

Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'architecture
Réf:.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المعمارية
المرجع.....

Thèse de DOCTORAT en Sciences

Spécialité : Architecture

Thème

**UTILISATION DES SYSTEMES EXPERTS DANS L'EVALUATION DES
AMBIANCES LUMINEUSES INTERIEURES.
CAS DES ALGORITHMES GENETIQUES ET/OU LOGIQUE FLOUE**

Présentée par :

Keltoum TAYEB

Soutenu publiquement le : 2019

Devant le Jury :

Dr. BENABBES Moussadek	Professeur	Président	Université de Biskra.
Dr. ZEMMOURI Nouredinne	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra.
Dr. ALKAMA Djamel	Professeur	Examineur	Université de Guelma.
Dr. ROUAG-SAFFIDINE Djamila	Professeur	Examineur	Université de Constantine.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire de conception et de modélisation des formes et des ambiances architecturales et urbaines (LACOMOFA) de l'Université de Biskra.

*Je remercie chaleureusement **Monsieur Noureddine ZEMMOURI**, Professeur à l'Université de Biskra d'avoir dirigé ma thèse et de m'avoir guidé tout au long de mes recherches, Je le remercie plus particulièrement car il m'a donné le goût de la recherche et d'entamer un travail de recherche destinés à l'étude des aspects liés à l'intégration de la modélisation dans le domaine de la conception architecturale. Je tiens aussi à le remercier, en tant que directeur du laboratoire LACOMOFA pour la confiance qu'il m'a fait en m'accueillant comme doctorante et membre permanent au sein du laboratoire.*

*Je tiens à remercier également les membres du jury, **Pr. BENABBES Moussadek**, **Pr. ALKAMA Djamel** et notre chère **Pr. ROUAG-SAFFIDINE Djamila** pour avoir accepté d'examiner ce travail. Un grand merci...*

Mes remerciements vont aussi à tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour.

A tous mes collègues du département d'architecture de l'université de BISKRA, ainsi que toute l'équipe de notre laboratoire (LACOMOFA). Je remercie aussi tous ceux qui m'ont encouragé, et Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues de travail au sein du département.

DEDICACES

A mes parents, mes sœurs et mes frères

A toute ma famille

A mes amis.....

RESUME

L'éclairage naturel est un facteur environnementale qui permet d'avoir, un confort, physiologique, physique et psychologique. Ainsi en l'exploitant correctement on peut aboutir non seulement à un bien être total de l'utilisateur (performance visuelle, état de satisfaction de l'esprit) mais aussi d'assurer un environnement fonctionnel, conformental et peu énergivore.

Néanmoins, vu le comportement aléatoire et souvent incontrôlable de la lumière naturelle, plusieurs architectes/concepteurs du bâtiment, optent pour l'alternative de l'éclairage artificiel plus maîtrisable mais bien plus énergivore que le premier. Ainsi, il est plus que nécessaire, d'élaborer des moyens/outils d'aide à la conception d'un environnement lumineux en adéquation avec les exigences de confort visuel de l'utilisateur.

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'évaluation des ambiances lumineuses, tels que : les méthodes d'évaluation in situ / sur maquette, mesure, questionnaire et enfin par simulation numérique.

Ce travail s'est intéressé de près à ce dernier type d'évaluation et il concerne une modélisation & optimisation de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un espace. La méthode de Split Flux Formula, est employée pour le développement d'un premier outil, offert pour la modélisation tridimensionnelle des ambiances lumineuses. Un second outil est proposé et qui a permis d'optimiser l'éclairage naturel à l'intérieur d'un espace où nous avons proposé une méthode d'optimisation basée sur la minimisation de l'erreur entre les valeurs de référence et les valeurs réelles de l'éclairage.

Le potentiel en énergie thermique de la lumière ne permet pas de passer outre, et d'associer à l'étude la dimension thermique. Pour cela, nous proposons dans ce travail un troisième outil, qui permet de prévoir l'influence des paramètres architecturaux, adoptés pour l'amélioration de l'ambiance lumineuse, sur la qualité de l'ambiance thermique.

Plusieurs modèles mathématiques et numériques ont été développés et implémentés sous environnement MATLAB et qui ont permis de concevoir des codes de calcul tridimensionnel destinés à l'étude des phénomènes liés à un éclairage purement naturel et aux phénomènes thermiques existants dans un espace architectural. Comme cas d'étude, nous avons modélisé & optimisé l'environnement lumineux/thermique d'une salle de classe située dans la ville de Biskra.

Mots clés : Simulation, Optimisation, éclairage naturel, ambiances lumineuses, ambiances thermiques, confort visuel, confort thermique.

الملخص

الإضاءة الطبيعية عامل بيئي يوفر الراحة الفسيولوجية، الجسدية والنفسية. استغلالها بشكل صحيح داخل المباني يمكن من تحقيق راحة كاملة للمستخدم وأيضا يمكن من ضمان بيئة وظيفية مريحة وموفرة للطاقة.

نظراً إلى السلوك العشوائي والغير القابل للتحكم في كثير من الأحيان للإضاءة الطبيعية ، يختار العديد من المهندسين المعماريين / مصممي المباني ، البديل و ذلك باستعمال الإضاءة الاصطناعية الأكثر قابلية للتحكم ولكنها الأكثر استهلاكاً للطاقة. من الضروري إذن ، تطوير الوسائل / الأدوات للمساعدة في تصميم بيئة الإضاءة بما يتماشى مع متطلبات الراحة البصرية داخل المباني.

تم تطوير العديد من الطرق لتقييم أجواء الإضاءة مثل : طرق تقييم الموقع / نموذج الحجم الطبيعي ، طرق القياس والاستبيان ، وأخيراً طرق المحاكاة الرقمية.

باستعمال المحاكاة الرقمية، يهدف هذا العمل الى تطوير الوسائل التي قد تستعمل في نمذجة وتحسين الإضاءة الطبيعية داخل المباني. في الأداة الأولى تم استخدام طريقة 'Split Flux Formula' اين تم اقتراح أداة فعالة والتي تم استخدامها اساساً للنمذجة ثلاثية الأبعاد للمشاهد الضوئية داخل المباني. كذلك تم اقتراح أداة ثانية والتي سمحت بتحسين الإضاءة الطبيعية داخل المباني حيث اقترحنا طريقة تحسين الإضاءة و التي تعتمد على تقليل الخطأ بين القيم المرجعية والقيم الحقيقية للإضاءة.

لا تسمح إمكانات الطاقة الحرارية للضوء بالذهاب إلى أبعد من ذلك دون الربط مع دراسة البعد الحراري. لهذا الغرض ، نقترح في هذا العمل أداة ثالثة ، والتي تسمح للتنبؤ بتأثير المعلمات المعمارية ، المعتمدة لتحسين البيئة المضيئة ، على جودة البيئة الحرارية.

لتحقيق الأهداف المسطرة في هذا البحث، تم تطوير وتنفيذ العديد من النماذج الرياضية والعديدية في ظل بيئة 'MATLAB' والتي سمحت بتصميم نظام حساب ثلاثي الأبعاد مخصص لدراسة الظواهر المتعلقة بالإضاءة الطبيعية البحتة والظواهر الحرارية الموجودة في الفضاء المعماري. كدراسة حالة ، قمنا بنمذجة وتحسين البيئة المضيئة / الحرارية لقاعة قسم دراسي يقع في مدينة بسكرة.

كلمات البحث : المحاكاة ، التحسين ، الإضاءة الطبيعية ، المحيط الضوئي، المحيط الحراري، الراحة البصرية ، الراحة الحرارية.

TABLE DE MATIERES

REMERCIEMENT	I
DEDICACE	II
RESUME	III
SOMMAIRE	V
TABLE D'ILLUSTRATIONS	XI
LIST DES TABLEAUX	XXI

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION.....	1
PROBLEMATIQUE.....	3
HYPOTHESES.....	6
OBJECTIFS.....	6
METHODOLOGIE.....	7

LA PREMIERE PARTIE

CHAPITRE I :

ECLAIRAGE NATUREL DANS LE BATIMENT

I. INTRODUCTION.....	11
I.1. AVANTAGES DE LA LUMIERE DU JOUR.....	12
I.2. ARCHITECTURE ET LUMIERE NATURELLE.....	15
I.3. L'INTEGRATION DE LA LUMIERE NATURELLE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION :	23
I.3.1. LA PREMIERE PHASE, LA PHASE D'ETABLISSEMENT.....	24
I.3.2. LA SECONDE PHASE, LA PHASE DE CONCEPTUALISATION	24

Table de matières

I.3.3. LA TROISIEME PHASE, DE MATERIALISATION.....	28
I.3.4. LA PHASE DE CONCEPTION DETAILLEE.....	29
I.4. LE CONFORT VISUEL.....	32
I.4.1. ECLAIRAGE OPTIMAL.....	34
I.4.2. LES RAPPORTS DE LUMINANCE.....	38
I.4.3. ABSENCE D'EBLOUISSEMENT.....	39
I.4.4. DES CONTRASTES APPROPRIES.....	42
I.4.5. UN RENDU CORRECT DES COULEURS.....	43
I.5. LE CONFORT THERMIQUE.....	48
I.6. RELATION ENTRE CONFORT VISUEL ET CONFORT THERMIQUE.....	51
I.7. CONCLUSION.....	54

Chapitre II

REVUE DES NOTIONS D'AMBIANCES ARCHITECTURALES ET URBAINES

I. INTRODUCTION.....	56
II.1. AMBIANCES ARCHITECTURALES ET URBAINES.....	57
II.2. AMBIANCES LUMINEUSES.....	59
II.3. LES PRINCIPAUX PARAMETRES DES AMBIANCES LUMINEUSES.....	63
II.4. TYPES D'AMBIANCES LUMINEUSES.....	64
II.4.2.1. LA PENOMBRE.....	65
II.4.2.2. L'AMBIANCE LUMINESCENTE.....	66
II.4.2.3. AMBIANCE INONDEE.....	67
II.5. AMBIANCE LUMINEUSE ET AMBIANCE THERMIQUE.....	68
II.6. CONCLUSION.....	73

CHAPITRE III :

**METHODES DE MODELISATION NUMERIQUES DES AMBIANCES
LUMINEUSES ET THERMIQUES**

III. INTRODUCTION.....	75
III.1. MODELISATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL DANS UN ESPACE ARCHITECTURAL.....	76
III.2. EXEMPLES DE LOGICIELS DE MODELISATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL.....	77
III.3. METHODES DE CALCUL DE L'ECLAIRAGE.....	80
III.3.1. METHODE DE RADIOSITE.....	80
III.3.2. METHODE DE LANCER DE RAYONS.....	81
III.3.3. METHODE DE SPLIT FLUX FORMULA.....	82
III.3.4. METHODE DE PHOTON MAPPING.....	83
III.4. LA SIMULATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL PAR UNE APPROCHE DIRECTE ET INVERSE.....	84
III.4.1. METHODES DE SIMULATION INVERSE DE L'ECLAIRAGE NATUREL.....	85
III.4.2. METHODES DE SIMULATION DIRECTE DE L'ECLAIRAGE NATUREL.....	91
III.5. LA SIMULATION THERMIQUE DANS LES BATIMENTS	93
III.5.1. EXEMPLES DE LOGICIELS UTILISES DANS LA SIMULATION THERMIQUE DES BATIMENTS.....	95
III.5.2. MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR.....	96
III.5.2.1. TRANSFERT PAR CONDUCTION.....	96
III.5.2.2. TRANSFERT PAR CONVECTION.....	97
III.5.2.3. TRANSFERT PAR RAYONNEMENT.....	97
III.5.3. EQUATION DE LA CHALEUR.....	97
III.5.4. RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA CHALEUR.....	99
III.5.4.1. DIVERSES METHODES NUMERIQUES DE RESOLUTION.....	99
III.5.4.1.1. METHODE DES ELEMENTS FINIS (MEF).....	99
III.5.4.1.2. METHODES DES INTEGRALES DE FRONTIERE.....	100
III.5.4.1.3. METHODE DES DIFFERENCES FINIS (MDF).....	100
III.5.4.1.4. METHODE DES VOLUMES FINIS (MVF).....	100

III.6. CONCLUSION.....101

LA DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE IV :

**PROPOSITION DE PROCEDES DE :
MODELISATION DES AMBIANCES LUMINEUSES
ET THERMIQUES**

IV. INTRODUCTION.....104

IV.1. DEVELOPPEMENT D'UN CODE DE CALCUL DEDIE A LA
SIMULATION/OPTIMISATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL105

IV.1.1 ALGORITHME DU CODE DE CALCUL DEDIE
A LA SIMULATION DIRECTE DE L'ECLAIRAGE NATUREL106

IV.1.1.1. PHASE 1. INTRODUIRE LES PROPRIETES
GEOMETRIQUES DU PROBLEME.....107

IV.1.1.2. PHASE 2. LA CREATION DU MAILLAGE.....108

IV.1.1.3. PHASE 3. BASE DE DONNEES.....110

IV.1.1.4. PHASE 4. CALCUL DES
ANGLES.....110

IV.1.1.5. PHASE 5. AFFECTATION.....110

IV.1.1.6. PHASE 6. RESOLUTION.....111

IV.1.1.7. PHASE 7. EXPLOITATION DES RESULTATS.....118

IV.2. ALGORITHME D'OPTIMISATION.....118

IV.3. RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA TEMPERATURE PAR LA MVF.....120

IV.4. CONCLUSION.....123

CHAPITRE V :

**RESULTATS DE SIMULATIONS DES
PERFORMANCES THERMIQUES**

V. INTRODUCTION.....126

V.1. RESULTATS DES SIMULATIONS (PARTIE THERMIQUE).....132

V.1.1. RESULTATS DES SIMULATION POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT SEPT FENETRES REPARTIE SUR UNE SEULE FAÇADE DURANT UNE PERIODE FROIDE.....	136
V.1.2. INFLUENCE DE L'EMPLACEMENT DE LA SALLE DE CLASSE SUR LE PROFIL DE LA TEMPERATURE INTERIEURE.....	151
V.1.2.1. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LA PREMIERE CONFIGURATION.....	154
V.1.2.2. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LA DEUXIEME CONFIGURATION.....	156
V.1.3. PROFIL DE LA TEMPERATURE INTERIEURE POUR UNE SALLE DE CLASSE BILATERALE DURANT UNE PERIODE FROIDE.....	158
V.1.4. RESULTATS DES SIMULATION POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT SEPT FENETRES REPARTIE SUR UNE SEULE FAÇADE DURANT UNE PERIODE CHAUDE.....	165
V.1.5. PROFIL DE LA TEMPERATURE INTERIEURE POUR UNE SALLE DE CLASSE BILATERALE DURANT UNE PERIODE CHAUDE.....	170
V.2. CONCLUSION.....	175

CHAPITRE VI :

RESULTATS DES SIMULATIONS DES AMBIANCES LUMINEUSES

VI. INTRODUCTION.....	179
VI.1. RESULTATS DES SIMULATIONS.....	184
VI.1.1. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT TROIS FENETRES.....	189
VI.1.1.1. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LE MOIS DE MARS	189
VI.1.1.2. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LE MOIS DE JUIN.....	199
VI.1.1.3. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LE MOIS DE SEPTEMBRE.....	201
VI.1.1.4. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LE MOIS DE DECEMBR.....	203

Table de matières

VI.1.1.5. INTERPRETATIONS DES RESULTATS DES SIMULATIONS PRESENTES.....	205
VI.1.2. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT SIX FENETRES.....	207
VI.2. OPTIMISATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUES DES FENETRES INTEGREES AUX NIVEAUX DES FAÇADES NORD ET SUD.....	222
VI.3. CONCLUSION.....	228
CONCLUSION GENERALE.....	231
PERSPECTIVES.....	236
BIBLIOGRAPHIE.....	237

Table illustrations

CHAPITRE I

N°	Figure	Source	N p
Figure I.1	Panthéon de Rome	https://commons.wikimedia.org	16
Figure.I.2.	De gauche à droite : Ptah, Amon-Rê, Ramses II et Rê-Horakhty	http://www.passion-egyptienne.fr/Abou%20Simbel.htm	17
Figure.I.3.	L'intérieur de la cathédrale Saint-Etienne réalisée par Guillaume de Sens entre 1135 et 1164	(Brun 2014)	19
Figure.I.4.	Palais des Expositions, Turin (Italie), Vue intérieure de chantier	https://expositions-virtuelles.citedelarchitecture.fr .	21
Figure.I.5.	Le pavillon allemand de l'exposition universel de Barcelone en 1929	http://www.apartime.com/fr/guide-de-barcelone/attractions-touristiques/mies-van .	22
Figure.I.6.	Le multiplexe <u>Kristallpalast</u> de l' <u>UFA</u> , à <u>Dresde</u> , en 1998.	https://fr.wikiloc.com/itineraires-marcher/dresden-de-norte-a-sur-	23
Figure.I.7.	Eglise Chiesa San Antonio abate, (Église de Recoaro)	(SALVIONE-DESCHAMPS 2013)	26
Figure.I.8.	Espace intérieur de l'église Chiesa San Antonio abate, (Église de Recoaro)	(SALVIONE-DESCHAMPS 2013)	27
Figure.I.9.	Maquette réalisée pour l'étude de l'éclairage naturel du CNIT-La Défense	https://moodle.epfl.ch/course/view .	29
Figure.I.10.	Exemple représentatif sur la répartition spatiale de l'éclairage à l'intérieur d'un édifice, (DIALux Support).	https://www.dial.de/en/dialux/support	30
Figure.I.11.	Paramètres du confort visuel	http://www.mysti2d.net/legarros/AC/07/Le%20confort%20visuel/	34
Figure.I.12.	Un exemple d'éblouissement	https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm	39
Figure.I.13.	Les trois composantes d'un éblouissement, directe et indirecte, réfléchi et crée par effet de voile	https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm	40
Figure.I.14	Trois situations différentes vis-à-vis le contraste offert pour un même niveau d'éclairement au niveau du plan de travail.	https://www.energieplus-lesite.be/index.php	42

CHAPITRE II

N°	Figure	Source	N p
Figure.II.1.	Eléments composants les ambiances.	(Hégron, 2010)	58
Figure.II.2.	Ambiance architecturale vécue.	(Chaabouni, 2011)	62
Figure.II.3.	Ambiance lumineuse vécue	(Chaabouni, 2011)	62
Figure.II.4.	Les éléments principaux d'une ambiance lumineuse .	(Sutter 2014)	64
Figure.II.5.	Eglise Saint-Etienne-Nevers (1063-1097).	(Gallas 2013).	66
Figure.II.6.	Hôtel Mercure à Blois, créés par l'architecte d'intérieur Nicolas Thermed	http://www.lilylatifi.com/actualites/textile-et-architecture-interieur .	67
Figure.II.7.	Exemple d'une ambiance inondée.	https://www.standardpro.com/fr/revue-des-principes-declairagisme/	67
Figure.II.8.	Les dimensions intervenant dans la conception d'une ambiance lumineuses.	(Chaabouni, 2011).	71
Figure.II.9.	L'influence de certaines propriétés techniques sur les ambiances, thermiques et acoustiques.		72

CHAPITRE III

N°	Figure	Source	N p
Figure.III.1.	Une scène d'éclairage intérieur donné par LIGHTSCAPE	http://www.3dsvf.com/modules/publish/Logiciels_4821.html	77
Figure.III.2	Une scène d'éclairage intérieur donné par ECOTECT.	http://logiciels.i3er.org/ecotect	79
Figure.III.3.	Exemple d'une scène du calcul de l'éclairage dans un espace intérieur ainsi que le maillage adopté pour la méthode de radiativité	http://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2016/FRA/?guid=GUID-C5A3C77B-794B-4444-9783-	81
Figure.III.4.	Démonstration de la méthode de lancer des rayons dans un espace architectural	(Bendekkiche 2017).	82

Table d'illustrations

Figure.III.5.	Les trois composantes de l'éclairage représentant la composante globale de l'éclairage dans un point donné, (méthode de split flux formula).		83
Figure.III.6.	Principe de la méthode du photon mapping.	(Deroisy, 2011).	84
Figure.III.7.	Simulation directe des effets d'ambiances.	(Siret 1997)	85
Figure.III.8.	Simulation inverses des d'ambiances.	(Siret 1997)	86
Figure.III.9.	Processus d'un algorithme évolutionnaire.	(Gallas 2013).	90
Figure.III.10.	Algorithme de simulation directe.	Source : auteur	93
Figure.III.11.	Maillage du domaine d'étude.	(Patankar, 1981)	101

CHAPITRE IV

N°	Figure	Source	N p
Figure.IV.1.	Organigramme représentant l'ensemble des blocs intervenant dans le code de calcul développé et implémenté sous environnement MATLAB.	Source : auteur	107
Figure.IV.2.	Exemple d'une salle de classe ayant trois fenêtres placées au niveau d'une seule façade.	Source : auteur	108
Figure.IV.3.	Volumes élémentaires constituant le maillage adopté	Source : auteur	108
Figure.IV.4.	Exemple du maillage crée à l'intérieur d'une salle de classe dotée de trois fenêtres.	Source : auteur	109
Figure.IV.5.	Angles définissant la position du soleil et l'élément du ciel	(Darula 2002).	113
Figure.IV.6.	Les trois composantes de l'éclairage représentant la composante globale de l'éclairage dans un point donné, (méthode de split flux formula).	Source : auteur	115
Figure.IV.7.	Illustration des paramètres géométriques (ds, α et β) adoptés dans les formulations IV.8, IV.9 et IV.10.	Source : auteur	116
Figure.IV.8.	Illustration des paramètres géométriques (i, j, R) adoptés dans la formulation IV.10.	Source : auteur	117
Figure.IV.9.	Algorithme d'optimisation	Source : auteur	119

Table d'illustrations

Figure.IV.10.	Volume élémentaire de la MVF.	(Patankar, 1981)	120
---------------	-------------------------------	------------------	-----

CHAPITRE V

N°	Figure	Source	N p
Figure.V.1.	la composition des murs latéraux et le plafond d'une salle de classe.	Source : auteur	134
Figure.V.2.	Températures extérieurs pour les journées du 21 Mars, 21 Juin et le 21 Décembre.	Source : auteur	134
Figure.V.3.a.	Vue tridimensionnelle de la salle de classe à modélisé.	Source : auteur	136
Figure.V.3.b.	Le maillage adopté à l'intérieur.	Source : auteur	137
Figure.V.4.	Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant 7 fenêtres pour la journée du 21 Décembre.	Source : auteur	140
Figure.V.5.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres.	Source : auteur	141
Figure.V.6.	Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant 7 fenêtres.	Source : auteur	142
Figure.V.7.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	143
Figure.V.8.	Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'extérieur vers l'intérieur.	Source : auteur	144
Figure.V.9.	Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	145
Figure.V.10.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan (X-Z) à des différents positions (y) pour la journée du 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	147

Table d'illustrations

Figure.V.11.	Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe sans fenêtres pour la journée du 21 Décembre respectivement à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur et de l'extérieur vers l'intérieur	Source : auteur	148
Figure.V.12.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle au centre des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur, pour une salle respectivement, avec et sans fenêtres	Source : auteur	148
Figure.V.13.	Différence entre température d'une salle de classe n'ayant pas de fenêtres et autre doté de sept fenêtres réparties sur une seule façade, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h.	Source : auteur	149
Figure.V.14.	Profil de la température moyenne en fonction de la hauteur de la salle de classe (z) à 10h et à 14h pour une salle de classe avec et sans fenêtres et pour un flux de chaleur orienté respectivement de l'extérieur vers l'intérieur et de l'intérieur vers l'extérieur pour la journée du 21 Décembre.	Source : auteur	150
Figure.V.15.	Ecart entre températures pour une salle de classe avec et sans fenêtres en fonction de la hauteur de la salle (z) à 10h et à 14h et pour un flux de chaleur orienté respectivement de l'extérieur vers l'intérieur et de l'intérieur vers l'extérieur pour la journée du 21 Décembre.	Source : auteur	151
Figure.V.16.	CEM MAHMOUD HOUHOU. Composé de 3 à salles répartie sur un bloc en Mono-rangée.	Source : auteur	152
Figure.V.17.	CEM HLIMI RACHID, les salles de classe sont regroupées en un seul bloc mono- rangée.	Source : auteur	152
Figure.V.18.	CEM 'FRERES BARKET', les salles de classes sont regroupées dans deux blocs séparés par un couloir, formant ainsi, une double rangée. Le premier bloc est composé de trois salles, le second est composé de cinq salles de classes.	Source : auteur	153
Figure.V.19.	CEM 'GHAMRI HOCINE', les salles de classes sont regroupées en deux ou trois salles dans deux blocs séparés par un couloir intermédiaire.	Source : auteur	153
Figure.V.20.	Les conditions aux limites pour la première configuration.	Source : auteur	154
Figure.V.21.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur, les conditions aux limites sont celle présentées dans la configuration 1 .	Source : auteur	155
Figure.V.22.	Les conditions aux limites pour la deuxième configuration.	Source : auteur	156
Figure.V.23.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur, les conditions aux limites sont celle présentées dans la configuration 2 .	Source : auteur	157

Table d'illustrations

Figure.V.24.	Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant quatorze fenêtres réparties sur deux façades, pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	160
Figure.V.25.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	161
Figure.V.26.	Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	162
Figure.V.27.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan (X-Z) à des différentes positions (y) pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	163
Figure.V.28.	Profil de la température moyenne en fonction de la hauteur de la salle de classe (z) à 14h pour une salle de classe avec quatorze fenêtres et une classe n'ayant aucune fenêtres pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur pour la journée du 21 Décembre.	Source : auteur	164
Figure.V.29.	Ecart entre températures pour une salle de classe avec quatorze fenêtres et une autre n'ayant aucune fenêtres en fonction de la hauteur de la salle (z) à 10h et à 14h, pour la journée du 21 Décembre.	Source : auteur	164
Figure.V.30.	Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant sept fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h.	Source : auteur	165
Figure.V.31.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	167
Figure.V.32.	Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h.	Source : auteur	168
Figure.V.33.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan (X-Z) à des différentes positions (y) pour la journée du 21 Juin à 14h.	Source : auteur	169
Figure.V.34.	Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant quatorze fenêtres réparties sur deux façades, pour la journée du 21 Juin à 14h.	Source : auteur	171
Figure.V.35.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h.	Source : auteur	172

Table d'illustrations

Figure.V.36.	Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	173
Figure.V.37.	Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan (X-Z) à des différents positions (y) pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.	Source : auteur	174

CHAPITRE VI

N°	Figure	Source	N p
Figure.VI.1.	Les trois composantes d'éclairément prise en compte dans le code développé.	Source : auteur	184
Figure.VI.2.a.	Plan des CEM conçu à partir des salles réparties dans une seule rangé. Exemple : plan RDC du CEM Khamla Ibrahim.	Source : auteur	186
Figure. VI.2.b.	Plan des CEM conçu à partir des salles réparties en deux rangées.	Source : auteur	186
Figure. VI.2.c.	Façade des salles de classe de quelques CEM inspectés dans la ville de BISKRA. Celles-ci sont dotées de trois, quatre et sept fenêtres.	Source : auteur	187
Figure.VI.3.	Vue tridimensionnelle du problème modélisé ainsi que le maillage adopté pour résoudre le problème.	Source : auteur	189
Figure.VI.4.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairément au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars à 10 h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord.	Source : auteur	190
Figure.VI.5.a.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairément au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord.	Source : auteur	191
Figure.VI.5.b.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairément au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord.	Source : auteur	191
Figure.VI.6.	Répartition bidimensionnelle de l'éclairément au sein d'une salle de classe pour le 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H (les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord).	Source : auteur	192
Figure.VI.7.	Profil bidimensionnelle de l'éclairément au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans des niveaux présentés sont ceux placés : en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres.	Source : auteur	193

Table d'illustrations

Figure.VI.8.	Répartition 3D de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars, respectivement à 10h et à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Sud.	Source : auteur	194
Figure.VI.9.	Profil 2D de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans des niveaux présentés sont ceux placés : en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres orientées vers le S.	Source : auteur	195
Figure.VI.10.	Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9m$ pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans le cas où les fenêtres sont orientées selon les façades N et S.	Source : auteur	196
Figure.VI.11.	Répartition spatiale du rapport ($\Delta E = \text{Eclairage}/\text{Eclairage}_{\min}$) selon le plan du travail défini par le niveau $z = 0.9m$, pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans le cas où les fenêtres sont orientées selon les façades N et S.	Source : auteur	197
Figure.VI.12.	Répartition spatiale du rapport ΔE selon le plan central portant les fenêtres pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans le cas où les fenêtres sont orientées selon les façades Nord et S	Source : auteur	197
Figure.VI.13.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Juin, respectivement à 10h et à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le N et Vers le S	Source : auteur	199
Figure.VI.14.	Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9m$ pour la journée du 21 Juin respectivement à 10 h et à 14 h dans le cas où les fenêtres sont orientées selon la façade Sud.	Source : auteur	199
Figure.VI.15.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Juin à 10 h et à 14h où les fenêtres sont placées selon les façades orientées vers le Nord et vers le Sud.	Source : auteur	200
Figure.VI.16.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Septembre, respectivement à 10h et à 14h.	Source : auteur	201
Figure.VI.17.	Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9m$ pour la journée du 21 Septembre respectivement à 10 h et à 14 h dans le cas où les fenêtres sont orientées selon la façade Sud.	Source : auteur	201

Table d'illustrations

Figure.VI.18.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Septembre à 10h et à 14h où les fenêtres sont placées selon les façades orientées vers le Nord et vers le Sud.	Source : auteur	202
Figure.VI.19.	Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9\text{m}$ pour la journée du 21 Décembre respectivement à 10 h et à 14 h dans le cas où les fenêtres sont orientées selon la façade Sud.	Source : auteur	203
Figure.VI.20.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Juin à 10 h et à 14h où les fenêtres sont placées selon les façades orientées vers le Nord et vers le Sud.	Source : auteur	204
Figure.VI.21.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars, respectivement à 10h et à 14h pour une configuration bilatérales.	Source : auteur	209
Figure.VI.22.	Répartition bidimensionnelle de l'éclairage sur le plan de travail pour la journée du 21 Mars, respectivement à 10h et à 14h pour une configuration bilatérales.	Source : auteur	209
Figure.VI.23.	Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour les journées du 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h pour une configuration bilatérales.	Source : auteur	210
Figure.VI.24.	Contours représentant le FLJ sur le plan de travail supposé maintenu au niveau $z = 0.9\text{m}$ pour une salle de classe ayant 6 fenêtres.	Source : auteur	213
Figure.VI.25.	Contours représentant le FLJ dans la zone I.	Source : auteur	213
Figure.VI.26.	Contours représentant le FLJ dans la zone II.	Source : auteur	214
Figure.VI.27.	Contours représentant le FLJ dans la zone III.	Source : auteur	214
Figure.VI.28.	Contours représentant le FLJ dans la zone IV.	Source : auteur	215
Figure.VI.29.	Contours représentant la répartition de l'éclairage dans la zone I.	Source : auteur	217
Figure.VI.30.	Contours représentant la répartition de l'éclairage dans la zone II.	Source : auteur	219
Figure.VI.31.	Contours représentant la répartition de l'éclairage dans la zone III.	Source : auteur	219
Figure.VI.32.	Contours représentant la répartition de l'éclairage dans la zone IV.	Source : auteur	220
Figure.VI.33.	Les surfaces proportionnelles à chaque zone distinguée à l'intérieur de la salle de classe.	Source : auteur	220

Table d'illustrations

Figure.VI.34.	Erreurs relative en fonction des dimensions des fenêtres pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h. Les résultats présentés sont ceux obtenus pour $E_{c_{réf}}=500\text{Lux}$.	Source : auteur	225
Figure.VI.35.	Erreurs relative en fonction des dimensions des fenêtres pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h. Les résultats présentés sont ceux obtenus pour $E_{c_{réf}}=350\text{ Lux}$.	Source : auteur	225
Figure.VI.36.	Profil bidimensionnel de l'éclairement dans le plan de travail pour des dimensions optimisées, les résultats sont présentés à titre indicatif à 14h pour le mois de Septembre.	Source : auteur	226
Figure.VI.37.	Profil bidimensionnel de l'éclairement dans la plan de travail avec $L_y = L_z = 1.2\text{m}$, les résultats sont présentés à titre indicatif à 14h pour le mois de Septembre.	Source : auteur	226
Figure.VI.38.	Contours représentant la répartition de l'éclairement sur le plan de travail, les dimensions des ouvertures sont celles obtenues par optimisation.	Source : auteur	227

Liste des tableaux

CHAPITRE I

N°	Tableau	Source	N p
Tableau I.1.	Facteurs modificateurs du niveau de l'éclairage selon Serra et Coch	(Bendekkiche, 2017)	35
Tableau I.2.	Quelques valeurs de référence de l'éclairage naturel selon le plan de travail	http://www.afe-eclairage.fr/docs/362-ext.pdf	36
Tableau.I.3.	Relations entre facteur de la lumière du jour et impressions visuelle, impression de clarté et ambiance créée.	(Siret, 1997)	38
Tableau.I.4.	Valeurs IRC et la qualité de la perception des couleurs.	https://www.energieplus-lesite.be/index.php	44
Tableau.I.5.	Relation entre confort visuel et confort thermique.	(Vittone, 2010)	53

CHAPITRE IV

N°	Tableau	Source	N p
Tableau.IV.1.	Quelques valeurs représentants le facteur de réflexion des surfaces extérieurs, intérieurs et certaines valeurs du coefficient de transmission lumineuse du vitrage.	https://www.energieplus-lesite.be/index.php	110
Tableau.IV.2.	Valeurs de α_s et γ_s pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre à 10 H et à 14H.	www.sunearthtools.com	113

CHAPITRE V

N°	Tableau	Source	N p
Tableau.V.1.	Paramètres géométriques et thermiques du problème thermique à modéliser	Littérature, auteur	135

CHAPITRE VI

N°	Tableau	Source	N p
Tableau.VI.1.	Paramètres géométriques et physiques du problème à modélisé	Littérature, auteur	188
Tableau.VI.2	Les angles déterminants la position du soleil pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et enfin le 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h.	Littérature	206
Tableau VI.3.	l'emplacement de la zone considérée, impression de clarté, impression visuelle du local et enfin ambiance en fonction du facteur de lumière du jour	(Magali & Arnaud).	211
Tableau VI.4.	Emplacement de la zone considérée, impression de clarté, impression visuelle et enfin ambiance en fonction du facteur de lumière du jour dans chacune des zones considérées (Zones I, II, III et IV).	Source : auteur	221

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

Des efforts considérables sont investis pour exploiter les énergies renouvelables dans différents domaines, tels que ceux liés à la production de l'électricité ou de l'énergie thermique afin de remplacer des sources fossiles, périssables et parfois très polluantes, par des sources naturelles et écologiques. Ceci permettra de réduire la quantité des déchets produits par l'exploitation des énergies renouvelables offertes gratuitement et qui sont disponibles pour l'éternité.

Le domaine de l'engineering est considéré comme responsable pour cerner le problème d'exploitation des sources naturelles où chaque branche et selon ses compétences, doivent exploiter les bénéfices offerts par des sources d'énergies, purement naturelles et renouvelables. Dans le domaine des énergies renouvelables, les experts du domaine de l'électricité, doivent exploiter les sources naturelles pour produire une qualité meilleure de l'électricité et couvrir au mieux, les demandes de la consommation en énergie électrique qui ne cesse d'augmenter. Dans le domaine des matériaux, les experts du domaine doivent procéder aux développements des techniques qui permettent d'avoir des cellules solaires et qui peuvent exploiter au maximum les rayons solaires dans la production de l'électricité. Dans le domaine architectural, les concepteurs jouent un rôle primordial et fondamental dans l'exploitation des énergies naturelles, considérées comme renouvelables et non-polluantes, pour procurer à l'utilisateur de meilleures conditions de confort. Les concepteurs doivent proposer des édifices où l'éclairage artificiel sera remplacé par un éclairage purement naturel. Ceci permettra de réduire considérablement, la consommation énergétique dans le secteur immobilier estimé de plus d'un tiers de la consommation énergétique globale, en particulier dans les pays développés, et de réduire ainsi, l'émission de dioxyde de carbone CO₂ (Lesage, 2013) engendrée principalement par la production énergétique pour l'éclairage électrique dans le secteur immobilier.

La lumière naturelle offre des avantages bénéfiques pour le développement durable. Celle-ci doit être dominante dans les espaces intérieurs. Cette démarche doit être incitée par les concepteurs qui doivent procurer des espaces qui peuvent exploiter les avantages d'une source naturelle. En effet, les avantages de la lumière du jour ne se limitent pas dans le cadre du développement durable, mais elle couvre aussi, d'autres avantages liés au bien être des

individus. La lumière naturelle joue un rôle primordial voir fondamental pour assurer aux occupants un confort intérieur tout en assurant, un confort psychologique, thermique et surtout un confort visuel où tout changement de lumière induit à des modifications de notre perception de l'espace architectural (Reiter. 2005). L'exploitation de la lumière naturelle dans un espace intérieur permet de réduire considérablement les contraintes physiques et psychologiques (ED 82) (Cantin 2008). Elle offre aussi des avantages physiologiques où elle est considérée comme avantageuse pour le système visuel et circadien humain. Un espace éclairé par la lumière naturelle contribue alors à l'amélioration des performances des occupants et elle offre beaucoup d'avantages comparés à un espace doté d'un éclairage artificiel (Cantin 2008).

LA PROBLEMATIQUE

Selon la nature des espaces conçus ainsi que le type des tâches réservées dans ces espaces, la prise en compte de l'éclairage naturelle dans la conception architecturale joue un rôle primordial dans l'amélioration de la qualité des ambiances offertes. Considéré comme élément fondamental, la lumière naturelle est au cœur des besoins architecturaux où elle a une grande influence sur le confort visuel et sur la qualité architecturale des espaces intérieurs (Chaabouni, 2011). Elle collabore à l'esthétique de l'architecture ; L'éclairage, support physique de l'ambiance lumineuse, est un équilibre entre l'espace et la lumière, elle la dévoile, révèle l'espace et crée l'ambiance... (Tourre, 2007).

Le concepteur se trouve confronter à exploiter une source d'énergie non-contrôlable et dépendante des conditions méthodologiques. L'éclairage offert par ce type de source est dépendant des paramètres architecturaux où le concepteur doit intervenir convenablement pour offrir une bonne qualité de lumière et ayant une quantité suffisante liée aux besoins des occupants. Le concepteur doit agir pour offrir un niveau d'éclairement adéquat et dépendant des activités exercées aux seins des édifices. Il doit aussi intervenir sur plusieurs éléments en agissant sur la distribution lumineuse, les rapports de luminance, les ombres, l'éblouissement et la température des couleurs, les ouvertures et leurs emplacements, pour offrir des espaces ayants une qualité supérieure du confort visuel. Face à tous ces éléments, le concepteur joue un rôle primordial pour offrir des édifices avec un éclairage naturel suffisamment adoptés aux besoins des occupants et une conception qui donne une meilleure visibilité vers l'extérieur

tout en respectant les échanges thermiques, l'éblouissement et les nuisances sonores. Le concepteur doit agir sous l'effet de plusieurs conditions et contraintes aléatoires et incontrôlables, où l'éclairage naturel dépend de l'heure, du jour, de la saison, de la position et de la trajectoire du soleil, de la clarté et de type du ciel, de la position du soleil et de l'emplacement géographique du projet architectural.

Le concepteur se trouve face à un problème défini par plusieurs paramètres, où il doit concevoir pour offrir des lieux qui doivent offrir un meilleur confort visuel. Des lieux où les occupants peuvent voir les objets avec un minimum d'effort. Des lieux où la lumière ne doit être ni forte ni faible où elle doit être optimale avec une répartition harmonieuse et ayant un spectre lumineux bien adapté à la sensibilité de l'œil et qui lui permet, de distinguer les couleurs pour donner une meilleure vision aux objets ²⁹. Le confort visuel dépend de plusieurs paramètres tels que l'intensité et de la lumière offerte, de sa répartition et de sa qualité. Il fait appel généralement à six facteurs déterminants pour pouvoir offrir un espace intérieur ayant un confort visuel idéal. Ces facteurs sont respectivement (Stellman 2000), un éclairage optimal, une luminance optimale, l'absence d'éblouissement, des contrastes appropriés, un rendu correct des couleurs et l'absence de fluctuations lumineuses. D'autres facteurs peuvent intervenir pour agir sur la qualité du confort visuel offert.

Toutes ces considérations doivent être prises en considération par le concepteur dès le début d'un projet architectural. Pour exploiter au maximum les bénéfices de la lumière naturelle, où elle doit être répartie uniformément sur l'ensemble des surfaces intérieures avec un niveau d'éclairement, optimal. Et qui permettra d'atteindre une répartition agréable, et satisfaisante dans le but d'offrir des lieux de bien-être par la conservation du contact mutuel, et direct avec l'environnement extérieur, offrant des lieux ayant un meilleur confort psychologique et visuel.

Face à tous ces éléments, le concepteur se trouve perdu devant un problème ayant une multitude de paramètres à définir et de les prendre en considération. La complexité du problème à résoudre est liée principalement à l'étude de l'ambiance visuelle offerte par une source naturelle peut induire le concepteur vers l'erreur et vers les mauvaises décisions.

²⁹ L'éclairage naturel dans les bâtiments.', https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm#ancree04

Aussi, le concepteur peut agir sur certains éléments architecturaux dans le but d'améliorer la qualité de l'ambiance visuelle. Ces éléments peuvent contribuer à l'amélioration de la qualité de l'ambiance lumineuse, cependant, elle peut détériorer d'autres ambiances, principalement celles liées à l'ambiance thermique.

A partir de là, certaines questions liées aux ambiances interviennent et qui sont :

- Comment peut-on élaborer un outil de prédiction de la qualité des ambiances, visuelle et thermique, afin de permettre aux concepteurs d'agir, avant et au cours de la conception d'un projet architectural, sur certains éléments architecturaux pour améliorer la qualité des ambiances intérieures ?
- Est-il possible de développer une méthode simplifiée qui permet d'atteindre un compromis entre simultanément ambiances lumineuse et thermique ?
- Peut-on considérer les outils actuels pour la modélisation (numérique) comme suffisant pour la simulation qualitative et quantitative des ambiances lumineuse et thermique ?

LES HYPOTHESES

Afin de pouvoir répondre aux questionnements précédemment cités, la présente étude propose les hypothèses principales suivantes :

Hypothèse principale 1

- La méthode de modélisation tridimensionnelle basée sur l'exploitation des méthodes directes de calculs de l'éclairage naturel permet de prédire de manière plus exhaustive la qualité des ambiances lumineuses intérieures.

Sous hypothèse

- La méthode de simulation directe basée sur l'exploitation des méthodes mathématico-numériques proposée permet aussi l'optimisation de l'éclairage naturel à l'intérieur des espaces conçus en agissant sur certains éléments architecturaux.

Hypothèse 2

- Vu l'indissociation de la lumière de son potentiel énergétique, la simulation directe permet de déterminer le comportement thermique de l'environnement intérieur et ainsi, l'interaction simultanée ambiance lumineuse/ ambiance thermique.

LES OBJECTIFS

Dans ce travail de recherche nous nous sommes intéressés à l'étude des ambiances dans les espaces architecturaux, en particuliers celles liées aux ambiances, visuelles et thermiques. Les objectifs à atteindre à travers ce travail sont :

- Le développement d'un outil de modélisation destiné à la simulation & à l'optimisation de l'éclairage naturel à l'intérieur des édifices qui permet d'une part, de prédire la qualité de cet éclairage. Il constitue un outil d'aide à la conception. Ce dernier permet la prise de décisions relatives aux paramètres architecturaux optimisant la qualité des ambiances lumineuses.
- Les outils développés doivent être plus performants par rapport aux outils déjà existants.
- Le développement d'un second outil, pour la prédiction de la qualité de l'ambiance thermique intérieure et la détermination de l'interaction confort visuel induit et qualité de l'ambiance thermique.

LA METHODOLOGIE

Dans ce contexte, plusieurs méthodes peuvent être exploitées pour offrir des outils d'aide à la conception. Ces outils doivent permettre de prédire les comportements des édifices et d'offrir ainsi, la possibilité d'intervenir au cours de la conception d'un projet architectural pour améliorer la qualité des ambiances offertes.

Pour la qualité du confort visuel offert par un éclairage naturel et via ces outils, le concepteur peut intervenir sur plusieurs paramètres architecturaux pour améliorer la qualité du confort offert. Le concepteur peut agir par exemple sur la forme, sur les orientations, sur les ouvertures en agissant sur leurs emplacements, leurs nombres et leurs dimensions. Le concepteur peut adopter les moyens des simulations directes de l'éclairage naturel pour

prédire la qualité du confort visuel offert par un éclairage naturel. La simulation directe de l'éclairage naturel exploite les méthodes de résolution des problèmes directes et qui expose les interactions formes/ phénomènes (Siret 1997). Ces méthodes permettent de déterminer les interactions entre la forme et les phénomènes physiques dans le but de présenter leurs effets et d'interpréter ainsi, les effets d'ambiances résultantes. Bien que ces méthodes présentent un outil de prédiction et un outil d'aide à la conception architecturale. Ces derniers, ne permettent pas de formuler, de manipuler ou d'atteindre les intentions envisagées et liées aux ambiances (Siret 1997). Ces méthodes ne peuvent agir sur les paramètres architecturaux dans le but d'atteindre les intentions discernées, car elle part déjà d'un problème bien définis et ayant une forme architecturale déterminée avec un ensemble d'éléments physiques bien précis. Ces méthodes sont souvent adoptées comme outils d'évaluation des performances atteintes. Ils peuvent être aussi exploités comme outils de correction où le projet est considéré comme étant un processus de type essai-erreur. Le projet sera défini à partir d'une forme initiale (essai) où elle sera corrigée progressivement par plusieurs tests de simulation et selon les erreurs atteintes et qui traduisent la différence entre les attentes souhaitées et les résultats obtenus par les simulations. D'autres méthodes peuvent être exploitées pour remédier aux inconvénients des méthodes directes. Il s'agit d'adopter les méthodes de résolution des problèmes en inverses. Des méthodes qui peuvent rendre effective la dynamique du projet autour des ambiances. La résolution du problème inverse permettra d'atteindre les attentes où elle assure un passage entre intensions et formes en définissant un effet capable de contraindre les formes (Siret 1997). Ce passage entre intensions et création de forme par l'intermédiaire d'effets, définit le processus de simulation inverse des ambiances dans les projets architecturaux.

Nous nous engageons alors dans ce travail a adopté les méthodes de calcul directe et inverse, pour développer un outil de simulation directe de l'éclairage naturel et à l'optimisation de certains paramètres architecturaux et qui permettent d'atteindre les objectifs désirés. Les outils développés doivent être s'adapté à n'importe quels types de ciel où ils peuvent prendre en considération les quinze types de ciels normalisés par la CIE. Les outils développés doivent s'adapter à la modélisation d'un projet architectural et qu'il soit à n'importe quel emplacement. Les outils développés doivent adopter un calcul tridimensionnel et apte à introduire des modèles, soient de calcul ou d'optimisation. Pour la méthode d'optimisation adoptée dans les outils développés, nous allons proposer une méthode, qu'on a appelée,

méthode paramétrique, exploitée principalement pour déterminer certains éléments qui permettent d'atteindre certaines intensions liées à l'éclairage naturel.

Pour aborder cette problématique nous avons divisé notre mémoire en deux parties : La première partie représente les définitions théoriques des fondements de notre travail où elle s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre intitulé ' **Eclairage naturel dans le bâtiment** ', nous avons présenté les avantages apportés par la lumière naturelle dans un bâtiment, si celle-ci est correctement prise en compte dans un projet architectural où nous avons exposé, la relation mutuelle entre la lumière naturelle et le projet architectural ainsi que les expériences menées au fil de l'histoire où le concepteur a adopté la lumière naturelle, pour déclarer certaines intensions liées soit à leurs croyances ou à leurs traditions. Dans une partie de ce chapitre, nous avons dévoilé quelques méthodes qui peuvent être exploitée pour permettre aux concepteurs d'intégrer, la lumière naturelle dans le processus de conception et qui permettent d'avoir une qualité meilleure de l'éclairage naturel aux seins des édifices tout en assurant un confort visuel agréable. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté la relation entre confort visuel/confort thermique ainsi que les éléments principaux influant sur la qualité des deux types de confort.

Le deuxième chapitre intitulé ' **Revue des Notions d'Ambiances Architecturales et Urbaines** ' met l'accent sur la définition des ambiances architecturales et urbaines, en particulier, celle liée à l'environnement lumineux intérieur. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté l'interaction entre ambiances lumineuse/ thermique.

Le troisième chapitre intitulé ' **Méthodes de Modélisation des Ambiances Lumineuses et Thermiques** ', consiste un point de départ vers la modélisation des ambiances lumineuses et des ambiances thermiques dans le bâtiment. Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des méthodes qui peuvent être adoptées pour la modélisation de l'éclairage naturel aux seins des édifices. Un état de l'art sur les méthodes ainsi que les outils de modélisation offerts pour la modélisation de l'éclairage naturel a été largement présenté. L'approche directe et l'approche inverse ont été exposées où nous avons adopté les deux approches, pour proposer un outil de simulation & d'optimisation pour la modélisation de l'éclairage naturel dans le bâtiment. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté les modèles

mathématiques et numériques qui nous ont permis de modéliser le comportement thermique des édifices, où nous avons adopté, l'équation de diffusion de la chaleur et la méthode des volumes finis pour résoudre le problème défini par une équation aux dérivées partielles.

La deuxième partie de la thèse répartie en **trois chapitres**, comporte dans l'ensemble, les modèles mathématiques, numériques et physiques et qui ont permis de concevoir, sous environnement MATLAB, des codes de calcul tridimensionnel, destinés à la modélisation/optimisation de l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments et de simuler l'interaction simultanée entre les ambiances lumineuse et thermique. Dans cette partie, les résultats des simulations sont largement présentés et interprétés.

Dans *le quatrième chapitre* intitulé '**Modélisation des Ambiances Lumineuses et Thermiques**', nous avons présenté la structure des codes de calcul développés ainsi que leurs modes d'implémentation sous environnement MATLAB. Les différentes phases adoptées pour le développement des outils de modélisation ont été résumées dans des organigrammes de calcul où nous avons largement présenté, les différents blocs des codes de calcul développés. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté les avantages offerts par les outils développés comparés à d'autres modèles déjà existants.

Dans *le cinquième chapitre*, intitulé '**Résultats de Simulations des Performances Thermiques**', les résultats de simulation des performances thermiques à l'intérieur des bâtiments sont présentés où nous avons montré l'influence des ouvertures sur le comportement thermique des édifices ainsi que sur la qualité du confort thermique offert.

Le sixième chapitre, intitulé '**Résultats de Simulations des Ambiances Lumineuses**' représente les résultats des simulations des ambiances lumineuses à l'intérieur d'un bâtiment obtenus à partir des codes de calcul développés.

Chapitre I

Eclairage naturel dans le bâtiment

Chapitre I

Eclairage naturel dans le bâtiment

I. INTRODUCTION

Le souci majeur d'un architecte est d'abriter l'homme dans des lieux sains avec les meilleures conditions de confort à l'intérieur d'un édifice et de le protéger des conditions de l'environnement extérieur. Considéré comme acteur principal, l'architecte est confronté d'une part à assurer des espaces isolés de l'environnement extérieur pour limiter les dissipations thermiques via les échanges et le transfert de chaleur entre milieux à travers les parois d'un édifice, mais en autre partie, il doit exploiter le potentiel de l'environnement extérieur pour améliorer la qualité du confort intérieur, principalement le confort visuel. L'architecte doit agir correctement pour libérer les façades, généralement considérées comme des parois d'une conception, de leurs rôles basique et de permettre à la lumière du jour, de pénétrer à l'intérieur des espaces dans le but d'offrir une lumière naturelle qui crée des ambiances diverses selon les dimensions et l'emplacement des ouvertures adoptées.

Confronté à deux types de sources d'éclairage, naturel et artificiel, l'architecte doit agir pour exploiter les bénéfices de chacune des sources pour améliorer la qualité de vie à l'intérieur d'un espace et d'offrir un meilleur confort visuel aux occupants d'un projet architectural. Cependant et vu le comportement aléatoire et incontrôlable d'un éclairage naturel, plusieurs architectes optent pour un éclairage artificiel maîtrisable et contrôlable (Reiter. 2005). L'architecte ne doit pas négliger les qualités inhérentes offertes par un éclairage naturel et de le remplacer par un éclairage artificiel, il doit procéder pour favoriser un éclairage purement naturel dans le but d'améliorer la perception dans un espace et pour assurer un rôle, qui dépasse largement celui offert par un éclairage artificiel adopté principalement pour permettre de voir à l'intérieur d'un édifice, mais d'introduire une liaison

directe avec le milieu externe et un contact visuel avec l'environnement extérieur. Louis Khan (Meiss 2004) préoccupé par le rôle primordial de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un espace explique par poésie la nécessité de renforcer l'éclairage naturel dans un espace

en exploitant au mieux les sources naturelles. Louis Khan insiste sur le renforcement de l'éclairage naturel et de remplacer l'éclairage artificiel par un éclairage purement naturel où il dit : *“L'éclairage artificiel n'est rien qu'un petit moment de lumière figé : il est lumière de la nuit et ne pourra jamais remplacer toutes les nuances de l'atmosphère créées par les heures de la journée et le miracle des saisons.”* Ou encore : *“lorsqu'on est convaincu que la lumière naturelle est un de nos composants essentiels, alors on ne peut accepter une école sans lumière naturelle. On ne peut pas accepter une salle de cinéma-qui me diriez-vous réclame l'obscurité- sans avoir la sensation qu'il doit bien y avoir quelque part dans la construction une fissure qui laisse rentrer suffisamment de lumière pour nous expliquer combien il fait sombre. En fait, il ne s'agit pas là d'un besoin réel mais d'une demande spirituelle fondamentale.”* (Meiss 2004).

I.1. AVANTAGES DE LA LUMIERE DU JOUR :

Considérée comme source primaire, le soleil offre les différentes formes de lumières qu'elle soit, directe ou indirecte formant ainsi, la lumière du jour. Cette lumière doit être adoptée comme source d'éclairage à l'intérieur d'un édifice car elle peut offrir le bien-être et le confort des occupants. Ce confort contribue à la diminution importante du stress et des pressions exercées sur les individus, en particulier dans les espaces de travail. Cela a été entamées dans plusieurs études menées sur l'influence de l'éclairage naturel sur le bien être des individus où il a été montré que la présence des fenêtres dans les espaces de travail améliorent la satisfaction des employés dans les lieux de travail et diminuent considérablement le stress et la pression du travail exercée sur le personnel dans un espace de travail (Stellman 2000). La lumière du jour agit positivement alors sur la santé physique et morale des occupants où il a été démontré qu'il existe un lien entre la lumière et la dépression par l'intermédiaire de la sérotonine considéré comme un régulateur de l'humeur, du sommeil et de l'appétit (Riou-Milliot 2015). L'éclairage naturel provenant essentiellement de l'infiltration de la lumière du jour à l'intérieur d'un espace peut offrir les bienfaits de la

lumière du soleil. Cette lumière, considérée comme un synchronisateur du rythme biologique d'un individu, peut être considérée comme un régulateur d'horloge interne et elle intervient aussi dans la synchronisation du sommeil des individus (Riou-Milliot 2015). En outre, la lumière du jour présente aussi des repères temporels (rythme naturel des saisons, d'une journée : jour/nuit, et mêmes des heures) et spatiaux (orientation cardinales). La lumière du jour peut même arborer les conditions atmosphériques et météorologiques via sa variabilité, sa couleur, son intensité et son contraste (Constans 2012).

Qu'il soit un espace de vie ou de travail, la lumière du jour pénétrant l'intérieur d'un espace à travers les ouvertures des façades et les fenêtres adoptées, permet de garder un contact direct et mutuelle avec l'environnement extérieur et d'être en liaison avec le milieu environnement, notamment pour donner et garder constamment une vue agréable qui donne sur un paysage naturel ou même sur un décor personnalisé. Ces fenêtres qui sont considérées comme source de lumière et qui offrent un éclairage naturel, peuvent attribuer à l'amélioration du côté esthétique du projet architectural.

Un éclairage naturel qui permet d'améliorer les conditions du travail et qui améliore la qualité du confort visuel à l'intérieur d'un espace, présente aussi des impacts économiques considérables car il permet de réduire largement la consommation énergétique, si celle-ci est correctement prise en compte avant et au cours de la conception d'un projet architectural. En effet, la consommation énergétique affectée pour un éclairage artificiel est considérée comme très importante (Reiter. 2005). L'intégration de la lumière du jour à l'intérieur des édifices permet de réduire les charges d'un éclairage purement artificiel. Indiquons comme exemple la consommation énergétique adoptée principalement pour l'éclairage des bureaux peut être réduite de 30% à 50% si la lumière du jour est correctement intégrée à l'intérieur des bureaux (Reiter. 2005). L'éclairage naturel apporte alors des gains en réduisant considérablement les factures de consommation dans les bâtiments en minimisant le recours à l'éclairage artificiel. La bonne gestion de l'éclairage naturel permet aussi d'apporter des bénéfices économiques en réduisant les charges du chauffage en profitant pleinement des gains solaires provenant de la lumière du jour et en réduisant les frais du refroidissement en limitant les apports de la chaleur provenant essentiellement des lampes par le remplacement des sources d'éclairage artificiel par des sources purement naturelle et renouvelable (Reiter. 2005). Outre que la productivité qui peut être augmenté par le confort et le bien être des travailleurs dans leurs

lieux du travail, des études ont montré (GREGOIRE 2017) que le confort par un éclairage naturel peut augmenter les ventes des magasins et des grandes surfaces commerciales.

L'éclairage naturel issu de la lumière du jour (soleil à la base) apporte alors des gains et des bénéfices économiques où il est considéré comme le mode d'éclairage le plus performant et qui peut offrir les meilleures conditions d'un confort visuel si celui-ci est correctement pris en compte à l'intérieur d'un édifice. L'éclairage naturel qui offre le bien être des occupants tout en assurant un confort visuel peut leurs offrir alors des avantages physiologiques et psychologiques. Dans le cadre du développement durable, la conception des immeubles en concordance avec leur environnement fait inscrire le climat parmi les dimensions fondamentales de l'architecture (Reiter. 2005). Sachant que l'éclairage naturel mène à réduire ou même à éliminer totalement l'utilisation de l'éclairage artificiel, il limitera la consommation d'énergie nécessaire pour la mise en œuvre de l'éclairage artificiel. En conséquence, l'éclairage naturel contribue à la diminution des rejets du CO₂ dans l'atmosphère. Dans certains pays comme par exemple la Belgique, l'intégration de l'éclairage naturel, couplé à un éclairage artificiel dans de nombreux bâtiments, rapporte entre 20% et 70% d'économie d'énergie en termes de consommations d'éclairage (Dachelet 2007). L'adaptation alors d'un éclairage naturel dans les édifices se traduit indirectement par une diminution importante des déchets produits par la consommation permanente et importante des énergies, qui sont généralement des énergies fossiles. Outre ces déchets produits au cours du fonctionnement des immeubles. Le remplacement de l'éclairage artificiel par un éclairage purement naturel permet d'économiser un nombre important de lampe, qui se traduit par la suppression des systèmes adoptés pour le recyclage du gaz qu'elle renferme (Reiter. 2005).

Jusqu'à ce jour, il demeure difficile d'assurer le contrôle de la qualité et la quantité de la lumière naturelle pénétrant un édifice. Le progrès technologique en matière d'éclairage artificiel permet souvent un meilleur contrôle et une grande efficacité énergétique. Cette alternative, s'adapte aux exigences des occupants à l'intérieur d'un édifice, selon l'heure et selon la saison, voir même selon l'activité exercé. De plus, l'industrie de l'éclairage artificiel a pris une nette longueur d'avance sur les techniques d'éclairage naturel (Adolphe 1998). Cependant, les enjeux liés à un éclairage naturel ainsi que ses impacts sur les individus et sur l'environnement consolident l'idée de renforcer l'adaptation de l'éclairage provenant essentiellement de la lumière naturelle aux seins des bâtisses.

Les avantages et les inconvénients offerts par un éclairage purement naturel et par un éclairage artificiel ont mené à une confrontation historique entre ces deux types d'éclairages adoptés à l'intérieur d'un espace. Cette confrontation a débuté depuis le XVI^e siècle et elle a contribué à l'amélioration progressive de la qualité et de la quantité de la lumière à l'intérieur des espaces, dépendant principalement du développement des techniques du verre, des structures porteuses ou encore du coût de l'énergie (Adolphe 1998).

I.2. ARCHITECTURE ET LUMIERE NATURELLE :

En assurant le bien-être et la santé des occupants et en offrant les meilleures performances énergétiques en minimisant la consommation énergétique liée à un éclairage artificiel, de chauffage ou de climatisation, la lumière du jour est devenue une évidence dans le rôle est déterminant dans tout projet architectural. Il existe alors une relation primordiale entre l'architecture et la lumière du jour. Cette relation, existé depuis toujours et depuis très longtemps, a permis de développer des techniques et des moyens au cours de l'histoire de l'architecture qui ont permis au fil du temps, d'intégrer les structures des édifices pour offrir au mieux, une qualité meilleure d'un éclairage provenant principalement d'une source naturelle. La détermination de satisfaire nos besoins envers la lumière naturelle a permis aussi d'établir un arrangement et un lien direct entre la lumière naturelle et la forme d'un édifice tout au long de l'histoire de l'évolution de l'architecture. Depuis l'antiquité, les concepteurs ont joué un rôle fondamental dans le développement des moyens nécessaires pour l'amélioration de la qualité et de la quantité de la lumière du jour pénétrante les édifices. Durant cette époque considérée comme la plus ancienne, les concepteurs via des perforations implémentées dans les édifices ont permis à la lumière du jour de pénétrer l'intérieur d'un espace. L'exemple le plus cité (Gallas 2013 ; Sutter 2014 ; Bendekkiche 2017) est le Panthéon de Rome (Fig.I.1.) construit en premier siècle av. J-C et qui à été endommagé au cours de l'histoire par plusieurs incendies, puis restauré. Considéré comme le plus grand monument romain antique et qui a gardé un état sein au fil du temps. Ce monument reflète une relation coriace entre architecture et lumière du jour. Dans ce gigantesque monument, la lumière du jour pénètre l'intérieur à travers un oculus sommital de 8.7m de diamètre (Sutter 2014). Le fuseau de lumière pénétrant l'intérieur du monument via cette unique source est caractérisé par un découpage et par une intensité dépendante du type de ciel à l'extérieur du monument,

rendant ainsi, chaque instant à l'intérieur du monument visuellement unique (Sutter 2014) . Durant l'antiquité, la lumière du jour a été adoptée pour créer un lien spirituel avec les édifices conçus et de l'exploitée comme un outil d'expression et de reconnaissance de l'existence d'une puissance astrale (Gallas 2013). Les concepteurs agissaient sur l'emplacement des ouvertures et selon l'orientation et la position du soleil pour créer une configuration qui permet à la lumière du jour de pénétrer l'intérieur des espaces dans des zones précises et selon des dates significantes pour célébrer un événement religieux (Gallas 2013 ; Bendekkiche 2017).

La lumière du jour durant cette période reflète le côté mystérieux et incompréhensible provenant de l'inconnu et de l'incertitude. Elle a été exploitée pour enrichir des notions immatérielles et spirituelles où elle a associée la lumière à des puissances supérieures dépassant largement celle possédée par les hommes et selon leurs, croyances, leurs cultures et aussi leurs traditions. La lumière du jour a été toujours une des préoccupations des concepteurs dans l'antiquité en particulier, dans les édifices monumentaux ou même dans des



Figure I.1 : Panthéon de Rome ¹

¹ Panthéon de Rome : Site : <https://commons.wikimedia.org>.

lieux de cultes où la lumière a été exploitée pour révéler ces intérieurs et réanimer les sens des croyants. N'ayant aucune restriction religieuse en terme de lumière, le concepteur agissait librement en adaptant des différents dispositifs architecturaux pour adopter un profil typique, caractérisant le volume intérieur d'un édifice dans le but de créer des ambiances et d'avoir une atmosphère souhaitée (Lhomme 2017).

Les architectes ont exploité le flux lumineux traversant des percements fins pour créer des ambiances lumineuses spécifiques aux lieux cultes et pour refléter leurs croyances en lumière divine venant pour briser les ténèbres (Sutter 2014) . Les architectes égyptiens par exemple ont exploités plusieurs paramètres architecturaux tels-que, l'orientation, la périodicité de la lumière naturel, la position des fenêtres placées selon la position du soleil, pour concevoir leurs temples religieux des divinités de l'Egypte antique (Gallas 2013 ; Bendekkiche 2017). Ces paramètres ont permis aux concepteurs égyptiens d'exploiter la lumière du jour à l'intérieur des temples dans des zones précises et selon des dates bien définies dans le but d'exprimer leurs croyances liées à la vie et pour faire de la lumière naturelle, une preuve tangible de l'existence d'une force extérieur divine (Gallas 2013). Les temples égyptiens ont été orientées souvent vers l'axe Est-Ouest² dont le symbolisme dépend principalement de la course du soleil, ou selon leur croyance, du dieu du soleil qui se lève de l'Est et se couche à l'Ouest².

Pour certains de ces temples, comme par exemple le grand temple d'Abou Simbel, l'orientation coïncidée parfaitement avec la trajectoire du soleil pour permettre à l'éclairage naturel de pénétrer à l'intérieur du temple via la porte principale (Gallas 2013) pour atteindre certains de ces statues. En effet, le temple comporte quatre statues taillées dans la paroi rocheuse du mur du fond². L'orientation choisie ainsi que l'emplacement des statues permet à la lumière du jour, d'atteindre, le visage de la statue d'Amon puis celui du roi au lever du soleil de la journée du 20 octobre et d'atteindre aussi, le visage de la statue d'Horus puis celle du roi au lever du soleil de la journée du 20 Février. Grâce aux orientations choisies ainsi que le choix de l'emplacement des statues, la lumière du jour ne peut jamais atteindre la statue de Path car celui-ci est considéré comme un dieu chtonien².

² Temple égyptien. Site : <http://www.passion-egyptienne.fr/Abou%20Simbel.htm>.



Fig.I.2. De gauche à droite : Ptah, Amon- Rê, Ramses II et Rê-Horakhty ²

Au moyen-âge, la lumière naturelle a envahi les espaces intérieurs des édifices où elle a occupé une place beaucoup plus importante, en particulier au sein des lieux cultes où elle a donné une nouvelle vision des espaces en faisant signe de clarté, de transparence, d'illumination et d'intelligibilité (Sutter 2014). Cette apparition et ce changement est dû principalement à l'apparition de nouvelles techniques conceptuelles durant cette époque, telle (Sutter 2014) : le développement du vitrail, le pouvoir d'assemblage de plusieurs segments et qui a permis de réaliser des motifs (Sutter 2014) en les adaptant selon les lieux et selon leurs emplacements. Aussi, l'adoucissement des structures par la découverte de la voûte en ogive, de la croisée d'ogive et de l'arc-boutant (Sutter 2014) a contribué à l'amélioration de la qualité et de la quantité de lumière dans les espaces intérieurs. En effet, avec l'apparition de l'architecture gothique dans la seconde partie du moyen-âge, les édifices portés sur des piliers très minces dotés de voûtes illimitées et montant aux nues et ayant un nombre important de fenêtres (Corblet 1860), offrant ainsi, plusieurs sources d'un éclairage parfaitement naturel à l'intérieur des édifices via ces ouvertures est contribuant ainsi, à l'amélioration de l'intensité de la lumière intérieure. (Comme exemple l'intérieur de la cathédrale de Saint-Etienne réalisée par Guillaume de Sens entre 1135 et 1164 (Brun 2014).

Les concepteurs de cette époque, préoccupé par le développement de nouvelle méthode dans le but de mieux bâtir et faire face aux abus via les principales règles de l'architecture évoquée dans des périodes antérieures (Corblet 1860). En effet, selon la définition de l'architecture gothique donnée par L'ABBLE JUBERT, 'considéré *comme un juge éclairé des beaux-arts*', 'l'abus des principales règles de l'architecture fit naître une nouvelle méthode de bâtir que l'on nomma architecture gothique et qui a subsisté jusqu'à charlemagne qui entreprit de rétablir celles des anciens.'(Corblet 1860). Dans ces nouveaux règles, les concepteurs n'ont pas négligé la contribution des ouvertures quelle peut apporter, non seulement vis-à-vis un éclairage naturel, mais aussi, d'un côté esthétique, voir même, spirituelle. Les cathédrales conçues durant les époques antérieures ont été décrites comme étant, des édifices trop chargés et ayant de lourdes façades. Durant ces périodes et dans le souci de faire apparaitre la supériorité et la performance, l'ensemble d'éléments intégrés dans ces édifices ont été dénaturés comme par exemple, les ouvertures et les fenêtres qui apparaissent par leurs sculptures, au portail d'un temple (Corblet 1860).



Fig.I.3. L'intérieur de la cathédrale Saint-Etienne réalisée par Guillaume de Sens entre 1135 et 1164 (Brun 2014).

Au cours du moyen âge, les fenêtres implémentées dans les édifices avait des dimensions, d'emplacements et de formes différentes avec un nombre qui évolue et qui deviens plus important. Les fenêtres dans les édifices évolué d'un siècle à un autre où on trouve par exemple, dans des lieux cultes du VIIe siècle, des fenêtres qui offrent un ensemble d'ornements simple et ornées des moulures du temps, tenues par des colonnes ou par des pieds-droits, en particulier dans les grandes édifices où les fenêtres sont souvent escortées par des colonnes. Considérées comme moyen, leurs taux d'occupation a été dépendant de leurs emplacements avec un regroupement de deux à deux si celles-ci est placées dans les étages supérieurs et de trois à trois ci celles occupent le centre de l'édifice (Caumont 1841).

Durant l'époque moderne et avec les avancées industrielles, en particulier celles offertes pour améliorer le processus de conception de l'industrie verrière où elle à permet de créer un rapport et un lien direct entre espace, structure et enveloppe. Les concepteurs modernes ont adopté l'acier et le verre on les exploitants comme matériaux principaux dans la conception des édifices (Gallas 2013). Avec l'apparition des nouveaux matériaux, tels que le fer et le béton armé, l'architecture moderne c'est libéré de l'ordinaire pour s'opposer à la continuité et l'uniformité des structures et pour offrir une grande liberté aux seins des édifices en conquérant un maximum d'espace. La découverte du béton durant cette période, considérée comme la plus importante dans l'histoire de l'architecture moderne, a créé (Fanelli 2008) des espaces importants par la libération du sol et du plan, mais aussi, elle a donné une grande place à l'éclairage naturel ont lui permettant de pénétrer librement l'intérieur des édifices. Ceci par la libération des façades qui a permis d'avoir, une occupation beaucoup plus importante des fenêtres et des ouvertures pour pouvoir s'étaler librement le long des façades des édifices (Fanelli 2008). Durant cette période et avec l'apparition du mouvement moderne qui a³ endoctriné la réflexion et le savoir-faire des architectes par son appel à la conceptualisation de l'architecture. Où il a réclaté le fonctionnalisme et le rationalisme³, la lumière du jour a trouvé les meilleures conditions les plus favorables pour être plus exploitées et de créer une forte alliance entre architecture, modernisme, lumière naturelle, et matériaux de conception en particulier, le verre qui a été largement exploité durant cette époque.

³ Le Corbusier, les cinq point de l'architecture moderne'. Site : <http://www.art-twenty.com/le-corbusier-les-cinq-points-de-larchitecture-moderne>.



Fig.I.4. Palais des Expositions, Turin (Italie), Vue intérieure de chantier ⁴

L'apparition donc du verre a incité les concepteurs vers la recherche d'une nouvelle forme, plus dynamique et très indépendante où elle s'est détachée des contraintes imposées par des contextes antérieurs. Les édifices conçus durant la progression de l'architecture moderne ont adopté des éléments individuels avec une composition spécifique et dépendante du rôle affecté à chacun des éléments. Libéré de leurs rôles porteurs, les panneaux représentant les murs des édifices ont exploité les avancées technologiques pour être des panneaux en verre donnant ainsi, une relance vers une nouvelle architecture, appelée l'architecture du verre (Schittich 2001). Celle-ci a permis de donner une voie libre à la lumière du jour comparée à celle, offerte par les fenêtres ou même par des murs conçue par d'autres matériaux. La lumière du jour peut éclairer alors les édifices du sol au plafond tout en gardant une vue directe avec l'environnement extérieur. (Voir l'exemple (Fig.I.5) du pavillon allemand de l'exposition universel de Barcelone en 1929 (Schittich 2001). Un exemple représentant l'adaptation, des panneaux en verre à la place des murs classiques conçus par des matériaux en briques rouge ou autres.

⁴ Arch&Lumière. Site : <https://expositions-virtuelles.citedelarchitecture.fr>.



Fig.I.5. Le pavillon allemand de l'exposition universel de Barcelone en 1929 ⁵.

Avec les progrès et les avancées technologiques en particuliers celles liées à la découverte de nouveaux matériaux via les alliages connue dans le domaine de la métallurgie et dans le domaine de la physique, des matériaux ont été largement exploités dans des divers domaines, en particulier dans le domaine de l'urbanisme contemporain. A partir de ces découvertes, l'architecture contemporaine, pouvez librement exploiter l'idée de la notion de la légèreté et de l'indépendance des éléments adoptés dans le processus conceptuel. Ces progrès ont permis à l'adaptation de la notion de la clarté et de la transparence dans le domaine conceptuel des édifices, et créer ainsi, une nouvelle notion à l'architecture moderne, en donnant naissance à des nouveaux édifices, totalement transparent et en lien directe avec l'environnement extérieur. La découverte des panneaux en verres et des matériaux plus légers et ayant une grande résistance et avec les lois de la physique, associées aux retouches artistiques, l'architecture moderne a pu atteindre les limites des lois et des codes revendiquent l'ouverture de l'architecture. L'exemple de Kristallpalast de l'UFA à Dresde est un exemple concret de l'architecture ouverte dont la genèse des formes répond à une démarche d'écriture automatique qui réinjecte dans la conception du projet une dimension subjective et aléatoire.

⁵ Guide de Barcelone. Site : <http://www.apartime.com/fr/guide-de-barcelone/attractions-touristiques/mies-van>.



Fig.I.6. Le multiplexe Kristallpalast de l'UFA, à Dresde, en 1998 ⁶.

I.3. L'INTEGRATION DE LA LUMIERE NATURELLE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION :

Considéré comme élément primordial dans la génération de l'ambiance lumineuse au sein d'un espace architectural, la lumière naturelle doit être prise en compte dans le processus de conception dès les premières phases de la génération d'un projet architectural. L'intégration de la lumière du jour dans le processus de conception influe sur plusieurs éléments du processus architectural où elle affecte, la structure, la forme, l'orientation, l'enveloppe et sa composition et enfin le type de matériaux adoptés dans la conception.

L'intégration de la lumière du jour dans le processus de conception est une tâche qui s'avère très délicate et qui nécessite de définir plusieurs aspects physiques liés au projet architectural. Selon l'état d'avancement du projet et en s'adaptant aux informations disponibles liés au projet, Gallas organise cette intégration selon cinq principales phases qui sont respectivement : (les étapes décrites ci-dessous ont été décrites par Gallas (Gallas 2013)).

I.3.1. LA PREMIERE PHASE, LA PHASE D'ETABLISSEMENT (Gallas 2013) :

Il s'agit de la première phase où le concepteur doit prendre en compte la lumière du jour selon des valeurs ou des quantités en lumières, requise dans des espaces construits. Le besoin en lumière du jour est traduit en valeurs de référence saisies et désignées selon la nature des espaces et leurs exploitations, c'est à dire selon les tâches et les activités désignées dans chacun des espaces construits. En effet, une salle d'étude exigera des intensités en lumière plus élevée à celle offerte dans une salle de repos ou dans un hall de réception. Les valeurs de référence de l'éclairage sont désignées selon des normes imposées par des organismes de travail, où lié au secteur de l'urbanisme ou de la conception et de la construction architecturale (Gallas 2013). Les normes d'éclairage différent d'un pays à un autre et ils sont présentées aux concepteurs sous forme d'un cahier technique qui sert comme étant un référentiel pour élaborer un cahier de charge. Dans certains pays, Ces normes ¹¹, volontaires par essence, peuvent devenir obligatoires dans leur application s'il y est fait référence dans le cadre d'un marché public ou dans un texte juridique à caractère réglementaire ¹¹.

I.3.2. LA SECONDE PHASE, LA PHASE DE CONCEPTUALISATION (Gallas 2013) :

La conception d'un projet architectural est un des processus les plus compliqués et qui fait appel à l'intégration d'un ensemble de facteurs physiques et d'ambiances architecturales où le concepteur doit agir pour les prendre en compte, correctement et dès le départ d'un projet architectural. L'architecte doit s'adapter pour faire face à des objets dynamiques qui évoluent avec l'avancement du projet en prenant en compte toutes les possibilités et les contraintes offertes par le projet architectural. Pour l'ambiance lumineuse et en fixant les besoins et les attentes dans un premier temps sous forme de valeur de référence, le concepteur procédera dans un second temps à traduire les attentes visées dans un projet architectural sous forme d'un langage architectural.

¹¹ Lux, la revue de l'éclairage, Eclairage Public, Lieux de Travail, Stade. <http://www.afe-eclairage.fr/docs/362-ext.pdf>

La réflexion et la créativité de l'architecte peuvent intervenir pour répliquer les intentions attendues par un programme établie et qui représentera une droite gouvernante et qui aidera à faire le bon choix, par rapports aux contraintes liées aux attentes vis-à-vis un éclairage naturel, sain et confortable. L'architecte classe ces intentions selon leurs priorités d'où la création des intentions architecturales qui incite le concepteur à exploiter ces expériences, ces connaissances et selon les conditions offertes à trouver la démarche architecturale nécessaire et utile qui permettra d'atteindre les intentions envisagées et selon leurs ordres. L'architecte doit cerner les sources de l'éclairage naturel dans un édifice pour les localiser et désigner leurs emplacements via des ouvertures placées dans les parois d'un édifice dans le but d'exploiter au maximum les potentiels offerts par chaque espace et par son environnement. Le concepteur doit exploiter les spécificités offertes par chacune des composantes d'une source de lumière naturelle qu'elle soit, une lumière diffuse, directe, zénithale ou réfléchie. Le choix et les actions prises par le concepteur vont agir sur la qualité et sur la quantité de la lumière offerte au sein d'un espace et sur la répartition de la lumière dans des zones particulières, ou l'architecte veut donner un signe propre et spécifique à chaque espace, pour le distinguer et pour le mettre en valeur.

Chaque architecte agit d'une façon particulière envers la création d'une ambiance lumineuse au sein d'un édifice où il adopte son propre langage de communication entre la lumière et l'espace tout en exploitant les moyens architecturaux mettent à sa disposition pour atteindre les intentions architecturaux et selon leurs priorités envisagées. Un ensemble de points réunissent les préoccupations des architectes et leurs intentions, selon Selma Chaabouni, Ces préoccupations sont appuyées sur la qualité de la distribution de la lumière, le choix des dispositifs, les effets de la lumière... (Chaabouni 2008). La forme du projet ainsi que les ambiances créent à l'intérieur dépendra de ces préoccupations pour s'adapter aux intentions soulignées. Selon le Corbusier, *'la clé est la lumière, la lumière illumine les formes et les formes ont le pouvoir émotionnel'*¹². La lumière est alors un des facteurs primordiaux et intervenant dans le choix de la forme d'un édifice et dans la qualité des ambiances offertes à l'intérieur d'un projet. En effet, plusieurs formes des projets les plus admiré ont été conçues à partir des intentions liées à un éclairage prescrit (Reiter. 2005).

