réputation mondiale et sont promues par différentes sociétés (Hatefi & Torabi, 2010).

Au cours des dernières années, l'analyse multicritères a poursuivi son essor à travers (Zopounidis & Doumpos, 2002) :

- De nouveaux développements théoriques sur de nouvelles techniques et la caractérisation de modèles de décision existants.
- La mise en œuvre de méthodologies multicritères dans des systèmes intégrés d'aide à la décision.
- Applications innovantes dans de nouveaux domaines, notamment la gestion, l'économie et la finance, l'environnement et la planification énergétique, les télécommunications, les transports, etc.

### 6.1.3 Etapes d'une analyse multicritère

Le processus de décision multicritère comporte plusieurs étapes : dans un premier temps, les différentes alternatives possibles doivent être identifiées ; puis un groupe de critères à utiliser pour l'évaluation des alternatives doit être défini ; enfin, tous les scénarios doivent être jugés au regard des critères fixés dans le but d'identifier les options les plus adaptées (Recchia, et al., 2011).

Selon Zopounidis & Doumpos (2002) et Recchia, et al (2011), la structure principale de l'analyse multicritère comprend les étapes suivantes (Figure 89) :

1. Identification du problème et définition des objectifs ;
2. Structuration du problème, définissant à la fois les options et les critères à utiliser ;
3. Modélisation des préférences, où la notation et la pondération sont effectuées ; elle consiste à juger chacune des solutions par rapport aux différents critères pour mettre en place la matrice d'évaluation ;
4. Agrégation et analyse des résultats ; dans le but de sélectionner la solution ayant les meilleures évaluations. Pour cela il existe plusieurs méthodes ; la famille des méthodes ELECTRE (Roy, 1977; Roy, 1968; Doumpos, et al., 2009; Bouyssou, et al.,

2021; Yu, 1992), La méthode PROMETHEE (Brans, 1982; Brans & Mareschal, 1992; Brans & Mareschal, 2005) .

5. Discussion et négociation des résultats obtenus.
6. L'aide à la prise de décision.

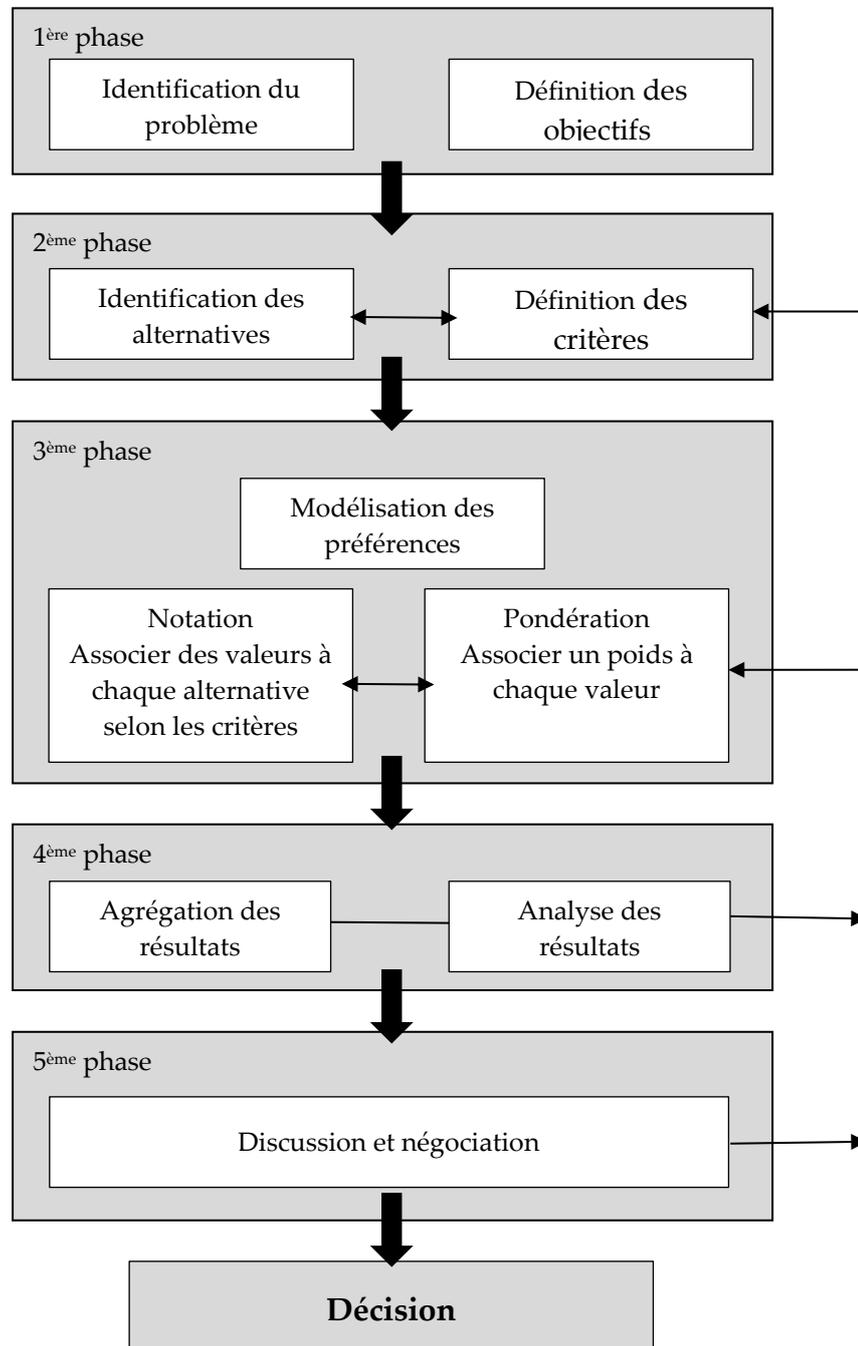


Figure 89 : Structure de l'analyse multicritère (Recchia, et al., 2011) reproduit par l'auteur

Dans la première phase, il est important de considérer toutes les lois, contraintes locales et politiques qui mettent généralement en évidence les aspects les plus critiques et causent les différences les plus importantes entre les alternatives hypothétiques. En effet, les bonnes décisions ne peuvent être prises que si les objectifs à atteindre sont clairement définis. Par conséquent, les objectifs doivent être spécifiques et mesurables, bien qu'ils puissent être dépendants du temps, c'est-à-dire atteignables à court, moyen ou long terme (Recchia, et al., 2011).

Généralement, les critères peuvent être organisés de deux manières différentes :

- Dans une structure hiérarchisée appelée arbre de valeurs, les objectifs fondamentaux sont fixés et donnent lieu à la définition de critères spécifiques.
- Alternativement, il est possible de lister tous les critères et dans une phase successive de les répartir en groupes caractérisés par le même objectif à poursuivre.

Ces critères doivent posséder les propriétés suivantes (Recchia, et al., 2011) :

- **Pertinence** des valeurs en fonction des objectifs fixés par les parties prenantes ;
- **Compréhensibilité** afin d'assurer la compréhension immédiate des critères par tous les décideurs pour être en mesure de les utiliser dans l'évaluation et la comparaison des processus concernant chaque solution proposée ;
- **Mesurabilité**, c'est-à-dire qu'au moins un indicateur mesurable de manière qualitative ou quantitative correspond à chaque critère, faute de quoi le critère doit être considéré comme non utilisable ;
- **Complétude** car l'ensemble des critères doit pouvoir couvrir tous les objectifs proposés et doit pouvoir mettre en évidence toutes les différences possibles. Ce périmètre n'a pas pu être atteint à la première étape et des lacunes n'ont été constatées dans la définition des indicateurs qu'à l'étape finale où les différentes solutions sont confrontées.

La première étape de l'aide à la décision multicritère consiste à définir l'ensemble des solutions ou alternatives à considérer dans le processus de prise de décision. **Dans notre travail il s'agit de l'ensemble des configurations géométriques proposées dans la section 1.1.3.**

Dans la seconde étape il convient de choisir les critères à prendre en considération dans le processus de décision. Ces critères sont associés à une échelle avec des valeurs ordinales ou cardinales. **Dans ce travail de thèse, nous avons considéré plusieurs critères pour l'évaluation des configurations géométriques des protections solaires, ces critères sont classés selon trois types de performances :**

- Performance énergétique en tenant compte la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation ;
- Performance thermique basée sur le calcul des températures de l'air en période d'été et d'hiver ;
- Performance lumineuse, consiste à évaluer les configurations par rapport aux niveaux d'éclairage en été et en hiver, l'autonomie de l'éclairage, le facteur de lumière du jour ainsi que l'uniformité ;

Dans la troisième étape, il s'agit de définir les performances de chaque configuration par rapport à ces critères. Ceci a fait l'objet d'une étude paramétrique basée sur la simulation numérique que nous avons présentée dans le chapitre 5 *Erreur ! Source du renvoi introuvable.* Les résultats de ces simulations constitueront une base de données intégrée dans l'outil d'aide à la conception des protections solaires que nous envisageons de développer.

La pondération qui consiste à attribuer un poids à chaque critère sera établie par le concepteur selon le type et l'usage du bâtiment. Dans le cas d'une école par exemple, l'importance est donnée aux performances lumineuses ainsi que les performances thermiques en période d'hiver puisque les vacances s'étalent sur une longue période d'été.

#### **6.1.4 Problématiques de l'approche multicritère d'aide à la décision**

Selon Bernard Roy (1985), Zopounidis & Pardalos (2010) et (Pereira de Castro, 2005), en considérant un ensemble discret d'alternatives décrites par une série de critères, nous pouvons identifier, quatre types principaux de problématique d'aide à la décision (Figure 90 & Figure 91) :

- **Problème de choix** (*problématique  $\alpha$* ) : il s'agit d'identifier la meilleure alternative ou définir un nombre limité de meilleures alternatives.
- **Problème de classification/tri** (*problématique  $\beta$* ) : consiste à faire le classement des alternatives selon des groupes homogènes prédéfinis.

- **Problème de rangement ou classement** (*problématique  $\gamma$* ) : il est question de construire un classement (*ranking*) d'alternatives de la meilleure à la moins bonne.
- **Problème de description** (*problématique  $\delta$* ) : décrire les alternatives selon les principales caractéristiques distinctives identifiées auparavant.

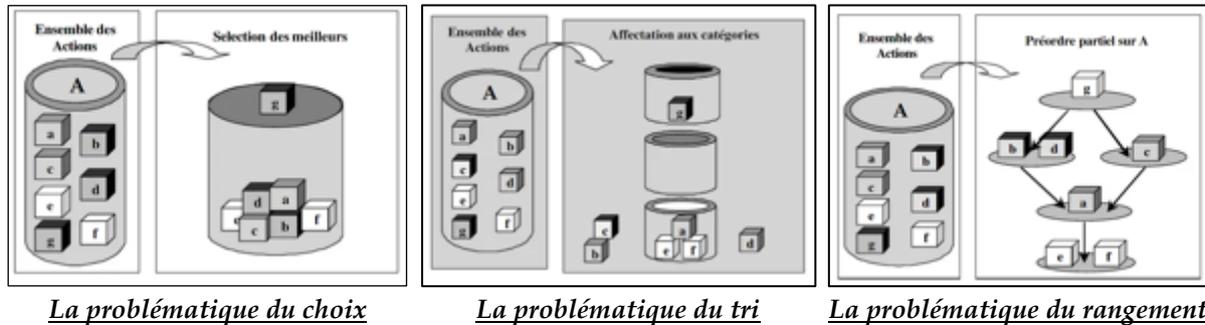


Figure 90 : Illustration des différentes problématiques de l'analyse multicritère (Ginting, 2000)

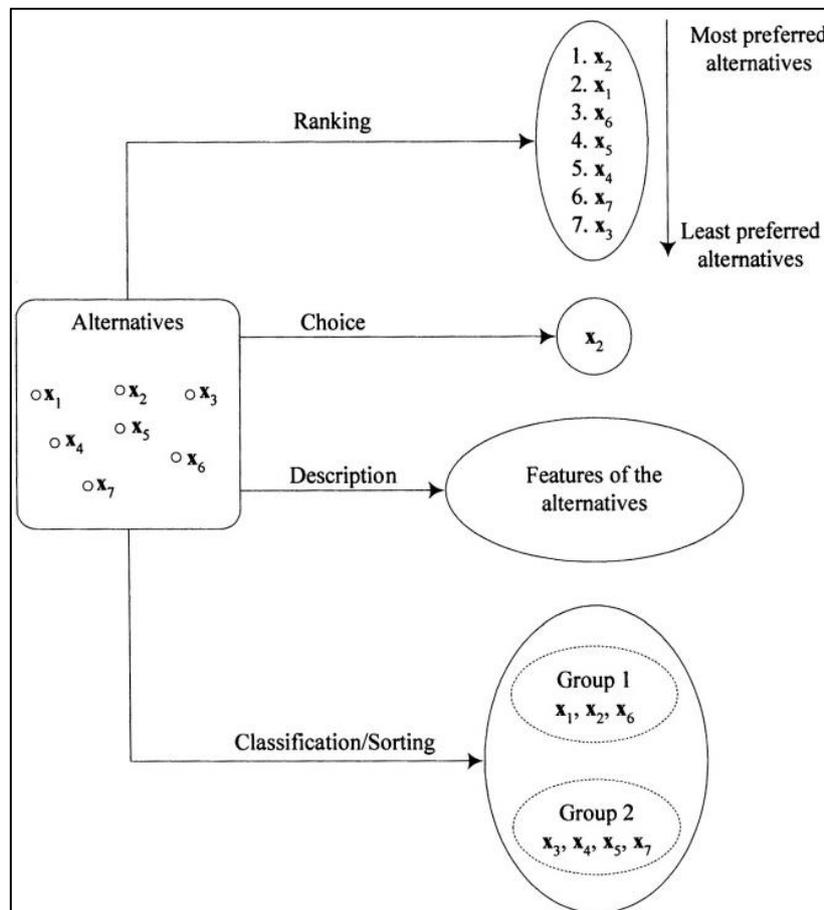


Figure 91 : Problématique d'aide à la décision (Doumpos & Zopounidis, 2004)

Zopounidis & Doumpos (2002) considère que les trois premières approches (choix, classification/tri et classement) conduisent à un résultat d'évaluation spécifique. Pour arriver à ce résultat, le choix et le rangement sont basés sur des jugements relatifs et, par conséquent, le résultat de l'évaluation dépend de l'ensemble d'alternatives considérées. Cependant, en prenant une décision de classification/tri, des jugements absolus doivent être effectués. Ce processus nécessite la comparaison à certains profils de référence.

Bien que la classification et le tri se réfèrent tous deux à l'affectation d'un ensemble d'alternatives dans des groupes prédéfinis, ils diffèrent en ce qui concerne la manière dont les groupes sont définis. En ce sens, la classification renvoie au cas où les groupes sont définis de manière nominale. Au contraire, le tri, terme largement utilisé par les chercheurs en aide à la décision multicritère, désigne le cas où les groupes sont définis de manière ordinale en partant de ceux comprenant les alternatives les plus préférées jusqu'à ceux comprenant les alternatives les moins préférées (Zopounidis & Doumpos, 2002).

Il est à noter que la manière dont l'aide à la décision multicritère est envisagée (la problématique) va contraindre la forme des résultats à obtenir (Zopounidis & Pardalos, 2010).

Dans le cas de prise de décision entre plusieurs alternatives de projet, il convient de considérer le processus de rangement (ranking) dont le résultat tient en considération toutes les alternatives contrairement au processus de choix ne prend en considération qu'une seule alternative en éliminant les autres. Selon Maystre et al. (1994), un problème de rangement est une évolution du problème de choix.

### **6.1.5 Approches méthodologiques des méthodes d'analyse multicritère**

Il est à noter que les méthodologies pour résoudre les problèmes de prise de décision sont abondantes. Les différences existantes entre ces méthodologies concernent à la fois la forme des modèles développés et le processus de développement des modèles. À cet égard, les chercheurs ont défini plusieurs catégorisations des méthodologies existantes dans ce domaine. Roy (1985) et Ben Mena (2000) ont identifié trois grands courants méthodologiques compte tenu des caractéristiques des modèles développés :

- **Approches du critère unique de synthèse** : elle utilise la fonction d'agrégation pour l'évaluation et la comparaison des alternatives. Elle effectue le classement des

alternatives en se basant sur des valeurs numériques attribuées (Roy & Vanderpotten, 1996).

- **Approches de sur-classement ou Outranking relation theory (ORT)** : Fondé, vers la fin des années 1960, par Bernard Roy avec le développement de la famille de la méthode ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) (Roy, 1968). Elle a été largement utilisée par les chercheurs travaillant sur les approches multicritères. Les méthodes basées sur cette approche comprennent deux phases : Il s'agit en premier temps de développer une relation de sur-classement ensuite exploiter cette relation de sur-classement  $S$  afin d'évaluer les solutions pour des objectifs de choix, de classement ou de classification/tri (Doumpos & Zopounidis, 2004). Les méthodes ORT les plus largement utilisées sont les méthodes ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) (Roy, 1991), ainsi que les méthodes PROMETHEE (Brans & Vincke, 1985; Brans & Mareschal, 2005) 6.1.6). Ces deux familles de méthodes comportent différentes variantes adaptées pour répondre aux problèmes de choix, de classement et de classement/tri.
- **Approches interactives**. Contrairement aux approches précédentes qui incarnent une structure mathématique claire, cette méthode est basée sur un dialogue entre le décideur et le modélisateur permettant d'évaluer de manière progressive la structure de préférence du décideur à travers un ensemble de questions (Celini, 2008).

D'autre part, Pardalos et al. (1995), ont suggéré un schéma alternatif prenant en compte à la fois les caractéristiques des modèles développés ainsi que les caractéristiques du processus de développement du modèle. Il propose quatre approches à savoir :

- **Programmation mathématique multi-objectif (MMP)** est une extension de la théorie de la programmation mathématique traditionnelle dans le cas où plusieurs fonctions objectives doivent être optimisées. L'intérêt majeur est de rechercher une solution de compromis appropriée. Dans la recherche d'une telle solution, il n'est pas nécessaire de considérer l'ensemble des solutions ; seule une partie de cet ensemble doit être considérée. Cette partie est appelée *ensemble efficace*. L'ensemble efficace est constitué de solutions qui ne sont dominées par aucune autre solution sur les objectifs pré-spécifiés. Ces solutions sont appelées solutions efficaces, solutions non dominées ou solutions optimales de Pareto
- **Théorie de l'utilité multi-attributs (MAUT)**, Considérée comme l'une des pierres angulaires du développement de l'aide à la décision multicritère et de sa mise en œuvre

pratique. Directement ou indirectement, toutes les autres approches utilisent les concepts introduits par cette théorie. Son objectif est de modéliser et de représenter le système préférentiel du décideur dans une fonction utilité/valeur  $U(g)$ , où  $g$  est le vecteur des critères d'évaluation  $g=(g_1, g_2, g_3, \dots, g_n)$ .

- **Relations de surclassement, Outranking relation theory (ORT)**, déjà expliquée ci-dessus.
- **Analyse de désagrégation des préférences (PDA)**, Contrairement à la théorie MAUT et ORT, où il s'agit d'un processus en aval consacré à la modélisation et à la représentation du système préférentiel du décideur dans un modèle mathématique prédéfini (fonctionnel ou relationnel) basé sur l'agrégation des différents critères d'évaluation. L'analyse de désagrégation des préférences (PDA), utilise un processus en arrière par le développement d'un cadre méthodologique général, qui peut être utilisé pour analyser les décisions réelles prises par le décideur afin qu'un modèle approprié puisse être construit. L'Analyse de désagrégation des préférences offre une flexibilité accrue quant à la manière d'exprimer les décisions. Le plus souvent, les décisions sont exprimées dans une échelle ordinaire impliquant un classement ou une classification des alternatives.

## 6.1.6 Méthodes d'analyse multicritère

Plusieurs méthodes d'analyse multicritère ont été développées pour effectuer le rangement (ranking) de plusieurs alternatives suivant un ordre de préférence. Toutes ces méthodes partent de la même grille d'évaluation, mais elles varient en fonction des compléments d'information qu'elles demandent (Zopounidis & Doumpos, 2002; Doumpos & Zopounidis, 2004). Parmi ces méthodes nous pouvons citer la famille des méthodes ELECTRE développées par Roy (1977) et la méthode PROMETHEE développée par Brans (1985).