¹² extrait relevé du livre de Sigrid Reiter, André De Herde, 'L'éclairage naturel des bâtiments', Presses univ. de Louvain, 2005.

L'église de Chiesa San Antonio abate (Église de Recoaro) conçue par Giuseppe Vaccaro entre 1949-1963 fait partie de ces œuvres où l'éclairage naturel crée une ambiance liée au lieu caractérisé par sa spécificité religieuse.¹³ Ayant une forme rectangulaire et présentant une parfaite symétrie sur le sens transversal, l'éclairage naturel se projette à l'intérieur de l'édifice à travers plusieurs oculus percés et dissimulés dans la voûte de la nef conçue par un ensemble d'arcs elliptiques (Salvione-Deschamps 2013).

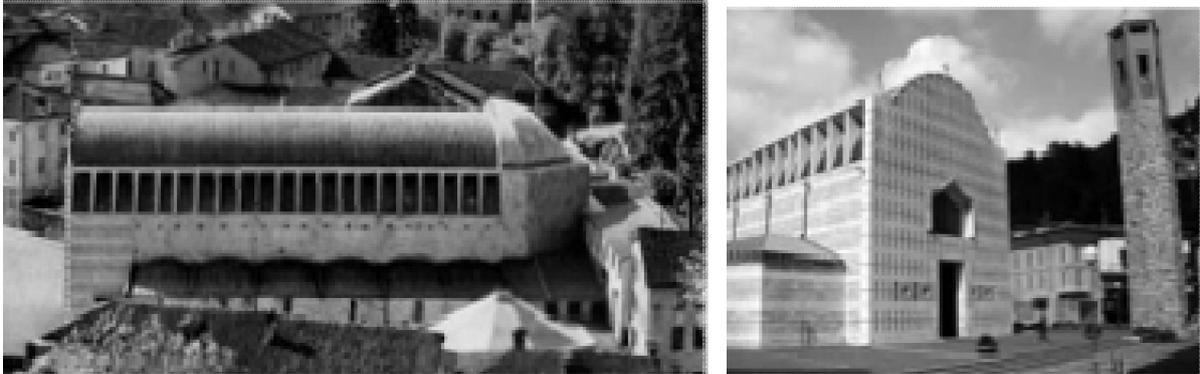


Fig.I.7. Eglise Chiesa San Antonio abate, (Église de Recoaro)¹³

La disposition des oculus répartie en alternance dans les arcs de la voûte et par l'appui de la lumière réfléchi sur les surfaces arrondi, permet à l'éclairage naturel de pénétrer l'intérieur de l'édifice qui maintient et qui offre une apparence dramatique de l'église¹³. Les parois de l'église à l'extérieur ont été conçues pour limiter la lumière du jour pénétrante l'intérieur de l'édifice à travers des lames réparties aussi en alternance et escortant les oculus lions les deux environnements, intérieur et extérieur¹³. La conception comporte une ouverture de forme lunule est intégrée dans la voûte implémentée dans un niveau supérieur et plus élevé à celui de la voûte principale. Cette disposition permet d'inonder le cœur d'une lumière qui est ensuite réfléchi vers le bas sur les surfaces intérieures de la voûte à quartiers¹³. La configuration adoptée dans cette église offre un éclairage singulier au niveau de la voûte du plafond de la nef principale¹³ qu'il lui offre une valeur esthétique particulière et donne une spécificité singulière à cette église grâce à la répartition particulière de la lumière du jour obtenu à partir du choix de la forme intérieure et extérieure.

¹³ Marie-Dina SALVIONE-DESCHAMPS, 'Décrire l'indicible : connaissance et sauvegarde de l'éclairage naturel dans l'architecture sacrée moderne occidentale.'. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2013.



Fig.I.8. Espace intérieur de l'église Chiesa San Antonio abate, (Église de Recoaro) ¹³.

Ceci renforce l'idée qu'une ambiance lumineuse dépendra principalement des décisions prises par le concepteur. La création des concepteurs dépendante principalement de l'imagination envers les formes adoptées et les structures intégrées dans un édifice agit sur la qualité et sur la quantité de la lumière. Elle agit aussi sur la répartition spatiale de la lumière où elle peut créer une ambiance particulière dans tout l'espace de l'édifice ou dans des zones particulières selon leurs signatures et leurs importances dans l'édifice. Dépendante du problème de conception, l'ambiance lumineuse selon CHAABOUNI est structurée selon des aspects récurrents incluant (Gallas 2013) : *le type de dispositif utilisé, la qualité des surfaces intérieures, la quantité de lumière, l'usage et le type d'effet de lumière produit.*

Selon Gallas (Gallas 2013), Au cours de cette phase, l'architecte peut prédire le comportement d'un espace vis-à-vis un éclairage naturel où il peut entrevoir la direction et la quantité d'un flux lumineux pénétrant un édifice ainsi que sa répartition. Le concepteur doit traduire toutes ces intentions et ces idées liées à la forme et dépendantes du projet à concevoir et selon les attentes via un éclairage naturel, sous un langage qui est traduit par un dessin développer par le concepteur. Ceci présente un moyen architectural en possession du

concepteur pour traduire ces pensées et ces intentions pour les concrétiser sous forme de configurations et des dessins représentant les espaces intérieurs et extérieurs. Le dessin alors présente un moyen de prédire la forme d'un espace ainsi que son environnement lumineux et il offre ainsi, un moyen de contrôle pour bien gérer l'ambiance lumineuse et de l'adapter selon les attentes et selon les espaces créés. Il présente alors un moyen en amont mis à la disposition du concepteur pour prendre en compte l'éclairage naturel, caractérisé par un aspect complexe et mal défini, dans la conception d'un projet architectural. Le dessin offre au concepteur le moyen de prendre les bonnes décisions liées à l'éclairage naturel par la comparaison des résultats prédictifs et selon les configurations adoptées ou proposées (Gallas 2013).

I.3.3. LA TROISIEME PHASE, DE MATERIALISATION (Gallas 2013) :

Il s'agit d'une phase où le concepteur, selon la méthode adoptée, doit assurer le passage vers la matérialisation du projet architectural développé à partir des intentions envisagées et développées dans les deux phases précédentes. Cette phase représente un passage à la conception d'un projet architectural ou le concepteur concrétise son projet et traduit les dessins et les formes développées, sur une échelle réduite, par la réalisation des maquettes représentatives du projet et qui peuvent refléter, correctement, le comportement réel du projet vis-à-vis un éclairage naturel (voir l'exemple de la maquette réalisée pour l'étude de l'éclairage naturel du CNIT-La Défense ¹⁴). Cette phase permet aux concepteurs de renforcer la certitude via la conformité des décisions prises et de rétablir certaines décisions induisant l'architecte vers l'erreur et d'introduire ainsi, des modifications en amont qui permettent à l'amélioration de la qualité de l'éclairage naturel à l'intérieur d'un édifice. Elle permet de prédire le comportement des édifices envers leurs ambiances lumineuses offertes et de la confronter aux attentes des occupants des lieux ou du concepteur lui-même.

¹⁴ PENS-313 : Espace et lumière : le projet d'éclairage, photo prise sur le site : <https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=3371>

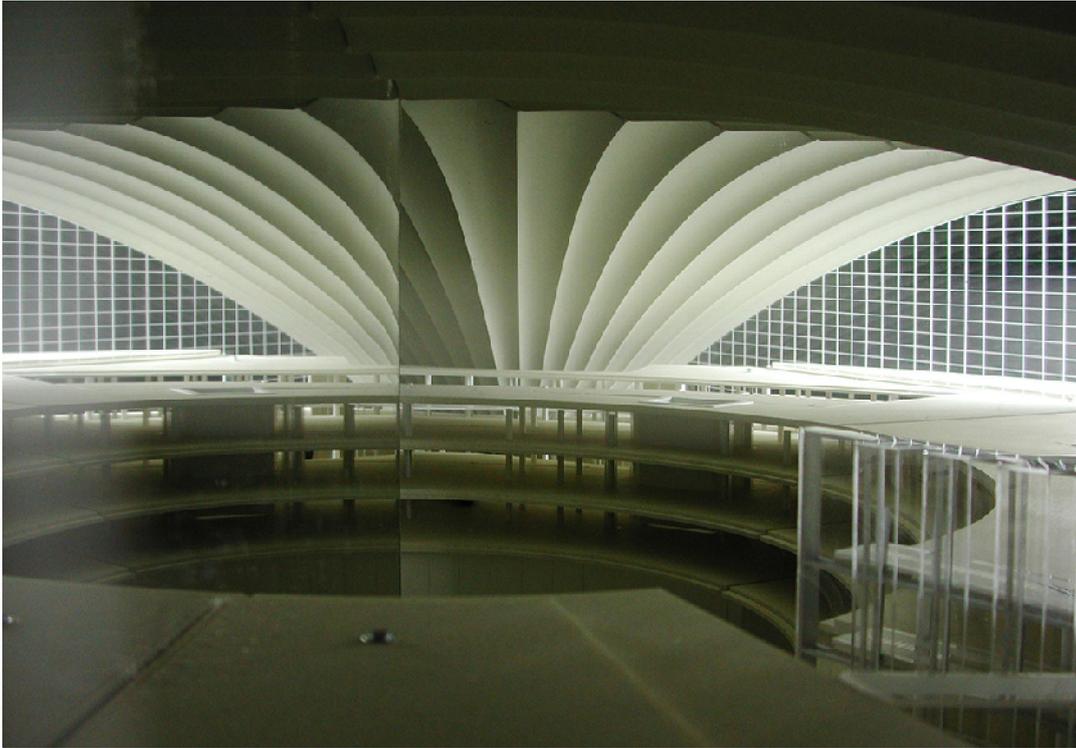


Fig.I.9. Maquette réalisée pour l'étude de l'éclairage naturel du CNIT-La Défense ¹⁴.

I.3.4. LA PHASE DE CONCEPTION D'ETAILLEE (Gallas 2013) :

Dans cette phase, le concepteur adopte les moyens de conception assisté par ordinateur (CAO) on exploitant les outils des simulations numériques de prédiction de l'éclairage à l'intérieur des édifices provenant essentiellement des sources purement naturelles. Le concepteur dans cette phase, résume l'ensemble des résultats obtenus par les phases antérieures tels-que, les orientations, les formes, les surfaces intérieures, les matériaux adoptés, les ouvertures, leurs dimensionnements et leurs emplacements. Par les moyens des simulations numériques disponibles, le concepteur peut prédire le comportement des édifices vis-à-vis un éclairage naturel et de procéder ainsi, à la simulation du comportement de l'ensemble d'éléments intervenant dans le processus architectural dans le but de déduire la contribution et l'effet de chaque élément. Ces outils offrent aux concepteurs les moyens de prédire la qualité et la quantité de l'éclairage naturel et de procéder ainsi, à l'amélioration des conditions offertes et d'exploiter au maximum les potentiels existants. Dans cette phase, le concepteur procède à la modification de certains éléments intégrés dans le processus de conception pour améliorer la qualité de l'éclairage offerte et de se rapprocher au mieux, aux

valeurs de référence traduisant les attentes des occupants d'un espace selon la nature des édifices et leurs exploitations. Les avancées technologiques liées au développement des outils de la CAO et les progrès liés aux systèmes intégrés dans les processus du calcul et les avancées liées aux cartes graphique, ont permis de réduire considérablement les temps de calcul et d'exploiter les méthodes numériques pour prédire la répartition spatiale de l'éclairage naturel aux seins des édifices. Plusieurs outils de simulation de l'éclairage naturel dans les édifices ont été proposés. Chacun de ces outils, présente des limites de calcul qui dépendent soit de la méthode numérique adoptée ou du modèle mathématique employé. A titre d'exemple, DIALUX peut être exploité pour le calcul de l'éclairage naturel mais sous conditions de trois types de ciel différents, parmi lequel le ciel couvert CIE est pris en compte¹⁵. Le modèle mathématique adopté dans ce dernier, ne permet pas de déterminer l'éclairage naturel pour tout type de ciel. Un autre logiciel par exemple 'GERONIMO' plus convivial été proposé et dédié aux architectes pour effectuer des simulations d'éclairage naturel à l'intérieur des édifices mais pour seulement deux types de ciels, clair et couvert¹⁵.

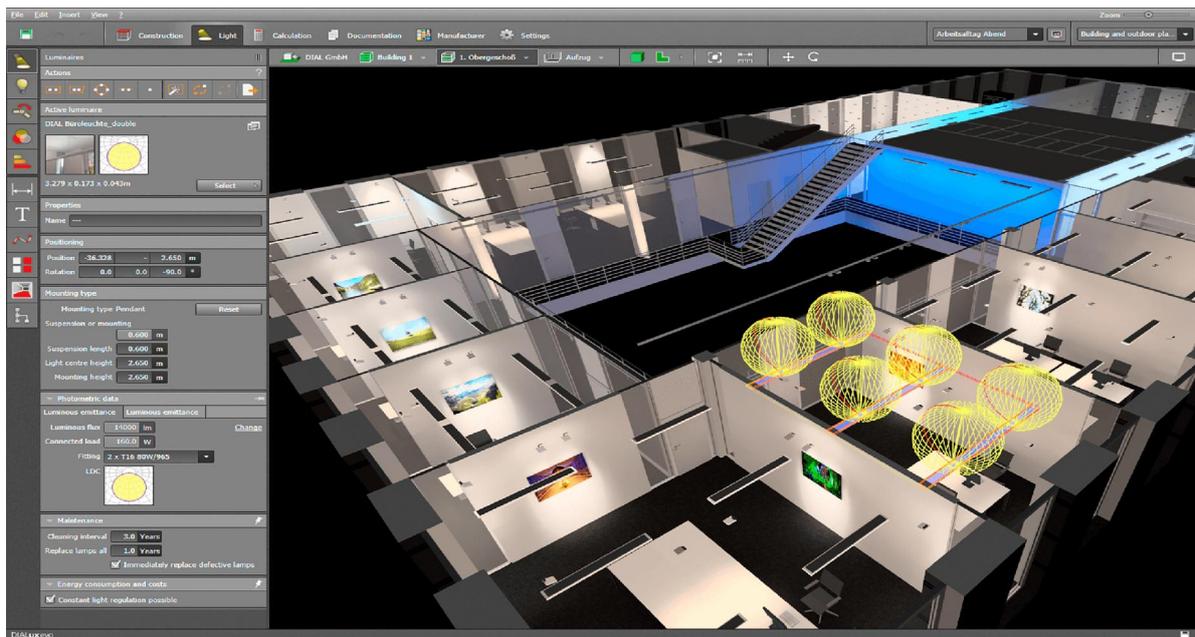


Fig.I.10. Exemple représentatif sur la répartition spatiale de l'éclairage à l'intérieur d'un édifice, (DIALux Support)¹⁶.

¹⁵ Simuler l'éclairage, site : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php>.

¹⁶ DIALux Support, Assistance with questions and technical problems. <https://www.dial.de/en/dialux/support/>

La prise en compte de la lumière du jour au cours du processus de conception intègre alors plusieurs phases complémentaires. Le concepteur doit prendre en considération l'intégration de chacune des phases au cours du développement et l'avancement de la conception d'un projet selon une chronologie bien précise et bien définie. Le concepteur se trouve confronté à une multitude de problèmes liés aux intentions et aux contraintes spécifiques à chacun des problèmes architecturaux. L'architecte cerne le problème d'intégration progressivement en allant d'une phase à une autre en réduisant ainsi et au cours de la progression du projet, le nombre de contraintes imposées liées aux intentions et aux attentes. Dans la première phase 'dite phase de conceptualisation' (Gallas 2013), caractérisée par une multitude d'intentions et gérée par un nombre important de facteurs architecturaux, liés aux contraintes imposées et aux attentes désirées. Le concepteur se trouve face à un problème de définition de certains paramètres architecturaux considérés comme les plus importants. Le concepteur doit déterminer la forme du projet, les orientations et de proposer une esquisse caractérisant la forme du projet. Le concepteur se trouve face à une multitude de propositions dépendantes de sa vision où le côté artistique peut intervenir pour la détermination de la forme du projet. La vision du concepteur vis-à-vis un éclairage naturel influe aussi sur les décisions prises durant cette phase. A partir de cette phase, le concepteur doit procéder à la mise en œuvre de plusieurs phases où il doit assurer, le passage d'une première étape définie par une phase d'incertitude via les décisions prises vers une autre étape incluant d'autres phases de confirmation et d'adaptation des paramètres architecturaux, qui permettront au cours du développement du projet, de se rapprocher aux valeurs de référence et aux attentes des occupants selon la particularité des lieux construits. Durant ces phases, le concepteur cerne le problème d'intégration de la lumière du jour progressivement par la matérialisation des intentions (Gallas 2013) et par la confrontation des résultats prédictifs et les résultats de références désignés selon la nature des lieux conçus. Les résultats prédictifs exploitent l'ensemble des données cumulées au cours des phases antérieures et permettent aux concepteurs d'agir pour effectuer des changements de plusieurs paramètres dans le but de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'éclairage naturel offert à l'intérieur des espaces. Les avancées technologiques liées à la CAO et le développement important d'outils numériques, ont offert aux concepteurs une multitude de choix pour exploiter un de ces outils. Le choix de ces outils et dépendant des limites offertes par chacun de ces outils dépendant principalement des modèles mathématiques et numériques exploités dans le développement de cet outil.

I.4. LE CONFORT VISUEL :

Ayant une grande capacité pour s'adapter à son milieu et aux conditions offertes par son environnement, l'être humain a besoin de la lumière considérée comme étant un élément clé pour apercevoir les objets et les lieux. La lumière est primordiale pour offrir la possibilité de voir et elle est importante pour apprécier les formes et les espaces, la couleur et la position dans le panorama visuel des objets de notre environnement. L'être humain perçoit des sensations à travers des signaux transmis et reçus par nos sens où 80% de ces signaux sont reçus et interprétés par le sens de la vue et traduit par la vision des choses (Stellman 2000). La lumière du jour nous offre cette capacité de voir les choses et les espaces, mais elle présente aussi, d'autres avantages liés à la santé et le bien être des individus. La lumière du jour ou la lumière naturelle permet de réduire considérablement les contraintes physiques et psychologiques (ED 82) (Cantin 2008). Elle offre aussi des avantages physiologiques où elle est considérée comme avantageuse pour le système visuel et circadien humain. Un espace éclairé par la lumière naturel contribue alors à l'amélioration des performances des occupants où il offre beaucoup d'avantages comparés à un espace doté d'un éclairage artificiel (Cantin 2008). Cette lumière augmente le sens de l'humour et elle contribue à la diminution du niveau de stress et de la fatigue dans des espaces privés ou du travail. Elle contribue à l'amélioration du rendement des travailleurs dans les espaces ayants des activités intenses et offre des lieux et des espaces aptes pour des travaux de réflexions en améliorant le niveau de la concentration des occupants. Dans ces espaces, la lumière contribue à la diminution du niveau de la fatigue et améliore ainsi, les conditions du travail et les conditions liées à la sécurité du personnel dans des lieux sensibles.

La lumière offerte dans les espaces intérieurs dépendra de la nature des activités réservées dans ces lieux. Elle varie d'un espace de travail à un autre et selon les tâches effectuées avec les précisions requises et dépendante du volume de travail et la mobilité nécessaire pour accomplir des tâches précises et planifiées (Stellman 2000). C'est aussi le cas des établissements scolaires où la lumière naturelle apporte les mêmes avantages cités précédemment. Celle-ci joue un rôle primordial, voir fondamentale pour la réussite du processus de l'enseignement et de l'apprentissage qui dépend fortement du confort offert aux apprenants et aussi aux enseignants. Le confort visuel offert aux intervenants dans le processus de l'enseignement coopère à la réussite de celui-ci. Dans des études menées, il a été montré que l'éclairage naturel contribue à l'amélioration du rendement des élèves et

augmente leurs motivations où il offre, des salles de classe ouvertes et en liaison avec le milieu extérieur. Des salles avec un environnement intérieur sain et confortable et qui lutte contre l'absentéisme des élèves et des enseignants (Benharkat 2006).

Sous certaines conditions, l'éclairage à l'intérieur d'un édifice, provenant essentiellement d'une source naturelle, peut offrir des espaces ayant un meilleur confort visuel. En effet, un espace intérieur peut offrir ce confort si ce dernier permet aux occupants de voir les objets avec un minimum d'effort. L'intensité de la lumière à l'intérieur de cet espace doit être modérée où elle doit être, ni forte ni faible et avec une répartition homogène et régulière ayant un spectre lumineux bien adapté à la sensibilité de l'œil et qui permet de distinguer les couleurs, pour donner une meilleure vision aux objets²⁹. La combinaison des éclairages, le contraste de luminances, l'apparence de couleurs de la lumière, le rendu des couleurs ou encore leurs choix, sont des éléments déterminants de l'environnement chromatique et du confort visuel. Considéré comme une sensation subjective, le confort visuel dépendant de l'intensité, de la répartition et de la qualité de la lumière, fais appel à six facteurs déterminants, ces facteurs sont respectivement (Stellman 2000) :

- Un éclairage optimal,
- Les rapports de luminance présents dans le local (bonnes conditions de contraste),
- Absence d'éblouissement,
- Des contrastes appropriés,
- Un rendu correct des couleurs, ...etc .

Outre que le problème de conception qui nécessite la prise en compte d'un ensemble de paramètres architecturaux liés par exemple à la forme du projet et aux ambiances architecturales, le concepteur se trouve confronté alors à d'autres facteurs complémentaires et intervenants pour consolider le confort visuel. Cependant, le confort visuel ne peut être représenté seulement par un ensemble de paramètres quantifiables et mesurables, donc par une seule partie objective. Il inclut aussi une seconde partie¹⁷, subjective, liée par exemple à un état de bien-être visuel dans un environnement défini¹⁷ ou lié au côté esthétique des objets vus individuellement ou dans leur ensemble, le mouvement où l'immobilité de ces objets (Roulet 2012).

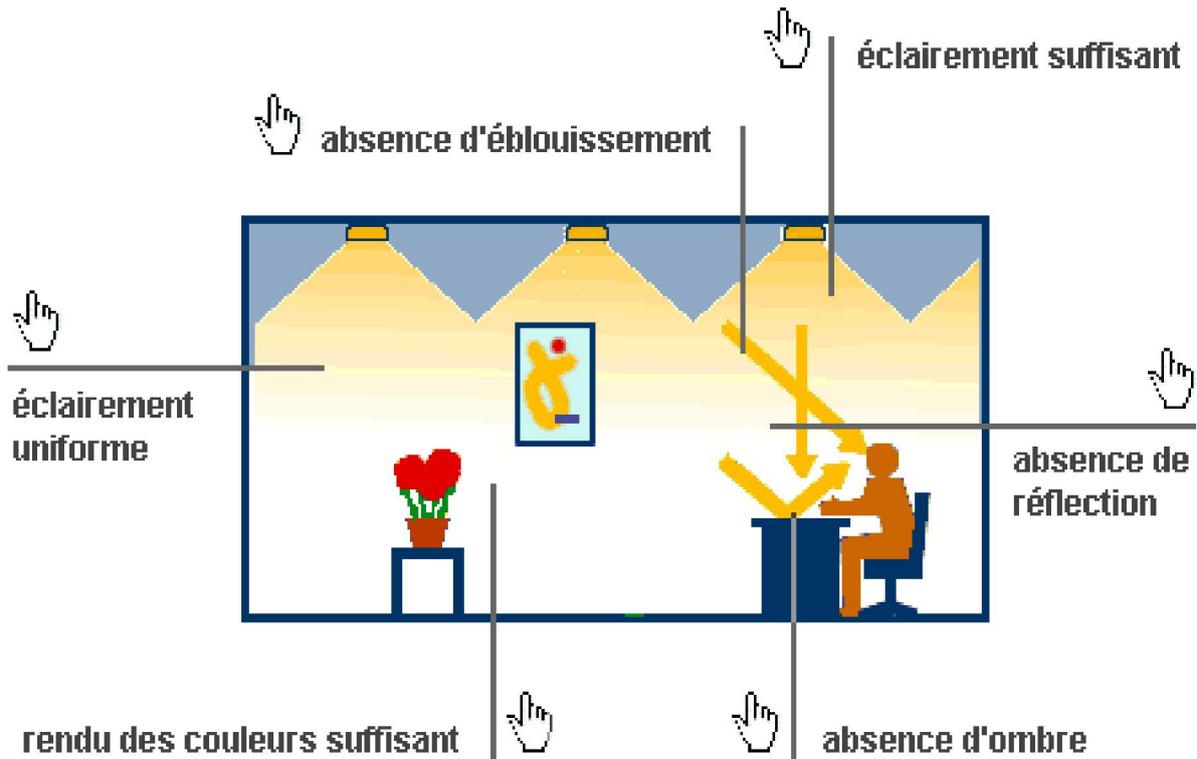


Fig.I.11. Paramètres du confort visuel ¹⁸.

I.4.1. ECLAIRAGE OPTIMAL :

Chaque individu a besoin d'un certain niveau d'éclairage permettant de visualiser correctement les objets ou d'exercer confortablement, une activité particulière dans un espace architectural. Le niveau d'éclairage dépend de la perception visuelle. Si celle-ci est définie dans un espace architectural par un niveau difficile, il sera indispensable alors, d'augmenter le niveau d'éclairage à l'intérieur de cet espace. L'éclairage influe alors sur la visibilité de la tâche visuelle et de son environnement. Le niveau d'éclairage dans un édifice ne doit être ni fort ni faible où il doit avoir une valeur de référence pour assurer une vision claire et sans fatigue. Ces valeurs de références sont fixées selon la spécificité des pratiques exercées et le degré de la précision de la tâche visuelle exercée dans ces espaces. Vue la facilité de mesure

¹⁷ "Le confort visuel et la normalisation (Normes & Règlements)" éditée par le CSTC en 2003. Site : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php>

¹⁸ Le confort visuel, Document de synthèse. Site : <http://www.mysti2d.net/legarros/AC/07/Le%20confort%20visuel/Le%20confort%20Visuel.html>

de l'éclairage, les valeurs de référence sont souvent représentées en termes d'éclairage, plutôt que de luminance¹⁹. Mais pour donner une meilleure représentation de la qualité d'éclairage, la sensation de la luminosité est mieux représentée par la luminance, il faut tenir compte alors, du coefficient de réflexion dans le choix de l'éclairage d'une surface. Plus il est faible, ou sa couleur foncée, plus la vision s'avère difficile et plus le niveau d'éclairage doit être élevé¹⁹. De plus, les niveaux d'éclairages conseillés doivent être nuancés en fonction du contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-fond¹⁹.

Il est difficile de préciser avec exactitude les valeurs d'un éclairage optimal dans un espace architectural. Celui-ci (l'éclairage) dépend non seulement, des activités exercées, mais il dépend aussi, aux facteurs personnels propres aux sujets et aux occupants d'un espace. Il peut être lié par exemple à leurs traditions et leurs habitudes. Il peut dépendre aussi de leurs emplacements géographiques. L'âge des individus peut influencer aussi sur le niveau d'éclairage nécessaire. En effet, un sujet de moyen âge nécessite un niveau d'éclairage plus faible que celui exigé par un sujet ayant un âge plus avancé. Serra et Coch (Bendekkiche 2017) traduit cette différence en pourcentage où ils considèrent qu'un sujet de moins de 35 ans nécessite un taux de 20% de moins d'éclairage par rapport à un sujet ayant une tranche d'âge comprise entre 35-55 ans. Pour traduire ces différences, Serra et Coch introduits un facteur modificateur de la valeur de l'éclairage qui varie selon l'âge du sujet. Ces facteurs sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tab.I.1.).

Tableau I.1. Facteurs modificateurs du niveau de l'éclairage selon Serra et Coch
(Bendekkiche 2017)

Tranche d'âge du sujet	Facteur modificateur
Age <35 ans, activité peut importante et facile	0.8
Age 35 ans à 55 ans, activité importante, difficulté régulière.	1
Age >55 ans, activité critique et peu usuelle, haute difficulté	1.2

¹⁹ L'éclairage naturelle confort visuel et la normalisation (Normes & Règlements)" éditée par le CSTC en 2003. Site : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php>

Dans certaines normes internationales, la valeur d'éclairage de référence est précisée en valeur moyenne dans les zones d'activités ou selon le plan de travail. Selon les normes européennes par exemple, un minimum d'éclairage doit être respecté pour assurer un confort visuel, de bien-être, les exigences de l'ergonomie visuelle et de la sécurité et de l'économie²⁰.

A titre d'exemple, nous avons présenté (Tableau I.2) quelques valeurs de référence²⁰ qui doivent être respectées dans certaines zones d'activités ou selon le plan de travail dans quelques édifices. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés à l'étude et à la modélisation de l'éclairage naturel au sein des édifices scolaire, et plus exactement dans les salles de classe. Selon les normes européennes, un plan de travail d'une salle de classe qui offre les meilleures performances visuelles doit avoir une valeur optimale de 500 Lux. Dans d'autres références, cette valeur est représentée par 300 Lux.

Tableau I.2. Quelques valeurs de référence de l'éclairage naturel selon le plan de travail ²⁰.

Zones, taches, activités	Eclairage moyen à maintenir (Lux) valeur minimale
Zone de circulation, couloirs	100
Escaliers	150
Magasins	
Espaces publics, halls d'entrée	100
Bâtiments scolaires, salle de classe en primaire et secondaire	500
Salle de conférences	500
Salle de dessin industriel	750
Eclairage des bureaux :	
– classement	300
– dactylographie, lecture	500
– poste CAO	500
– réception	300
– archives	200

²⁰ Lux, la revue de l'éclairage. Chier technique. Site : <http://www.afe-eclairage.fr/docs/362-ext.pdf>

Physiquement, l'éclairage dans un point traduit la densité du flux lumineux traversant une surface portant ce point quelconque dans l'espace. L'éclairage alors dans un point de l'espace représente le quotient entre la quantité de lumière émise par une surface lumineuse et la surface portant ce point. L'éclairage est exprimé en Lux est donné par la relation :

$$E = \frac{\text{Flux Lumineux}(lm)}{\text{surface}(m^2)} = \frac{\phi}{S} (\text{Lux}) \quad II.1$$

Seule la valeur de l'éclairage ne peut assurer un confort visuel. En effet, la répartition spatiale de l'éclairage dans un espace doit être la plus uniforme, c'est à dire elle doit réserver une valeur constante sur un maximum de point de l'espace. Ceci est traduit par un faible gradient ou par un faible écart entre la valeur maximal et la valeur minimale de l'éclairage dans un plan de l'espace. On peut exprimer aussi l'uniformité de l'éclairage par un rapport définie par le quotient entre sa valeur maximale et sa valeur minimale. Dans certaines normes, ce rapport doit être varié entre 0.3 et 0.7 (Bendekkiche 2017).

Dans des travaux de modélisation d'un éclairage provenant d'une source naturelle (le cas d'un éclairage naturel). La qualité de la lumière offerte à l'intérieur des espaces peut être traduite par le facteur de lumière du jour (FLJ). Ce facteur est déterminé par le rapport entre l'éclairage à l'intérieur d'un espace et l'éclairage à l'extérieur de l'édifice sur un plan horizontal et sous les conditions d'un ciel couvert.

$$FLJ = \frac{E_{\text{intérieur}}}{E_{\text{extérieur}}} = (\%) \quad II.2$$

Exprimé en pourcent, ce facteur ne prend pas en compte, l'heure ou le jour de la modélisation. Il ne peut prendre aussi les orientations des édifices ou des ouvertures. Le facteur du temps n'est pas pris en compte par ce facteur. Ce facteur peut traduire la quantité et la qualité de la lumière dans un édifice et constitue un indicateur fiable sur la qualité de l'environnement lumineux intérieur tel que perçu par l'œil humain et en décrivant la relation entre les espaces intérieurs et extérieurs tout en indiquant le contraste entre les deux (Bendekkiche 2017).

Dans la littérature, un tableau récapitulatif est très employé pour décrire la relation entre le facteur de lumière du jour est son influence sur l'impression de clarté, impression visuelle de l'espace et l'ambiance créée dans les espace considéré.

Tab.I.3 : Relations entre facteur de la lumière du jour et impressions visuelle, impression de clarté et ambiance créée.

FLJ	- de 1 %	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12 %
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très élevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance environ 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			A proximité des fenêtres ou sous des lanterneaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone semble être séparée de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		

I.4.2. LES RAPPORTS DE LUMINANCE :

Les valeurs de contraste d'une image, en allant du noir le plus profond au blanc considéré comme le plus pur, sont déterminées par un signal qui définit la luminance²¹. L'autre partie du signal représente la couleur, appelée chrominance²¹. La luminance représente une grandeur physique et qui reflète la sensation visuelle de la luminosité d'une surface lumineuse²². Sa valeur est dépendante de l'intensité lumineuse (I). Pour une surface noire, la luminance est quasiment nulle et elle augmente pour des surfaces très lumineuses^{22, 23}. La luminance d'une surface est exprimée en [Cd (Candela)/m²]. Elle est déterminée par le rapport entre l'intensité émise en direction de l'œil et la surface apparente qui émet cette intensité.

$$L = \frac{I}{Scos(\alpha)} = (Cd/m^2) \quad II.3$$

²¹ Sciences Luminance. Futura Sciences. Site :

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-luminance-2510/>

²² Luminance, Wikipédia. Site : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Luminance>

²³ La Luminance, Site : http://colbertserv.lyceecolbert-tg.org:3007/cours_eclairage/viewer/visu.php?f=211

La sensation visuelle est influencée alors par la valeur de la luminance. Pour voir correctement et éviter les gênes visuelles provenant essentiellement des sources lumineuses, la répartition spatiale de la luminance doit être uniforme où il faut éviter les différences excessives de la luminance²⁴. L'inconfort visuel apparaît aussi dans des zones très sombres ou très brillantes²⁴. L'inconfort visuel apparaît aussi lorsque le gradient spatial, défini dans un espace, par la différence entre une valeur maximale et une valeur minimale de la luminance, est très important. Si ce gradient devient minime ou trop faible, on crée des espaces ayant une impression de monotonie²⁴ et très confortable où l'individu ressent un confort agréable vis-à-vis, la qualité visuelle offerte.

I.4.3. ABSENCE D'EBLOUISSEMENT :

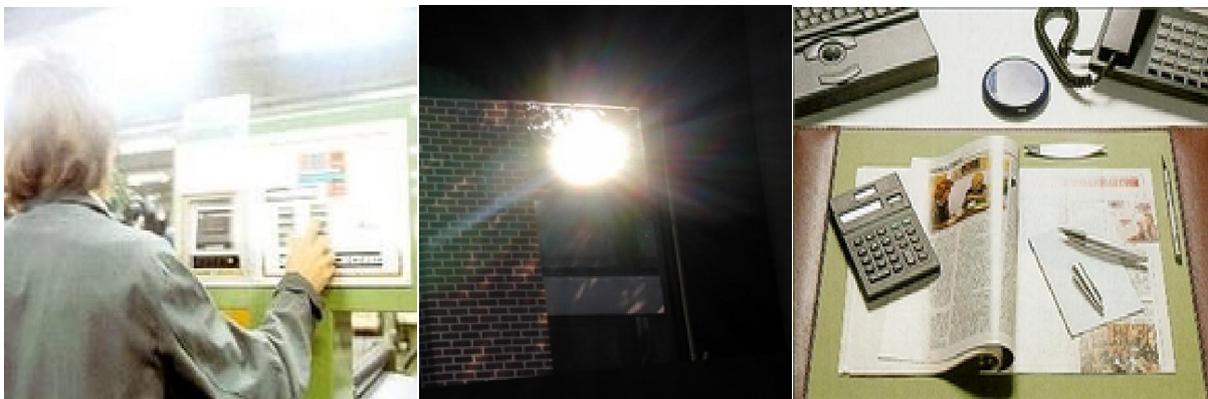
L'éblouissement provoque un malaise des individus en créant un inconfort visuel dans les espaces architecturaux. Il est dû principalement à la présence d'une source lumineuse ayant une luminosité trop importante ou par la présence des surfaces adjacentes ayant un contraste lumineux trop élevé, placées dans le champ de vision des individus²⁴.



Fig.I.12. Un exemple d'éblouissement ²⁴.

²⁴ l'éclairage naturel des bâtiments, Site : https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm

Considéré comme le paramètre le plus gênant dans la réalisation d'une tâche, l'éblouissement provoque une diminution de l'aptitude à différencier les objets. Il est distingué selon l'emplacement de la source ayant une luminance importante ou selon le degré de l'intensité de l'éblouissement²⁴. Selon la position de la source d'inconfort visuel et qui donne naissance à l'éblouissement, l'éblouissement est classé en deux types. L'éblouissement direct et l'éblouissement indirect²⁴. Pour l'éblouissement direct, il apparaît par la présence d'une source lumineuse intense placée directement dans le champ de vision. L'éblouissement indirecte est créé par des sources d'inconforts créés par la réflexion perturbatrice via des surfaces ayant des coefficients de réflexion important, comme par exemple, la présence des surfaces spéculaires ou brillantes²⁴. Une autre composante de l'éblouissement indirecte peut apparaître par l'effet de voile ou par l'effet des petites surfaces réfléchissantes provoquant, la réduction du contraste entre tache visuelle et son environnement immédiat. Selon l'intensité de l'éblouissement, on distingue deux types d'éblouissement, un éblouissement perturbateur caractérisé par une intensité moins importante, celui-ci crée un malaise et un inconfort visuel, mais l'individu peut voir les détails et apercevoir les choses. Avec le temps, ce type d'éblouissement crée la fatigue visuelle²⁴. Avec des intensités très élevées qui sont dues principalement à la présence des sources ayant une luminance importante, l'éblouissement devient très intense et les individus confrontés à ce type d'éblouissement ne peuvent apercevoir les objets pendant un certain temps²⁴. Il est distingué parmi les sources les plus influents créant un inconfort visuel très intense.



Eblouissement direct Eblouissement indirect réfléchi Eblouissement indirect, Effet de voile
Fig.I.13. Les trois composantes d'un éblouissement, directe et indirecte, réfléchi et créée par effet de voile.²⁴.

Pour un édifice éclairé par une source naturelle, il peut être le siège de plusieurs sources d'éblouissements et qui peuvent être produites par ²⁴ :

- la présence des sources de luminance ayant des intensités diverses à travers les fenêtres qui donne un lien directe avec le milieu extérieur ayant le soleil et le ciel comme sources d'éblouissement.
- l'influence des surfaces voisines à l'extérieur d'un édifice et créant la réflexion du soleil ou du ciel.
- une luminance importante crée par les fenêtres et les murs voisins.
- Un contraste de luminance excessive entre une fenêtre et son châssis.

Le concepteur doit agir correctement pour éliminer ce type d'inconfort visuel, en particulier dans les édifices où les individus exercent des activités de réflexion ou dans les lieux nécessitant un confort visuel trop élevé. Il existe plusieurs procédés et certaines techniques simples qui peuvent être adoptés pour éliminer totalement l'éblouissement ou même l'atténuer. L'éblouissement peut provenir d'une source d'éclairage artificiel ou d'une source naturelle. Pour le cas d'un éblouissement provenant essentiellement d'une source naturelle (le ciel ou le soleil) où les fenêtres sont considérées comme sources intermédiaires et principales pour la création de l'éblouissement à l'intérieur d'un édifice. Dans ces conditions, le concepteur peut prévoir l'emplacement d'une grande fenêtre sur une façade d'un édifice aux lieux d'installer plusieurs fenêtres ayant des faibles dimensions sur la même façade²⁴. Les fenêtres d'un édifice peuvent être dotées par des éléments de protection solaires pour écranter totalement le ciel²⁴. Un écrantage partiel du ciel peut être effectué par l'emplacement des éléments déflecteurs ou même par des éléments moins lumineux que le ciel²⁴. Le concepteur peut agir pour diminuer par exemple les contractes, fenêtre-châssis et mur fenêtre²⁴. Pour les sources artificielles donnant naissance à l'éblouissement à l'intérieur des édifices, des techniques plus simples que celles présentées précédemment peuvent être exploitées pour remédier au problème de l'éblouissement. Des grilles de défilement peuvent être placées en dessous des sources d'éclairages. Le flux lumineux peut être orienté par l'utilisation des diffuseurs enveloppants ou des réflecteurs parabolique (Stellman 2000). Le concepteur doit prédire une installation des sources d'éclairage en s'éloignant du champ de vision des occupants et selon les activités prévues dans chaque édifice.

I.4.4. DES CONTRASTES APPROPRIES :

Le contraste représente la différence ou le gradient de la luminosité entre un objet et son environnement. Il peut aussi présenter la différence de luminosité entre les différentes parties d'un seul objet. Un équilibre du niveau de contraste dans un espace architectural est une des conditions primordiales pour avoir un confort visuel. La présence d'un fort contraste dans un édifice provenant d'une grande différence de luminance, crée dans le champ de vision des individus, provoque un malaise et une fatigue visuelle. Cette fatigue provient essentiellement par l'œil qui doit s'adapter à la direction du regard qui change, durant cette adaptation, l'acuité visuelle diminue et crée ainsi, une fatigue visuelle inutile²⁴. Une différence de luminosité doit être respectée pour ne pas dépasser certaines valeurs de contraste et pour créer un environnement sain et qui offre un meilleur confort visuel. Un bon niveau de contraste assure la distinction entre deux zones et entre éléments. Si les différences de luminance dans un espace sont trop faibles, créant ainsi des faibles contrastes, on risque de créer un espace défavorable et inconfortable vis-à-vis le confort visuel offert. En effet, des valeurs limitant le contraste, qui doit être suffisant pour favoriser la perception du relief des objets, doivent être respectées²⁴.



Fig.I.14¹⁹. Trois situations différentes vis-à-vis le contraste offert pour un même niveau d'éclairage au niveau du plan de travail, la première situation (présenté sur le côté gauche de la figure) est nettement plus agréable que la troisième¹⁹. Dans cette situation, le niveau de différence entre la luminance est les moins importants comparés aux autres situations caractérisées par des niveaux de contraste très élevés.

Un bon confort visuel dépend non seulement alors de la répartition spatiale de l'éclairage qui doit être maintenu uniformément le long des espaces architecturaux, mais aussi de la luminance où elle doit avoir une répartition harmonieuse pour offrir des contrastes respectant certaines valeurs de référence, en particulier dans les différentes zones du champ visuel et dans les surfaces de référence (zone de travail et zones voisines)¹⁹. Cependant, il est plus difficile d'assurer l'uniformité de la luminance, où plusieurs facteurs interviennent et influent sur la distribution de la lumière dans un espace, tel-que, la disposition des sources lumineuses et la réflexion des parois¹⁹.

I.4.5. UN RENDU CORRECT DES COULEURS :

Chacune des sources lumineuses, qu'elle soit artificielle ou naturelle, est caractérisé par son propre spectre lumineux. Pour qu'un spectre lumineux soit visible, il doit avoir une longueur d'onde comprise entre 380-760 nanomètres¹⁹.

C'est le cas par exemple de la lumière du jour qui provient essentiellement du ciel ou du soleil et qui présente un spectre visible et de forme continue. La lumière offerte par les sources naturelles dite blanche, composée essentiellement d'un mélange de spectre visible, est considérée comme la lumière la plus appréciée et qui permette de voir les couleurs des objets avec une grande exactitude¹⁹.

Le confort visuel offert par une ambiance lumineuse dépend alors, du rendu des couleurs. Pour le qualifier, on fait généralement appelle à l'indice de rendu des couleurs (IRC ou Ra), peut interpréter l'aptitude d'une source à rendre correctement les couleurs présentes dans un espace architectural comparé à celle produit par une source de lumière idéale ou naturelle. il reflète alors la disposition d'une source lumineuse à bien rendre les couleurs des objets. IRC est compris entre 0 et 100. A 0, IRC indique l'absence de couleur raisonnable et à 100, IRC indique qu'il s'agit d'une lumière naturelle. Le tableau (Tab.I.4) présente un récapitulatif des valeurs IRC où il présente selon les valeurs d'IRC, la qualité de la perception des couleurs par les individus¹⁹.

¹⁹ L'éclairage naturelle confort visuel et la normalisation (Normes & Règlements)" éditée par le CSTC en 2003. Site : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php>

Tab.I.4 : Valeurs IRC et la qualité de la perception des couleurs¹⁹.

Plage d'IRC	Perception des couleurs
Ra < 25	faible
25 < Ra < 65	moyenne
65 < Ra < 90	bonne
90 < Ra	élevée

Dans les établissements scolaires ou même dans les établissements artistiques. IRC joue un rôle primordial pour la réussite du processus d'enseignement car les enfants, par exemple, en situation d'apprentissage, ont besoin d'une qualité supérieure pour distinguer la qualité des images offertes et dans le but de faciliter l'apprentissage des couleurs et les harmonies colorées. Il est nécessaire de prendre en compte aussi l'influence de IRC dans les autres espaces afin d'offrir des lieux confortables vis-à-vis la qualité d'éclairage offerte à l'intérieur des espaces.

Dans la partie ci-dessus, nous avons cité quelques éléments physiques et qui peuvent être pris en compte par le concepteur pour offrir des édifices ayant un confort visuel de qualité et qui peut répondre aux attentes des occupants vis-à-vis un éclairage sain et confortable. Cependant, il existe d'autres éléments qui n'ont pas été cités. Pour cela, nous allons essayer de présenter un résumé sur quelques autres éléments qui peuvent intervenir pour assurer un confort visuel à l'intérieur des édifices.

La tâche attribuée aux concepteurs, où dans sa grande partie, consiste à assurer un confort visuel dans les édifices est l'une des tâches la plus complexe où elle nécessite l'intervention de plusieurs paramètres, complémentaires et qui doivent être pris en compte dès le départ du projet architectural. En effet, les ombres par exemple et qui peuvent apparaître à l'intérieur des édifices et l'un des facteurs influent sur la qualité de l'éclairage offerte. Le concepteur et selon les orientations envisagées et la direction du champ de vision à l'intérieur des édifices, doit prévoir la direction de lumière, qu'elle soit naturelle ou artificielle, et son effet sur la création d'ombres marquées et qui risquent de perturber la vision des individus¹⁹.

Pour un éclairage naturel et pour diminuer l'effet d'ombre créé par la lumière, le concepteur doit favoriser une pénétration latérale¹⁹ via les parois des édifices où les fenêtres sont généralement adoptées comme sources d'éclairages. En termes de lumière du jour, le concepteur doit assurer une autonomie maximale en lumière naturelle en exploitant au maximum, le potentiel offert par les sources naturelles ayant généralement une durée qui s'étale, selon la saison et l'emplacement géographiques des édifices, entre 8 heures et 10heures. L'environnement intérieur et extérieur peut aussi agir sur la qualité du confort visuel. Cet environnement représenté essentiellement par les parois et leurs propriétés, par le volume des édifices ou par les surfaces des édifices entourant l'espace architectural. Tous ces éléments, influent sur la qualité d'éclairage offerte à l'intérieur des édifices comme par exemple, la réflexion de la lumière du jour produite par les surfaces de l'environnement extérieur. Les conditions nécessaires pour offrir un confort dans sa définition la plus générale, nécessitent la satisfaction des besoins des individus liés à l'ensemble des composantes du système sensoriel (Dubois 2006). Pour le cas particulier et qui consiste à offrir le bien être des individus via un éclairage offert dans un édifice, le confort visuel est défini comme étant : « *une impression subjective de satisfaction du système visuel principalement procurée par l'absence de gêne induite par l'ensemble de l'environnement visuel*» (Dubois 2006). Le confort visuel fait appel alors, à des facteurs physiques et environnementaux, mais aussi il comporte une notion de subjectivité. La notion du confort visuel fait intervenir des éléments liés à la physiologie et aussi à la subjectivité des individus. En effet, selon des études menées sur la qualité du confort visuel offerte dans des espaces architecturaux, il a été montré que deux sujets ont été exposés aux mêmes conditions d'un éclairage bien défini. Le jugement prononcé par ces deux sujets a été contradictoire entre, un jugement de satisfaction envers le confort offert par l'éclairage, et par un autre jugement contradictoire et qui a énoncé la non-satisfaction du sujet via la qualité de l'éclairage offerte (Dubois 2006). Dans d'autres travaux de recherches menées principalement par Parpairi. Il a été démontré que l'étude des ambiances lumineuses nécessite la prise en compte des éléments liés à des aspects non-mesurables, nommés '*Facteurs humains et architecturaux*'. Parmi ces facteurs on évoque par exemple, la vue vers l'extérieur, la diversité des ambiances lumineuses, le degré du contrôle perçu et la liberté de mouvement (Dubois 2006).

En effet, la création des moyens qui communiquent avec l'environnement extérieur et qui donnent une vue vers l'extérieur en créant un lien permanent avec l'environnement extérieur

et lui procure certaines informations liées à cet environnement où elles reflètent par exemples, les conditions météorologiques à l'extérieur. Le lien avec l'environnement extérieur, crée pour les individus un repère de temps et d'espace, d'ailleurs si l'un des avantages que seule la source naturelle peut l'offrir où elle est essentielle pour le réglage de l'horloge biologique. Le contact avec l'environnement extérieur permet de créer une atmosphère adéquate et crée une ambiance qui permet de réduire les contraintes exercées sur les individus, donc ce lien rapporte des bénéfices psychologiques. Le concepteur doit alors, agir pour créer une ambiance visuelle confortable tout en gardant un lien direct avec l'environnement extérieur (Dubois 2006). Les occupants d'un espace à l'intérieur peuvent même garder le contact avec d'autres personnes à l'extérieur de l'espace et de voir même, leurs activités si c'est nécessaire.

Un autre facteur déterminant et qui selon PARPAIRI doit être pris en compte pour offrir un confort visuel à l'intérieur d'un espace. Il s'agit d'assurer la liberté du mouvement des individus à l'intérieur d'un espace architectural éclairé essentiellement par une source naturelle. Ce facteur, et que le concepteur doit le prendre en compte dans la conception d'un édifice, pour permettre aux individus, occupants cet espace, de se déplacer librement et de changer ainsi leurs emplacements, dans le but par exemple, d'éviter l'inconfort provient de la présence de l'éblouissement (Dubois 2006) ou d'éviter aussi, une zone de l'espace où les rayons solaires peuvent augmenter la température dans cette zone. La création de cette mobilité permet alors, de créer des emplacements dynamiques où les individus peuvent s'adapter aux conditions offertes par les sources d'éclairage naturel, selon la saison, selon le mois et même selon l'heure de la journée. Le concepteur doit offrir alors des espaces dynamiques où les individus peuvent changer l'orientation de leurs regards. Ce facteur peut offrir le confort visuel et profiter des potentiels offertes par une source naturelle, tout en évitant certains paramètres liés aux inconforts présents par l'existence d'une source d'éclairage naturelle, tel-que, l'éblouissement et l'élévation de la température locale. Cependant, le confort visuel offert par la prise en compte de cet élément est limité, et dépendant de certains paramètres tel-que : le temps d'exposition à la nuisance environnementale, le contexte et le type d'activité exercée dans cet espace (Dubois 2006). Cet élément et selon notre avis, peut éviter aux occupants de confronté certains inconforts liés à la source d'éclairage naturel, mais il peut aussi, créer des gênes aux individus par rapport à leurs déplacements ou même par rapport aux perturbations créées par le changement permanent de leurs habitudes liées à l'espace et qui peut être nuisant pour certains individus. On ne peut pas

par exemple, imaginer une salle de classe dotée de plusieurs tables et qui nécessitent plusieurs éléments liés à l'activité pédagogique, parfois lourde en masse, et qui se déplace en permanence. On ne peut pas imaginer dans cette salle de classe un déplacement de tables et d'individus selon la quantité de la lumière pénétrant l'édifice ou par rapport à son orientation. On ne peut pas imaginer une salle de classe, où les sujets changeront en permanence leurs directions de regard selon la direction du flux lumineux pénétrant la salle et on désire éviter par exemple le problème d'éblouissement. Ce facteur peut intervenir dans certains espaces où on peut créer des déplacements sont autant nuisibles aux occupants par ce déplacement en permanence.

Le concepteur se trouve confronté alors à une multitude de paramètres influents sur la qualité du confort offert dans un espace architectural. Qu'il soit lié à un confort acoustique, thermique ou visuel, il est nécessaire d'approvisionner le concepteur par des outils nécessaires et complémentaires pour la réussite du processus de conception. Les outils d'aide à la conception sont considérés comme les outils les plus importants pour contribuer à la réussite du processus de conception. Ces outils peuvent être exploités pour l'étude de la qualité des ambiances offertes dans un édifice ou dans un espace architectural déjà existant et de rapporté ainsi, quelques solutions intermédiaires dans le but est d'améliorer la qualité des ambiances offertes sans avoir recours à des modifications de la forme ou du concept de l'édifice. Ils peuvent agir par exemple, pour prédire correctement, les dimensions optimales des ouvertures ou des fenêtres adoptées ou de prévoir leurs emplacements optimaux et qui peut offrir un meilleur confort visuel. Les outils d'aide à la conception peuvent aussi intervenir dès le départ de la conception d'un projet architectural, mais cette fois-ci, dans le but est de proposer des éléments architecturaux importants et qui peuvent agir dans le but d'avoir le meilleur confort et d'exploiter ainsi, les potentiels offerts par l'environnement extérieur d'un édifice. Ces moyens peuvent intervenir pour agir par exemple, sur la forme du projet, sur le nombre et sur l'emplacement des ouvertures. Ils peuvent même agir pour désigner les orientations, les couleurs des surfaces et autres éléments.

I.5. LE CONFORT THERMIQUE :

Le confort thermique peut être défini comme état de satisfaction des individus vis-à-vis les conditions thermiques offertes dans un environnement ou dans un espace. Le confort thermique est atteint d'après la norme 'ISO 7730' (Boulfani 2010), '*si le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que ses mécanismes autorégulateurs ne soient pas trop sollicités*'

Près de 50% de la population mondiale vit dans les villes où elles passent près de 90% de leurs temps à l'intérieur des édifices (Batier 2016). Selon ces statistiques, il est nécessaire alors d'offrir un maximum de confort à l'intérieur des abris. Dépendant essentiellement de la température offerte aux individus occupants un espace architectural, le confort thermique offert dans cet espace est défini comme étant la sensation liée à cette chaleur et qui est propre et dépendante de chacun des individus. Les édifices doivent alors avoir, les meilleures conditions pour offrir un meilleur confort à leurs occupants. Pour assurer un bon confort thermique et pour garantir une sensation de bien-être aux individus, occupants un espace architectural, les occupants doivent n'avoir, ni trop chaud, ni trop froid. Pour cela, les édifices, en particulier, leurs enveloppes, doivent isoler correctement les conditions climatiques de l'environnement extérieur, aux conditions offertes à l'intérieur des espaces. En hiver par exemple, les édifices doivent assurer une température élevée est indépendante de l'environnement extérieur caractérisé durant cette période par des températures très basses. En été, ces derniers doivent offrir des espaces ayants des basses températures comparées à celles, offertes par l'environnement extérieur.

Considéré comme une partie du confort offert dans un espace architectural, le confort thermique assure le bien être des individus et se définit selon plusieurs aspects, psychologique, physiologique et physique (Batier 2016). Le confort thermique est traditionnellement dépendant de six paramètres qui sont²⁷ respectivement, le métabolisme, l'habillement, la température ambiante, la température moyenne des parois, l'humidité relative de l'air et sa vitesse.

Pour *le métabolisme*, il traduit la chaleur interne produite à l'intérieur du corps humain, généralement maintenue autour de 37°C (± 5 °C) (Batier 2016). Cette température est dépendante de plusieurs paramètres, tel-que par exemple, l'activité exercée.

²⁷ Le confort thermique, Site : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10250#c20964493+c2912+c2913+c2914+c20964503+c20964513>

Elle dépend aussi, du sexe de l'individu, de son état de santé et son Age. Le corps humain est considéré comme homéotherme (Batier 2016 - Roulet 2004) où il tente constamment, de conserver une température intérieure constante. Cependant, l'environnement extérieur caractérisé par la température ambiante, agit continuellement pour échanger de la chaleur avec le corps humain. Il existe plusieurs modes intervenants dans l'échange thermique entre le corps humain et l'environnement extérieur, parmi ces modes on cite (Roulet 2004) :

- l'échange de la chaleur par conduction qui se fait généralement par le contact direct entre le corps humain et un objet. Le corps humain aura une sensation d'un objet froid ou chaud selon la différence de température entre le corps humain et l'objet en contact.
- L'échange de la chaleur par convection où la chaleur s'échange entre le corps humain et l'air ambiant. La mobilité des individus et la vitesse de l'air peuvent être attribués à l'augmentation de l'échange de la chaleur entre les deux.
- L'échange de chaleur par rayonnement entre le corps humain et les surfaces voisines placées à l'intérieur d'un édifice. En effet, si par exemple, le corps humain est voisin à une surface chaude (exemple : un radiateur), il aura la sensation d'avoir chaud. Dans le cas contraire, c'est à dire si le corps humain est voisin à une surface froide, il aura une sensation de froid.
- Un autre mécanisme intervenant dans l'échange de la chaleur entre le corps humain et l'environnement extérieur. Il s'agit de l'évapotranspiration qui consiste à dégager la température du corps humain quel que soit la température à l'extérieur.

Pour *l'habillement* et qui crée un écran pour limiter l'échange thermique entre le corps humain et son environnement, il influe sur la sensation au froid et au chaud et aussi sur le bien être des occupants. Cependant, le mode d'habillement des individus dépend aussi de la nature des édifices et de la spécificité des activités exercées à l'intérieur des espaces. Il n'est pas très pratique d'exiger un niveau d'habillement intense dans les maisons pour éviter par exemple le froid car ceci peut influe sur le bien être des individus. Même dans les salles de classe par exemple, où le mode d'habillement et son intensité, peuvent influer sur la mobilité des élèves et sur le bien-être.

Le troisième élément influent considérablement sur la qualité du confort thermique offert est représenté par *la température ambiante*. Celle-ci est considérée comme l'un des paramètres fondamentaux pour assurer un bon confort thermique et qui peut prédire correctement la sensation des individus vis-à-vis, la qualité du confort thermique offert dans un espace architectural.

Via les modes de transfert de chaleur, tel-que, la conduction, la convection et le rayonnement, la température ambiante intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'homme (Boulfani 2010). Le bien-être des individus est atteint avec une température corporelle de 37°C (Hegger 2011). Si la température ambiante baisse ou augmente au-delà de cette valeur, l'environnement extérieur via les modes de transfert de chaleur entre cet environnement et le corps humain tente de modifier cette valeur. Cependant, le corps humain possède les moyens nécessaires pour la régulation thermique dans le but de maintenir cette valeur. Pour cela, le métabolisme du corps humain varie de 20% pour chaque variation de 1.5 °K (Hegger 2011).

Partant de la condition présentée précédemment où elle suggère que le confort thermique est atteint si le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que ses mécanismes autorégulateurs ne soient pas trop sollicités. Pour cela et selon cette condition, on peut dire que la température de l'air, appelée aussi, température ambiante est l'élément le plus important dans un édifice qu'il faut tenir compte dans l'étude de la qualité du confort thermique offert dans un édifice.

Répartie sur les parois d'un édifice, *la température des parois* représentant le quatrième élément influent sur la qualité du confort thermique, donne aussi une idée sur le confort éprouvé et ressentie. Si les températures des parois, très influencées par l'environnement extérieur et selon les techniques d'isolations adoptées, sont très élevées ou sont très basses, les individus placés aux voisinages des parois seront confrontés à des conditions d'inconfort thermique, représentés par des valeurs de températures excessives et par la répartition de la température non homogène entre le milieu intérieur et les parois. La température des parois et via les modes de transfert de chaleur peut aussi agir sur la valeur moyenne de la température de l'air.

Le confort thermique est assuré alors par un ensemble d'élément, trois de ces éléments dépendent essentiellement de l'individu (Gratia 2006) où le confort thermique est influencé par le taux de métabolisme, de l'état de santé de l'individu (ADER 1997) et son habillement

(Gratia 2006). Les autres éléments dépendent de l'environnement, tels-que, l'humidité relative de l'air et les courants d'air à l'intérieur d'un espace (Gratia 2006).

L'humidité de l'air a une influence subjective sur le confort des individus (Hegger 2011). En effet, un air portant un faible taux d'humidité ou un taux assez élevé peut nuire et donner une mauvaise sensation et un inconfort thermique. Le taux d'humidité recommandé pour assurer une sensation de bien-être varie entre 35% et 70% (Hegger 2011), dans cette marge, l'humidité relative n'a pas d'influence sur la qualité du confort thermique (Saddok 2016).

Concernant les courants d'air à l'intérieur d'un espace, quantifiés par une valeur et une direction précise, ils influent sur le confort thermique par l'accroissement et le renforcement des échanges thermiques par convection. Ces derniers auront une influence sur le confort thermique au-delà d'une vitesse de 0.2m/s (Gratia 2006). Mais leur influence est relative et dépendante de la température intérieure. Un faible mouvement d'air, peut contribuer à l'amélioration du confort thermique dans des espaces chauds où la température est élevée. Dans le cas contraire où l'intérieur des espaces est caractérisé par une température basse, la circulation d'air à l'intérieur des espaces peut devenir gênante et donner une nuisance accompagnée d'un inconfort thermique.

I.6. RELATION ENTRE CONFORT VISUEL ET CONFORT THERMIQUE :

Les ouvertures ou les fenêtres dans les édifices sont considérées comme des éléments primordiaux pour permettre à l'éclairage intérieur de pénétrer à l'intérieur des espaces. Le confort visuel offert dépend de plusieurs paramètres où les éléments liés aux fenêtres placées dans les parois de l'édifice jouent un rôle très important pour garantir un meilleur confort visuel. En effet la quantité de la lumière et sa répartition dépend principalement des éléments liés aux fenêtres et qui sont, leurs nombres, leurs emplacements, leurs dimensions, leurs orientations et leurs propriétés lumineuses, telle-que par exemple le facteur de lumière du vitrage. Cependant, les fenêtres placées dans un édifice doivent d'une part, assurer le confort visuel, et d'autre part, ils doivent assurer le confort thermique. Pour assurer correctement ce double rôle lié à deux types de confort, le vitrage intégré principalement dans les ouvertures des édifices doit correctement gérer les apports solaires où il faut équilibrer entre trois paramètres et qui sont (Vittone, 2010) :

- **le facteur solaire**²⁸ : qui caractérise la quantité totale d'énergie pénétrant un vitrage par rapport à l'énergie solaire incidente. Il traduit alors la contribution d'un vitrage à l'échauffement de la pièce. Variant entre 0 et 1, plus ce facteur est élevé, plus les apports solaires sont importants.

- **le facteur lumineux**¹⁹ : il traduit la transmission lumineuse d'un vitrage et sa contribution à l'éclairage naturel d'une pièce. En effet, lorsque la lumière du jour est reçue par un vitrage, une partie de la lumière est réfléchiée vers l'extérieur, une autre partie est absorbée par les matériaux et une partie est transmise vers l'intérieur.

- **le facteur thermique**¹⁹ : il traduit la quantité de chaleur traversant une paroi en régime permanent. Il peut refléter alors la capacité du vitrage à conserver la température intérieure.

Selon la définition de ces facteurs liés aux vitrages des ouvertures adoptées dans un édifice et qui caractérisent la source principale de l'éclairage naturel dans un édifice. On constate que le concepteur est confronté à un problème qui consiste à offrir le confort thermique et le confort visuel durant toutes les saisons de l'année et selon les conditions météorologiques de l'environnement extérieur. Les besoins à l'intérieur des édifices sont contradictoires d'une saison à une autre, en particulier pour nos besoins envers l'apport solaire.

En effet, en hiver par exemple, il sera bénéfique d'exploiter au maximum les apports solaires et lumineux. Ceci est contradictoire pour la saison d'été où il faut limiter considérablement l'apport thermique en gardant un apport lumineux modéré. Des solutions pratiques sont suggérées pour assurer un double confort, thermique et visuel, tels-que par exemple (Vittone, 2010) :

- Maintenir un facteur solaire à 40% pour limiter les apports solaires, en particulier en été.
- Pour le facteur lumineux, il peut être maintenu à 70% pour permettre à la lumière du jour de pénétrer l'intérieur des édifices.
- Pour le coefficient thermique, généralement il est maintenu entre 1.1 W/ (m².K) et 1.6 W/(m².K).

²⁸ Dictionnaire environnement. Site : https://www.actu-nviroennement.com/ae/dictionnaire_environnement

Le concepteur se trouve aussi confronté à un second problème et qui consiste à favoriser soit le confort thermique, soit le confort visuel. En effet, si le concepteur adopte par exemple un vitrage opaque dans le but d'améliorer le confort thermique, par la limitation des apports solaire. Ceci aura des impacts sur la quantité de la lumière pénétrant l'intérieur d'un édifice, et par conséquent, il aura aussi des impacts sur la qualité du confort visuel offert à l'intérieur d'un édifice où il peut diminuer la qualité du confort thermique. Le concepteur peut aussi, adopter des moyens de filtrage pour réduire la composante infrarouge du rayonnement solaire responsable de l'augmentation de la température dans un édifice (Vittone, 2010). Ces moyens qui nécessitent l'emplacement de plusieurs couches d'oxyde métallique ¹⁹ en surface de vitrage, peuvent réduire ¹⁹ le facteur de transmission de vitrage et par conséquent, ils peuvent diminuer la quantité et la qualité de la lumière offerte à l'intérieur d'un édifice. De plus, si le concepteur choisi un emplacement optimal et un nombre important de fenêtres qui permet d'exploiter la lumière naturelle pour une durée maximale, il se peut que ce choix lié au nombre et à l'emplacement de fenêtres, et qui a permis d'améliorer la qualité du confort visuel, nuire à la qualité du confort thermique offert dans un espace architectural. Dans la littérature (Vittone, 2010), nous avons trouvé un tableau (Tab I.5) qui résume la relation entre le confort visuel et confort thermique.

Tab.I.5. Relation entre confort visuel et confort thermique (Vittone, 2010).

	Economie d'énergie	Confort visuel et thermique
Plus de lumière à travers un vitrage ayant un coefficient de transmission élevé	Réduction de l'énergie liée à la consommation d'éclairage électrique	Plus d'éclairage naturel avec plus de contact avec l'environnement extérieur. Risque d'éblouissement si aucun dispositif de protection solaire n'est prévu
un vitrage isolant ayant un coefficient de déperdition thermique réduit	Plus les déperditions thermiques sont réduites à travers sa surface en hiver, plus le vitrage est chaud sur sa face intérieur et donc moins la température de l'air intérieur doit être élevé pour assurer le confort en hiver.	Les risques de condensation de surface sont réduits ; plus le confort thermique est grand en hiver ;
Plus de contrôle de rayonnement solaire entrant avec un facteur solaire réduit	Les frais de conditionnement d'air en été seront réduits En revanche, moins d'apports d'énergie gratuite en Hiver	Les risques de surchauffe due à l'effet de serre sont diminués ; Moins de lumière naturelle.

Il est difficile alors de prédire correctement des propriétés optimales liées en particuliers, aux propriétés des fenêtres qui permettent d'atteindre à la fois un bon confort visuel et de conserver le meilleur confort thermique. Dans ce contexte, nous avons désiré via ce travail de recherche, étudié à la fois la qualité du confort visuel offert dans un édifice, et qui s'agit d'une salle de classe situé dans la ville de Biskra et en outre, d'inspecté l'influence des ouvertures adoptées dans ces édifices sur la qualité du confort thermique offert dans ces espaces. Pour cela, nous nous sommes engagés à développer nos propres codes de calcul dédiés principalement à la modélisation de l'éclairage naturel et à la modélisation des phénomènes thermiques à l'intérieur des édifices. Le but est d'étudier la qualité du confort visuel offert, en inspectant la quantité et la qualité de la lumière offerte par un édifice déjà existant. Et de voir aussi, l'influence des ouvertures sur la qualité du confort thermique offert en adaptant la température intérieure comme grandeur de référence.

I.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les avantages offerts par un éclairage naturel et son importance dans les bâtiments. Nous avons aussi présenté la relation qui relie, l'architecture et l'éclairage naturel en indiquant, son évolution dans l'histoire de l'architecture ainsi que les moyens nécessaires à exploiter, pour prendre en compte, l'éclairage naturel dans le processus de conception dès le départ de la conception d'un projet architectural.

A la fin de ce chapitre, nous avons présenté les définitions du confort visuel et du confort thermique où nous avons indiqué un ensemble de paramètres qui permettent d'atteindre un des confort au sein d'un édifice, en montrant les éléments nécessaires pour atteindre un bon confort, visuel et thermique. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation de la relation qui lie, les deux confort, visuel et thermique, ainsi que la complexité d'atteindre ces deux types de confort simultanément. La modélisation des aspects liés aux confort, visuel et thermique permettra de réduire cette complexité et qui n'exige, le développement d'un ensemble de modèles mathématiques, numériques et physiques.

Chapitre II

Revue des notions d'ambiances architecturales et urbaines

Chapitre II

Revue des notions d'ambiances architecturales et urbaines

II. INTRODUCTION

Selon Luc Adolphe (Adolphe 1998), *une ambiance architecturale ou urbaine est la synthèse, pour un individu et à un moment donné, des perceptions multiples que lui suggère le lieu qui l'entoure*. L'ambiance architecturale traduit alors, la situation auquel un individu est confronté dans un espace, où il se trouve, et qui regroupe un ensemble d'éléments influent sur sa perception immédiate. Dans cet espace, l'individu est envahi par des sensations différentes où il sera affecté par un environnement à la fois sonore, olfactif, lumineux, esthétique, etc. Tout ces éléments (Bendekkiche 2017) font de l'ambiance un concept difficile et compliqué qui forme une globalité réunissant les aspects physiques, sociaux et sensibles.

La perception d'un individu envers l'éclairage offert dans un espace construit définit l'ambiance lumineuse ressentie dans cet espace. Considéré comme une des composantes des ambiances architecturales et urbaines et la plus influente sur la qualité de l'ambiance offerte, l'étude des l'ambiances lumineuses a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche où dans certains de ces travaux, l'ambiance lumineuse a été définie comme étant «le résultat d'une interaction entre une ou des lumières, un individu, un espace, et un usage». Cette interaction influence momentanément ou durablement la perception et le ressenti de l'espace illuminé.

Dans ce contexte et dans le but de mettre l'accent sur la définition des ambiances architecturales et urbaines, en particulier, celle qui traduit la perception des individus envers la qualité de l'éclairage offerte à l'intérieur des espaces, nous présentons dans ce chapitre une revue sur les notions d'ambiances architecturales et urbaines.

II.1. AMBIANCES ARCHITECTURALES ET URBAINES :

Le terme d'ambiance est employé souvent pour décrire l'atmosphère régie dans un espace et vécu par un individu sous l'influence de plusieurs phénomènes de nature, acoustique, thermique, visuel et autres. Certains (Hégron, 2010) définissent l'ambiance comme étant '*un ensemble d'éléments et dispositifs physiques*'. En effet, selon Augoyard (Piombini, 2013), l'ambiance représente une relation qui lie nos sensations qu'on perçoit par le contact ou par la rencontre d'un élément physique (Piombini, 2013). Autres définissent l'ambiance comme étant, une sensation offerte aux occupants d'un espace par les conditions matérielle et morale offerte dans un environnement, elle est définie comme étant un '*Atmosphère matérielle et morale qui environne un lieu, une personne*' (Hégron, 2010).

La prise en compte des ambiances dans le domaine de l'architecture a pris une nouvelle dimension au milieu des années soixante-dix à partir de l'apparition d'une nouvelle discipline destinée à l'étude des ambiances architecturales (Laporte, 2007). Intégré au cursus des architectes, la '*maitrise des ambiances*' a été associée à d'autres branches de l'engineering où elle a fait appel aux sciences et aux techniques liées à quelques phénomènes physiques tels que : l'acoustique, l'éclairage et la thermique. Ce recours vers des sciences et des disciplines a donné la notion d'une approche interdisciplinaire, ouvrant ainsi, un nouveau axe de recherche, récent et perméable, et qui a relancé une dynamique et une incitation à développer des travaux de recherches qui nécessitent, la contribution de plusieurs phénomènes couplés et la réalisation des travaux de simulation à partir du développement des modèles représentatif, et d'une caractérisation physique du sensible. D'autres prospectes ont été introduit visant des recherches en esthétique, en sciences cognitives ou encore des contributions de la sociologie et de l'anthropologie des espaces habités (Laporte, 2007).

^o <https://fr.wikiloc.com/itineraires-marcher/dresden-de-norte-a-sur-9709713>.

Pour assurer une bonne maîtrise d'un problème lié à l'étude de l'ambiance architecturale et de pourvoir développer des travaux de recherches affectés à l'analyse et à l'amélioration des ambiances urbaines, il est indispensable alors de traiter un problème interdisciplinaire qui doit assurer un couplage, entre architecture et urbanisme tout en associant les sciences de l'ingénieur, les sciences humaines et sociales. L'étude des ambiances architecturales et urbaines doivent être utilisées pour mener une analyse liée aux espaces ainsi que leurs conceptions avec une réflexion profonde aux configurations sensibles (Laporte, 2007). L'ambiance architecturale doit avoir une dimension spatiale généralisée et non spécifique à un espace bien définie, qu'il soit destiné à un espace, d'habitation, de travail, de commerce ou de présentation, voir même pour d'autres espaces (espace de transport, hôpital, musée,etc.). Les ambiances architecturales et urbaines adoptent alors, une notion trans-scalaire (Laporte, 2007). Les ambiances architecturales et urbaines regroupent un ensemble d'éléments (Fig.II.1), complémentaires et qui ne peuvent être séparés l'un de l'autre. Ces éléments sont : l'ensemble des phénomènes physiques intervenant dans un espace ou dans l'environnement construit, la perception et enfin l'usage (Hégron, 2010).

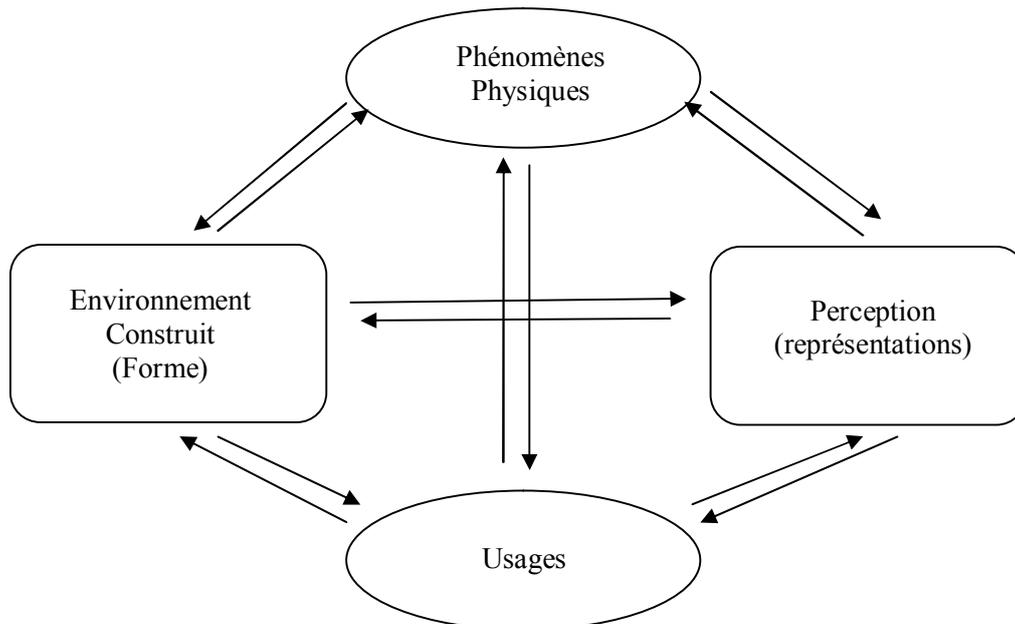


Fig.II.1. Eléments composants les ambiances (Hégron, 2010).

En effet, grâce aux phénomènes physiques présents dans un lieu, incluant, en particulier, la lumière, la température, le son, les usages d'un lieu, peuvent apprécier la qualité offerte à l'intérieur des espaces tout en déterminant la forme et les propriétés de l'environnement. Cette appréciation est dépendante des usages mais aussi de l'usage des lieux. Il existe alors une relation primordiale entre usages et espace où la prise en compte des perceptions récoltées et l'expression des représentations permettra d'intégrer et d'adapter le côté architectural, urbain et paysagé dans le processus de conception des édifices pour mieux cerner l'usage des espaces (Hégron, 2010).

II.2. AMBIANCES LUMINEUSES :

Les ambiances architecturales et urbaines réunissent alors dans un même axe l'ensemble des phénomènes physiques intervenant dans un espace ou dans l'environnement construit, la perception du milieu et l'influence de l'environnement. Elle reflètera la sensation des usages d'un lieu conçu selon les usages adoptés et qui sert à diffuser la perception via les qualités offertes aux occupants et selon leurs attentes. L'objet ou l'environnement construit, offre aux concepteurs les moyens nécessaires pour agir et pour assurer la maîtrise des phénomènes physiques (Tourre, 2007) où il offre les outils nécessaires afin d'assurer le contrôle de certains éléments physiques influencent la sensation et l'ambiance ressentie. Considéré comme un élément fondamental dans l'ambiance lumineuse, l'éclairage offre l'opportunité aux concepteurs de créer un lien direct entre un paramètre physique et l'environnement construit. « *La lumière révèle l'espace, et l'espace transforme la lumière* » (Tourre, 2007).

Narboni définit l'ambiance lumineuse comme étant (Chaabouni 2008) « *le résultat d'une interaction entre une ou des lumières, un individu, un espace et un usage* ». Dans cette définition, les composantes d'une ambiance architecturale sont réunies pour caractériser une des ambiances, produite essentiellement par l'interaction d'un espace éclairé et un usage de cet espace, en offrant une sensation qui dépendra de l'utilisateur et de l'usage de l'espace considéré. Ayant le même titre que l'ambiance sonore, olfactive ou thermique, l'ambiance lumineuse est considérée comme une des composantes des ambiances architecturales et urbaines et elle est caractérisée par un profil complexe et composé en couvrant de multiples

phénomènes de nature, physiques, socio-humaines, ou encore des phénomènes sensibles et esthétiques (Chaabouni 2008).

En effet, pour donner une définition de la lumière et de présentés des interprétations liées aux faits de la lumière, on doit se référer aux notions de la physique et aux lois liées à la propagation et d'absorption. Grâce aux recours vers les lois de la physique, on peut par exemple présenter la définition de la lumière comme étant une onde électromagnétique à oscillation sinusoïdale et qui se propage dans l'air, avec une vitesse précise. Aussi et on se référant aux lois de la physique, on peut interpréter par exemple sa visibilité par rapport à l'œil humaine et dire quelle est caractérisée par une longueur d'onde comprise entre 0,38 micron et 0,78 micron. L'éclairage présente aussi une dimension socio-économique où il contribue à l'amélioration de la qualité de vie ou du travail selon l'usage des lieux conçus. L'éclairage offert dépend aussi des individus dépendant par exemples, de leurs capacités oculaires. L'éclairage agit sur la sensation et sur les sentiments des individus ressentis à l'intérieur des espaces (Chaabouni 2008). Il peut aussi contribuer à l'amélioration du côté esthétique des espaces. L'ambiance lumineuse présente alors une dimension sensible et une autre, esthétique.