### 6.1.6.1 La méthode ELECTRE

La famille des méthodes ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la REalité*) développée, depuis les années 60, par Berbard Roy (1991; 1977; 1968), considérée, aujourd'hui, comme étant la méthode de sur-classement (ORT) la plus utilisée. Elle consiste à classer les alternatives de la meilleure à la moins bonne à partir de leur comparaison deux à deux. Cinq versions de la méthode ELECTRE ont été développées, dont chacune correspond à l'une des trois premières problématiques citées ci-dessus :

- **ELECTRE I** : c'est la première méthode de la famille ELECTRE, publiée en 1968 (Roy, 1968). Elle est basée sur la problématique de choix  $P.\alpha$ , son objectif est de sélectionner, au moyen de la relation de sur-classement  $S$ , un ensemble "A" contenant les meilleures alternatives.
- **ELECTRE II** relève de la problématique  $\beta$  de classification/tri. Elle utilise aussi la relation de sur-classement  $S$  et vise, à travers les relations d'ordre de chaque critère, à attribuer à l'ensemble des actions potentielles  $A$  une structure de pré-ordre total afin de faciliter le choix. Il s'agit d'un classement descendant des actions. Par rapport à la méthode ELECTRE I, celle-ci introduit deux types de sur-classement fort et faible.
- **ELECTRE III**, Basé sur la problématique de rangement ou classement  $\gamma$ . En plus des principes de la méthode ELECTRE II, elle introduit, pour chaque critère, les seuils d'indifférence et de préférence stricte. Elle utilise également le seuil de veto, pour concrétiser la notion de discordance. L'algorithme de classement est basé sur le niveau de signification du degré de crédibilité qui indique la valeur à partir de laquelle la différence entre deux degrés de crédibilité est significative (Roy, 1977).
- **ELECTRE tri** (Yu, 1992) est un ensemble de méthodes basées sur la méthode ELECTRE III (Roy, 1991) et relevant de la problématique  $\beta$  de classification/tri. Son objectif est d'affecter des alternatives à des catégories ayant pour limites des alternatives fictives appelées profils. Les alternatives sont comparées à ces profils par la relation de sur-classement  $S$  (Doumpos, et al., 2009). La méthode originale ELECTRE Tri-B utilise un seul profil de limitation par catégorie. Une méthode plus récente, ELECTRE Tri-nB, permet d'utiliser plusieurs profils de limitation pour chaque catégorie (Bouyssou, et al., 2021).

En considérant un ensemble de  $n$  alternatives possibles  $a_i$ ,  $i = 1.2\dots,n$ , et un groupe de  $m$  critères adoptés  $A = \{a_i\}$  et  $C_1, C_2\dots, C_m$ , les, chaque alternative  $a_i$  est caractérisée par un vecteur multi-attribut  $\{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{im}\}$  qui correspond à son évaluation par rapport aux différents critères. La méthode ELECTRE est basée sur une structure de modèle de préférence, qui consiste à comparer chaque deux alternatives, pour obtenir :

- Une Préférence forte ou faible par l'une des alternatives.
- Une indifférence entre les deux alternatives.
- Une incomparabilité entre les deux alternatives.

Les situations de préférence ou l'indifférence sont définies par les seuils de préférence "p" et de d'indifférence "q", fixés par le décideur.

- **Le seuil de préférence "p"**, indique une différence absolue ou relative qui permet de déterminer une préférence stricte entre deux évaluations.
- **Le seuil d'indifférence "q"**, indique la différence absolue ou relative entre les alternatives où aucune préférence ne peut être établie.

Un **seuil de veto "v"** est également attribué à chaque critère "C". Il permet de définir l'incomparabilité entre deux alternatives "A" et "B", autrement dit c'est la différence à partir de laquelle la comparaison entre les deux alternatives est ignorée.

L'importance de chaque critère est indiquée par l'attribution des **poïds**. Toutes ces données permettront d'assembler une matrice d'évaluations (Tableau 25). Dont l'analyse est basée sur la comparaison, deux à deux, des actions potentielles (Scharlig, 1985).

Tableau 25 : Structure de la matrice des performances (De Castro, 2005).

Critères		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	...	C <sub>m</sub>
Poïds		p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	...	p <sub>m</sub>
Alternatives	a <sub>1</sub>	e <sub>11</sub>	e <sub>12</sub>	e <sub>13</sub>	...	e <sub>1m</sub>
	a <sub>2</sub>	e <sub>21</sub>	e <sub>22</sub>	e <sub>23</sub>	...	e <sub>2m</sub>
	a <sub>3</sub>	e <sub>31</sub>	e <sub>32</sub>	e <sub>33</sub>	...	e <sub>3m</sub>
	...	...	...	...	...	...
	a <sub>n</sub>	e <sub>n1</sub>	e <sub>n2</sub>	e <sub>n3</sub>	...	e <sub>nm</sub>

Comme nous l'avons déjà dit, les méthodes ELECTRE sont basées sur le concept de relation de sur-classement S. Une relation binaire définie sur l'ensemble des alternatives permettant d'affirmer qu'une alternative "A" surclasse une alternative "B". Cette affirmation est basée sur deux essais ; premièrement, un test de *concordance* qui indique qu'une majorité des critères favorisent "A", et ensuite, un test de *discordance* qui indique qu'une minorité des critères favorisent "B" (De Castro, 2005).

Les relations de sur-classement sont déterminées en fonction des possibilités de relations de rangement entre deux alternatives "A" et "B" à savoir : une préférence forte, une préférence faible ou une indifférence (Figure 92), ces relations de sur-classement sont calculées comme suit (Caillet, 2003) :

- "A" est fortement préférée par rapport à "B" si  $g(A)-g(B) > p$
- "A" est faiblement préférée par rapport à "B" si  $q < g(A)-g(B) \leq p$
- "A" est indifférente par rapport à « B » si  $|g(A)-g(B)| \leq q$

Où  $g(a_i)$  est l'évaluation de l'alternative  $a_i$  par rapport au critère "g".

On peut donc calculer pour la paire "A,B ":

- **Un indice de concordance**  $c(A,B)$ , indiquant le degré de confiance pour l'hypothèse « A est meilleure que B ».
- **Un indice de discordance**  $d(A,B)$ , mesure le degré de méfiance pour l'hypothèse « A est meilleure que B ».

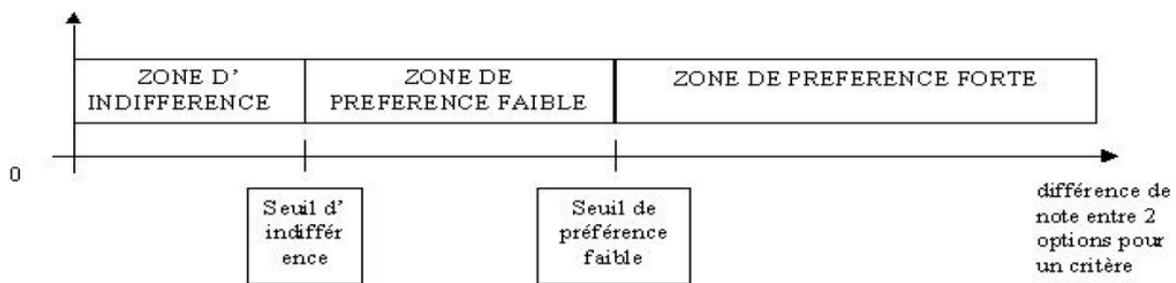


Figure 92 : Zones de préférence et d'indifférence (Caillet, 2003)

A partir de là, on peut établir les matrices de concordance et de discordance, à travers la comparaison de toutes les alternatives deux par deux. La combinaison des deux matrices permet d'établir la matrice de **crédibilité**. Cette dernière mesure quantitativement la force de l'affirmation A surclasse B, ou A est aussi performante que B. Elle permet également le rangement des alternatives (De Castro, 2005).

La méthode ELECTRE offre l'avantage de traiter à la fois des caractéristiques quantitatives et qualitatives de critères, les résultats finaux sont validés avec raisons et elle permet de traiter des échelles hétérogènes. D'autre part cette méthode présente un certain nombre d'inconvénients ; elle est moins polyvalente et exige une bonne compréhension des objectifs, en particulier lorsqu'il s'agit de caractéristiques quantitatives.

### 6.1.6.2 Méthode PROMETHEE

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) est l'une des méthodes multicritère les plus récentes qui a été développée par

Jean-Pierre Brans (1982) et étendue par Jean-Pierre Brans et Philippe Vincke (Brans & Vincke, 1985). Cette méthode appartient à la classe des méthodes de sur-classement, elle a été introduite pour aider à surclasser partiellement ou totalement un ensemble d'actions évaluées sur plusieurs critères. Les principales caractéristiques des méthodes PROMETHEE sont la simplicité, la clarté et la stabilité (Brans & Mareschal, 2005).

PROMETHEE montre le degré de dominance d'une alternative sur l'autre. Son principe est d'établir un processus de comparaison de chaque alternatives par rapport aux ce qui permet le classement ordonné de l'ensemble des alternatives (Brans & Mareschal, 2005). Elle consiste à classer les alternatives en calculant, pour chaque alternative, un flux de sur-classement positif et un flux de sur-classement négatif.

Sept méthodes différentes du groupe PROMETHEE ont été développées. PROMETHEE I (classement partiel) et PROMETHEE II (classement complet) ont d'abord été publiés en 1982 par Brans (Brans, 1982), puis en 1985, Brans et Vincke ont développé PROMETHEE III (classement par intervalles) et PROMETHEE IV (cas continu) (Brans & Vincke, 1985). En 1988 Brans et Mareschal ont proposé PROMETHEE GAIA qui fournit une représentation géométrique à l'appui de la méthodologie PROMETHEE (Brans & Mareschal, 1988). En 1992 et 1995, les mêmes auteurs ont proposé deux autres versions : PROMETHEE V (incluant les contraintes de segmentation) (Brans & Mareschal, 1992) et PROMETHEE VI (représentation du cerveau humain) (Brans & Mareschal, 1995).

Les méthodes PROMETHEE comportent trois étapes principales (Wu & Abdul-Nour, 2020) :

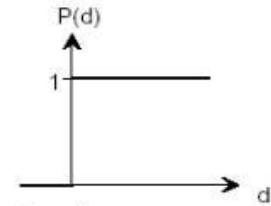
- Le calcul des degrés ou de l'intensité de préférence pour chaque paire d'alternatives sous chaque critère
- Le calcul des flux uni-critères positifs, négatifs et nets
- Le calcul des flux globaux

Le principe des méthodes PROMETHEE consiste à construire une relation de sur-classement évaluée indiquant une intensité de préférence. Le calcul des indices  $P_i(g_i(a) - g_i(b))$  permet de mesurer les intensités de préférence sur les critères  $i$  pour chaque paire d'alternative. Ces indices peuvent prendre différentes formes (Brans & Mareschal, 2005; Moeffaert, 2002; Brans & Mareschal, 2002; Vincke, 1989). On peut citer certaines d'entre elles :

Si on considère l'écart entre les évaluations  $d_i = g_i(a) - g_i(b)$  alors :

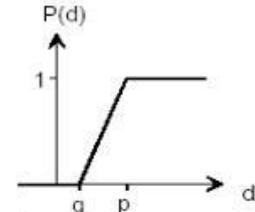
**Vrai critère** : dès qu'il y a un écart, l'action ayant l'évaluation la plus élevée a une préférence stricte.

$$P_i(d_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$



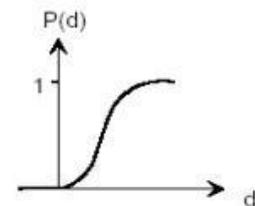
**Critère à préférence linéaire** : permet de préférer progressivement "a" à "b" en fonction de l'écart observé entre  $g(a)$  et  $g(b)$ . Le degré de préférence augmente jusqu'à atteindre le seuil  $p$ , la préférence est alors stricte au-dessus de ce seuil.

$$P_i(d_i) = \begin{cases} \frac{d_i - q_i}{p_i - q_i} & \text{si } q_i \leq d_i \leq p_i \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$



**Critère gaussien** : le degré de préférence augmente de manière continue en fonction du paramètre "s" qui doit être fixé. Ce paramètre définit le point d'inflexion de la fonction de préférence.

$$P_i(d_i) = 1 - e^{-\frac{d_i^2}{2s_i^2}}$$



Où  $q_i$  et  $p_i$  sont respectivement le seuil de préférence et d'indifférence. Ils permettent d'indiquer l'intensité de préférence. L'indice S mesure la crédibilité de l'affirmation "a" surclasse "b".

La méthode PROMETHEE implique une décision au niveau du groupe, elle permet de traiter des informations qualitatives et quantitatives et d'intégrer des informations incertaines et floues. Cependant elle ne structure pas correctement l'objectif et dépend du décideur pour attribuer un poids de plus elle est compliquée et donc les utilisateurs sont limités aux experts.

Bien que tous les calculs de PROMETHEE puissent être effectués manuellement, plusieurs logiciels ont été développés pour aider à mettre en œuvre cette méthode. Les logiciels actuellement disponibles sont (Ishizaka & Nemery, 2013):

- PromCale développé par Bertrand Marescal et Jean-Pierre Brans en 1990,
- Decision Lab développé par ULB et Visual Decision en 2000,
- D-Sight développé par Yves De Smet en 2010,
- Smart Picker Pro développé en 2012 par Philippe Némery

- Visual PROMETHEE développé par Bertrand Marschal en 2013.

## 6.2 Les outils d'aide à la conception

Les chercheurs ont développé des outils d'aide à la conception afin de faciliter la compréhension des concepteurs à travers la transmission des connaissances pluridisciplinaires issues de la recherche scientifique. Ils permettent d'orienter les concepteurs et de comparer les performances des différentes solutions (Fernandez, 2010). Ces outils interviennent dans les premières phases de conception, lorsque les choix primordiaux sont opérés et que les informations nécessaires pour éclairer ces choix sont encore limitées (Adolphe, 1991).

Dans cette partie nous présentons les différents concepts liés aux outils d'aide à la conception, mettant en évidence les types de ces outils, leurs caractéristiques, ainsi que les outils d'aide développés dans le domaine de la conception des protections solaires.

### 6.2.1 Classification des outils d'aide à la conception

Les outils de conception assistée par ordinateur (CAO) sont généralement orientés vers la représentation graphique (2D ou 3D) et donc considérés comme outil de dessin assisté par ordinateur (DAO). Pour M. Légise (1995) ces outils ne conviennent pas aux premières phases de la conception, ils sont plutôt utilisés pour dessiner les documents graphiques après l'achèvement de la conception. Aujourd'hui, la maquette numérique BIM constitue un outil de prise de décision basée sur une représentation numérique partagée facilitant les processus de conception, de construction et d'exploitation du projet.

Dans ses travaux traitant les modes de transferts d'un savoir scientifique dans le champ de l'architecture, Patrick Depecker (1985) a mis en évidence deux types d'outils d'aide à la conception :

- **Les outils de premier genre** ou lois générales, qualifiés d'outils d'aide à la conception,
- **Les outils de second genre** ou systèmes généraux de Conception Assistée par Ordinateur "CAO" qualifiés d'outils d'évaluation.

Dans une autre classification, Depecker et al (2000) distinguent trois types basiques d'outils d'aide à la conception architecturale :

- **Règles expertes (savoir-faire)** : ce sont des connaissances développées par des experts et des chercheurs spécialisés, sous forme simplifiée, telles que les règles de choix ou les règles de tendance de comportements.
- **Codes simplifiés** : il s'agit des codes de calcul obtenus à partir des modèles physiques simplifiés, permettant de fournir des résultats précis. Ils sont caractérisés par leur processus interactif, la rapidité des calculs et leurs interfaces simplifiées.
- **Codes spécialisés** : ils sont basés sur des modèles physiques sophistiqués et très précis issus de la recherche scientifique. Leur interface n'est pas toujours conviviale en plus leur utilisation nécessite des connaissances approfondies de différents phénomènes liés au bâtiment (thermique, lumineux ou de la dynamique des fluides).

D'autre part, Chaabouni et al (2009) ont établi une classification basée sur l'orientation de ces outils et proposent à cet effet cinq classes d'outils :

- **Les outils orientés intentions** : utilisent la simulation inverse afin d'identifier des solutions possibles pour satisfaire les intentions du concepteur.
- **Les outils orientés références** : ils permettent basés sur la manipulation d'images références qui permet aux concepteurs de concevoir des effets spécifiques (lumineux, tectoniques, constructifs, etc.). Ils sont particulièrement utiles dans les premières étapes de la conception car ils offrent aux concepteurs la possibilité d'explorer différentes solutions possibles.
- **Les outils orientés connaissances** : ils sont basés sur la présentation des informations textuelles et des références visuelles dans l'objectif d'aider le concepteur à identifier des solutions adaptées. Ce type d'outil est principalement destiné à la pédagogie et à l'acquisition des connaissances.
- **Les outils orientés performance** : utilisés pour évaluer les performances des choix effectués par les concepteurs à l'aide de paramètres quantifiables, permettant ainsi d'améliorer leurs compétences. Il existe trois types d'outils orientés performances :
  - **Calculs simplifiés** : ils permettent de comparer des hypothèses de conception sans avoir à maîtriser l'ensemble des connaissances nécessaires pour le fonctionnement de l'outil ni de créer un modèle détaillé du projet. Les résultats sont sous forme numérique, tabulaire ou graphique. Ces outils ne produisent pas d'images permettant aux concepteurs une visualisation des résultats dans l'espace projeté et une évaluation de la qualité globale. Cependant l'obtention des résultats est simple et rapide.

- **Simulation analogique** : elle permet d'évaluer les performances des choix de conception à l'aide d'une maquette. Elle permet également aux concepteurs de matérialiser et de tester rapidement, sur la maquette, les différents variables. En revanche ces outils demandent plus de temps et plus de rigueur notamment dans la méthodologie et la fabrication de la maquette.
- **Simulation numérique** : fait partie des codes spécialisés, elle permet d'évaluer les performances des bâtiments en utilisant un modèle virtuel. Elle permet également de réaliser des études paramétriques plus complètes que la simulation analogique. La simulation numérique est rarement utilisée par les architectes. Selon Depecker, et al (2000) ceci est principalement dû au fait que les architectes pensent qu'il est possible de résoudre les problèmes thermiques, lumineux ou de la ventilation, par l'utilisation des systèmes actifs (climatisation, éclairage artificielle, chauffage, ventilation mécanique). De plus, ils ne considèrent pas la dimension énergétique comme paramètre de conception architecturale. D'autre part, la simulation numérique possède des interfaces généralement complexes et peu conviviales pour les architectes et exige des connaissances approfondies des différents phénomènes et nécessite également un temps d'apprentissage relativement long (Dubois, 2014).
- **Les outils hybrides** : ils rassemblent les propriétés des trois outils précédents ayant pour objectif l'identification d'une solution et l'évaluation de ses performances. Ces outils se présentent généralement sous forme de manuel très volumineux (des centaines de pages) contenant beaucoup d'informations, d'illustrations et de méthodes. Les concepteurs doivent donc consacrer beaucoup de temps pour se familiariser avec toutes ces informations, identifier les solutions possibles et les outils d'évaluation appropriés. Cela semble contredire l'objectif principal des outils d'aide à la conception (Dubois, 2014).

## 6.2.2 Cas des protections solaires

Nous présentons ci-dessous quelques exemples d'outil d'aide à la conception développés dans la littérature notamment dans le domaine de l'ensoleillement (Dubois, 2014; Houpert, 2003). Par ailleurs, nous précisons que cette liste n'est pas exhaustive. D'autres outils pourront être identifiés à travers des études plus approfondie.

### 6.2.2.1 SOLIMAC

Développé par Daniel Siret dans le cadre de sa thèse de doctorat (Siret, 1997), SOLIMAC est un logiciel de simulation inverse traitant les contraintes solaires (que le soleil soit visible ou non) (Figure 93). Il est considéré comme un outil d'aide à la conception de la catégorie orienté *Intention*. Il propose de calculer des volumes de contrainte solaire appelés "*pyramides complexes d'ensevelissement*" et déterminer une solution à partir d'une intention ou un objectif prédéfini (Siret, 1997). SOLIMAC permet donc de dimensionner les ouvertures et les protections solaires à partir des intentions fixées par le concepteur.

Selon Houpert, la contrainte de la *pyramide complexe d'ensevelissement* de la surface S durant la période solaire T, se traduit par des ombres, dans le cas de dimensionnement d'une protection solaire, ou taches solaires dans le cas de dimensionnement des ouvertures (Houpert, 2003).

SOLIMAC ne considère que l'ensevelissement et ne permet pas de traiter plusieurs critères simultanément ni d'explorer ou de comparer plusieurs solutions. Il considère que les solutions résultantes sont optimales par rapport aux intentions définies par l'utilisateur. De plus, cet outil vise à trouver une solution qui répond uniquement aux intentions du concepteur sans tenir compte de leur impact sur les conditions thermiques et lumineuses à l'intérieur de l'espace.

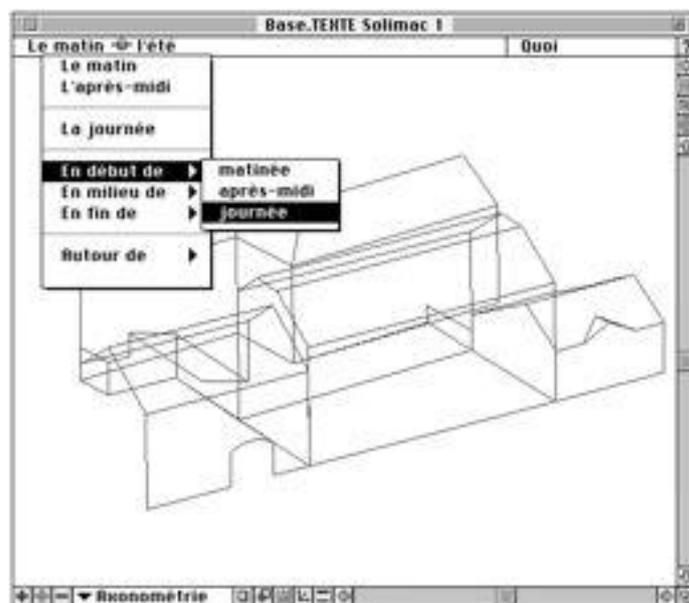


Figure 93 : Vue du logiciel SOLIMAC (Siret, 1997)

### 6.2.2.2 Le logiciel Réflexions solaires et visuelles SVR

Le logiciel SVR, fait partie de la catégorie des outils d'aide à la conception orientés *Intentions*. Il a été développé par Houpert (2003), dans le cadre de la simulation inverse de l'ensoleillement en continuité avec les travaux de Daniel Siret (Siret, 1997). Ce logiciel prend en considération les contraintes solaires et visuelles dans une même interface (Figure 94).