Toutes ces dimensions font de l'ambiance lumineuse un concept difficile et composé et qui forme une globalité réunissant les aspects physiques, sociaux et sensibles. L'ambiance lumineuse est décrite alors par un aspect multidimensionnel qui regroupe un ensemble de phénomènes et qu'il lui permet d'encadrer correctement le champ sémantique du concept. En effet, selon Augoyard, un ensemble de phénomènes locaux peut créer une ambiance si cet ensemble peut vérifier les quatre conditions suivantes (Chaabouni 2008) :

- *Les signaux physiques de la situation sont repérables et décomposables ;*
- *Ces signaux interagissent avec d'un côté, la perception, les émotions et l'action des sujets et dans un autre côté, les représentations sociales et culturelles.*
- *Ces phénomènes composent une organisation spatiale construite ;*
- *Le complexe signaux-percepts-représentations est exprimable.*

Ces conditions reflètent d'une façon générale la définition d'une ambiance créée par un ensemble de phénomènes. Celle-ci est définie comme étant une sensation offerte aux

occupants d'un espace à travers des signaux physiques et qui doivent être percevables et dissociable. Le sujet sera confronté alors à des signaux physiques multiples et disloqués, lui offrant (les signaux) ainsi, des perceptions visuelle, auditive et olfactive (Chaabouni, 2011). Chacun de ces perceptions est représentatif est compose une partie partielle de l'ambiance, leurs assemblage permettra de présenté une appréciation de l'ambiance et de pouvoir combiné le sens de l'ambiance globale ressentie par le sujet dans un environnement. En effet, selon Amphoux (Chaabouni, 2011), *'Le propre de l'ambiance, c'est de mêler et d'enchevêtrer les perceptions déterminées par les différents canaux sensoriels dont dispose le sujet'* (Chaabouni, 2011).

L'ambiance est alors définie comme étant un ensemble de sensation offerte dans un espace où le sujet est envahi par des sensations différentes où il sera affecté par cet environnement à la fois sonore, olfactif, lumineux, esthétique, etc (Sutter 2014) . L'appréciation d'une ambiance partielle ou même globale, est relative, dépendante du sujet où plusieurs paramètres peuvent intervenir et influent son jugement prononcé envers l'ambiance. Ces paramètres peuvent être de nature culturel, géographique, traditionnel, où même a des paramètres liées au sujet tel-que, son état de santé et moral, ces traditions, ces habitudes, son âge, sa personnalité. En effet, une ambiance offerte dans un espace peut être jugée comme désagréable et inconfortable par un individu et cette même ambiance peut être considérée comme agréable et souhaitable par un autre sujet. D'autres facteurs liés à l'espace et à son usage influent considérablement sur l'appréciation de l'ambiance ressentie. En effet, les matériaux exploités dans la conception d'un édifice, ces propriétés géométriques liés à son volume et ces dimensions, les textures adoptées ainsi que les couleurs utiliser (Chaabouni, 2011), agissent sur la sensation offerte vis-à-vis une ambiance. Cette sensation dépendra aussi, de l'usage des lieux et aux activités réservées dans ces lieux. En effet, les couleurs, les dimensions, le volume, l'éclairage, les dimensions offertes pour un lieu par exemple, de détraction, diffèrent à celui adopté dans un lieu d'apprentissage ou pour un autre lieu utilisé par exemple aux soins des patients. Même si la nature de l'usage des lieux affecte l'appréciation de l'ambiance ressentie, le sujet agit aussi différemment via l'appréciation de l'ambiance pour un lieu qui conserve la même activité. Les éléments liés à un espace d'apprentissage des petits enfants diffèrent à celui adopté pour des sujets plus âgés. Aussi, les conditions nécessaires et intervenant dans l'appréciation de l'ambiance diffèrent entre une salle de classe, ou dans une salle de lecture ou mêmes dans des salles destinées au dessin ou

pour faire des activités sportifs. Plusieurs éléments se regroupent alors et s'intègrent pour représenter une ambiance vécue, il s'agit des phénomènes physiques, des espaces construits selon leur usage et leur usager (Fig.II.2) (Chaabouni, 2011).

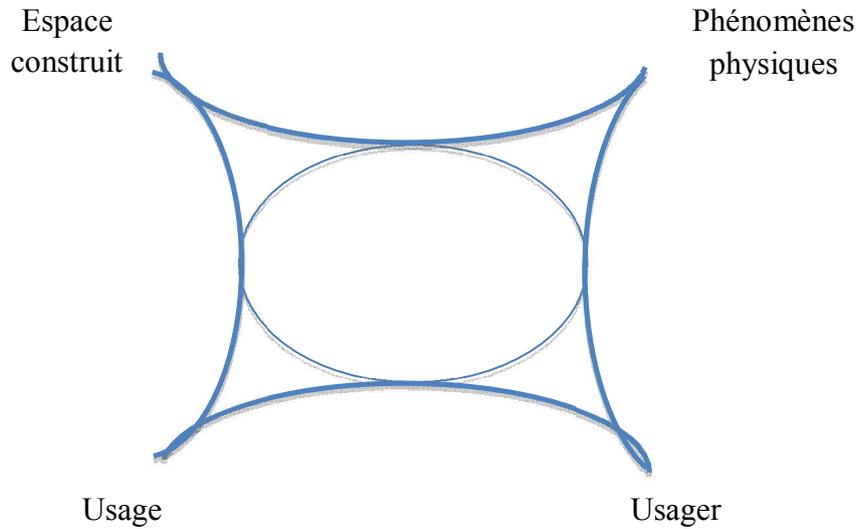


Fig.II.2. Ambiance architecturale vécue (Chaabouni, 2011).

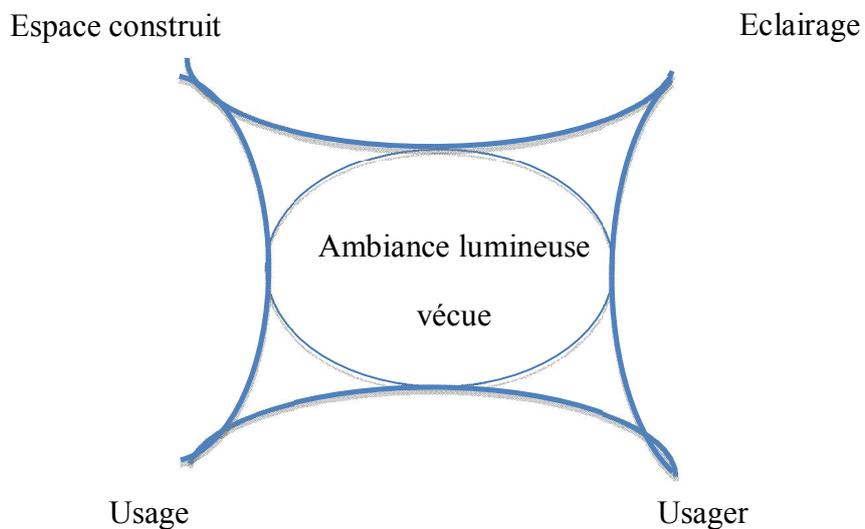


Fig.II.3. Ambiance lumineuse vécue (Chaabouni, 2011).

Considéré comme une des composantes de l'ambiance architecturale, l'ambiance lumineuse fait aussi intervenir plusieurs éléments qui s'intègrent pour créer une ambiance lumineuse vécue. Cette ambiance est créée par un élément physique primordial, il s'agit de la lumière. Cette ambiance est alors vécue par l'interaction de plusieurs éléments qui sont respectivement : l'éclairage, les espaces conçus, usage et l'utilisateur (Fig.II.3) (Chaabouni, 2011).

II.3. LES PRINCIPAUX PARAMETRES DES AMBIANCES LUMINEUSES :

Une alliance forte se crée entre lumière et un espace architectural pour créer un environnement sain et qui peut offrir une ambiance lumineuse agréable où le sujet peut apercevoir des objets à l'intérieur d'un édifice nettement et sans la présence de facteurs contribuant à l'apparition de gêne visuelle. L'environnement lumineux est composé alors par la lumière et l'espace architectural.

Cet environnement est caractérisé par des paramètres qualitatifs, qui peuvent traduire le confort visuel offert à l'intérieur d'un espace et l'agrément des sujets, et des paramètres quantitatifs dépendants principalement des exigences et des besoins des occupants. On partant du principe (Sutter 2014) que l'ambiance lumineuse inclue un ensemble de paramètres lié à l'environnement lumineux et qui s'interagissent pour créer une ambiance ressentie par un sujet, vis-à-vis cet environnement, on peut dire alors que l'ambiance lumineuse est caractérisée par trois dimensions principales qui sont : la lumière, l'objet architectural et le sujet (Sutter 2014) . Cependant et pour avoir une bonne ambiance lumineuse, on doit assurer, une meilleur quantité et qualité de lumière (Sutter 2014) . En effet, la quantité de lumière doit répondre aux attentes des individus ont leurs offrant, une quantité de lumière suffisante et nécessaire pour aider les individus à faires leurs taches dans les espaces architecturaux dans les meilleurs conditions. Aussi elle doit offrir des niveaux d'éclairage adéquat à leur environnement et selon la nature des lieux. Pour la qualité de la lumière offerte, elle influe sur la qualité de l'ambiance lumineuse où elle se caractérise par (Sutter 2014) les notions du confort et d'agrément.

L'ambiance lumineuse est régie alors par trois paramètres et sa qualité est dépendante de la satisfaction de ces trois éléments (Fig.II.4). Si un de ces éléments est défaillant, l'ambiance lumineuse appréciée, ne peut répondre aux attentes des occupants d'un espace (Sutter 2014) .

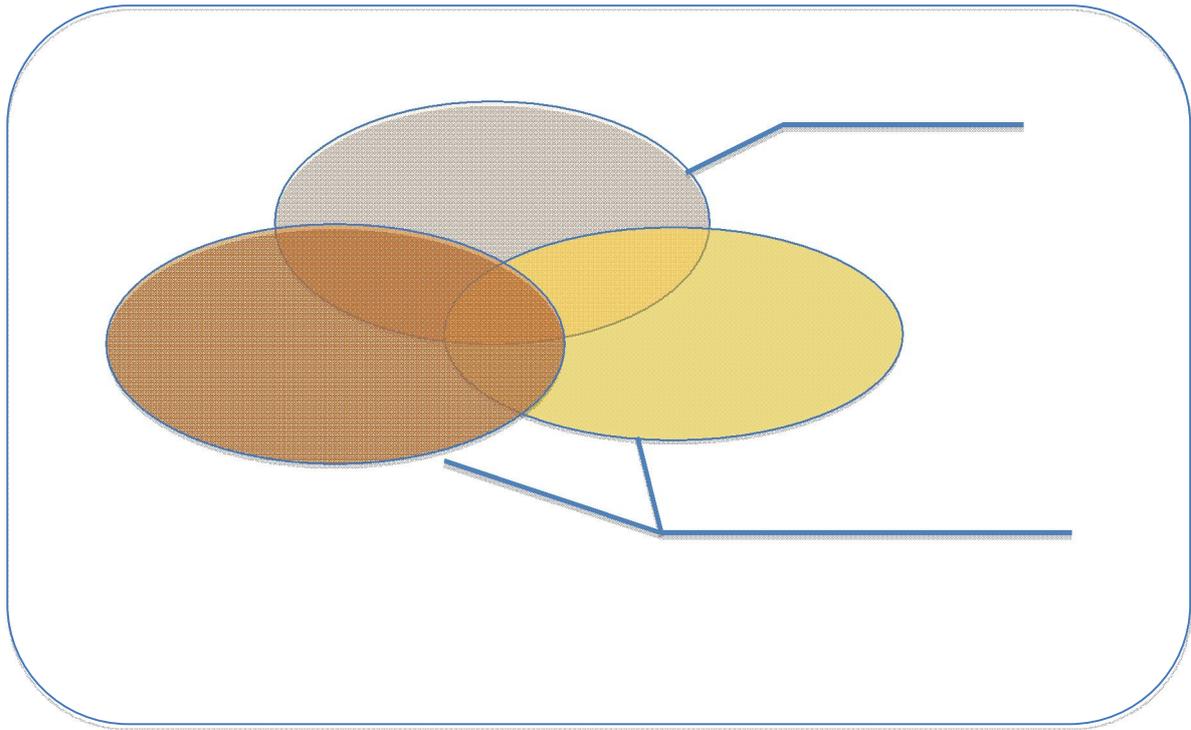


Fig.II.4. les éléments principaux d'une ambiance lumineuse (Sutter 2014) .

II.4. TYPES D'AMBIANCES LUMINEUSES :

Le passage de la lumière dans un espace architectural ainsi que ces impacts sur le sujet et sur son environnement n'est jamais imprévisible, en effet, selon Alberto Campo Baeza : *'L'architecture, l'espace ne sont rien sans lumière. Rien. Moins que rien. Rien qu'édifices, fussent-ils bien insérés dans leur contexte. Rien que des formes, fussent-elles d'une grande beauté. Rien que des fonctions, fussent-elles bien résolues. Rien que constructions, fussent-elles ingénieusement érigées. Rien que structure, fussent-elles novatrices. Rien que matériaux, fussent-ils assemblés d'exquise manière. Sans oublier le dessin, dont est abondamment arrosé le tout. Mais la lumière ? Où se trouve l'espace ?, ou est l'architecture ? Sans lumière, il n'est d'architecture qui soit.'* (Reiter. 2005).

La lumière dans un espace architectural permet au sujet de visionner les objets et de découvrir les espaces intérieurs d'un édifice. En dehors du rôle classique de la lumière qui consiste dans l'ensemble à visionner et offrir le pouvoir de voir dans les édifices, la lumière naturelle crée des ambiances lumineuses plus agréables à celle offerte par une lumière artificielle et elle présente des avantages bénéfiques pour la santé humaine. La lumière bleue du matin par exemple contribue à l'augmentation de la concentration des individus et la

lumière rouge de la fin de journée, permet de nous clamer⁷. La lumière du jour permet de fortifier les os et de synchroniser notre rythme biologique. Elle permet aussi de synchroniser notre sommeil et elle agit positivement pour améliorer le moral des individus. Elle est bénéfique pour la peau des individus et elle permet, à mieux apprendre⁸ et de générer des impressions psychologiques liées à l'espace architectural (Reiter. 2005).

L'infiltration de la lumière dans un espace architectural crée des impacts psychologiques, sensoriels et symboliques. Cette infiltration génère dans un édifice ou dans un lieu architectural, un des types des ambiances lumineuses. Sachant qu'il existe trois types d'ambiances lumineuses, la distinction entre ces trois types est basée sur la luminosité d'un espace et sur le rapport entre la lumière et l'ombre. Cette distinction dépend aussi de la répartition spatiale de la lumière au sein des édifices (Reiter. 2005).

A partir de cette distinction, trois principaux types d'ambiances lumineuses sont définis (Reiter. 2005) :

- **II.4.1. LA PENOMBRE** : Dans ce type d'ambiance, la lumière se focalise dans un endroit partiel de l'espace où elle crée un rapport directe entre architecture et lumière en offrant '*un dialogue entre l'ombre et une lumière solide qui la transperce par endroits*' (Reiter. 2005 ; S. Bendekliche 17). Ce lien entre lumière et architecture a été adopté depuis l'architecture romaine où il a connu une évolution en particulier dans les lieux cultes. Dans ces lieux, les concepteurs ont créé une pénombre permanente par un fort contraste de lumière naturelle pénétrant des ouvertures de faibles dimensions et placées dans les niveaux supérieurs des édifices. Ce type d'ambiance a créé dans ces lieux, une relation tangible entre architecture et lumière et qui a offert un discours entre l'ombre et la lumière dans le but de matérialiser des choses spirituels pour faire preuve de l'existence de la divinité et de son unicité (Gallas 2013).

⁷ QUELLE EST L'INFLUENCE DE LA LUMIÈRE SUR L'ÊTRE HUMAIN ?/ lien : <https://www.eclairage-veranda.com/nl/node/99>.

⁸ 7 bienfaits de la lumière du soleil./ Lien : https://www.sciencesetavenir.fr/sante/7-bienfaits-de-la-lumiere-du-soleil_19492



Fig.II.5. Eglise Saint-Etienne-Nevers (1063-1097) (Gallas 2013).
Exemple d'une ambiance pénombre.

- **II.4.2. L'AMBIANCE LUMINESCENTE :** Avec les changements des réflexions des utilisateurs et des concepteurs envers l'éclairage intérieur des édifices, en particulier, celui qui adopte la lumière du jour comme source d'éclairage et en donnant plus de place et d'importance à la lumière dans les édifices, pour la rendre plus fonctionnelle, plus intense et qui s'adapte aux besoins des utilisateurs selon son usage. Avec les avancées technologiques qui ont permis d'avoir une lumière plus homogène et une répartition spatiale beaucoup plus importante, et avec les techniques qui ont permis de conserver un lien direct avec l'environnement extérieur et d'assurer la continuité spatiale entre environnements, extérieur et intérieur. Avec l'apparition de nouveaux matériaux qui ont donné naissance à des ouvertures et des sources d'éclairage invisibles et qui s'intègrent aux parois des édifices. La lumière a créé le type d'ambiance lumineuse qui se caractérise par '*une clarté ambiante, une omniprésence d'une lumière qui tend à disparaître parce qu'elle est partout.*' (M .A. Gallas 13, Reiter. 2005).



Fig.II.6. Hôtel Mercure à Blois, créés par l'architecte d'intérieur Nicolas Thermed⁹.
Exemple d'une ambiance lumineuse.

- **II.4.3. AMBIANCE INONDEE** : ce type d'ambiance est présente dans des espaces où l'intensité et la quantité de lumière dépasse les limites pour atteindre des valeurs et des apports très importantes et pour inonder en lumière tout l'espace intérieur des édifices, offrant ainsi, une ambiance inondée qui se caractérise par *'une exaltation de la lumière embrassant tout l'espace ; il se trouve qu'il y a trop plein d'une lumière envahissante et parfois écrasante.'* (M .A. Gallas 13, Reiter. 2005).



Fig.II.7. Exemple d'une ambiance inondée, Photo¹⁰.

⁹ AMBIANCE "CELESTE" POUR UN PROJET D'ARCHITECTURE D'INTÉRIEUR,
<http://www.lilylatifi.com/actualites/textile-et-architecture-interieur>.

¹⁰ Revue des principes d'éclairagisme, <https://www.standardpro.com/fr/revue-des-principes-declairagisme/>

II.5. AMBIANCE LUMINEUSE ET AMBIANCE THERMIQUE

L'étude des ambiances architecturales et urbaines fait principalement appelle à une recherche multidisciplinaire où elle intègre en dehors des sciences de l'engineering, les sciences humaines et les sciences sociales. Des approches multicritères réunissant une abondance d'hypothèses et des diverses méthodes qui s'intègrent pour relancer la prospection des ambiances architecturales et urbaines, caractérisé par la multitude et l'interaction des ambiances simultanément lumineuses, thermiques, aérauliques, sonores et olfactives (Adolphe 1998). Le développement du thème des ambiances architecturales est dépendant alors d'un problème complexe où toute ambiance compose simultanément avec l'ensemble des modalités sensorielles (Adolphe 1998). L'étude des ambiances architecturales s'articule sur des éléments d'analyses et qui sont, des signaux physiques, architecture des lieux, activité perspective et conduites sociales. L'intersensorialité et l'interdisciplinarité traduisent la complexité de l'étude des ambiances architecturales (Hégron, 2010).

L'ambiance lumineuse est l'une des composantes des ambiances architecturales où elle était largement étudiée dans plusieurs travaux de recherche. Selon CHAABOUNI, les dimensions intervenantes dans la conception des ambiances lumineuses sont respectivement, la dimension d'usages, la dimension esthétique et la dimension technique (Chaabouni, 2011). En effet, pour bien concevoir il est nécessaire d'offrir des lieux ayants des espaces intérieurs qui peuvent offrir un meilleur confort visuel selon les usages attribués à chaque espace. Ces espaces doivent assurer des lieux ayants une qualité et une quantité de lumière suffisante et qui permettent aux occupants de voir les choses correctement et sans efforts pour éviter la fatigue visuelle à long terme et pour assurer des lieux qui favorisent le bien être des occupants. La qualité et la quantité de lumière offertes à l'intérieur des espaces est dépendante de l'usage et des activités réservées dans chaque espace. Le concepteur et on adaptant la lumière du jour comme source principale doit offrir des espaces où la lumière ne doit être ni-forte ni-faible est adéquate à l'usage des espace et caractérisant la spécificité des espaces liée aux pratiques et des activités exercées dans chaque espace. Le concepteur doit agir correctement dès le départ de la conception d'un projet architectural et selon son usage, pour concevoir un espace ayant une ambiance qui offre une meilleure qualité de lumière dépendante de certains éléments qualitatifs et qui sont par exemples, sa répartition, son homogénéité et son contraste. Ces éléments sont choisis selon l'usage des lieux. La quantité de lumière offerte est dépendante aussi de l'usage des lieux où il existe certaines valeurs de

référence à respecter et exigées pour chaque activités exercées dans un espace, qu'il soit un espace de travail ou autre. L'intégration de la dimension d'usage dans la conception des ambiances permettra de garantir les éléments d'un confort visuel, où l'architecte peut concevoir des espaces intérieurs ayant un niveau d'éclairage adéquat à l'usage des espaces. Un rendu des couleurs correct et dépendant des activités exercées ; une répartition harmonieuse de la lumière dans les espaces intérieurs ; l'absence d'ombres gênants, en particulier dans les espaces de travail ou de lecture par exemple et enfin l'absence d'éblouissement dans le champ de vision des occupants et dépendant des orientations et des activités exercées.

La prise en compte de la lumière dans la conception architecturale a des impacts sur la qualité des espaces conçus. Elle a été exploitée depuis longtemps, en particulier dans les lieux cultes, pour créer des ambiances où les concepteurs ont voulu exploiter la lumière pour renforcer leurs croyances et donner preuve de l'existence d'une force extérieure. Les concepteurs des églises gothiques par exemples ont adopté la lumière pour créer des espaces exaltés en lumière (Renoue 2001). Les immenses verrières créent et la structure osseuse de l'architecture permet de créer une luminosité maximale à l'intérieur des espaces (Renoue 2001) mais aussi de créer une certaine spécificité liée à l'esthétique lumineuse à l'intérieur et à l'extérieur des espaces. Selon Rafael Serra, le concepteur doit adopter la lumière naturelle non seulement dans ses aspects quantitatifs mais aussi par ses qualités esthétiques ²⁵. Le concepteur crée une ambiance lumineuse et offre une dimension esthétique à l'intérieur des espaces où il peut adopter son profil artistique et de créativité et on exploitant certains paramètres liés à l'éclairage. Tels-que, l'intensité de la lumière offerte, sa répartition et on jouant sur le contraste offert et sur les ombrages offerts, ainsi que de choisir certaines zones selon leurs emplacements et selon leurs importances dans les édifices pour les rendre soit des zones très éclairées ou très ombrées. En effet, selon Alvaro Siza²⁵, '*dans un bâtiment, j'aime la lumière, le pénombre et même l'obscurité.*' C'est avec ces éléments indissociables que le concepteur agit pour créer une certaine ambiance intérieure ayant une esthétique lumineuse et qui caractérise chaque espace et dépendant de ces éléments adoptés.

²⁵ La lumière en architecture d'intérieur. Site : <https://www.linkedin.com/pulse/20140707173530-26370643-la-lumi%C3%A8re-en-architecture-d-int%C3%A9rieur>.

²⁶ Ambiances en architecture Lumière et Espace Architectural Azeddine BELAKEHAL, Site : https://cours-examens.org/images/Etudes_superieures/Architecture_et_urbanisme/2eme_annee/Architecture/Theorie_projet_S2/Cours%20S2-9.pdf

La prise en compte de la dimension esthétique dans la conception des ambiances lumineuses, en particulier à l'intérieur des espaces, augmente la richesse des espaces architecturaux et crée des ambiances lumineuses visuellement très riches (Chaabouni, 2011). Pour offrir cette richesse, il est plus intéressant d'adopter la lumière naturelle dans l'éclairage des édifices. Celle-ci peut offrir une richesse inégalée en termes d'intensité, de variabilité de teinte, de direction. Elle est notre référence universelle (c'est grâce à elle que nous attribuons leurs couleurs aux objets) et elle nous donne nos repères spatiaux-temporels ²⁶.

Selon CHAABOUNI (Chaabouni, 2011), la troisième dimension intervenante dans la conception des ambiances lumineuse est la dimension technique. Cette dimension est celle qui reflète les moyens nécessaires et qui doivent être adoptée pour créer une ambiance lumineuse. Elle traduit le côté matériel choisi par le concepteur et qui doit être distingué et sélectionné soigneusement pour offrir une ambiance lumineuse souhaitée selon, l'usage des espaces et selon la dimension esthétique désirée. La dimension technique exploite un ensemble de moyens qui permettent d'avoir une qualité et une quantité de lumière désirées. Plusieurs éléments s'intègrent pour créer cette dimension et qui sont par exemples, les couleurs des parois intérieures, les coefficients de réflexion, des murs intérieurs, du sol et du plafond, les ouvertures implantées dans les parois extérieures des édifices et leurs propriétés, principalement, leurs nombre et leurs dimensions, la qualité du vitrage adopté et les orientations des ouvertures.

La conception d'une ambiance lumineuse fait appelle alors à trois dimensions comme présenté dans la Fig.II.8 (Chaabouni, 2011). La dimension d'usage tente d'offrir certaines limites liées à la qualité de l'éclairage offert et aux valeurs de référence nécessaires pour offrir un confort visuel dépendant de l'usage des espaces et des activités réservées à l'intérieur. La dimension esthétiques traduit le côté d'art et artistique adopté par le concepteur et on exploitant la lumière comme moyen de création. La dimension technique inclue les éléments matériels nécessaires et mette à la disposition des concepteurs pour offrir l'ambiance lumineuse désirée. Cependant, certains de ces éléments techniques peuvent d'un côté intervenir pour améliorer la qualité de l'ambiance lumineuse et d'aboutir à un confort visuel désiré, mais aussi, ils peuvent intervenir dans d'autres ambiances (comme par exemples, thermiques, acoustiques et autres...), soit pour l'améliorer et atteindre les attentes et les objectifs, soit pour la détériorer en s'éloignant des attentes liées à chaque type d'ambiance.

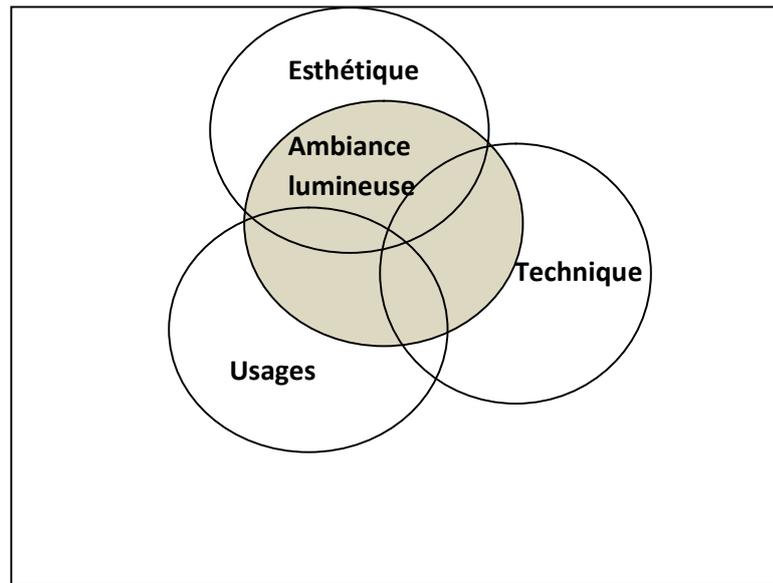


Fig.II.8. Les dimensions intervenant dans la conception d'une ambiance lumineuses
(Chaabouni, 2011).

Il existe alors des éléments, appartenant à la dimension technique, intermédiaires et qui interviennent dans la création d'une ambiance lumineuse désirée mais ils influent aussi sur la qualité des autres ambiances, quelles soit, thermiques, acoustiques ou autres. Pour l'ambiance lumineuse, nous considérons que les ouvertures adoptées dans les édifices sont les éléments les plus influents sur la qualité de l'ambiance offerte. Celle-ci, dépendra des propriétés des ouvertures adoptées tels-que par exemple, le nombre des ouvertures, leurs dimensions, leurs propriétés et leurs orientations. Cependant et on agissant sur l'amélioration de la qualité de l'ambiance lumineuse et on adoptant les ouvertures et leurs propriétés comme paramètres à déterminer, peut-on contribué à l'amélioration ou à la dégradation des autres ambiances ? Le concepteur se trouve alors face à un problème complexe est dépendant de plusieurs paramètres intervenants dans d'autres ambiances.

Dans ce contexte, est-il possible de proposer un moyen d'aide à la conception offert aux concepteurs pour pouvoir déterminé les paramètres des ouvertures et qui permettent d'offrir une ambiance lumineuse désirées ?.

Aussi, est-il possible d'inspecter et d'estimé ainsi, l'influence des paramètres des ouvertures adoptées, sur la qualité des autres ambiances créés à l'intérieur des espaces ?

Pour les ouvertures et qui sont considérées comme éléments techniques, primordiaux dans la création d'une ambiance lumineuse, nous considérons qu'ils peuvent agir seulement sur la qualité des ambiances thermiques et acoustiques (Fig.II.9.). Leurs influence sur les autres ambiances est considéré comme minime voir inexistante. Il est difficile alors de concevoir une ambiance lumineuse et d'atteindre les attentes sans affecter aux autres ambiances principalement, l'ambiance thermique et acoustique. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous limiterons notre étude sur l'effet des ouvertures sur la qualité de l'ambiance thermique.

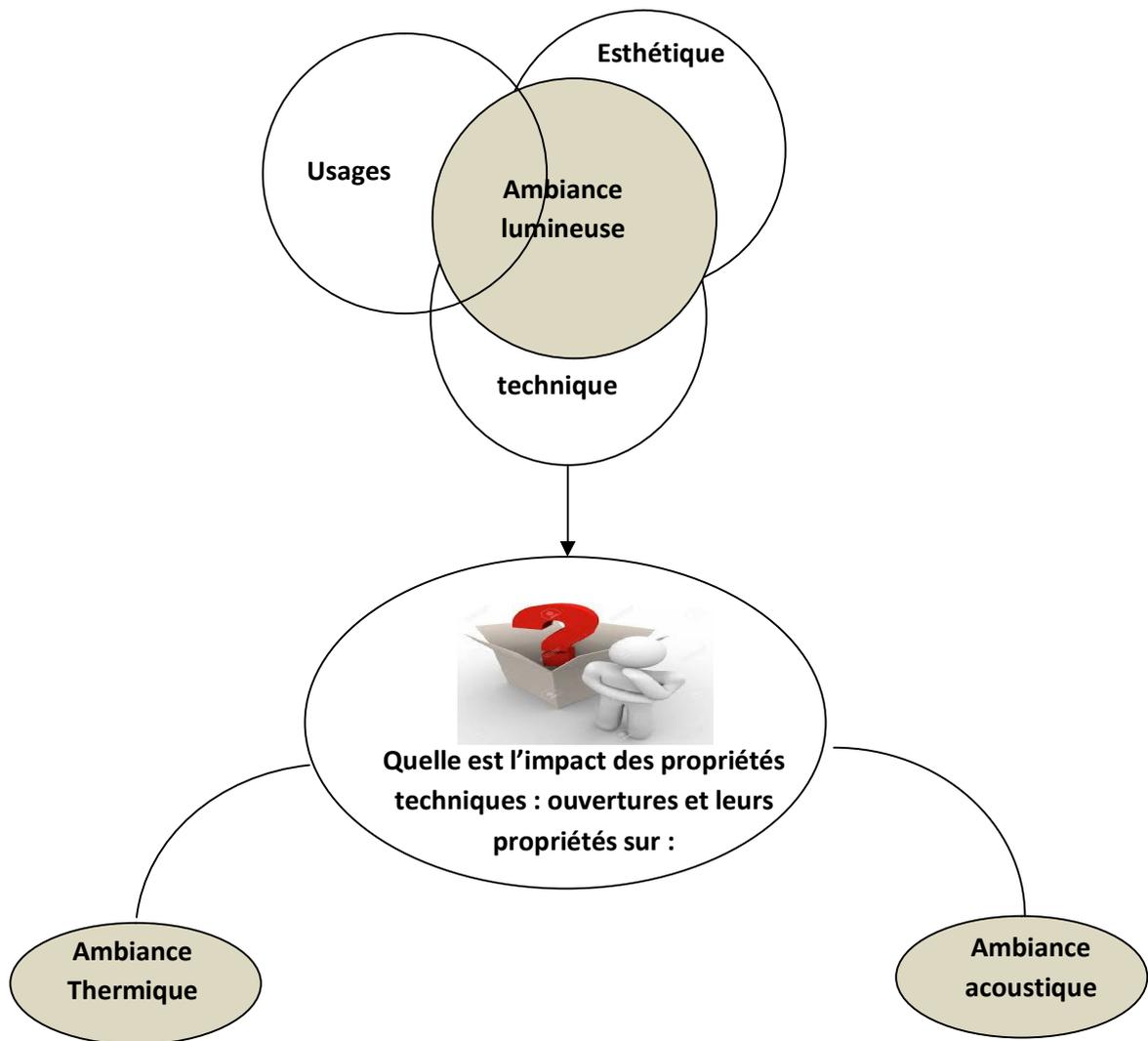


Fig.II.9. L'influence de certaines propriétés techniques sur les ambiances, thermiques et acoustiques.

II.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition de l'ambiance lumineuse où nous avons présenté, ces principaux éléments ainsi que les démarches à prendre, selon plusieurs phases à respecter et qui permettront de prendre correctement, la lumière du jour dans le processus de conception.

Dans plusieurs travaux de recherches, les dimensions intervenant dans la conception d'une ambiance lumineuses ont été décrites. CHAABOUNI résume ces dimensions en trois et qui sont respectivement, la dimension d'usages, la dimension esthétique et enfin, la dimension technique. A travers les éléments intervenants dans la dimension technique, principalement les ouvertures adoptées dans le bâtiment, nous avons montré leurs influences sur d'autres ambiances, principalement, l'ambiance thermique.

Chapitre III :

Méthodes de Modélisation des Ambiances Lumineuses et Thermiques

Chapitre III

Méthodes d'Evaluation des Ambiances Lumineuses et Thermiques

III. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons présentés les éléments nécessaires qui doivent être présents pour assurer le confort visuel et le confort thermique où nous avons terminé par montrer, la complexité de la relation qui lie, le confort visuel et le confort thermique. Nous avons proposé de procéder au développement d'un outil d'aide à la conception utilisé pour la modélisation de l'éclairage naturel et des phénomènes thermiques présents dans un espace architectural. Dans le présent chapitre nous allons alors présenter, l'ensemble des modèles mathématiques, numériques et physiques et qui ont permis de concevoir, sous environnement MATLAB, deux codes de calcul adoptés d'une part, à la modélisation de l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments et dans d'autre part, à la modélisation de l'ensemble des phénomènes thermiques présents dans les espaces architecturaux.

Sachant qu'il existe plusieurs méthodes d'évaluation des ambiances lumineuses et/ou thermiques, tels-que par exemple, la méthode in situ ou sur maquette, la méthode des mesures où certains grandeurs physiques sont adoptées pour évaluer la qualité des ambiances, tels-que l'éclairage ou la température et enfin la méthode par questionnaires où l'avis de l'ensemble des sujets est traduite pour évaluer la qualité des ambiances offerte. Cependant et dans le but d'avoir une meilleure précision et de proposer un outil d'optimisation et de prédiction, nous avons opté dans le cadre de ce travail de recherche vers l'utilisation de la méthode de simulation des ambiances lumineuses et thermiques. Les modèles développés seront appliqués pour la simulation des ambiances lumineuse et ou thermique d'une salle de classe située dans la ville de Biskra.

Ce chapitre et qui consiste un point de départ vers la modélisation de l'éclairage naturel et des phénomènes thermiques aux sains des bâtiments, présentera l'ensemble des aspects primordiaux pour la simulation dans les espace architecturaux, en particulier, celle liée aux ambiances visuelles et aux ambiances thermiques.

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté quelques logiciels très exploités dans la simulation de l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments. Aussi, nous avons présenté l'ensemble des méthodes adoptées pour le calcul de l'éclairage naturel à l'intérieur des espaces architecturaux ainsi que les approches adoptées pour la simulation de l'éclairage naturel et qui sont principalement, l'approche directe et l'approche inverse.

A la fin de ce chapitre, nous avons exposé, les avantages offerts par la simulation thermique des bâtiments où nous avons cité quelques logiciels très exploités dans la simulation énergétique. L'ensemble des modèles, mathématiques et numériques et qui ont permis à une modélisation tridimensionnelle des phénomènes thermiques à l'intérieur des bâtiments seront largement présentés.

III.1. MODELISATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL DANS UN ESPACE ARCHITECTURAL :

Plusieurs outils d'aide à la conception ont été développés et exploiter par les concepteurs au cours de la conception d'un projet architectural. Parmi ces outils, des logiciels ont été développés pour modéliser un éclairage à l'intérieur d'un édifice et provenant essentiellement d'une source naturelle. Parmi ces logiciels on cite par exemples, LIGHTSCAPE, RADIANCE, ECOTECH, DAYSIM et PHANIE, voir même d'autres logiciels. Chacun de ces outils offre au concepteur la possibilité de créer une maquette virtuelle représentant la forme du projet et qui prend en compte, l'ensemble des éléments englobant un projet dans le but de traduire l'influence de l'ensemble des éléments influent sur la qualité de l'éclairage offerte. Ces outils exploitent chacun, une des méthodes numériques spécifiques ou chaque logiciel peut donner des résultats des simulations reflétant le comportement des édifices vis-à-vis un éclairage purement naturel ou même mixte, mais selon des contraintes ou des conditions spécifiques à chacun de ces logiciels.

III.2. EXEMPLES DE LOGICIELS DE MODELISATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL :

Il existe plusieurs logiciels de modélisation d'un éclairage intérieur qu'il soit artificiel ou naturel. Conçut par AUTODESK, LIGHTSCAPE fais parties de ces outils utilisés dans la modélisation tridimensionnelle de l'éclairage à l'intérieur d'un édifice. Qu'il soit un éclairage naturel ou artificiel, LIGHTSCAPE détermine l'éclairage intérieur ³⁰ à partir du calcul des sources lumineuses directes et par le calcul de l'éclairement aux niveaux des surfaces intérieurs éclairés indirectement par la réflexion des autres surfaces de l'édifice ³⁰.

LIGHTSCAPE possède une bibliothèque incluant un ensemble de matériaux où le concepteur peut exploiter cette bibliothèque pour prendre en compte, l'influence de l'ensemble de ces matériaux sur la qualité de l'éclairage offerte. Les sources de lumière present en compte par LIGHTSCAPE peuvent être, une lumière ambiante, des néons ou bien des lampes incandescence ³⁰. LIGHTSCAPE adopte deux méthodes, une méthode exploitée pour le calcul quantitatif de la lumière appelé la méthode de radiosité, la seconde méthode appelée la méthode de lancer de rayons exploitée pour l'amélioration qualitative et visuelle des images de synthèse (Maamari ,2004).



Fig.III.1²⁵. Une scène d'éclairage intérieur donné par LIGHTSCAPE ³⁰.

³⁰ 3DVF, Logiciels 3D : Lightscape-autodesk, Site : http://www.3dvf.com/modules/publish/Logiciels_4821.html

Radiance est un autre logiciel très utilisé dans le calcul tridimensionnel de l'éclairage, qu'il soit naturel ou artificiel, à l'intérieur des édifices. Radiance calcul³¹ la radiance spectrale, l'irradiance et les éblouissements³¹. La méthode exploitée dans ce logiciel est appelée la méthode de lancer inverse de rayons ou elle est combinée avec une seconde méthode appelée, illumination globale. Radiance permet de calculer les apports lumineux tels-que : l'éclairement, luminance, l'apport solaire, le FLJ et l'autonomie de l'éclairage. Radiance est considéré comme un des outils les plus performants et qui peut donner des résultats des simulations proches de la réalité. Différents des autres outils de modélisation, Radiance n'offre pas une interface de modélisation ou même, une interface graphique pour la présentation des résultats. Ces derniers sont présentés soit sous forme deligne de commande textuel (pour la modélisation) ou sous la forme de tableau représentant les résultats des simulations (Gallas 2013).

Un autre logiciel très utilisé par les concepteurs appelé, ECOTECT. Il s'agit d'un des logiciels développés par AUTODESK et qui permet de traiter plusieurs problèmes liés, à l'acoustique, la thermique et à l'éclairage naturel dans les édifices. Pour le problème d'éclairage naturel à l'intérieur des édifices, ECOTECT présente les résultats sous forme d'une répartition spatio-temporelle de certains paramètres traduisant la qualité de l'éclairage offert à l'intérieur des espaces, tels-que : l'évaluation du facteur de lumière du jour (FLJ), du niveau d'éclairement et des rayonnements solaires incidents sur les surfaces, vitrées et opaques. Compatible avec d'autres logiciels, ECOTECT peut être utilisé avec Radiance par exemple pour résoudre plus correctement les problèmes liés à l'éclairage naturel à l'intérieur des édifices comme il peut être utilisé avec SOLAIRE ou ENERGYPLUS pour résoudre des problèmes liés à la thermiques.

DAYSIM est un logiciel de modélisation de l'éclairage naturel dans les édifices où il fait aussi appel à radiance pour calculer la quantité annuelle de l'éclairage aux seins et autour des édifices¹⁹. DAYSIM peut prendre en considération l'influence des façades, statiques ou dynamiques, où il peut aussi prendre en considération, l'effet de l'éclairage artificiel selon la disponibilité de la quantité de la lumière offerte par les sources naturels¹⁹. Les résultats délivrés par DYASIM sont présentés en termes de l'autonomie dynamique et l'UDI (Useful Daylight Illuminance), d'éblouissement et des consommations annuelles de

³¹ XPAIR, Logiciels du bâtiment - Acoustique - Ventilation - Qualité d'Air - Eclairage - Puits Climatiques. Site : https://outils.xpair.com/logiciels_batiment/acoustique.htm

l'éclairage électrique, où il présente aussi, les horaires d'occupations¹⁹. Les données climatiques peuvent être traité par DAYSIM où il peut télécharger et traiter ainsi, des données liées à la météo délivré par un autre logiciel 'ENERGYPLUS' utilisé pour la simulation énergétiques des bâtiments (Bendekkiche 2017). Des données diverses peuvent être intégrées et prisent en compte par DAYSIM. Ces données couvrent des éléments climatiques, tels que, le rayonnement directe et diffus, où même des éléments géographiques tels-que, le lieu, latitude, longitude, altitude, facteur de réflexion du sol et autres (Bendekkiche 2017).

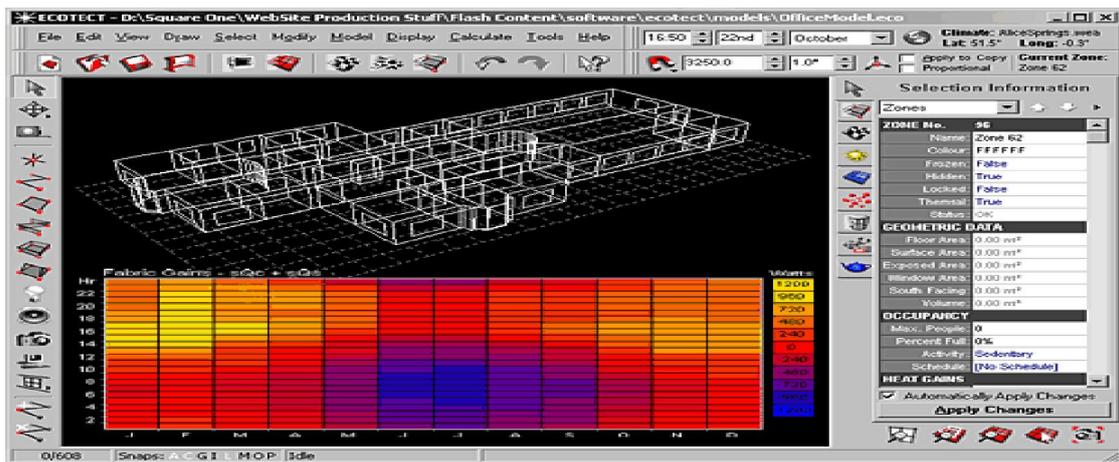


Fig.III.2³². Une scène d'éclairage intérieur donné par ECOTECT³².

Autres logiciels peuvent être exploités dans le domaine de la modélisation de l'éclairage naturel dans les édifices, tels-que, ADELIN, DIALUX, RELUXSUITE et autres. Chacun de ces outils offre aux concepteurs le moyen de prédire le comportement des édifices via un éclairage naturel où chacun, adopte une méthode mathématique ou numérique spécifique. Les limites des résultats obtenus dépendent principalement des méthodes mathématiques et numériques adoptées par chacun des logiciels développés. Certains de ces logiciels, peuvent par exemple, présentés des résultats de simulation sous seulement, les conditions d'un ciel couvert tel-que ECOTECT. Dans d'autres logiciels, les résultats présentés peuvent prendre seulement deux ou trois types de ciels. De plus l'inconvénient majeur des outils disponibles, représente une boîte noir ou une boîte fermée dans le concepteur ne peut jamais intervenir pour améliorer les modèles adoptés ou même les adaptés selon ces besoins qui peuvent être spécifique à la zone géographique ou climatique voir même à d'autres paramètres. L'utilisateur d'un logiciel ne peut jamais aussi proposer des compléments de modèle tel-que, des outils d'optimisation qui permettent par exemple, d'optimiser les ouvertures d'un édifice.

³² I3ER, Ingénierie de l'Efficacité Énergétique et des Energies Renouvelables. Site : <http://logiciels.i3er.org/ecotect>

L'utilisateur d'un logiciel est toujours sous la contrainte des modèles développés par les concepteurs du logiciel et par ces limites.

Sur ces points qui présentent les inconvénients majeurs d'exploiter un logiciel, nous nous sommes orientés dans ce travail de recherche à développer notre propre outil de simulation d'un éclairage naturel au sein d'un édifice. Cet outil permettra de prévoir correctement la modélisation des édifices vis-à-vis un éclairage purement naturel sous différents types de ciel. Cet outil doit permettre aussi d'implémenter nos propres modèles d'optimisations qui permettront par exemple, d'optimiser les dimensions des ouvertures d'un édifice pour avoir un éclairage optimal à l'intérieur des espaces étudiés.

III.3. METHODES DE CALCUL DE L'ECLAIRAGE :

Plusieurs méthodes ont été adoptées dans des algorithmes du calcul de l'éclairage aux seins des édifices. Dans cette partie, nous présentons les principales méthodes trouvées dans la littérature où nous allons présenter, en particulier, la méthode adoptée dans le code du calcul développé dans le cadre de ce travail de recherche.

III.3.1. METHODE DE RADIOSITE :

La méthode de radiosité a été appliquée dans son origine vers les années 60 pour la résolution des problèmes thermiques, en particulier dans le calcul des échanges radiatifs thermiques. Vers les années 80, cette méthode a été exploitée dans la résolution des problèmes liés au calcul de l'éclairage dans les édifices (Maamari ,2004). Le principe de cette méthode consiste à subdiviser le domaine géométrique limitant l'espace architectural et son environnement en plusieurs mailles ou cellules élémentaires. Cette procédure constitue la première phase de la méthode de la radiosité et elle est appelée, la phase de la création du maillage. Le maillage adopté dans cette phase dépend de la géométrie de l'espace architectural à modéliser. Les éléments élémentaires, créent et constituants le maillage adopté, peuvent avoir une forme quadrilatère pour des géométries cartésiennes, comme il peut avoir une forme hexaédrique ou autres pour des géométries plus complexes. Dans la procédure du calcul, nous considérons d'abord que les éléments du maillage sont des éléments récepteurs ou nous calculons d'abord la lumière directe reçue par chaque élément. Dans la seconde partie du calcul, chaque élément élémentaire est considéré comme une source émettrice de la lumière où il émet une partie du flux lumineux reçu en prenant en compte le facteur de réflexion de chaque élément

élémentaire, selon son appartenance et son milieu. Cette lumière émise par chaque élément du maillage subit plusieurs inter-réflexions jusqu'à ce que la totalité du flux lumineux reçu au départ sera totalement absorbé ou dissipé (Maamari ,2004).

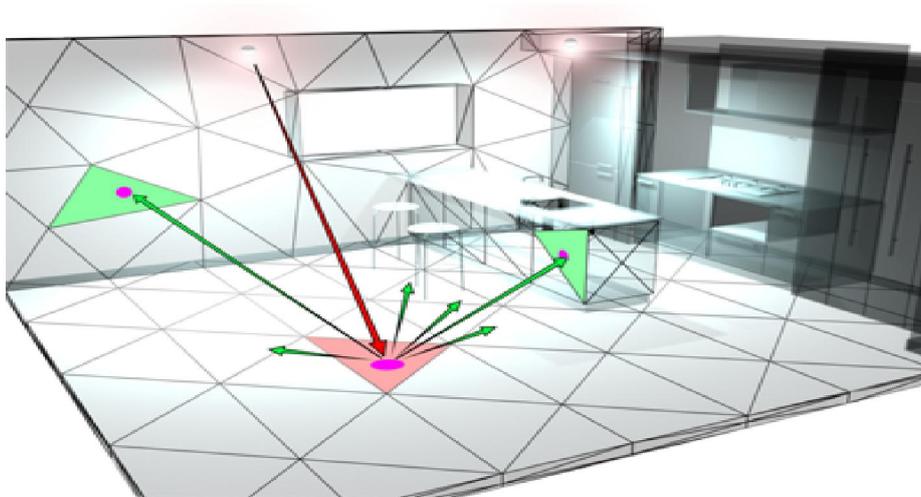


Fig.III.3. Exemple d'une scène du calcul de l'éclairage dans un espace intérieur ainsi que le maillage adopté pour la méthode de radiosité ³³.

III.3.2. METHODE DE LANCER DE RAYONS :

Considérée comme la méthode la plus ancienne (Maamari ,2004), cette méthode est basée sur le calcul des trajectoires d'un faisceau de rayons lumineux dans une scène représentant l'espace architectural. L'ensemble des rayons constituant les faisceaux, subiront le long de leurs trajectoires et à travers toutes les surfaces de l'espace architectural, la réflexion, la transmission, la réfraction. Selon l'origine pris pour le suivi du rayon, deux approches possibles peuvent présenter la méthode (Bendekkiche 2017) :

- La source de lumière est prise comme origine et le rayon est suivi depuis la source de la lumière jusqu'à ce qu'il atteigne le point d'observation ou qu'il soit atténué (Bendekkiche 2017).
- Le point d'observation est pris comme référence et le rayon de lumière est tracé depuis le point d'observation jusqu'à ce qu'il atteigne une source de lumière.

³³ Modélisation d'illumination globale avec la radiosité. Site : <http://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2016/FRA/?guid=GUID-C5A3C77B-794B-4444-9783-7F2EA11C16B>

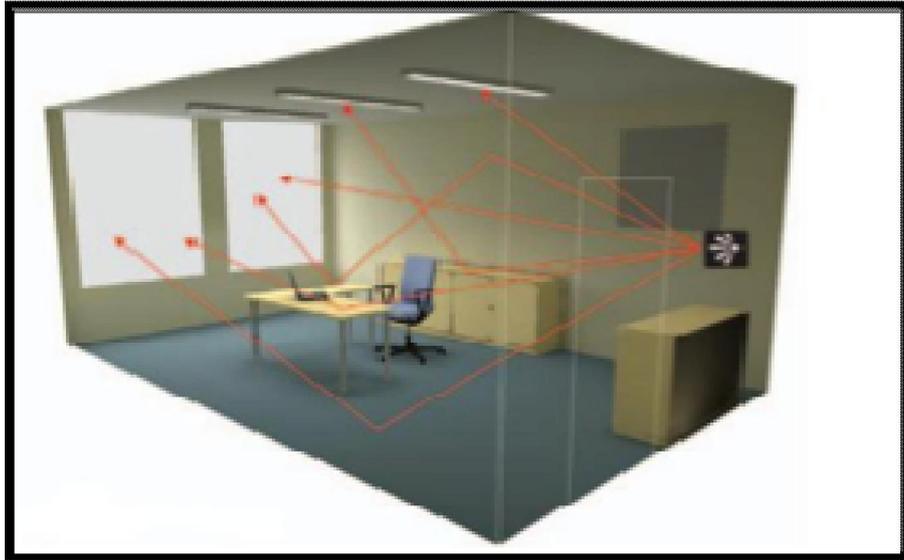


Fig.III.4. démonstration de la méthode de lancer des rayons dans un espace architectural (Bendekkiche 2017).

III.3.3. METHODE DE SPLIT FLUX FORMULA :

Il s'agit de la méthode adoptée dans le cadre de ce travail de recherche et qui a abouti à un code de calcul de modélisation tridimensionnelle d'un éclairage provenant essentiellement d'une source naturelle. La méthode de SPLIT FLUX FORMULA part du principe de la décomposition où elle considère que l'éclairage dans chaque point de l'espace est composé de trois composantes distinctes. Chacune des composantes représente une portion de l'éclairage. La résultante des trois composantes représente la composante globale de l'éclairage dans chaque point considéré ou dans chaque point de calcul.

- La première composante de l'éclairage (E_d) représente la composante directe de l'éclairage, c'est à dire la composante pénétrant l'édifice à travers la fenêtre pour atteindre directement le point considéré.
- La seconde composante de l'éclairage (E_{re}) représente la composante de l'éclairage atteignant le point considéré mais à travers une surface extérieure. Ceci par la réflexion de lumière reçue par cette surface et transmise vers le point considéré par réflexion. Dans le cadre de ce travail, les surfaces voisines ont été négligées, seul le sol de l'environnement extérieur est pris en considération.

- Enfin la troisième composante de l'éclairage (E_{ri}) est qui représente la composante atteignant le point considéré par la réflexion de la lumière à travers une surface appartenant à l'environnement intérieur. Dans le cadre de ce travail, les surfaces composant l'édifice sont prises en compte, c'est à dire, le sol, les murs latéraux et le plafond de l'espace.

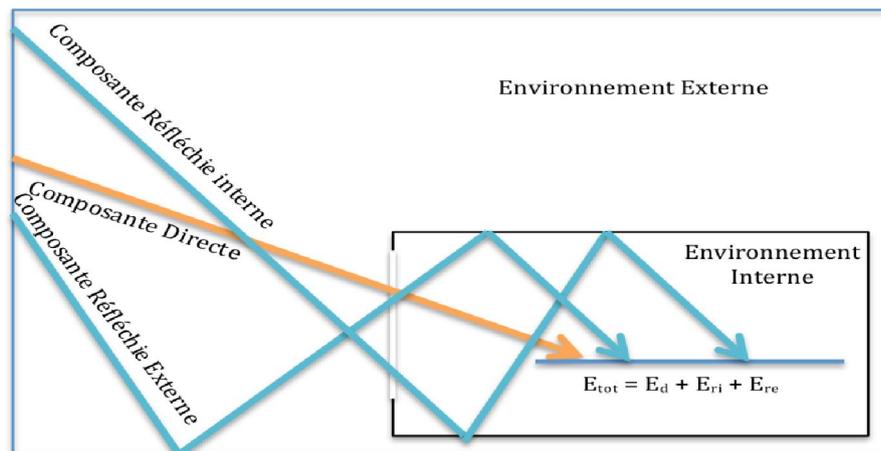


Fig.III.5. Les trois composantes de l'éclairage représentant la composante globale de l'éclairage dans un point donné, (méthode de split flux formula).

III.3.4. METHODE DE PHOTON MAPPING :

Pour la modélisation des phénomènes physiques, plusieurs méthodes numériques ont été proposées conçues à partir de la combinaison de deux, ou même de plusieurs méthodes. Le but est d'exploiter les avantages de chaque méthode et d'éviter ainsi, certains inconvénients présents dans chacune des méthodes exploitées.

La méthode de PHOTON MAPPING fait partie de ces méthodes où elle adopte deux méthodes différentes avec un calcul réparti en deux phases. Dans la première phase de calcul, la méthode de lancer de rayon est combinée à une structure de stockage des données (**Photon map**). La seconde étape consiste en un lancer de rayon inverse (Deroisy, 2011).

Un photon map est comme une cartographie mémorisant l'apport de lumière de premier ordre reçu par toutes les surfaces d'un espace et sert à affiner la prise en compte des multiples interrélflexions de lumière dans une scène lors de la seconde étape du calcul (Deroisy, 2011).

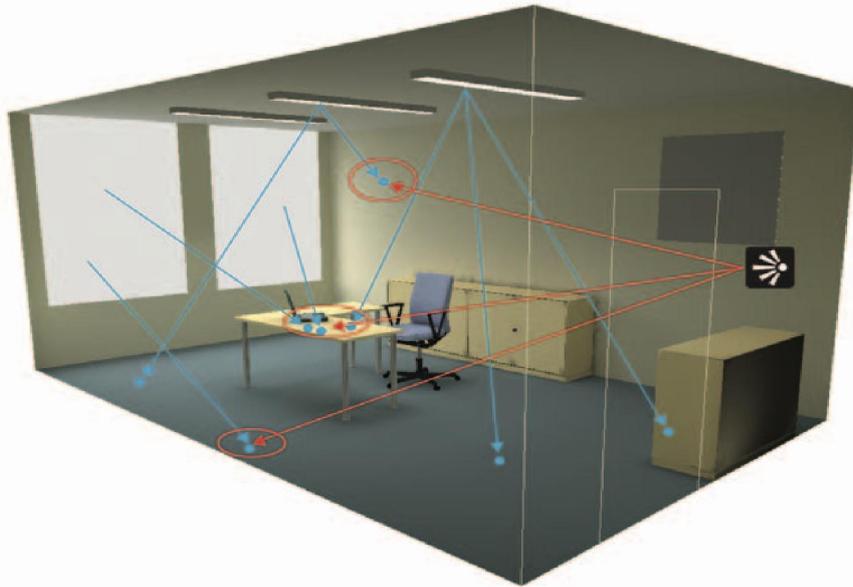


Fig.III.6. Principe de la méthode du photon mapping (Deroisy, 2011).

III.4. LA SIMULATION DE L'ÉCLAIRAGE NATUREL PAR UNE APPROCHE DIRECTE ET INVERSE :

Les méthodes de calcul présentées précédemment permettent de prédire la répartition de l'éclairage naturel à l'intérieur des édifices. A partir d'un problème bien posé, ces méthodes exploitent l'ensemble des données géométriques et physiques pour prédire les valeurs de l'éclairage naturel aux seins des édifices. Ces outils offrent aux concepteurs le moyen de prédire, avant même de réaliser un projet architectural, avec une certaine précision les valeurs de l'éclairage intérieur. Le but est d'offrir aux concepteurs un moyen de prédiction où il peut agir pour faire des modifications sur certains éléments architecturaux pour améliorer la qualité du confort offert. Le concepteur peut agir sur, la forme du projet, les orientations adoptées, les matériaux utilisés ou même sur les dimensions des ouvertures, leurs nombres et leurs emplacements. Les méthodes directes offrent aux concepteurs le pouvoir d'agir sur plusieurs paramètres architecturaux, cependant, le concepteur et pour chaque modification, doit relancer un nouveau calcul pour prendre en compte, les modifications effectuées dans le processus de

calcul. L'application des méthodes directes ne peut dans certains cas, exploiter les meilleures solutions qui permettent d'avoir une meilleure qualité du confort offert, qu'il soit visuel ou autre. Dans ce contexte, il existe des méthodes d'optimisations qui permettent d'atteindre des solutions optimales liées aux attentes des occupants en adaptant certains paramètres architecturaux. Ces méthodes permettent alors, de résoudre des problèmes inverses liés à l'éclairage à partir des intentions désirées, où le concepteur agit sur certains éléments architecturaux pour atteindre les objectifs fixés dès le départ de la conception d'un projet architectural et liés aux attentes de leurs occupants.

III.4.1. METHODES DE SIMULATION INVERSE DE L'ECLAIRAGE NATUREL :

Pour résoudre un problème architectural lié à un problème d'ambiance. L'architecte peut exploiter les méthodes de résolution d'un problème direct. Les méthodes des simulations utilisées dans la résolution des problèmes directes sont des méthodes qui exposent les interactions **formes/ phénomènes**. Ces méthodes sont considérées alors comme des outils de simulation directe et qui seront mises en œuvre selon le processus schématisé dans la Fig.III.7 (Siret 1997).

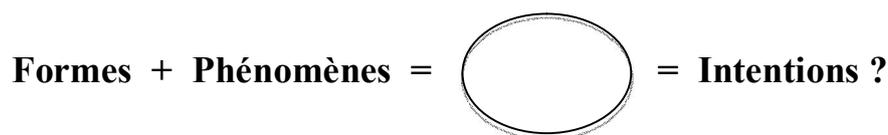


Fig.III.7. Simulation directe des effets d'ambiances (Siret 1997).

Ces méthodes permettent alors de déterminer les interactions entre la forme et les phénomènes physiques dans le but de présenter leurs effets et d'interpréter ainsi, les effets d'ambiances résultantes. Bien que ces méthodes présentent un outil de prédiction et un outil d'aide à la conception architecturale. Cependant, les méthodes de résolution des problèmes directes ne permettent pas de formuler, de manipuler ou d'atteindre les intentions envisagées et liées aux ambiances (Siret 1997). Ces méthodes ne peuvent agir sur les paramètres architecturaux dans le but d'atteindre les intentions discernées, car elle part déjà d'un problème bien défini et ayant une forme architecturale déterminée avec un ensemble d'éléments physiques bien précis. Ces méthodes sont souvent adoptées comme outils d'évaluation des performances atteintes. Ils peuvent aussi être exploités comme outils de correction où le projet est considéré

comme étant un processus de type essai-erreur (Siret 1997). Le projet sera défini à partir d'une forme initiale (essai) où elle sera corrigée progressivement par plusieurs tests de simulation et selon l'erreur atteintes et qui traduit la différence entre les attentes souhaitées et les résultats obtenus par les simulations.

Les limites des méthodes de résolution des problèmes directes ont incité les concepteurs à adopter des méthodes de résolution des problèmes inverses. Des méthodes qui peuvent rendre effective la dynamique du projet autour des ambiances. La résolution du problème inverse permettra d'atteindre les attentes où elle assure un passage entre intensions et formes en définissant un effet capable de contraindre les formes. Ce passage entre intension et création de forme par l'intermédiaire d'effets, définit le processus de simulation inverse des ambiances dans les projets architecturaux. Ce processus peut être schématisé par la Fig.III.8 (Siret 1997).

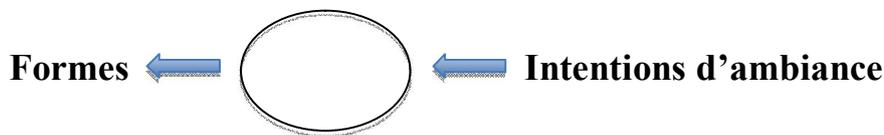


Fig.III.8. Simulation inverses des d'ambiances (Siret 1997).

Selon Siret (Siret 1997), les méthodes de simulation inverse doivent satisfaire trois conditions qui sont respectivement :

- *permettre de formuler des intentions d'ambiance, c'est-à-dire de définir des effets particuliers du projet concernant les ambiances,*
- *autoriser la manipulation et la transformation de ces intentions, au fil de la conception, pour permettre le développement du discours du projet,*
- *être capables de réaliser les effets donnés en déterminant les conditions à appliquer sur les formes pour ce faire et, pratiquement, en déterminant les formes elles-mêmes réalisant ces effets.*

Pour la résolution des problèmes inverses liés à l'éclairage naturel, depuis très longtemps, plusieurs méthodes ont été proposées pour optimiser l'éclairage naturel à l'intérieur des édifices en adoptant des problèmes simples. Dans certains de ces travaux, les auteurs ont parvenus à déterminer un minimum de coût et de consommation d'énergie pour avoir une

valeur d'éclairage exigée dès le départ de la simulation. Les travaux développés par Rodford et Gero en 1979 font parties par exemple de ces travaux (Bendekkiche 2017). La notion de la simulation inverse apparaît de plus en plus dans des travaux de simulation en particuliers, ceux utilisés pour la détermination d'un éclairage ayant des valeurs spécifique où dans l'ensemble de ces travaux, les propriétés des fenêtres sont adoptées comme éléments primordiaux à déterminés pour atteindre les objectifs liés à un éclairage optimal. Les travaux présentés par exemple par G. Stevens (1990) ou Augenbroe et Winkelmann (1991) sont un exemple de ces travaux. Dans des travaux de simulation présentés, la notion de la simulation inverse a été appliquée parfois de manière explicite et parfois de manière implicite. Khemlani du Martin Center for Architectural and Urban Studies à Cambridge a adopté la notion de simulation inverse de manière explicite où il a proposé un ensemble de configurations de baies sur la façade principale d'un espace intérieur localisé et orienté de manière quelconque, avec un nombre de percement choisi par l'utilisateur et qui lui a permis d'atteindre la performance énergétique et l'éclairage naturel désirés (Siret 1997). La méthode inverse adoptée par Mahdavi et Berberidou-Kallikova en 1995 est exploitée de manière implicite avec un processus qui déduit l'erreur à partir d'un essai (essai-erreur) et qui modélise à chaque fois le problème et utilise une stratégie d'optimisation orientée par des préférences dynamiques, pour prendre en compte l'ambiance lumineuse et reconstruire des ouvertures (Bendekkiche 2017).

Les méthodes inverses appliquées dans le processus de conception permettent aux concepteurs de déterminer plusieurs aspects architecturaux mal définis, flous et difficile à définir tels-que : la forme du projet, les dimensions, les orientations, les ouvertures et autres paramètres intervenant dans le processus de conception. Ces aspects architecturaux sont

définis à partir des intentions et aux attentes liées par exemple, à l'ambiance visuelle, l'ambiance thermique et à l'ambiance acoustique et par l'exploitation des méthodes de résolution des problèmes en inverses. Cependant et avant de présentés les méthodes de résolution des problèmes en inverses, il faut rappeler qu'il existe une grande variété de méthodes exploitées pour définir les éléments flous du processus de conception. Ces méthodes ont été classées par Gallas (Gallas 2013) en trois grandes familles qui sont respectivement :

- *Une famille qui exploite les références*

- *Une famille qui utilise des modèles physiques*
- *une famille qui fait appel à des modèles numériques.*

Pour la première famille, le concepteur et pour trouver des solutions liées à l'identification de certains éléments architecturaux, il peut avoir recours à des références regroupant un ensemble de solutions liées à des problèmes architecturaux antérieurs ou par des expériences menées dans d'autres projets, où les contraintes ont été définies et résolues. Dans ces références, le concepteur peut trouver des règles imposées et qui ont permis de résoudre certains problèmes architecturaux lors de la conception des projets antérieurs considérés comme références. Ces références sont offertes aux concepteurs soit par des documents de référence, ou par des manuels techniques, ou par des abaques de représentation de calcul et enfin par des outils d'exploration de références (Gallas 2013).

Dans la seconde famille, le concepteur et dans le but de déterminer les éléments primordiaux intervenants dans le processus de conception et pour garantir les attentes et les intentions, il peut avoir recours aux modèles physiques. Les modèles réduits ou maquettes sont les éléments clés de ce support d'assistance où ils doivent traduire, sous un échèle réduit, la réalité physique du projet et avec des degrés différents de simplification (Gallas 2013). Le concepteur et via ces maquettes, peut créer des ambiances à l'intérieur pour prédire le comportement des édifices avant leurs conception et d'intervenir ainsi, pour apporter les modifications nécessaires pour atteindre les attentes liées aux intentions. Des maquettes ont été exploitées pour étudier par exemple, le comportement de la couverture et de la structure face à la sollicitation du vent et à la charge de la neige. D'autres maquettes ont été adoptées pour étudier les ambiances lumineuses aux seins des édifices où dans certains de ces maquettes, les conditions d'un ciel couvert ont été reproduites par l'emplacement de plusieurs miroirs et par un éclairage intérieur assuré par des tubes fluorescents (Gallas 2013).

La troisième famille et qui regroupe l'ensemble des modèles et les méthodes numériques développées dans le but est d'offrir aux concepteurs des moyens d'aides à la conception exploités soit, à la représentation bidimensionnelle où tridimensionnelle de la géométrie des édifices, soit à la prédiction des ambiances architecturales, soit à l'optimisation de certains paramètres liés aux projets architecturaux pour atteindre les intentions liées aux ambiances désirées. Cette famille regroupe un ensemble de méthodes numériques et qui ont permis de développer, des modèles permettent de tracer des géométries à partir des intentions. Ces

modèles on permet aussi, d'exploiter un ensemble de modèles physiques et mathématiques, de prédire le comportement visuel, thermique et acoustique liés aux édifices réalisés. Dans d'autres modèles, appelés modèles d'optimisation, des éléments architecturaux ont été définis et qui ont permis d'atteindre le meilleur confort qu'il soit visuel, thermique ou acoustique et qui peut répondre aux attentes des occupants et aux intentions des concepteurs.

Les méthodes de résolution des problèmes en inverses font parties de ces méthodes et qui ont offert aux concepteurs, un support d'assistance (Gallas 2013) pour bien concevoir et pour offrir les meilleures ambiances.

Appelé aussi, méthodes d'optimisations, les méthodes génératives font partie des méthodes très exploitées dans le domaine de la conception architecturale et qui permettent d'optimiser certains éléments architecturaux pour atteindre les ambiances désirées, quelles soit visuelles, thermiques ou acoustiques.

Ces méthodes extraites du domaine de l'engineering et très exploitées dans la résolution des problèmes d'optimisation liés à des branches outre que l'architecture. Elle adopte des algorithmes appelés algorithmes évolutionnaires et qui sont définis comme étant, des méthodes pratiques et robustes pour automatiser la recherche de bonnes solutions. Berachi (Berachi, 2010) définit ces méthodes comme étant : *'Les algorithmes évolutionnaires sont des méthodes pratiques et robustes pour automatiser la recherche de bonnes solutions. Ils sont proposés comme un moyen de trouver des solutions proches des optima globaux pour des problèmes complexes dans un temps beaucoup plus court que ce qui serait requis par l'évaluation de toutes les solutions possibles. Les algorithmes évolutionnaires ont été appliqués avec succès à une variété de problèmes d'optimisation difficiles. Malgré leurs capacités méthodiques, ils souffrent du problème de réglage/contrôle de paramètres. Un point-clé consiste à trouver un moyen d'ajustement automatique des paramètres durant l'exécution de l'algorithme. Ce concept doit être appliqué pour améliorer la recherche et obtenir une convergence efficace'* (Berachi, 2010).

Basées sur une simulation brute de l'évolution naturelle des populations, les algorithmes évolutionnaires sont considérés comme des méthodes d'optimisation stochastique. En partant du principe de l'évolution des espèces décrit par Darwin, les algorithmes évolutionnaires s'appuient sur la poursuite de l'évolution des espèces qui explique comment, seuls les individus les plus adaptés à leurs environnements, ont pu évoluer (Berachi, 2010). Selon

Gallas, les algorithmes évolutionnaires peuvent être divisés en quatre grandes familles : la programmation évolutionnaire, les stratégies évolutionnaires, les algorithmes génétiques et la programmation génétique (Gallas 2013).

Le principe des algorithmes évolutionnaires est basé sur une méthode itérative où elle adopte durant le processus itérative, le principe de la variation stochastique sur les individus d'une population. Chaque individu de la population est considéré comme une solution où il est obtenu à partir de chaque itération du processus itératif. A partir d'une population initiale choisie aléatoirement, un processus itératif est mis en œuvre et après une sélection, les solutions sont regroupées en paires et recombinaison afin de reproduire de nouvelles solutions qui remplaceront les solutions les moins bonnes, jugées selon des critères bien définis et imposées au début de l'algorithme. Une fonction d'évaluation associe une valeur d'adaptation, appelée (Fitness), à chaque individu dans le but de déterminer sa pertinence par rapport au problème (critère de sélection) (Berachi, 2010). L'organigramme présenté dans la Fig.III.9 résume les démarches adoptées par un algorithme évolutionnaire (Gallas 2013).

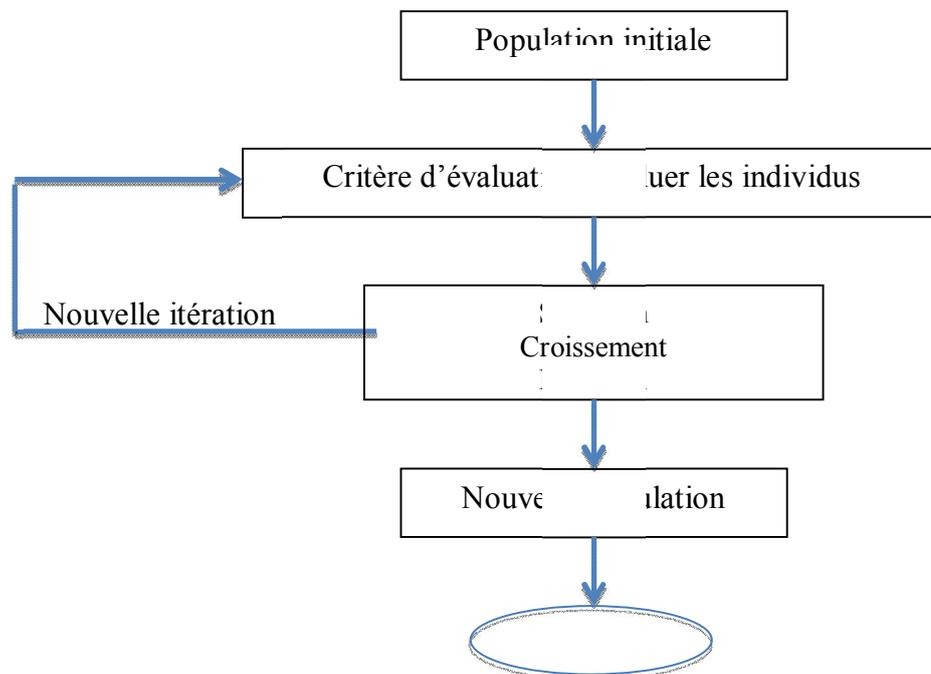


Fig.III.9. Processus d'un algorithme évolutionnaire (Gallas 2013).

Les algorithmes évolutionnaires ont été adoptés principalement dans le cadre des travaux de recherches (Gallas 2013) où ils sont permis dans leurs ensembles, de générer des formes architecturales (Marin, 2009) ou d'offrir la maîtrise des comportements, thermique, visuel et acoustique liés à des projets architecturaux. Des travaux par exemples, conduits par Paul Coates en 1997, ont permis d'intégrés les algorithmes évolutionnaires dans le champ de la génération de la forme architecturale (Marin, 2009). Dans d'autres travaux, menés par Blostein (1995), les algorithmes évolutionnaire ont permis de générés des configurations spatiales. Rosenmann en 1997, et Frazer posent les fondements théoriques des algorithmes évolutionnaires pour les appliquer dans la conception non-routinière. Sachant que Frazer et depuis 1968 a fait appel aux méthodes des algorithmes génétiques pour l'optimisation des façades des édifices (Marin, 2009). Dans d'autres travaux plus récents, comme par exemple ceux menés par Caldas en 2003, les algorithmes génétiques ont été exploités pour l'optimisation des consommations énergétiques aux seins des édifices ainsi que la réduction des coûts de la construction. Ils existent d'autres exemples où les algorithmes évolutionnaires ont été exploités pour l'évaluation des performances des fluides (Marin, 2009). Les algorithmes évolutionnaires ont connus un essor considérable dans le domaine architectural, en particulier, par leurs intégrations dans le processus de conception d'un projet architectural. Ils sont été adoptés, pour résoudre des problèmes liés à l'optimisation de certains éléments architecturaux dans le but d'atteindre des intentions liées, aux comportements, thermiques, visuels ou autres. Ils ont même été appliqués pour développer un outil 'EcoGen' interactif d'optimisation bioclimatique multicritères en phase de conception initiale d'un ou de plusieurs bâtiments dans un environnement construit (îlot, parcelle) (Marsault 2016). Conçu sous environnement C++ et Java, cet outil couple les modèles de simulation avec les modèles morphologiques où les algorithmes génératifs interactifs sont adoptés pour traiter le problème d'optimisation (Marsault 2016).

III.4.2. METHODES DE SIMULATION DIRECTE DE L'ECLAIRAGE NATUREL :

Appartenant à la troisième famille des méthodes de simulation des édifices via leurs comportements, thermique, visuel ou acoustique. Ces méthodes regroupent un ensemble de modèles, physiques, mathématiques et numériques et qui seront organisés selon un schéma, contenant plusieurs blocs interactif est organisés selon une chronométrie précise et qui permet

de préparer des données nécessaires pour effectuer un calcul dans le bloc qui suit. L'ensemble des propriétés physiques et géométriques du problème à modéliser incluant, les conditions initiales liées aux variables à déterminer sont introduites dans des blocs initiaux et représentant le point de départ de la simulation. D'autres blocs viennent pour inclure l'ensemble des coefficients et d'équations provenant essentiellement des modèles mathématiques adoptés. Dans le cas de l'éclairage naturel par exemple, une des méthodes de calcul présentées précédemment (méthode de radiosité, méthode de lancer des rayons, méthode de SPLIT FLUX Formula) est exploitée où elle est implémenté dans un des blocs pour sa mise en œuvre et pour déterminer, et selon la méthode adopter, l'ensemble des composantes constituant la composante globale de l'éclairage naturel atteint à l'intérieur d'un édifice. Dans cette étape, les conditions initiales, physiques et géométriques imposées auparavant, interviennent pour déterminer la valeur exacte de l'éclairage.

A la fin du processus de calcul, des blocs d'exploitations viennent pour clôturer la démarche de calcul, où elle exploite les résultats liés à la détermination de la variable inconnu pour calculer d'autres grandeurs liées au même problème ou à des problèmes similaires dans le cas des phénomènes physiques couplés. Dans l'exemple de l'éclairage naturel, la valeur de l'éclairement définie auparavant permet de déterminer par exemple, le facteur de lumière du jour (FLJ), voir aussi d'autres grandeurs liées à un problème d'éclairage. Les résultats atteints durant la démarche de la résolution ou de l'exploitation, peuvent être présentés sous différentes formes. Ils peuvent être présentés, sous forme de graphe, monodimensionnel, bidimensionnel ou tridimensionnel. Ils peuvent même être présentés sous forme de tableau ou autre. La Fig.III.10 résume les démarches à suivre par les méthodes de simulation directe.