Cet outil resté dans le stade d'un prototype expérimental. Comme pour le logiciel SOLIMAC, celui-ci se limite à définir des solutions susceptibles de répondre aux intentions du concepteur tout en négligeant l'effet de ces solutions sur les performances des bâtiments.



Figure 94 : Interface du prototype de logiciel Réflexions solaires et visuelles (SVR) (Houpert, 2003)

### 6.2.2.3 Daylight Design Variation Book

Daylight Design Variation Book est un outil d'aide à la conception de l'éclairage de la catégorie orientée "Références" (TNO-TUE Centre for Building Research, 2000). Il se présente sous forme d'un site Internet permettant aux concepteurs d'étudier plusieurs types d'ouvertures, et de comparer, selon les indicateurs de performance, chaque deux types

d'ouvertures (Dubois, 2014). Cet outil permet donc aux concepteurs d'approfondir leurs connaissances sur l'éclairage naturel. En revanche, il ne permet pas la compréhension des stratégies passives (Dubois, 2014). Les images dominent à la fois la navigation et la présentation de résultats, tandis que les informations textuelles sont absolument minimales (Figure 95).



Figure 95 : L'interface de l'outil Daylight Design Variation Book

#### 6.2.2.4 Les feuilles de calculs LUMcalcul

LUMcalcul est un outil de calculs simplifiés, développé sous forme de feuille de calcul EXCEL. C'est un outil d'aide à la conception de l'éclairage naturel (Demers & Potvin, 2004). LUMcalcul s'inspire spécifiquement de la méthode *LT* (*light thermal method*) développée par Baker et al (Baker, et al., 1995; Baker & Steemers, 1996). L'utilisateur introduit un certain nombre de données relatives au lieu (la latitude) aux surfaces vitrées (orientation, dimensions, inclinaison et la transmittance) et aux surfaces opaques (orientation, dimensions et réflectance). LUMcalcul gère automatiquement ces données pour calculer le facteur de lumière du jour (FLJ). Une progression à rebours est possible par l'introduction d'un FLJ cible pour définir les dimensions et l'orientation des ouvertures pour atteindre cet objectif (Figure 96). L'obtention des résultats dans LUMcalcul est simple et rapide. En revanche, il ne génère pas d'images permettant au concepteur la visualisation des résultats (Dubois, 2014).

Par ailleurs, une validation effectuée, à travers la comparaison entre les résultats obtenus avec LUMcalcul et ceux issus des expérimentations réalisées en ciel artificiel, a montré un écart d'environ 3% entre ces résultats (Demers & Potvin, 2004).



Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels  
École d'architecture

# LUMcalcul 2.08©

Prédiction de la lumière naturelle  
pour les étapes conceptuelles du design architectural

Cette feuille de calcul du Facteur Lumière du Jour a été élaborée par Claude MH Demers à partir des équations de David Loe publiées dans "The design of lighting" (1988), E&F Spon, London and New York. Elle est distribuée à titre didactif. Lorsque pertinent, des références de G.Z. Brown et M. De Kay de "Sun, wind and light" (2002), John Wiley and Sons, N.Y., 2002, sont ajoutées pour expliciter certaines données ou résultats.  
Pour toute suggestion visant son amélioration, n'hésitez pas à contacter l'auteur: [claudio.demers@arc.ulaval.ca](mailto:claudio.demers@arc.ulaval.ca)

## Identification du projet

Localisation: latitude   
Particularité environnementale   
Espace spécifique étudié

### Symboles

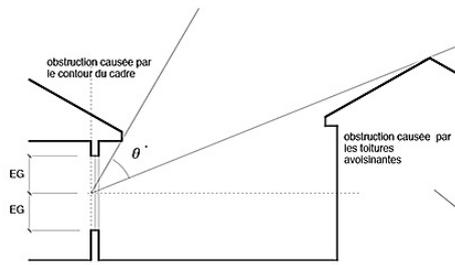
- Un commentaire est ajouté aux cases marquées d'un triangle rouge
- Ces cases doivent obligatoirement être remplies ou mises à jour.
- Cases utilisées pour des éléments aux caractéristiques différentes d'une même variable.
- Cases sont activées d'un menu déroulant. Veuillez sélectionner l'élément de votre choix.

## 1. Description des surfaces

### Transparence (fenêtres et ouvertures sur l'extérieur)

Description des surfaces transparentes selon l'orientation

	Éclairage latéral: surfaces transparentes selon l'orientation			
	Nord	Sud	Est	Ouest
1. Largeur (m)	0,00	4,00	0,00	0,00
Hauteur (m)	0,00	4,00	0,00	0,00
Superficie (m2)	0,00	16,00	0,00	0,00
Transmittance	0,70	0,70	0,70	0,70
Réflectance	0,10	0,10	0,10	0,10
Inclinaison	vertical	vertical	vertical	vertical
Angle ciel visible (°)	90	90	90	90
2. Largeur (m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Hauteur (m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Superficie (m2)	0,00	0,00	0,00	0,00
Transmittance	0,00	0,00	0,00	0,00
Réflectance	0,00	0,00	0,00	0,00
Inclinaison	vertical	vertical	vertical	vertical
Angle ciel visible (°)	0	0	0	0
Aires totales (m2)	0,00	16,00	0,00	0,00



	Éclairage zénithal: puits de lumière	
	type 1	type 2
Longueur (m)	0,00	0,00
Largeur/Hauteur (m)	0,00	0,00
Superficie (m2)	0,00	0,00
Transmittance	0,70	0,70
Réflectance	0,10	0,10
Inclinaison	horizontale	horizontale
Angle, ciel visible (°)	180	180

### Surfaces opaques (murs, plafonds, planchers)

Description des surfaces opaques selon l'orientation.

	Surfaces verticales (incluant les ouvertures)			
	Nord	Sud	Est	Ouest
1. Largeur (m)	4,00	4,00	4,00	4,00
Hauteur (m)	4,00	4,00	4,00	4,00
Superficie (m2)	16,00	16,00	16,00	16,00
Réflectance	0,80	0,80	0,80	0,80
2. Largeur (m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Hauteur (m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Superficie (m2)	0,00	0,00	0,00	0,00
Réflectance	0,00	0,00	0,00	0,00
Aires totales (m2)	16,00	16,00	16,00	16,00
Opacités (m2)	16,00	0,00	16,00	16,00

	Surfaces horizontales (incluant les ouvertures)	
	Plancher	Plafond
1. Largeur (m)	4,00	4,00
Longueur (m)	4,00	4,00
Superficie (m2)	16,00	16,00
Réflectance	0,80	0,80
2. Largeur (m)	0,00	0,00
Longueur (m)	0,00	0,00
Superficie (m2)	0,00	0,00
Réflectance	0,00	0,00
Aire totale par orientation (m2)	16,00	16,00
Aire des opacités par orientation (m2)	16,00	16,00

## 2. Variables utilisées dans le calcul du Facteur lumière du jour (FLJ) moyen

Aire majorée des éléments de transparence   $A_g$   
 Éclairage latéral (m2)   
 Éclairage zénithal (m2)   
 Latéral+zénithal (m2)   
 Obstructions par cadre et membrures    
 Aire totale des surfaces de l'espace (m2)   $A$   
 Rapport aires verre zénithal/latéral  %  
 Volume total de l'espace  m3  
 Rapport transparence/volume de l'espace   
 Angle ciel visible moyen (°)   $\theta$   
 Réflectance moyenne des surfaces de l'espace   $\rho$   
 Surfaces verticales: Nord   
 64,00 m2: Sud   
 Est   
 Ouest   
 Surfaces horizontales: plafond   
 plancher   
 Transmittance résultante du verre   $\tau$   
 Transmittance moyenne du verre   
 Facteur d'entretien

$$\bar{D} = \frac{A_g \theta \tau}{A (1 - \rho_2)}$$

Equation du FLJ (De Tregenza & Loe)

## 3. Facteur lumière du jour (FLJ) résultant

Condition ACTUELLE calculée

Facteur lumière du jour moyen  %

Attention: les gains thermiques pourraient être élevés.

L'éclairage de cet espace serait qualifié de brillant  
 La contribution à l'éclairage naturel serait très bonne  
 En principe, un éclairage électrique ne serait pas nécessaire

Pourcentage d'ouvertures (latéral+zénithal)  %  
 Pourcentage d'ouvertures (latéral seulement)  %

Condition ALTERNATIVE

Calcul de la surface vitrée nécessaire à l'obtention d'un FLJ souhaité  %  
 FLJ souhaité  %

Aire d'ouvertures requise pour l'obtention du FLJ souhaité  m2  
 Pourcentage d'ouvertures (toutes surfaces)  %

Pourcentage de vitrage (assumant une seule façade vitrée). Choisir l'orientation:

Nord	Sud	Est	Ouest
0,32%	0,32%	0,32%	0,32%

Figure 96 : Exemple de feuille d'entrée des données LUMcalcul (Demers & Potvin, 2004)

### 6.2.2.5 L'héliodon

L'héliodon est un outil d'aide à la conception basé sur la simulation analogique, utilisé pour la simulation de l'éclairage et de l'ensoleillement moyennant une maquette. Il permet de reproduire les conditions d'ensoleillement direct à différents moments de la journée et de l'année (Dubois, 2014). L'héliodon est composé de deux axes de rotation avec une lampe représentant le soleil, les rotations de la table, sur laquelle est placée une maquette, simulent les trajectoires solaires pour une latitude et une journée données (Figure 97) (Beckers, 2011).

L'avantage majeur de l'héliodon est sa capacité de produire des résultats quantitatifs et qualitatifs (Dubois, 2014). En revanche, la fabrication de la maquette demande plus de temps et plus de rigueur. Pour surmonter cette contrainte, des héliodons numériques ont été développés et intégrés dans plusieurs logiciels de modélisation 3D tel que Heliodon 2 développé par Beckers et Masset (2011). Les héliodons numériques, ne nécessite pas la création de maquette permettant au concepteur de gagner du temps.



Figure 97 :L'héliodon

### 6.2.2.6 Autodesk *Ecotect Analysis*

Autodesk Ecotect Analysis est un outil d'aide à la conception basé sur la simulation numérique, développé par Andrew Marsh, compatible avec plusieurs outils de CAO, permettant de créer un modèle 3D utilisé simultanément pour la conception et l'exécution des

simulations telle que l'analyse énergétique, l'évaluation des performances thermiques, l'éclairage naturel, analyse acoustique etc. (Dubois, 2014). Ecotect est un outil très complexe qui nécessite une formation d'apprentissage pour sa prise en main et le maîtriser et comprendre son contenu et les résultats obtenus (Fernandez, 2010).

Les résultats présentés sous forme d'indices, bilans, graphes et schémas sont utilisés dans les analyses quantitatives tandis que les projections d'ombrage, les rendus et les photos réalistes sont plutôt adaptés aux analyses qualitatives (Dubois, 2014). Autodesk Ecotect Analysis est plutôt adapté à des phases avancées de la conception, il demande beaucoup de temps ainsi que la maîtrise des différents phénomènes relatifs aux questions environnementales (Fernandez, 2010).

### **6.2.2.7 Sun Wind & Light**

Le manuel Sun Wind & Light est un outil d'aide à la conception faisant partie de la catégorie hybride écrit par G.Z Brown et Mark DeKay (Brown & DeKay, 2000) et soulignant l'importance de prendre en considération l'environnement naturel dans la conception architecturale. Il fournit des stratégies passives pour la conception de bâtiments durables et économes en énergie, tout en mettant l'accent sur l'utilisation des ressources naturelles telles que le rayonnement solaire, la lumière naturelle, le vent etc. Ce manuel couvre plusieurs domaines notamment la conception solaire passive, la ventilation naturelle, l'éclairage naturel, les stratégies de protection solaire et les systèmes d'énergie renouvelable. Il présente, à travers les textes et les illustrations, des méthodes de calculs simplifiés et abaques que le concepteur peut utiliser aux différents échelles et phases de conception pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'impact environnemental (Figure 98).

Dans l'ensemble, le manuel "Sun Wind & Light" est une ressource inestimable pour les architectes, les ingénieurs et les concepteurs. Cependant sa limite se situe au niveau du nombre important de pages ce qui requière beaucoup de temps pour se familiariser avec son contenu.

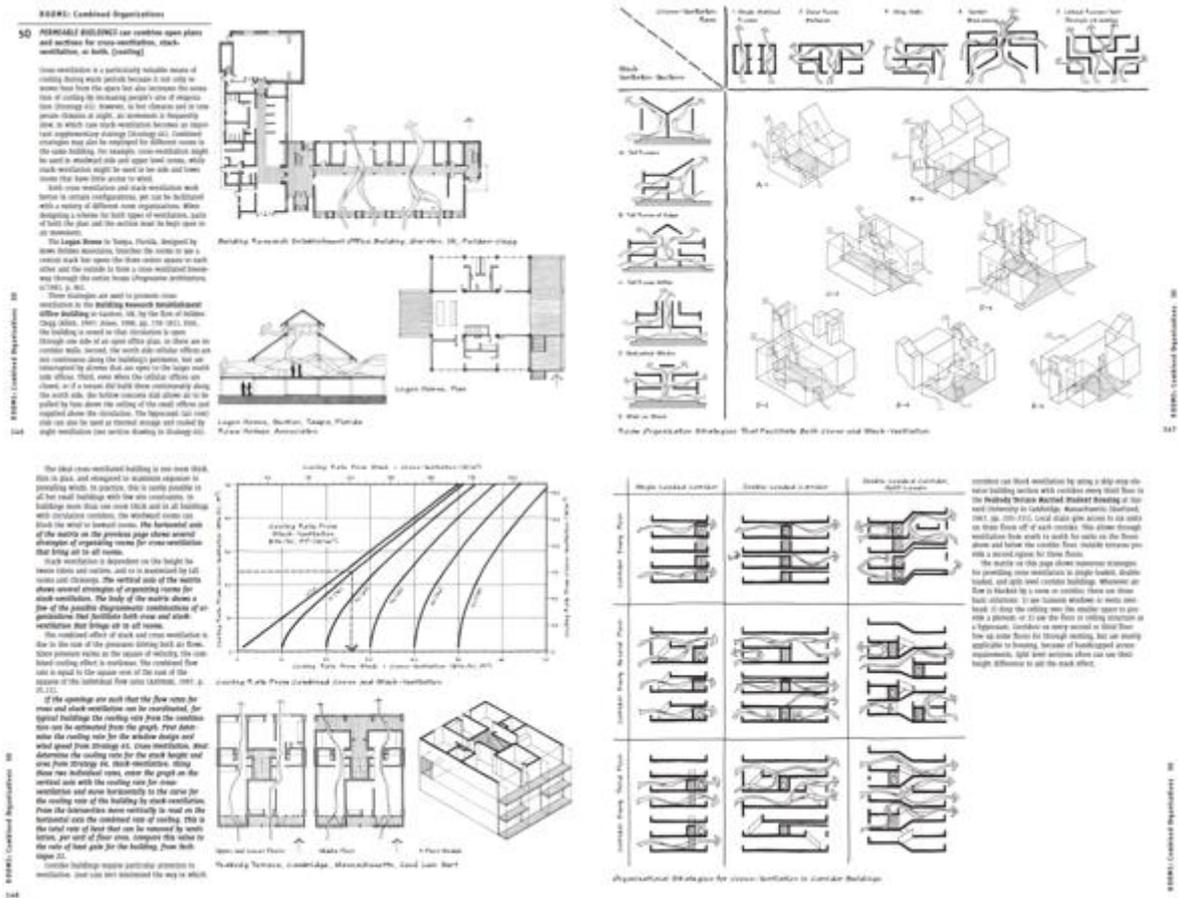


Figure 98 : Extrait du manuel Sun Wind & Light (Brown & DeKay, 2000)

### 6.2.2.8 Le logiciel TRNSHD

TRNSHD est un outil de simulation développé par le laboratoire d'énergie solaire (SEL) à l'Université de Wisconsin-Madison (Hiller, et al., 2000) pour les simulations de bâtiments avec TRNSYS. Il permet de dimensionner les protections solaires externes et de calculer les périodes d'ensoleillement et la distribution du rayonnement solaire. Ce programme a l'avantage de pouvoir gérer plusieurs formes, cependant les protections solaires ne sont calculées que pour le cas des éléments attachés à la façade (Houpert, 2003).

### 6.2.2.9 Le logiciel SHADESIGN

SHADESIGN est un outil d'aide à la conception des protections solaire développé par Francisco Arumi-Noé qui propose un algorithme capable de générer des brise-soleil en forme d'entonnoir (funnel surface) (Arumi-Noé, 1996). Étant donné qu'il est nécessaire de protéger une fenêtre du soleil d'été et également de l'exposer au soleil d'hiver, cet algorithme a été

développé pour concevoir automatiquement une forme géométrique qui satisfait aux deux exigences et présentant la solution minimale aux exigences simultanées. La fenêtre peut être décrite par un polygone convexe arbitraire et elle peut être orientée dans n'importe quelle direction, et elle peut être placée à n'importe quelle latitude choisie. L'algorithme se compose de deux étapes séquentielles : d'abord pour trouver une surface d'entonnoir solaire d'hiver ; et le second pour couper la surface soumise aux conditions de protection estivales (Arumi-Noé, 1996).

L'interface du logiciel est composée de deux parties ; celle à droite est consacrée aux données dans un format "cadran" (le cadran supérieur pour définir les jours d'été et d'hiver et le cadran inférieur pour choisir l'orientation de la fenêtre) (Figure 99).

La limite de ce programme se situe principalement au niveau de la forme des protections solaires. Les formes générées sont difficilement exploitables en architecture et se limitent au cas d'un auvent accolé à la façade. D'autre part, les jours de conception correspondant à la protection et l'ensoleillement sont définis par le concepteur. Cela veut dire que la fiabilité des résultats dépend des données introduites par le concepteur. De plus cet outil ne permet pas d'évaluer l'efficacité (thermique énergétique ...) des protections solaires générées.

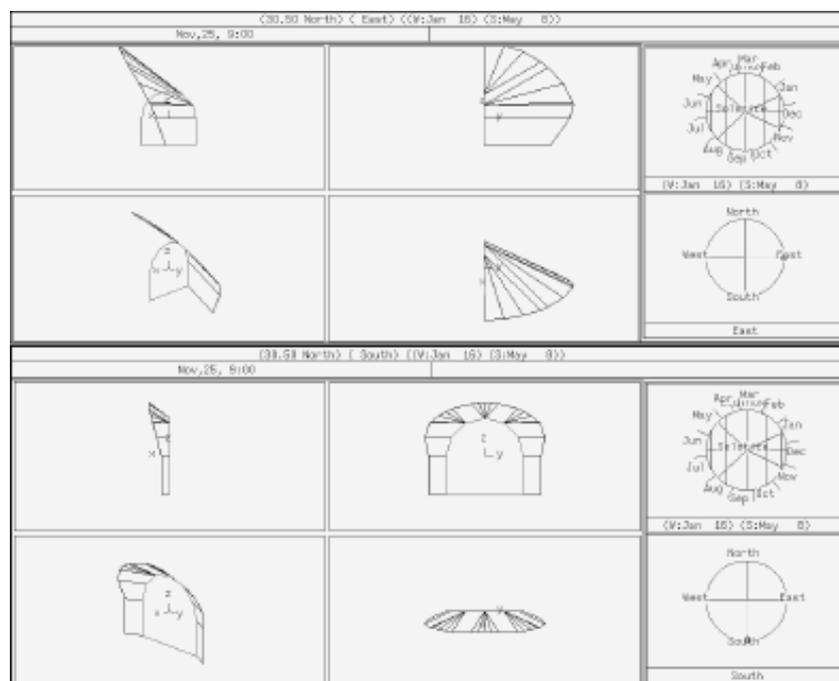


Figure 99 : L'interface du programme SHADESIGN

### 6.2.2.10 Le logiciel WINSHADE

WINSHADE est un outil d'aide pour la conception du contrôle solaire développé par l'Université du Queensland (Australie) et présenté par Chitrarekha Kabre (Kabre, 1999). Il utilise l'interface du logiciel *AutoCAD*. WINSHADE comporte trois modules correspondant à l'analyse climatique, la génération et l'optimisation des protections solaires (Houpert, 2003). L'utilisateur introduit les données relatives au lieu (la latitude et la longitude), et à la fenêtre à protéger (l'orientation et dimensions) (Figure 100). L'outil génère et optimise, par la suite, la protection solaire en se basant sur l'analyse climatique du lieu considéré.