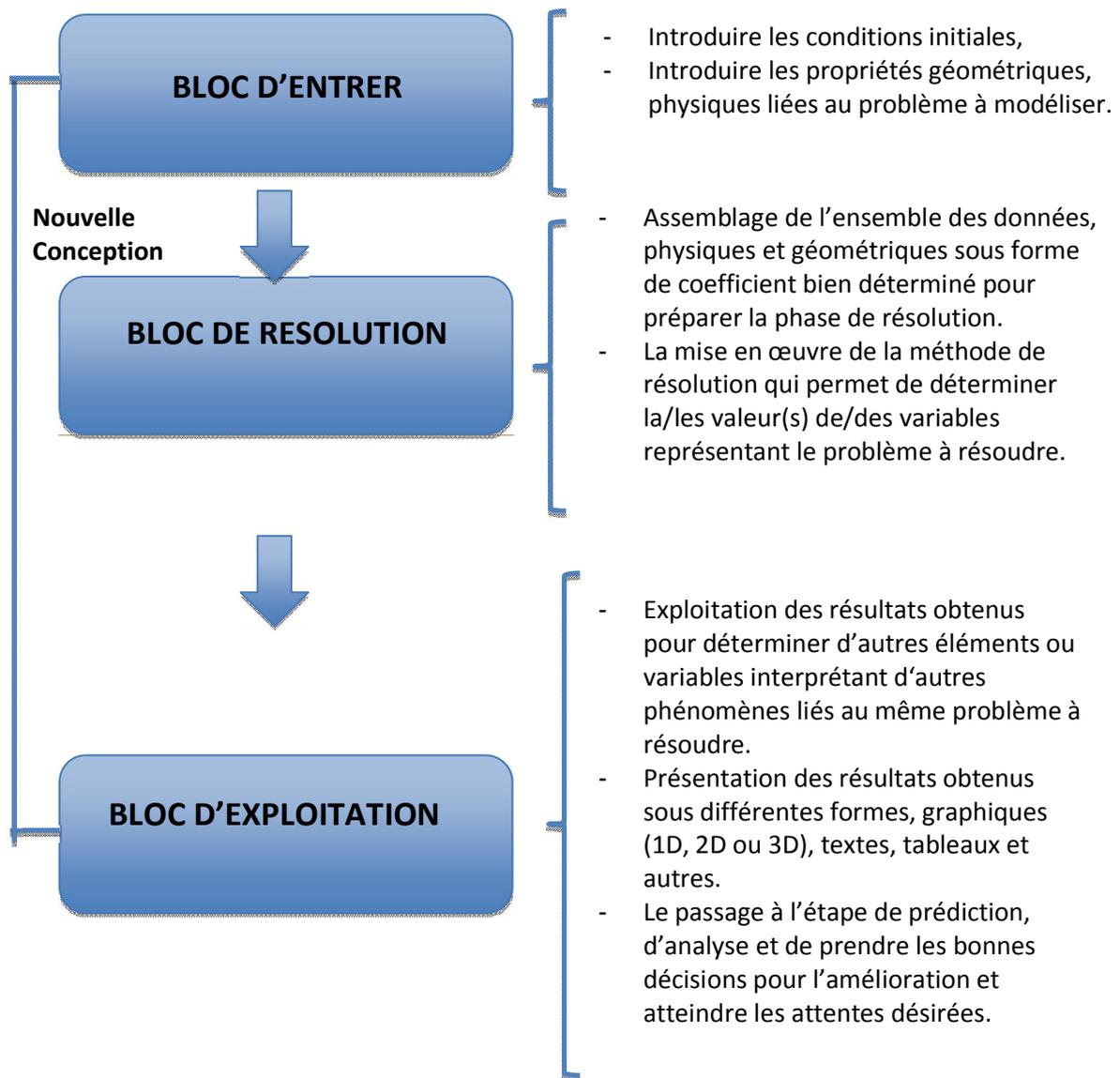


Fig.III.10. Algorithme de simulation directe.

III.5. LA SIMULATION THERMIQUE DANS LES BATIMENTS :

La simulation thermique des bâtiments permet de déterminer le comportement des espaces architecturaux vis-à-vis la qualité de l'ambiance thermique offerte à l'intérieur de ces espaces. Elle permettra de prédire les besoins en chaleur ou en froid d'un espace architectural et sur une longue période. Heure par heure et selon la saison et les conditions météorologiques de l'environnement extérieur, la simulation thermique des bâtiments peut prédire correctement le comportement des bâtiments vis-à-vis leurs confort thermique offerts. Elle offre ainsi, le

moyen aux concepteurs de prendre des initiatives architecturales avant et au cours de la conception d'un projet architectural dans le but est d'améliorer la qualité du confort thermique offert à l'intérieur des espaces architecturaux.

La simulation thermique des bâtiments est conçue à partir des modèles qui prennent en compte les différents modes de transfert de chaleur, soit à l'intérieur des bâtiments, soit entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur par l'intermédiaire des parois des bâtiments. Ces modèles permettent de prédire les apports en chaleur à l'intérieur des bâtiments et de définir ainsi, les dissipations thermiques entre environnements, intérieur et extérieur. Via ces modèles, le concepteur peut agir pour améliorer les apports de chaleur et limiter les dissipations thermiques en adaptant les moyens d'isolations nécessaires. La simulation thermique offre aux concepteurs un moyen d'optimisation qui permet d'avoir un meilleur confort thermique en adaptant les paramètres architecturaux comme paramètres à optimisés.

Pour prendre en compte la particularité du site d'implantation d'un projet architectural et son influence sur l'ambiance et sur la qualité du confort thermique offert à l'intérieur des bâtiments, le concepteur doit exploiter les outils des simulations du comportement thermique des bâtiments dès le départ d'un projet architectural. Ces outils permettent aux concepteurs d'agir correctement pour offrir un meilleur confort thermique face à des éléments variables, incontrôlables et dépendants de l'emplacement géographique et des conditions de l'environnement extérieur des bâtiments à concevoir. Ils faciliteront ainsi, l'intégration du projet dans son environnement tout en exploitant les conditions météorologiques pour améliorer la qualité de l'ambiance offerte et en améliorant la qualité du confort thermique. Ces outils et qui sont considérés comme moyens d'aide à la conception architecturales, permettent d'adapter certains éléments architecturaux, tels-que, la forme, l'orientation, les matériaux adoptés, les parois et ces éléments, ...etc., pour exploiter les bénéfices de l'environnement extérieur et ces conditions et qui permettent d'améliorer la qualité du confort thermique. En effet, les éléments architecturaux cités peuvent par exemple, contribué à l'augmentation de la température intérieure durant les périodes froides comme ils peuvent intervenir pour diminuer la température intérieure durant les périodes chaudes. La simulation thermique des bâtiments permet aussi de prédire l'évolution spatio-temporelle de la température à l'intérieur, ceci permettra aux concepteurs de prendre les dispositions

nécessaires afin d'assurer une température homogène et d'éviter ainsi, des gradients de température élevés, en particulier, aux voisinages des façades portant les ouvertures.

Les outils de simulation de la température dans les bâtiments offrent aux concepteurs un moyen d'aide à la conception en contribuant à l'amélioration de la qualité des ambiances architecturales en particuliers, celle liée à l'ambiance thermique. Le concepteur doit avoir les compétences nécessaires pour exploiter ces outils ou même, de procéder aux développements de certains modèles, adéquats a son projet architectural.

Dans la partie ci-dessous, nous allons faire une présentation de quelques logiciels adoptés pour l'évaluation thermique et énergétiques à l'intérieur des bâtiments. Nous présentons par la suite, les modes de transfert de chaleur qui permettent de prédire le transfert de chaleur entre environnements, intérieur et extérieur et même dans l'environnement intérieur. Nous présentons par la suite, les modèles mathématiques et numériques qui doivent être exploités pour prédire la répartition spatio-temporelle de la température à l'intérieur des espaces architecturaux.

III.5.1. EXEMPLES DE LOGICIELS UTILISES DANS LA SIMULATION THERMIQUE DES BATIMENTS :

Plusieurs outils de simulation sont offerts aux concepteurs pour la simulation thermique à l'intérieur des bâtiments. TRNSYS³⁴ fait partie de ces outils et qui permet de simuler les performances thermiques des bâtiments. Dans ces simulations, TRNSYS³⁴ peut prendre en considération les systèmes de chauffage et de climatisation. Il peut même intégrer les systèmes adoptés pour le refroidissement ou pour le chauffage et qui sont alimentés en énergies renouvelable. Il intègre des géométries tridimensionnelles pour la modélisation thermiques des bâtiments.

EnergyPlus^{TM35} est un autre logiciel et qui permet aussi de simuler le comportement thermique et énergétique des bâtiments. Développé par le DOE (Departement of Energy, États-Unis), EnergyPlus^{TM35} permet d'inspecter le respect des températures du confort des bâtiments.

³⁴ CSTB logiciels, modélisation d'illumination globale avec la radiosité. Site : <https://logiciels.cstb.fr/batiments-et-villes-durables/performances-energetiques/trnsys/>

³⁵ Simulation thermique dynamique avec EnergyPlusTM. Site : <http://exportation-a-energyplus.cype.fr/>

D'autres logiciels peuvent être exploités pour la modélisation tridimensionnelle des phénomènes thermiques à l'intérieur des bâtiments tel-que : ECOTECT.

Dans d'autres outils, le concepteur peut importer les maquettes numériques des projets à partir des logiciels adoptés pour esquisser (tels-que : RAVIT ou ARCHICAD) et de procéder au calcul thermique à l'intérieur des espaces conçus. ArchiWIZARD fait partie de ces outils et qui permet de faire un calcul thermique et d'éclairage en temps réel. D'autres outils sont proposés pour l'évaluation énergétique et environnementales des bâtiments et qui se combine avec d'autres logiciels pour effectuer un calcul complet lié à la thermique ou même à l'éclairage. PLEIADES, ALCYONE et Radiance font parties de ces outils.

III.5.2. MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

Le transfert de la chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température (Gradient de température) et cela quelque soit le milieu, même le vide, qui les sépare. De ce fait, les transferts thermiques ont, aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques, un rôle souvent essentiel (Sacadura, 1993).

Le transfert de la chaleur reconnaît en général trois modes de transfert. Il s'agit de la transmission par conduction, convection et rayonnement. Ces modes de transfert de la chaleur peuvent être présents, dans un procédé, d'une manière séparée, combinée deux à deux ou l'ensemble à la fois.

III.5.2.1. TRANSFERT PAR CONDUCTION

La conduction est un phénomène au moyen duquel la chaleur s'écoule à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) d'une région à haute température vers une autre à basse température ; ou entre différents milieux mis en contact (Sacadura, 1993).

III.5.2.2. TRANSFERT PAR CONVECTION

La convection thermique correspond à un transport de chaleur par un fluide en mouvement : par exemple le chauffage d'une habitation fait largement appel à ce mode de transfert, qu'il s'agisse de la circulation d'un fluide dans la tuyauterie et les radiateurs, ou des mouvements d'air à l'intérieur du volume chauffé. On sait que le fluide guidé par la canalisation exécute un déplacement forcé par des accélérateurs alors que les mouvements de l'air dans le volume chauffé s'effectuent librement. Ceci met en exergue deux modes de convection : la convection forcée et la convection libre (Sacadura, 1993).

III.5.2.3. TRANSFERT PAR RAYONNEMENT

Le rayonnement est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un autre à basse température, lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsque un vide les sépare (Sacadura, 1993).

III.5.3. EQUATION DE LA CHALEUR

L'équation de diffusion de la chaleur qui interprète l'évolution spatio-temporelle de la température est représentée par l'équation III.14 :

$$-\operatorname{div}(\vec{k} \operatorname{grad} T) = P - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.14})$$

En introduisant le LAPLACIEN de la température ΔT dans la formulation (III.14), on obtient la relation connue sous le nom de l'équation de la chaleur.

$$k \Delta T + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = P \quad (\text{III.15})$$

Tels que :

ρ : Masse volumique [Kg/m^3],

- \vec{q} : Sources des flux de conduction [W/m^2], donnée par $\vec{q} = -k \text{ grad } T$;
- k : Conductivité thermique [$W / (m.K)$],
- T : Température [K],
- P : Terme source de chaleur intervenant, dans le cas d'un problème thermique lié aux édifices, à l'augmentation de la température à l'intérieur des édifices.

A l'intérieur d'un édifice, un microclimat est créé et qui nous protège des aléas climatiques de l'environnement extérieur. Dans ces espaces intérieurs, les différents modes de transfert de chaleur interviennent pour assurer un échange de chaleur entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. Dans ces conditions, le terme source de la chaleur P de la seconde partie de l'équation III.15 inclus (Batier 2016) :

- L'énergie thermique produite par les systèmes de génies climatiques ;
- Les transferts de masse et de la chaleur avec l'environnement extérieur dépendant de plusieurs facteurs, tels-que, les conditions climatiques, les paramètres des parois ainsi que ces éléments et principalement des paramètres liés à la qualité d'isolement thermique entre le deux environnements ;
- Les transferts aérauliques liées au renouvellement d'air ;
- Les apports solaires transférés à travers les vitrages ;

Dans notre travail, nous avons pris en considération les deux modes de transfert de chaleur et qui sont, le mode de transfert de chaleur par conduction et par convection. Pour prendre en compte la propagation de la chaleur à l'intérieur de l'édifice par le mode de transfert de la chaleur par conduction, nous avons introduit les propriétés thermiques de l'environnement intérieur, tel-que par exemple, la conductivité thermique de l'air. Concernant l'échange de chaleur entre environnements, intérieur et extérieur, produit principalement via les parois de la salle de classe, principalement, les murs et les vitrages, nous avons imposé une condition aux limites de type 'Newton' où nous avons imposé un flux de chaleur donnée par :

$$q = h_c (T_s - T_a) \quad (\text{III.16})$$

Cette conditions représente le cas d'un flux de chaleur échangé par convection avec une zone de température ambiante T_a et un environnement extérieur de température T_s et ayant un coefficient d'échange h_c .

Pour résoudre le problème thermique à l'intérieur d'un édifice, il faut procéder à la résolution du système d'équations, III.15 et III.16. L'équation scalaire présentant l'évolution spatio-temporelle de la température est décrite par une équation aux dérivées partielles. Pour la résoudre on doit adopter généralement une des méthodes numériques, qui seront présentées dans la partie ci-dessous.

III.5.4. RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA CHALEUR

Le développement des méthodes numériques (différences finies, volumes finis, éléments finis, intégrales de frontière, etc.) est heureusement accompagné par les avancées du matériel informatique. Des programmes qui nécessitaient autrefois des calculateurs complexes et onéreux tournent à présent sur les PC d'un coût modeste.

III.5.4.1. DIVERSES METHODES NUMERIQUES DE RESOLUTION

Elles consistent toutes à transformer la ou les équations aux dérivées partielles (EDP) en un système d'équations algébriques dont la solution donne les valeurs des grandeurs recherchées. On propose ici un aperçu de ces méthodes.

III.5.4.1.1. METHODE DES ELEMENTS FINIS (MEF)

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée X par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de X en supposant que, dans ce domaine, X varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié (y compris l'espace environnant) (Devely, 2000). Elle conduit à des tailles importantes pour la mémoire des calculateurs et à

des temps de calcul longs qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels (Devely, 2000).

III.5.4.1.2. METHODES DES INTEGRALES DE FRONTIERE

Elle ramène le traitement de l'EDP dans l'ensemble du matériau à celui limité à la frontière du domaine. Ne nécessitant pas le maillage volumique ni du matériau ni de l'espace, elle est « économique » en taille mémoire et temps de calcul. Elle est souvent couplée à la MEF (Devely, 2000).

III.5.4.1.3. METHODE DES DIFFERENCES FINIS (MDF)

C'est la méthode la plus ancienne. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse permet de donner une bonne approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égales au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées (Devely, 2000).

III.5.4.1.4. METHODE DES VOLUMES FINIS (MVF)

La méthode des volumes finis (MVF) se déduit à partir de la méthode des éléments finis (MEF). Le domaine d'étude (Ω) est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (celui des différences finies). L'EDP est intégrée sur chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude (Patankar 1981).

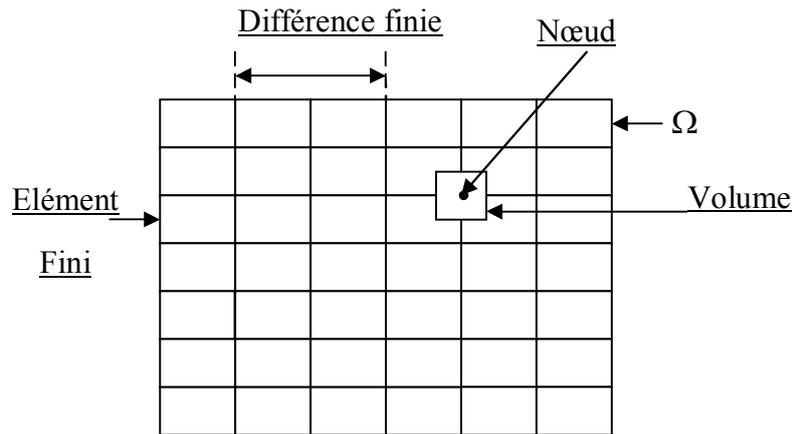


Fig.III.11. Maillage du domaine d'étude.

III.6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons entamé une étude approfondie sur les concepts principaux de l'éclairage naturel. Dans cette présentation, nous avons présenté, les aspects liés essentiellement à la modélisation de l'éclairage naturel aux seins des édifices où nous avons présenté dans un premier temps, quelques logiciels conçus dans le but est d'entamer une étude de simulation de l'éclairage en général et en particulier, celui créé par des sources, purement naturelles. Ces logiciels sont considérés comme un outil d'aide à la conception offert aux concepteurs dans le but de leurs offrir, des moyens de prédiction de la qualité du confort offert dans les édifices conçus et un outil qui permet, aux concepteurs, d'intervenir avant et au cours de la conception d'un projet architectural. L'intervention des concepteurs consiste dans l'ensemble à apporter des modifications liées aux paramètres architecturaux et qui permettent d'apporter un niveau de confort plus amélioré.

Généralement la conception des logiciels fais appelle aux modèles mathématiques et numériques, spécifiques à chacun des logiciels développés. Les résultats des simulations présentés, dépendront principalement des modèles adoptés où dans certains de ces logiciels, les simulations peuvent être exploitées mais sous certaines conditions, liées soit aux calculs, soit aux modèles mathématique et numériques exploités. En effet, certains de ces logiciels, peuvent présentés des résultats des simulations sous seulement, deux ou trois types de ciel.

Dans d'autres logiciels, les résultats de l'éclairage par exemple, sont seulement présentés dans des points spécifiques ou même selon des niveaux particuliers qui sont généralement, le sol ou mêmes, les parois des édifices. De plus, l'inconvénient majeur des logiciels offerts et qui sont considérés comme une boîte noire, interdisant toutes modifications pour l'amélioration des modèles adoptés ou même pour intégrer des modèles de calcul ou liés à l'optimisation de certains paramètres architecturaux. Les outils proposés ne peuvent, dans certains cas, à s'adapter aux conditions liées à certains projets où ils ne peuvent couvrir, par défaut de leurs modèles, certains aspects liés par exemple, à leurs emplacements géographiques, le type de ciel, ou autres. Dans ce contexte et dans le but de développer notre propre code de calcul, nous nous sommes engagés à développer un outil d'aide à la conception et qui peut être exploité dans le but de modéliser l'éclairage naturel aux seins des bâtiments.

Dans le chapitre présenté, nous avons exposé plusieurs méthodes qui peuvent être adoptées pour le calcul de l'éclairage naturel aux seins des édifices. Parmi ces méthodes, nous avons choisi, d'exploiter la méthode de SPLIT FLUX FORMULA.

Dans un édifice, les ouvertures implémentées dans les parois sont considérées comme des sources principales de l'éclairage naturel. Ces dernières peuvent offrir une meilleure qualité de l'éclairage pour atteindre un meilleur confort visuel mais elles peuvent aussi, agir sur le comportement thermique des édifices. Dans le but d'inspecter l'influence des ouvertures adoptées sur la qualité du confort thermique offert, nous avons proposé un modèle mathématique et numérique et qui peut être exploité pour développer un code de calcul tridimensionnel pour la modélisation des phénomènes thermiques aux seins des bâtiments. L'équation de diffusion de la chaleur et la méthode des volumes finis ont été exploitées pour atteindre cet objectif.

Chapitre IV :

Modélisation des Ambiances Lumineuses et Thermiques

Chapitre IV

Modélisation des Ambiances Lumineuses et Thermiques

IV. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présentés les éléments nécessaires intervenant dans la conception d'une ambiance lumineuse où nous avons terminé par montrer, la complexité de la relation qui lie, l'ambiance lumineuse et l'ambiance thermique. Nous avons proposé à la fin du chapitre présenté, de procéder au développement d'un outil d'aide à la conception et qui peut être utilisé pour la modélisation de l'éclairage naturel et des phénomènes thermiques présents dans un bâtiment. Dans le présent chapitre nous allons alors présenter, l'ensemble des modèles mathématiques, numériques et physiques et qui ont permis de concevoir, sous environnement MATLAB, deux codes de calcul utilisés pour la simulation de l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments et aussi, pour la modélisation de l'ensemble des phénomènes thermiques présents dans ces bâtiments.

Les modèles mathématico-numériques développés et qui ont aboutis à des codes de calcul implémentés sous l'environnement MATLAB peuvent présenter plusieurs avantages, principalement :

- le code de calcul exploité pour la modélisation de l'éclairage naturel peut être appliqué sous conditions de n'importe quel type de ciel et quelques soit l'emplacement géographique du projet.
- Une méthode d'optimisation a été proposée et implémentée dans les codes de calcul développé. Cette méthode a permis de surmonter quelques problèmes numériques et de définir les dimensions optimales des ouvertures pour atteindre un meilleur confort visuel.

- Les modèles développés ont permis d'atteindre un calcul tridimensionnel (3D), plus exacte, comparé aux calculs atteints par des modèles monodimensionnel (1D) ou même bidimensionnel (2D).
- Les codes développés sont conçus à partir des programmes interactifs, apte pour introduire de nouveaux modèles de calcul ou d'optimisation, voir même d'autres modèles liés à l'étude des éléments du confort, ce qui ouvre des perspectives en moyen terme pour entamer une étude complète sur les ambiances architecturales et urbaines.

IV.1. DEVELOPPEMENT D'UN CODE DE CALCUL POUR LA SIMULATION/OPTIMISATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL À L'INTERIEUR DES EDIFICES :

Dans la partie ci-dessous, nous présentons les procédures adoptées et qui ont permis de développer un code de calcul de simulation de l'éclairage naturel à l'intérieur des édifices et dans d'autre part, d'optimiser ces valeurs en agissant sur certains paramètres liés dans l'ensemble, aux dimensions des ouvertures adoptées dans les parois des édifices. Ces méthodes, appartiennent à la troisième famille (paragraphe II.4.1), définies par un aspect de modélisation et qui font appel, à un ensemble de modèles mathématico-numériques. Pour résoudre le problème de simulation/optimisation, nous avons couplé entre les méthodes de simulation directe et les méthodes d'optimisation. Les méthodes de simulation directe, ont permis de déterminer l'éclairage naturel réparti à l'intérieur d'un édifice. Pour l'optimisation, elle permettra de définir un ensemble de paramètres architecturaux et qui permettrons d'atteindre des niveaux d'éclairage désirés, et d'voir ainsi, un certain confort en créant une ambiance visuelle particulière.

Dans la méthode de simulation directe, nous avons adopté une des méthodes de calcul de l'éclairage naturel, il s'agit de la méthode de SPLIT FLUX FORMULA. Cette méthode permettra de déterminer l'ensemble des composantes de l'éclairage naturel et qui atteint les surfaces intérieures d'un édifice. Pour la méthode d'optimisation adoptée dans le cadre de ce travail, nous allons proposer une nouvelle méthode où elle va exploitée les résultats des simulations atteints par la modélisation directe. Une fonction objective sera déterminée à

partir des intentions désirées. Pour la décrire, nous avons fixé un objectif et qui s'agit d'atteindre un niveau d'éclairage précis. La fonction objective sera déterminée à partir de la différence entre les valeurs de l'éclairage réelles et les valeurs d'éclairage de référence. Comme paramètres à optimiser, nous avons agi principalement sur les dimensions des ouvertures. Ces dimensions sont prises variables et limitées par un maximum et un minimum. Pour ces dimensions, nous allons calculer les valeurs de l'éclairage. Les dimensions des fenêtres qui seront prises sont ceux qui offrent un minimum entre les valeurs d'éclairages réels et les valeurs de référence. Une méthode d'interpolation linéaire a été adoptée pour représenter le profil de l'éclairage pour chaque pas paramétrique et qui représente le pas géométrique adopté pour décrire les dimensions des fenêtres.

IV.1.1 ALGORITHME DU CODE DE CALCUL DEDIE A LA SIMULATION DIRECTE DE L'ECLAIRAGE NATUREL A L'INTERIEUR DES EDIFICES :

Pour résoudre un tel problème, nous avons procédé à plusieurs étapes et qui ont permis de déterminer l'éclairage à l'intérieur des espaces. Les étapes de calcul sont résumées dans l'organigramme présenté dans la Fig. IV.1. Le code de calcul développé est composé de plusieurs blocs, interactifs et complémentaires, est implémenté sous environnement MATLAB. Chaque bloc du code sera présenté dans la partie ci-dessous :

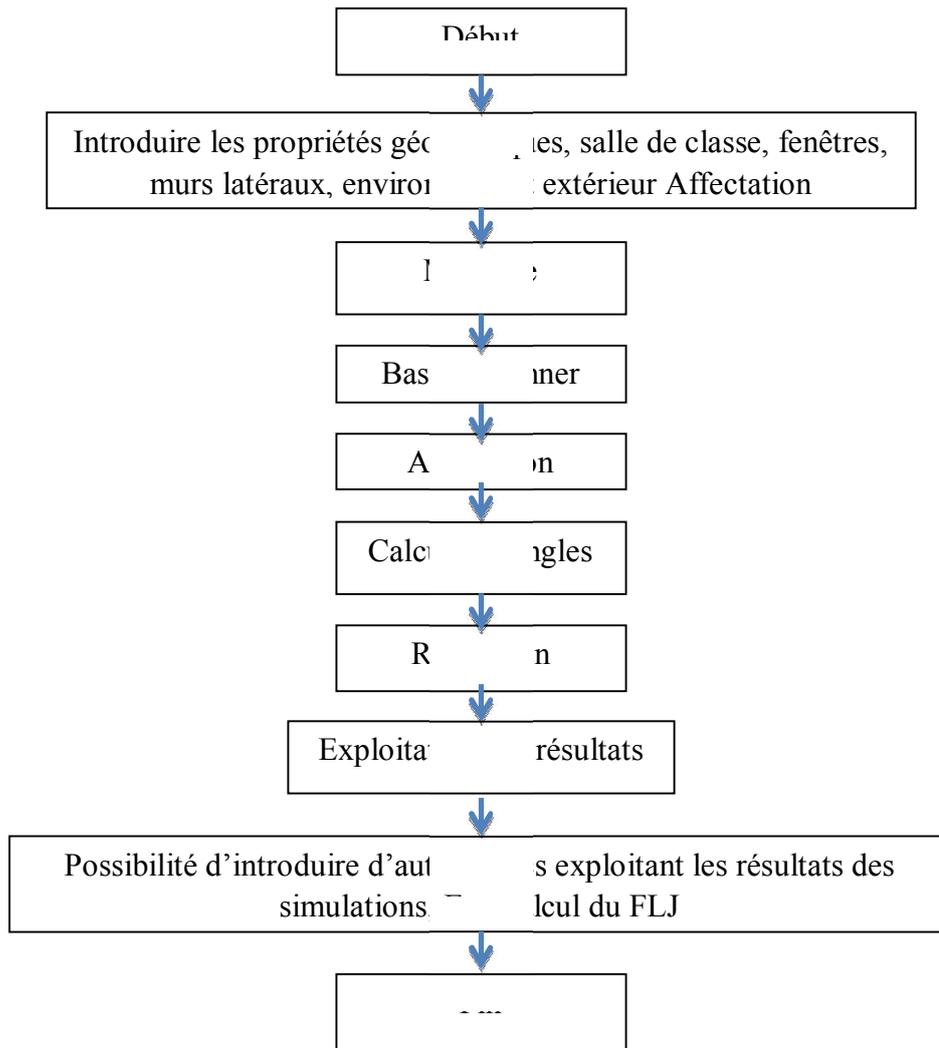


Fig.IV.1. Organigramme représentant l'ensemble des blocs intervenant dans le code de calcul développé et implémenté sous environnement MATLAB.

IV.1.1.1. PHASE 1. INTRODUIRE LES PROPRIETES GEOMETRIQUES DU PROBLEME :

Dans la première phase du code de calcul développé, nous avons procédé à donner une définition des propriétés géométriques du problème à modéliser. Dans l'ensemble du problème, il s'agit d'une salle de classe dotée de plusieurs fenêtres placées selon le choix de l'orientation de la façade principale. Cette phase est préparatoire pour la seconde phase consacrée à la création du maillage de l'espace architectural à modéliser. Dans cette phase, on donne une définition de l'ensemble des propriétés géométriques définissant l'espace géométrique, tels-que, les dimensions de la salle de classe, les dimensions des murs latéraux,

le plafond et le sol de la salle, les dimensions et le nombre des fenêtres et enfin les dimensions de l'environnement extérieur. A la fin de cette phase, on peut retracer la géométrie de la salle de classe comme celle présentée dans la Fig.IV.2.

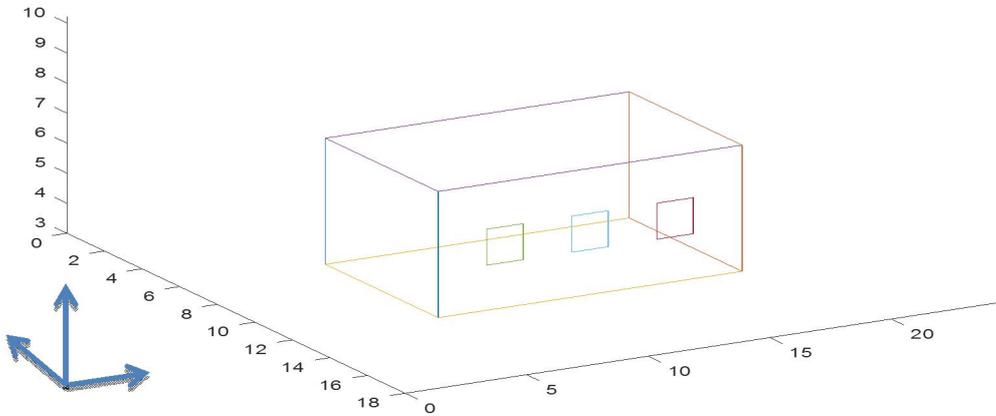


Fig.IV.2. Exemple d'une salle de classe ayant trois fenêtres placées au niveau d'une seule façade.

IV.1.1.2. PHASE 2. LA CREATION DU MAILLAGE :

Dans cette phase on procède à la création du maillage de l'espace architectural composé de la salle de classe et de l'environnement extérieur. Sachant qu'il existe des outils de maillage très performants et qui peuvent traiter des géométries complexes comme par exemple le MGS. Cependant et dans le cadre de notre travail, nous avons développé notre propre maillage, créé et implémenté sous l'environnement MATLAB. Celui-ci permet de subdiviser le domaine géométrique en un nombre de volumes élémentaires de forme quadrilatère (Fig.IV.3).

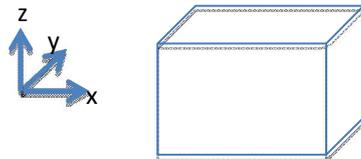


Fig.IV.3. Volumes élémentaires constituant le maillage adopté.

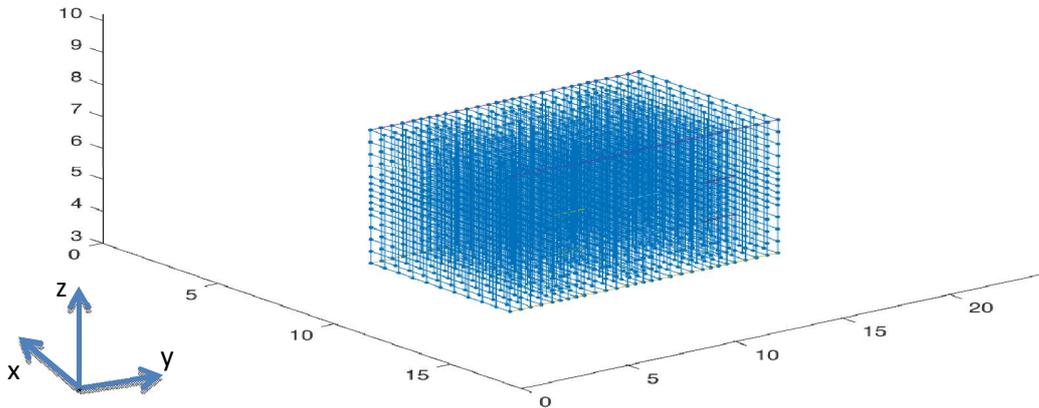


Fig.IV.4. Exemple du maillage crée à l'intérieur d'une salle de classe dotée de trois fenêtres.

A partir des volumes élémentaires choisis, on peut modéliser des espaces ayant des formes hexaédriques. Aussi le volume choisi permet de traiter un problème tridimensionnel. En effet, pour prendre en compte l'ensemble des composantes constituant l'éclairément global dans un point donné, Il est nécessaire de procéder à un calcul tridimensionnel.

La phase de maillage permettra de créer l'ensemble des points qui seront considérés comme des points de calcul où chacun, représentera une valeur d'éclairément qui sera définie par la méthode de SPLIT FLUX FORMULA. La Fig.IV.4. représente un exemple d'un maillage crée à l'intérieur d'une salle de classe dotée de trois fenêtres.

Dans cet exemple, nous avons adopté un maillage non-uniforme, c'est à dire un maillage ou les éléments élémentaires prennent des dimensions différentes. Ceci dans le but est de raffiner le maillage dans les zones ou l'éclairément est supposé fortement non-linéaire et sa valeur variée considérablement. Ces zones sont celles voisines de la façade principale portant les fenêtres. Dans l'exemple présenté, (Fig.IV.2), la salle de classe, ayant les dimensions ($L_x \times L_y \times L_z = 6 \times 12,5 \times 4,2 \text{m}^3$), est dotée de trois fenêtres de dimensions ($L_{fy} \times L_{fz} = 1,5 \times 1,5 \text{m}^2$) et elle est discrétisée en 3920 volumes élémentaires. Chaque fenêtre est discrétisé en 24 volumes élémentaires et le domaine du calcul incluant l'environnement voisin de la salle ainsi que l'intérieur de la salle de classe est composé de 23760 volumes élémentaires.

IV.1.1.3. PHASE 3. BASE DE DONNEES :

Dans cette phase on procède à la définition de l'ensemble des propriétés physiques dans chaque point considéré comme point de calcul est représentant le niveau d'éclairement. Dans un premier temps, on a crée dans ce bloc, une bibliothèque contenant l'ensemble des propriétés physiques liées aux milieux caractérisant l'espace architectural à modéliser, tels-que : le coefficient de transmission lumineuse du vitrage, le facteur de réflexion des surfaces extérieures et intérieures, etc. A la fin de cette phase, chaque point crée dans l'espace et le domaine de calcul sera défini par ces propriétés physiques, dépendantes de son appartenance à chaque milieu dans l'espace architectural. Le Tab.IV.1. Représente quelques valeurs représentant les propriétés physiques adoptées dans ce bloc.

Tab.IV.1. Quelques valeurs représentant le facteur de réflexion des surfaces extérieurs, intérieurs et certaines valeurs du coefficient de transmission lumineuse du vitrage¹⁹.

Facteur de réflexion des surfaces extérieures (F_s)	$F_s = de 0.22$ (sol extérieur en terre), $F_s = 0.35$ (sol en béton) et $F_s = 0.9$ (un sol considéré comme blanc).
Facteur de réflexion des surfaces intérieures (F_i)	$F_i = 0.7$ (plafond), $F_i = 0.5$ (murs), $F_i = 0.3$ (sol), $F_i = 0.2 - 0.6$ (plan utile).
Coefficient de transmission lumineuse du vitrage (τ_v)	$\tau_v = 0.6$ (vitrage double normalement sale), $\tau_v = 0.8$ (vitrage double), $\tau_v = 0.9$ (vitrage simple de 3mm).

IV.1.1.4. PHASE 4. CALCUL DES ANGLES :

Dans ce bloc qui caractérise la quatrième phase du code de calcul développé, un ensemble de relations trigonométriques ont été implémenté dans le but de déterminer les angles nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode SPLIT FLUX FORMULA. Ce bloc défini l'ensemble des angles créés entre, les points de calcul, entre surfaces et entre ouvertures.

IV.1.1.5. PHASE 5. AFFECTATION :

Dans ce bloc est dans le but est de simplifié la mise en œuvre de la méthode SPLIT FLUX FORMULA ainsi que l'écriture de l'ensemble des équations provenant de cette méthode. Le

produit entre les angles et certaines dimensions géométriques a été réécrit sous forme des coefficients bien définis.

IV.1.1.6. PHASE 6. RESOLUTION :

C'est la phase où la méthode SPLIT FLUX FORMULA est mise en œuvre pour déterminer la valeur de l'éclairement dans chaque point du maillage créé. Trois composantes doivent être déterminées pour représenter la composante globale de l'éclairement dans chaque point considéré. Dans le code développé, seul la lumière du jour est considérée comme source d'éclairage. Pour entamer une telle modélisation, il est nécessaire de déterminer la distribution de la luminance du ciel et de définir les conditions de la lumière du jour pendant toute l'année. Vu la diversité des conditions météorologiques, quinze ciels normalisés ont été définis par la commission internationale de l'éclairage (CIE) (Darula 2002). Cependant, dans les travaux de simulation, les quatre types de ciel les plus couramment utilisés sont respectivement, le ciel uniforme, le ciel couvert, le ciel clair sans soleil et enfin le ciel clair avec soleil (Darula 2002). Chacun de ces types de ciel est caractérisé par sa répartition particulière de la luminance sur la voûte céleste et qui varie en fonction de l'heure, de la saison, de latitude et enfin de l'altitude (Daiche, 2015). Plusieurs modèles ont été proposés pour définir les conditions de la lumière du jour ainsi que la distribution de luminance du ciel à des situations différentes. Parmi ces modèles, nous citons le modèle de Moon et Spencer proposé en 1942 et adopté par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) en 1955. Autres modèles ont été proposés pour le calcul de la luminance pour les autres types de ciel comme celui proposé par Kittler en 1967 et qui décrit la luminance d'un ciel clair. D'autres modèles plus généraux ont été proposés dans le but de décrire tous les types de ciel. Parmi ces modèles, le modèle empirique de Richard Pérez appelé aussi le modèle de tout temps où il peut déterminer la répartition de la luminance, en allant d'un ciel clair vers un ciel couvert, à partir de deux coefficients liés respectivement à la clarté et à la luminosité du ciel. Dans le cadre de ce travail de recherche et pour calculer la luminance provenant de n'importe quel type de ciel (les quinze types de ciel normalisés par la CIE), nous avons utilisé un modèle général et qui peut prendre en considération tout type de ciel pour n'importe quel emplacement, il s'agit d'un modèle proposé en 2002 par Stanislav Darula et Richard Kittler (Darula 2002). Dans ce modèle, le

rapport entre la luminance dans un élément de ciel arbitraire ($L_{\gamma\alpha}$) et la luminance zénithale (L_z) est donnée par la relation suivante :

$$\frac{L_{\gamma\alpha}}{L_z} = \frac{f(\chi)\varphi(Z)}{f(Z_s)\varphi(0)} \quad (III.1)$$

où Z , Z_s et χ sont respectivement, l'angle zénithal de l'élément du ciel, l'angle zénithal du soleil et enfin la distance angulaire entre l'élément du ciel et le soleil. Cette distance χ est exprimée en fonction des angles Z , Z_s par la relation suivante (Darula 2002) :

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos Az) \quad (IV.2)$$

Az exprime la variation entre l'angle azimutal du plan vertical de l'élément du ciel (α) est l'angle azimutal de la position du soleil (α_s), cette variation est exprimée par :

$$Az = |\alpha - \alpha_s| \quad (IV.3)$$

L'ensemble des angles présentés dans le système d'équations IV.1-3 est résumé dans la Fig.IV.5. Dans le modèle de Stanislav Darula et Richard Kittler (Darula 2002) présenté précédemment par le système d'équations IV.1-3, on peut déterminer à n'importe quel emplacement la luminance provenant du ciel. L'emplacement géographique de l'espace architectural est pris en compte dans ce modèle, par la trajectoire du soleil dépendante de l'angle azimutal (α_s) et de la hauteur (γ_s). Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation du comportement des salles de classe situées dans la ville de Biskra. A titre d'exemples, nous avons simulé leurs comportements vis-à-vis un éclairage naturel à 10H et à 14H pour les journées du (21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et le 21 Décembre). Pour cet emplacement et pour les journées et les heures des simulations considérées, nous avons résumé les valeurs des angles α et γ_s dans le Tab.IV.2.

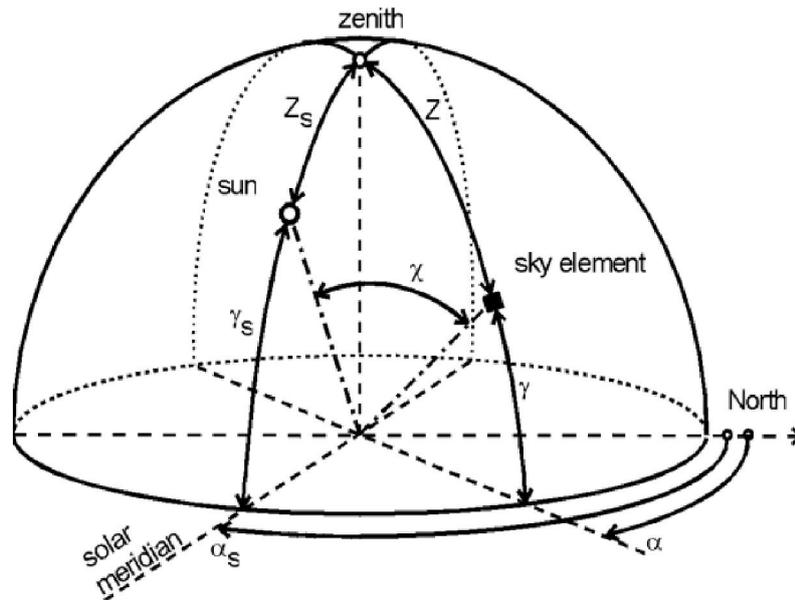


Fig.IV.5. Angles définissant la position du soleil et l'élément du ciel (Darula 2002).

Tab.IV.2 : Valeurs de α_s et γ_s pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre à 10 H et à 14H³⁶.

Paramètres	Valeur
La trajectoire du soleil définie par : l'angle azimutal (α_s), la hauteur (γ_s).	Les angles sont donnés respectivement pour les journées du : 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et enfin pour le 21 Décembre :
	A 10 h : α_s (en degré) = [122.94 97.46 126.16 141.98],
	A 14h : α_s (en degré) = [211.34 242.56 216.32 202.14].
	A 10 h : γ_s (en degré) = [38.52 53.76 41.04 21.09],
	A 14 h : γ_s (en degré) = [51.31 69 49.75 28.35].

Dans la formulation (IV.4), la fonction indicatrice f est exprimée en fonction des angles Z_s et χ par les relations ci-dessous (Darula 2002) :

$$f(\chi) = 1 + c \left(\exp(d\chi) - \exp\left(\frac{d\pi}{2}\right) \right) + e \cos^2 \chi \quad (III.4)$$

$$f(Z_s) = 1 + c \left(\exp(dZ_s) - \exp\left(\frac{d\pi}{2}\right) \right) + e \cos^2 Z_s \quad (III.5)$$

³⁶ Site : www.sunearthtools.com

La luminance d'un élément de ciel $L_{\gamma\alpha}$ dans la relation (IV.1) est reliée à son angle zénithal Z par (Darula 2002) :

$$\begin{aligned}\varphi(Z) &= 1 + a \exp(b/\cos Z) \text{ si } 0 \leq Z \leq \pi/2 && \text{et} \\ \varphi(\pi/2) &= 1 ; \varphi(0) = 1 + a \exp(b) && \text{(III.6)}\end{aligned}$$

Dans le modèle mathématique présenté précédemment, le système d'équations IV.1-IV.6 permet de calculer la luminance d'un élément de ciel arbitraire $L_{\gamma\alpha}$ en prenant en considération, la distance angulaire entre l'élément du ciel et le soleil, ainsi que les conditions atmosphériques via les paramètres (a, b, c, d, e). Ces paramètres ont des valeurs précises et différentes selon le type de ciel et ils peuvent traduire le comportement de quinze types de ciel différents (Darula 2002). Dans notre travail et pour modéliser le ciel caractérisant la ville de Biskra considéré comme ciel de type 11, nous avons adopté les valeurs (Darula 2002) :

$$a=-1, b=-0.55, c = 10, d = -3 \text{ et } e = 0.45 \quad \text{(IV.7)}$$

Ce modèle permet de calculer l'éclairement intérieur en considèrent seulement la luminance du ciel comme la seule source d'éclairement. Des travaux de recherches ont adopté ce modèle via des codes de calcul monodimensionnel, comme par exemple (Daiche, 2015) où l'éclairement intérieur est calculé à des points spécifiques du domaine de calcul. Ces modèles monodimensionnels (1D) ne peuvent en aucun cas, prendre en considération toutes les composantes de l'éclairement dans un espace architectural. Il est nécessaire alors de proposer des modèles de calcul tridimensionnel. Dans notre travail est dans le but de calculer l'éclairement intérieur dans tout l'espace architectural et pour prendre en compte l'ensemble des composantes constituant l'éclairement global E_{tot} (Fig.IV.5), tel-que : la composante directe (E_d) ; la composante réfléchiée interne (E_{ri}) et enfin la composante réfléchiée externe (E_{re}), un calcul tridimensionnel est nécessaire

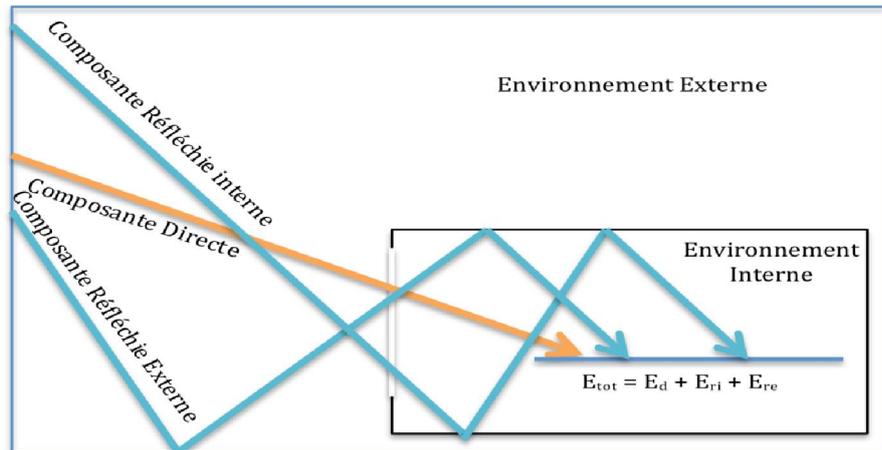


Fig.IV.6. Les trois composantes de l'éclairage représentant la composante globale de l'éclairage dans un point donné, (méthode de split flux formula).

La composante directe E_d provenant du ciel en fonction de la luminance $L\gamma\alpha$ et en considérant qu'il n'y a pas de phénomène de réfraction et de défraction, nous avons adopté la formulation suivante (Tourre, 2007) :

$$E_d = \iint_S \frac{L\gamma\alpha \cos^3\alpha \cos\beta \tau ds}{ds^2} \quad (IV.8)$$

S est la surface de l'élément d'ouverture. Dans le cas où la surface éclairée et l'élément d'ouverture sont parallèles, la composante E_d est exprimée par (Tourre, 2007) :

$$E_d = \iint_S \frac{L\gamma\alpha \cos^4\alpha \tau ds}{ds^2} \quad (IV.9)$$

Dans (IV.8) et (IV.9), τ est le coefficient de transmission, ds, α et β (Fig.IV.7) sont respectivement, la distance entre l'élément d'ouverture et la facette portant le point à éclairer

(point de calcul), l'angle entre la normale de la facette portant le point à éclairer et la direction de la facette portant le point à éclairer vers l'élément d'ouverture et enfin l'angle entre la normale de l'élément d'ouverture et la direction de l'élément d'ouverture vers la facette source. A partir de la luminance $L_{\gamma\alpha}$, chaque facette appartenant au domaine de calcul reçoit un flux élémentaire et donc un éclairage par rapport à la surface de chaque facette, qui sera à son tour émise vers une autre facette. La notion de l'éclairage est remplacée, pour un rayonnement émis par l'émittance de la surface émettrice. En effet, si on considère deux facettes ds_1 et ds_2 appartenant au domaine du calcul. Le flux élémentaire émis de ds_1 vers ds_2 est exprimé par :

$$d\phi_{12} = \frac{M ds_1 ds_2 \cos(i) \cos(j)}{\pi R^2} \quad (IV.10)$$

R est la distance séparant le centre des deux facettes S_1 et S_2 . i et j sont les angles entre la normale de chaque facette et la direction de chacune des facettes vers l'autre (Fig.II.17). L'éclairage élémentaire de la facette S_2 provenant de la facette S_1 est obtenu par la division du flux élémentaire $d\phi_{12}$ par l'aire de la facette S_2 soit ds_2 .

$$E_{12} = \frac{d\phi_{12}}{ds_2} \quad (IV.11)$$

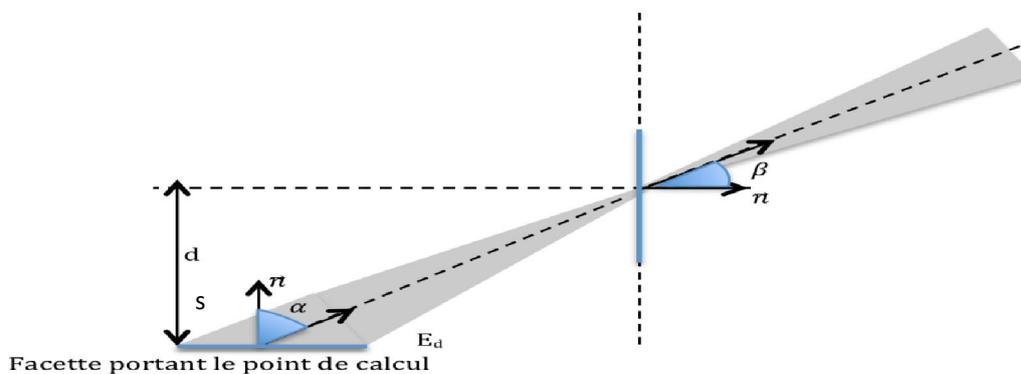


Fig.IV.7. Illustration des paramètres géométriques (ds , α et β) adoptés dans les formulations IV.8, IV.9 et IV.10.

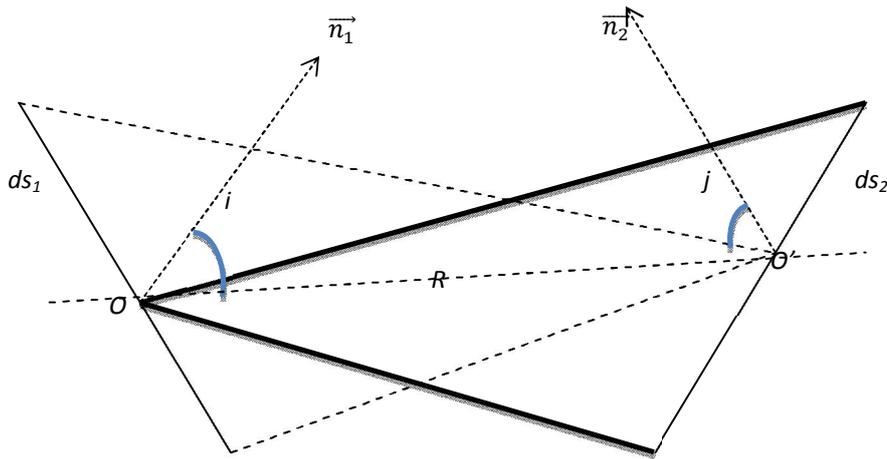


Fig.IV.8. Illustration des paramètres géométriques (i, j, R) adoptés dans la formulation IV.10.

En utilisant les relations (IV.10) et (IV.11) on peut exprimer la composante réfléchie interne (E_{ri}) et la composante réfléchie externe (E_{re}) par :

$$E_{ri} = \sum_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, n \\ i \neq j}} E_{i,j} \quad (\text{IV.12})$$

$$E_{re} = \sum_{\substack{i=1, \dots, m \\ j=1, \dots, n}} E_{i,j} \quad (\text{IV.13})$$

Où n et m sont respectivement le nombre de facettes du milieu interne et le nombre de facettes du milieu externe. Pour calculer E_{re} , il faut prendre aussi en considération le facteur de transmission τ .

Le système d'équations présentés précédemment est qui ont été obtenues principalement par la mise en œuvre de la méthode SPLIT FLUX FORMULA ont été implémentée dans un bloc de résolution et qui a permis d'exploiter l'ensemble des blocs développés précédemment. L'exécution du bloc de résolution permet à la fin de calcul de définir l'éclairement dans l'ensemble des points affectés dans le domaine du calcul.

IV.1.1.7. PHASE 7. EXPLOITATION DES RESULTATS :

Cette phase permet de représenter les résultats des simulations obtenus, il s'agit de la répartition de l'éclairement dans l'ensemble des points créés par le maillage affecté dans le domaine de calcul. Les résultats obtenus ont été présentés sous forme de graphe, monodimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel où les outils de graphisme offerts par MATLAB ont été largement exploités. Pour les représentations tridimensionnelles, des efforts ont été attribués pour réaliser des présentations tridimensionnelles de la répartition spatiale de l'éclairement. Dans ce bloc, les valeurs de l'éclairement peuvent être adoptées pour déterminer d'autres grandeurs et qui peuvent traiter correctement la qualité du confort visuel offert, tel-que, le calcul du facteur de la lumière du jour (FLJ).

IV.2. ALGORITHME D'OPTIMISATION :

L'algorithme d'optimisation adopté dans le cadre de ce travail et qu'on a appelé, algorithme d'optimisation paramétrique procède de la manière suivante :

- dans un premier temps, on doit définir les paramètres à optimiser. Dans le cadre de ce travail, nous avons considérés que les dimensions des fenêtres sont les paramètres à optimiser.
- donner une plage de variation des dimensions des fenêtres, limitée par une valeur maximale et une valeur minimale. Ceci donnera l'intervalle décrivant les dimensions des fenêtres qui peuvent être exploitées. Cet intervalle, représente les dimensions des fenêtres autorisées à exploitées.
- Définir le pas paramétrique, il définit le passage d'une dimension à une autre en commençant par une valeur minimale et en allant vers une valeur maximale. La précision du calcul et le temps du calcul dépendront de la valeur du pas adopté.
- Pour chaque pas, les dimensions des fenêtres sont réactualisées pour relancer la simulation directe de l'éclairage naturel en allant de la phase 1 à la phase 7.
- Les valeurs de l'éclairement correspondant aux dimensions des fenêtres adoptées sont stockées.
- Un calcul d'erreur est effectué, il représente l'écart entre les valeurs obtenues et les valeurs de références imposées par le concepteur.
- Une interpolation linéaire est adoptée entre les valeurs d'éclairement. Le but est de représenter toutes les valeurs d'éclairement possible.

- Pour chaque valeur du pas paramétrique, une erreur est déterminée. En traçant les valeurs de l'erreur en fonction des dimensions adoptées, on peut déterminer les dimensions optimales qui permettent d'avoir la meilleure solution liée aux dimensions des fenêtres.

Avec les deux méthodes, nous pouvons alors, déterminer les paramètres optimaux liées aux dimensions des fenêtres et qui permettent d'avoir un éclairage naturel intérieur qui peut répondre aux attentes.

L'algorithme adopté pour résoudre le problème d'optimisation est présenté dans la Fig.IV.9.

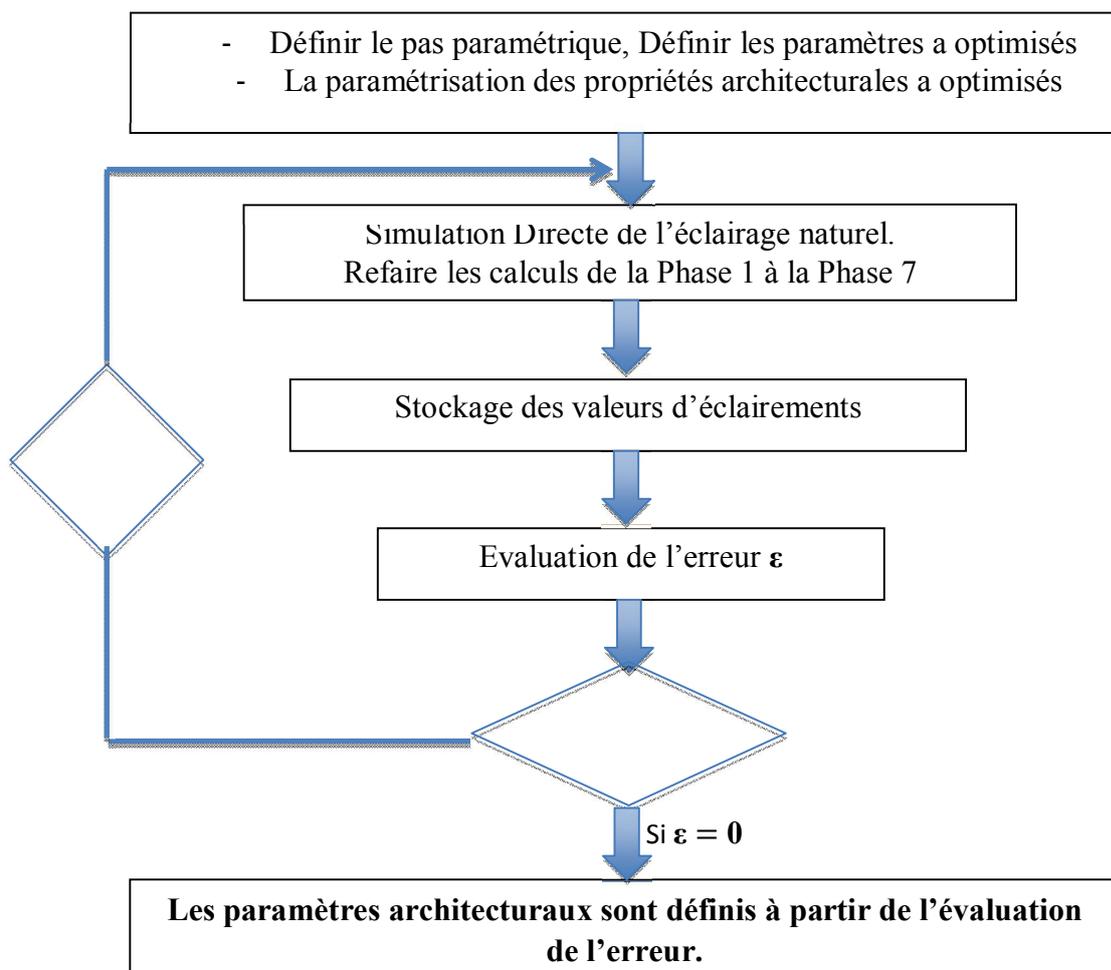


Fig.IV.9. Algorithme d'optimisation

IV.3. RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA TEMPERATURE PAR LA MVF

Rappelons d'abord le modèle thermique adopté dans ce travail de recherche est présenté par une équation aux dérivées partielles (voir paragraphe (II.5.3), Chapitre II).

$$-\text{div}(\vec{k} \text{ grad } T) = P - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{IV.14})$$

Comme présenté précédemment, la résolution d'un tel problème fait appel à l'utilisation d'une des méthodes numériques. Parmi ces méthodes, nous avons sélectionné la méthode des volumes finis MVF. La MVF est une méthode de discrétisation. Elle est utilisée, en particulier en mécanique des fluides où elle est apparue, il y a une vingtaine d'années. Depuis, la méthode des volumes finis a connu un essor considérable non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie scientifique : La thermique et autres. La méthode des volumes finis peut être vue comme une version spéciale de la méthode des éléments finis dont la fonction de projection β est prise égale à l'unité.

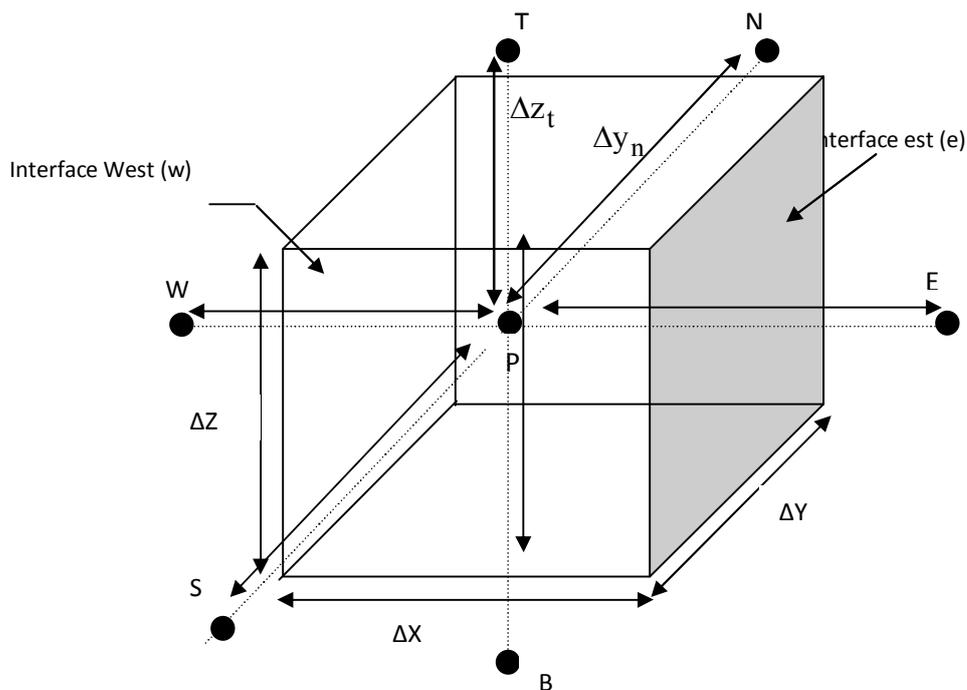


Fig.IV.10. Volume élémentaire de la MVF.

Elle consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires, de forme simple et adjacente. Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel (e, w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e, w, s, n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e, w, s, n, t, b). Chaque volume entoure un nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E, W) dans le cas monodimensionnel, (E, W, S, N) dans le cas bidimensionnel, et (E, W, S, N, T, B) dans le cas tridimensionnel (Fig.IV.10) (Patankar,1981). La méthode des volumes finis intègre, sur chaque volume élémentaire les équations des problèmes à résoudre. Elle fournit ainsi d'une manière naturelle des formulations discrètes. Il existe une grande variété de méthodes selon le choix de la géométries des volumes élémentaires (maillage régulier ou maillage irrégulier). Après discrétisation des EDP, on arrive à construire un système d'équation algébrique qui va être résolu par une des méthodes connues (itérative par exemple).

Pour la mise en œuvre de la MVF, les opérateurs spatiales dans l'équation de chaleur (IV.14) sont développés en coordonnées cartésiennes, leur développement permet réécrire l'équation IV.14 en :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P_s \quad (IV.15)$$

La mise en œuvre de la MVF consiste à intégrer les différents termes différentiels de l'équation IV.15 sur le volume fini, correspondant au nœud P, et délimité par les frontières (e, w, n, s, t, b).

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_b \int_s \int_w \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz dt &= \int_t^{t+\Delta t} \int_b \int_s \int_w \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz dt + \\ &\int_t^{t+\Delta t} \int_b \int_s \int_w \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dz dt + \\ &\int_t^{t+\Delta t} \int_b \int_s \int_w \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz dt + \\ &\int_t^{t+\Delta t} \int_b \int_s \int_w P_s dx dy dz dt \end{aligned} \quad (IV.16)$$

Nous n'allons pas présentés les développements liés aux intégrales de l'ensemble des termes de l'équation IV.16, mais nous allons présenter directement les résultats obtenus directement après intégration. Ces développements ont été retirés principalement du livre présenté par PATANKAR (Patankar, 1981).

$$\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z (T_P - T_P^0) = a_e T_E \Delta t + a_w T_W \Delta t + a_n T_N \Delta t + a_s T_S \Delta t + a_t T_T \Delta t + a_b T_B \Delta t + (a_e + a_w + a_n + a_s + a_t + a_b) T_P \Delta t + P_S \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad (IV.17)$$

ou :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_e = \frac{k_e \Delta y \Delta z}{\Delta x_e}, \quad a_w = \frac{k_w \Delta y \Delta z}{\Delta x_w}, \quad a_n = \frac{k_n \Delta x \Delta z}{\Delta y_n}, \quad a_s = \frac{k_s \Delta x \Delta z}{\Delta y_s}, \\ a_t = \frac{k_t \Delta x \Delta y}{\Delta z_t}, \quad a_b = \frac{k_b \Delta x \Delta y}{\Delta y_b} \end{array} \right.$$

Ainsi, l'équation algébrique finale peut être écrite sous une forme où seules les valeurs nodales apparaissent, l'expression, sous forme condensée, est donnée par :

$$a_p T_P = a_e T_E + a_w T_W + a_n T_N + a_s T_S + a_t T_T + a_b T_B + b \quad (IV.18)$$

$$a_{0p} = \frac{\rho c_p \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}$$

où :

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s + a_t + a_b + a_{0p}$$

$$b = P_S \Delta x \Delta y \Delta z + a_{0p} T_P^0$$

Pour résoudre l'équation algébrique (IV.18), nous avons adopté une des méthodes itératives, il s'agit de la méthode de GAUSSE SEIDEL. Son algorithme est donné par :

$$X_i^{(k+1)} = \left[b_i - \sum_{j=1}^{(i-1)} a_{ij} X_j^{(k+1)} - \sum_{j=(i+1)}^n a_{ij} X_j^k \right] / a_{ij} \quad : i = 1, \dots, n$$

En donnant aux inconnues X_i^k des valeurs arbitraires initiales X_i^0 (pour $k=0$). Le processus

sera arrêté si : $\frac{|X_i^{(k+1)} - X_i^k|}{X_i^k} < \epsilon$ dans le cas d'une précision relative.

ϵ : Précision imposée par l'utilisateur.

IV.4. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons entamé une étude approfondie sur la modélisation de l'éclairage naturel et aux phénomènes thermiques produits à l'intérieur des bâtiments. Les codes de calcul développés sous environnement MATLAB ainsi que leurs algorithmes ont été largement présentés.

L'outil développé et qui a permis de modéliser l'éclairage naturel aux seins des bâtiments présente plusieurs avantages et qui sont :

- il est conçu à partir d'un modèle tridimensionnel qui permet de prendre en compte l'ensemble des composantes de l'éclairage naturel, comparé à d'autres modèles, monodimensionnel ou bidimensionnel.
- Le modèle de l'éclairage adopté permet de prendre en compte, les quinze types de ciels normalisés par la CIE.
- Il s'agit d'un code local conçu par nous-mêmes ou nous pouvons intégrer d'autres modèles ou même d'autres méthodes dans le but d'améliorer la qualité des résultats, ou de proposer de nouveaux modèles de calcul ou d'optimisation.
- Il permet d'atteindre n'importe quel point dans l'espace intérieur. Il peut même atteindre les divers plans dans un espace intérieur.

Dans le chapitre présenté, nous avons procédé à la mise en œuvre de la méthode de SPLIT FLUX FORMULA. Cette méthode a été intégrée dans un algorithme de simulation directe de l'éclairage naturel. A travers plusieurs phases de calcul direct de l'éclairage naturel, un premier code de calcul a été développé et implémenté sous environnement MATLAB.

Les modèles développés permettront de déterminer et dans tout point de l'espace intérieur, la valeur de l'éclairement. Afin de compléter cette étude, nous avons intégré, dans le code de calcul développé, la méthode d'optimisation que nous avons appelée, méthode paramétrique. Celle-ci peut être exploitée dans le but d'atteindre un certain niveau d'éclairement à l'intérieur. La méthode développée et que nous avons appelée, méthode paramétrique, exploite les résultats des simulations provenant de la simulation directe de l'éclairage naturel, où les paramètres à optimiser, seront exploités pour déterminer, à chaque pas paramétrique, les valeurs optimaux et qui permettent d'atteindre les niveaux d'éclairements désirés.

Les modèles mathématiques et numériques de la simulation directe de l'éclairage naturel, couplé à la méthode paramétrique, adoptée pour optimiser les paramètres architecturaux, ont été implémentés sous environnement MATLAB pour proposer un second outil et qui doit permettre à une modélisation/Optimisation tridimensionnelle de l'éclairage naturel aux seins des bâtiments.

Pour la résolution du problème thermique à l'intérieur des bâtiments, nous avons proposé un modèle mathématique et numérique et qui a été exploité pour développer un code de calcul tridimensionnel utilisé dans la modélisation des phénomènes thermiques aux seins des édifices. L'équation de diffusion de la chaleur et la méthode des volumes finis ont été exploitées pour résoudre un tel problème.

CHAPITRE V :

***RESULTATS DE SIMULATIONS DES
PERFORMANCES THERMIQUES***

CHAPITRE V

RESULTATS DE SIMULATIONS DES PERFORMANCES THERMIQUES

V. INTRODUCTION

Perçu comme le contentement de la perception humaine par rapport à son environnement thermique, le confort thermique est un élément relativement subjectif (Dahech, 2014, M'Sellem 2007) qui fait référence à un certains nombre de conditions pour assurer la satisfaction des individus avec une sensation de n'avoir ni très froid ni très chaud. Cette satisfaction dépend de l'activité des individus pratiquée à l'intérieur des espaces, aussi (M'Sellem, 2007) des habitudes et des préférences des individus.

Selon plusieurs études et pour assurer la réussite de la tâche pédagogique, il est nécessaire d'assurer le confort à l'intérieur des espaces pédagogiques de tous les acteurs intervenants dans le processus de l'enseignement et en particulier, ceux des apprenants. Le confort thermique est considéré comme l'un des principaux facteurs le plus déterminant de la performance du système éducatif (Saddok 2016). En effet, le confort thermique agit aussi bien sur le bien-être de la personne que sur son rendement et sa productivité (M'Sellem, 2007).

Dans un espace intérieur, le confort thermique fait parti des conditions les plus importantes dépendant essentiellement de la température ressentie, de la température de l'air et de la température des parois, il dépend aussi de l'aménagement et des différentes sources productives de la chaleur dans cet espace. En outre, le confort thermique nécessaire pour maintenir le bien-être des apprenants dans leurs environnements est généralement influencé par d'autres paramètres qui sont respectivement (Roulet 2004, M. Hegger 11) :

La température de l'air : la température de l'air dite aussi ambiante est considérée comme l'un des éléments les plus importants et qui intervient considérablement pour assurer le confort thermique (Hegger 2011) où chaque espace nécessite une température adéquate et dépendante de l'activité exercée au sein de cet espace avec une valeur considérée comme confortable comprise (Boulfani 2010) entre 18°C et 25°C. Cette température variée dépend essentiellement des systèmes adoptés pour maintenir un équilibre sein pour la satisfaction des occupants avec leurs environnements en offrant les meilleurs conditions thermiques par l'intermédiaire des systèmes de chauffage dans le cas des températures intérieures basses et des systèmes de refroidissements dans le cas des températures intérieures élevées. En plus des systèmes intégrés à l'intérieur des espaces et pour maintenir la satisfaction des occupants vis-à-vis du confort thermique, l'enveloppe des surfaces doit préserver une température confortable pour les occupants, indépendante des conditions thermiques de l'extérieur liées aux conditions climatiques. Ceci par la présence d'une bonne isolation thermique via les parois de l'enveloppe englobant un espace.

- **La température des parois** : Associée à la température ambiante, la température des parois donne une idée sur le confort éprouvé et ressenti. Elle peut être évalué par la moyenne des températures de toutes les parois constituant l'enveloppe d'un espace tels-que : les murs, les dalles, les plafonds et les ouvrants. Celle-ci peut contribuer considérablement à l'amélioration de la qualité du confort thermique à l'intérieur d'un espace, en effet, des ouvertures avec un double vitrage dotées d'une zone intermédiaire de faible émissivité offrent un meilleur confort thermique comparée à celles ayant un simple vitrage qui peuvent émettre un rayonnement chaud en été et un rayonnement froid en hiver, produisant ainsi, une sensation d'inconfort à l'intérieur de l'espace, en particulier dans les zones voisines des ouvertures. Cette sensation d'inconfort dépendra des conditions climatiques à l'extérieur des espaces et elle peut accroître par le biais des autres éléments constituant l'enveloppe de l'espace (sol, plafond, ...etc.) par l'émission du même rayonnement désagréable. Dans ces conditions, le confort thermique peut être amélioré par les systèmes de refroidissement ou du chauffage et par l'adaptation des systèmes d'isolation thermique placés dans les parois séparant l'extérieur de l'intérieur. Ceci permettra une réduction importante de la demande d'énergie avec un confort thermique amélioré par la limitation des échanges thermiques.

- **Humidité relative de l'air et les courants d'air** : contrairement aux idées perçues, la sensation du confort thermique ne dépend pas seulement de la température de l'air mais elle est influencée par d'autres éléments. Trois de ces éléments dépendent essentiellement de l'individu (Gratia 2006) où le confort thermique est influencé par le taux du métabolisme, de l'état de santé de l'individu (ADER 1997) et son habillement (Gratia 2006). Les autres éléments dépendent de l'environnement, tels-que, l'humidité relative de l'air et les courants d'air à l'intérieur d'un espace (Gratia 2006). Définie comme étant la proportion de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (Saddok 2016), l'humidité de l'air a une influence subjective sur le confort des individus (Hegger 2011). En effet, un air portant un faible taux d'humidité ou un taux assez élevé peut nuire et donner une mauvaise sensation et un inconfort thermique. Le taux d'humidité recommandé pour assurer une sensation de bien être varie entre 35% et 70% (Hegger 2011), dans cette marge, l'humidité relative a une influence sur la qualité du confort thermique (Saddok 2016). En dehors de ces valeurs, l'humidité peut créer des inconforts à l'intérieur des espaces. En effet (M'Sellem, 2007), dans un espace ayant un taux d'humidité en dessous de 20 %, les occupants de cet espace dans le cas des basses températures auront une sensation plus accrue au froid accompagné d'une sensation de sécheresse et de picotement. Au-delà de 80%, les occupants auront une sensation d'étouffement avec une ambiance insupportable surtout à des températures élevées (M'Sellem, 2007).

Concernant les courants d'air à l'intérieur d'un espace, quantifiés par une valeur et une direction précise, ils influent sur le confort thermique par l'accroissement et le renforcement des échanges thermiques par convection. Ces derniers auront une influence sur le confort thermique au-delà d'une vitesse de 0.2m/s (Gratia 2006). Mais leurs influences sont relatives et dépendantes de la température intérieure. Un faible mouvement d'air, peut contribuer à l'amélioration du confort thermique dans des espaces chauds où la température est élevée. Dans le cas contraire où l'intérieur des espaces est caractérisé par une température basse, la circulation d'air peut devenir gênante et donner une nuisance accompagnée d'un inconfort thermique. Il est difficile alors de préciser une valeur optimale de la vitesse de l'air. Elle peut être inférieure à 0.15m/s pour une température ambiante de 20°C et devient gênante au-dessus de cette valeur (0.15m/s) mais pour une température ambiante qui dépasse 23°C, des vitesses au-delà de 0.15m/s peuvent contribuer a l'amélioration considérable du confort thermique par le renforcement par exemple de la dissipation de la chaleur corporelle par effet de

convection où l'échange thermique s'effectue principalement entre les occupants d'un lieu et le milieu environnant.

Pour assurer alors un environnement qui peut offrir aux occupants un meilleur confort thermique ; il est nécessaire d'agir sur plusieurs facteurs physiques couplés et dépendant l'un de l'autre. La température ambiante et la température des parois doivent offrir un lieu ni trop froid ni trop chaud. A ceci, il faut assurer un faible mouvement d'air qui peut contribuer à l'amélioration du confort thermique et enfin, offrir les meilleures conditions pour avoir un lieu caractérisé par un meilleur taux d'humidité et qui offre une localité ni trop humide ni trop sèche. Le confort thermique est un élément relativement subjectif (ADER 1997) , il est difficile alors d'envisager des valeurs optimales pour ces facteurs, néanmoins, des valeurs de références peuvent être imposées afin d'avoir un meilleur confort thermique. Comme exemple et pour assurer un lieu confortable caractérisé par des températures comprises entre 20°C et 22°C, il est nécessaire d'assurer un taux d'humidité compris entre 35% et 60% avec une vitesse d'air inférieure ou égale à 15m/s (Hegger 2011). Même si ces conditions sont vérifiées, cela ne peut en aucun cas garantir la satisfaction de tous les occupants d'un espace. Le confort thermique fait appel à d'autres facteurs, individuels et relatifs à chacun des individus, tels-que : l'âge, le type d'habillement, le sexe et l'activité exercée, le métabolisme, l'état de santé et autres.

En absence du confort thermique à l'intérieur d'un espace, il est nécessaire de procéder à l'adaptation des moyens de chauffage ou de refroidissement selon les conditions climatiques et en particuliers dans des conditions climatiques extrêmes. L'efficacité et la rentabilité des systèmes adoptés dépendent essentiellement de leurs dimensionnements. En effet, si on prévoit une installation sous-dimensionnée ceci peut ne pas répondre aux attentes des occupants vis-à-vis du confort thermique, en revanche, un surdimensionnement des systèmes adoptés, mène à un surcoût pour les acquérir et pour les frais de leurs mises en marche. Il est possible alors d'assurer le confort thermique via des installations auxiliaires, dimensionnées et intégrées à l'intérieur des espaces et qui peuvent offrir le confort thermique désiré. Dans ces conditions, la qualité du confort thermique dépendra principalement de la qualité et de la manière de l'intégration des équipements adoptés. Ces installations nécessitent une consommation d'énergie, qui peut être dans certaines conditions, importantes et très coûteuses, d'autres parts et d'après plusieurs études, il est recommandé dans la possibilité, d'offrir aux occupants d'un espace un confort thermique passif, sans avoir recours à ce type d'installation. Ces dernières ne doivent être utilisées que dans des conditions climatiques

extrêmes. Ceci est possible si le concepteur prend les bonnes décisions avant et au cours du processus de conception. Le concepteur sera confronté alors à proposer une conception architecturale afin d'offrir un espace intérieur confortable dans un environnement très influencé par les conditions climatiques qui peut être, chaud, froid ou autres. Ces conditions compliqueront la tâche du concepteur où il sera en mesure de proposer une conception qui peut répondre aux attentes des occupants vis-à-vis du confort thermique dans des conditions différentes. En effet, si l'air ambiant d'un environnement extérieur est satisfaisant, il est recommandé d'adopter des conceptions qui permettent un taux de ventilation naturelle élevée et bénéfique pour assurer le confort thermique et améliorer ainsi, la qualité de l'air intérieur (Atkinson 2011). Ceci devient défavorable dans des conditions climatiques différentes, comme par exemple dans le cas d'un climat froid caractérisé par des basses températures ou par un climat chaud défini par un air ambiant maintenu à une température extérieure et qui dépasse les 30°C, dans ces conditions, l'infiltration d'air extérieur doit être minimale (Atkinson 2011) avec l'augmentation des procédés adoptés pour l'isolation dans le but de réduire les échanges thermiques avec l'environnement extérieur. Ces procédés permettent les déperditions par transmission et de garder ainsi, le confort thermique intérieur indépendamment des conditions climatiques à l'extérieur.