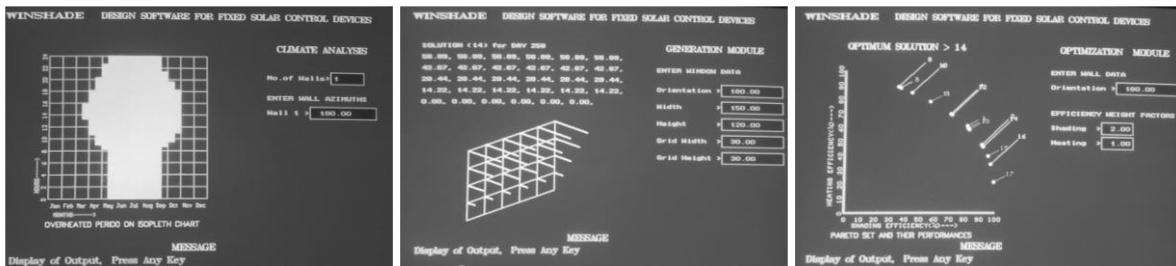


Figure 100 : Les différents modules du programme WINSHAD. De gauche à droite : Le module d'analyse climatique, le module de génération et le module de l'optimisation (Kabre, 1999)

WINSHADE présente toutefois certaines limites. Il génère une seule configuration géométrique des protections constituée de deux éléments latéraux verticaux et d'un auvent oblique (Figure 101). D'autre part il ne prend en considération que des fenêtres rectangulaires positionnées sur un plan vertical. De plus, sa base de données climatique se limite à trois pays ; l'Inde, l'Australie et Singapour (Houpert, 2003).

Il est à noter également que cet outil ne prend pas en considération l'effet des protections solaires générées sur la consommation énergétique et l'éclairage naturel, considérant un seul critère, celui de la performance thermique.

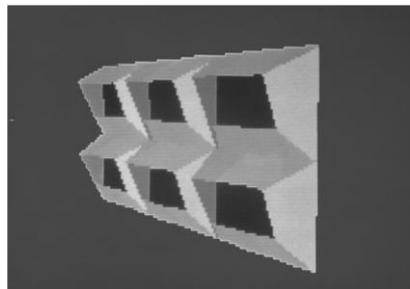


Figure 101 : Visualisation des résultats sur AutoCAD (Kabre, 1999)

### 6.3 Conclusion

Nous avons abordé dans la première partie de ce chapitre le problème de la décision devant une série d'alternatives. Ce type de problème, dit multicritère, est généralement posé par rapport à la conception architecturale, notamment durant la phase d'avant-projet. Pour le résoudre plusieurs méthodes d'analyse ont été développées en se basant sur différentes approches (Approche du critère unique de synthèse, approche de sur-classement, approche interactive, théorie de l'utilité multi-attributs ...). Vincke (1989) précise qu'*il n'existe pas de méthode idéale et qu'il n'en existera jamais étant donné le caractère mathématiquement mal posé des problèmes multicritères. On ne peut rendre cohérent un problème qui ne l'est pas par nature.* Nous pouvons donc affirmer que le choix de la méthode d'analyse dépend essentiellement de la nature du problème.

Nous avons également mis en évidence les différentes méthodes d'analyse multicritère notamment celles basées sur l'approche de sur-classement, qui est la plus adaptée à la conception architecturale. Les méthodes les plus utilisées dans ce domaine sont la méthode ELECTRE (De Castro, 2005) et la méthode PROMETHEE (Wu & Abdul-Nour, 2020). Nous les avons présentées en détail en soulignant les principes, les méthodes de calcul et les techniques utilisées pour chacune d'elles.

Considérant que ces méthodes sont très compliquées et exigeant la compréhension des différentes équations, nous envisageons de les intégrer, sous forme de module, dans l'outil d'aide à la conception proposé. A cet effet le concepteur n'aura pas besoin de les connaître ni de les maîtriser.

Dans le chapitre suivant nous présentons en détails le cahier des charges pour l'élaboration de notre outil d'aide à la conception des protections solaire.

## **7 Chapitre VII : Pro-Sol un prototype d'outil d'aide à la conception des protections solaires**

### **Introduction**

**D**ans ce chapitre, nous proposons de développer un outil d'aide à la conception des protections solaires extérieures fixes que nous avons nommé "Pro-Sol". Ce programme est exécutable sur une plate-forme PC/Windows. Son élaboration est basée sur les résultats de simulation obtenus via l'étude paramétrique ainsi que l'analyse multicritère présentée dans le chapitre précédent.

L'élaboration de cet outil a pour objectif d'aider à dimensionner la protection solaire et de choisir les configurations les plus favorables par rapport aux aspects énergétique, thermique et visuel. Il est donc un outil à la fois d'aide à la conception et à la décision.

Ce chapitre constituera un cahier des charges présentant l'ensemble des éléments nécessaires pour l'élaboration de l'outil d'aide à savoir ; ces caractéristiques, le langage utilisé pour la programmation, les bases de données, les formules et équations utilisées pour le dimensionnement des protections solaires ainsi que la maquette de l'outil.

### **7.1 Caractéristiques de l'outil proposé**

Nous avons conçu notre outil d'aide que nous avons proposé a été pensé afin de répondre à une exigence fondamentale : orienter le concepteur, dès les premières phases de conception, dans le choix et le dimensionnement des protections solaires externe fixe. Afin d'atteindre cet objectif, l'outil doit répondre à un certain nombre d'exigences. Bernard PAULE (1999), dans son travail sur l'application de la logique floue à l'aide à la décision en éclairage

naturel, a synthétisé les principales caractéristiques nécessaires à un outil d'aide à la décision afin qu'il soit compris, accepté et utilisé par les architectes.

Nous avons adopté ces mêmes caractéristiques dans l'élaboration de notre outil d'aide à la conception. A cet effet, l'outil se présente sous forme informatique en répondant aux caractéristiques suivantes :

- Convivial et facile à apprendre, rapide et ayant une souplesse d'utilisation.
- Adapté à une utilisation dès les premières phases du projet.
- Présente une simplicité d'utilisation et ne nécessite aucun apprentissage. Son utilisation est instinctive et aucun manuel n'est nécessaire
- Les notions manipulées sont familières à l'architecte.
- Intelligible ; les résultats sont exprimés sous forme compréhensible généralement de type graphique (plan, élévation et axonométrie).

## **7.2 L'architecture du logiciel "Pro-Sol" d'aide à la conception des protections solaires**

L'architecture logicielle désigne la manière dont le logiciel est conçu, elle décrit les différents éléments d'une application et leurs interactions. La conception de l'architecture est une étape particulièrement cruciale du développement logiciel.

Nous présentons ci-dessous les différents éléments contribuant à la conception de l'architecture de notre outil d'aide, le langage de programmation, le diagramme de séquence, les besoins et support ainsi que la maquette informatique.

### **7.2.1 Le langage de programmation**

Afin de répondre au mieux à ces caractéristiques, nous avons choisi de programmer en "*Visual Basic*" car ce langage permet une représentation visuelle sous forme de fenêtre, forme que les utilisateurs sont habitués à utiliser.

*Visual Basic* est un « environnement de développement intégré, créé par Microsoft. Directement dérivé du BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code), il permet

un développement facile et rapide des applications. C'est l'un des langages de programmation les plus utilisés aujourd'hui ».

### 7.2.2 Diagramme de séquence (d'activité)

Pour l'élaboration du cahier des charges de l'outil, nous allons utiliser la programmation orientée objet. Pour ce faire, nous allons élaborer les différents diagrammes d'interactions UML (use case, séquences, d'état, d'activités).

Un diagramme de séquences, appelé également diagramme d'événements ou scénario d'événements, modélise le comportement d'un système. Il s'agit de la représentation graphique de l'interaction entre l'utilisateur et le système suivant un ordre chronologique dans la formulation UML (Unified Modeling Language). Il décrit donc les différentes étapes d'un processus et représente les communications avec et au sein du système.

La Figure 102 présente le diagramme de séquences établi pour notre outil d'aide. Globalement le programme est constitué de trois étapes : dimensionnement, analyse multicritère et présentation des résultats.

Dans la première étape l'utilisateur (le concepteur) introduit les données. Il s'agit de choisir une ville parmi la liste proposée, définir l'orientation de la fenêtre à protéger, les masques urbains, l'angle d'inclinaison de la façade ainsi que les dimensions de la fenêtre.

En se basant sur ces données et en utilisant, à partir de la base de données, les angles d'occultation optimum (HSA et VSA) relatifs à la ville et l'orientation choisie, le programme procédera au dimensionnement de la protection solaire. Il s'agit de calculer la profondeur à l'aide des équations présentées ci-dessous.

Dans une deuxième étape, l'utilisateur est appelé à attribuer des coefficients aux critères d'évaluation afin que le programme puisse classer les configurations géométriques en se basant sur l'analyse multicritères.

Enfin et après avoir choisi une configuration parmi celles proposées, le programme affiche les résultats concernant la profondeur des lamelles, l'espacement entre les lamelles et l'inclinaison des lamelles (Figure 103).

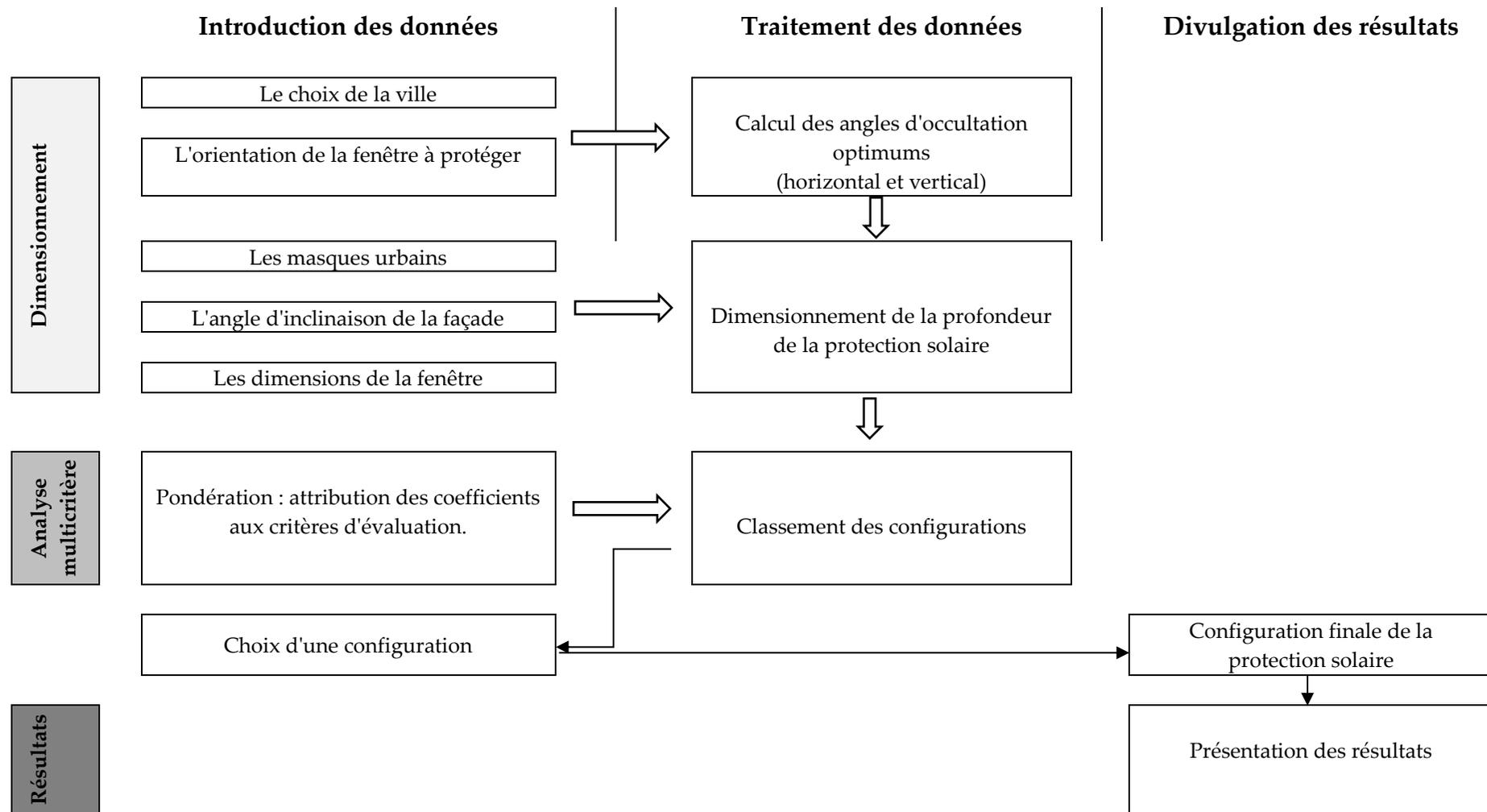


Figure 102: schématisation du diagramme de séquences de Pro-Sol

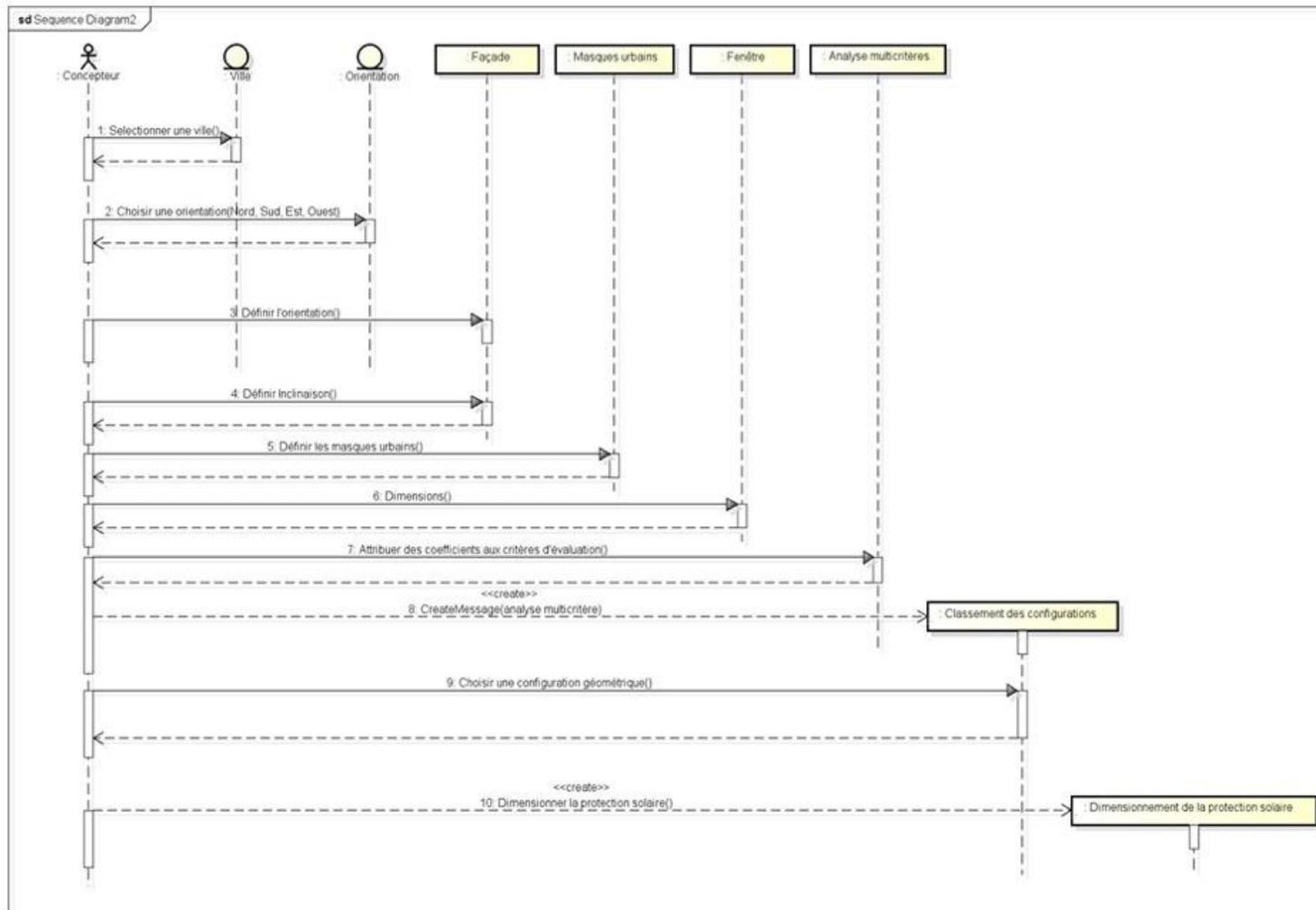


Figure 103 : Diagramme de séquences du le prototype Pro-Sol établi avec Astah\_UML