Le concepteur est alors face à des conditions contradictoires et qui doivent être prises en compte dans le processus de conception depuis le début de la conception du projet architectural jusqu'à la fin de celui-ci. Le concepteur et pour améliorer le confort thermique à l'intérieur d'un espace, doit agir non seulement sur l'enveloppe d'un espace ou sur sa forme, mais aussi sur, les matériaux utilisés et sur les ouvertures du projet ainsi que sur la qualité des fenêtres adoptées, il doit renforcer la création d'ombrage extérieur pour réduire l'apport de chaleur solaire en particulier dans des zones définies par un climat chaud. Il doit adopter les moyens nécessaires pour assurer une bonne isolation thermique qui permettent d'avoir une inertie thermique adaptée aux besoins. A la fin d'un projet, le concepteur doit offrir un espace intérieur avec une température intérieure satisfaisante et qui peut offrir un confort pour la majorité des occupants et adéquate avec les activités exercées à l'intérieur de cet espace. Il doit non-seulement offrir un lieu défini par une température moyenne acceptable, mais aussi il doit agir pour garantir une répartition homogène et symétrique et éviter ainsi, les gradients de températures importants à l'intérieur de l'espace. Le concepteur doit d'offrir aussi à la fin d'un projet architectural un lieu thermiquement confortable avec des surfaces ayant des températures uniformes et qui doivent être ni très chaudes ni très froides.

Des moyens d'aides à la conception assistée par ordinateur (CAO) peuvent être exploités dans le but de prévoir les confort à l'intérieur des espaces, tels-que, le confort visuel, acoustique, thermique, etc. Ces moyens permettent aux concepteurs de prendre les bonnes décisions afin d'offrir à la fin d'un projet architectural des lieux ou des espaces confortables et qui peuvent répondre aux attentes des occupants. Ils permettent aussi de prédire l'influence de plusieurs paramètres liés aux confort offerts. Ainsi de procéder et avant même de commencer à la conception d'un projet architectural, à modifier certains paramètres, tels que, les orientations, les ouvertures, les matériaux adoptés, l'isolation thermiques, acoustiques, etc. dans le but est d'avoir un projet avec un meilleur confort et qui répond aux attentes, sans avoir recourt à des modifications, parfois très coûteuses, au cours de la conception d'un projet, voir même à la fin d'un projet architectural. Ces moyens peuvent être utilisés aussi dans le but d'examiner ou d'inspecter la qualité du confort offert par un projet architectural déjà réalisé, ainsi de proposer des recommandations qui peuvent améliorer la qualité du confort à l'intérieur. Dans ce contexte, nous avons développé dans le cadre de ce travail de recherche, un outil d'aide aux concepteurs, appliqué principalement à la modélisation tridimensionnelle des phénomènes thermiques dans une classe, située dans la ville de Biskra. Cet outil est conçu à partir d'un modèle mathématique et numérique tridimensionnel où la méthode des volumes finis dans sa version tridimensionnelle est adoptée pour résoudre un système d'équations différentielles composées principalement par l'équation de diffusion de la chaleur est les équations différentielles qui traduisent l'ensemble des échanges thermiques entre la salle de classe et l'environnement extérieur, en particulier, entre les ouvertures de la salle de classe et l'air environnemental. Cet outil peut prévoir la qualité du confort thermique pour n'importe quelle journée de l'année et à tout instants, par le calcul tridimensionnel de la température à l'intérieur des salles de classe en tenant en compte, l'influence de plusieurs phénomènes et de plusieurs paramètres tels-que :

- Les échanges thermiques par conduction et par convection.
- Les propriétés thermiques des matériaux adoptés dans la conception du projet et leurs influences sur la répartition de la température.
- Les modes de transfert de chaleur depuis l'extérieur vers l'intérieur des espaces en passant par l'air séparant les croissants.
- Les couches minces qui présentent les couches des enduits où même celles qui présentent les couches de crépissage ont été prisent en compte, celles-ci influent

sur le profil de la température intérieure et ainsi, sur la qualité du confort thermique.

- Prendre en considération l'influence des parois, du sol et l'ensemble des surfaces de l'enveloppe de la salle de classe.

L'outil numérique développé est conçu à partir d'un modèle mathématique et numérique tridimensionnel implémenté sous environnement MATLAB. Celui-ci reflète d'une manière satisfaisante la répartition spatiale de la température à l'intérieur d'un espace architectural comparé à un modèle bidimensionnel ou monodimensionnel, en particulier si celle-ci est répartie d'une manière non-homogène. Ceci présente un grand avantage du code développé car il permet de donner une vision prédictive sur le profil spatial de la température et ainsi de prédire si celle-ci peut être satisfaisante non seulement par rapports aux valeurs, mais aussi, par rapports aux gradients des températures qui peuvent apparaître à l'intérieur d'un espace et qui peuvent présenter des inconvénients majeurs sur le confort thermique. L'outil développé peut prendre en considération les conditions climatiques de n'importe quelle ville. Dans le cadre de ce travail, nous avons intégré les données climatiques de la ville de Biskra. Définie comme étant une ville aride est caractérisée par trois saisons différentes, qui sont respectivement, une saison des pluies et deux saisons sèches, une relativement fraîche et l'autre chaude avec des températures journalières qui peuvent atteindre 35°C à 45°C, de plus, la ville de Biskra est caractérisé par un climat où la température journalière subit des fluctuations importantes où elle peut atteindre 37°C dans la journée et 20°C dans la nuit de la même journée.

V.1. RESULTATS DES SIMULATIONS (PARTIE THERMIQUE) :

Nous présentons dans cette partie les résultats des simulations de la répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur d'une salle de classe. Cette présentation a pour objectif, d'inspecter la qualité du confort thermique des salles de classes d'une part et de présenter l'influence de certains éléments liés à la conception, principalement les dimensions des ouvertures, sur les performances thermiques et d'étudier ainsi, la possibilité d'améliorer ces performances en agissant sur les dimensions des ouvertures, voir d'autres éléments liés à la conception. Les résultats à caractère thermique seront largement présentés pour une salle de classe ayant sept fenêtres. Plusieurs tests de simulation seront présentés selon l'emplacement

de la salle de classe, où elle sera placée dans un premier temps dans un endroit isolé des autres salles puis elle sera placée aux voisinages des autres salles de classes. Dans les résultats présentés, nous allons considérer que le flux de chaleur échangé entre l'intérieur et l'extérieur de la salle est orienté dans les deux sens. Ceci dépendra du gradient de la température et des conditions initiales imposées dans nos simulations. La température extérieure est fixée à une valeur bien déterminée selon les conditions climatiques dépendant du jour et de l'heure de la simulation.

Dans les résultats présentés, nous avons essayé de rapprocher au mieux les cas tests des simulations présentées à des cas réels représentant au mieux le comportement thermique réel des salles de classe. Pour cela, nous avons pris en considération la composition réelle des parois constituant l'enveloppe de la salle de classe. Pour les parois latérales (Fig.V.1), elles sont supposées être composées essentiellement de cinq parois qui sont respectivement, deux murs en brique, une couche d'air séparant les deux murs et enfin deux couches superficielles, une à l'extérieur considérée comme une couche de crépissage supposé en ciment et une couche intérieure considérée comme une couche d'enduit supposée en plâtre. Le sol est considéré comme étant une plate forme conçue à partir de la couche de béton au dessus de laquelle on trouve une couche de céramique. Le plafond qui couvre la partie supérieure de la salle est supposé être composé d'une dalle en béton et une couche en plâtre en dessous de la dalle. Les propriétés géométriques et physiques du problème à traiter sont résumées dans le Tab.V.1. Il résume l'ensemble des paramètres géométriques et thermiques des différentes couches des parois qui sont respectivement : la chaleur massique, la masse volumique, la conductivité thermique et enfin le coefficient de convection. Les résultats thermiques sont présentés pour les journées du 21 Mars, 21 Juin et enfin pour le 21 Décembre, respectivement à 10H et à 14H. Les températures extérieures pour ces journées sont présentées dans la Fig.V.2. Pour la résolution du problème thermique nous avons adopté un maillage cartésien conçu à partir des volumes de forme hexaédrique, le maillage adopté est non-uniforme et il est caractérisé par une densité qui varie d'une couche à une autre et d'une zone à une autre. Dans le but de traiter le problème fortement non-linéaire en particulier dans les zones séparant l'extérieur de l'intérieur où la température varie considérablement, nous avons adopté un maillage très raffiné. Les flux de chaleur échangés sont calculés via les interfaces des volumes du maillage adopté, où chaque volume élémentaire composé d'un nœud principal P, intègre les propriétés thermiques selon chaque domaine considéré.

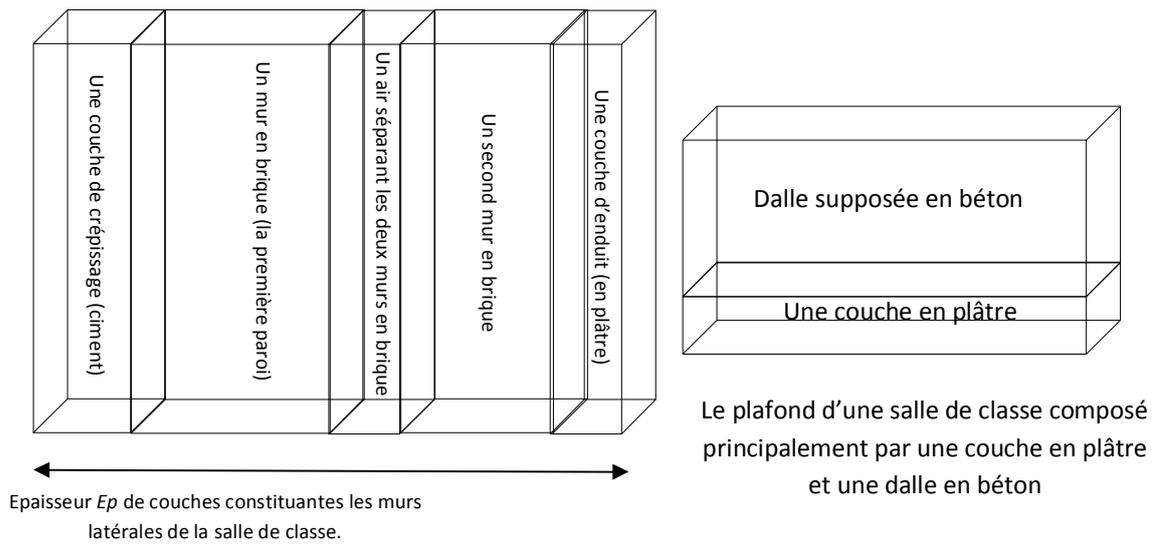


Fig.V.1. la composition des murs latéraux et le plafond d'une salle de classe.

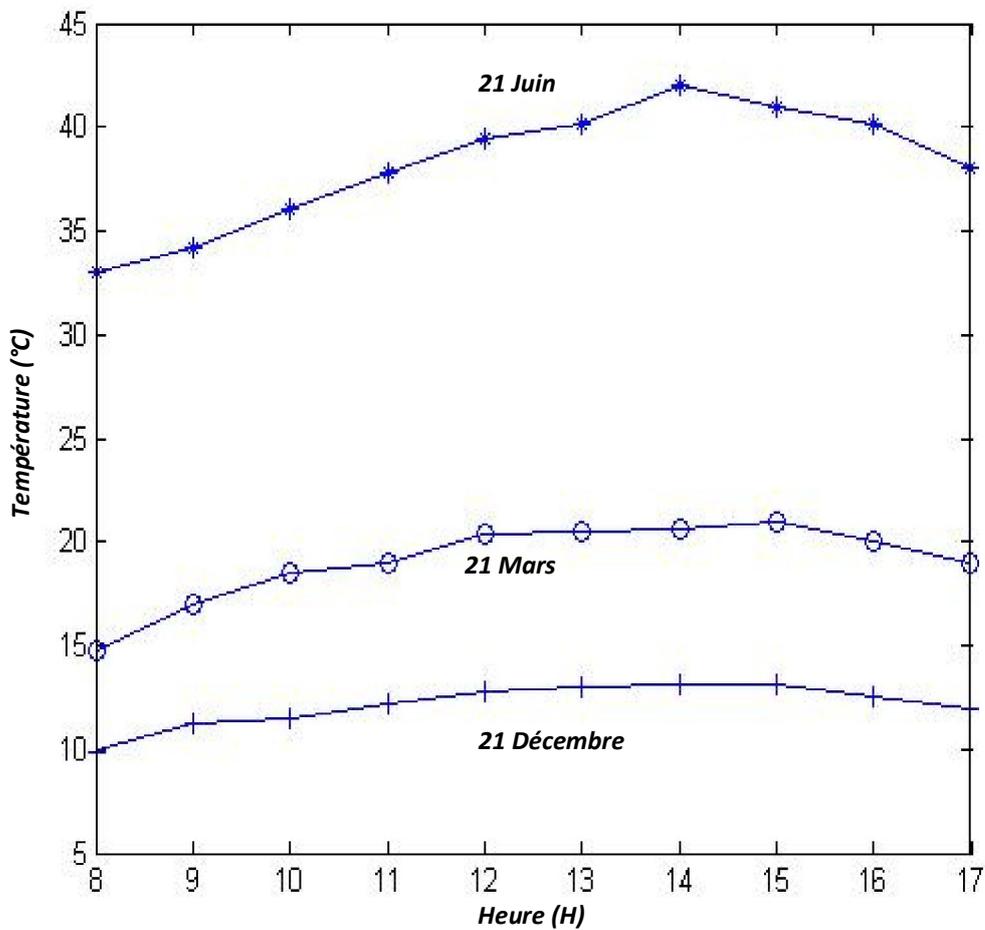


Fig.V.2. Températures extérieures pour les journées du 21 Mars, 21 Juin et le 21 Décembre.

Tab.V.1. Paramètres géométriques et thermiques du problème thermique à modéliser :

Paramètres géométriques et thermiques des couches constituant l'enveloppe de la salle de classe :					
Les murs en brique					
Epaisseur du premier mur $E_p = 15 \text{ cm}$	Epaisseur du second mur $E_p = 10 \text{ cm}$	Chaleur massique $C_p = 1000 \text{ J/(Kg.k)}$	Masse volumique $\rho = 800 \text{ (Kg.m}^3\text{)}$	Conductivité thermique $k=0.5 \text{ W/(m.K)}$	Coefficient de convection $h = 10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
Air séparant les deux murs en brique					
Epaisseur $E_p = 5 \text{ cm}$	Chaleur massique $C_p = 1004 \text{ J/(Kg.k)}$		Masse volumique $\rho = 1.16 \text{ (Kg.m}^3\text{)}$	Conductivité thermique $k=0.024 \text{ W/(m.K)}$	
Couche d'enduit supposée en plâtre					
Epaisseur $E_p = 1 \text{ cm}$	Chaleur massique $C_p = 1000 \text{ J/(Kg.k)}$		Masse volumique $\rho = 1300 \text{ (Kg.m}^3\text{)}$	Conductivité thermique $k=0.52 \text{ W/(m.K)}$	
Couche de crépissage (Mortier en ciment)					
Epaisseur $E_p = 1 \text{ cm}$	Chaleur massique $C_p = 1000 \text{ J/(Kg.k)}$		Masse volumique $\rho = 1900 \text{ (Kg.m}^3\text{)}$	Conductivité thermique $k=1.5 \text{ W/(m.K)}$	
La dalle supposée en béton					
Epaisseur $E_p = 15 \text{ cm}$	Chaleur massique $C_p = 1000 \text{ J/(Kg.k)}$		Masse volumique $\rho = 2400 \text{ (Kg.m}^3\text{)}$	Conductivité thermique $k=1.70 \text{ W/(m.K)}$	
Vitrage					
Epaisseur $E_p = 1 \text{ cm}$	Chaleur massique $C_p = 750 \text{ J/(Kg.k)}$		Masse volumique $\rho = 2500 \text{ (Kg.m}^3\text{)}$	Conductivité thermique $k=1 \text{ W/(m.K)}$	
Propriétés géométriques de la salle de classe					
Dimensions des fenêtres : $L_y \times L_z \text{ (m}^2\text{)} = 1 \times 1.2$			Dimension de la salle de classe : $L_x \times L_y \times L_z \text{ (m}^3\text{)} = 9 \times 9 \times 3.5$		
Propriétés géométriques de la boîte d'air limitant le domaine du calcul :					
$L_x \times L_y \times L_z \text{ (m}^3\text{)} = 10.14 \times 10.64 \times 4.93$					
Propriétés du maillage adopté					
Nombre totale des volumes élémentaires adopté pour le maillage du problème thermique : $94 \times 194 \times 88 = 1604768$ volumes, Nombre des volumes élémentaires à l'intérieur de la salle de classe : 1112832 volumes élémentaires, Nombre des volumes élémentaires aux parois de la salle de classe : 142848 volumes, Nombre des volumes élémentaires utilisé pour discrétiser une fenêtre : 96 volumes élémentaires,					

V.1.1. RESULTATS DES SIMULATION POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT SEPT FENETRES REPARTIE SUR UNE SEULE FAÇADE DURANT UNE PERIODE FROIDE :

Afin de prendre en considération la variation de la température en particulier entre le milieu extérieur et intérieur caractérisé par un problème fortement non-linéaire, nous avons raffiné le maillage (Fig.V.3) à l'intérieur de la salle de classe, principalement dans les zones où l'échange thermique est très important comme les parois de la salle de classe considérées comme le lieu d'échange thermique le plus important. Le maillage adopté est composé de 1112832 volumes élémentaires à l'intérieur de la salle dont 142848 volumes élémentaires utilisés pour discrétiser le problème thermique aux parois de la salle de classe.

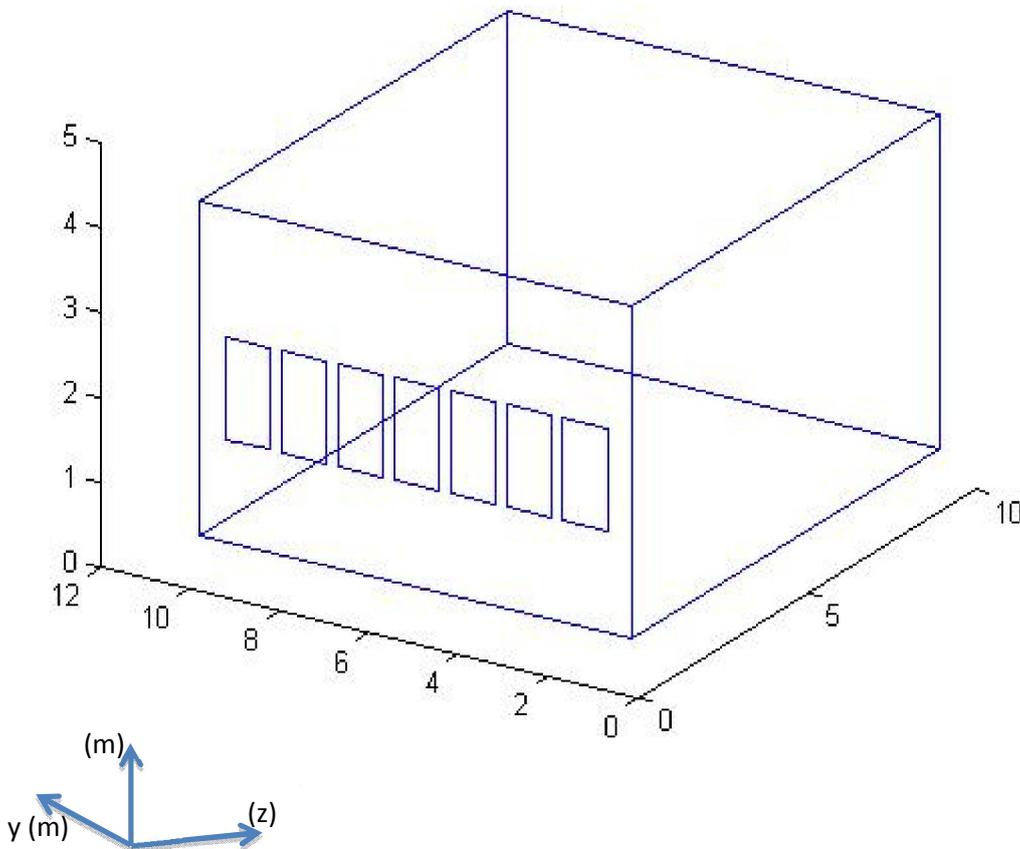


Fig.V.3.a. Vue tridimensionnelle de la salle de classe à modélisé.

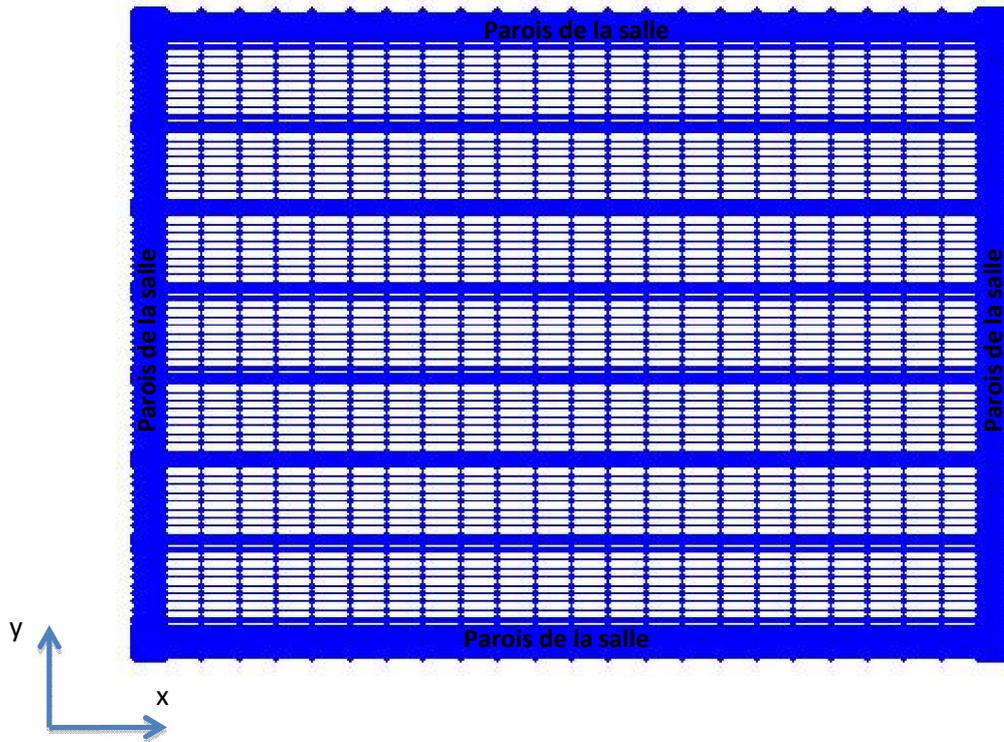


Fig.V.3.b. Le maillage adopté à l'intérieur.

Les figures Fig.V.4-7 représentent la répartition tridimensionnelle et bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant sept fenêtres, répartie sur une seule façade, pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h et pour un flux de chaleur orienté soit de l'extérieur vers l'intérieur ou de l'intérieur vers l'extérieur. Dans nos simulations et pour imposer le sens de l'orientation du flux de chaleur, on impose un gradient de température positive ou négative selon la valeur de la température initiale imposée à l'intérieur de la salle de classe, cela pour pouvoir étudier les deux types d'échanges possible, soit de l'extérieur vers l'intérieur ou de l'intérieur vers l'extérieur. Pour la journée du 21 Décembre où la température extérieure avoisine les 10°C, nous avons imposé une température intérieur initiale de 4°C afin d'avoir un flux de chaleur orienté de l'extérieur vers l'intérieur et de 28°C pour imposer un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur. Ceci pour étudier le taux d'échange entre l'intérieur et l'extérieur et de montrer ainsi, le degré de la dissipation de la chaleur intérieure dans ces conditions climatiques caractérisées par une période froide.

Pour la température extérieure, elle est supposée uniforme et elle est imposée selon le jour et l'heure de la simulation. Le transfert de chaleur entre les milieux est supposé dû essentiellement à la conduction et à la convection.

Selon les résultats présentés dans les figures Fig.V.4-7 on constate que :

- Dans le cas où nous avons supposé un flux de chaleur orienté de l'extérieur vers l'intérieur, (le cas où nous avons supposé que la température initiale à l'intérieur est de 4°C), la température intérieure atteint des valeurs comprises entre 10°C et 13°C dans un temps proche d'une heure. Dans le second cas où nous avons supposé un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur (température initiale à l'intérieur est maintenue à 28°C), la température intérieure atteint des valeurs comprises entre 11°C et 16°C dans un temps estimé à une heure.
- L'échange thermique entre les milieux, extérieur et intérieur, est très important, via les parois constituant l'enveloppe de la salle de classe, en particulier au niveau de la façade portant les fenêtres. Cet échange thermique a modifié considérablement la température intérieure de la salle de classe en particulier dans les zones voisines aux fenêtres comme le présentent dans les figures Fig.V.5 et Fig.V.7. où nous avons enregistré un fort échange thermique au plan intermédiaire situé au centre du plan portant les fenêtres de la salle de classe.
- Pour la journée du 21 Décembre caractérisée par des températures basses durant toute la journée (Autour de 10 °C, Fig.V.2), nécessitant ainsi des moyens de chauffage pour augmenter la température intérieure, offrant ainsi un confort thermique aux apprenants, dans ce cas, il devient très intéressant de limiter l'échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur, afin de préserver des températures élevées à l'intérieur de la salle. Dans ces conditions, les parois de la salle de classe, en particulier les fenêtres de la salle présentent un inconvénient majeur qui consiste à renforcer l'échange thermique, par conduction et par convection, entre l'intérieur et l'extérieur de la salle contribuant ainsi à la diminution de la température intérieure.
- Vu l'importance d'échanges thermiques entre les milieux extérieurs et intérieurs, le coût du chauffage sera important.

- L'apparition d'un gradient de température important à l'intérieur de la salle de classe sur le plan horizontal de la salle de classe (le plan X-Y de la salle). Ceci peut être constaté selon le profil de la température présenté dans les figures Fig.V.5 et Fig.V.7.

Le confort thermique est très dépendant de la répartition spatiale de la température, celle-ci doit être uniforme à l'intérieur d'un espace pour offrir aux occupants un meilleur confort. Les occupants d'un espace doivent ressentir la même température. Celle-ci doit conservée les mêmes valeurs en particulier dans les zones inférieures proches du sol et proche des parois de la salle de classe. Dans ce contexte et dans le but d'inspecter l'homogénéité de la température à l'intérieur d'une salle de classe, nous avons mené une étude qualitative du gradient de la température qui apparait sur le plan horizontal de la salle de classe. Les résultats des simulations du gradient de la température sont présentés dans les figures Fig.V.8 et Fig.V.9. Ces derniers représentent la répartition bidimensionnelle du gradient de la température sur différents plans horizontaux pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté respectivement de l'extérieur vers l'intérieur et de l'intérieur vers l'extérieur. Selon ces résultats, on constate que le gradient de la température intérieure aux plans situés respectivement, en dessous, au centre et au dessus de la fenêtre atteint un maximum de 2°C, 3°C et 2°C dans le cas d'un échange thermique orienté vers l'intérieur et de 2.7°C, 3.6°C et 3.6°C dans le cas d'un échange thermique orienté vers l'extérieur. En plus des parois latérales, le sol et le plafond de la salle de classe contribuent aussi à l'échange thermique entre l'extérieur et l'intérieur, ils contribuent ainsi à la diminution de la température de la salle de classe et contribuent aussi à l'augmentation des gradients de la température. Il est intéressant alors de présenter le profil de la température selon des plans verticaux (le plan X-Z de la salle).

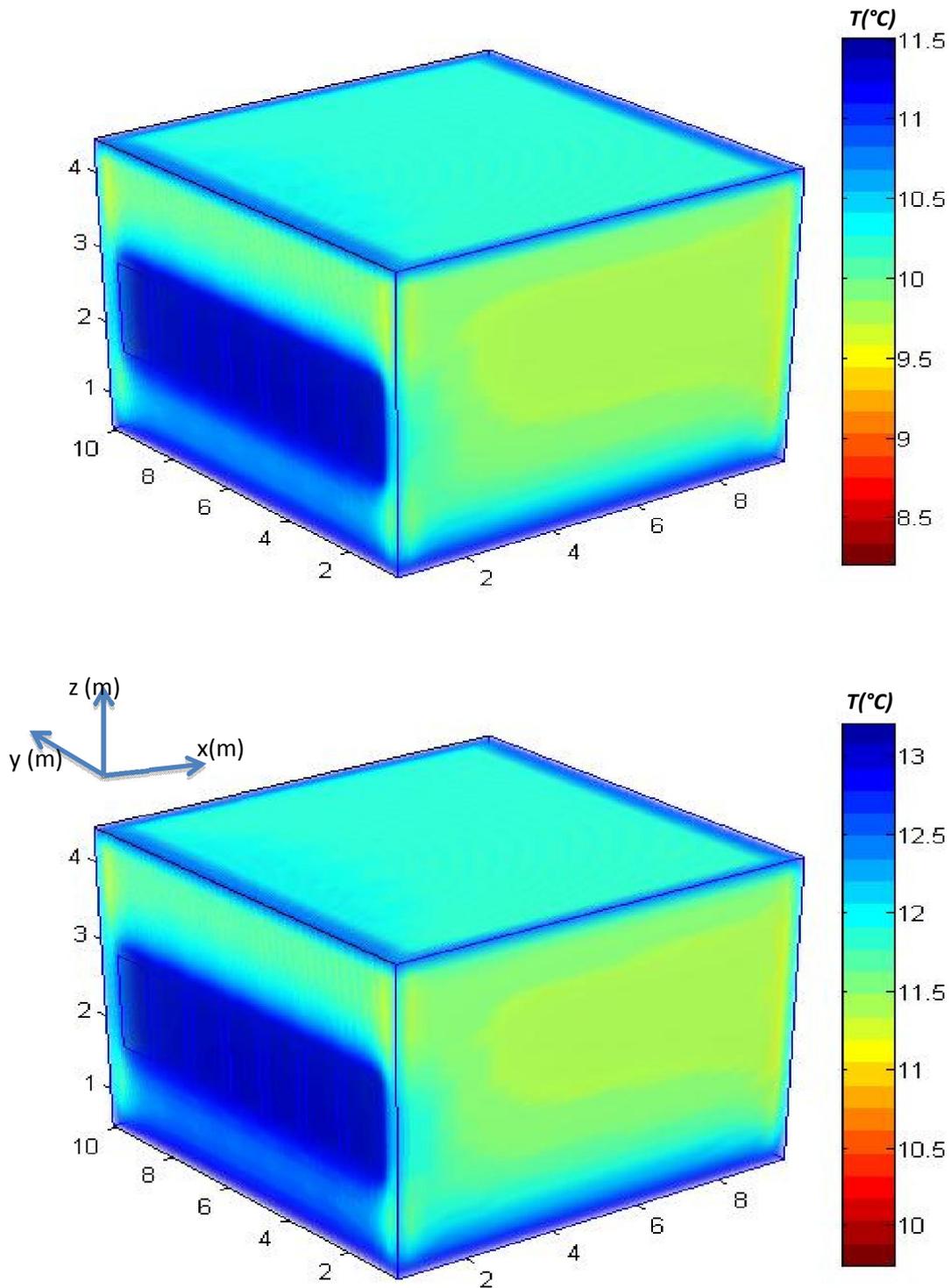


Fig.V.4. Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant 7 fenêtres pour la journée du 21 Décembre respectivement à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'extérieur vers l'intérieur.

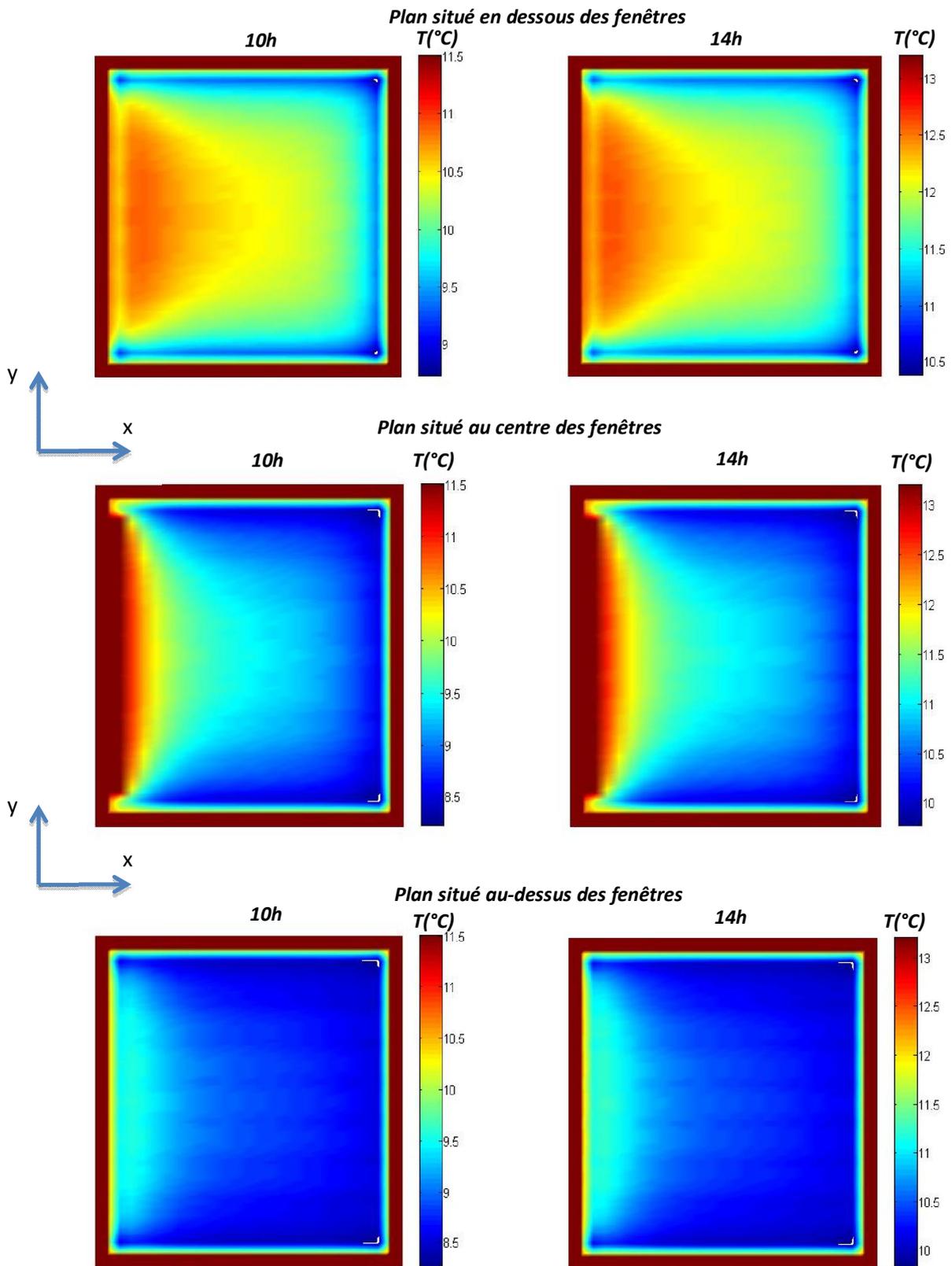


Fig.V.5. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'extérieur vers l'intérieur.

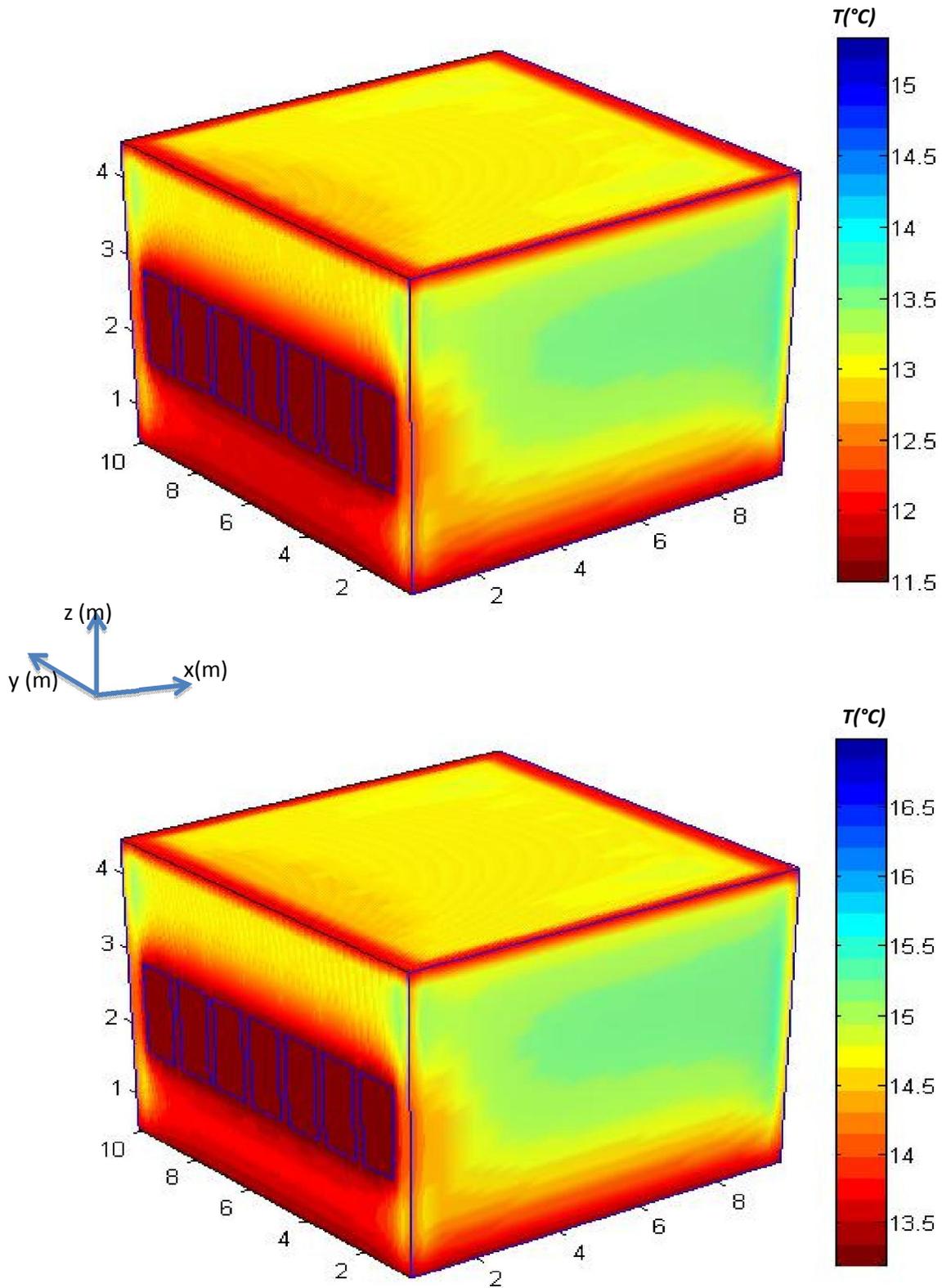


Fig.V.6. Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant 7 fenêtres pour la journée du 21 Décembre respectivement à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

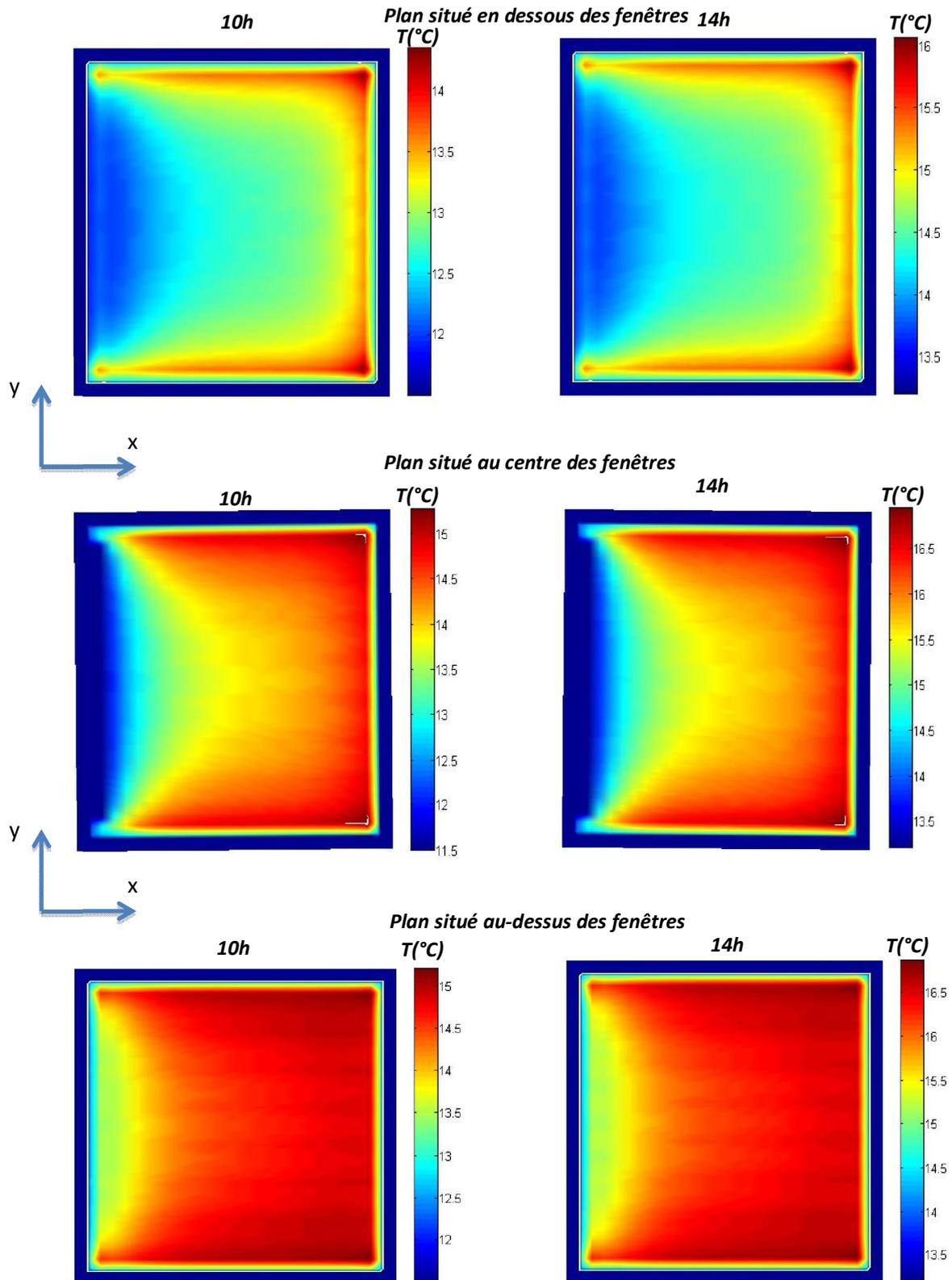


Fig.V.7. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

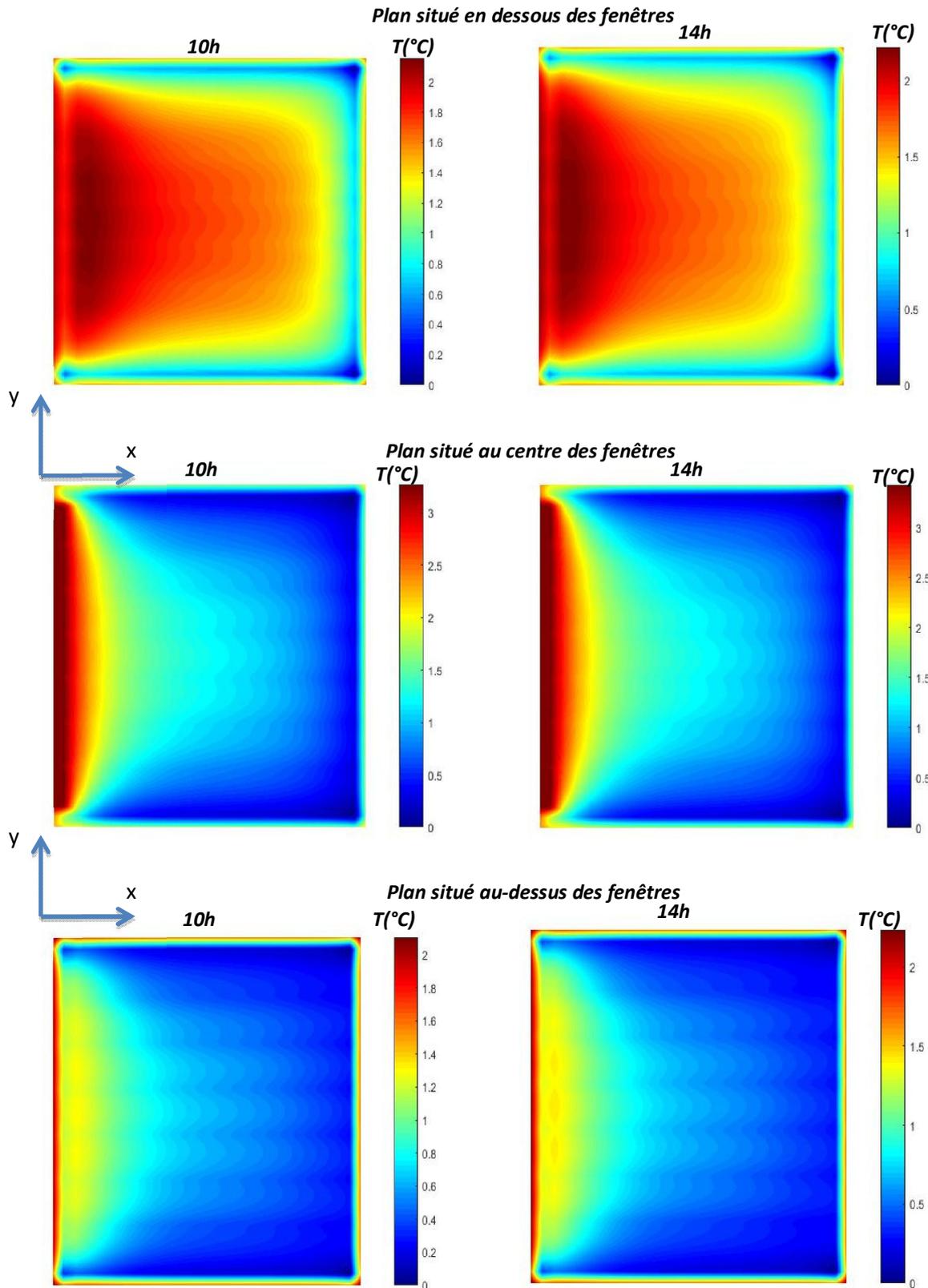


Fig.V.8. Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'extérieur vers l'intérieur.

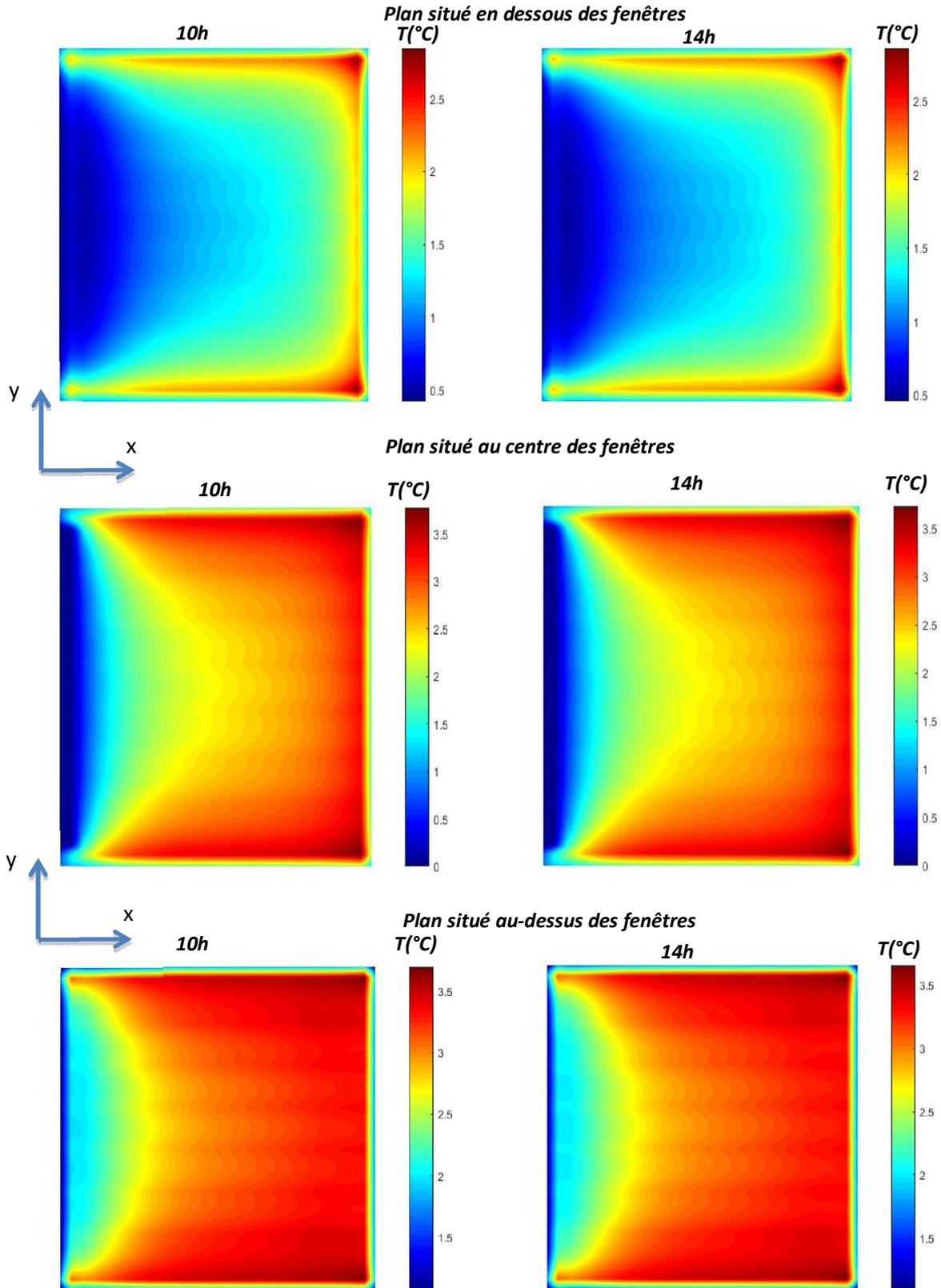


Fig.V.9. Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

Pour étudier le profil de la température sur le plan vertical, nous avons présenté sur la Fig.V.10. La répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe sur le plan (X-Z) à trois positions différentes selon Y. Selon le profil de la température présenté, on peut dire que la température croît en allant du plan inférieur vers le plan supérieur où elle devient plus élevée. Sur l'ensemble des plans spatiaux présentés (le plan X-Z), le gradient de la température atteint la valeur de 3°C.

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés en particulier à l'étude des paramètres qui peuvent affecter le confort thermique en particulier, les ouvertures de la salle de classe. Pour présenter une étude qualitative et qui donne une meilleure vision sur l'influence des ouvertures sur le confort thermique en diminuant la température intérieure, durant cette période caractérisée par des températures basses. Aussi de présenter leurs influences sur la répartition spatiale de la température, nous avons fait une comparaison entre le comportement thermique de la salle de classe présenté précédemment, c'est-à-dire celle qui intègre sept fenêtres dans une seule façade et une autre, ayant les mêmes propriétés physiques et géométriques cependant elle ne possède aucune fenêtre. Le but est de présenter les différences entre les deux salles, ainsi de déduire l'effet lié aux fenêtres. Les résultats de comparaison sont présentés sur les figures, Fig.V.11-13, selon les résultats présentés, on peut dire que :

- Le profil de la température dans la salle de classe n'ayant pas de fenêtre est plus homogène à celle dotée de fenêtres où le gradient de température est plus important, en particulier au voisinage de la façade portant les fenêtres.
- La Fig.V.13 présente la différence entre la répartition spatiale de la température d'une salle de classe n'ayant pas de fenêtres et une autre ayant les mêmes propriétés à la différence d'avoir sept fenêtres réparties sur une seule façade. Les plans de températures présentés sont ceux situés respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10 h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur de la salle vers l'extérieur. Selon ces résultats, on constate que le maximum de la différence entre températures des deux salles atteint un maximum de 3°C dans le plan central des fenêtres. Sur les plans situés en dessous et au-dessus des fenêtres, le maximum de différence entre températures des deux salles atteint respectivement les températures de 1.1 °C et 0.9 °C.

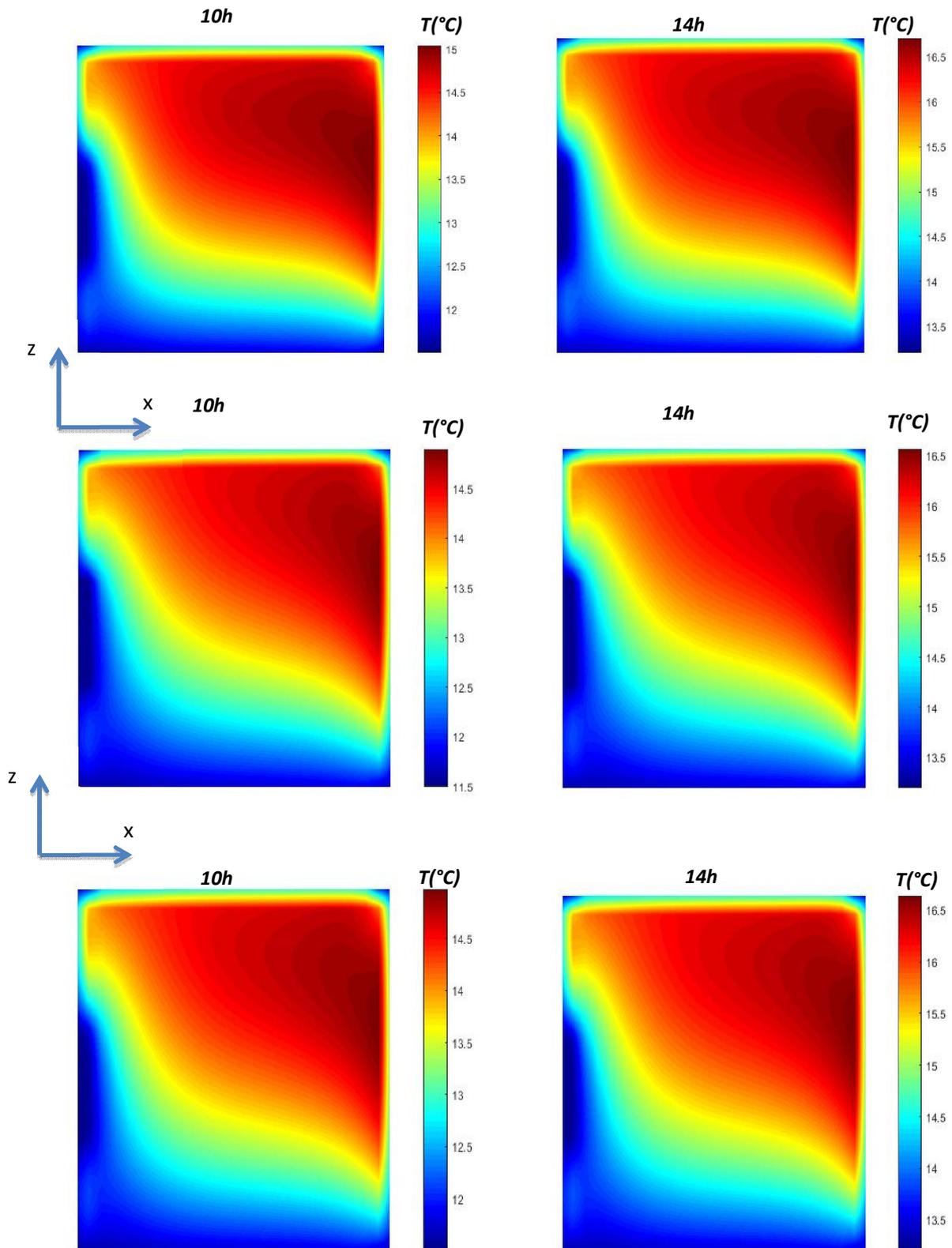


Fig.V.10. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan (X-Z) à des différentes positions (y) pour la journée du 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

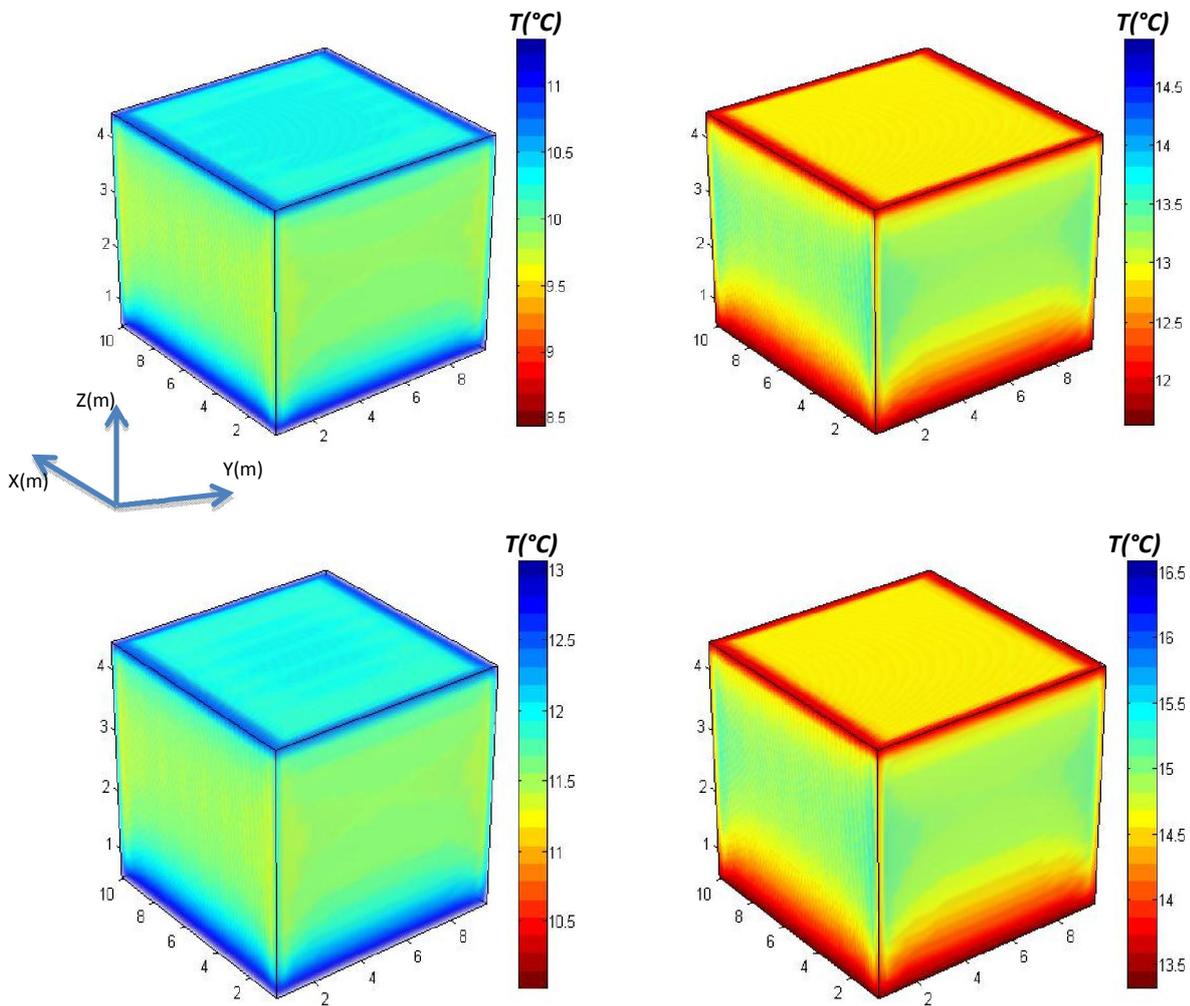


Fig.V.11. Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe sans fenêtres pour la journée du 21 Décembre respectivement à 10h et à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur et de l'extérieur vers l'intérieur.

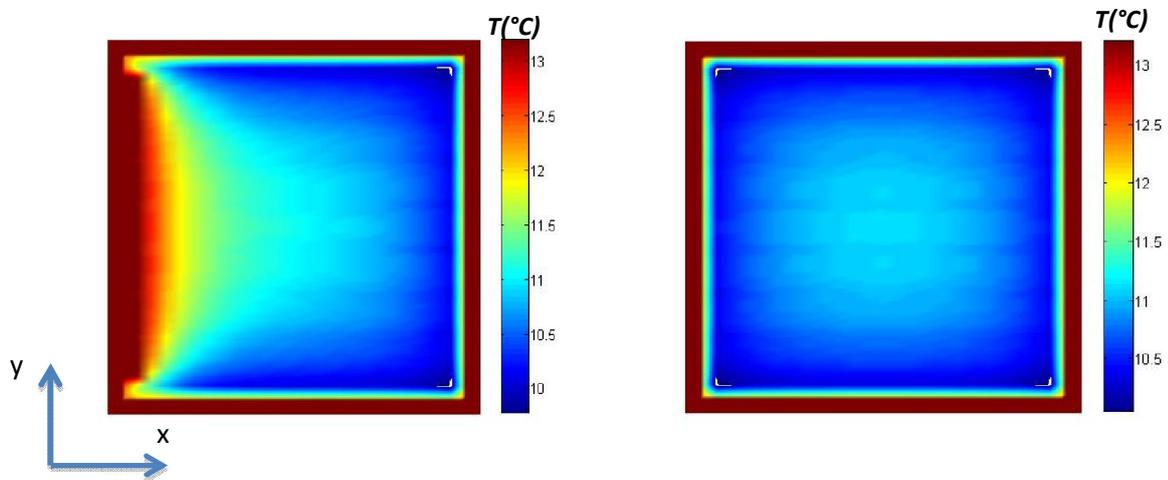


Fig. v. 12. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle au centre des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur, pour une salle respectivement, avec et sans fenêtres.

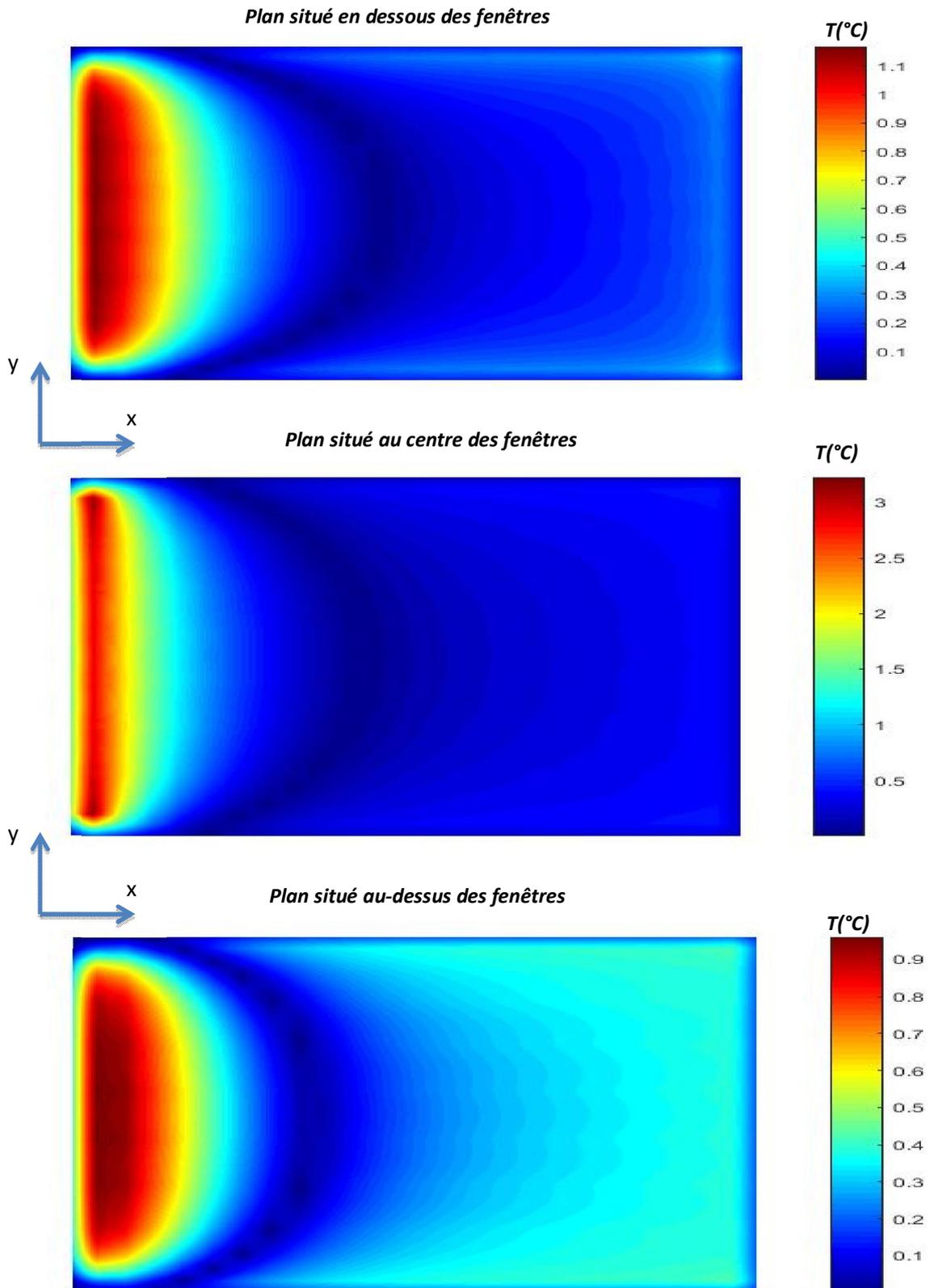


Fig.V.13. Différence entre température d'une salle de classe n'ayant pas de fenêtres et autre doté de sept fenêtres réparties sur une seul façade, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 10h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

Pour la journée du 21 décembre et pour compléter l'étude comparative entre les deux salles présentées précédemment, nous avons calculé les valeurs moyennes de la température à chaque niveau z à 10h et à 14h. Aussi, nous avons calculé les écarts de températures entre les deux salles, ceci dans le cas d'un flux de chaleur orienté respectivement de l'extérieur vers l'intérieur et de l'intérieur vers l'extérieur. Les résultats des simulations obtenus sont présentés au niveau des figures Fig.V.14 et Fig.V.15.

Selon les résultats présentés dans le Fig.V.14, on peut dire qu'il existe un faible écart entre les températures des deux salles. L'écart maximal entre les profils de la température atteint la valeur de 0.25°C sur une distance de $z = 1.75\text{ m}$. Cette valeur peut être considérée comme négligeable.

En conclusion, on peut dire que pour la journée du 21 Décembre, la conception actuelle ainsi que la disposition et les dimensions des fenêtres contribuent à l'apparition d'un gradient de température à l'intérieur d'une salle de classe avec une valeur maximale de 3°C . Cette présence n'affecte pas considérablement la valeur moyenne de la température où elle peut atteindre un maximum considéré comme négligeable avec une valeur qui varie entre $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$.

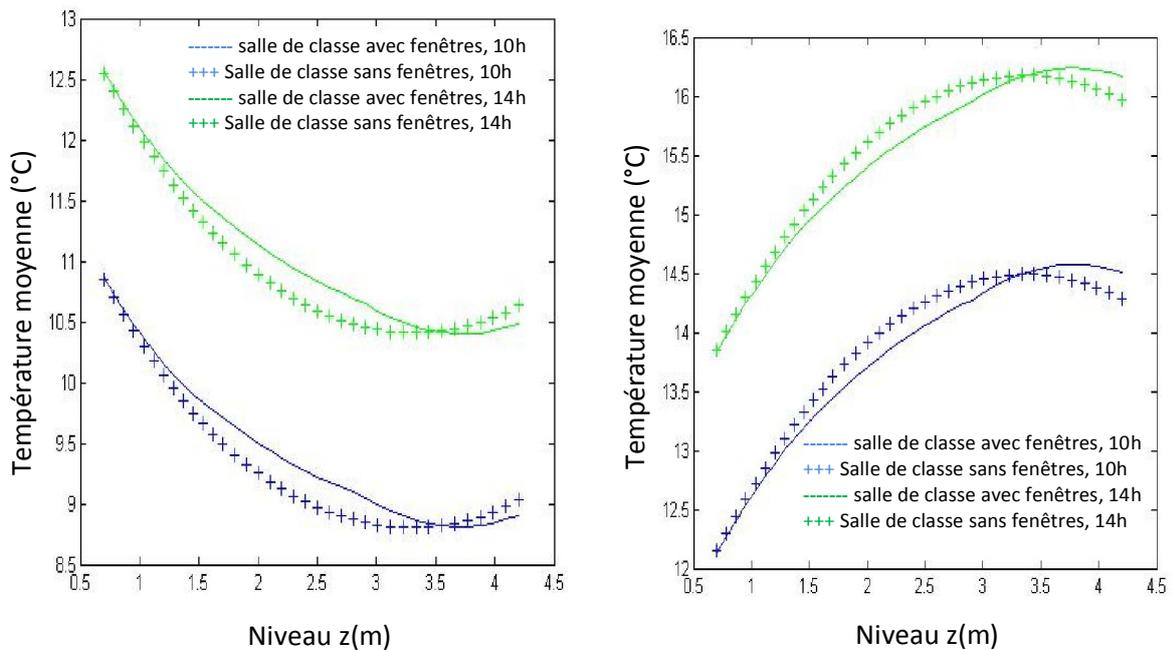


Fig.V.14. Profil de la température moyenne en fonction de la hauteur de la salle de classe (z) à 10h et à 14h pour une salle de classe avec et sans fenêtres et pour un flux de chaleur orienté respectivement de l'extérieur vers l'intérieur et de l'intérieur vers l'extérieur pour la journée du 21 Décembre.

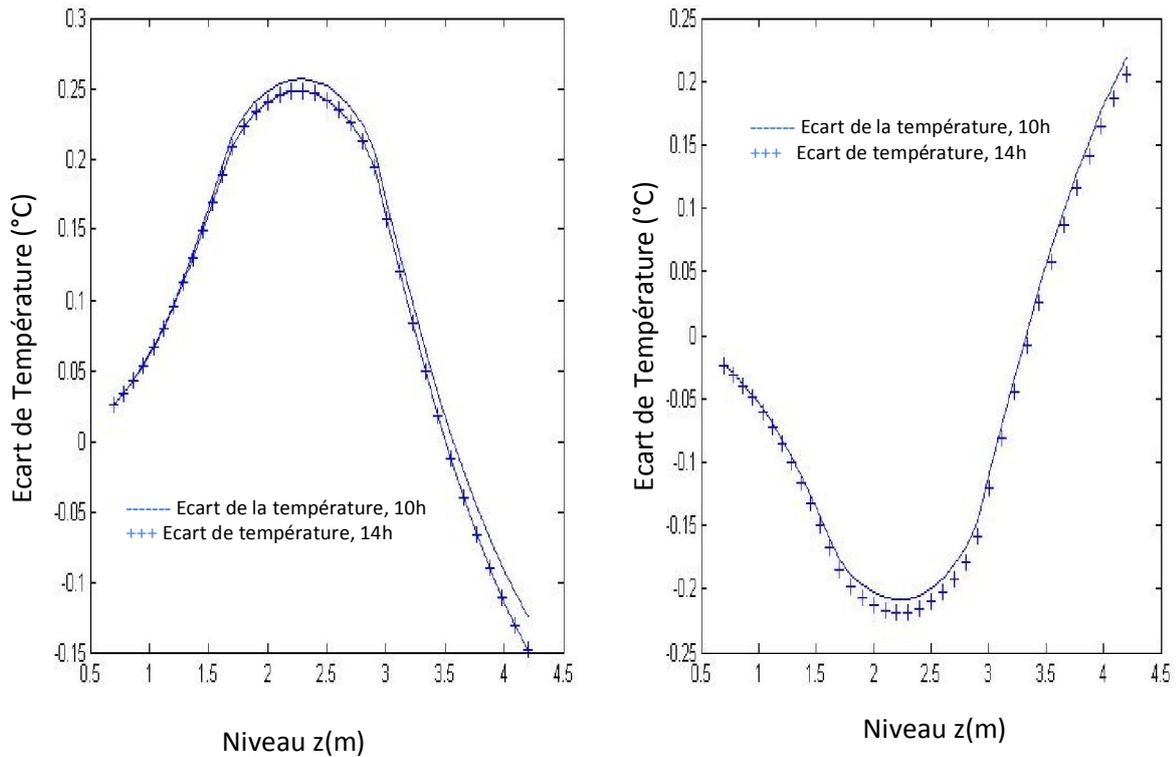


Fig.V.15. Ecart entre températures pour une salle de classe avec et sans fenêtres en fonction de la hauteur de la salle (z) à 10h et à 14h et pour un flux de chaleur orienté respectivement de l'extérieur vers l'intérieur et de l'intérieur vers l'extérieur pour la journée du 21 Décembre.

V.1.2. INFLUENCE DE L'EMPLACEMENT DE LA SALLE DE CLASSE SUR LE PROFIL DE LA TEMPERATURE INTERIEURE :

La conception des écoles existantes dans la ville de Biskra est caractérisée par plusieurs typologies où le regroupement des salles de classe diffère d'un établissement à un autre. Dans leurs formes générales, les salles de classes sont regroupées soit dans une seule rangée ou dans deux rangées séparées. A titre d'exemple, dans les CEMs '**MAHMOUD HOUHOU**' et '**H'LIMI RACHID**', les salles de classe sont regroupées en mono-rangée comme le montrent les figures, Fig.V.16-17. Dans d'autres typologies, comme par exemple les CEMs '**FRERES BARKET**' et '**GHAMRI HOCINE**', les salles de classe sont regroupées en deux rangées séparées par un couloir intermédiaire comme présentés dans le montrent les figures Fig.V.18-19. Dans ces typologies, le profil de la température peut être influencé par l'emplacement des salles. En effet, pour une salle de classe ayant un emplacement centrale ou intermédiaire dans un bloc mono-rangé ou dans un bloc à deux rangées, la température intérieure peut être influencée par la température intérieure des salles voisines. Pour cela nous avons présenté le

comportement thermique des salles de classes centrales où nous avons modélisé deux configurations possibles selon l'emplacement de la salle de classe et ainsi, selon les conditions aux limites imposées.

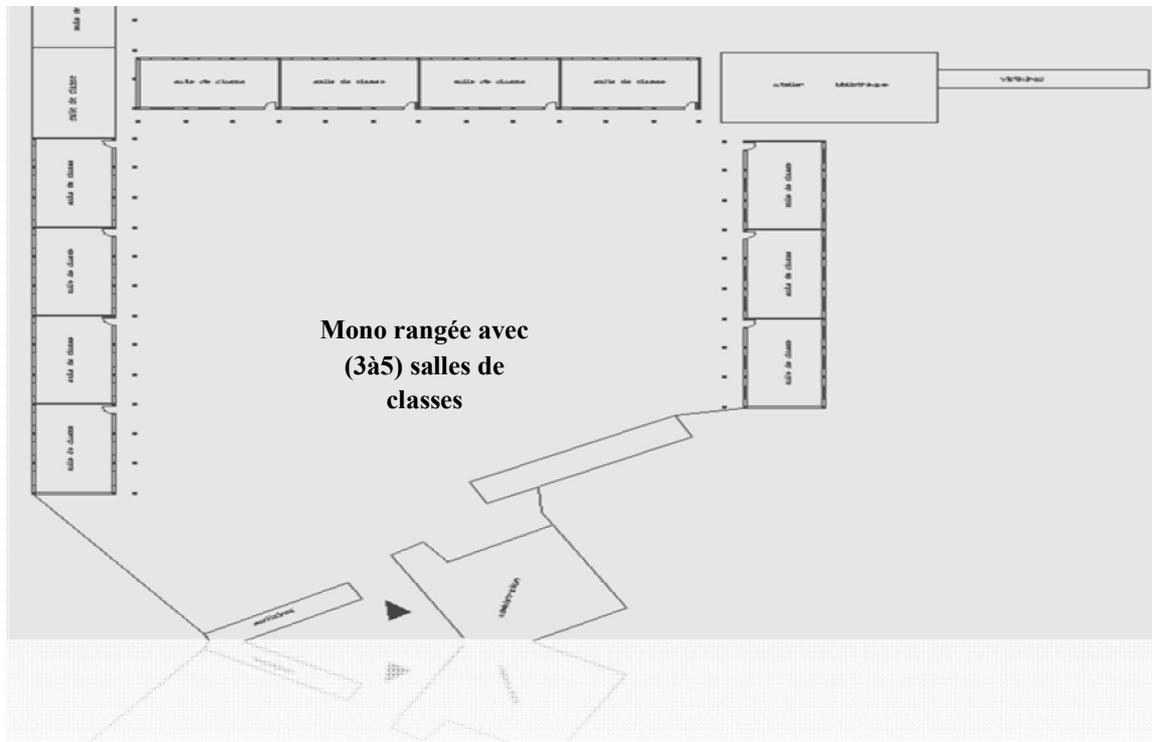


Fig.V.16. CEM MAHMOUD HOUHOU. Composé de 3 à salles répartie sur un bloc en Mono-rangée.

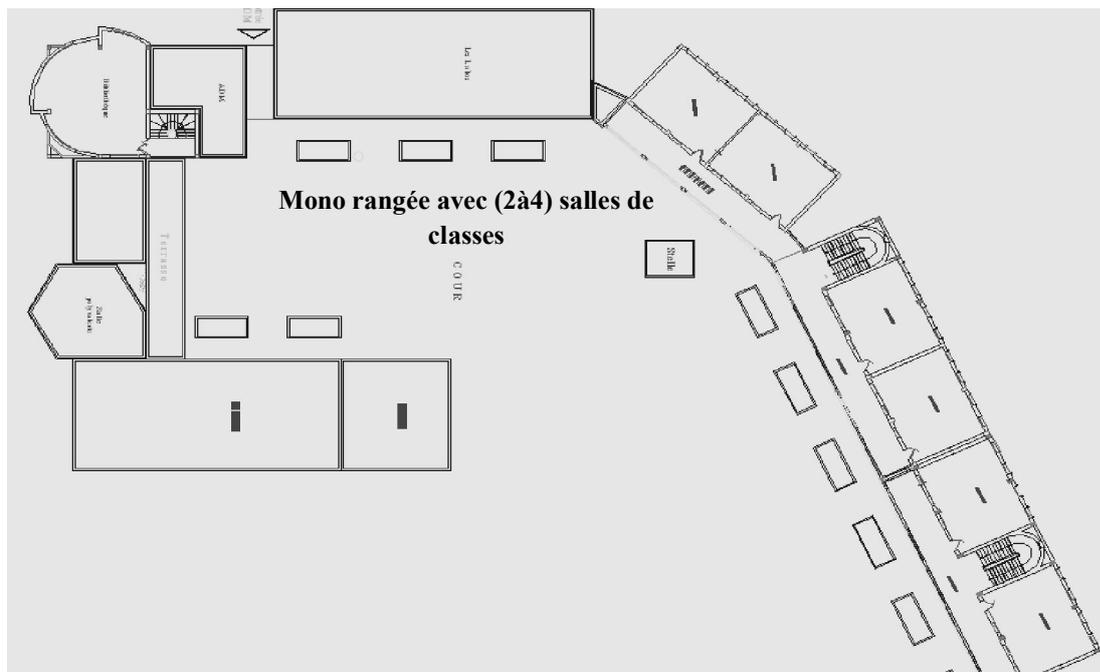


Fig.V.17. CEM HLIMI RACHID, les salles de classe sont regroupées en un seul bloc mono-rangée.