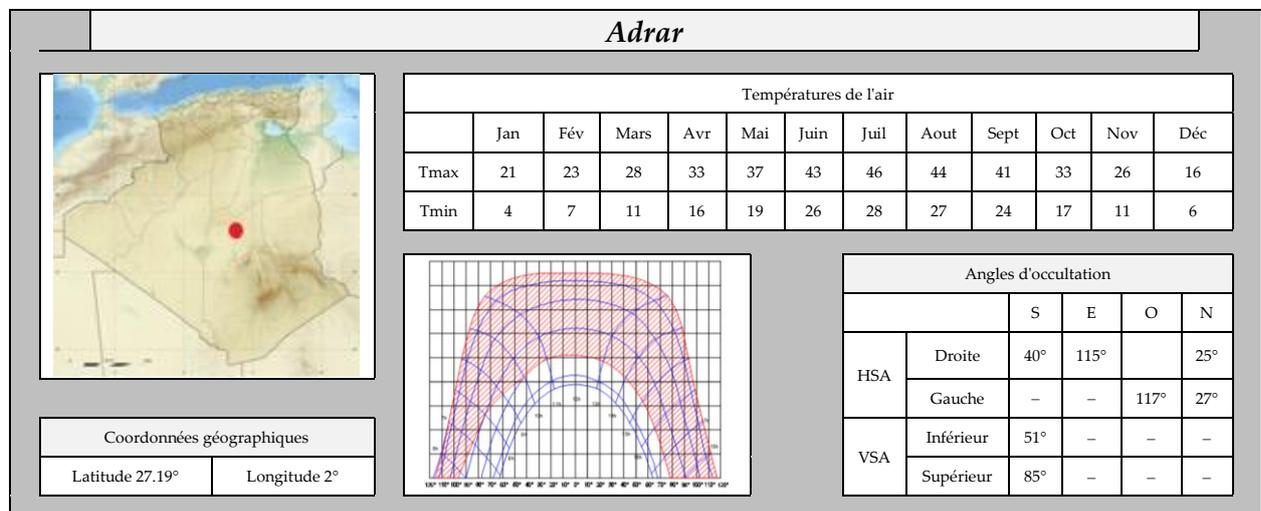
## 7.2.3 Besoins et supports

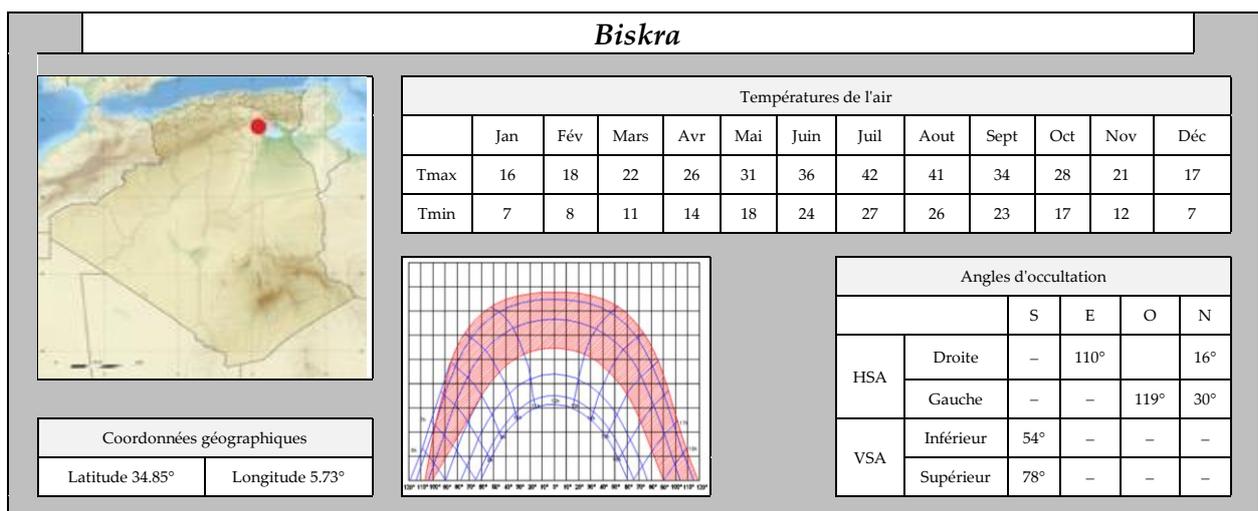
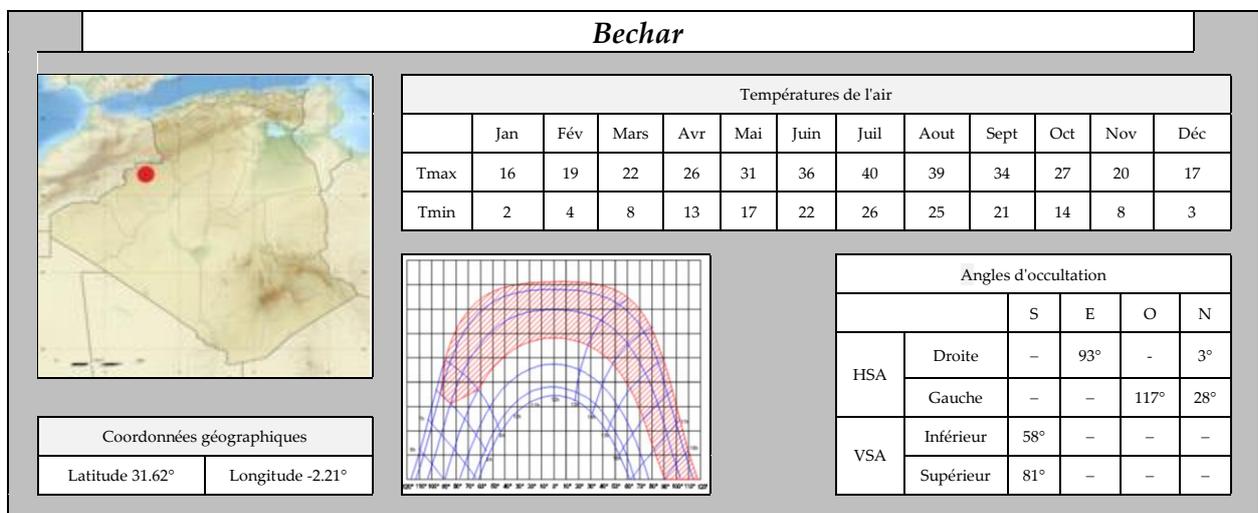
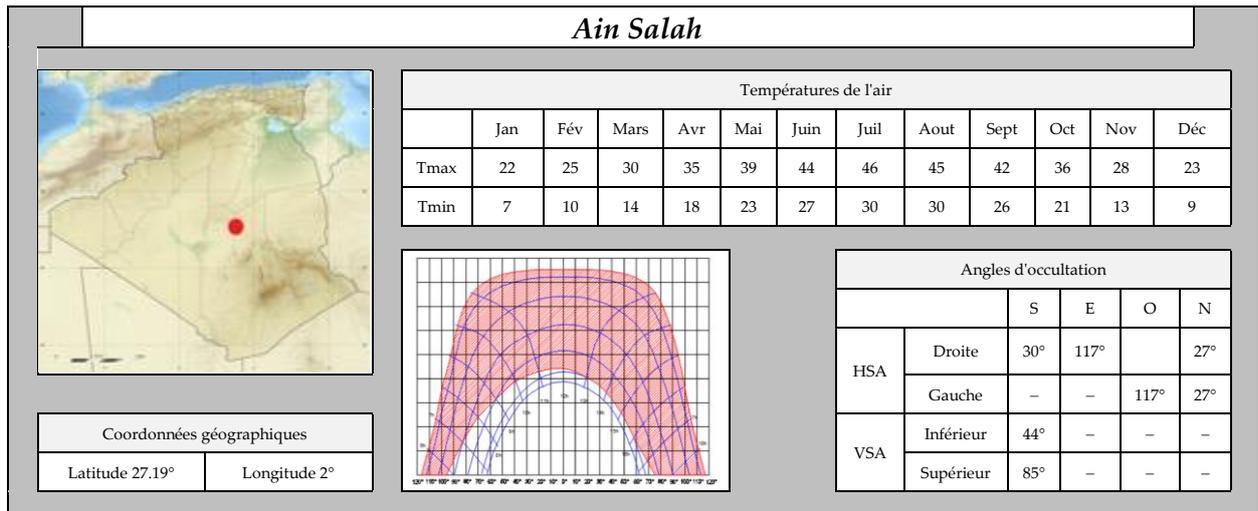
### 7.2.3.1 Base de données relative aux villes

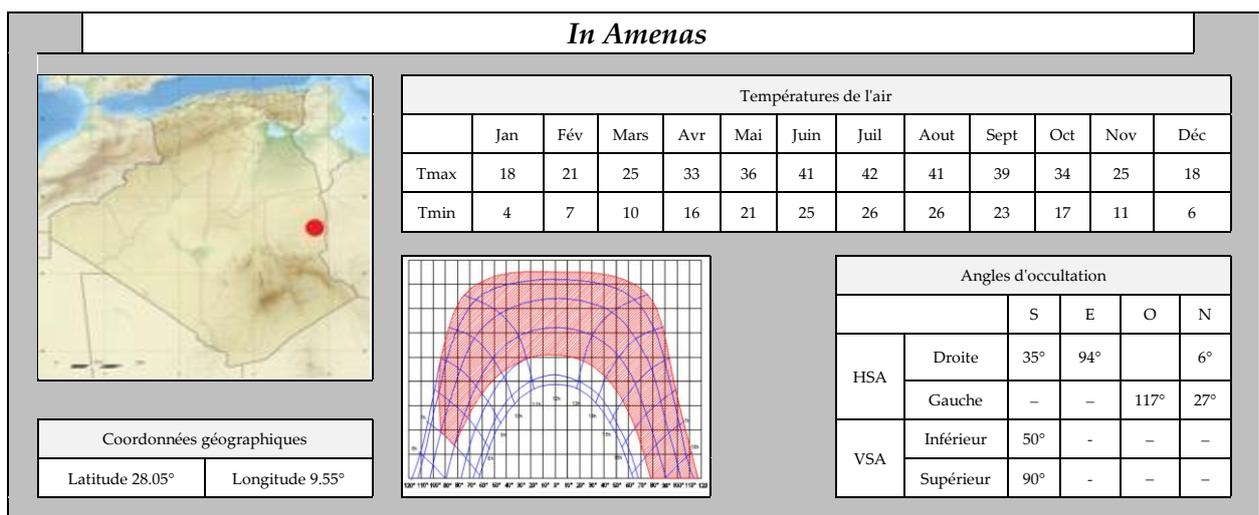
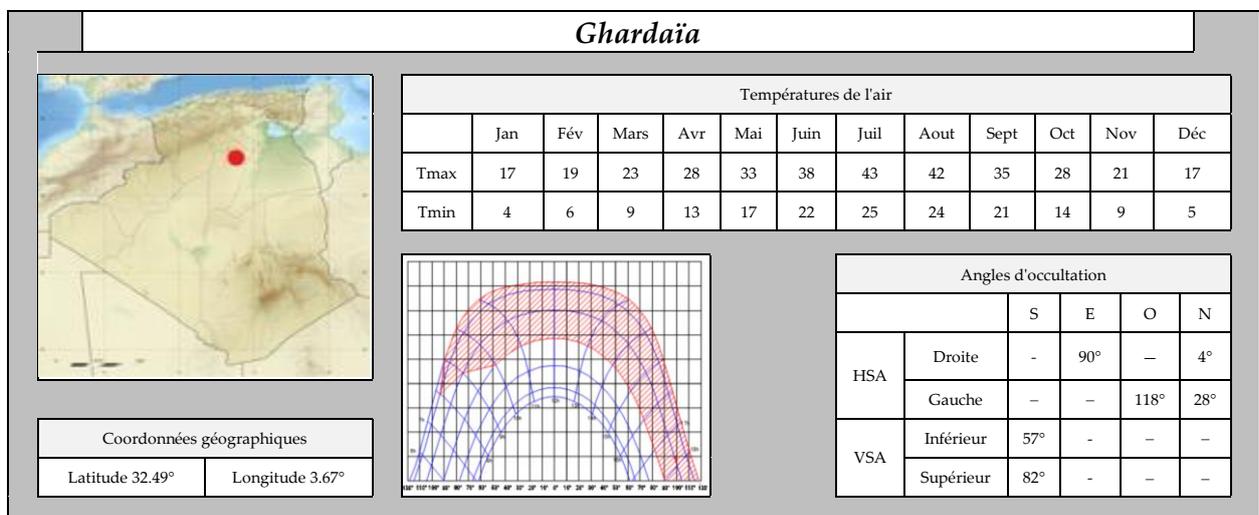
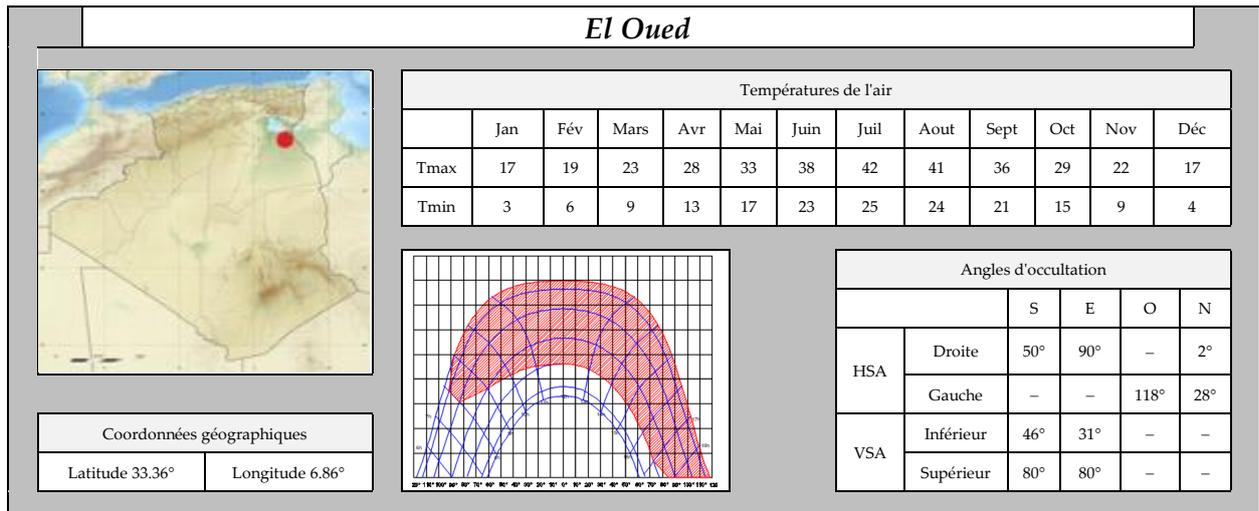
L'outil d'aide à la conception des protections solaires a été développé afin d'être utilisé par les architectes et concepteurs pour dimensionner les protections solaires dans les milieux à climat chaud. Dix villes représentatives du sud Algérien, caractérisées par leur climat chaud, ont été prises en considération dans l'élaboration de cet outil. Le choix a été effectué par rapport à leur latitude ; paramètre important dans le dimensionnement des protections solaires. Ces villes sont : Adrar, Ain Salah, Bechar, Biskra, El Oued, Ghardaïa, In Amenas, Ouargla, Tamanrasset et Tindouf.

Nous présentons ci-dessous, pour chaque ville, une fiche contenant la situation géographique, les coordonnées (latitude et longitude), les températures de l'air, le diagramme solaire ainsi que les angles d'occultation optimaux (Figure 104).

Les angles d'occultation optimaux ont été calculés, pour chaque orientation, à partir des températures de l'air et la latitude du lieu. Ils seront utilisés pour dimensionner la taille de la protection solaire.







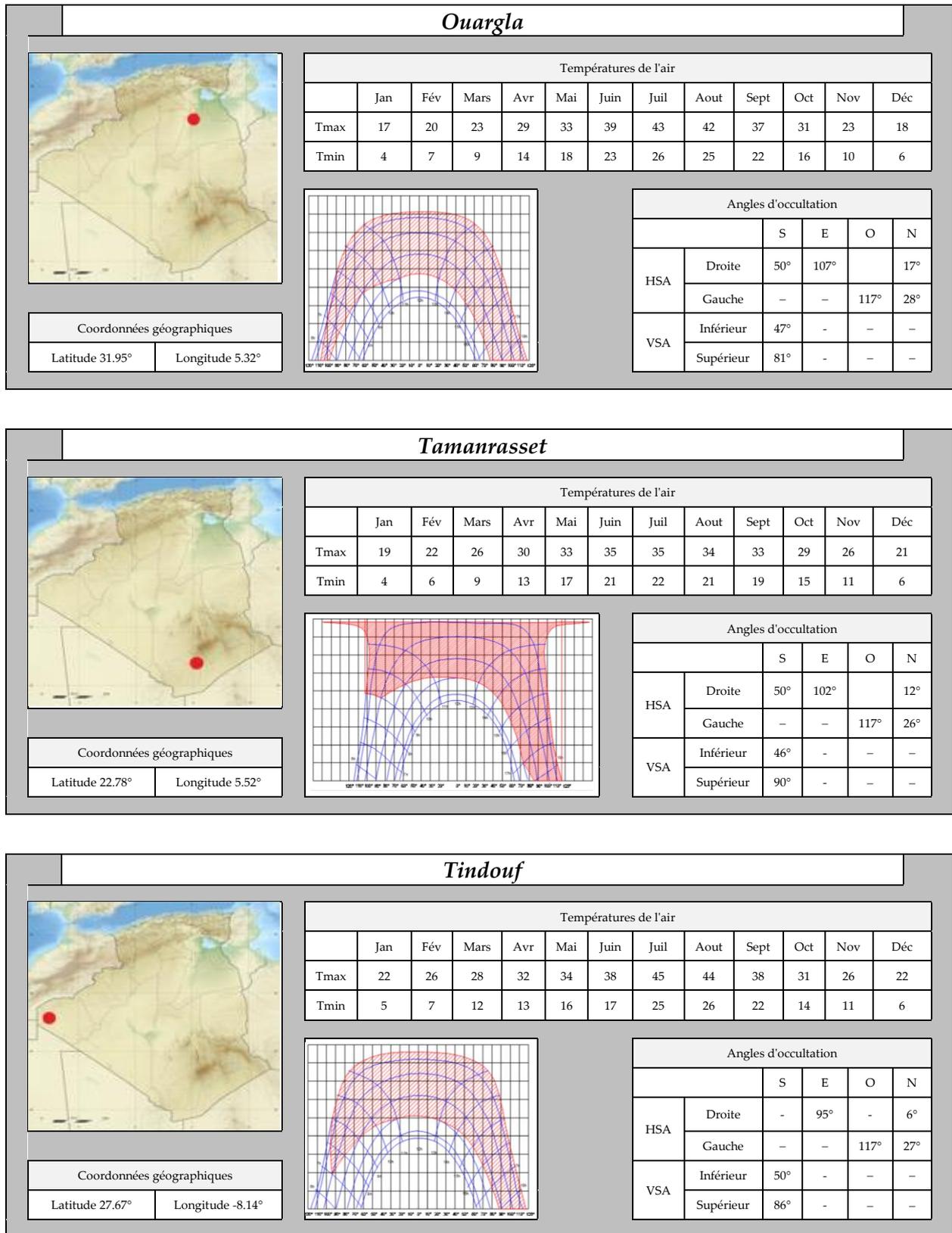


Figure 104 : Fiches techniques contenant la situation géographique, les coordonnées (latitude et longitude), les températures de l'air, le diagramme solaire et les angles d'occultation optimaux

### 7.2.3.2 Evaluation des performances

Pro-Sol a été développé dans le but d'exploiter les résultats issus de l'étude paramétrique présentée dans le Chapitre V. Cette étude nous a permis d'évaluer l'ensemble des configurations géométriques de protection solaire par rapport aux différents critères considérés. Ces résultats constituent une base de données utilisée dans l'analyse multicritère afin d'identifier les configurations les plus favorables. Notons ici que c'est le concepteur qui fixe les poids des critères (pondération) selon leur importance. Cette importance dépend notamment du type de bâtiment considéré. Dans certains bâtiments c'est la performance lumineuse qui prime, dans d'autres c'est plutôt la performance thermique ou énergétique.

### 7.2.3.3 Les équations numériques

Les équations numériques développées dans le cadre de l'élaboration de notre outil d'aide à la conception sont présentées dans l'annexe C.

## 7.2.4 Maquette informatique de "Pro-Sol"

La simple description des différentes données et des actions qui apparaîtront dans l'interface d'une application est certainement insuffisante pour établir l'application finale. La production d'une maquette des écrans s'avère nécessaire pour compléter la description des besoins. La maquette informatique, appelée aussi maquette IHM, qui désigne les Interfaces Homme/ Machine, est la représentation d'un système qui permet d'en tester et valider certains aspects ergonomiques et graphiques ainsi que le comportement (maquette fonctionnelle).

De nombreux logiciels permettent de réaliser les maquettes informatiques. Dans notre cas, nous avons utilisé le programme Balsamiq Mockups 3.5.17 (<https://balsamiq.com/wireframes/mockups3fordesktop/>).

Nous présentons dans la Figure 105 la maquette informatique IHM du logiciel Pro-Sol. Une description détaillée de la navigation et du fonctionnement du programme sera présentée dans la section suivante (7.3).

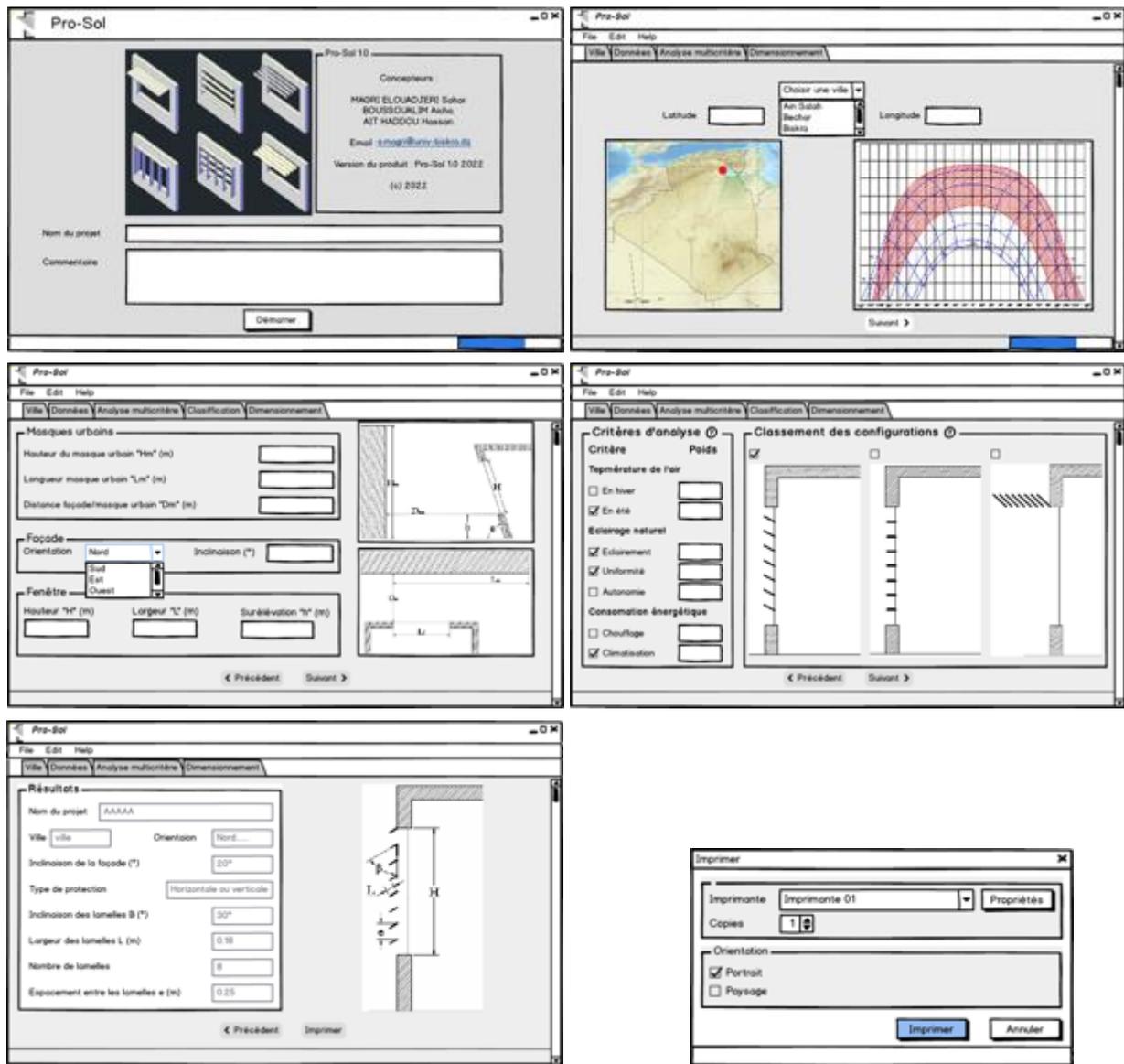


Figure 105 : Maquette informatique IHM du logiciel Pro-Sol

### 7.3 Description de la navigation et fonctionnement de Pro-Sol

La navigation dans l'outil Pro-Sol compte trois phases principales : l'introduction des données, le traitement des données et la divulgation des résultats.

L'interface graphique a été créée en utilisant Visual Basic. Elle est composée d'un écran d'accueil et d'une interface principale qui permet d'aller aux différents onglets. Nous avons quatre onglets : Ville, Données, Analyse multicritère et le dimensionnement.