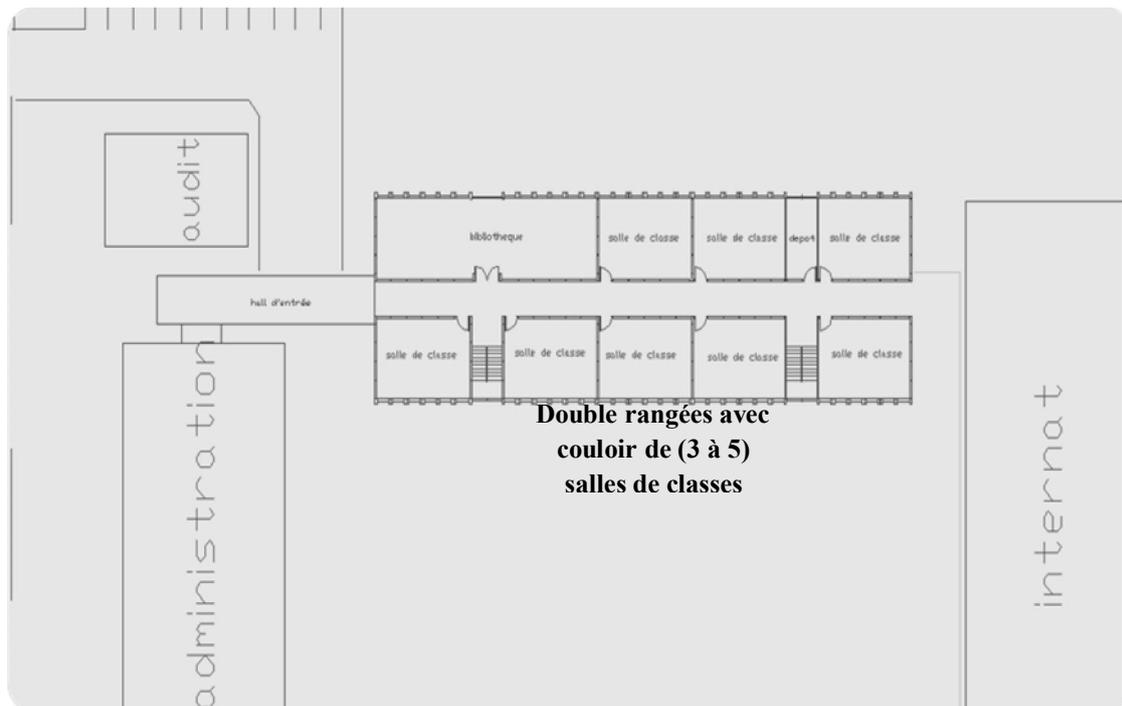


Fig.V.18. CEM 'FRERES BARKET', les salles de classes sont regroupées dans deux blocs séparés par un couloir, formant ainsi, une double rangée. Le premier bloc est composé de trois salles, le second est composé de cinq salles de classes.

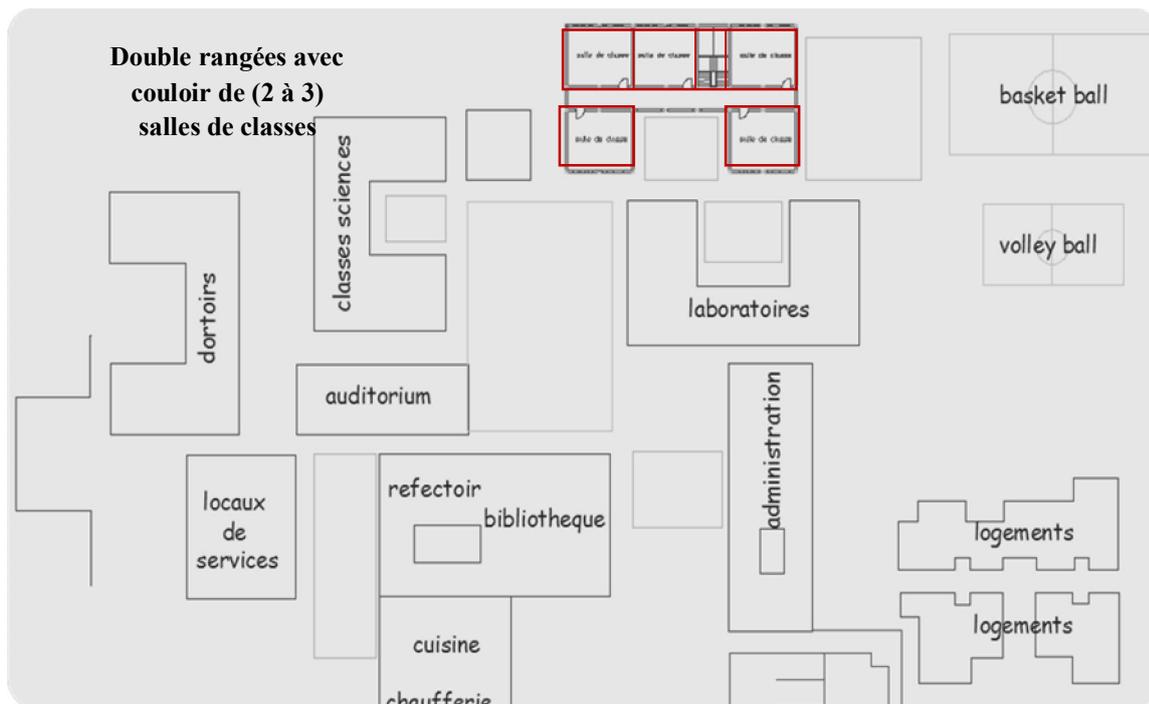


Fig.V.19. CEM 'GHAMRI HOCINE', les salles de classes sont regroupées en deux ou trois salles dans deux blocs séparés par un couloir intermédiaire.

V.1.2.1. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LA PREMIERE CONFIGURATION :

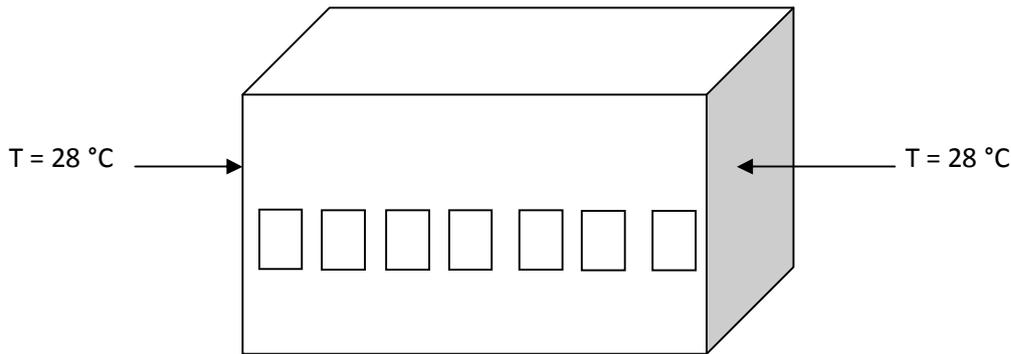


Fig.V.20. Les conditions aux limites pour la première configuration.

Dans cette configuration (Fig.V.20), nous avons considéré une salle de classe centrale où deux de ces parois seront influencées par la température des salles de classes voisines. Dans cette première configuration, nous avons imposé sur les parois de la salle de classe, une température constante prise égale à 28°C où nous avons considéré que les salles voisines sont réchauffées avec une température intérieure maintenue à une valeur constante de 28°C. Pour les façades principales, nous avons imposé une température extérieure égale à 13.2°C (celle qui correspond à 14H pour la journée du 21 Décembre). Nous avons traité cette configuration pour présenter des cas réels où la température intérieure de la salle de classe peut être influencée par son emplacement dans les blocs où elle est regroupée. Pour cette configuration, le profil bidimensionnel de la température à l'intérieur de la salle de classe, sur les plans situés respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h et pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur est présenté dans la Fig.V.21. Selon les résultats présentés, on peut dire que le profil de la température dépend de l'emplacement de la salle de classe par rapport aux salles voisines, celles-ci contribuent à l'apparition d'un fort gradient de température à l'intérieur de la salle de classe, où nous pouvons atteindre des températures de l'ordre de 22°C aux voisinage des surfaces mutuelles entre salles, alors que la température au centre de la salle varie entre 14°C et 17°C. On peut dire aussi que selon les caractéristiques thermiques de la salle de classe present, il existe une forte dissipation de la chaleur orientée de l'intérieur vers l'extérieur où la température durant cette période est très basse. En effet, la température initiale à l'intérieur de

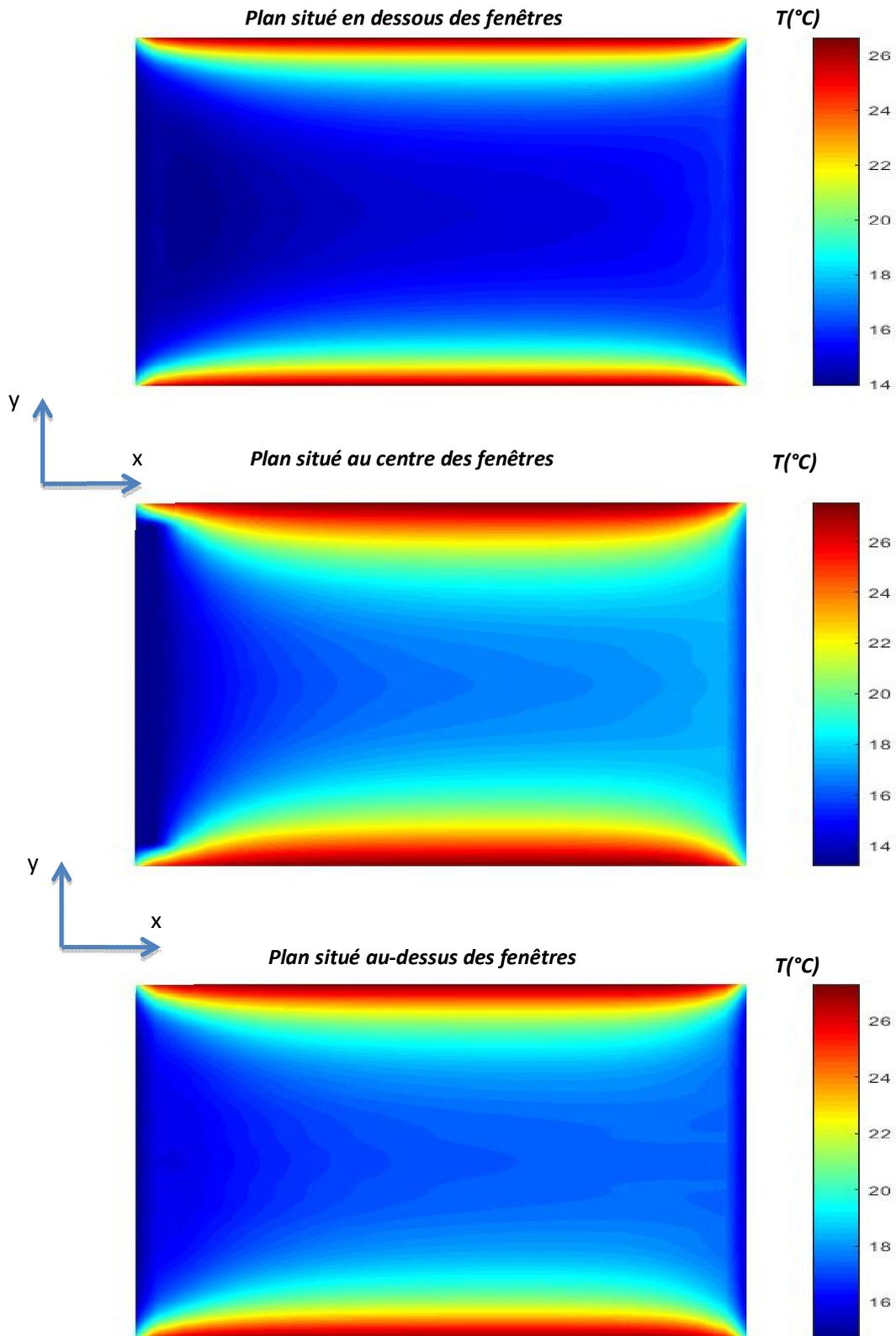


Fig.V.21. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur, les conditions aux limites sont celle présentées dans la **configuration 1**.

La salle a été maintenue à 28°C où elle sera abaissée dans un temps réduit. Ceci nécessite des moyens et un coût de chauffage élevé durant cette période.

V.1.2.2. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LA DEUXIEME CONFIGURATION :

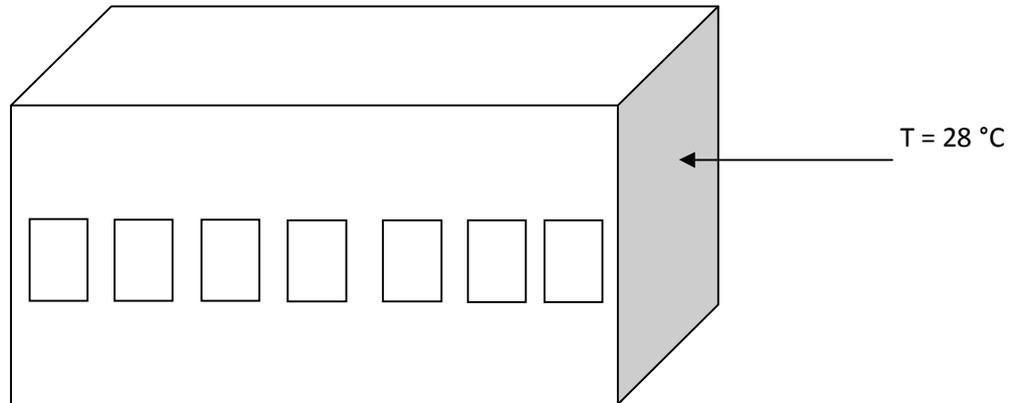


Fig.V.22. Les conditions aux limites pour la deuxième configuration.

Dans cette configuration, nous avons considéré que la salle de classe est placée dans la limite extrême du bloc où les salles sont regroupées en bloc mono-rangé ou dans un bloc à deux rangées. Pour prendre en considération cette configuration, nous avons imposé sur une seule paroi, une température constante prise égale à 28°C. Cette valeur représente la température intérieure où nous avons considéré que la salle de classe est dotée de moyen de chauffage. Pour les trois autres façades, nous avons imposé une température extérieure égale à 13.2°C (la température qui correspond au 21 Décembre, à 14H). Le profil bidimensionnel de la température intérieure est présenté dans la Fig.V.23. Selon le profil présenté, on remarque qu'il existe toujours un important gradient à l'intérieur de la salle de classe en particulier aux voisinages de la surface mutuelle. La zone voisine à la façade principale ayant des fenêtres est la zone la plus froide avec une température qui varie entre 14°C et 17°C. Pour les zones voisines à la surface mutuelle, la température varie entre 18°C et 22°C.

Selon le profil de la température présentée, on peut dire aussi que l'échange thermique est considérable avec une diminution importante de la température intérieure où elle été prise initialement égale à 28°C. Cela veut dire aussi que pour assurer le confort thermique et pour augmenter la température intérieure, le coût du chauffage sera important.

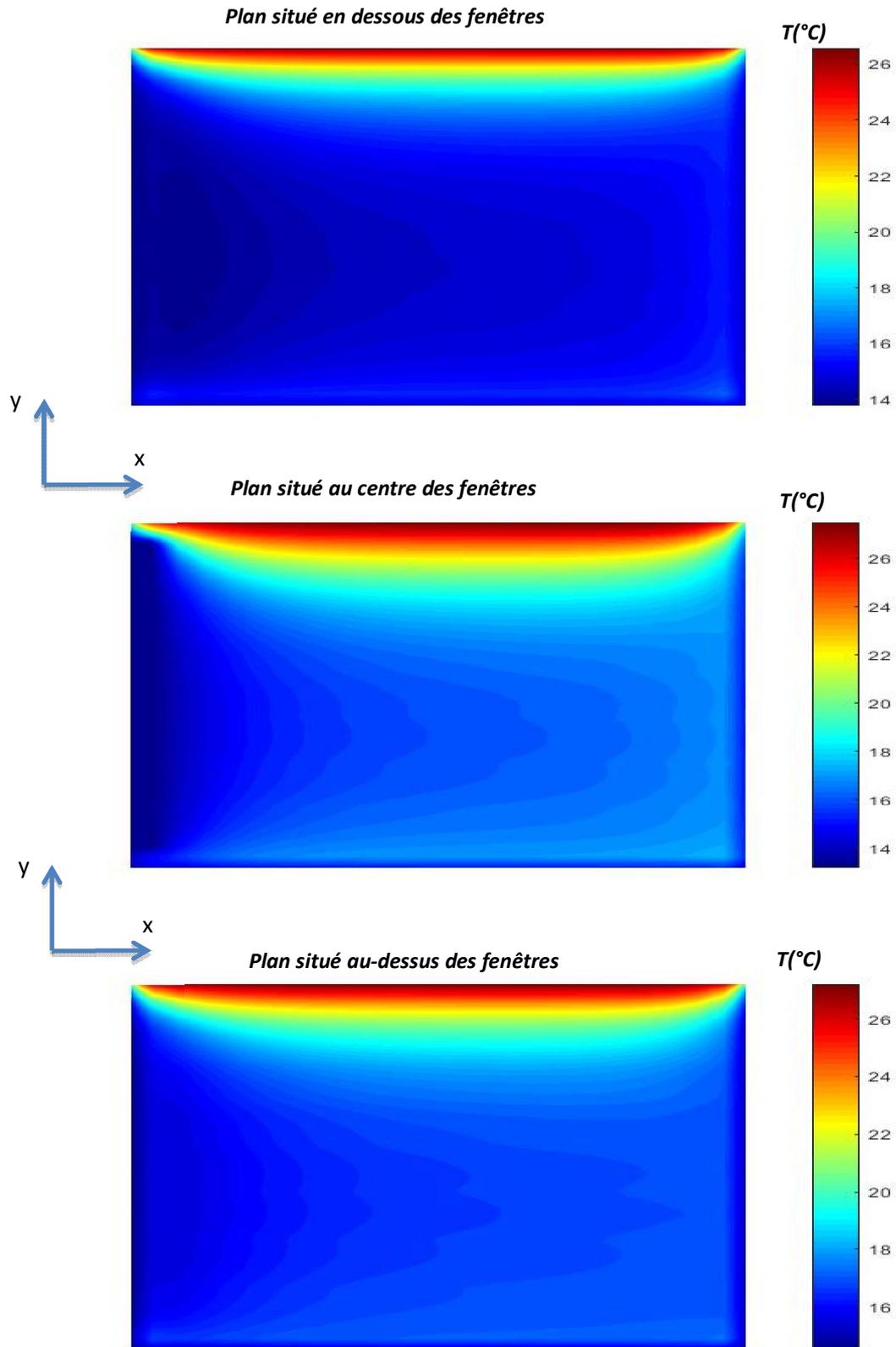


Fig.V.23. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur, les conditions aux limites sont celle présentées dans la **configuration 2**.

V.1.3. PROFIL DE LA TEMPERATURE INTERIEURE POUR UNE SALLE DE CLASSE BILATERALE DURANT UNE PERIODE FROIDE :

Certaines classes possèdent des fenêtres réparties sur deux façades juxtaposées. Pour modéliser leurs comportements thermiques nous avons calculé la répartition spatiale de la température intérieure pour une salle de classe ayant les mêmes propriétés physiques et géométriques présentées précédemment à la différence d'avoir quatorze fenêtres réparties sur deux façades. Les résultats présentent le profil tridimensionnel et bidimensionnel de la température pour la journée du 21 Décembre, à 14 H et pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur, sont présentés au niveau des figures Fig.V.24-25. Dans les résultats présentés, nous avons considéré qu'il ya un transfert de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur. C'est le cas le plus probable dans les conditions climatiques imposées par une basse température durant cette période où le confort thermique est conditionné par la présence des moyens de chauffage à l'intérieur de la salle. Pour cela, nous avons imposé une température intérieure de 28°C. Selon les résultats présentés on peut dire que :

- Les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur ont diminué considérablement la température intérieure dans un temps réduit. Elle atteint une valeur comprise entre 13.5°C et 17°C.
- Le profil de la température intérieure est fortement non-homogène, les zones les plus froides sont celles proches des fenêtres.
- La température est élevée dans les plans supérieurs de la salle de classe.
- Selon le profil du gradient de la température présentée dans la Fig.V.26, on peut dire que celui-ci est important au voisinage des zones ayant des fenêtres où il atteint son maximum de 3°C dans le plan central des fenêtres.
- Le profil de la température moyenne présenté dans la Fig.V.28 montre que celle-ci varie entre 13.8°C et 16.45°C et elle croît dans des niveaux supérieurs avec un profil presque linéaire.
- Pour montrer l'influence de la présence des fenêtres (quatorze fenêtres réparties sur deux façades), nous avons calculé la différence entre la température moyenne d'une salle de classe dotée de fenêtres et une autre n'ayant aucune fenêtre (Fig.V.29). Selon les résultats présentés on peut dire que l'influence de la présence des fenêtres sur la valeur moyenne de la température est presque négligeable où elle est définie par un maximum de 0.55°C.

Il est de même que précédemment, on peut dire que les salles de classes ayant quatorze fenêtres réparties sur deux façades contribuent à l'apparition d'un gradient de température à l'intérieur avec une valeur maximale de 3°C. Cette présence n'affecte pas considérablement la valeur moyenne de la température où elle peut atteindre un maximum de 0.55°C. Comparée au cas précédent, cette valeur a été doublée.

Pour le Mois de décembre représenté dans nos simulations par la journée du 21 Décembre et par les heures, respectivement 10H et 14H, et qui est caractérisé par des températures extérieures basses, le confort thermique fait appel à plusieurs éléments, principalement une température beaucoup plus élevée que celle de l'extérieur. Il est important alors, d'adopter des moyens de chauffage pour offrir aux occupants un lieu thermiquement confortable. Malheureusement les salles de classe dans ces conditions et dans leurs états actuels, ne peuvent en aucun cas assurer une bonne isolation entre les deux milieux où selon les résultats présentés précédemment, il existe un échange thermique important au niveau des parois de la salle, en particulier au niveau des façades portant les fenêtres. Cela nécessitera des coûts très élevés pour le prix du chauffage et pour assurer une température ambiante confortable.

Selon les résultats présentés précédemment on peut dire aussi, que même si les salles de classes seront dotés des systèmes de chauffage, il peut y avoir un inconfort thermique, ceci est dû principalement aux asymétries de la répartition de la température et aux valeurs importantes des gradients de la température à l'intérieur de la salle et qui peuvent atteindre 3°C. Dans ces conditions, les occupants d'une salle de classe seront en contact avec des surfaces qui donneront une sensation d'avoir froid et d'autres qui donneront une sensation d'avoir chaud, en particulier dans les zones voisines aux fenêtres, au sol et au plafond de la salle. Les occupants d'une salle de classes ressentiront un changement de la température selon les deux plans, horizontal et vertical.

Les enveloppes des salles de classe dans le cas idéal doivent limiter les déperditions de chaleur durant une période froide dont le but est de limiter le transfert de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur. Malheureusement, ce n'est pas le cas dans les études présentées où nous avons enregistré un transfert de chaleur important orienté de l'intérieur vers l'extérieur. Au contraire, l'enveloppe des salles de classe contribue à la diminution de la température intérieure par le renforcement du transfert de chaleur par deux modes différents qui sont principalement, le transfert de chaleur par conduction et par convection, offrant ainsi des

parois avec des températures très basses ce qui donne un inconfort thermique considérable, en particulier dans les zones proches des parois. Dans le cas idéal aussi, les parois d'une conception doivent jouer un rôle primordial dans la réduction de la consommation de l'énergie de chauffage, où la consommation énergétique principale dans les établissements scolaires est utilisé principalement aux moyens du chauffage durant cette période considérer comme froide. Dans les cas d'étude on peut dire que les parois de la salle de classe ne contribuent en aucun cas à la réduction de la consommation énergétique.

Concernant les ouvertures de la salle qui constituent une partie importante de l'enveloppe, elles contribuent aussi à l'apparition d'un fort gradient de température à l'intérieur de la salle, en particulier dans les zones voisines. Cependant elles ont une faible influence sur la valeur de la température moyenne.

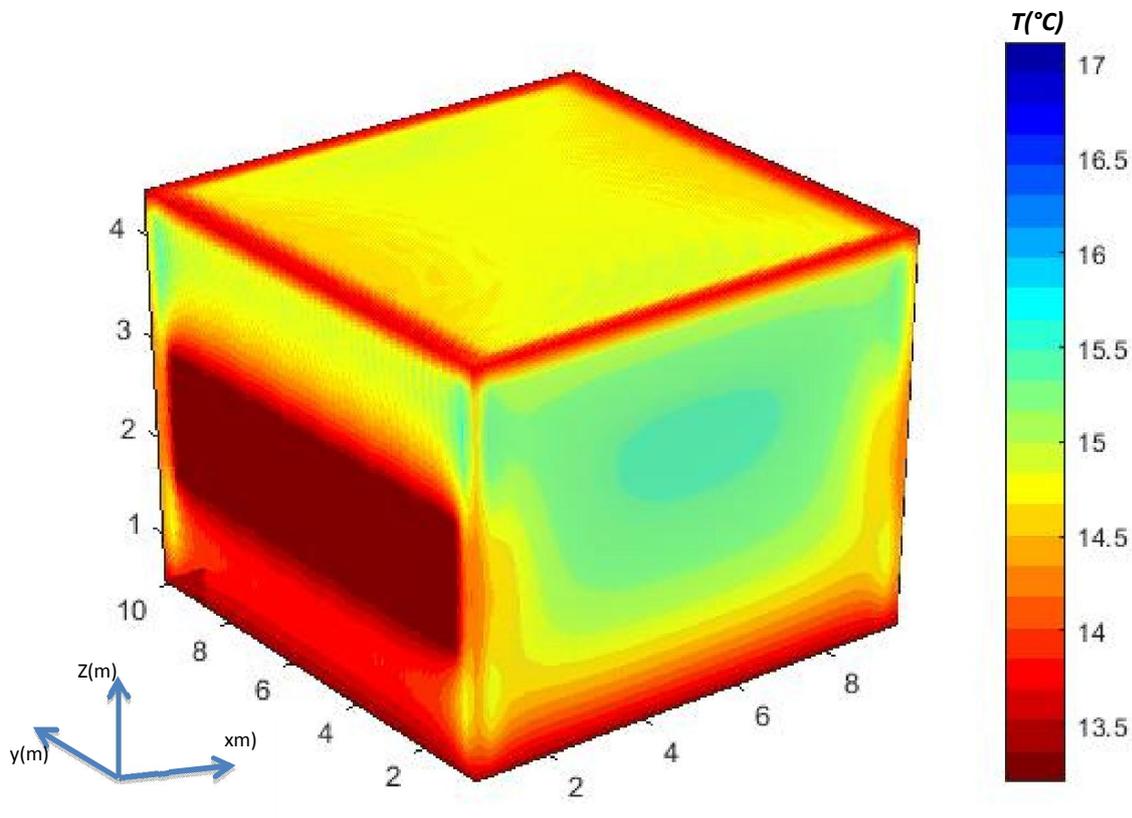


Fig.V.24. Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant quatorze fenêtres réparties sur deux façades, pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

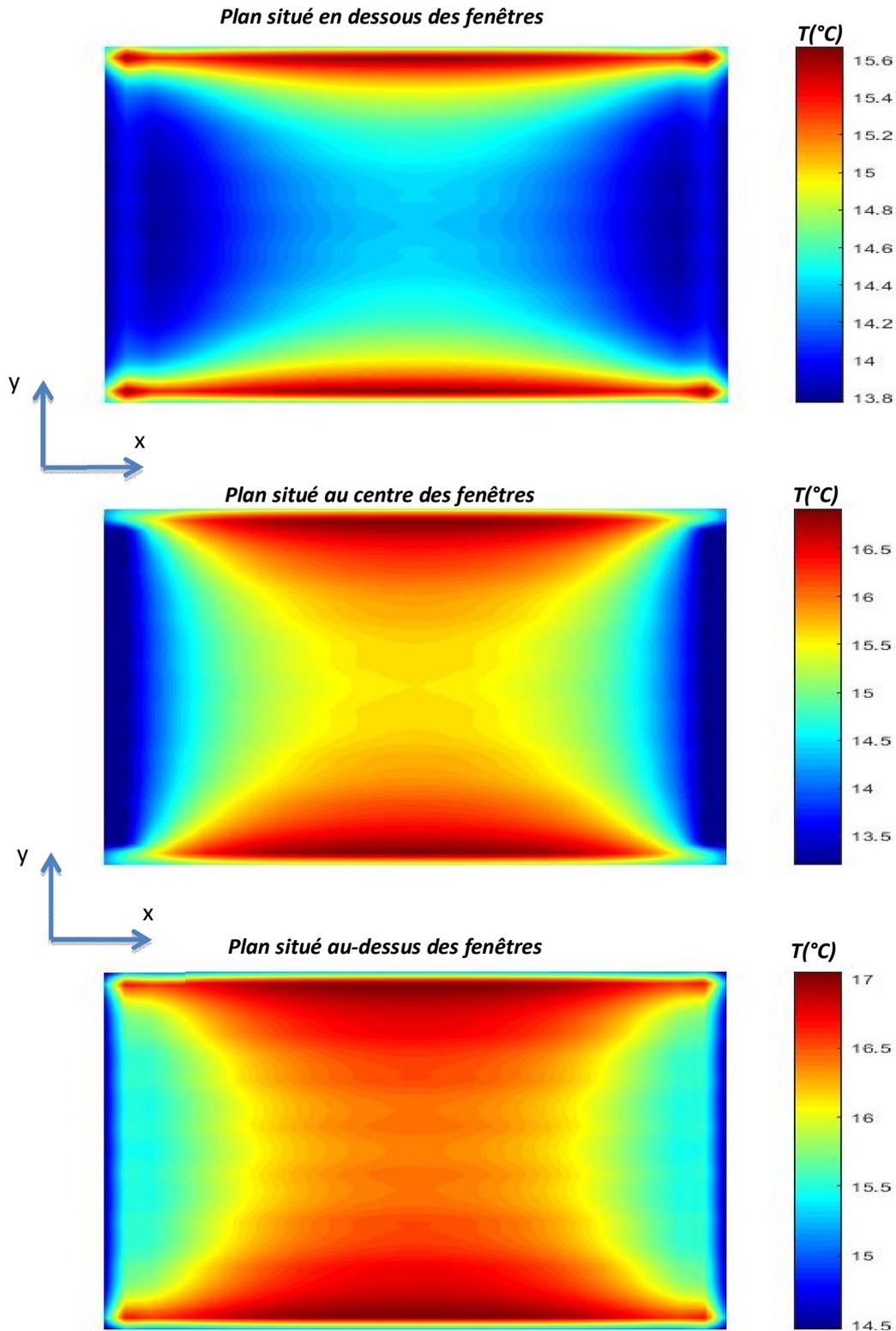


Fig.V.25. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

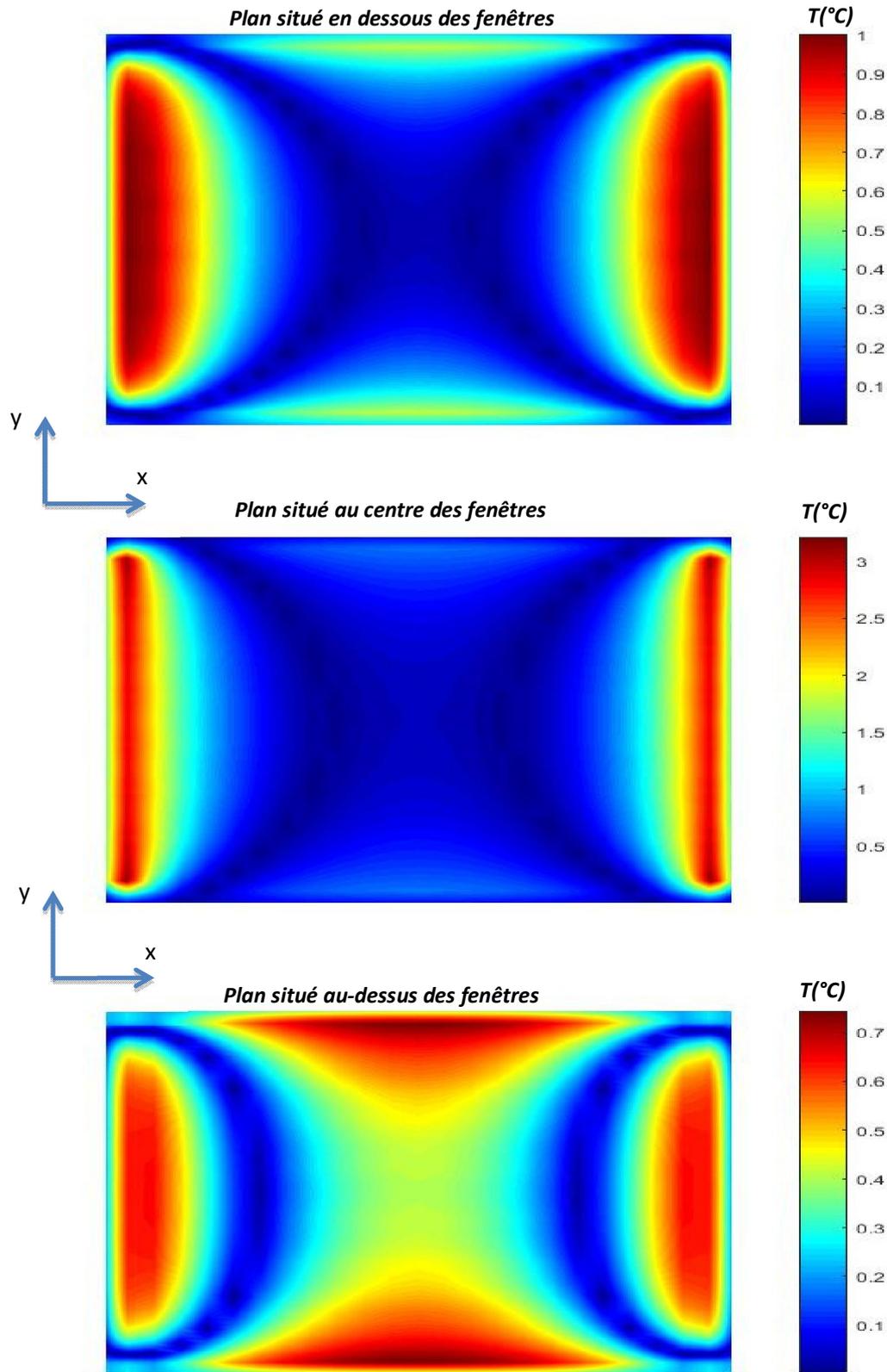


Fig.V.26. Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

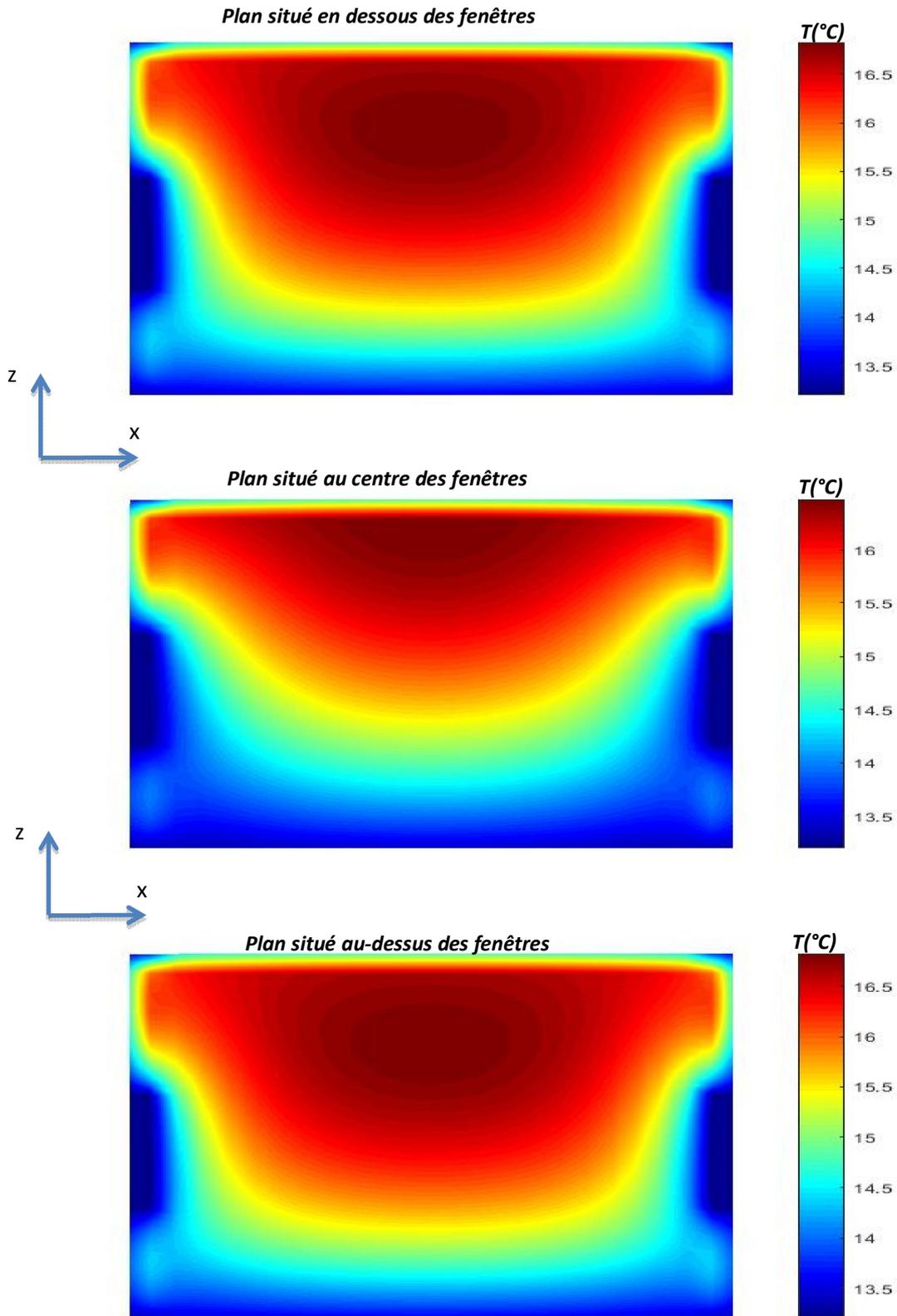


Fig.V.27. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan (X-Z) à des différents positions (y) pour la journée du 21 Décembre à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

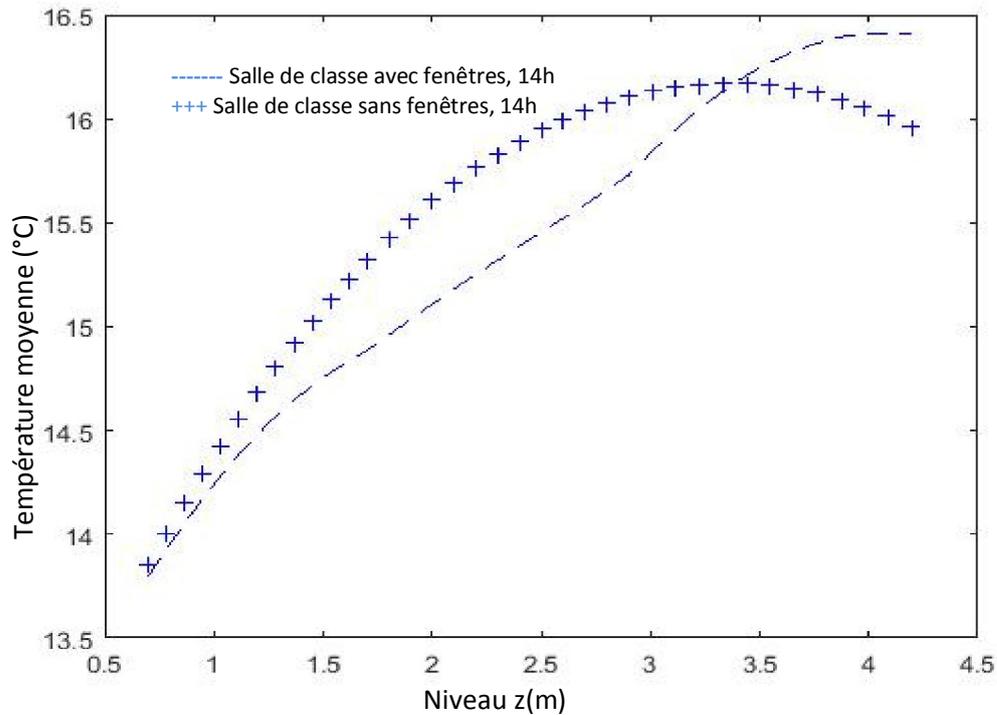


Fig.V.28. Profil de la température moyenne en fonction de la hauteur de la salle de classe (z) à 14h pour une salle de classe avec quatorze fenêtres et une classe n'ayant aucune fenêtres pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur pour la journée du 21 Décembre.

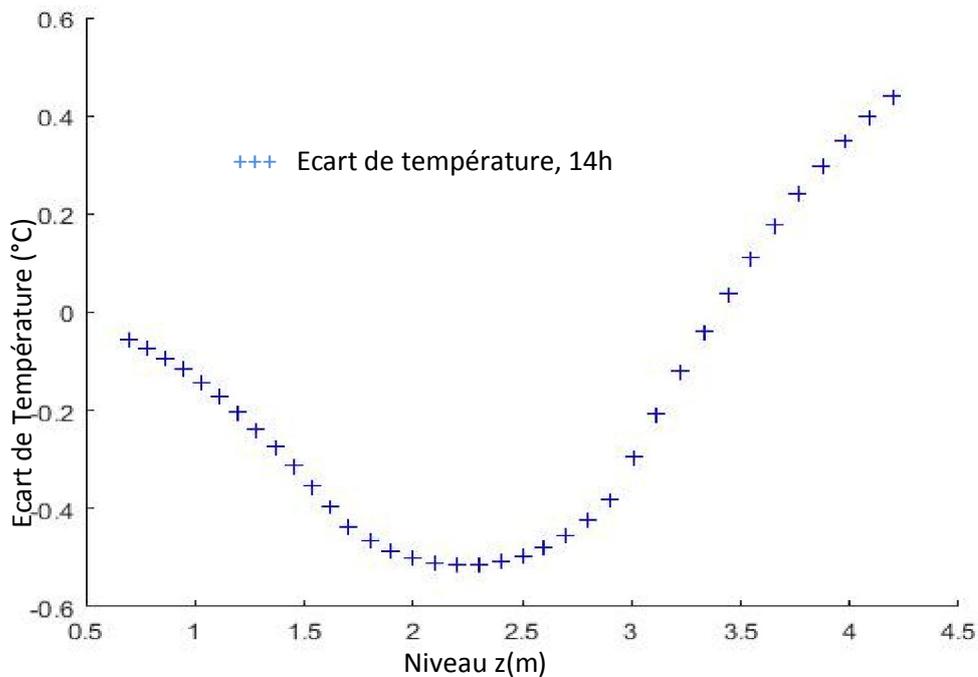


Fig.V.29. Ecart entre températures pour une salle de classe avec quatorze fenêtres et une autre n'ayant aucune fenêtres en fonction de la hauteur de la salle (z) à 10h et à 14h, pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur pour la journée du 21 Décembre.

V.1.4. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT SEPT FENETRES REPARTIEES SUR UNE SEULE FAÇADE DURANT UNE PERIODE CHAUDE :

La ville de BISKRA décrite comme étant une ville aride est caractérisée par une saison très chaude où la température peut atteindre des valeurs élevées et qui peuvent dépassées les 45°C. Dans ces conditions climatiques, il est très difficile d'assurer un confort thermique à l'intérieur des espaces sans avoir recours aux moyens du confort thermique actif.

Pour étudier la qualité du confort thermique dans ces conditions climatiques extrêmes, et en considérant que la température intérieure est l'élément clé et qui joue un rôle primordial pour assurer ce type de confort, nous avons modélisé le comportement thermique des salles de classe de la ville de BISKRA où nous avons représenté la répartition spatiale bidimensionnelle et tridimensionnelle de la température intérieure. Dans nos simulations et pour représenter les résultats thermiques pour une période chaude, nous avons résolu le problème thermique où nous avons imposés des conditions thermiques extérieures qui correspondent à la journée du 21 Juin à 14H. Pour cette journée est à cette heure, la température extérieure peut atteindre des valeurs importantes avoisinant les 40°C.

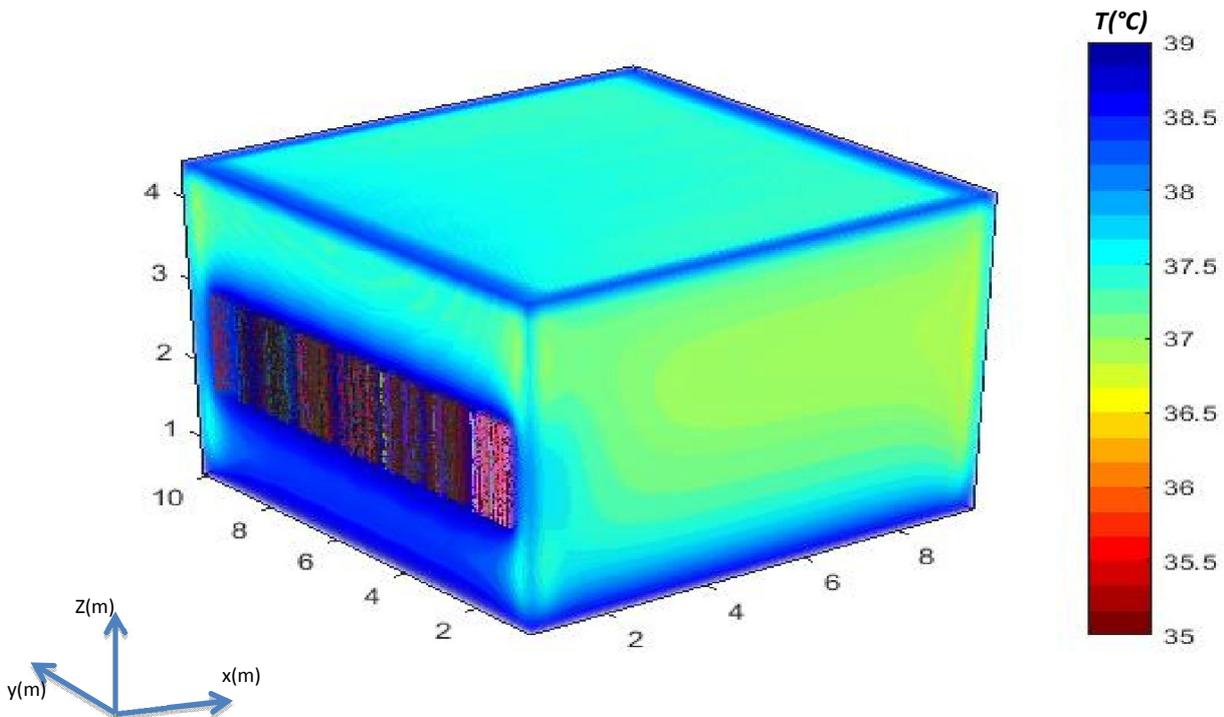


Fig.V.30. Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant sept fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

Le profil de la température intérieure ainsi que le taux de transfert de chaleur dépend essentiellement des propriétés physiques et géométriques de la salle de classe, aussi des propriétés des matériaux adoptés dans la conception de l'enveloppe de la salle qui doit dans ces conditions climatiques extrêmes, assurer une isolation thermique pour éviter toute pénétration de la chaleur extérieure vers l'intérieur en limitant le transfert de chaleur entre les deux milieux. Le profil de la température dépend aussi des conditions initiales imposées à l'intérieur de la salle de classe. De nos simulations, nous avons considéré une température initiale de 25°C, cette valeur correspond à une température intérieure idéale obtenue si la salle de classe est dotée de moyen de refroidissement. Dans ces conditions, le flux de chaleur sera orienté de l'extérieur vers l'intérieur.

Selon le profil de la température intérieure présenté au niveau des figures Fig.V.30-31, on peut dire que la température intérieure a augmenté considérablement dans un temps réduit où elle atteint des valeurs comprises entre 35.5 °C et 39°C. Sa répartition est fortement non-homogène où nous avons des zones chaudes aux voisinages des ouvertures avec des températures de 38°C à 39°C. Le fond de la salle est l'endroit où la température est la plus basse où elle atteint des valeurs comprise entre 35°C et 36°C. On peut dire alors que la conception des salles de classes ainsi que les matériaux adoptés ne permettent pas d'avoir une bonne isolation thermique entre l'intérieur et l'extérieur de plus, il ne permet pas d'avoir un bon confort thermique qui nécessite un profil de température homogène, ou la température doit être maintenue à une valeur presque constante. Pour étudier l'homogénéité de la répartition de la température, nous avons présenté sur la Fig.V.32 le profil bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe sur les plans situés respectivement, en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur. Selon le profil présenté, on peut dire que le gradient de la température peut atteindre un maximum de 3.5°C sur un plan horizontal situé en dessous des fenêtres ou même au centre du plan portant les fenêtres. Sur un plan situé au-dessus des fenêtres, le maximum du gradient atteint une valeur de 2.5°C. Pour le profil de la température sur le plan vertical présenté au niveau de la Fig.V.33. Nous pouvons dire aussi que la température varié d'un niveau inférieur où elle atteint son maximum vers un niveau supérieur où elle atteint son minimum. Le gradient de température peut atteindre un maximum de 3.5°C entre les niveaux inférieur et supérieur de la salle de classe.

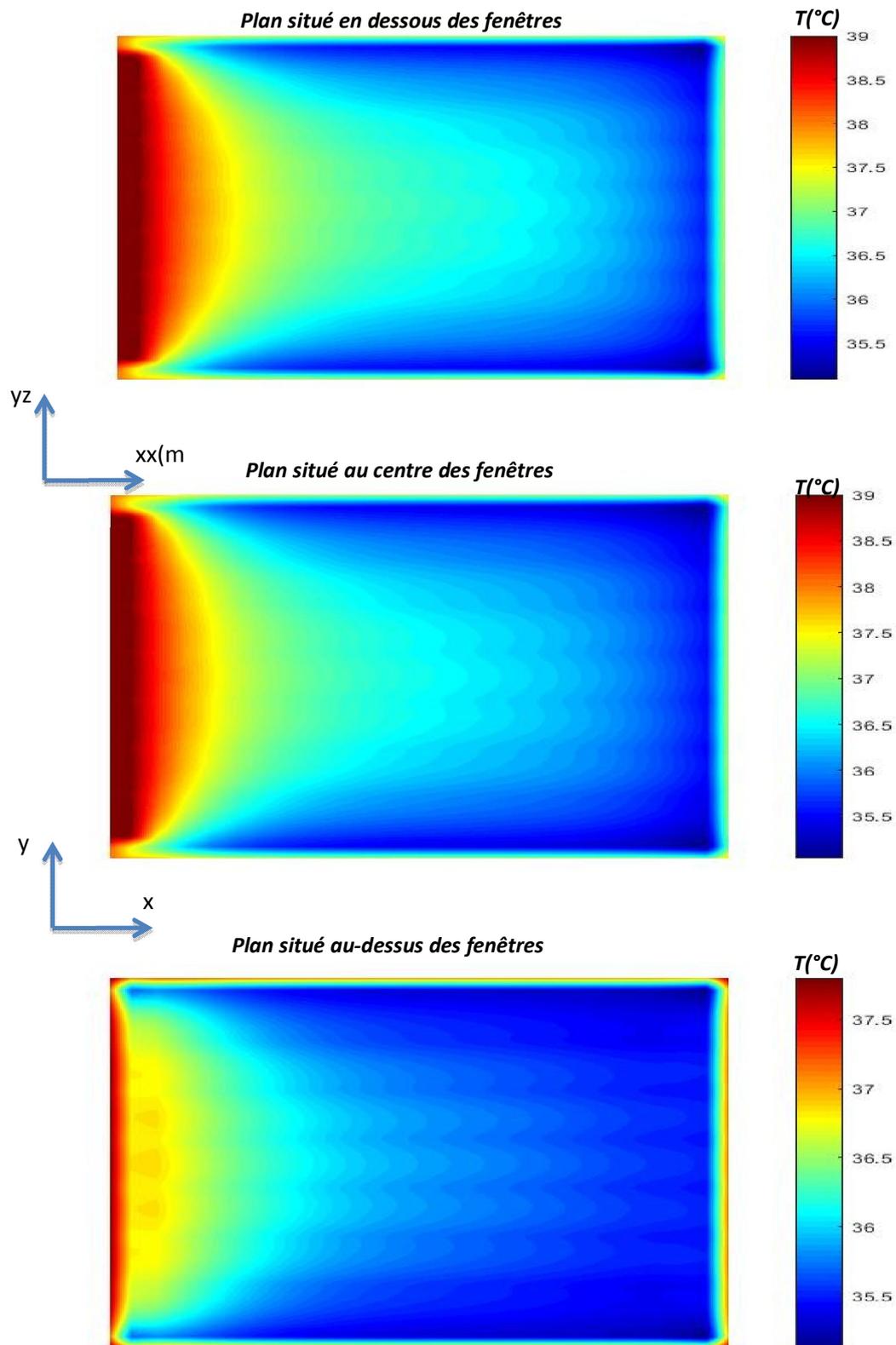


Fig.V.31. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

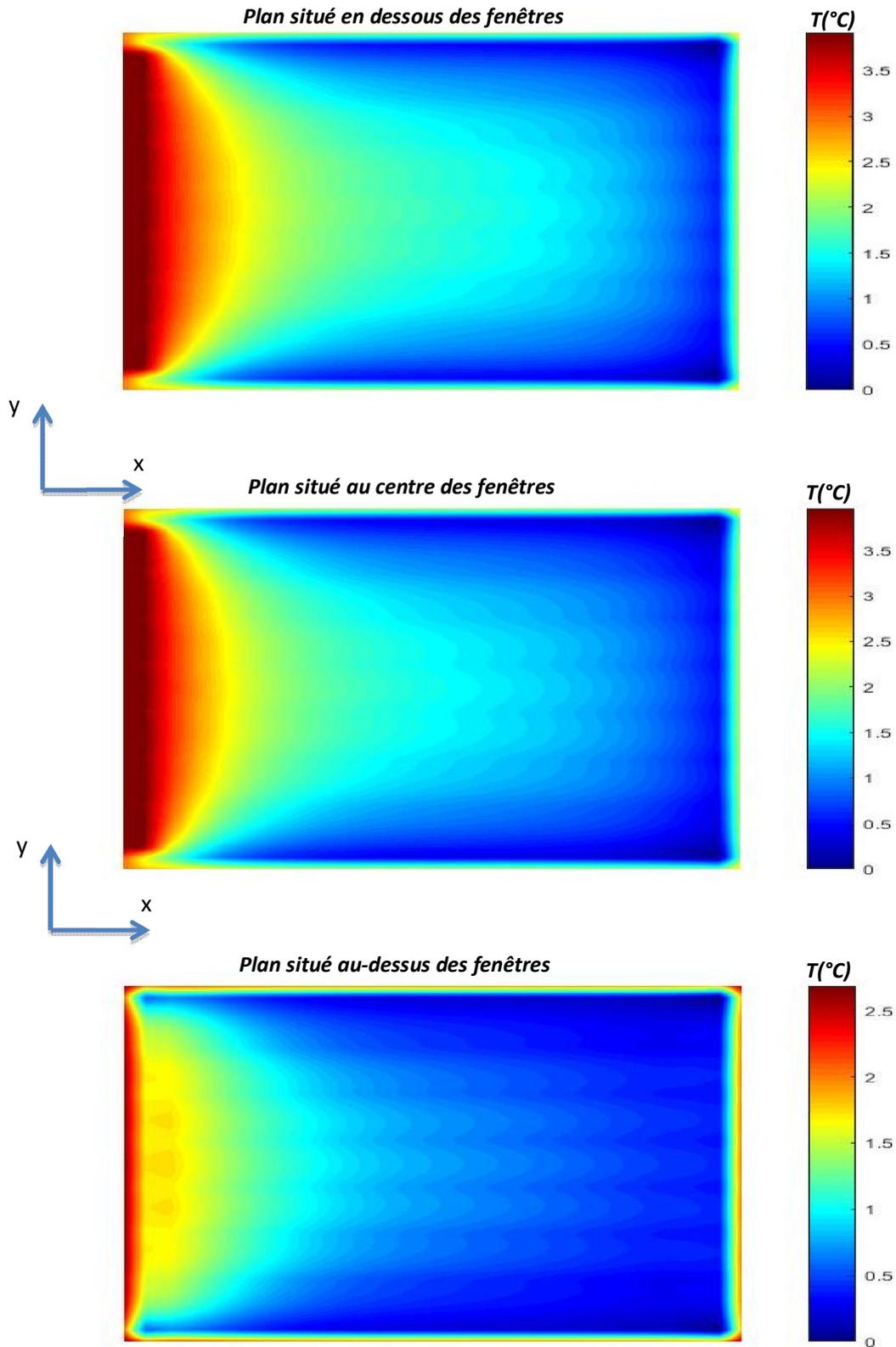


Fig.V.32. Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

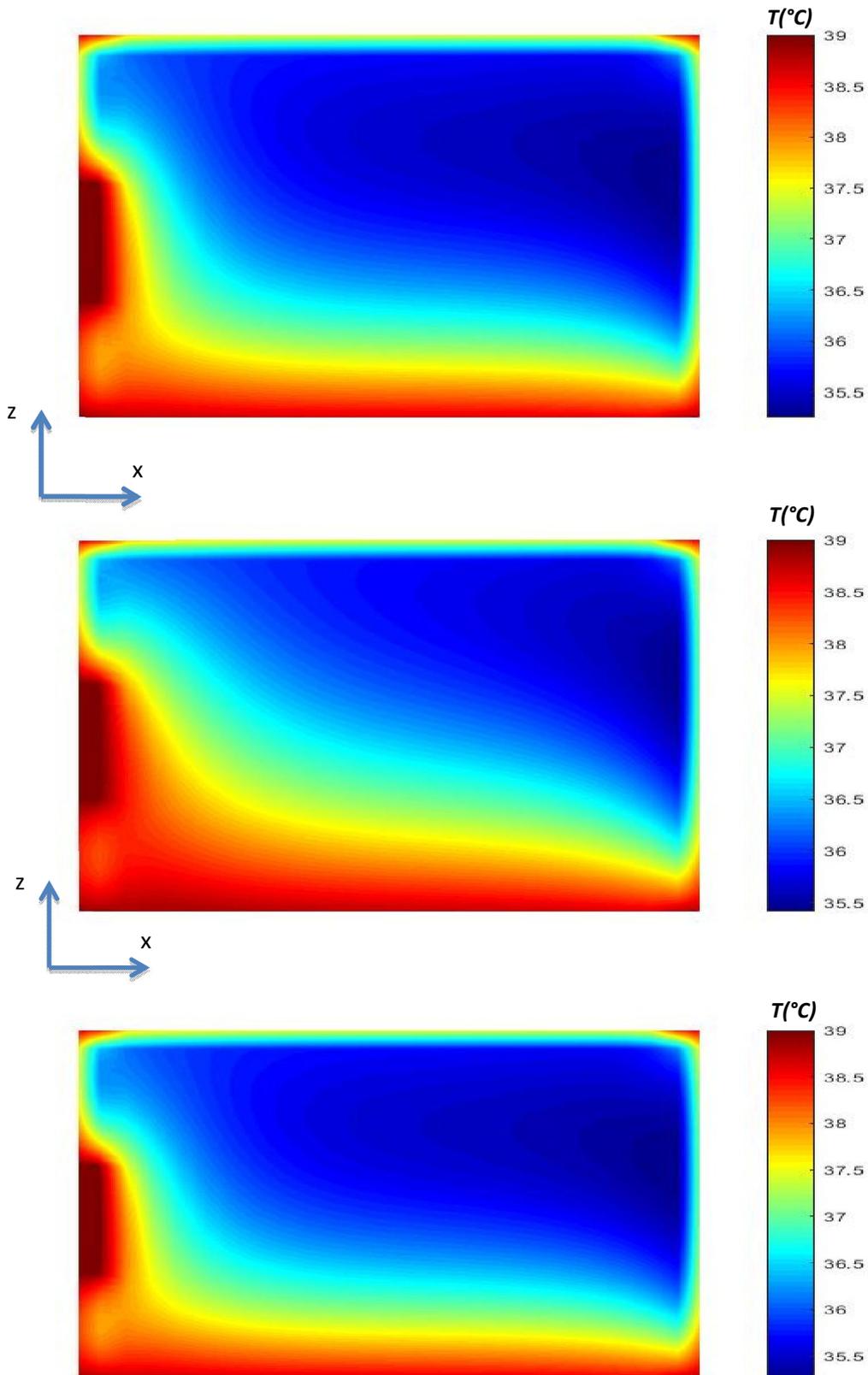


Fig.V.33. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle sur le plan (X-Z) à des différentes positions (y) pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

V.1.5. PROFIL DE LA TEMPERATURE INTERIEURE POUR UNE SALLE DE CLASSE BILATERALE DURANT UNE PERIODE CHAUDE :

Dans cette partie nous avons présenté les résultats des simulations du comportement thermique d'une salle de classe ayant quatorze fenêtres réparties sur deux façades où chacune porte sept fenêtres de mêmes dimensions et de mêmes propriétés. Le profil de la température intérieur dans ces conditions ainsi que celui du gradient est présenté au niveau des figures Fig.V.34-37. De même que précédemment, la période chaude est représentée à titre d'exemple par la journée du 21 Juin à 14H où les températures à l'extérieur peuvent atteindre les 45°C. Le flux de chaleur est aussi supposé orienté de l'extérieur vers l'intérieur où nous avons supposé une température intérieure initiale de l'ordre de 25°C. Dans ces conditions et selon les résultats présentés on peut dire que :

- Les échanges thermiques entre les milieux intérieur et extérieur ont fortement augmenté la température intérieure dans un temps très réduit où celles-ci peut atteindre des valeurs comprises entre 35°C et 39°C.
- l'enveloppe de la salle de classe qui doit s'opposer à l'échange thermique ou de le réduire n'a pas vraiment contribué à améliorer le confort thermique.
- Le profil de la température intérieure est fortement non-homogène avec des écarts de température sur le plan vertical qui peuvent atteindre, 3.5°C sur des niveaux situés en dessous et au centre des fenêtres. Dans les niveaux supérieurs situés au-dessus des fenêtres, le gradient de température peut atteindre un maximum de 2.5°C.
- La température est élevée dans les plans inférieurs de la salle de classe.
- Selon le profil du gradient de la température présenté dans la Fig.V.36, on peut dire que celui-ci est important au voisinage des zones ayant des fenêtres où il atteint son maximum de 3.5 °C.

Il est de même que précédemment, on peut dire que les salles de classes ayant quatorze fenêtres réparties sur deux façades contribuent à l'apparition d'un gradient de température à l'intérieur avec une valeur maximale de 3.5°C. L'enveloppe de la salle de classe qui doit s'opposer à l'échange thermique n'influe pas sur l'amélioration du profil de la température. Celle-ci est très influencée par la température extérieure considérée comme très élevée. Dans ces conditions, on peut dire que la conception des salles ainsi que les

moyens adoptés ne permettent en aucun cas d'améliorer ou d'atteindre un confort thermique souhaitable et même si les salles seront dotées de moyens de refroidissement, le coût de la climatisation sera très élevé.

Durant cette période caractérisé par des températures élevées, l'isolation thermique peut contribuer à l'amélioration du confort thermique et de réduire considérablement la consommation énergétique considérée comme très importante durant cette période. Aussi et selon la trajectoire du soleil qui atteint des niveaux hauts sur l'horizon, l'isolation de la toiture peut contribuer à limiter les échanges thermiques sur des niveaux supérieurs de la salle de classe. Le confort thermique peut être amélioré dans ces conditions par l'amélioration du processus de conception par l'adaptation des conceptions qui permettent de renforcer la ventilation naturelle et d'exploiter par exemple, l'effet d'ombrage des conceptions voisines.

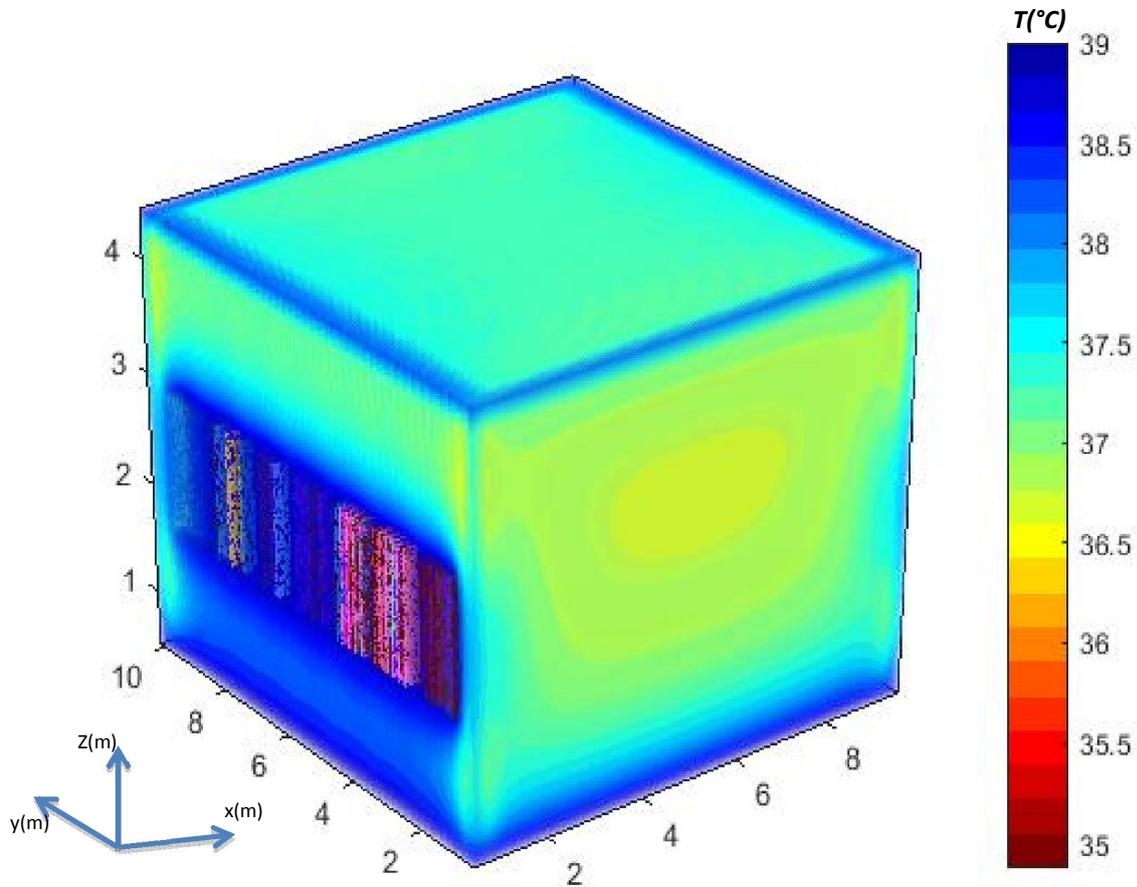


Fig.V.34. Répartition tridimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe ayant quatorze fenêtres réparties sur deux façades, pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

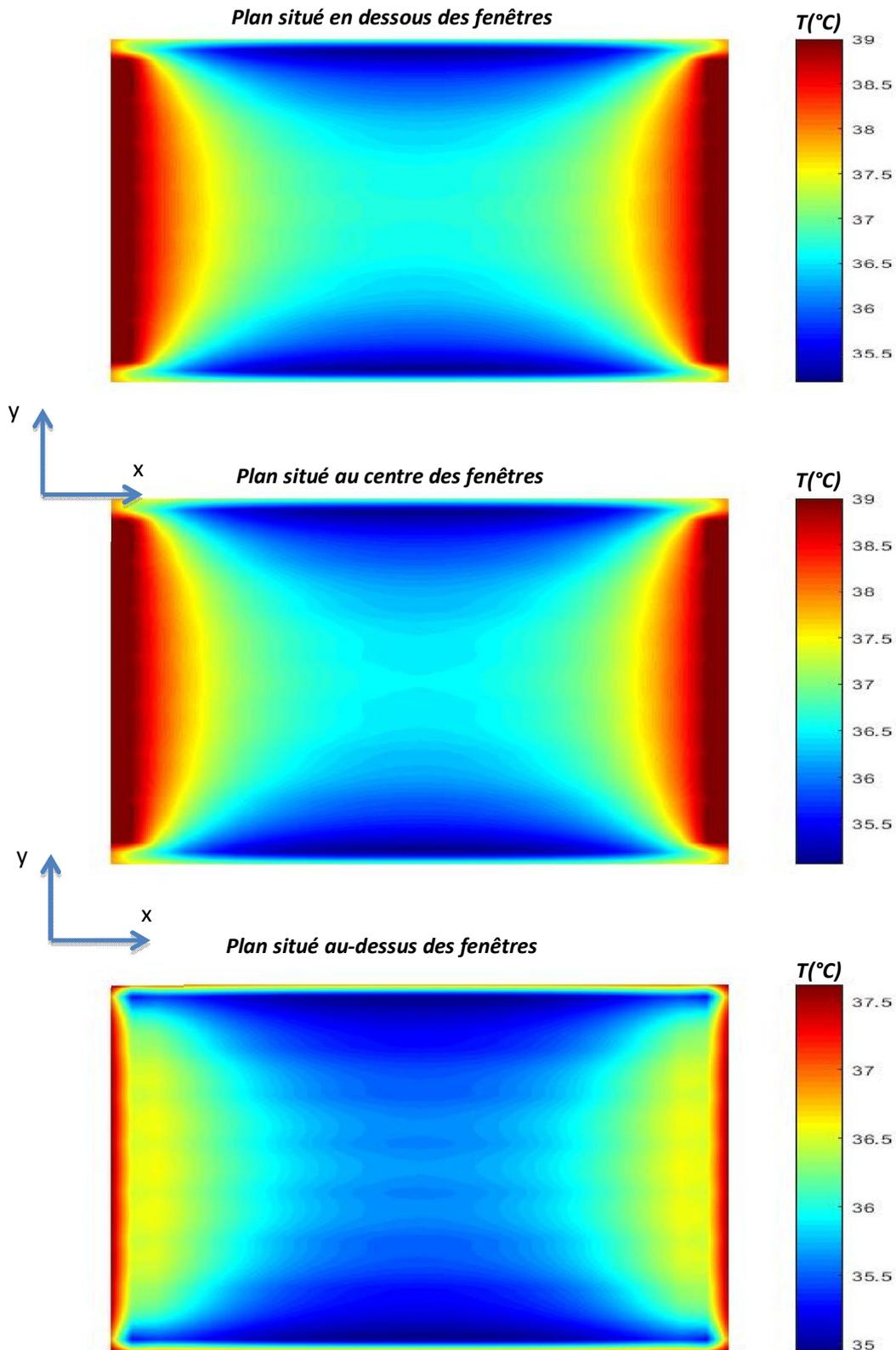


Fig.V.35. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

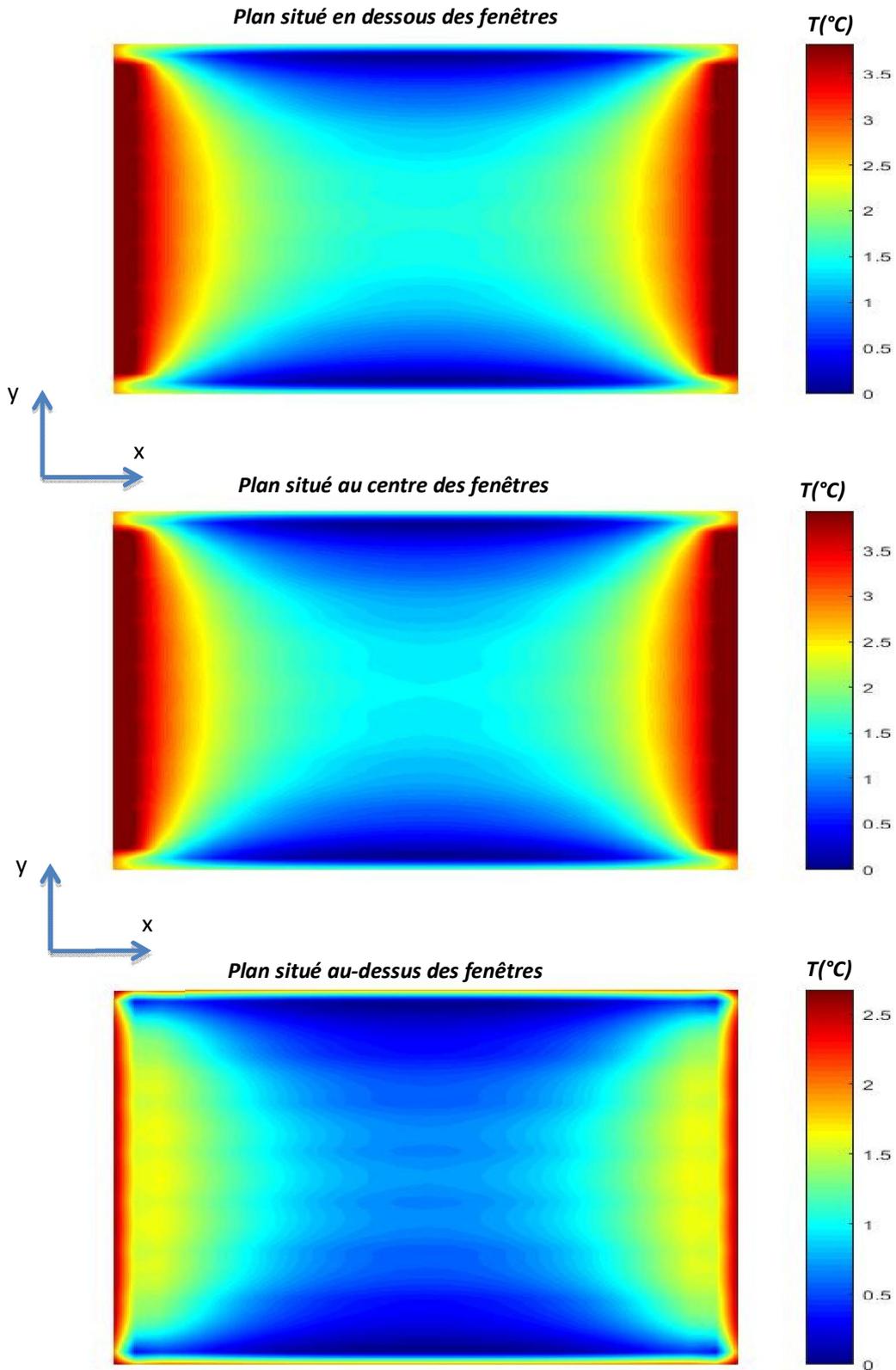


Fig.V.36. Répartition bidimensionnelle du gradient de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan situé respectivement en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

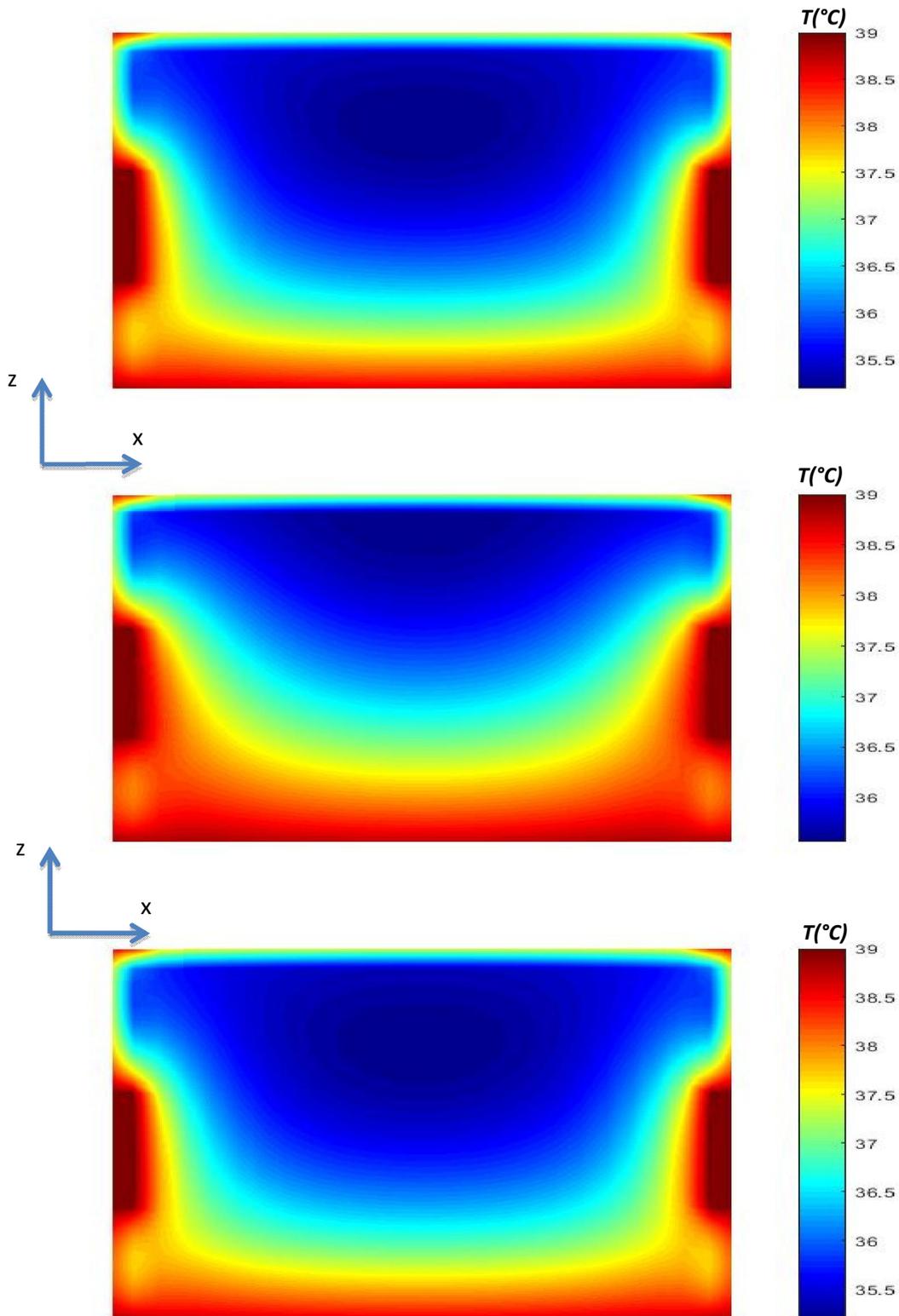


Fig.V.37. Répartition bidimensionnelle de la température à l'intérieur de la salle de classe, ayant quatorze fenêtres, sur le plan (X-Z) à des différents positions (y) pour la journée du 21 Juin à 14h pour un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur.

V.2. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des simulations du comportement thermique de quelques salles de classe situées dans la ville de BISKRA. Cette ville, caractérisée par un climat aride, est définie par des saisons froides ou chaudes où la température extérieure et selon la saison, peut être très élevée pour atteindre des valeurs de l'ordre de 45°C, comme elle peut être basse pour atteindre 11°C dans la matinée. Les résultats des simulations sont obtenus à partir d'un code de calcul développé et implémenté sous environnement MATLAB, où la méthode des volumes finis a été adoptée pour résoudre un problème thermique régi par des équations aux dérivées partielles. Dans nos simulations, nous avons pris en considération l'ensemble des paramètres liés à la conception de la salle de classe et qui peuvent agir sur le profil thermique, principalement les différentes couches des parois utilisées pour concevoir l'enveloppe de la salle de classe. La période froide a été représentée par la journée du 21 Décembre et la période chaude a été représentée par la journée du 21 Juin. Dans les simulations présentées, nous avons considéré un flux de chaleur orienté de l'intérieur vers l'extérieur durant la période froide et un flux de chaleur orienté de l'extérieur vers l'intérieur durant la période chaude. Ceci dépendra de la valeur initiale de la température imposée à l'intérieur de la salle de classe. Des outils de visualisation tridimensionnelle et bidimensionnelle ont été développés dans le but de faire une présentation de la répartition spatiale de la température au sein d'une salle de classe, et d'étudier ainsi l'homogénéité de sa répartition spatiale à l'intérieur des salles sur des niveaux horizontaux ou même verticaux.

Un lieu thermiquement confortable est un lieu où les moyens adoptés pour offrir une température ambiante agréable sont les moins sollicités. Ces moyens doivent assurer des températures qui donnent une sensation de bien être où l'ensemble des occupants ne doivent avoir ni trop froid ni trop chaud. Cette sensation de bien-être ne dépend pas seulement d'une température moyenne confortable et adéquate aux individus ainsi que leurs activités exercés au sein d'un espace, mais elle dépend aussi, de la répartition spatiale de la température où elle doit être homogène et presque uniforme sur tous les plans du lieu que ce soit vertical ou horizontal. En effet, un environnement avec des températures ayant des grandes différences en températures est considéré comme un lieu inconfortable. Ceci peut être observé par exemple dans un espace où la température est très élevée aux voisinages des radiateurs adoptés pour assurer l'échauffement d'un espace alors qu'aux voisinages des ouvertures, on enregistre des températures généralement basses et dépendantes des conditions climatiques à l'extérieur. Malheureusement et selon les résultats des simulations présentés, on peut dire que

les salles de classe étudiées possèdent tous les critères d'un lieu thermiquement inconfortable durant les deux périodes, chaude ou froide. Ces critères sont :

- Un taux d'échange thermique très important entre l'extérieur et l'intérieur où la température intérieure dépend essentiellement de la température imposée par les conditions climatiques à l'extérieur de la salle de classe. Ceci mène à des températures élevées durant la période chaude et des températures basses durant la période froide.

- L'échange thermique entre les deux milieux, extérieur et intérieur, est très important, via les parois constituant l'enveloppe de la salle de classe, en particulier au niveau de la façade portant les fenêtres. Cet échange thermique a modifié considérablement la température intérieure de la salle de classe en particulier dans les zones voisines aux fenêtres offrant ainsi une répartition spatiale de la température fortement non-homogène et non-uniforme. Ceci a donné une naissance aux gradients de température à l'intérieur avec des écarts qui peuvent atteindre 3 à 3.5°C durant les périodes froides ou chaudes.

- La présence des fenêtres contribue à l'apparition d'un inconfort thermique à l'intérieur des salles par la contribution de l'apparition des gradients de températures importants, en particulier aux voisinages des façades principales. Cette présence n'affecte pas vraiment la valeur moyenne de la température intérieure où nous avons enregistré une différence maximale de 0.25°C entre une salle n'ayant aucune fenêtre et une autre ayant sept fenêtres réparties sur une seule façade est de 0.55°C entre une salle de classe n'ayant aucune fenêtre et une autre dotée de quatorze fenêtres réparties sur deux façades.

- Les surfaces des parois de la salle (les parois latérales, le sol et le plafond de la salle) présentent un inconvénient majeur pour le confort thermique. Celles-ci offrent des températures basses durant la période froide et des températures élevées durant une période chaude.

- Outre que l'inconfort enregistré à l'intérieur des salles de classe, on peut dire que leurs enveloppes est mal conçues pour assurer une bonne isolation thermique entre les milieux. La conception des salles de classes étudiées présente alors des inconvénients majeurs du point de vue économique et même écologique où le coût du chauffage ou du refroidissement doit être très élevé.

Dans les conditions d'étude présentées et selon les conceptions présentées, on peut dire que l'amélioration du confort thermique des salles de classe de la ville de BISKRA repose essentiellement sur l'utilisation des moyens et des techniques d'isolation thermique qui doivent être intégrées dans les parois enveloppant un environnement.

L'inconvénient majeur des ouvertures repose sur l'apparition d'un gradient de température en particulier aux voisinages des façades principales portant les fenêtres de la salle de classe. Ceci peut être évité par l'adaptation d'un vitrage qui peut assurer une isolation thermique parfaite (un double vitrage par exemple). Même si le coût de ces ouvertures est considéré comme élevé, mais ceci devient bénéfique comparé au coût du chauffage ou du refroidissement durant les périodes froides ou chaudes.

Chapitre VI : Résultats des Simulations des Ambiances Lumineuses

Chapitre VI

Résultats des Simulations des Ambiances Lumineuses

VI. INTRODUCTION

Des efforts considérables s'investissent pour concevoir des édifices en concordance parfaite avec leur environnement où le climat (Reiter. 2005) est considéré comme un élément clé qu'il faut bien tenir en compte dans le processus de conception. Dans le cadre du développement durable, il serait bénéfique d'exploiter au maximum l'éclairage naturel à l'intérieur d'un édifice, et de remplacer ainsi, l'éclairage artificiel par un éclairage naturel considéré comme écologique et qui permet de réduire considérablement la quantité des déchets produits (Reiter. 2005) par la consommation intense de l'éclairage artificiel. Ce remplacement permettra de réduire considérablement la consommation énergétique du secteur immobilier estimé de plus d'un tiers de la consommation énergétique globale en particulier dans les pays développés, et de réduire ainsi, l'émission de dioxyde de carbone CO₂ produit principalement dans la production énergétique pour couvrir la demande du secteur immobilier vis-à-vis de sa consommation en éclairage artificiel (Lesage. 2013).

L'éclairage naturel est généré par la répartition de la lumière naturelle pénétrant l'espace construit (Tourre, 2007). Dans tout projet architectural, l'éclairage naturel joue un rôle primordial voire fondamental pour assurer aux occupants un confort intérieur tout en assurant un confort psychologique, thermique et surtout un confort visuel où tout changement de lumière induit des modifications de notre perception de l'espace architectural (Reiter. 2005). Considéré comme élément important du confort intérieur, le confort visuel est intimement lié aux conditions d'éclairage. Plusieurs éléments peuvent agir sur la qualité du confort visuel, principalement le niveau d'éclairage, la distribution lumineuse, les rapports de luminance, les ombres, l'éblouissement et la température des couleurs (Gratia 2006), les ouvertures et leurs

emplacements. Face à tous ces éléments, le concepteur joue un rôle primordial pour offrir des édifices avec un éclairage naturel suffisamment adopté aux besoins des occupants et une conception qui donne une meilleure visibilité vers l'extérieur tout en respectant les échanges thermiques, l'éblouissement et les nuisances sonores. Le concepteur doit agir sous l'effet de plusieurs conditions et contraintes aléatoires et incontrôlables, où l'éclairage naturel dépend de l'heure, du jour, de la saison, de la position et de la trajectoire du soleil, de la clarté et de type du ciel, de la position du soleil et de l'emplacement géographique du projet architectural.

Toutes ces considérations doivent être présent en considération par le concepteur dès le début d'un projet architectural pour exploiter au maximum les bénéfices de la lumière naturelle. Où elle doit être répartie uniformément sur l'ensemble des surfaces intérieures avec un niveau d'éclairement, optimal et qui permettra d'atteindre une répartition agréable et satisfaisante dans le but est d'offrir des lieux de bien-être par la conservation du contact mutuel et direct avec l'environnement extérieur, offrant des lieux ayants un meilleur confort psychologique et visuel. En effet (ED 82), la lumière naturelle permet de réduire considérablement les contraintes physiques et psychologiques (ED 82) (Cantin 2008). Elle offre aussi des avantages physiologiques où elle est considérée comme avantageuse pour le système visuel et circadien humain. Un espace éclairé par la lumière naturelle contribue alors à l'amélioration des performances des occupants où il offre beaucoup d'avantages comparés à un espace doté d'un éclairage artificiel (Cantin 2008).

Dans les lieux du travail, plusieurs études ont montré que l'amélioration des conditions du confort du personnel à l'intérieur d'un édifice, en particulier le confort visuel qui peut être atteint, que par un éclairage naturel, améliore considérablement le rendement et la productivité des travailleurs. Il affecte aussi, l'humeur, la motivation et la productivité du personnel (Cantin 2008). La lumière naturelle offre aux personnels (Podbelski 2017) une protection contre la fatigue oculaire et elle permet d'augmenter considérablement la concentration des travailleurs et d'atteindre aussi, une qualité meilleure des fonctions mentales et de mémorisation (Atkinson 2011). Offrir un lieu de travail avec des meilleures conditions visuelles ne dépend pas seulement des critères quantitatifs mais aussi des critères qualitatifs. La lumière offerte dans ces lieux dépendra du poste de travail, des tâches effectuées avec les précisions requises en prenant en compte, le volume de travail et la mobilité nécessaire pour accomplir les tâches planifiées (Stellman 2000). C'est aussi le cas des établissements scolaires où la lumière naturel apporte les mêmes avantages cités

précédemment. Celle-ci joue un rôle primordiale, voir fondamentale pour la réussite du processus de l'enseignement et de l'apprentissage qui dépend fortement du confort offert aux apprenants et aussi aux enseignants, à l'intérieur des salles de classe voir même, dans tout les espaces d'un établissement scolaire. Le confort offert à tous les intervenants dans le processus d'enseignement coopère à la réussite de celui-ci. Dans des études menées, il a été montré que l'éclairage naturel contribue à l'amélioration du rendement des élèves et augmente leurs motivations où il offre, des salles de classe ouverte et en liaison avec le milieu extérieur. Des salles avec (Benharkat, 2006) un environnement intérieur sein et confortable et qui lutte contre l'absentéisme des élèves et des enseignants (Benharkat 2006).

Un espace intérieur peut offrir un confort visuel si ce dernier permet aux occupants de voir les objets avec un minimum d'effort. L'intensité de la lumière à l'intérieur de cet espace ne doit être ni forte ni faible où elle doit être optimale avec une répartition homogène et un spectre lumineux bien adapté à la sensibilité de l'œil et qui permet de distinguer les couleurs pour donner une meilleure vision aux objets ²⁹. Considéré comme une sensation subjective, le confort visuel dépendant de l'intensité, de la répartition et de la qualité de la lumière, fais appel à six facteurs déterminants pour pouvoir offrir un espace intérieur ayant un confort visuel idéal. Ces facteurs sont respectivement (Stellman 2000) :

- Un éclairage optimal,
- Une luminance optimale,
- Absence d'éblouissement,
- Des contrastes appropriés,
- Un rendu correct des couleurs,
- Absence de fluctuations lumineuses.

Ces facteurs où le concepteur peut jouer un rôle primordial pour offrir des lieux ayant les meilleures conditions d'éclairages nécessaires pour accomplir une tâche spécifique à l'intérieur d'un espace, tout en évitant les conditions d'inconfort visuelle provoquant des nuisances et des fatigues visuelles. Il est nécessaire alors de proposer des espaces intérieurs sans éblouissement, où il faut éviter par exemple, des emplacements des sources lumineuses

intenses dans le champ de vision et agir au mieux, pour éliminer des réflexions intenses de la lumière via des surfaces brillantes ou réfléchissantes. Le concepteur doit agir pour éviter la présence gênante des ombres, en particulier dans les zones d'activités de précision comme par exemple, la lecture ou l'écriture. Ces zones et selon l'activité exercée, doivent avoir un niveau d'éclairage adéquat avec une répartition homogène et uniforme dans toutes les zones d'activités où il est préférable d'offrir (Stellman 2000) un éclairage général plutôt qu'un éclairage localisé pour éviter, une fatigue oculaire et les risques de diminuer la réponse visuelle avec le temps (Stellman 2000).

La lumière du jour peut assurer tout type de confort à l'intérieur d'un projet architectural si celle-ci, est correctement prise en compte avant et au cours de la conception d'un projet architectural. Il est alors nécessaire de développer des outils de simulation qui permettent d'anticiper et de prévoir notre confort visuel et générer des ambiances à l'intérieur de notre espace et de prédéterminer la répartition spatiale de l'éclairage intérieur qui provient essentiellement d'un éclairage naturel. Ceci peut mettre en évidence et avant la conception du projet, les différences entre les attentes des occupants vis-à-vis de l'ambiance lumineuse offrant au concepteur l'opportunité d'agir pour modifier le volume, la forme, les dimensions, l'orientation des éléments d'ouvertures, dont le nombre, l'emplacement et leurs répartitions agissent fortement sur la qualité de l'éclairage intérieur.

Plusieurs outils de prédétermination de l'éclairage naturel ont été proposés, principalement les méthodes analytiques simplifiées qui ne peuvent en aucun cas, déterminer l'éclairage intérieur de façon satisfaisante et de prédire correctement, sa répartition spatiale au sein d'un espace intérieur. La conception assistée par ordinateur (CAO) via le développement des outils de simulation, bidimensionnel voir tridimensionnel est considérée comme le moyen le plus performant et le plus efficace pour la simulation de l'éclairage naturel. Ces outils peuvent être considérés comme un moyen d'aide aux concepteurs pour la réussite d'un projet architectural. Parmi ces outils, on peut citer comme exemple, ECOTECT, RADIANCE, DAYLIGHT et DIAL. Certains de ces outils prennent en compte seulement un ou deux types de ciel, par exemple, Ecotect, Daylight, Dial, peuvent simuler l'éclairage naturel à l'intérieur d'un projet architectural seulement pour un type de ciel couvert CIE ou uniforme CIE (Deroisy, 2011). Autres outils de simulation peuvent prendre en compte les quatre types du ciel les plus couramment utilisés qui sont respectivement, le ciel uniforme, le ciel couvert, le ciel clair sans soleil et enfin le ciel clair avec soleil. Les outils de simulation

proposés sont considérés comme une boîte fermée, non accessible aux utilisateurs pour pouvoir développer, ainsi d'implémenter des modèles mathématiques, voir mêmes des outils numériques supplémentaires qui permettent d'optimiser la structure architecturale en agissant sur certains paramètres comme par exemple, les murs, les plafonds, l'emplacement et les dimensions des ouvertures, etc.

Il est intéressant alors, d'avoir un code de calcul propre et accessible et qui permet de simuler l'éclairage naturel sous les différents types de ciel. Aussi d'implémenter des outils numériques supplémentaires comme les outils d'optimisations qui permettent d'améliorer les caractéristiques d'une conception dont le but est d'offrir aux occupants, les meilleures conditions visuelles pour avoir un maximum de confort. De plus, pouvoir prendre en considération avant et au cours de la conception d'un projet architectural, certains phénomènes physiques qui peuvent intervenir pour influencer la qualité du confort offert tels que, les phénomènes thermiques, acoustiques, etc. il s'agit un des objectifs visé dans ce travail de recherche où nous avons développé un modèle mathématique et numérique sous environnement MATLAB et qui a permis de modéliser la répartition tridimensionnelle de la tâche solaire pénétrant dans une salle de classe. Le but est d'inspecter, voir même discuter la qualité du confort visuel, obtenu principalement via un éclairage naturel, offert aux élèves à l'intérieur des salles de classe. Dans ce contexte, nous avons présenté dans ce chapitre, les résultats des simulations de l'éclairage naturel au sein d'une salle de classe située dans la ville de Biskra, choisie comme cas d'étude. Les résultats obtenus à partir du code développé ont permis de présenter l'influence de certains paramètres tels que : l'emplacement du projet architectural, l'orientation des façades, l'emplacement des fenêtres, etc. Le modèle mathématique et numérique qui a permis de développer un code de calcul tridimensionnel, dynamique et qui peut prendre en considération tout type de ciel et de pouvoir intégrer des algorithmes d'optimisation qui permettent d'avoir une forme architecturale meilleure, offrant ainsi, un éclairage naturel optimal au sein de n'importe quel projet architectural assurant ainsi, un confort visuel avec les différentes ambiances lumineuses développées.

VI.1. RESULTATS DES SIMULATIONS :

Dans les résultats des simulations présentés et dont le but d'avoir une meilleur précision par rapports aux valeurs de l'éclairéement présentés, nous avons pris en compte l'ensemble des composantes constituant l'éclairéement intérieur total (E_{tot}) (Fig.VI.1.), tel- que :

- La composante directe (E_d),
- La composante réfléchié interne (E_{ri}),
- La composante réfléchié externe (E_{re}).

Pour prendre en considération les trois composantes de l'éclairéement et vu l'inhomogénéité probable de la répartition de l'éclairéement à l'intérieur de la salle de classe et qui dépendra de la conception, principalement de l'emplacement des ouvertures, il est nécessaire d'adopter un calcul tridimensionnel. Pour traiter correctement la variation de l'éclairéement en particulier entre les milieux extérieur et intérieur caractérisés par un problème fortement non-linéaire, nous avons adopté un maillage non-uniforme avec une densité qui varie d'une zone à une autre, le maillage sera raffiné à l'intérieur de la salle de classe, principalement dans les parois et dans les ouvertures de la salle de classe.

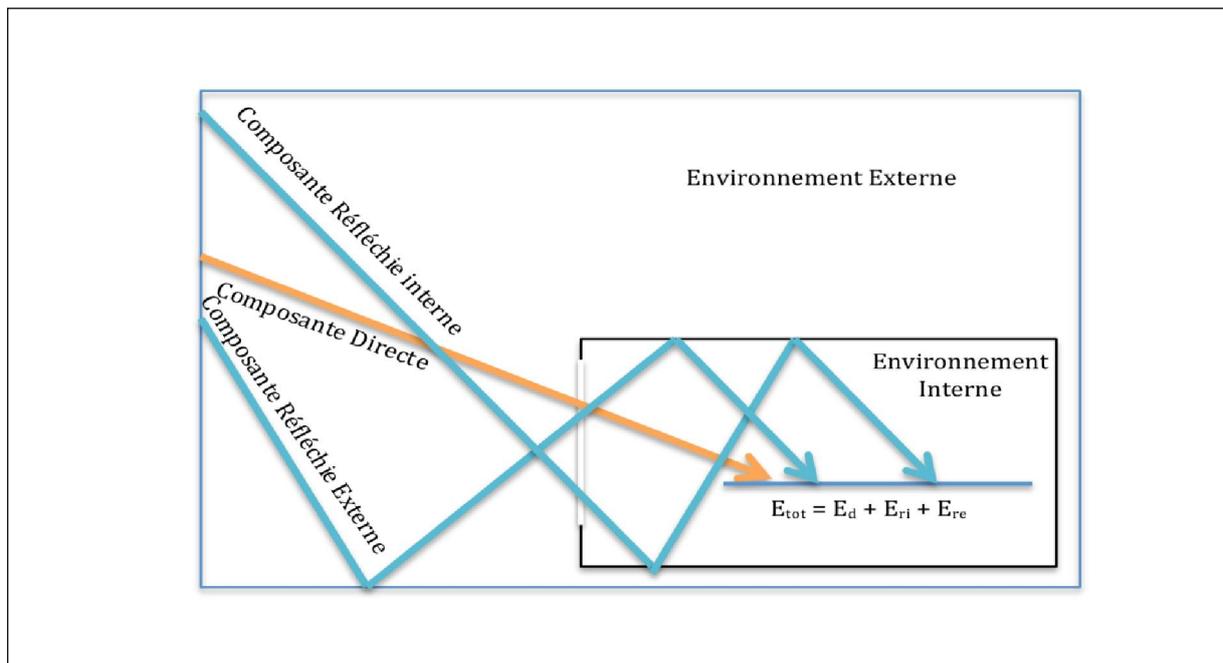


Fig.VI.1. Les trois composantes d'éclairéement prise en compte dans le code développé

Dans la partie ci-dessous, nous présentons les résultats des simulations obtenus à partir du code de calcul développé. Ces résultats présentent la répartition tridimensionnelle de l'éclairement au sein d'une salle de classe ayant une forme géométrique rectangulaire et de dimension ($Lx \times ly \times Lz$), dotée respectivement de trois et de six fenêtres.

Les fenêtres de la salle de classe ayant les mêmes dimensions ($lyf \times Lzf$) seront placées aux niveaux des façades les plus longues (Nord, Sud, Nord et Sud). Dans le but de prendre en considération l'influence du milieu environnant, nous avons considéré que la salle de classe est entourée par une boîte d'aire de dimensions ($Lxa \times lya$), Cette boîte inclue les conditions aux limites imposées à l'extérieur de la salle de classe et présente les limites du domaine de calcul. Selon la conception des CEMs inspectés dans la ville de BISKRA, nous avons distingué deux types de CEM selon l'arrangement des salles de classe où celles-ci, sont regroupées soit dans un seul bloc ou dans deux blocs séparés par un couloir intermédiaire. A titre d'exemple, le **CEM Khamla Ibrahim** présenté dans la Fig.VI.2. est conçu à partir des salles de classe (six salles de classes) regroupées dans une seule rangée où les fenêtres sont réparties dans une seule façade. Dans le second type présenté dans la Fig.VI.3. conçu à partir des salles de classes regroupées en trois à neuf salles réparties dans deux rangées séparées.

Les fenêtres des salles sont réparties dans une seule façade. Concernant le nombre et les dimensions des fenêtres, l'ensemble des CEM inspectés dans la ville de Biskra, sont dotés de trois à neuf fenêtres (comme le présente la Fig.VI.4) avec des dimensions allant de $0.6m$ à $1.5m$ ($lyf \times Lzf = 0.6-1.2 \times 1.2-1.5m^2$). Afin de limiter la présentation des résultats, nous avons présenté les résultats des simulations pour des salles de classe ayant trois et six fenêtres, réparties respectivement dans une seule façade et dans deux façades.

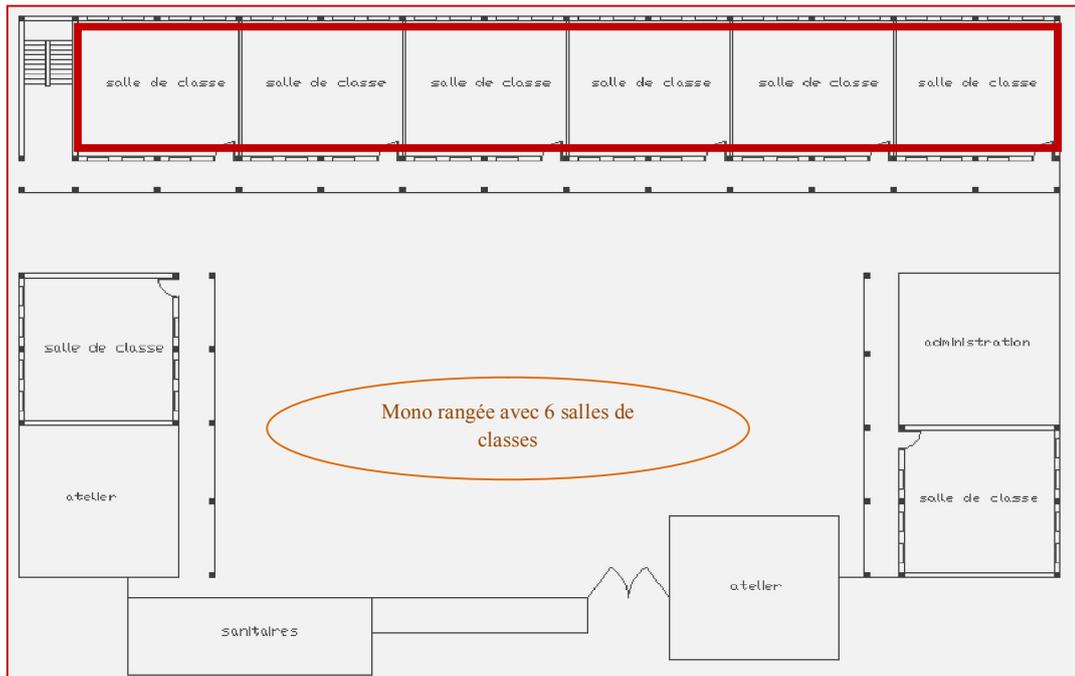


Fig.VI.2. Plan des CEM conçu à partir des salles réparties dans une seule rangée.
Exemple : plan RDC du CEM Khamla Ibrahim.

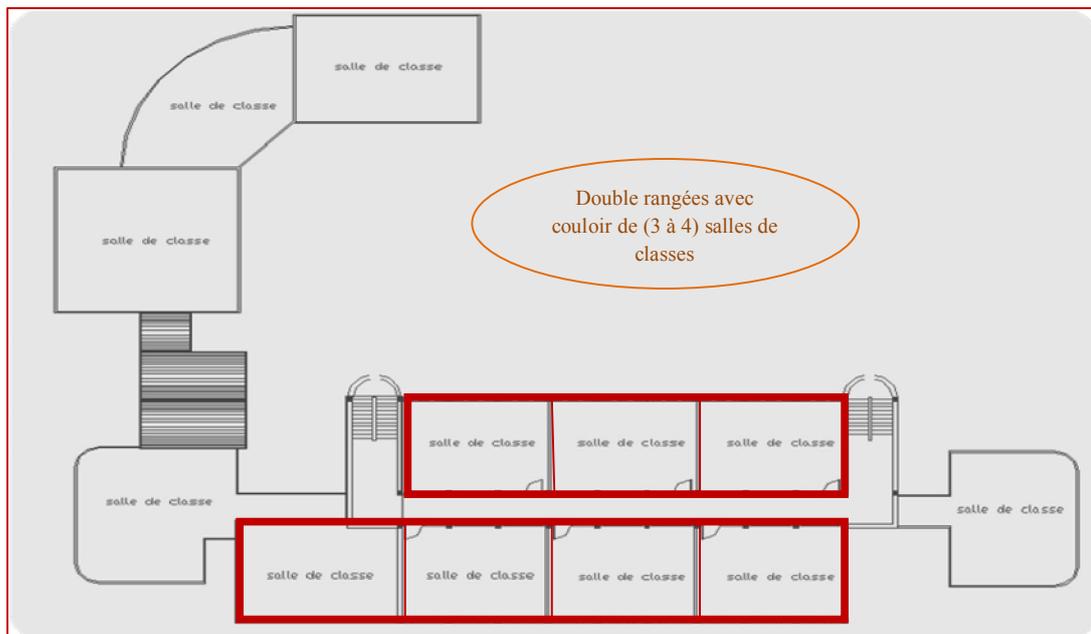


Figure. VI.3. Plan des CEM conçu à partir des salles réparties en deux rangées.

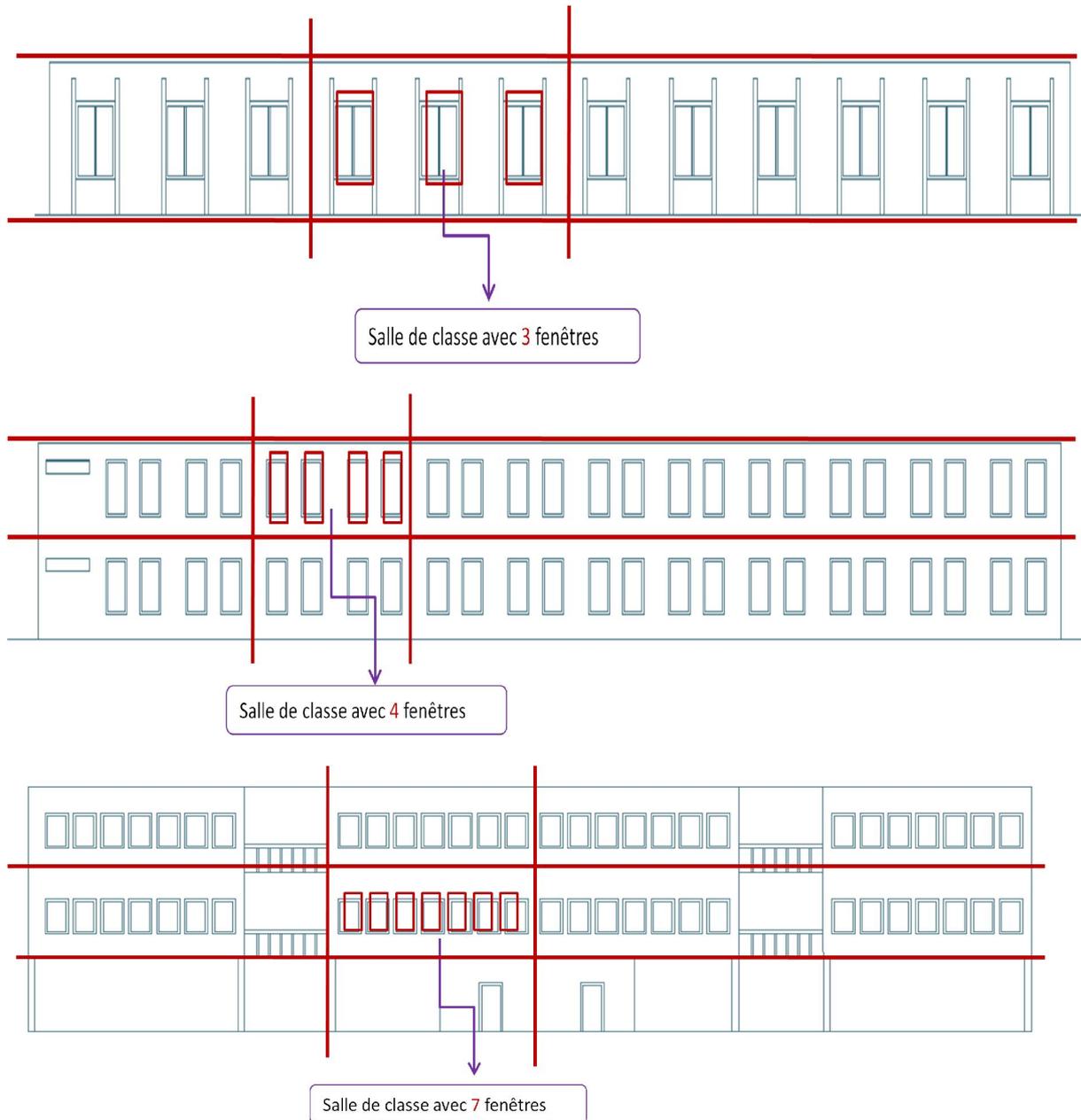


Figure. VI.4. Façade des salles de classe de quelques CEM inspectés dans la ville de BISKRA. Celles-ci sont dotées de trois, quatre et sept fenêtres.

L'ensemble des propriétés géométriques et physiques du problème à traiter et dont les résultats sont présentés, sont résumées dans le tableau (Tab.VI.1). Ce dernier résume l'ensemble des angles adoptés ainsi que les valeurs des coefficients adoptés pour décrire le type de ciel de la ville de Biskra ainsi que les valeurs de certains paramètres physiques tels-que, le coefficient de transmission des vitres, le facteur de réflexion des surfaces intérieures (murs, plafond, sol intérieur) et enfin le facteur de réflexion des surfaces extérieures (le sol à l'extérieur de la salle).

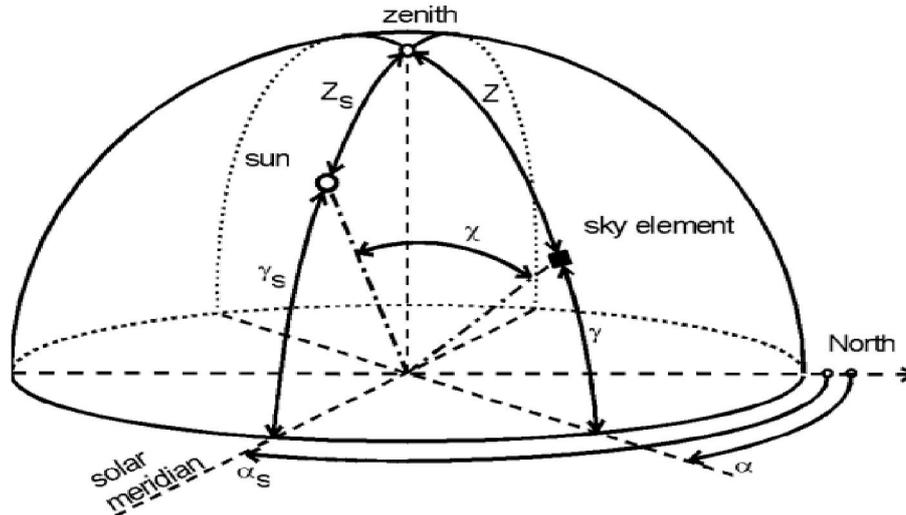


Fig.VI.2. Angles définissant la position du soleil et l'élément du ciel (Darula 2002).

Tab.VI.1. paramètres géométriques et physiques du problème à modélisé

Paramètres	Valeur ou expression
<i>La trajectoire du soleil définie par : l'angle azimutal (α_s) et la hauteur (γ_s).</i>	α_s (en degré) pour le mois de Mars, Juin, Septembre et décembre à 10 h, [122.94 97.46 126.16 141.98], α_s (en degré) pour le mois de Mars, Juin, Septembre et décembre à 14h : [211.34 242.56 216.32 202.14]. γ_s (en degré) pour le mois de Mars, Juin, Septembre et décembre à 10 h = [38.52 53.76 41.04 21.09], γ_s (en degré) pour le mois de Mars, Juin, Septembre et décembre à 14 h = [51.31 69 49.75 28.35].
Dimension de la salle de classe L_x, L_y et L_z.	$L_x \times L_y \times L_z = 7 \times 9 \times 3.5 \text{ m}^3$
Air environnement	$L_x \times L_y = 5 \times 5 \text{ m}^2$
Dimension des fenêtres	$L_y \times L_z = [\text{de } 0.5\text{m à } 2.5\text{m}; \text{de } 0.5 \text{ à } 2.5\text{m}]$
Nombre de fenêtre	3 ou 6.
Les paramètres standard utilisés pour décrire le type de ciel caractérisant la ville de Biskra, considéré comme ciel de type 11.	$a = -1, b = -0.55, c = 10, d = -3$ et $e = 0.45$.
Facteur de réflexion des surfaces extérieures (F_s)	$F_s = \text{de } 0.22$ (sol extérieur en terre), $F_s = 0.35$ (sol en béton) et $F_s = 0.9$ (un sol considéré comme blanc).
Coefficient de transmission du vitrage (τ_v)	$\tau_v = 0.9$ (vitrage simple de 3mm).

VI.1.1. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT TROIS FENETRES :

Dans cette partie nous présentons les résultats des simulations d'une salle de classe ayant trois fenêtres réparties sur une seule façade, les dimensions de la salle de classe ainsi que les dimensions des fenêtres sont celles trouvées dans quelques CEM inspectés dans la ville de BISKRA. L'éclairément est calculé, en particulier à l'intérieur des salles de classe. Celui-ci peut être calculé à n'importe quel jour de l'année et à tout instant de la journée en prenant en considération l'orientation des salles ainsi que l'orientation et l'emplacement des fenêtres. Comme références, nous avons présenté les résultats des simulations pour les journées, respectivement, du 21 Mars (L'équinoxe), 21 Juin (solstice d'été), 21 Septembre (L'équinoxe) et enfin le 21 Décembre (solstice d'Hiver). Les résultats des simulations sont aussi présentés (à titre d'exemples) à 10h et 14 h. La Fig.VI.3 présente une vue tridimensionnelle du problème modélisé ainsi que le maillage adopté pour résoudre le problème lié à la répartition tridimensionnel de l'éclairément à l'intérieur de la salle de classe.

VI.1.1.1. Résultats des simulations Pour le Mois : dans cette partie nous présentons les résultats des simulations pour la journée du 21 Mars dans le cas où les fenêtres sont placées selon la façade orientée respectivement, vers le Nord et vers le Sud.

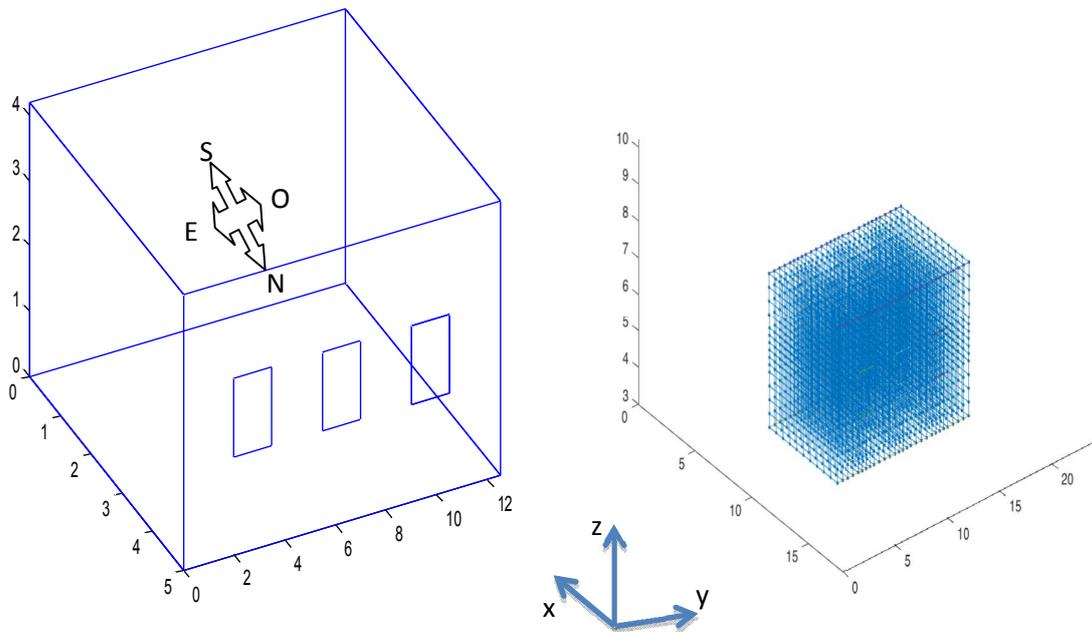


Fig.VI.3. Vue tridimensionnelle du problème modélisé ainsi que le maillage adopté pour résoudre le problème.

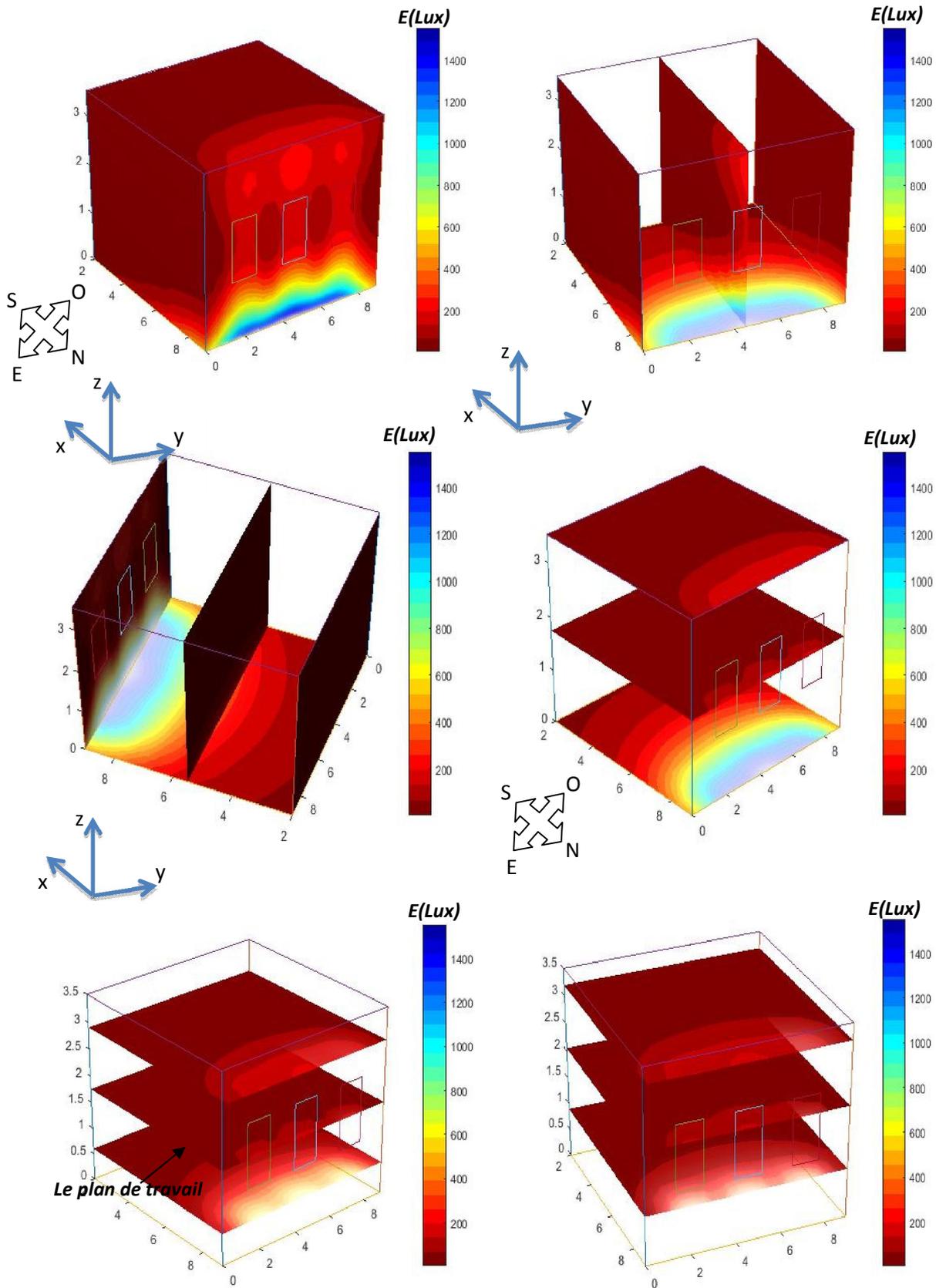


Fig.VI.4.Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars à 10 h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord.

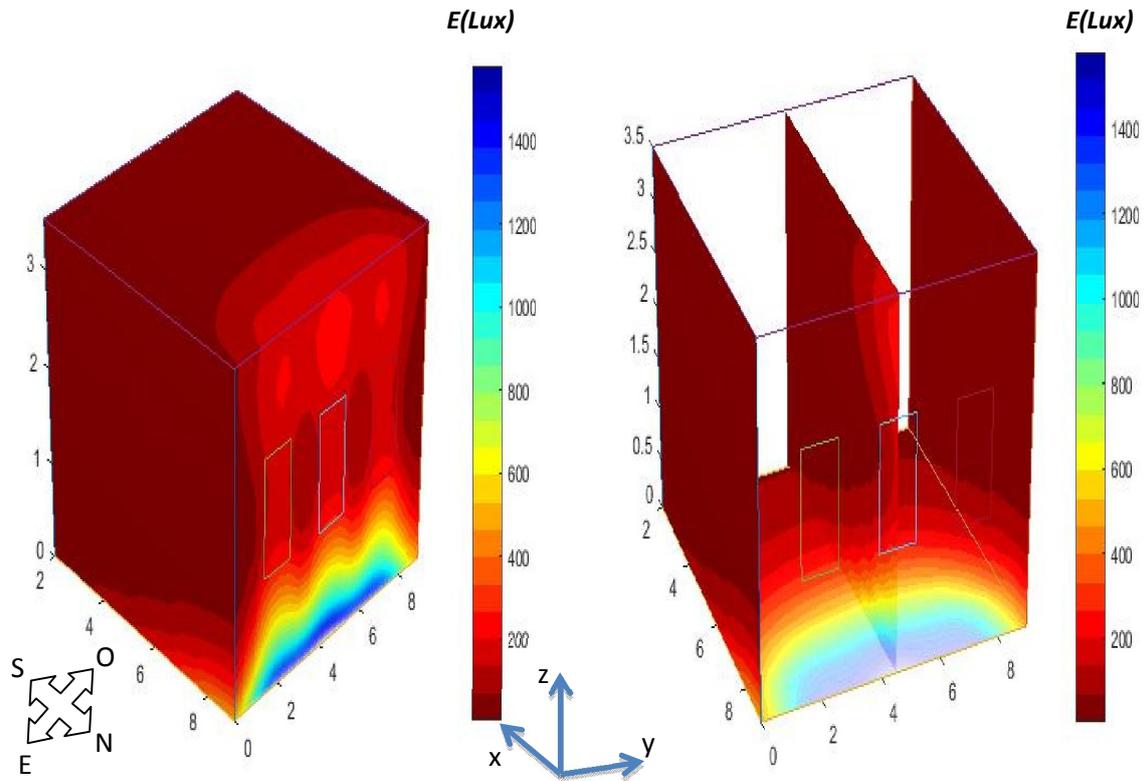


Fig.VI.5.a. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord.

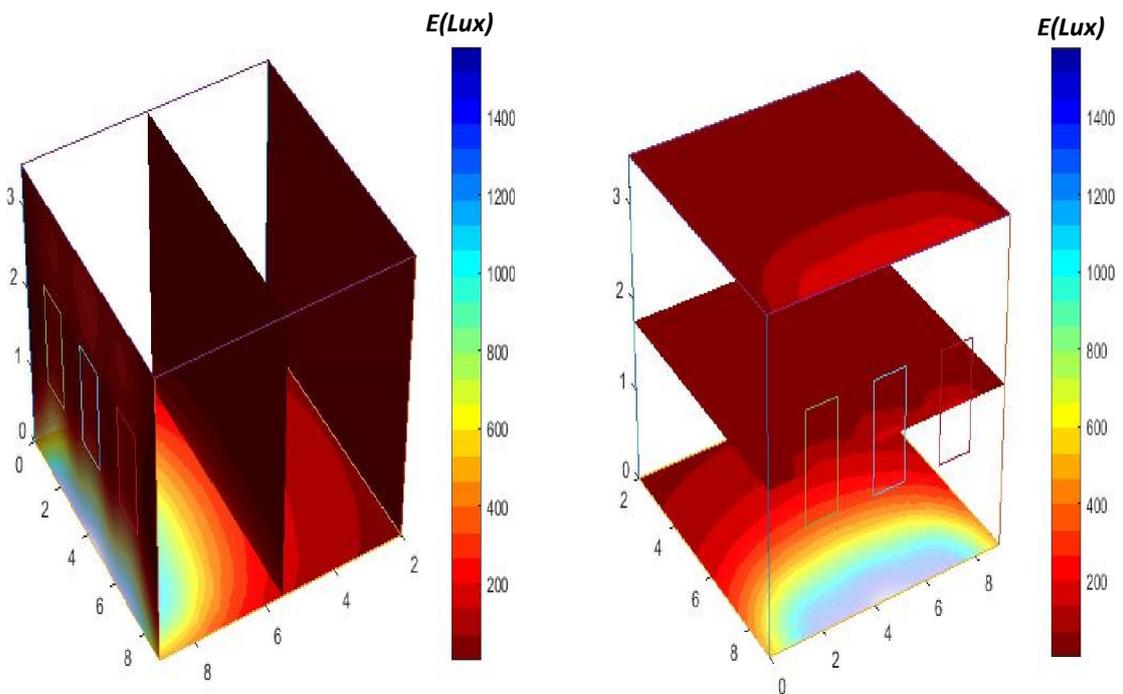


Fig.VI.5.b. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord.

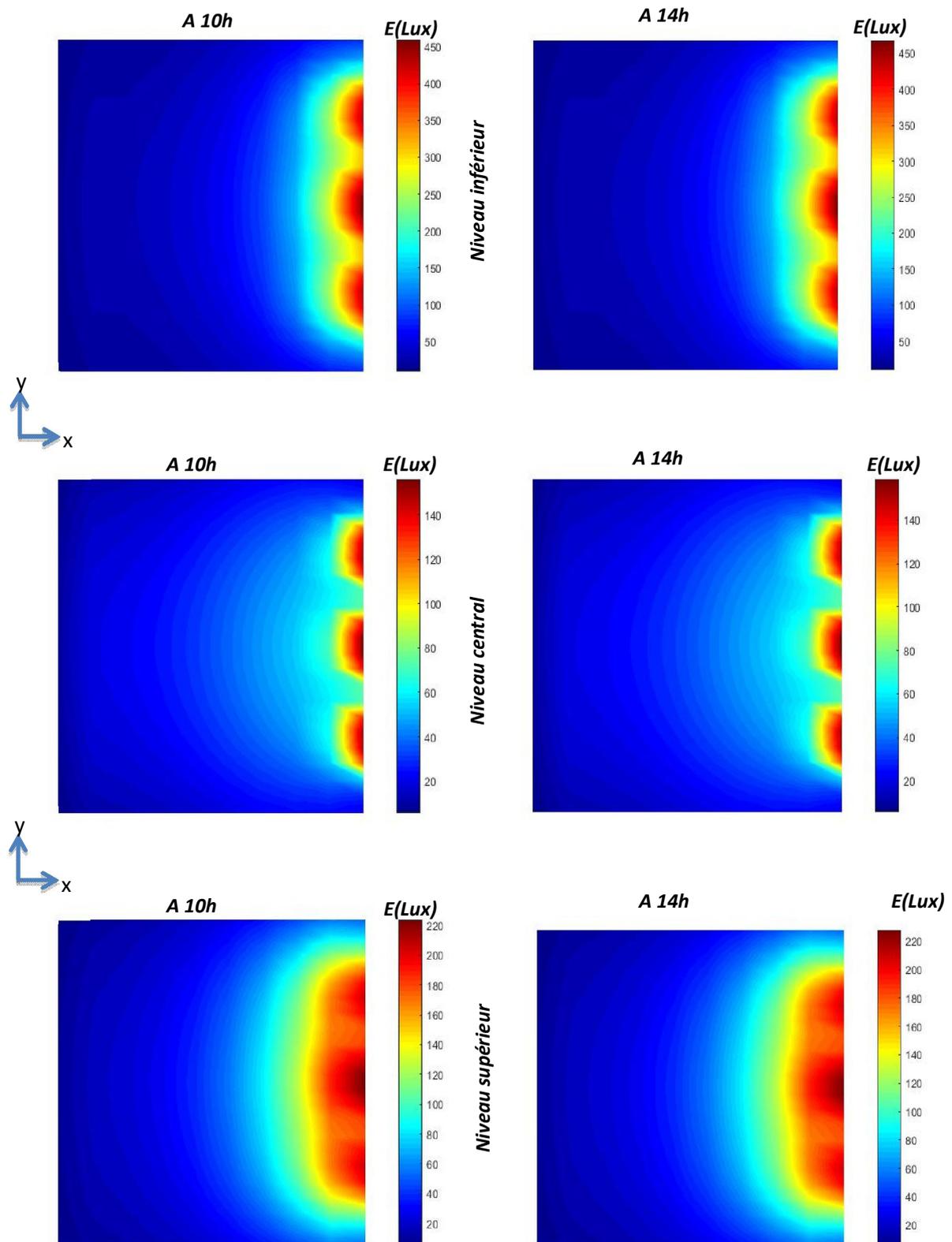


Fig.VI.6. Répartition bidimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour le 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H (les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord). Les niveaux présentés sont ceux placés : en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres

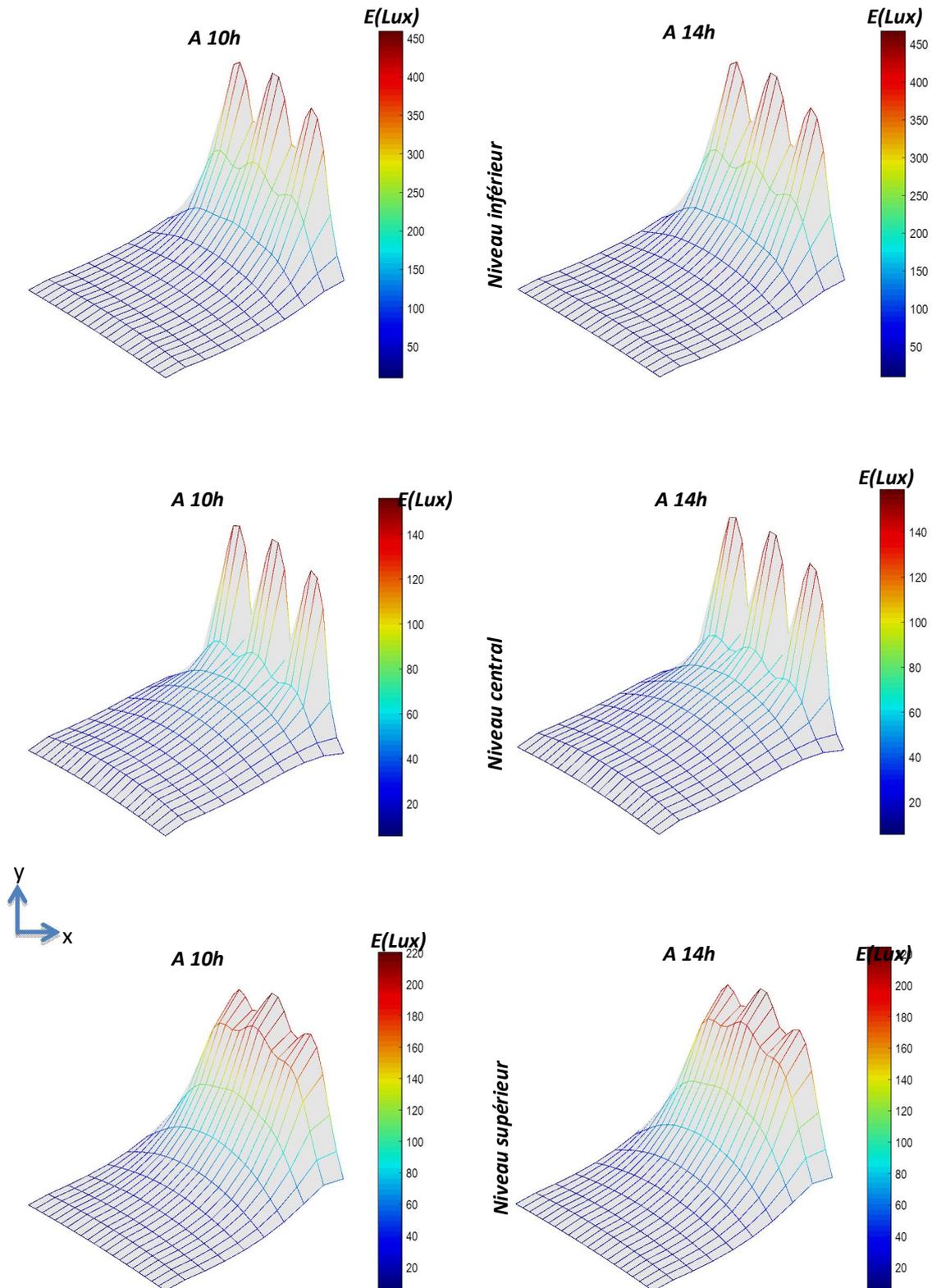


Fig.VI.7. Profil bidimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans des niveaux présentés sont ceux placés : en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres

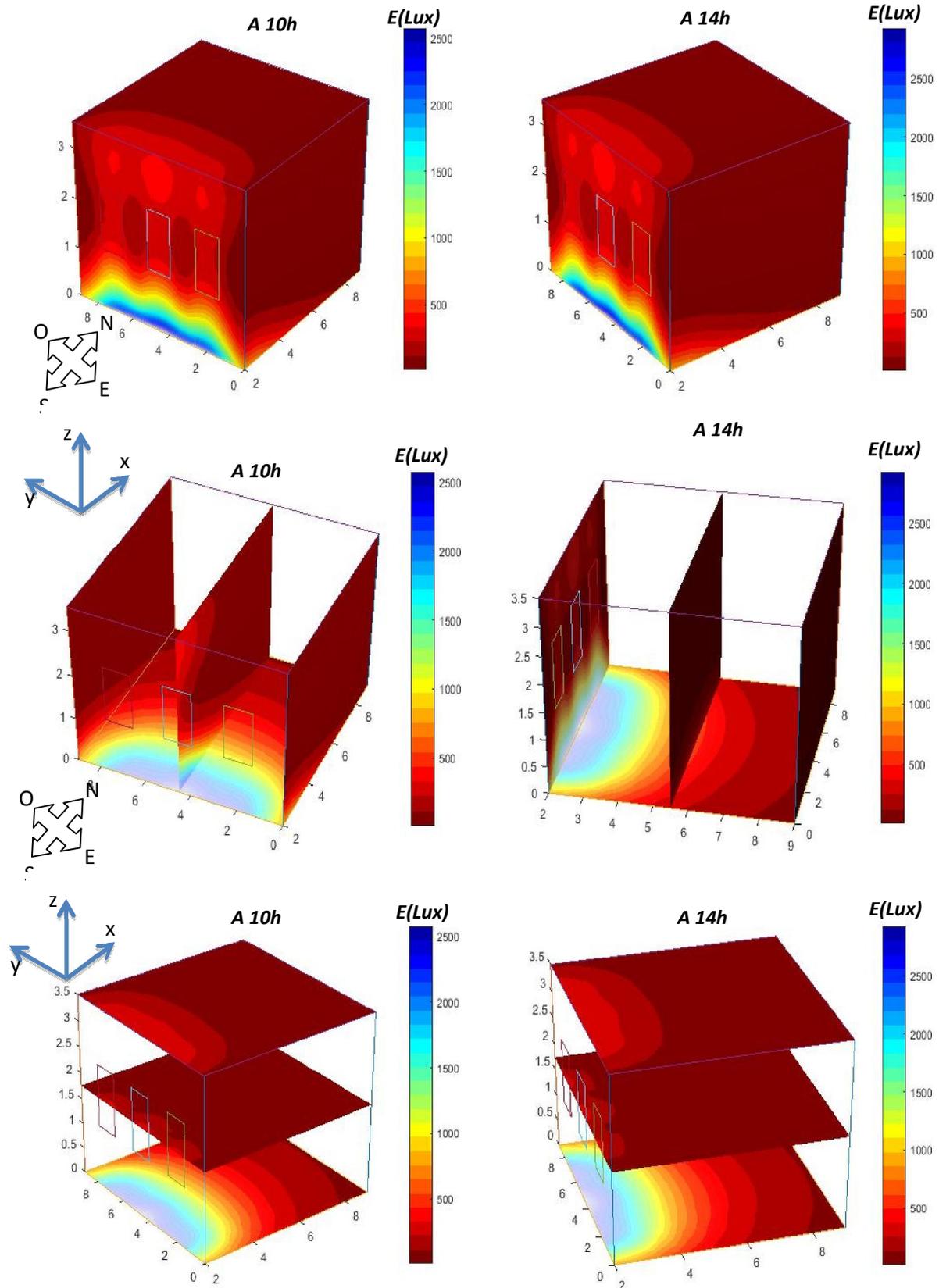


Fig.VI.8. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars, respectivement à 10h et à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Sud.

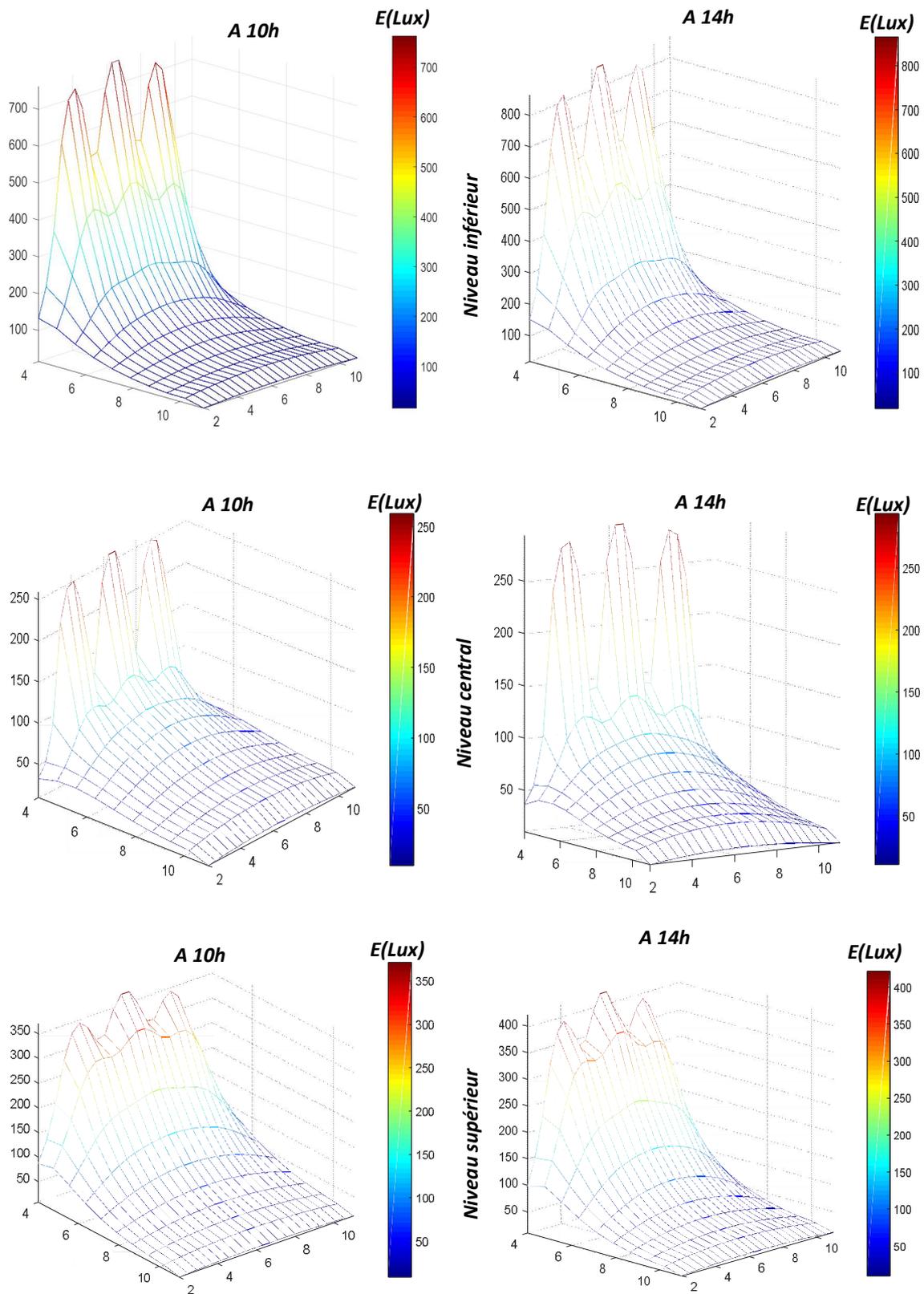


Fig.VI.9. Profil bidimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans des niveaux présentés sont ceux placés : en dessous des fenêtres, au centre des fenêtres et enfin au dessus des fenêtres orientées vers le Sud.

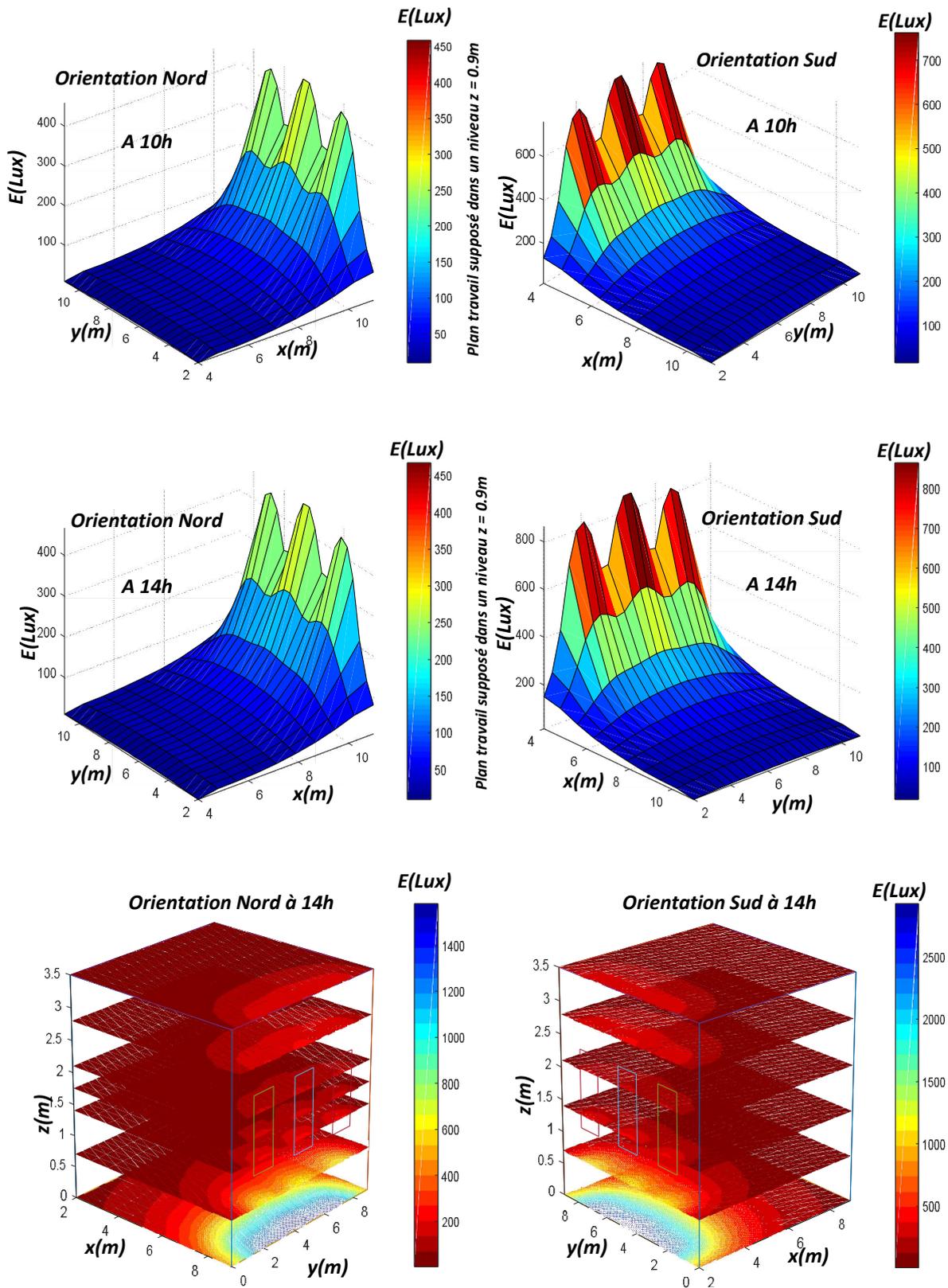


Fig.VI.10. Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9$ m pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans le cas où les fenêtres sont orientées selon les façades Nord et Sud.

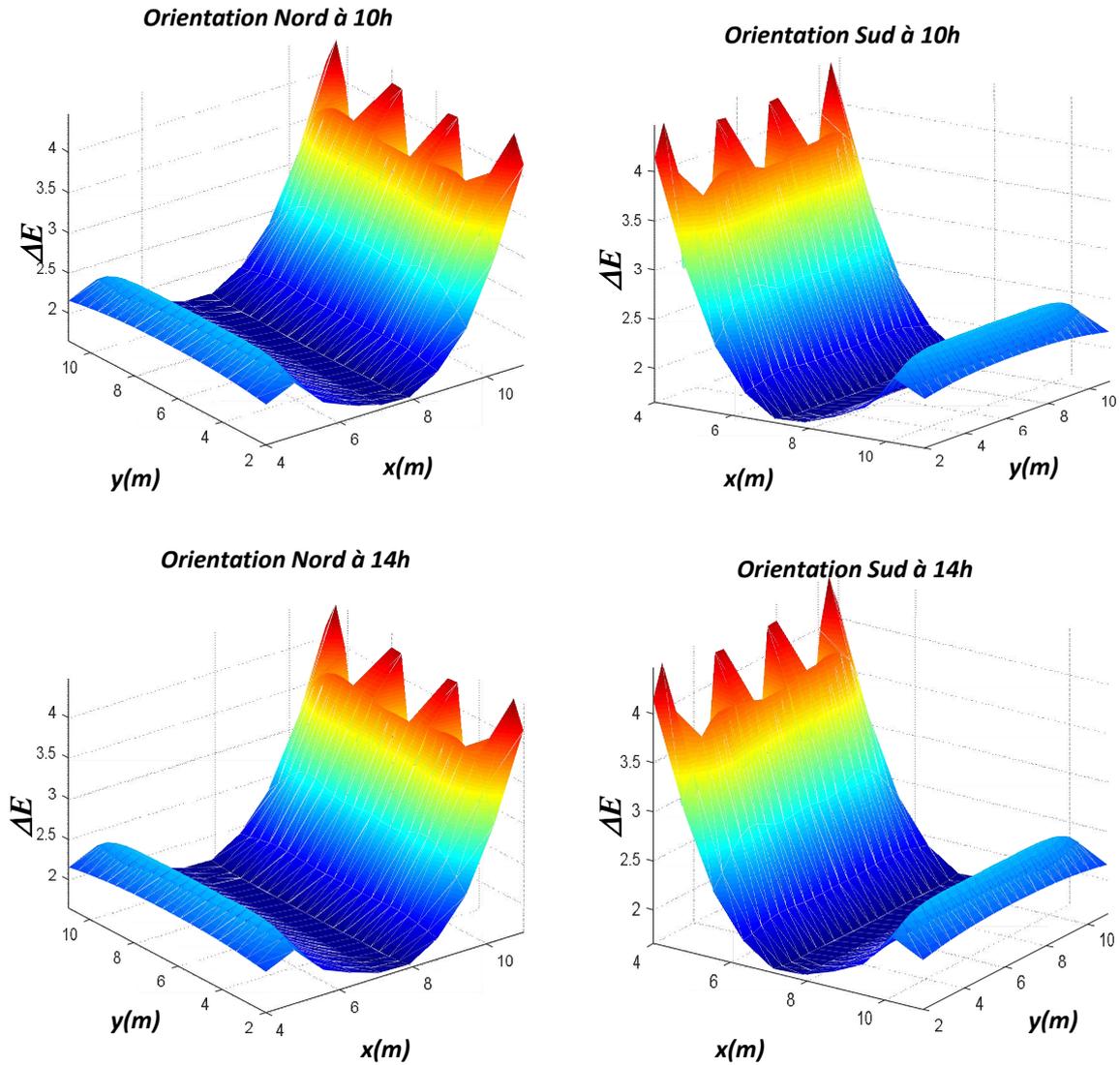


Fig.VI.11. Répartition spatiale du rapport ($\Delta E = \text{Eclaircissement}/\text{Eclaircissement}_{\min}$) selon le plan du travail défini par le niveau $z = 0.9\text{m}$, pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans le cas où les fenêtres sont orientées selon les façades Nord et Sud.

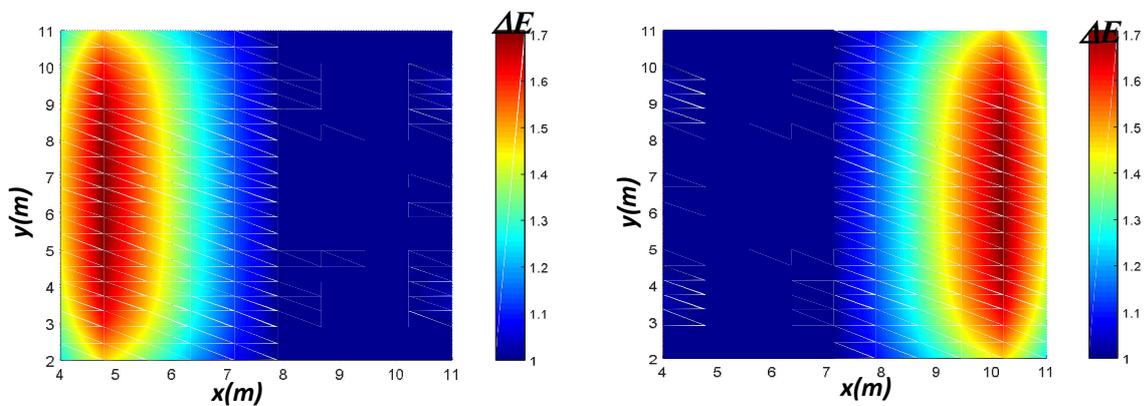


Fig.VI.12. Répartition spatiale du rapport ($\Delta E = \text{Eclaircissement}/\text{Eclaircissement}_{\min}$) selon le plan central portant les fenêtres pour la journée du 21 Mars respectivement à 10 H et à 14 H dans le cas où les fenêtres sont orientées selon les façades Nord et Sud.

Selon les résultats présentés on peut dire que la répartition de l'éclairage à l'intérieur de la salle de classe est fortement non-homogène où elle est intense au voisinage des fenêtres et elle diminue considérablement en s'éloignant de cette façade. Aussi l'éclairage diminue en allant du sol vers le plafond de la salle de classe. L'éclairage intérieur est supérieur dans le cas de l'orientation Sud à celui offert par l'orientation Nord. Pour la journée du 21 Mars, le maximum de l'éclairage atteint les valeurs suivantes :

- Dans le plan du travail adéquat à une salle de classe et qui correspond au niveau $z = 0.9\text{m}$, l'éclairage atteint la valeur maximale de : 459 lux à 10H et de 467 lux à 14h pour l'orientation Nord et la valeur de 762lux à 10h et de 865 lux à 14h pour l'orientation sud.
- Dans le plan situé au centre des fenêtres, le maximum de l'éclairage atteint la valeur de : 156 lux à 10H et de 158 lux à 14h pour l'orientation Nord et de 259lux à 10h et de 294 lux à 14h pour l'orientation sud.
- Dans le plan situé en dessus des fenêtres, le maximum de l'éclairage atteint la valeur de : 223 lux à 10H et de 227 lux à 14h pour l'orientation Nord et de 371lux à 10h et 421 lux à 14h pour l'orientation sud.

Selon la répartition spatiale de l'éclairage sur le plan de travail défini par le niveau $z = 0.9\text{m}$, on peut dire que l'éclairage ne peut atteindre la valeur de 500 lux considérée comme une valeur de référence pour une salle de classe ayant des fenêtres orientées vers le Nord. Pour l'orientation Sud, l'éclairage peut dépasser largement cette valeur. Cependant, cette répartition est fortement non-linéaire où elle varie considérablement aux voisinages des surfaces voisines aux fenêtres. Pour donner une meilleure représentation des résultats, en particulier sur le plan de travail supposé maintenu au niveau $z = 0.9\text{m}$, nous avons présenté sur la Fig.VI.11 la répartition spatiale du rapport $\Delta E = \text{Eclairage} / \text{Eclairage}_{\min}$ où, E : est l'éclairage sur chaque niveau définie par z et dans tout les points du calcul ayant les coordonnées x et y et Eclairage_{\min} : représente le minimum de E. Ce rapport peut refléter la qualité de l'éclairage naturel ainsi que la qualité du confort visuel offert à l'intérieur de la salle de classe, en particulier sur le niveau du plan de travail. Selon les résultats présentés dans le Fig.VI.11 on peut dire que le rapport ΔE varie presque linéairement entre les fenêtres et le centre de la salle où il varie entre un maximum de 4 atteint au voisinage des fenêtres et il décroît linéairement pour atteindre la valeur de un au centre de la salle. Ce rapport adopte une

répartition plus uniforme au voisinage de la façade opposée à la façade principale dotée de fenêtres.

VI.1.1.2. Résultats des simulations Pour le Mois de Juin : Nous présentons les résultats des simulations pour la journée du 21 Juin dans le cas où les fenêtres sont placées selon la façade orientée respectivement, vers le Nord et vers le Sud à 10H et à 14H.

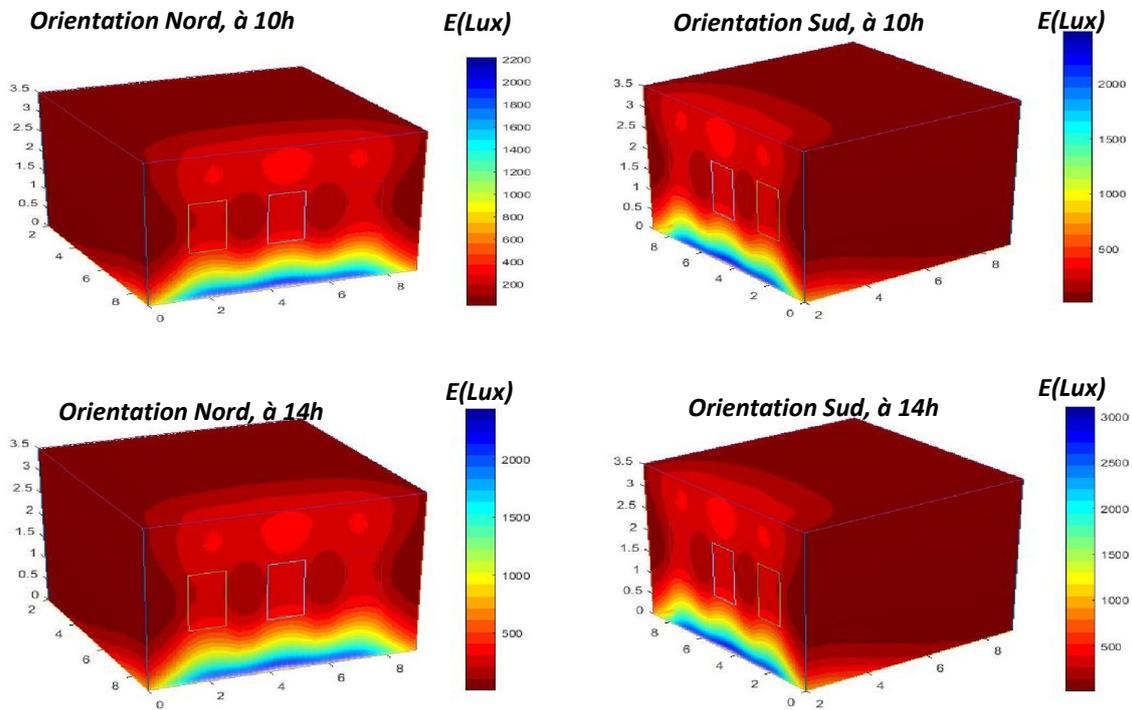


Fig.13. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Juin, respectivement à 10h et à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord et Vers le Sud.