### 7.3.1 Ecran d'accueil

Au lancement du programme, une fenêtre d'accueil s'ouvre (Figure 106). Elle contient le nom du logiciel, les concepteurs, ainsi que la version de l'outil. Elle contient également une case consacrée au nom du projet avec un commentaire pour le décrire. Maintenant il suffit de cliquer sur le bouton "**DEMARRER**" pour lancer le programme.

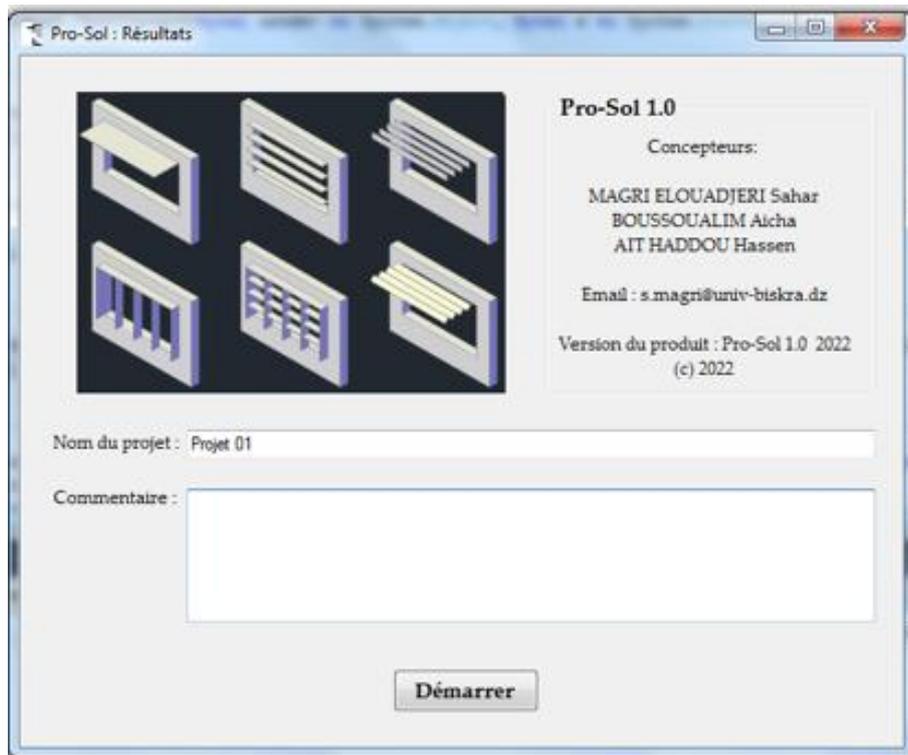


Figure 106: Ecran d'accueil du logiciel Pro-Sol

### 7.3.2 L'onglet "Ville"

Dans cet onglet l'utilisateur doit choisir la localisation de son projet. Le programme propose, dans sa version actuelle, dix villes algériennes, caractérisée par leur climat chaud et sec, et ayant des longitudes et latitudes différentes. Si la ville, dans laquelle le projet sera conçu, ne figure pas dans la liste, le concepteur choisit celle ayant la latitude la plus proche. Rappelant que des angles d'occultation (verticale et horizontale) ont été calculés pour chaque ville et seront utilisés dans le dimensionnement des protections solaires. En cliquant sur le bouton "Suivant", l'utilisateur accède à l'onglet "Données" (Figure 107).

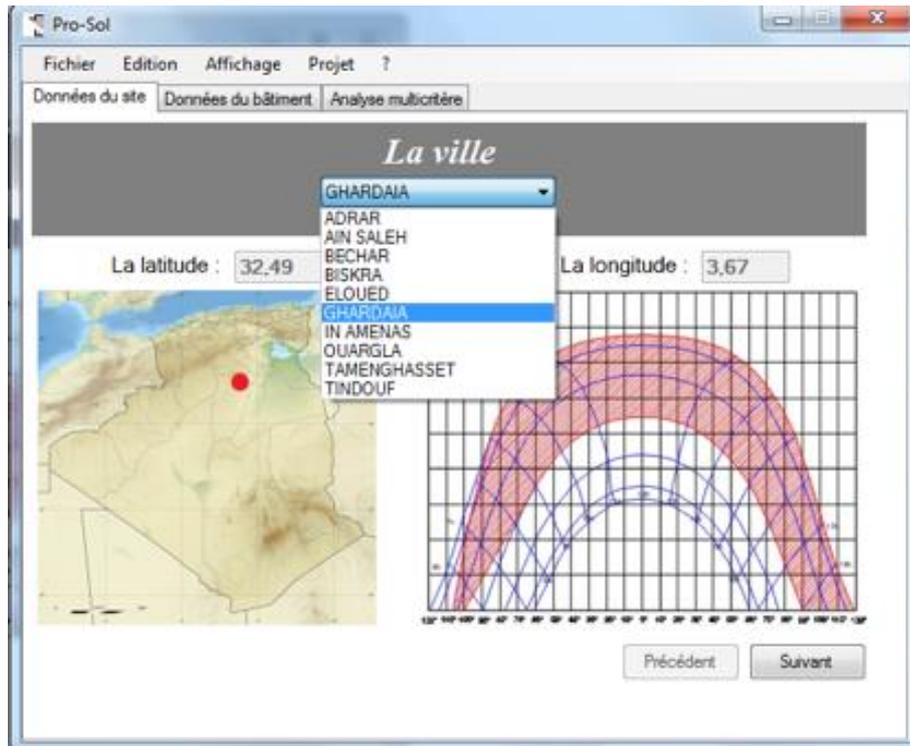


Figure 107 : L'onglet " Ville" de l'interface du logiciel Pro-Sol

### 7.3.3 L'onglet "données"

Dans cette fenêtre, l'utilisateur est invité à introduire les données d'entrée. Il s'agit des données relatives aux masques urbains (la hauteur, la longueur et la distance par rapport à la façade), à la façade (orientation et inclinaison) et à la fenêtre (largeur, hauteur et élévation) (Figure 108).

Une fois ces données sont renseignées, le concepteur peut commencer l'analyse en cliquant sur le bouton "Suivant" pour accéder à l'onglet "Analyse multicritère". Le bouton "Précédent" permet de revenir à l'onglet "Ville" et modifier les informations le cas échéant.

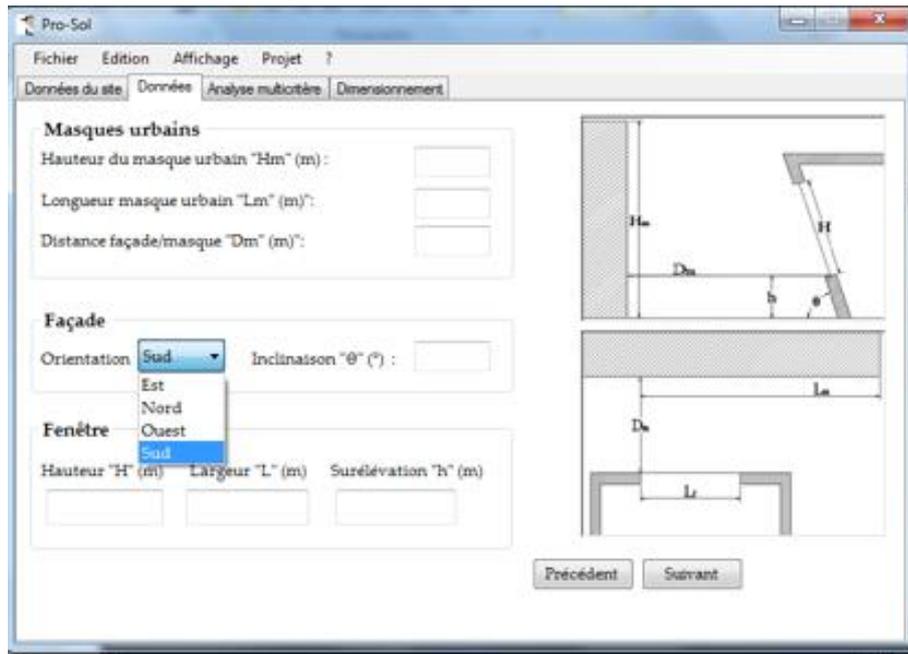


Figure 108 : Interface du logiciel Pro-Sol, l'onglet "données"

### 7.3.4 L'onglet "Analyse multicritère"

Comme il a été expliqué auparavant, ce programme est un outil d'aide basé sur l'analyse multicritère. Il s'agit de concevoir des protections solaires en tenant en considération plusieurs critères. Rappelant que l'évaluation des différentes configurations géométriques par rapport à ces critères a été déjà effectuée dans la deuxième partie de ce travail. Maintenant l'utilisateur doit choisir les critères à prendre en considération et définir leur poids (Figure 109). Ces données permettront au programme de procéder à l'analyse multicritère via la méthode *PROMETHEE* dont l'algorithme est préalablement intégré. Au fur et à mesure que ces valeurs sont choisies, apparaissent en temps réel, à droite de la fenêtre, les trois meilleures configurations géométriques parmi lesquelles l'utilisateur doit faire un choix. En cliquant sur suivant l'utilisateur accède à l'onglet "Dimensionnement".

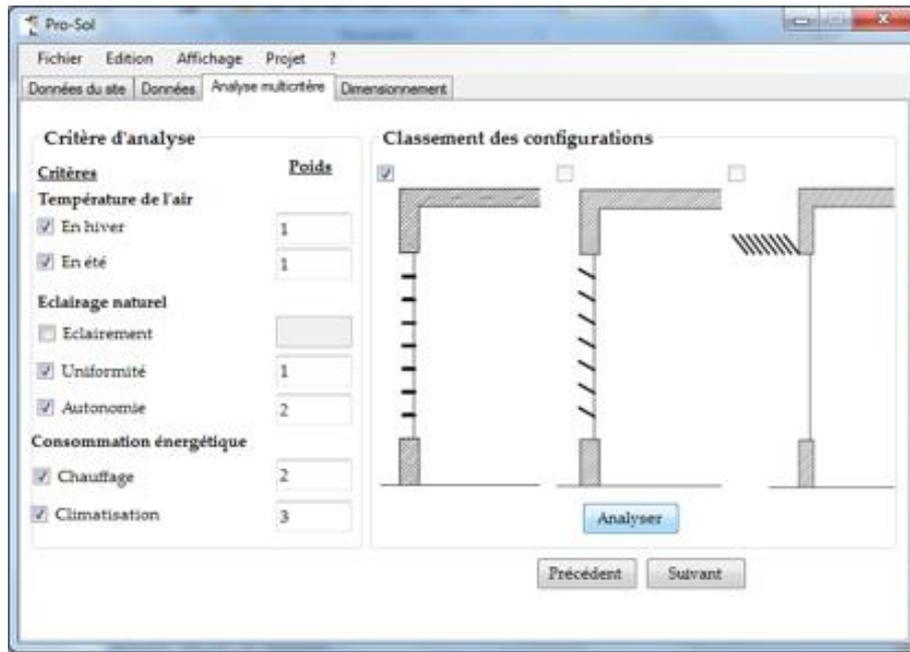


Figure 109 : Interface du logiciel Pro-Sol, l'onglet "Analyse multicritère"

### 7.3.5 L'onglet "Dimensionnement"

Une fois toutes les données introduites, le programme affiche les résultats en indiquant la profondeur des lamelles, l'espacement entre les lamelles et leur inclinaison. L'utilisateur peut imprimer ou sauvegarder ces résultats afin de les prendre en considération dans la conception de son projet (Figure 110).

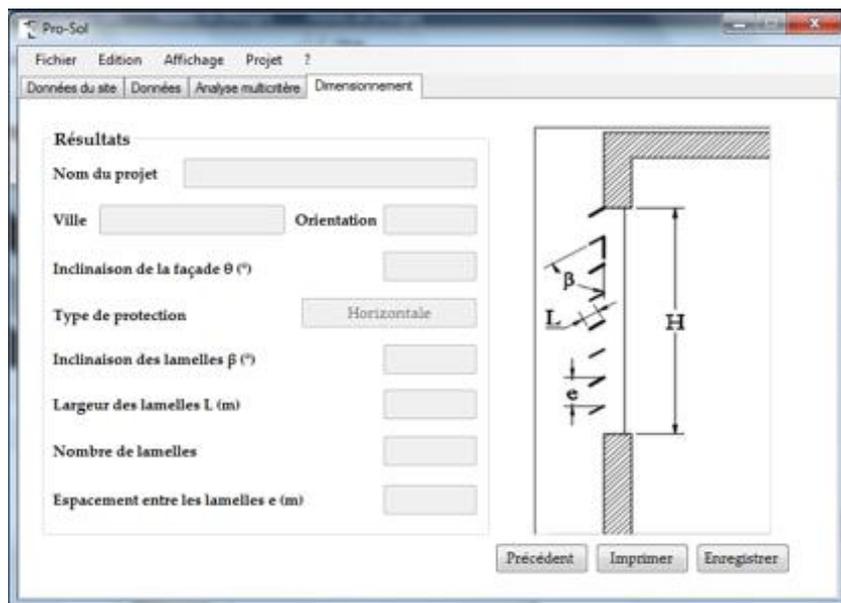


Figure 110 : Ecran des résultats

## Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons essayé de tracer les grandes lignes de l'outil d'aide à la conception des protections solaires que nous avons nommé Pro-Sol. Nous avons présenté le cahier des charges qui contient les éléments nécessaires pour son élaboration.

Tout d'abord nous avons présenté les caractéristiques de l'outil. Rappelons que cet outil a été conçu pour orienter le concepteur, dès les premières phases de conception, dans le choix et le dimensionnement des protections solaires externe fixe. C'est pourquoi il doit être simple à utiliser et ne nécessite aucun apprentissage. Le concepteur n'a qu'introduire les données relatives à la localisation (ville), aux masques urbains et au bâtiment. Il détermine également, selon le type du projet, le poids des différents critères d'évaluation à prendre en considération. Pour répondre à ces caractéristiques, nous avons choisi de programmer en "*Visual Basic*" qui permet une représentation visuelle sous forme de fenêtre, forme avec laquelle les utilisateurs se familiarisent facilement.

Par la suite, nous avons présenté en détail les besoins et supports nécessaires. Il s'agit du digramme des séquences, la base de données relative aux villes et les équations numériques à utiliser pour le dimensionnement des protections solaires. Nous avons présenté également les différents composants de l'interface du logiciel, en mettant l'accent sur la navigation à travers les différentes fenêtres du programme.

## *Conclusions et perspectives*

**N**ous avons vu à travers cette thèse à quel point le contrôle solaire est primordiale dans la conception des bâtiments. L'admission du rayonnement solaire permet d'économiser l'énergie pour le chauffage en hiver mais il n'est pas apprécié en été car il engendre une augmentation de la consommation énergétique pour le refroidissement, notamment dans les régions à climat chaud. La protection solaire constitue une partie importante de l'enveloppe d'un bâtiment et contribue efficacement à contrôler le rayonnement solaire pénétrant à l'intérieur des espaces. Elle influence directement le confort thermique et visuel ainsi que la consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage. Toutefois, son application pourrait entraîner certains conflits comme celui de la contradiction entre les exigences de confort d'hiver et d'été ou encore celles du confort thermique et lumineux

Nous avons pu constater également que l'effet thermique et lumineux d'une protection solaire dépend de plusieurs paramètres que l'architecte peut manipuler dès le début du processus de conception. Même s'il est soucieux de ces effets, l'architecte demeure incertain face aux choix formels ou dimensionnels à effectuer. En absence des connaissances précises, il se trouve confronté à un raisonnement architectural consistant à introduire une protection solaire pour régler des aspects d'ordre esthétique et des incertitudes liées aux conditions thermiques et lumineuses. De plus les outils d'analyse, disponible aujourd'hui, sont généralement compliqués et adaptés à la fin du processus de conception. Le concepteur doit donc disposer d'un outil lui permettant de dimensionner la protection solaire et de faire des choix quant à leur configuration géométrique.

Ce travail de recherche, avait pour premier objectif d'étudier l'impact des paramètres de conception des protections solaires sur les performances thermique, lumineuse et énergétique par rapport à un milieu à climat chaud et sec. Le deuxième objectif était d'esquisser un outil d'aide à la conception pouvant guider les architectes à effectuer des choix adéquats en termes de conception des protections solaires dans les premières étapes de la conception architecturale.

Tout d'abord nous avons mis en évidence les paramètres de conception des protections solaires ayant un impact à la fois sur les conditions thermiques et lumineuses à l'intérieur des bâtiments, à savoir l'espacement entre les lamelles, leur inclinaison et leur disposition. Notons que la profondeur des lamelles dépend, en plus de ces paramètres, de l'angle d'occultation optimal calculé pour chaque orientation. Dans les études antérieures (Ossen, et al., 2005; Freewan, et al., 2009; Bagheri Sabzevar & Erfan, 2021; Chou, 2004; Hammad & Abu-Hijleh, 2010; Palmero-Marrero & Oliveira, 2014) l'angle d'occultation n'a pas été fixé mais varie en fonction de l'espacement et la profondeur des lamelles.

Un ensemble de configurations géométriques, issu de la combinaison des différents paramètres de conception a constitué un support pour la simulation numérique. Afin d'évaluer l'impact de ces paramètres, nous avons effectué une étude paramétrique à l'aide de trois logiciels de simulation ; TRNSYS 17 pour le calcul thermique dynamique, RADIANCE 2.0 et DAYSIM 3.1 pour la simulation de l'éclairage. La simulation numérique nous a permis de comprendre, selon les différentes orientations, le comportement des configurations géométriques notamment la relations entre les paramètres de conception et les différents critères d'évaluation, à savoir la température de l'air en été et en hiver, l'illuminance, l'autonomie, l'uniformité et la consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation.

Nous résumons les résultats que nous avons obtenus de l'étude paramétrique comme suit :

L'impact des paramètres de conception varie selon l'orientation et la période considérée. Des différences significatives ont été enregistrées entre les configurations étudiées dans le cas de l'orientation Sud, notamment en période d'hiver, contrairement aux orientations Est, Ouest et Nord, pour lesquelles nous avons constaté le même comportement des configurations géométriques considérées.

Dans le cas de l'orientation Sud :

- La protection solaire réduit la température de l'air en hiver jusqu'à 3,5°C par rapport au cas de référence (sans protection solaire) cependant cette réduction ne dépasse pas 0,8°C en été.
- La consommation énergétique pour le chauffage augmente jusqu'à 39% et la consommation énergétique pour la climatisation diminue de 20%. Ces résultats se rapprochent de ceux de la littérature. Kim & al. (2012) enregistre une réduction de la consommation énergétique entre 10% et 35%. Pour Ossen, Ahmad, & Madros (2005) elle varie entre 19% et 31%. Al Touma & Ouahrani

(2017) ont montré que, dans un climat chaud, une protection solaire permet d'économiser la demande énergétique totale jusqu'à 20,6 %.

- L'éclairement minimal diminue de plus de 47% en hiver et 42% en été. Cependant l'éclairement maximal diminue de 9% seulement en hiver et de plus de 88% en été.
- Le sDA<sub>500.50%</sub> a été significativement réduit en comparaison avec le cas de référence mais il reste au-dessus de la valeur acceptable (55%).

Pour les deux orientations Est et Ouest, nous avons enregistré un écart de température de l'air par rapport au cas de référence d'environ 2°C en hiver et 2,9°C en été. La consommation d'énergie pour le chauffage augmente de plus de 22% pour l'orientation Est et 19% pour l'orientation Ouest. Cependant nous avons enregistré une économie d'énergie par rapport au cas de référence de plus de 38% pour l'orientation Est et 42% pour l'orientation Ouest. Dans le cas de l'orientation Nord, l'effet de la protection solaire est négligeable. L'écart de température de l'air par rapport au cas de référence ne dépassant pas 0.3°C en hiver et 0.6°C en été. Par rapport au cas de référence, les charges de chauffage ont été augmentées de 3% seulement et nous avons enregistré une économie d'énergie d'environ 12%.

Les configurations géométriques étudiées pour les orientations Est, Ouest et Nord présentent le même comportement ce qui signifie que l'impact des paramètres de conception est négligeable.

Nous avons constaté à travers l'analyse des résultats, que les critères d'évaluation ne sont pas toujours en corrélation avec les paramètres de conception. A cet effet, nous avons identifié six indicateurs ayant un impact direct sur les performances des protections solaires et qui sont en corrélation (positive ou négative) avec les critères d'évaluation. Ces indicateurs sont : la fraction du rayonnement solaire direct, le coefficient de protection, le rayonnement réfléchi par les lamelles, le rayonnement réfléchi par le sol, la pénétration du rayonnement solaire et la perméabilité visuelle. Les cinq premiers dépendent de la position solaire (hauteur et azimut) et des paramètres de conception tandis que la perméabilité visuelle dépend uniquement des paramètres de conception et ne change pas en changeant la position solaire.

Les résultats de simulation ont montré qu'aucune configuration n'améliore à la fois toutes les performances souvent contradictoires. Nous constatons une contradiction entre les performances thermique et lumineuse, entre la performance thermique en été et en hiver, ou encore entre la consommation énergétique pour la climatisation et le chauffage. Selon les résultats de simulation, lorsque la température de l'air, les niveaux d'éclairement ainsi que les charges de climatisation diminuent, la consommation énergétique pour le chauffage et l'éclairage artificiel

augmente, cela crée une situation conflictuelle évidente en compliquant le choix des configurations les plus favorables. Il s'agit donc d'un problème de décision multicritère. Par conséquent, ce choix doit être basé sur une analyse multicritère permettant de classer les différentes configurations par rapport aux critères étudiés et d'identifier les configurations les plus favorables vis-à-vis de tous ces critères.

Afin que ces résultats soient valorisés de manière à pouvoir les exploiter et qu'ils soient accessibles et directement utilisables par les concepteurs, nous avons jugé utile de les intégrer dans une démarche d'aide à la conception. Nous avons consacré la dernière partie de notre travail à l'élaboration d'un outil d'aide à la conception des protections solaires, basé sur l'analyse multicritère, permettant le dimensionnement et le choix de la configuration géométrique la plus favorable.

### **Il existe plusieurs pistes quant à l'extension et la suite de ce travail de doctorat.**

La première piste serait l'extension de l'outil à d'autres types de climats. Même si ce travail était basé sur une méthodologie appliquée pour le cas des climats chauds et sec, il peut être facilement étendu pour d'autres types de climats. Ceci nécessitera l'élaboration d'une nouvelle étude paramétrique tenant compte des conditions climatiques appropriées à ces climats.

La seconde piste est de développer cet outil en prenant en considération d'autres critères d'évaluation des protections solaires. Les travaux futurs peuvent éventuellement inclure une étude de l'impact des paramètres de conception des protections solaire sur la ventilation naturelle qui pourrait avoir un impact significatif sur la consommation énergétique pour la climatisation notamment dans les climats chauds. Des recherches futures pourraient également étudier l'impact sur le coût et la vue sur l'extérieur.

Les valeurs de paramètres que nous avons étudiés (angle d'inclinaison et espacement) sont discrètes avec un intervalle plus au moins important. Nous proposons d'étendre l'étude vers d'autres valeurs de ces paramètres. De même d'autres paramètres de conception pourront être pris en considération, tel que notamment la forme des lamelles, leur matérialité et la distance par rapport à la façade. Ceci aura l'avantage d'augmenter le nombre de configurations géométriques et d'élargir le choix. Des travaux de simulations supplémentaires seront donc nécessaires pour évaluer les performances de ces nouvelles configurations.

Une piste intéressante à approfondir se situe au niveau du type de protection solaire. Dans ce travail, nous avons étudié le cas d'une protection extérieure fixe, notre première idée serait d'établir un travail sur les protections solaires dynamiques. Nielsen et al (2011) Winther (2013) et Liu (2014) ont tous confirmé que les protections solaires dynamiques fonctionnent mieux que les protections fixes, ils ont démontré que ce type de protection est plus performant en ce qui concerne la demande énergétique, la réduction de surchauffe, ainsi que pour l'éclairage naturel et la vue sur l'extérieur. Nous proposons comme perspective de recherche de vérifier ces performances par rapport au climat chaud aride.

Un aspect qui n'avait pas été envisagé au départ mais qui a émergé tout naturellement, est l'aspect pédagogique de l'outil d'aide à la conception. En effet, cet outil pourrait être aussi utilisé pour enseigner les différents aspects relatifs à l'ensoleillement et aux protections solaires notamment leur dimensionnement. Pour cela il faudra intégrer un module supplémentaire pour expliquer les différents aspects relatifs à l'ensoleillement.

Enfin, la validation de notre outil d'aide à la conception auprès des concepteurs nous paraît intéressante car elle permet de dégager d'éventuelles lacunes et d'améliorer certaines fonctionnalités du programme. Par ailleurs, il nous a également paru intéressant d'intégrer cet outil d'aide, sous forme de plugin dans des logiciels de conception assistée par ordinateur, familiers pour les concepteurs, tels que AutoCad, ArchiCad ou SketchUp.

## Références bibliographiques

Adolphe, L., 1991. *L'aide à la décision technique dans la conception architecturale : application à l'énergétique du bâtiment..* s.l.:Thèse de doctorat en énergétique de l'Ecole des mines de Paris..

Ait Haddou, H., 2018. *Modélisation simulation pour l'aide à la décision multicritères des architectes-urbanistes*, Toulouse: Toulouse Capitole Publications.

Al Touma, A. & Ouahrani, D., 2017. Shading and day-lighting controls energy savings in offices with fully-Glazed façades in hot climates. *Energy and Buildings*, Issue 151, p. 263–274.

Alhalel, T. & Seigne, J.-R., 2001. La différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai : l'équation du temps. *Bulletin de l'union des physiciens*, Issue 838, pp. 1557-1579.

Al-Tamimi, N. A. & Fadzil, S. F., 2011. The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics. *Procedia engineering* , pp. 273-282.

Alzoubi, H. H. & Al-Zoubi, A. H., 2010. Assessment of building façade performance in terms of daylighting and the associated energy consumption in architectural spaces: Vertical and horizontal shading devices for southern exposure facades. *Energy Conversion and Management*, August, 51(8), pp. 1592-1599.

Arumi-Noé, F., 1996. Algorithm for the geometric construction of an optimum shading device. *Automation in Construction*, 1(5), pp. 211-217.

Associates, J. J. H. &, s.d. *DOE2.com*. [En ligne] Available at: <http://www.doe2.com/> [Accès le 14 02 2020].

Athienitis, A. & Tzempelikos, A., 2002. A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device.. *Solar Energy* , 4(72), p. 271–281.

Atkinson, W., 1912. *The orientation of buildings ; or Planning for sunlight*. NEW YORK: John Wiley & Sons.

- Attia, S., Beltrán, L., De Herde, A. & Hensen, J., 2009. Architect friendly : a comparison of ten different building performance simulation tools. *11th IBPSA Building simulation conference*, 27-30 July.p. 204–211.
- AUDIENCE, 1999. *Auto-formation à distance au contrôle d'environnement des constructions et des équipements*. [En ligne]  
Available at: <http://audience.cerma.archi.fr/>
- Autodesk, Inc, 1999. *Lightscape user's guide*. USA: s.n.
- Bader, S., 2011. High-performance façades for commercial buildings. *The university of Texas Austin*.
- Bagheri Sabzevar, H. & Erfan, Z., 2021. Effect of Fixed Louver Shading Devices on Thermal Efficiency. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, 4(12), pp. 349-357.
- Baker, N. & Steemers, K., 1996. *The LT Method 2,0, An Energy Design Tool for Non-Domestic Buildings*. UK: Cambridge Architectural Research Limited.
- Baker, N., Steemers, K. & Hoch, D., 1995. *The LT Method : An Energy Design Tool for Non, Domestic Buildings*. s.l.:s.n.
- Bardet, G., 1943. Le facteur soleil en urbanisme. *Techniques et Architecture*, Issue n°7-8 .
- Bardou, P. & Arzoumanian, V., 1978. *Archi de soleil*. s.l.:Edition Parenthèses.
- Barozzi, M. L. J. Z. A. M. C., 2016. The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Eng*, pp. 275-284.
- Bauer, M. & Molse, P. S. M., 2007. *Green Building\_ Guidebook for Sustainable Architecture*. s.l.:Springer.
- Beckers, B., 2004. *Le diagramme solaire*, s.l.: s.n.
- Beckers, B., 2011. *Modélisation du rayonnement dans les projets architecturaux et urbains*, s.l.: s.n.
- Beckers, B. & Beckers, P., 2014. *Reconciliation of Geometry and Perception in Radiation Physics*. s.l.:John Wiley and Sons.
- Beckers, B. & Masset, L., 2011. *Heliodon 2, software and user's guide*. s.l.:<http://www.heliodon.net>.
- Beckers, B., Masset, L. & Beckers, P., 2008. *Une projection synthétique pour la conception architecturale avec la lumière du soleil, Rapport Helio\_003\_fr*. [En ligne].
- Beckman, W. A. et al., 1994. TRNSYS, The most complete solar energy system modeling and simulation software.. *Renewable Energy*, Volume Vol.5, Part 1, pp. 486–488.

Bellia, L., De Falco, F. & Minich, F., 2013. Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates.. *Applied Thermal Engineering*, pp. 190-201.

Bellia, L., Marino, C., Minichierlo, F. & Pedace, A., 2014. An overview on solar shading systems for buildings.. *6th Conference of Sustainability in Energy and Buildings, SEB-14. Energy Procedia*, Issue 62, pp. 309-317.

Ben Mena, S., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 2(4), pp. 83-93.

Bennett, R., 1978. *Sun angles for design*. Bala Cynwyd, USA: Robert Bennett.

Bessoudo, M., Tzempelikos, A. & Athienitis, A., 2010. Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices; Part I: Experiments and building thermal model. *Building and Environment*, 45(11), p. 2506–2516.

Bodart, M. & De Herde, A., 2002. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. *Energy and Buildings*, 34(5), pp. 421-429.

Boesiger, W., 1994. *Le Corbusier œuvre complète: 1938-1946*. Volume 06.

Bouyssou, D., Marchant, T. & Pirlot, M., 2021. A theoretical look at ELECTRE TRI-nB and related sorting models..

Brans, J. & Mareschal, B., 2005. *PROMETHEE Methods in Multiple Criteria Decision Analysis, State of the Art Survey*. Springer Science éd. New York: Jose Figueira, Salvatore Greco ve Matthias Ehrgott.

Brans, J.-p., 1982. Elaboration d'instruments d'aide à la décision: méthode PROMETHEE. *Colloque d'aide à la décision*.

Brans, J.-P. & Mareschal, B., 1988. Geometrical representations for MCDA. The GAIA module. *Eur. J. Oper. Res*, Issue 34, p. 69–77.

Brans, J.-P. & Mareschal, B., 1992. Promethee V: Mcdm Problems With Segmentation Constraints. *Inf. Syst. Oper. Res*, Issue 30, p. 85–96.

Brans, J.-p. & Mareschal, B., 1995. The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems. *J.Decis. Syst*, Issue 4, pp. 213-223.

Brans, J.-P. & Mareschal, B., 2002. *PROMETHEE-GAIA, Une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. s.l.:Éditions de l'Université de Bruxelles, Éditions Elipses.

Brans, J. & Vincke, P., 1985. A preference ranking organization method. *Management Science*, 31(6), pp. 647-656.

- Brown, G. Z. & DeKay, M., 2000. *Sun, Wind & Light: Architectural Design Strategies*. 2e éd. New York: Wiley.
- BS 8206-2:2008, 2008. *Lighting for Buildings - Part 2: Code of Practice for Daylighting*, London: British Standards Institution.
- Caillet, R., 2003. *Analyse multicritère: étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie*. Montréal: s.n.
- Campbell, G. & Norman, J., 1998. *An introduction to Environmental Biophysics*. second edition éd. New York: Springer.
- Capderou, M., 1986. *Atlas solaire de l'Algérie*. Alger: Office des publications universitaires.
- Capeluto, G., 2003. Energy performance of the self-shading building envelope. *Energy and Buildings*, Issue 35 , p. 327-336.
- Carmody, J., Selkowitz, S. & heschong, L., 1996. *Residential windows. A guide to new technologie and energy performance*. New York: Norton.
- Celini, F., 2008. *Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant*. Lyon: université claudes bernard.
- Chaabouni, S., Bignon, J. & Halin, G., 2009. Utilisation d'une collection de références pour assister la conception des ambiances lumineuses. *Conception architecturale numérique et approches environnementales, Actes du 3ème séminaire de conception architecturale*.
- Chatelet, A., Lavigne , P. & Fernandez, P., 1994. *Architecture climatique : une contribution au développement durable* . France: Edisud.
- Chia, S., 2008. Minimizing Solar Insulation in High-Rise Buildings through Self-Shaded.
- Chou, C., 2004. The performance of daylighting with shading device in architecture design. *Journal of Applied Science and Engineering* , Volume 7, p. 205-212.
- CIBSE, 1999. *Daylighting and Window Design, Lighting Guide LG10*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers.
- Claros, S. & Soler, A., 2001. Indoor daylight climate comparison between light shelves and overhang performances in Madrid for hours with unit sunshine fraction and realistic values of model reflectance. ;71:233-9. .. *Sol Energy* , 71(4), pp. 233-239.
- Cuevas, C., Fissore, A. & Fonseca, N., 2010. Natural convection at an indoor glazing surface with different window blinds.. *Energy Build.*, Issue 42, p. 1685-1691.
- Datta, G., 2001. Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation.. *Renewable Energy*.

Datta, G., 2001. Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation.. *Renewable Energy*.

Datta, G., 2001. Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation.. *Renewable Energy*.

David, M., Donn, M., Garde, F. & Lenoir, A., 2011. Assessment of the thermal and visualefficiency of solar shades.46(7). *Building and Environment*, p. 1489–1496.

David, M., Donn, M., Garde, F. & Lenoir, A., 2011. Assessment of the thermal and visualefficiency of solar shades.46(7). *Building and Environment*, p. 1489–1496.

David, M., Donn, M., Garde, F. & Lenoue, A., 2011. Assessment of the thermal and visualefficiency of solar shades.46(7). *Building and Environment*, p. 1489–1496.

De Castro, E. B. P., 2005. *Méthode d'aide à la conception architecturale basée sur l'analyse multicritère et sur des données simulées des comportements des bâtiments*, s.l.: s.n.

De Michele, G., Oberegger, U. & Baglivo, L., 2015. Coupling dynamic energy and daylighting simulations for complex fenestration systems. Building Simulation Applications 2015.. *BSA 2015. 2nd IBPSA-Italy Conference Bozen-Bolzano, 4th–6th February 2015*.

Demers, C. M. & Potvin, A., 2004. LUMcalcul 2.01: prédiction de la lumière naturelle pour la conception architecturale. *Proceedings of eSIM2004*, 9-11 juin.

Depecker, P., 1985. *Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champ de l'architecture. Le cas de la thermique.*, s.l.: INSA de Lyon.

Depecker, P., Menezo, C., Bastos, L. & Queiroz, T., 2000. Aide à la décision et structure d'outils pour la conception thermique des bâtiments, typologie, modes d'usage, incertitude. *2eme Conférence Internationale sur l'Aide à la Décision dans le Domaine Génie Civil et Urbain*, pp. 869-884.

Djenane, M., 1998. *Participation de la forme urbaine au contrôle de l'irradiation solaire, référence particulière au rôle de la rue dans les régions chaudes et sèches.*, s.l.: s.n.

Djenane, M., 2008. Microclimatic behaviour of urban forms in hot dry regions.Towards a definition of adapted indicators.. *25th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA, Dublin..*

Doumpos, M., Marinakis, Y., Marinaki, M. & Zopounidis, C., 2009. • An evolutionary approach to construction of outranking models for multicriteria classification: The case of the ELECTRE TRI method. *European Journal of Operational Research*, Issue 199, p. 496–505.

Doumpos, M. & Zopounidis, C., 2004. *Multi-criteria Decision Aid Classification Methods*. USA: Kluwer Academic Publishers.

Dubois.M-C, 1997. *Solar Shading and Building Energy Use, A Literature Review, Part 1.*, Lund, Sweden: s.n.

Dubois, C., 2014. *Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique; une feuille de route pour les architectes et les designers urbains québécois*, Canada: s.n.

Dubois, M.-C., 1998. *Solar Protective Glazing for Cold Climates:A Parametric Study of Energy Use in Offices.Report TABK--98/3053*. Lund (Sweden).: Lund University, Dept. of Building Science..

Dubois, M.-C., 2003. Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators. *Lighting Research & Technology*, March, 35(1), p. 61–74.

Dubois, M.-C. & Blomsterberg, A., 2011. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: a literature review.. *Energy Build*, 10(43), p. 2572–2582.

Dubois, M. C., 2001. *Impact of Solar Shading Devices on Daylight Quality: Simulations with Radiance*, Lund, Sweden: Division of Energy and Building Design, Lund Institute of Technology, Lund University.

Duffie, J. A. & Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ème éd. s.l.:s.n.  
ESP-r, s.d. <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>. [En ligne]  
Available at: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>  
[Accès le 9 12 2019].

Fernandez, L., 2010. *Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux*, s.l.: s.n.

Freewan, A. A., 2014. Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. *Solar Energy*, Issue 102, p. 14–30.

Freewan, A. A., Shao, L. & Riffat, S., 2009. Interactions between louvers and ceiling geometry for maximum daylighting performance.. *Renew. Energy*, Issue 34, p. 223–232..

Fumo, N., Mago, P. & Luck, R., 2010. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*, Volume 42, p. 2331–2337.

Ganga A, W. & Benny, R., 2017. Performance evaluation of light shelves. *Energy and Buildings*, Issue 140, p. 19–27.

Garry, S., 1990. *The Reasoning Architect: Mathematics and Science in Design*. s.l.:McGraw-Hill College .

Ginting, R., 2000. *Intégration du système d'aide à la décision multicritères et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle, application dans le choix de partenaires en Indonésie*, s.l.: l'Université de droit et des sciences d'Aix-Marseille .

Givoni, B., 1978. *L'homme l'architecture et le climat..* paris, France.: Edition le Moniteur.

Givoni, B., 1998. *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons éd. New York: s.n.

Gratia, E. & De Herde, A., 2007. The most efficient position of shading devices in a double-skin façade. *Energy and Buildings*, Volume 39 , p. 364–373.

Grynberg, A., 1989. Validation of RADIANCE. LBID 1575. Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science Division, Lighting Systems Research Group..

Grynning, B., Gustavsen, A. & Time, B., 2011. Solar Shading Systems and Thermal Performance of Windows in Nordic Climates.. *9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011*.

Grynning, S., Time, B. & Matusiak, B., 2014. Solar shading control strategies in cold climates – Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces. *Solar Energy*, Issue 107, p. 182–194.

Hammad, F. & Abu-Hijleh, B., 2010. The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building.. *Energy Build.* 42, p. 1888–1895..

Harberl, J. & Kota, S., 2009. Historical survey of daylighting calculations methods and their use in energy performance simulations. *Proceedings of the 9th international conference for enhanced building operations, Austin, TX*, pp. pp.1-9.

Harimi, D., Ming, C. C. & Kumaresan, S., 2011. Estimation of exterior vertical daylight for the humid tropics of Kota Kinabalu city in East Malaysia.. *Renew. Energy*, 1(36), p. 9–15.

Harzallah, A., 2007. *Émergence et évolution des préconisations solaires dans les théories architecturales et urbaines en France, de la seconde moitié du XIXe siècle à la deuxième guerre mondiale*. ENSA Nantes: s.n.

Harzallah, A., 2007. *Emergence et évolution des préconisations solaires dans les théories architecturales et urbaines en France, de la seconde moitié du XIXe siècle à la deuxième guerre mondiale..* s.l.:s.n.

Harzallah, A., Siret, D., Monin, E. & Bouyer, J., 2005. *Controverses autour de l'axe héliothermique: l'apport de la simulation physique à l'analyse des théories urbaines*. Paris, s.n.

Hatefi, S. & Torabi, S., 2010. A Common Weight MCDA-DEA Approach to Construct Composite Indicators. *Ecological Economics*, Volume 70, pp. 114-120.

---

Heschong, L. et al., 2012. *Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. NY, USA: IES-Illuminating Engineering Society: New York.

Hiller, M. D., Beckman, W. A. & Mitchell, J. W., 2000. TRNSHD a program for shading and insolation calculations. *Building and Environment*, Issue 35, pp. 633-644.

Houpert, S., 2003. *Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles Dans le projet architectural et urbain développement et application du logiciel svr*, s.l.: l'École d'Architecture de Nantes.

Houpert, S., 2003. *Approche inverse pour la résolution des contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain, développement et application du logiciel SVR*, France: Université de Nantes.

Hviid, C., Nielsen, T. & Svendsen, S., 2008. Simple tool to evaluate the impact of daylight on building energy consumption. 82 (9), 787–798.. *Solar Energy*.

IEA, 2019. *Global Status Report for Buildings and Construction 2019*, Paris, France: IEA.

Ishizaka, A. & Nemery, P., 2013. *Multi-Criteria Decision Analysis*. UK: WILEY: West Sussex.

Iversen, A. et al., 2013. *Daylighting Calculations in Practice*. Copenhagen: Danish Building Research Institute. Aalborg University.

Izard, J., 1979. *Archi bio*. s.l.:Parenthèses.

Jan, J., 1983. *Rayonnement solaire : aspects géométriques et astronomiques*.. s.l.:Météo-France.

Johnson, R. et al., 1984. Glazing energy performance and design optimization with daylighting.. 4(6), p. 305–317.

Kabre, C., 1999. WINSHADE: A computer design tool for solar control. *Building and Environment*, 3(34), pp. 263-274.

Kaftan, E., 2001. The Cellular Method to Design Energy Efficient Shading Form to Accommodate the Dynamic Characteristics of Climate. *Proceedings, PLEA 20 The 18th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianopolis, Brazil, November 7-9*, pp. 829-833.

Kandar, M., Nimlyat, P. & Abdullahi, M., 2019. Influence of inclined wall self-shading strategy on office building heat gain and energy performance in hot humid climate of Malaysia. *Heliyon*, Volume 5.

Kanmogne, A., Wadawa, B. & Ntamack, G. E., 2012. *Energie solaire pour le développement de télécommunication*. s.l.:Editions Universitaires Européennes.

Kim, G., Lim, H. S., Lim, T. S. & Schaefer, L., 2012. Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. *Energy and Buildings*, Issue 46, p. 105–111.

---

Kim, J. T. & Kim, G., 2009. Advanced External Shading Device to Maximize Visual and View Performance. *2nd International Conference on Sustainable Healthy Buildings* ). Seoul, Korea, pp. 49-60.

Kim, J.-H. et al., 2007. An Experimental Study for The Evaluation of the environmental Performance by The Application of the Automated Venetian Blind.. *Clima 2007 WellBeing Indoors..*

Kirimtat, A., Koyunbaba, B. & Chatzikonstantinou, I., 2016. Review of simulation modeling for shading devices in buildings.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 53, pp. 23-49.

Knowles, R. L., 2003. The solar envelope. Its meaning for urban growth and form. *Energy and building*, 1(35), pp. 15-25.

Knowles, R. L. & Villecco, M. N., 1980. Solar Access and Urban Form. *AIA Journal*, February. pp. 42-49.

Koenigsberger, O. H., Ingersoll, T., Mayhew, A. & Szokolay, S., 1973. *Manual of tropical housing and building, Pt.1: Climatic design..* London: Longman.

Koo, S., Yeo, M. & Kim, K., 2010. ., . Automated blind control to maximize the benefits of daylight in buildings.. *Building and Environment*, 6(45), p. 1508–1520.

Kotey, N. A., Wright, J. L., Barnaby, C. S. & Collins, M. R., 2009. Solar Gain through Windows with Shading Devices: Simulation Versus Measurement. *ASHRAE Transactions*, Volume 115.

Krstić, D. et al., 2019. Effect of external solar shading usage on energy consumption and thermal comfort in the student dormitory in Niš. *E3S Web of Conferences, CLIMA*, Volume 111.

Laget, P.-L., 2014. L'invention du système des immeubles à gradins. Sa genèse à visée sanitaire avant sa diffusion mondiale dans la villégiature de montagne et de bord de mer. *In Situ* 24, 18 Juillet.

Lam, J. C., Tsang, C., Li, D. H. & Cheung, S., 2005. Residential building envelope heat gain and coolin. *Energy*, Volume 37, pp. 529-544.

Lavafpour, Y. & Sharples, S., 2015. Summer Thermal Comfort and Self-Shading Geometries in Passivhaus Dwellings: A Pilot Study Using Future UK Climates. *Buildings*, Volume 5, pp. 964-984.

Lavigne, P., Brejon, P. & Fernandez, P., 1994. *Architecture climatique : une contribution au développement durable, volume Tome 1..* Saint-Rémy-de-Provence: EDISUD..

Lawrence Berkeley National Laboratory, s.d. *Desktop Radiance v.1.02 [ComputerSoftware]*. s.l.:Available: <http://radsite.lbl.gov/deskrad> (Accessed 10 December 2014)..

LBL, 1994. *WINDOW 4.0: A PC Program for Analysing Window Thermal Performance of Fenestration Products. Report LBL-35298.*, Berkeley, California (USA): Lawrence Berkeley National Laboratory, Windows and Daylight Group..

LBN, L. B. N. L., s.d. *Desktop Radiance v.1.02.* s.l.:s.n.

Lechner, N., 2008. *Heating, cooling, lighting; design methods for architects.*. New jersey: John Wiley & Sons .

Lee, E., DiBartolomeo, D. & Selkowitz, S., 1998. Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office.. *Energy and Buildings*, 1(29), p. 47–63.

Léglise, M., 1995. *Art under constraint – preserving the creative dimension in computeraided architectural design, languages of design.* Amsterdam (Pays-Bas): Elsevier.

Lim, Y.-W.et al., 2012 . Building façade design for daylighting quality in typical government office building. *Building and Environment*, 57(194-204).

Ling, C., 2005. Minimizing solar insolation on high rise building in Malaysia.

Littlefair, P., 1998. Passive solar urban design : ensuring the penetration of solar energy into the city. vol. 2(no 3).

Liu, M., 2014. *Modelling and control of intelligent glazed facade, PhD Thesis*, s.l.: Aalborg University, Aalborg University Press.

Loëhnert, G., Dalkowski, A. & Sutter, W., 2003. Integrated Design Process: A Guideline for Sustainable and Solar-Optimised Building Design.Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings. *International Energy Agency (IEA) Task 23, subtask B.*

Lollini, R., Danza, L. & Meroni, I., 2010. Energy efficiency of a dynamic glazing system. *Solar Energy*, 4(84), p. 526–537.

Los, L., 1981. A Bioclimatic approach to urban space system. *proc.Of in .Passive.*

Loutzenhiser, P., Maxwell, G. & Manz, H., 2007. An empirical validation of the daylighting algorithms and associated interactions in building energy simulation programs using various shading devices and windows. *Energy* , Volume 32, p. 1855–1870.

Machin , A., Naylor , D., Harrison, S. & Oosthuizen, P., 1998. Experimental study of free convection at an indoor glazing surface with a Venetian blind, *Int. J. Heat. Ventil. Air-Condition. HVAC&R RESEARCH*, 4(2), p. 153–166.

Magri Elouadjeri, S., Ait Haddou, H. & Boussoualim, A., 2015. Luminous and thermal effect of slat angle solar protection in hot climates.. *International Conference on Environment and Renewable Energy*, 20-21 May.

Magri Elouadjeri, S., Boussoualim, A. & Ait Haddou, H., 2015. Luminous and thermal effect of slat angle solar protection in hot climates.. *International Conference on Environment and Renewable Energy*, 20-21 May.

Magri Elouadjeri, S., Boussoualim, A. & Ait Haddou, H., 2021. Evaluating the Effect of External Horizontal Fixed Shading Devices' Geometry on Internal Air Temperature, Daylighting and Energy Demand in Hot Dry Climate. Case Study of Ghardaia, Algérie.. *Buildings*.

Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N. & Christoffe, J., 2011. Daylighting metrics for residential buildings. *27th Session of CIE International Conference*.

Marsh, A., 2003. Computer-optimised shading design, Building Simulation. *International Building Performance Simulation Association (IBPSA), Eindhoven, Netherlands, August 11- 14,2003 ..*

Matusiak, B., 2006. A design method for fixed outside solar shading device. *PLEA2006, The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 6-8 September.

Maystre, L. Y., Pictet, J. & Simos, J., 1994. *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Lausanne, Suisse: Presse Polytechniques et Universitaires Romandes.

Mazria, E., 1979. *The Passive Solar Energy Book*. Emmaus, Paris: Rodale Press.

Meerbeek, B. et al., 2014. Building automation and perceived control: A field study on motorized exterior blinds in Dutch offices. *Building and Environment*, Issue 79, pp. 66-77.

Michael, A., Gregoriou, S. & Kalogirou, S. A., 2017. Environmental Assessment of an Integrated Adaptive System for the Improvement of Indoor Visual Comfort of Existing Buildings. *Renewable Energy*.

Minaert, J., 2001. *Henri Sauvage ou l'exercice du renouvellement*. Paris: Norma.

Moeffaert, D. V., 2002. *Multi Criteria Decision Aid in Sustainable Urban Water Management*, *Thèse de doctorat*, Stockholm: s.n.

Montenegro, E., Potvin, A. & Demers, C., 2012. Impact of school building typologies on visual, thermal and energy performances.. *Proceedings of the Passive and Low Energy in Architecture (PLEA), Lima, Peru,7-9 November 2012*.

Moon, P. & Spencer, D., 1942. Illumination from a nonuniform sky. *Illum. Eng. (N.Y.)*, 37, pp. 707-726.

Nabil, A. & Mardaljevic, J., 2006. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, July, 38(7), pp. 905-913.

NEF, 2016. *National Energy Foundation CO2 Emissions Calculator based upon DEFRA data*.

[En

ligne]

Available at: <http://www.natenergy.org.uk>  
[Accès le 02 Juin 2016].

Nielsen, M. V., Svendsen, S. & Jensen, L. B., 2011. Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight. *Solar Energy*, Issue 85, p. 757–768.

Nielsen, M. V., Svendsen, S. & Jensen, L. B., 2011. Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight. *Solar Energy*, 85(5), p. 757–768.

Nielsen, M. V., Svendsen, S. & Jensen, L. B., 2011. Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight.,. *Solar Energy* 85, p. 757–768.

Nielsen, M. V., Svendsen, S. & Jensen, L. B., 2011. Quantifying the potential of automated dynamicsolarshading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight.. *Solar Energy*, 85(5), p. 757–768.

Nielsen, T., 2005. Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design.. *Solar Energy*, 1(78), p. 73–83..

Nikpour, M., Kandar, M. & Ghasemi, M., 2012. Heat transfer reduction using self-shading strategy in energy commission building in Malaysia.. *Appl. Sci*, 9(12 ), p. 897–901..

Oh, J. K. W., Haberl, J. S. & Degelman, L., 2000. Enhanced software for displaying orthographic, stereographic, gnomonic and cylindrical projections of the sunpath diagram and shading mask protractor. *Proceedings of the Twelfth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*, 15-17 May.pp. 234-246.

Oke, T., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations.. *Journal of climatology*, Volume 1, pp. 237-254.

Oke, T., 1988. Street design and urban canopy layer climate.. *Energy and Buildings*, Volume 11, pp. 103-113.

Oke, T., Spronken smith, R., Jauregui, E. & Grimmo, C., octobre 1999. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), pp. 3919-3930.

Olgyay, V., 1963. *Design with climate : Bioclimatic approach to architectural regionalism*. s.l.:Princeton University Press.

Olgyay, V. & Olgyay, A., 1957. *Solar Control and Shading Devices*. Princeton, N.J: Princeton University Press.

Oliveira, A. & Palmero-Marrero, A. I., 2010. Effect of louver shading devices on building energy requirements.. *Appl. Energy* 87, p. 2040–2049.

Ossen, D. R., Ahmad, M. H. & Madros, N. H., 2005. Impact of solar shading geometry on building energy use in hot humid climates with special reference to malaysia. *NSEB2005 – SUSTAINABLE SYMBIOSIS, National Seminar on Energy in Buildings, UiTM*, 10-11 May.

Ouahrani, D. & Al touma, A., 2018. selection of slat separation-to-width ratio of brise-soleil shading considering energy savings, co2 emissions and visual comfort – a case study in qatar author links open overlay panel. *Energy and Buildings*, April, Issue 165, pp. 440-450.

Palmero-Marrero, A. I. & Oliveira, A. C., 2014. Effect of louver shading devices on building energy requirements.. *Applied Energy*, pp. 2040-2049.

Pardalos, P., Siskos, Y. & Zopounidis, C., 1995. *Advances in Multicriteria Analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

PassivAct, 2015. *Bioclimatisme, Trajectoires solaires*. [En ligne] Available at: <https://passivact.com/Concepts/files/Bioclimatisme-TrajectoiresSolaires.html> [Accès le 10 Décembre 2015].

Paule, B., 1999. *Application de la logique floue à l'aide à la décision en éclairage naturel*. Lausanne, EPFL: s.n.

Pereira de Castro, E. B., 2005. *Méthode d'aide à la conception architecturale basée sur l'analyse multicritère et sur des données simulées des comportement des bâtiments*. Lyon: Institut national des sciences appliquées.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. & Pout, C., 2008. A review on buildings energy consumption information.. *Energy Build*.

Petersen, S. & Svendsen, S., 2010. Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design.. *Energy Buildings*, 7(42), p. 1113–1119.

Petherbridge, P., 1969. *Sunpath diagrams and overlays for solar heat gain calculations*.. London: s.n.

Phillips, R., 1948. Sunshine and shade in Australasia.. *Technical Study , Common wealth Experimental Building Station*, Issue 23.

Ratti, C., Raydan, D. & Steemers, K., 2003. Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy Build*, Issue 35, p. 49–59.

Recchia, L. et al., 2011. *General Theory of Multicriteria Analysis and Life Cycle Assessment. in Multicriteria Analysis and LCA Techniques*. London: s.n.

- Reinhart, C. F. & Walkenhorst, O., 2001. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy Buildings* 33, p. 683–697.
- Reinhart, C. & Voss, K., 2003. Monitoring manual control of electric lighting and blinds. *International Journal Lighting Research & Technology*, Issue 35, pp. 243-260.
- Rey, A., Pidoux, J. & Barde, C., 1928. *La science des plans de villes, ses applications à la construction, à l'extension, à l'hygiène et à la beauté des villes, orientation solaire des habitations*. Lausanne, Payot et Cie, Paris.: Dunod.
- Rosenfeld, J. L. J., 1996. On the calculation of the total solar energy transmittance. *8th International Meeting on Transparent Insulation Material*.
- Roy, B., 1968. Classement et choix en présence de points de vue multiples: La méthode ELECTRE. *RIRO*, Issue 8, pp. 57-75.
- Roy, B., 1977. *Electre III, un Algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples*. Paris, France: SEMA, Rapport de recherche n° 81.
- Roy, B., 1985. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Paris: Economica.
- Roy, B., 1991. The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision*, 1(31), pp. 49-73.
- Roy, B. & Vanderpotten, D., 1996. The European School of MCDA : Emergence, Basic Features and Current Works. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, Issue 5, pp. 22-38.
- Scharlig, A., 1985. *Décider sur plusieurs critères*. Lausanne, Suisse: Presse Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Serra, V., Zanghirella, F. & Perino, M., 2010. Experimental evaluation of a climate facade: Energy efficiency and thermal comfort performance.. *Energy Build.*, Issue 42, p. 50–62..
- Settino, J., Carpino, C., Perrella, S. & Natale, A., 2020. Multi-Objective Analysis of a Fixed Solar Shading System in in Different Climatic Areas. *Energies*, 13(12), pp. 32-49.
- Shalaby, M., 2002. *Evaluating lightscape's accuracy for predicting daylighting illuminance compared to an actual space*. Thesis for the Degree of Master of Interior. s.l.:University of Florida.
- Shen, E., Hu, J. & Patel, M., 2014. Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies. *Building Environment*, Volume 78, p. 155–170.
- Siret, D., 1997. *Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural : application à l'ensoleillement*, France: Université de Nantes.
- Siret, D., 2011. les enveloppes solaires de Ralph Knowles, ou les ambivalences d'un modèle de régulation des formes urbaines. *Cahiers du LAUA*, Novembre.Issue 14.

Siret, D., 2012. Soleil, lumière et chaleur dans l'architecture moderne : excursions dans l'oeuvre de Le Corbusier L'émoi de l'Histoire.. *L'histoire dans tous ses états*, N° 34, pp. 177-193.

Siret, D., 2013. Les sensations du soleil dans les théories architecturales et urbaines. De l'hygiénisme à la ville durable. *Les cinq sens de la ville du Moyen Âge à nos jours*, pp. 105-117.

Siret, D., 2014. Une utopie artistique solaire urbaine des années 1960 : l'hélioplastique de Mieczyslaw Twarowski. *Environnement Urbain*, Volume 8.

Siret, D. & Harzallah, A., 2006. Architecture et contrôle de l'ensoleillement. *Congrès IBPSA France, Saint Pierre de la Réunion, France*.

Stadler, M., Firestone, R., Curtil, D. & Marnay, C., 2006. On-site generation simulation with EnergyPlus for commercial buildings. *upcoming conference proceedings of the 2006 ACEEE*.

Su, B., 2013. Impacts of building design factors on Auckland school energy consumptions.. *Int. J. Civil Archit. Sci. Eng*, p. 264–270.

Szokolay, S., 2008. *Introduction to architectural science: the basis of sustainable design*. London , United Kingdom and NY, United States: Architectural Press/ Routledge.

Szokolay, S. V., 1996. *PLEA Notes: Solar Geometry*, Brisbane: PLEA Passive and Low Energy Architecture International and University of Queensland.

Teller, J., 2004. *Confort Thermique- Géométrie solaire*. Liège: s.n.

Teller, J. & Azar, S., 2001. Townscope II - A computer system to support solar access decisionmaking. *Solar Energy*, Vol. 70(no 3).

TNO-TUE Centre for Building Research, 2000. *Daylight Design Variations Book*. [En ligne] Available at: <http://jandiepens.nl/varbook/index.htm> [Accès le 20 Juin 2019].

TRNSYS 17, s.d. Getting Started.. Dans: *TRNSYS 17 a TRaNsient SYstem Simulation program*. s.l.:s.n.

Twarowski, M., 1967. *Soleil et architecture*.. Paris: Pznan, Arkady Warszawa..

Tzempelikos, A., 2008. The impact of venetian blind geometry and tilt angle on view, direct light transmission and interior illuminance. *Solar Energy*, Issue 82, p. 1172–1191.

Tzempelikos, A., Athienitis, A. & Zmeureanu, R., 2007. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, Volume 81, p. 369–382.

Tzempelikos, A., Bessoudo, M., Athienitis, A. & Zmeureanu, R., 2010. Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices – Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties.. *Build. Environ* 45, p. 2517–2525.

- Tzempelikos, A. & Roy, M., 2004. A Simulation Design Study for the Facade Renovation.. *Montreal: Canadian Solar Buildings Conference.*
- Tzikopopoulos, A., Karatza, M. & Paravanits, J., 2005. Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings. *Energy and Buildings*, Volume 37, pp. 529-544.
- USGBC, 2020. Daylight. Retrieved November 14, 2020 from: <https://www.usgbc.org/credits/healthcare/v4-draft/eqc-0>.
- Valladares-Rendón, L., Schmid, G. & Lo, S.-L., 2017. Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems. *Energy and Buildings*, Volume 140, pp. 458-47.
- Van denDobbelsteen, A., Thijssen, S. & Colaleo, C. V., 2007. Ecology of the building geometry-environmental performance of different building shapes. *Proceeding of the CIB World Building Congress*, 14–17 May.
- Vera, S., Bustamante, W., Molina, G. & Uribe, D., 2016. A flexible and time-efficient schedule-based communication tool for integrated lighting and thermal simulations of spaces with controlled artificial lighting and complex fenestration systems. *Building performance simulation*, 9(4), pp. 382-396.
- Vermeulen, T., 2014. *Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire*, France: s.n.
- Vincke, P., 1989. *L'aide multicritère à la décision*. l'Université de Bruxelles éd. s.l.:s.n.
- Wald, L., 2020. *Introduction au rayonnement solaire*. Paris: Presses des Mines.
- Weber, W. et al., 1991. *Soleil et architecture - Guide pratique pour le projet*, Berne: Office central fédéral des imprimés et du.
- Winther, F., 2013. *Intelligent glazed facades—an experimental study*, in: *PhD, DCEThesis No. 43*, s.l.: s.n.
- Wong, N. H. & Djoko, A. I., 2004. Effect of external shading devices on daylighting penetration in residential buildings. *Lighting Research & Technology*, 36(4), p. 317–333.
- Wong, N. H. & Djoko, A. I., 2004. Effect of external shading devices on daylighting penetration in residential buildings. *Lighting Research & Technology*, 1 December, 36(4), p. 317–333.
- Wu, Z. & Abdul-Nour, G., 2020. Comparison of Multi-Criteria Group Decision-Making Methods for Urban Sewer Network Plan Selection. *CivilEng*, Issue 1, pp. 26-48.
- Yannas, S., 1994. *Solar energy and housing design*. London: Architectural association.
- Yao, J. & Yan, C., 2011. Evaluation of The Energy Performance of Shading Devices based on Incremental Costs.. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, pp. 450-452.

Yi , H., Srinivasan, R. & Braham, W., 2015. An integrated energy–energy approach to building form optimization: use of EnergyPlus, energy analysis and Taguchi-regression method.. *Building Environment*, Volume 84, p. 89–104.

Ylitalo, et al., 2012. Thermal performance of external roller blinds retrofit for offices in the United Kingdom. *Proceedings of the 3rd international conference on Engineering, Project and Production Management EPPM2012, University of Brighton, UK, 10–11th September.*

Yüceer, N. S., 2012. An Approach to overhang Design, Istanbul Example. *Solar Radiation* , p. 315 322.

Yun, G., Yoon, K. & Kim, K., 2014. The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings. *Energy Build*, Volume 84, p. 70–85.

Yu, W., 1992. ELECTRE TRI : Aspects méthodologiques et manuel d'utilisation. *Document du Lamsade* , Issue 74.

Zain-Ahmed, A., Sopian, K., Othman, M. & Sayigh, A., 2002. Daylighting as a passive solar design strategy in tropical buildings: a case study of Malaysia.. *Energy Conserv. Manag.*, 13(43), p. 1725–1736.

Zerefosa, S. C. et al., 2012. The role of building form in energy consumption: The case of a prismatic building in Athens. *Energy and Buildings*, Volume 48, p. 97–102.

Zhang, A., Bokel, R. & van den Dobbels, A., 2017. The Effect of Geometry Parameters on Energy and Thermal Performance of School Buildings in Cold Climates of China.. *Sustainability*, 9(1708).

Zopounidis , C. & Pardalos, P. M., 2010. *Handbook of multicriteria analysis*. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag.

Zopounidis, C. & Doumpos, M., 2002. Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. *European Journal of Operational Research*, Issue 138, pp. 229-246.

*Annexes*