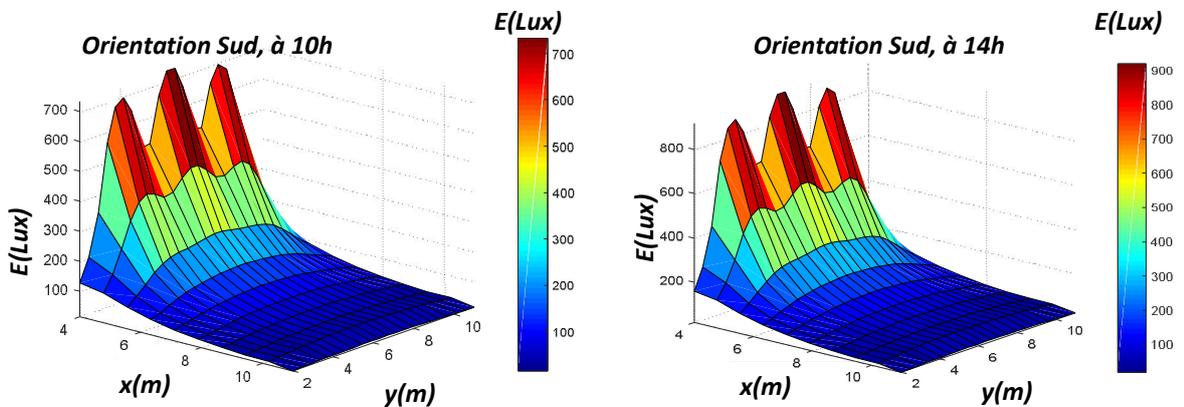


Fig.VI.14. Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9\text{m}$ pour la journée du 21 Juin respectivement à 10 h et à 14 h dans le cas où les fenêtres sont orientées selon la façade Sud.

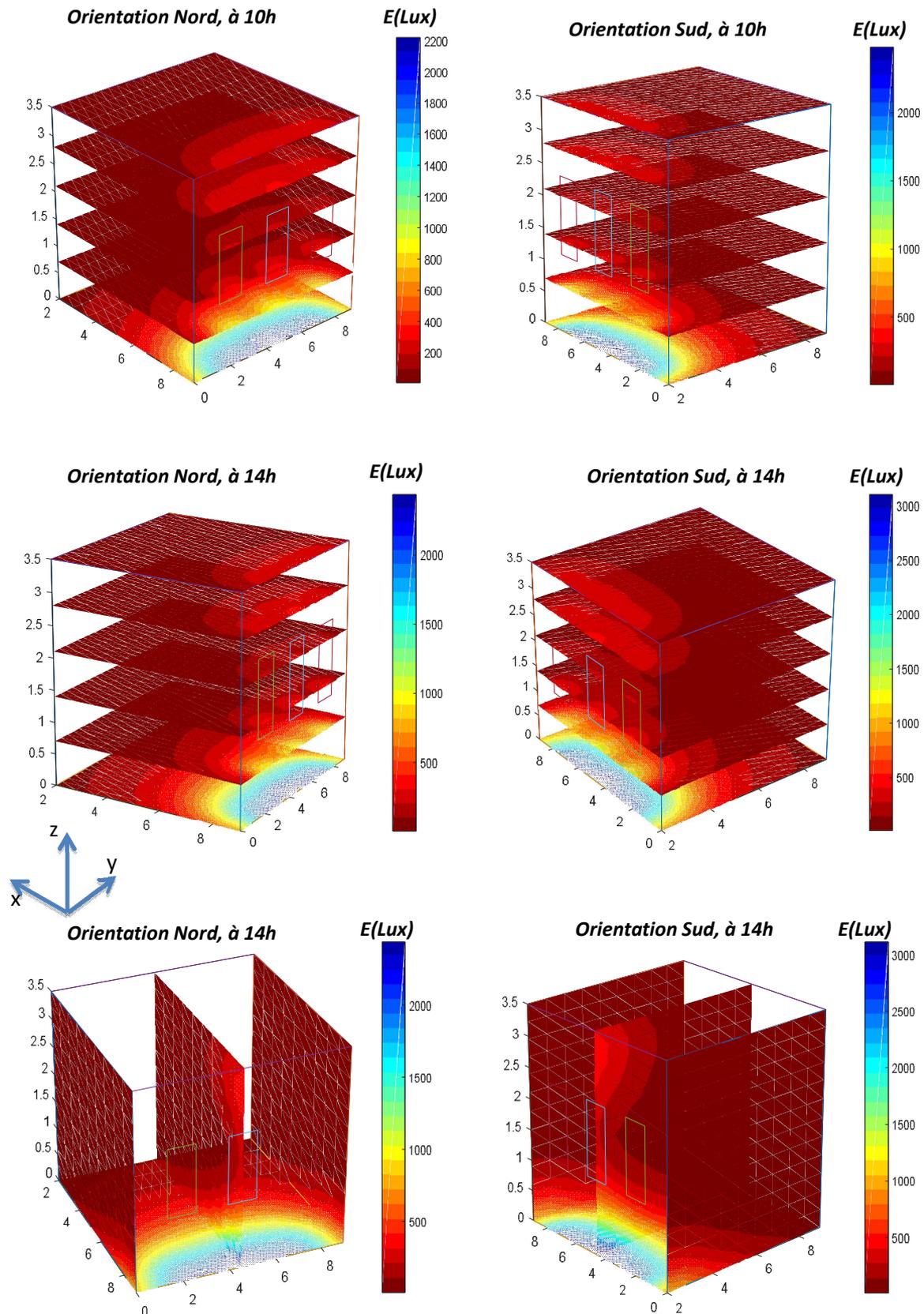


Fig.VI.15. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Juin à 10 h et à 14h où les fenêtres sont placées selon les façades orientées vers le Nord et vers le Sud.

VI.1.1.3. Résultats des simulations Pour le Mois de Septembre : représenté par la journée du 21, la partie ci-dessous présente le comportement des salles de classes vis-à-vis son éclairage naturel où les fenêtres sont orientées respectivement vers le Nord et le Sud à 10 h et à 14h.

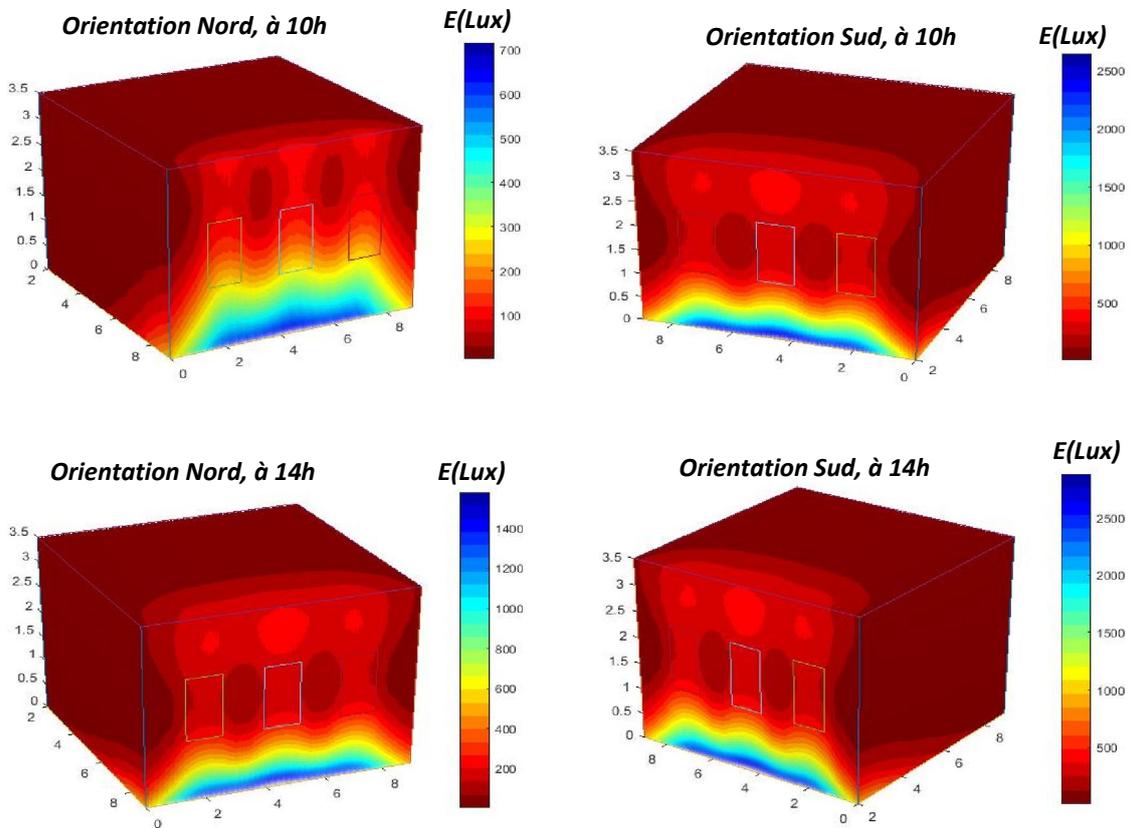


Fig.VI.16. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Septembre, respectivement à 10h et à 14h où les fenêtres sont placées selon la façade orientée vers le Nord et Vers le Sud.

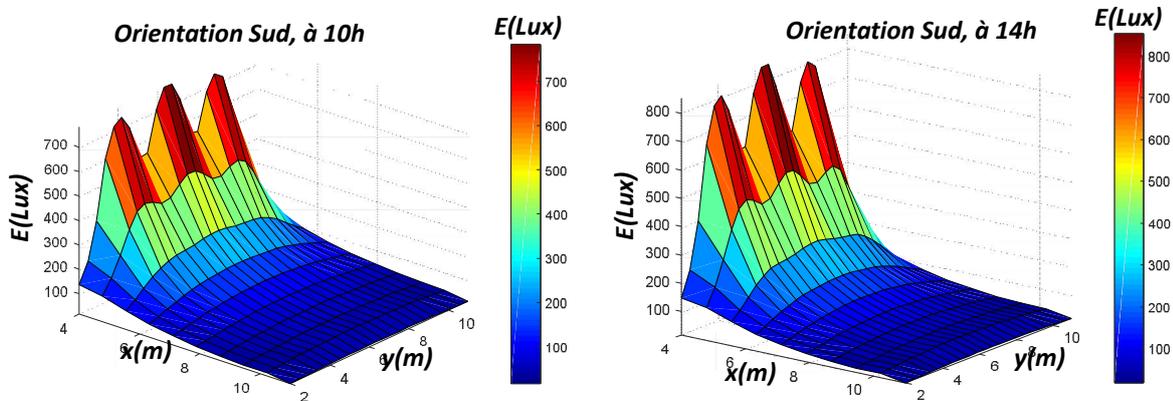


Fig.VI.17. Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9\text{m}$ pour la journée du 21 Septembre respectivement à 10 h et à 14 h dans le cas où les fenêtres sont orientées selon la façade Sud.

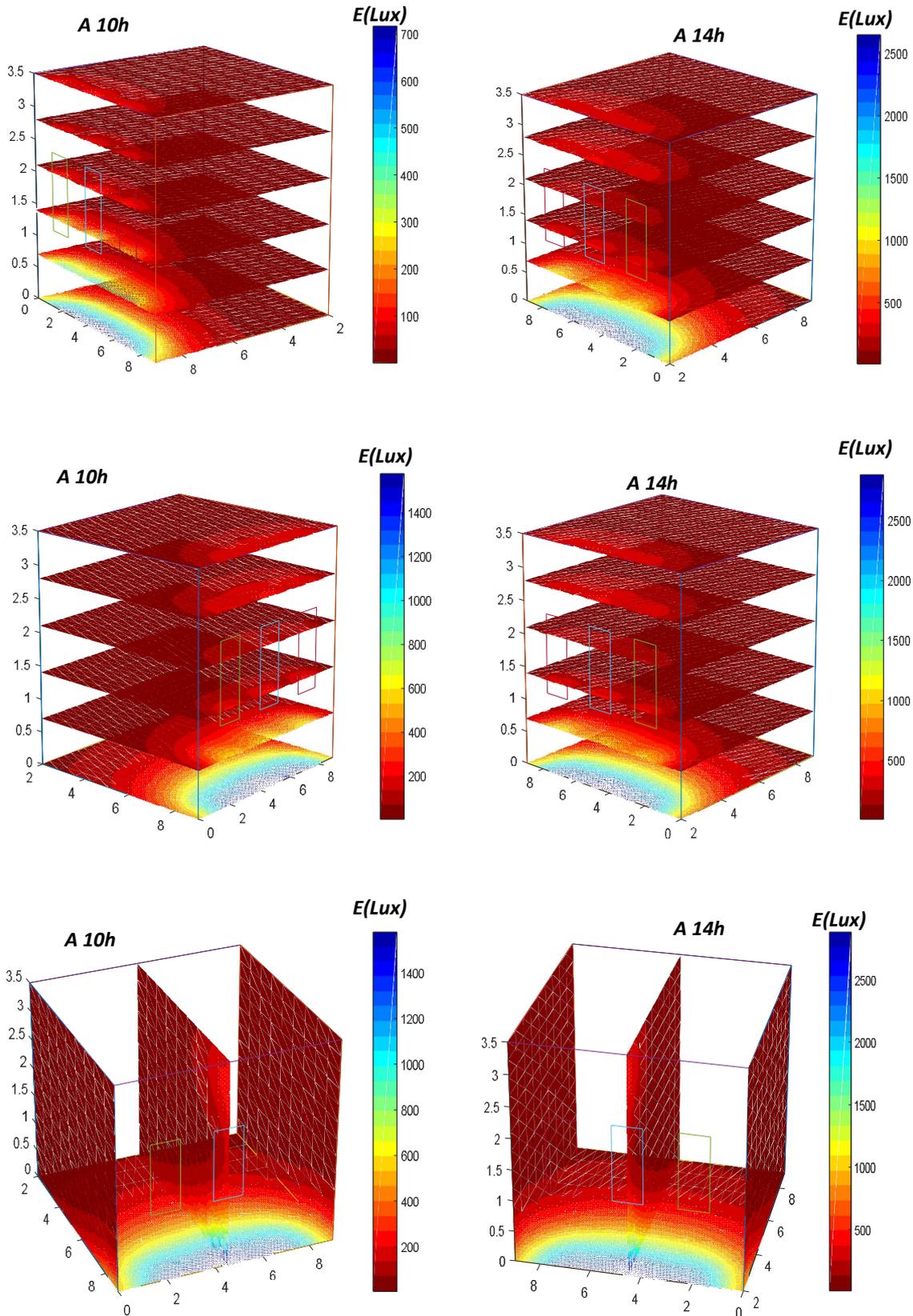


Fig.VI.18. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Septembre à 10h et à 14h où les fenêtres sont placées selon les façades orientées vers le Nord et vers le Sud.

VI.1.1.4. Résultats des simulations Pour le Mois de Décembre : représenté par la journée du 21, la partie ci-dessous présente le comportement des salles de classes vis-à-vis son éclairage naturel où les fenêtres sont orientées respectivement vers le Nord et le Sud à 10 h et à 14h.

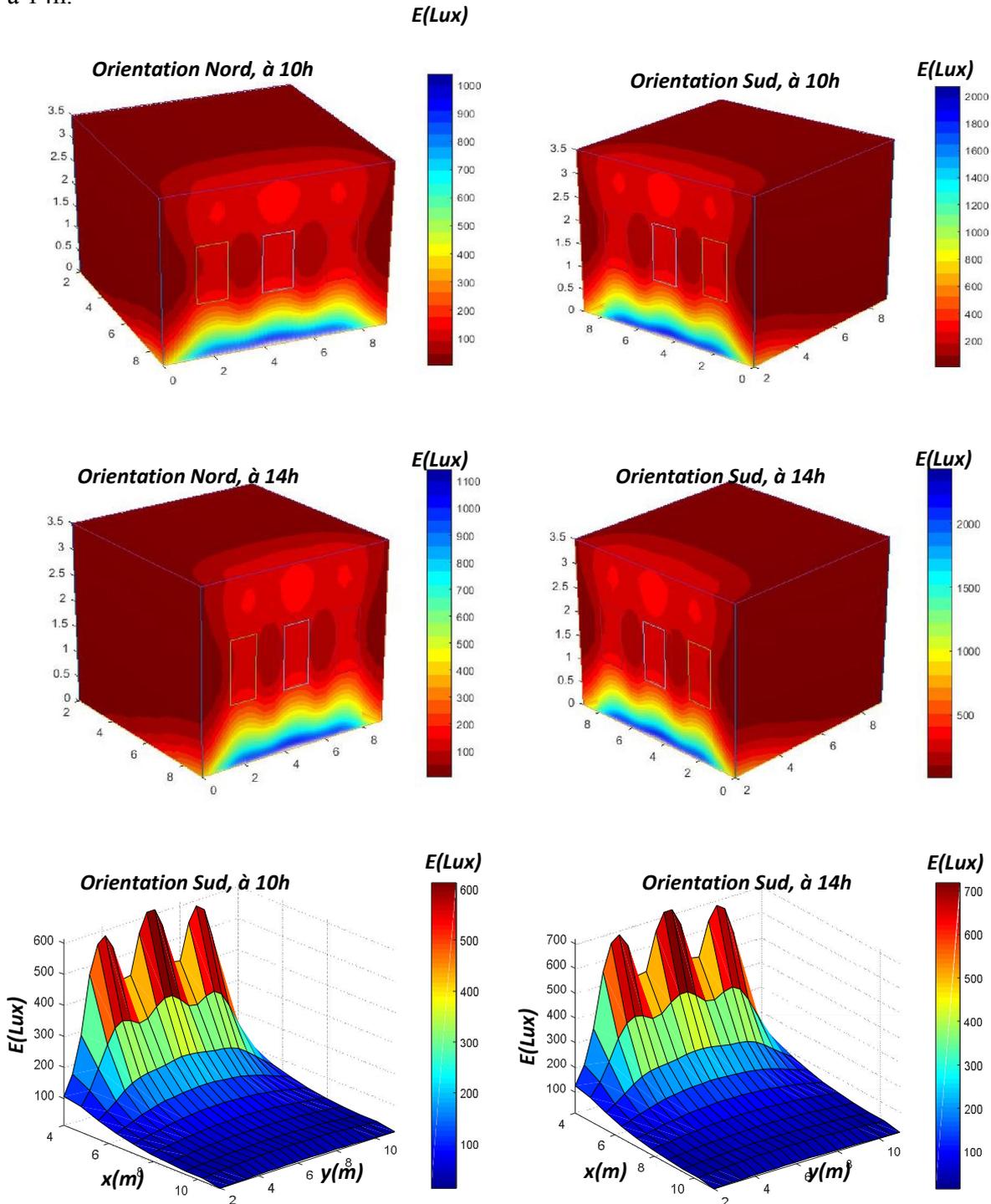


Fig.VI.19. Comparaison entre le profil de l'éclairage au sein d'une salle de classe au niveau du plan de travail supposé à $z = 0.9\text{m}$ pour la journée du 21 Décembre respectivement à 10 h et à 14 h dans le cas où les fenêtres sont orientées selon la façade Sud.

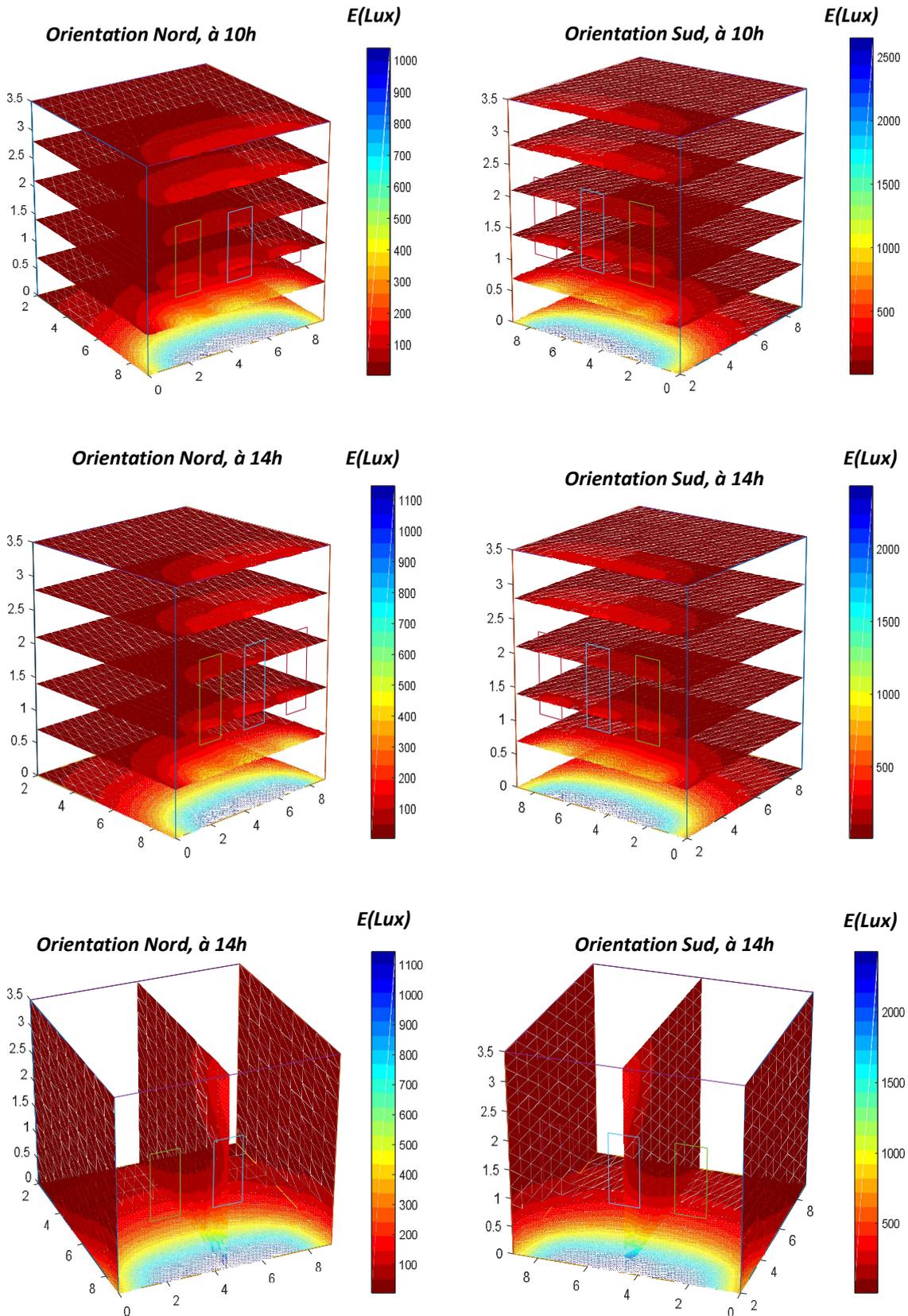


Fig.VI.20. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Juin à 10 h et à 14h où les fenêtres sont placées selon les façades orientées vers le Nord et vers le Sud.

VI.1.1.5. Interprétations des résultats des simulations présentées :

Les résultats présentés ci-dessus présentent la répartition bidimensionnelle et tridimensionnelle de l'éclairement au sein d'une salle de classe dotée de trois fenêtres orientées respectivement, vers le Nord et vers le sud. Ces deux orientations ont été choisies car il s'agit d'orientations qui peuvent offrir les meilleures performances vis-à-vis d'un éclairage naturel en offrant un maximum d'éclairage qui peut être exploité à l'intérieur de la salle. En effet, selon la trajectoire du soleil définie principalement par l'angle azimutal (α_s) et la hauteur (γ_s) on perçoit que le soleil peut offrir un maximum d'éclairement si les fenêtres de la salle de classe seront orientées vers le sud où il sera en exposition directe avec la façade principale dès les premières heures de la matinée avec des angles azimutaux $\alpha_s > 90^\circ$ (Voir Tab.VI.2.).

Selon les résultats présentés on peut dire que l'éclairement dépend de l'heure et de l'orientation de la façade principale portant les ouvertures de la salle de classe. En effet, l'éclairement accroit considérablement de 10H à 14H et il atteint son maximum pour le cas où la façade principale est orientée vers le Sud. Les mois de Mars, Septembre et Décembre semblent les mois les plus influencés par l'orientation de la façade principale et l'heure de la simulation. En effet, les valeurs maximales atteintes sur le plan de travail supposé maintenu à une position $z = 0.9\text{m}$ sont :

- **Pour le mois de Mars** : l'éclairement maximal atteint un maximum de 459.0476 Lux à 10h et de 467.5643 Lux à 14h pour une orientation vers le Nord et de 762.0995 Lux à 10h et de 865.1957 Lux à 14h pour une orientation vers le Sud, soit un écart d'éclairement entre les deux orientations (Nord et Sud) de 303.0519 Lux à 10h et de 397.6314 Lux à 14h.

- **Pour le mois de Juin** : le maximum d'éclairement atteint une valeur de 656.9287 Lux à 10h et de 721.4601 Lux à 14h pour le cas où la façade principale est orientée vers le Nord et de 733.5422 Lux à 10 h et de 920.0609 Lux à 14h pour le cas où la façade principale est orientée vers le Sud, soit un écart d'éclairement entre les deux façades (Nord et Sud), de 76.61 Lux à 10h et de 198.60 Lux à 14H

- **Pour le mois de Septembre** : l'éclairement maximal atteint sur le plan de travail est de 370.7681 Lux à 10h et de 466.9660 Lux à 14h pour une orientation vers le Nord alors qu'il est de 783.4805 Lux à 10 h et de 852.7915 Lux à 14h pour une orientation vers le Sud, soit un écart de 412.71 Lux à 10 h et de 385.82 Lux à 14h.

- **Pour le mois de Décembre** : pour une orientation Nord, le maximum atteint la valeur de 852.7915 Lux à 10h et de 338.7117 Lux à 14h. Pour l'orientation Sud, le maximum d'éclairement atteint la valeur de 612.4813 Lux à 10h et de 718.8033 Lux à 14h, soit un écart de 240.3102 Lux à 10h et de 380.0916 Lux à 14h.

Tab.VI.2. Les angles déterminants la position du soleil pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et enfin le 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h.

<i>Jour / heure</i>	<i>21 Mars à 10h</i>	<i>21 Juin à 10h</i>	<i>21 Septembre à 10h</i>	<i>21 Décembre à 10h</i>
<i>angle azimutal (α)</i>	122.94°	97.46°	126.16°	141.98°
<i>la hauteur (γ)</i>	38.52°	53.76°	41.04°	21.09°
<i>Le jour, l'heure :</i>	<i>21 Mars à 14h</i>	<i>21 Juin à 14h</i>	<i>21 Septembre à 14h</i>	<i>21 Décembre à 14h</i>
<i>angle azimutal (α)</i>	211.34°	242.56°	216.32°	202.14°
<i>la hauteur (γ)</i>	51.31°	69°	49.75°	28.35°

Selon les résultats présentés, on peut dire que l'éclairement décroît considérablement en allant de la façade principale vers la façade en face et en allant du sol de la salle de classe vers le plafond de la salle. Cette décroissance est très importante et elle crée des différences en éclairage d'un point à un autre et d'un plan à un autre.

Pour l'ensemble des mois présentés, la valeur optimale de l'éclairement (Eclairement de 500 Lux) sur quelques points du plan de travail est atteinte. Cependant, le profil de l'éclairement caractérisé par une répartition fortement non-linéaire en particulier, aux voisinages des ouvertures de la salle de classe. Dans ces conditions, les occupants de cet espace, en particulier les apprenants et selon leurs emplacements, seront confrontés à des conditions d'éclairage non-confortables caractérisées par des intensités trop faibles ou trop fortes. Les conditions d'éclairage sont mal adaptées qui peuvent provoquer dans le temps, une fatigue visuelle accompagnée de troubles visuels et d'une sensation d'inconfort vis-à-vis des performances visuelles présentes et qui proviennent principalement d'un éclairage purement naturel. La répartition non-homogène de l'éclairement à l'intérieur d'une salle de classe dans les conditions présentées ne contribue en aucun cas à l'amélioration du confort visuel à l'intérieur de la salle de classe. Outre cette mauvaise répartition, le niveau d'éclairement offert est considéré comme trop faible pour une salle de classe sauf sur une faible zone où l'éclairement peut atteindre des valeurs acceptable entre 300 Lux et 500 Lux.

En conclusion on peut dire que selon les conditions présentées, seul l'éclairage naturel ne peut offrir le confort visuel au sein d'une salle de classe dotée de trois fenêtres, réparties sur une seule façade, où la répartition est fortement non-homogène, de plus, le niveau d'éclairage à l'intérieur de la salle de classe est considéré comme trop faible pour assurer un confort visuel et adéquat à une activité d'enseignement et d'apprentissage.

VI.1.2. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR UNE SALLE DE CLASSE AYANT SIX FENETRES :

Nous présentons dans la partie ci-dessous les résultats des simulations de l'éclairage naturel au sein d'une salle de classe dans les mêmes conditions précédentes mais pour le cas d'une salle de classe ayant six fenêtres réparties sur deux façades orientées respectivement vers le Nord et vers le Sud. Chacune des façades porte trois fenêtres de même dimensions et ayant les mêmes propriétés physiques tels-que, le coefficient de transmission du vitrage. Les résultats des simulations qui traduisent le comportement de la salle de classe vis-à-vis d'un éclairage purement naturel sont présentés dans les Fig.VI.21-23. Selon les résultats présentés on peut dire que l'éclairage naturel offert, dans le cas d'une configuration bilatérale des fenêtres où elle seront réparties en deux façades juxtaposées, a été considérablement modifié et amélioré avec un profil plus homogène et un niveau d'éclairage plus important est adéquat à une salle de classe. En effet, selon les résultats présentés on peut dire :

Pour l'ensemble des mois (Mars, Juin, Septembre et Décembre), la tâche solaire occupe une portion beaucoup plus importante que celle d'une salle de classe ayant des fenêtres réparties sur une seule façade (le cas unilatérale). Cette tâche se répartie à l'intérieur de la salle de classe pour couvrir l'ensemble des plans verticaux et horizontaux avec des différences de niveau d'éclairage moins importantes et plus homogènes comparées à celles d'une conception basée sur une répartition des fenêtres unilatérale. Le sol de la salle de classe est parfaitement éclairé avec des niveaux d'éclairage modérés. Dans les conditions des simulations présentées et selon le mois de simulation, le niveau d'éclairage sur le plan de travail supposé maintenu sur un niveau $z = 0.9$ m atteint des valeurs importantes par rapport à celles d'une salle de classe ayant des fenêtres unilatérales, pour le mois de Mars par exemple, le niveau d'éclairage atteint un minimum de 100 Lux au centre de la salle de classe et un maximum de 800 Lux aux voisinages de la façade Sud.

Outre que la valeur de l'éclairage ainsi que sa répartition, un autre paramètre quantitatif peut refléter correctement la qualité du confort visuel à l'intérieur d'un espace et il peut répondre par prédiction, si on peut atteindre la satisfaction des occupants vis-à-vis d'un éclairage purement naturel. Il s'agit du facteur de lumière du jour (FLJ) défini par le rapport entre l'éclairage naturel intérieur reçu en un point d'un espace intérieur (généralement le niveau du sol de l'espace ou le plan du travail de cet espace) et l'éclairage naturel à l'extérieur de cet espace sous conditions d'un site parfaitement dégagé par un ciel couvert. Pour prendre en considération ces conditions particulières liées à un ciel dégagé, nous avons introduit le type de ciel-1 (Darula, 2002) déterminé dans le modèle développé par les coefficients a, b, c, d et e avec $a = 4$, $b = -0.70$, $c = 0$, $d = -1$ et $e = 0$ (Darula, 2002). Les valeurs du FLJ sont indépendantes de l'orientation des ouvertures de la salle de classe, de la saison et de l'heure du jour. Les résultats représentant la répartition du FLJ sont présentés dans la Fig.VI.24. Pour interpréter les résultats représentant la répartition du FLJ à l'intérieur de la salle, nous avons utilisé les valeurs présentées dans le Tab.VI.3 qui résume selon l'emplacement de la zone considérée, la relation entre les valeurs du FLJ et l'impression de la clarté, l'impression visuelle à l'intérieur de l'espace et enfin l'ambiance ressentie.

Selon les résultats des simulations présentées dans la Fig.VI.24, on constate que le FLJ adopte un profil parfaitement symétrique selon l'axe des (X) placé au centre de la salle de classe, c'est-à-dire à $x = 3.5\text{m}$. Cette symétrie est due au profil de l'éclairage à l'intérieur de la salle de classe qui adopte aussi un profil parfaitement symétrique par rapport à l'axe de symétrie placé au centre de la salle de classe ($x = 3.5\text{m}$). Cette symétrie des deux profils, le FLJ et l'éclairage, est due principalement à la symétrie de la conception de la salle de classe d'une part, et au nombre des fenêtres réparties de façon identique entre les deux façades N et S en d'autre part. Aussi, Ce profil est dû aux conditions du calcul de l'éclairage sous un ciel couvert, où l'orientation, le jour et l'heure de la simulation n'ont aucune influence sur la valeur de l'éclairage. Outre ces conditions, la salle de classe est dotée de six fenêtres, identiques et ayant les mêmes propriétés géométriques et physiques, réparties sur deux façades le long de l'axe des (Y) offrant ainsi, un profil d'éclairage parfaitement symétrique selon l'axe des (X). Les valeurs du FLJ varient entre un maximum de 17.037% et un minimum de 3%. La valeur maximale du FLJ est atteinte au voisinage des ouvertures et la valeur minimale du FLJ est atteinte dans des zones lointaines de la façade principale, en particulier au centre de la salle de classe. Selon les valeurs du FLJ présentées, on constate que le FLJ varie fortement selon l'axe des (X). Cette variation est moins

importante au long de l'axe des (Y) c'est-à-dire l'axe portant les fenêtres et qui représente les deux façades principales de la salle de classe (la façade Nord et la façade Sud). Il devient alors, très favorable de placer les occupants de la salle de classe selon des rangées placées le long de l'axe des (Y), c'est à dire le long de la façade principale portant les fenêtres. Ceci dans le but d'éviter le problème d'éblouissement qui peut provenir de l'emplacement des fenêtres et d'éviter la variation importante de l'éclairage le long de cet axe.

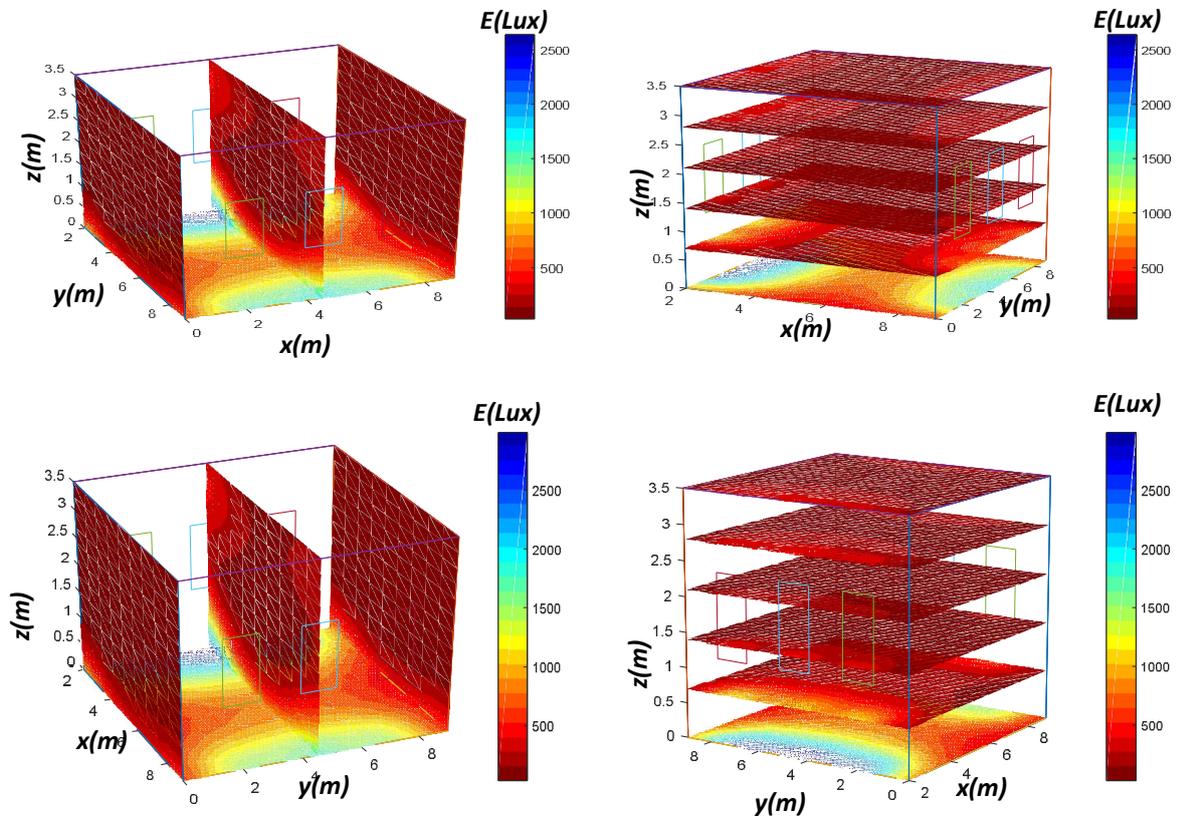


Fig.VI.21. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour la journée du 21 Mars, respectivement à 10h et à 14h pour une configuration bilatérales.

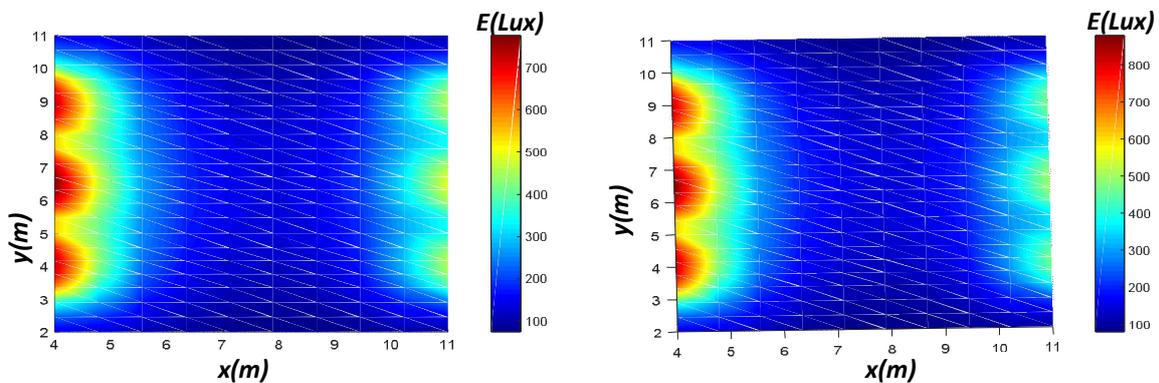


Fig.VI.22. Répartition bidimensionnelle de l'éclairage sur le plan de travail pour la journée du 21 Mars, respectivement à 10h et à 14h pour une configuration bilatérales.

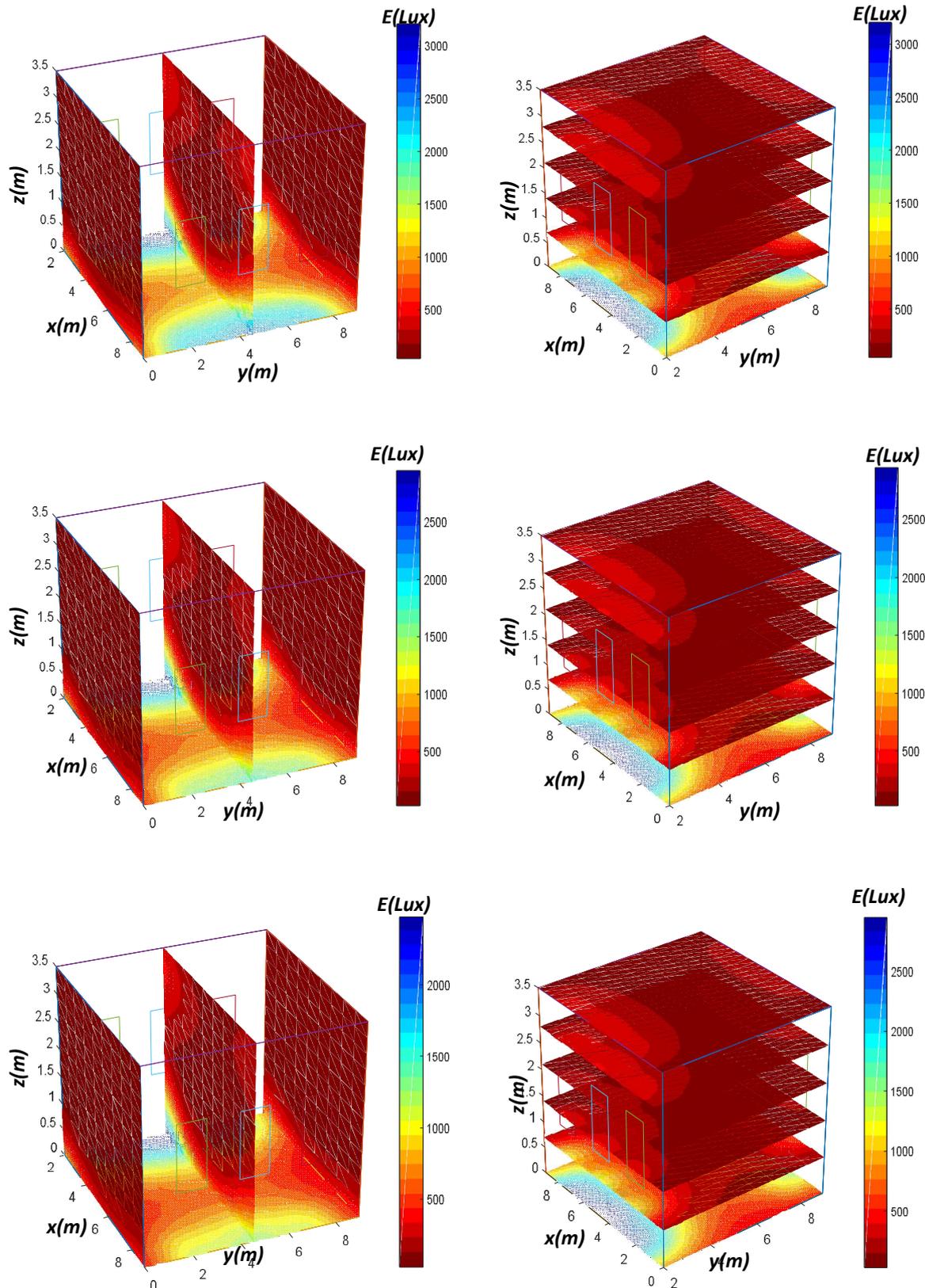


Fig.VI.23. Répartition tridimensionnelle de l'éclairage au sein d'une salle de classe pour les journées du 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h pour une configuration bilatérales.

Tableau VI.3. l'emplacement de la zone considérée, impression de clarté, impression visuelle du local et enfin ambiance en fonction du facteur de lumière du jour (Magali & Arnaud).

FLJ	- de 1 %	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12 %
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très élevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance environ 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			A proximité des fenêtres ou sous des lanternes		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone semble être séparée de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		

Pour donner une meilleure vision sur l'impression de la clarté, l'impression visuelle ainsi que l'ambiance ressentie à l'intérieur de la salle de classe selon les valeurs du FLJ. Et dans le but de représenter la qualité de l'éclairage naturel offerte dans des portions de la salle de classe, nous avons subdivisé la surface totale du plan de travail en quatre zones principales, cette subdivision dépend de la valeur du FLJ qui doit refléter convenablement la qualité de l'éclairage naturel offerte dans chacune des zones considérées et il peut être interprété l'ambiance ressentie dans chacune des zones. Chaque zone est déterminée par les coordonnées x et y et un niveau z fixé à **0.9m**. Grâce à cette division, on peut aussi représenter les résultats obtenus en forme de portion, où chaque portion reflète convenablement la qualité et l'ambiance ressentie vis-à-vis d'un éclairage purement naturel.

La première zone située au voisinage des façades principales (Nord et Sud), c'est-à-dire aux voisinages des fenêtres de la salle de classe. Cette zone s'étale sur deux endroits différents définis respectivement par $x = 0\text{m}-0.5\text{m}$ et $x = 6.5\text{m}-7\text{m}$. La deuxième zone qui s'étale aussi sur deux endroits différents définis respectivement par $x = 0.5\text{m}-1.35\text{m}$ et $x = 5.65\text{m}-6.5\text{m}$. Pour la troisième zone, elle s'étale entre deux régions limitées par $x = 1.35\text{m}-3\text{m}$ et $x = 4\text{m}-5.65\text{m}$. Enfin la quatrième zone représentée seulement par une seule région qui s'étale sur une distance $x = 3\text{m}-4\text{m}$. Cette zone représente la région centrale de la salle de classe. Dans cette subdivision, la hauteur de la salle de classe correspond au plan de travail supposé maintenu à $z = 0.9\text{m}$. Pour la largeur représentée par y, elle varie entre 0m et 9m, elle s'étale alors le long des deux façades principales.

- **La première zone (Zone I)** : Répartie sur deux endroits différents, cette zone s'étale sur une surface limitée par $x = 0\text{m} - 0.5\text{m}$ et $x = 6.5\text{m} - 7\text{m}$ (Fig.VI.25). L'emplacement de cette zone est adjacent aux façades principales portant les ouvertures de la salle de classe. Dans cette zone, le FLJ varie entre **11.58%** et **17.037%**. Des valeurs plus faibles du FLJ n'ont pas été prises en compte dans cette zone. Ces faibles valeurs sont localisées aux extrémités de la salle de classe où elles auront une faible influence jugée par leurs faibles taux d'occupation par rapport à la surface totale du plan du travail et selon leur emplacements adjacents qui sera influencé par les conditions d'éclairage offertes et l'ambiance lumineuse présente dans cette zone. Selon les valeurs du FLJ prises en compte dans cette zone (**11.58%** et **17%**), le FLJ est considéré comme très élevé, les occupants placés dans cette zone auront une impression d'être dans un endroit clair à très clair et qui s'ouvre vers l'extérieur. Le risque d'éblouissement dans cette zone est très important, voire inévitable. Cette zone occupe presque une surface de $2 \times (0.5 \times 9) \text{ m}^2 = 9 \text{ m}^2$, soit un taux de **14.2857 %** de la surface totale du plan de travail. Dans cette zone, le FLJ varie considérablement caractérisé entre **11.58%** et **17%** sur une faible distance de 0.5m. ceci reflète aussi la variation importante de l'éclairement sur cette faible distance.
- **La deuxième zone (Zone II)** : de même, cette zone est répartie sur deux endroits différents à l'intérieur de la salle de classe. Le premier endroit s'étend entre $x = 0.5\text{m}$ et $x = 1.35\text{m}$ et le deuxième endroit s'étend sur la même longueur donnée par $x = 5.65\text{m} - 6.5\text{m}$ (Fig.VI.26). Cette zone est considérée comme la zone la plus proche de la première zone caractérisée par des valeurs du FLJ qui varient dans l'ensemble, entre **6.88%** et **10.75%**. d'autres valeurs plus faibles dans cette zone ont été négligées car leur taux d'occupation peut être négligé, ainsi que leur emplacement qui sera influencé par les autres valeurs du FLJ dans cette zone considérée comme importante. Avec les valeurs du FLJ prises en compte (**6.88%** et **10.75%**), on considère que le FLJ dans cette zone est élevé où l'éclairage naturel peut offrir un plan de travail clair, voire même très clairs dans certains points de cette zone. Les élèves ou les occupants de cet espace auront une sensation d'être en liaison avec le milieu extérieur et le risque d'éblouissement dans cette zone est toujours présent. Cette zone est répartie sur une surface de $2 \times (0.85 \times 9) \text{ m}^2 = 15.3\text{m}^2$ où elle occupe un taux **24.2857%** de la surface totale du plan de travail. De même, le FLJ varie considérablement dans cette zone.

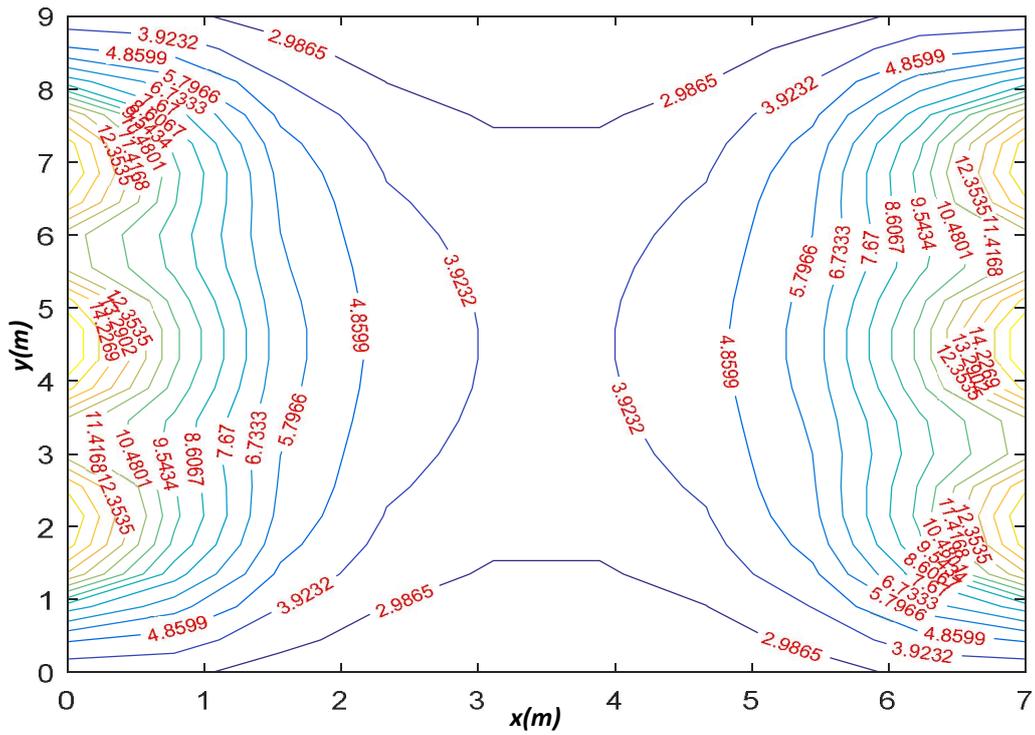


Fig.VI.24. Contours représentant le FLJ sur le plan de travail supposé maintenu au niveau $z = 0.9m$ pour une salle de classe ayant 6 fenêtres réparties sur deux façades (le cas bilatérale).

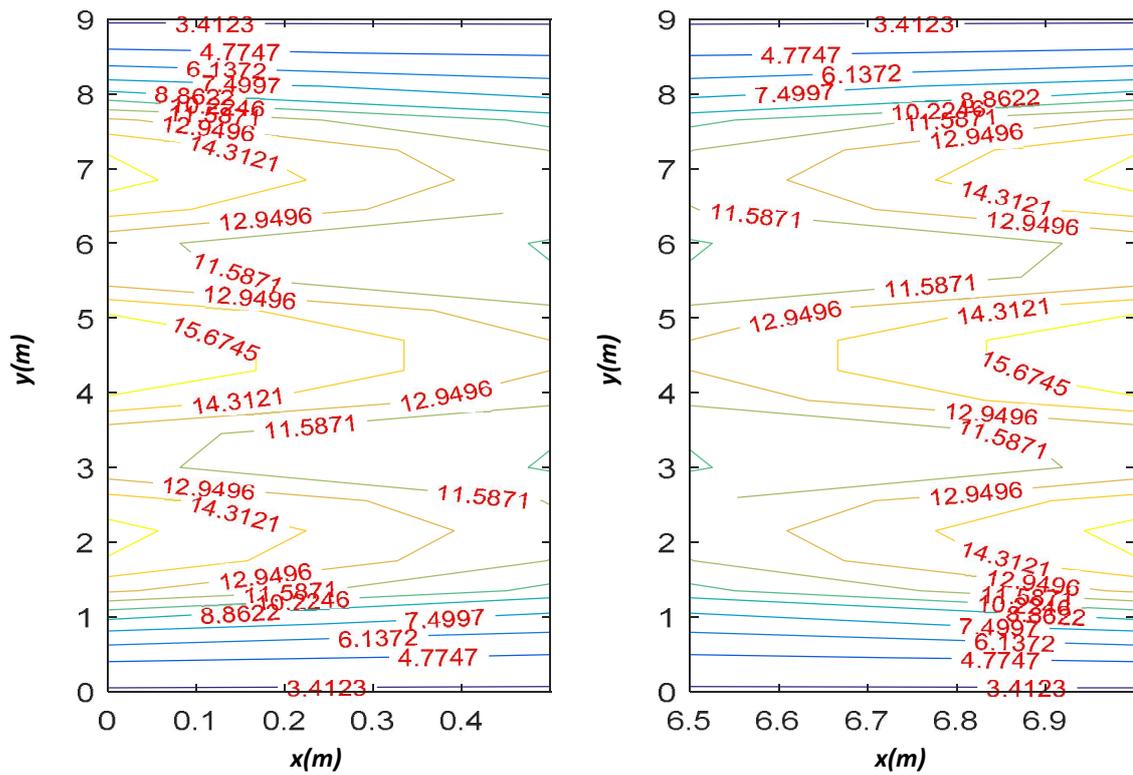


Fig.VI.25. Contours représentant le FLJ dans la zone I.

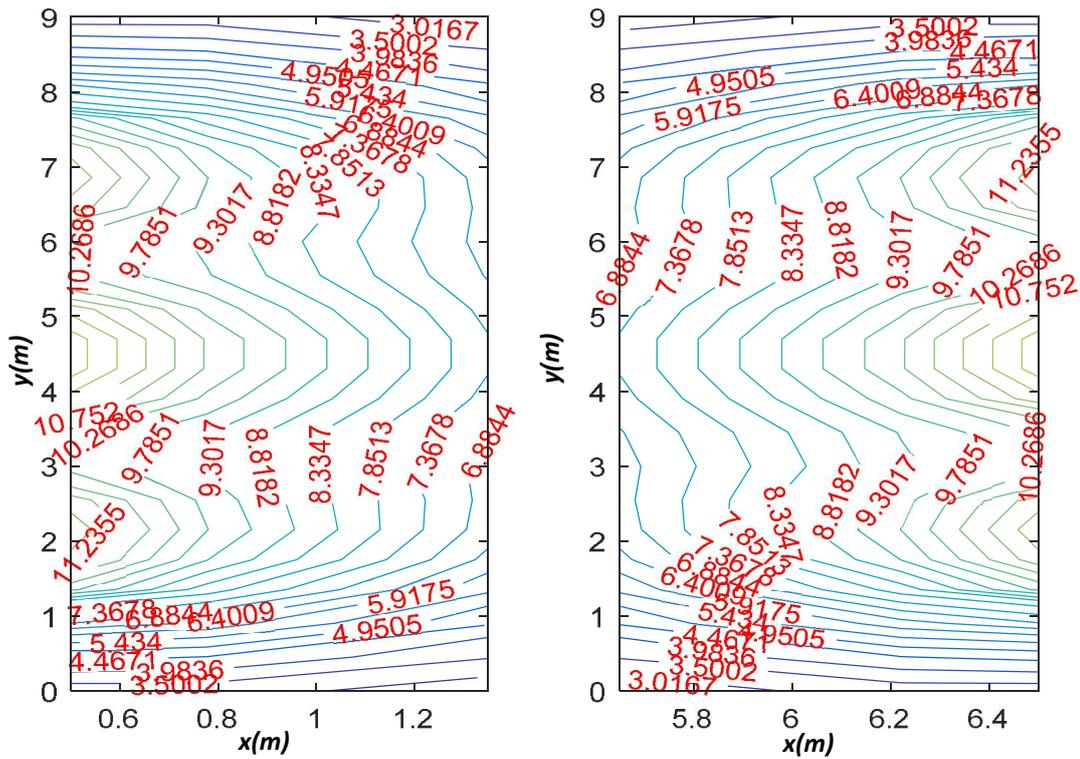


Fig.VI.26. Contours représentant le FLJ dans la zone II.

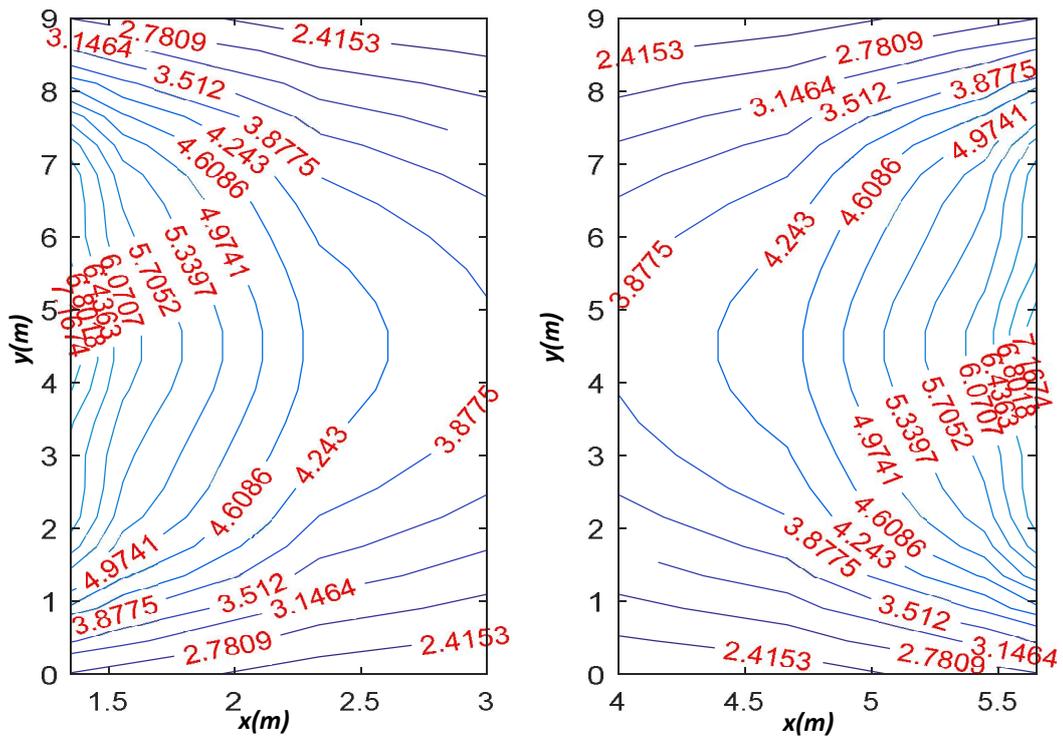


Fig.VI.27. Contours représentant le FLJ dans la zone III.

- **La troisième zone (Zone III)** : Répartie sur deux régions différentes, cette zone est répartie (Fig.VI.27) entre $x = 1.35\text{m}-3\text{m}$ et $x = 4\text{m}-5.65\text{m}$, soit sur une surface de $2 \times (1.65 \times 9) \text{ m}^2 = 29.7\text{m}^2$, avec un taux de **47.1429%** par rapport à la surface totale du plan de travail. Cette zone occupe la plus grande surface comparée aux trois autres zones (Zones I, II et IV). Le FLJ dans cette zone adopte un profil plus uniforme avec des faibles écarts comparés aux écarts en valeurs du FLJ dans les autres zones (zone I et zone II). Ceci reflète aussi l'homogénéité de l'éclairage dans cette zone. Avec des valeurs comprises entre presque **3%** et **7%**, le FLJ dans cette zone est considéré comme moyen, ainsi, l'éclairage naturel répartie à l'intérieur de la salle de classe peut offrir un plan de travail peu éclairé, voir même clair dans quelques points du plan de travail appartenant à cette zone. Les occupants de cet espace auront une sensation d'être en liaison avec le milieu extérieur avec un risque d'éblouissement quasiment nulle.

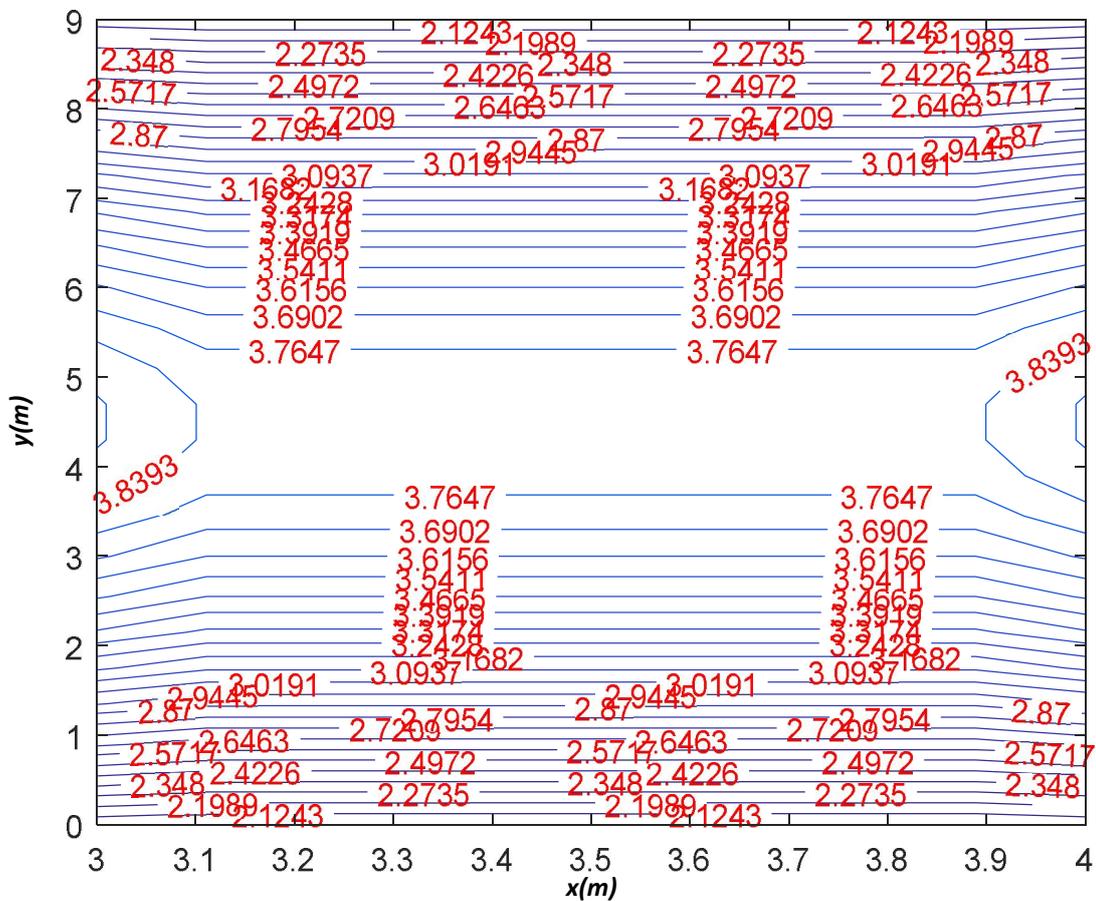


Fig.VI.28. Contours représentant le FLJ dans la zone IV.

- **La quatrième zone (Zone IV)** : Cette zone occupe un taux **14.2857%** de la surface totale du plan de travail. Cette zone est considérée comme la zone centrale est la plus éloignée de la première zone où elle se répartie entre $x = 3\text{m}$ et $x = 4\text{m}$ (Fig.VI.28). Avec un FLJ considéré comme modéré et qui varie entre **2.12%** et **3.92%**, cette zone est considérée comme un peu éclairée et l'espace intérieur semble être isolé et refermé sur lui-même. Le risque d'éblouissement dans cette zone est quasiment nul. Le FLJ dans cette zone adopte le profil le plus uniforme, ceci peut être traduit par l'homogénéité de l'éclairage intérieur dans cette zone.

Grâce aux valeurs du FLJ présentées, nous avons pu distinguer quatre zones différentes selon le plan du travail de la salle de classe maintenu dans le niveau $z = 0.9\text{m}$. Cependant et dans le but de donner une meilleure analyse de la qualité du confort visuel ainsi que l'ambiance ressentie, il est nécessaire d'accompagner aux valeurs du FLJ, les valeurs de l'éclairage dans chacune des zones distinguées. En effet, seul le FLJ ne peut prévoir correctement la qualité du confort visuel qui dépend aussi de la valeur de l'éclairage offert à l'intérieur de la salle de classe. Le FLJ est déterminé sous conditions d'un ciel couvert alors que l'éclairage naturel dépend non seulement de l'état du ciel, mais aussi de l'emplacement du projet, de l'orientation des façades principales ayant les ouvertures, du jours et même de l'heure de la simulation. Pour cela, nous avons présenté dans les figures Fig.VI.29-32 les valeurs de l'éclairage dans le plan du travail de la salle de classe dans chacune des zones considérées (les quatre zones distinguées selon les valeurs du FLJ).

Dans les conditions présentées, les occupants de la salle de classe se trouvent confrontés à des conditions d'éclairage différentes selon leurs emplacements dans chacune des quatre zones considérées. Dans certaines zones, les occupants seront aussi confrontés à des sources d'inconforts visuels. En effet, Si ces derniers seront placés aux voisinages des façades principales portant les fenêtres (façade Nord et façade Sud), les occupants seront face à des sources de luminance ayant un trop fort contraste de luminance, le risque d'éblouissement dans cette zone est très élevé avec un FLJ qui varie entre **11.58%** et **17%**. Ajoutée à ces conditions considérées comme les plus défavorables pour un éclairage sain et confortable, la variation importante de l'éclairage dans cette zone est considérable vu le profil fortement non linéaire de l'éclairage aux voisinages des fenêtres. Cette zone (Zone I) qui s'étale sur une distance de **0.5m** depuis les façades principales (la façade Nord et la Façade Sud) offre un

éclairage qui varie entre une valeur minimale de **570 Lux** et une valeur maximale de **851.8501 Lux** pour atteindre un écart d'éclairement de **285 Lux** (Fig.VI.29). Cette différence d'éclairement maintenue sur une faible distance de **0.5m** est considérée comme importante. Cette zone qui s'étale le long des deux façades et sur une portion estimée à **14.2857 %** de la surface totale du plan de travail peut contenir des niveaux d'éclairement adéquats à un plan de travail d'une salle de classe (entre **350 Lux** et **500 Lux**). Aussi les occupants placés dans cette zone auront une sensation d'être en liaison avec le milieu extérieur. Cependant, le risque d'éblouissement dans cette zone avec un profil d'éclairement fortement non-homogène peut nuire les occupants et ne contribue en aucun cas à améliorer les conditions du confort visuel. Des faibles valeurs d'éclairement apparaissent aux extrémités de la salle, leurs influences sur la qualité d'éclaire offerte sont non-considérables. En conséquent, on peut dire que l'éclairage naturel n'offre aucun confort aux individus placés dans cette zone et ne contribue en aucun cas présenté, à l'amélioration des conditions et des performances qui doivent être présentent pour améliorer les conditions d'enseignement et d'apprentissage.

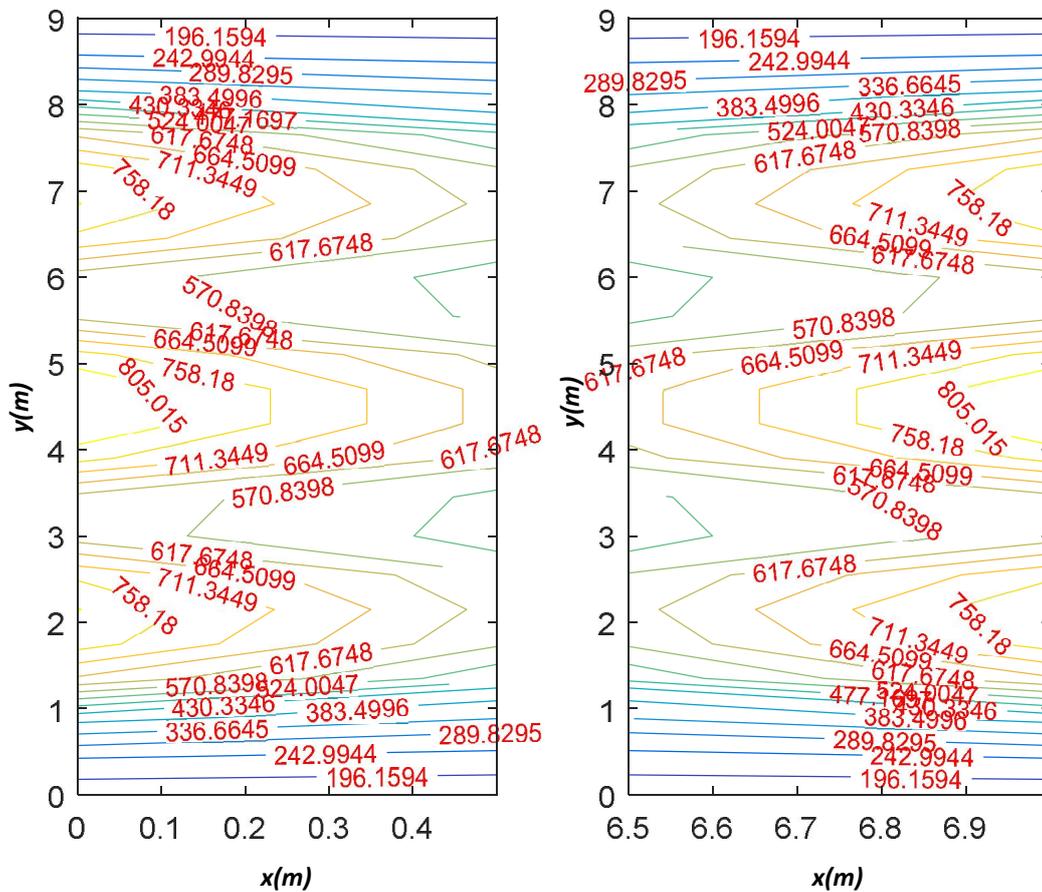


Fig.VI.29. Contours représentant la répartition de l'éclairement dans la zone I.

Si les occupants de la salle de classe seront renvoyés vers des zones plus éloignées des façades principales, en particulier, vers la zone II, l'éclairage offert adopte toujours un profil non-homogène mais avec des intensités plus faibles à celles présentes dans la zone I. Avec un facteur de lumière du jour considéré comme élevé et qui varie entre **6.88%** et **10.75%**, l'éclairage naturel dans ces conditions offre un éclairage sur le plan de travail qui varie presque entre **300 Lux** et **513 Lux** (Fig.VI.30). Malgré ces valeurs, considérées comme optimales dans un plan de travail d'une salle de classe, on peut dire que cette zone offre certaines conditions d'inconfort visuel qui sont dues principalement, à l'inhomogénéité de l'éclairage dans cette zone qui s'étale sur une faible longueur de **1m** d'une part et d'autre part, à la présence du risque d'éblouissement dans cette zone. Cette zone est répartie sur une portion de **15.3m²**, soit sur un taux **24.2857%** de la surface totale du plan de travail.

La troisième zone (Zone III) qui s'étale sur deux régions différentes et sur la même longueur dans les deux régions définie respectivement par $x = 1.35\text{m}-3\text{m}$ et $x = 4\text{m}-5.65\text{m}$, est caractérisée par un profil d'éclairage plus homogène à celui présent dans les deux autres zones (Zone I et zone II). Avec un facteur de lumière du jour considéré comme moyen et qui varie entre **3%** et **7%**, cette zone offre un éclairage dans l'ensemble qui varie entre **193Lux** et **341 Lux**, soit un écart de presque **148Lux** sur une longueur de 1.65m. Le niveau d'éclairage offert dans cette zone est supposé peu éclairé à clair par rapport à un plan de travail d'une salle de classe. Cette zone considérée comme la zone la plus importante car celle-ci occupe une surface de **29.7m²** avec un taux de **47.1429%** par rapport à la surface totale du plan de travail.

La zone IV répartie sur une seule région placée au centre de la salle de classe est caractérisée par un profil d'éclairage le plus homogène. Dans cette zone, l'éclairage varie presque entre **109 Lux** et **191 Lux** soit un écart de presque de **80 lux** dans une zone qui s'étale sur une longueur x de 1 mètre. Cette variation est moins importante et s'étale sur une distance plus longue comparée à celle trouvée dans les zones I et II. Cette zone occupe une surface de **18m²**, soit un taux de **14.2857%** de la surface totale du plan de travail. Avec un facteur de lumière du jour modéré et qui varie entre **2.12%** et **3.92%**, cette zone offre un niveau d'éclairage peu faible pour un plan de travail d'une salle de classe donnant ainsi, une impression d'avoir un éclairage insuffisant avec une surface peu éclairée.

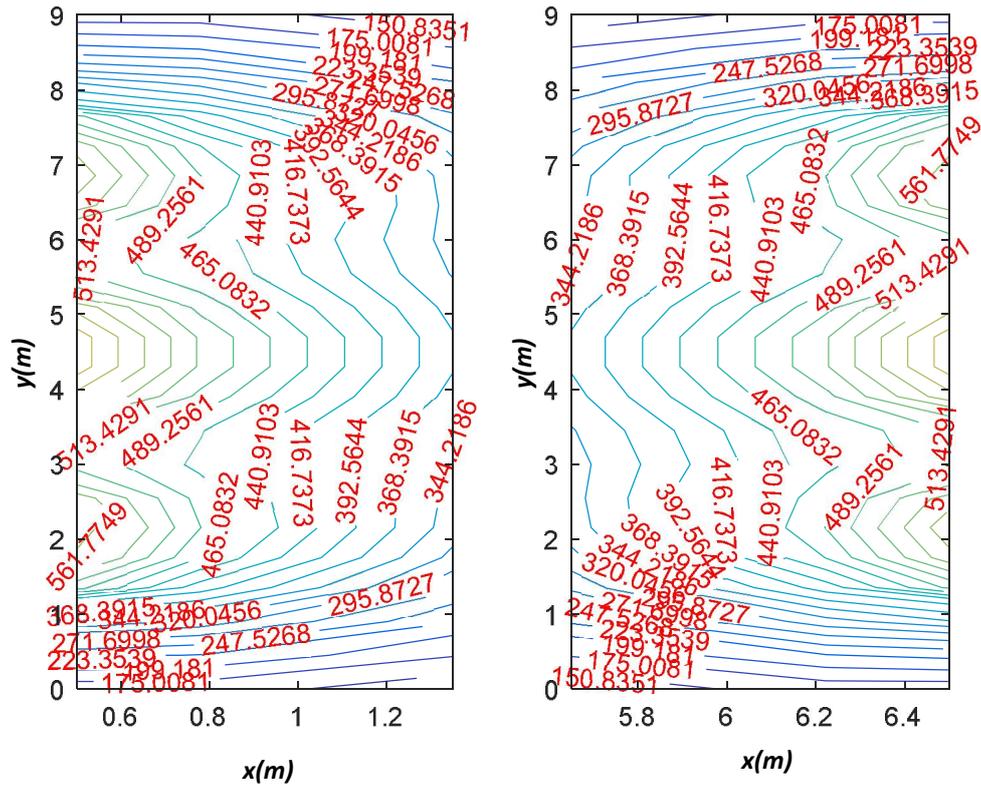


Fig.VI.30. Contours représentant la répartition de l'éclairage dans la zone II.

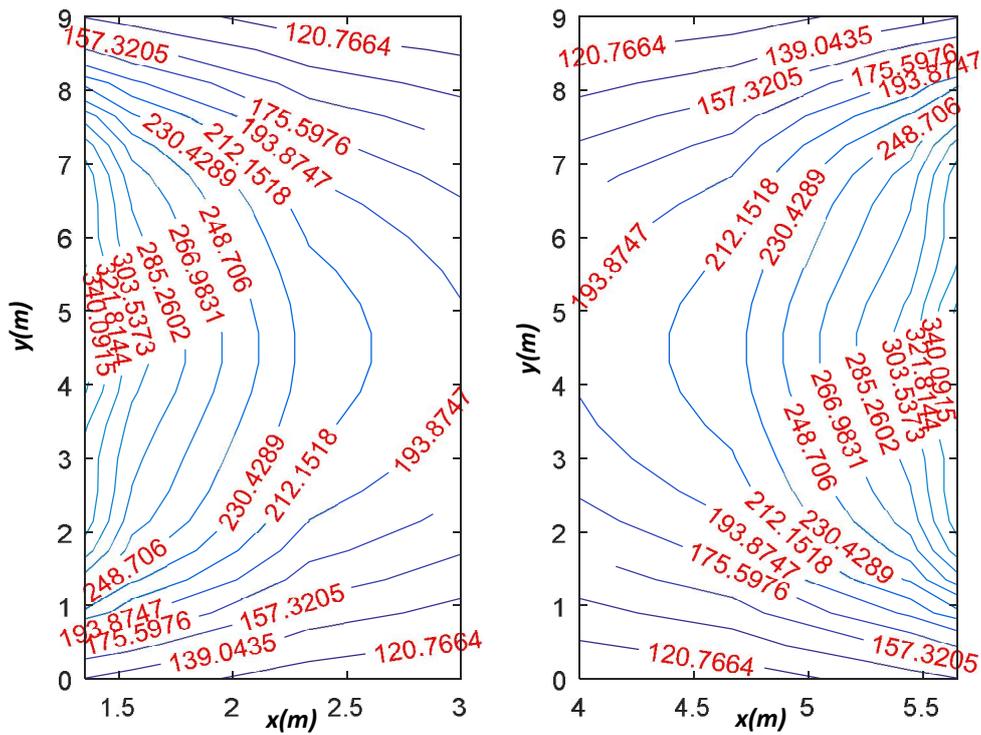


Fig.VI.31. Contours représentant la répartition de l'éclairage dans la zone III.

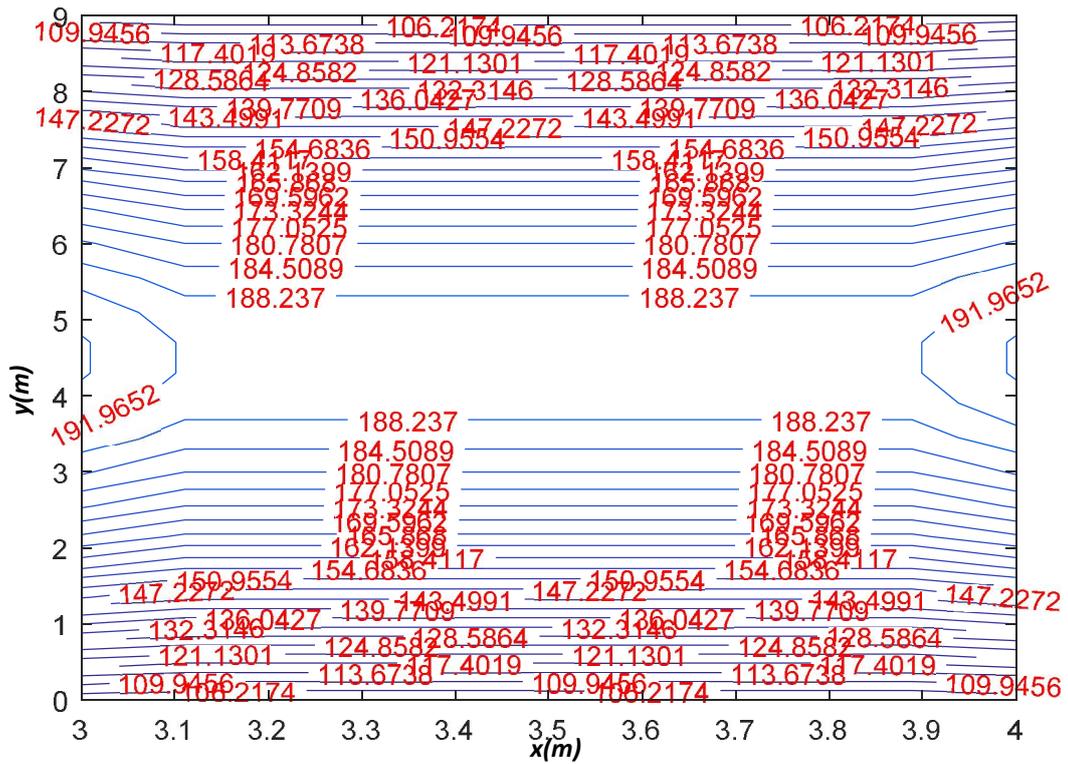


Fig.VI.32. Contours représentant la répartition de l'éclairage dans la zone IV.

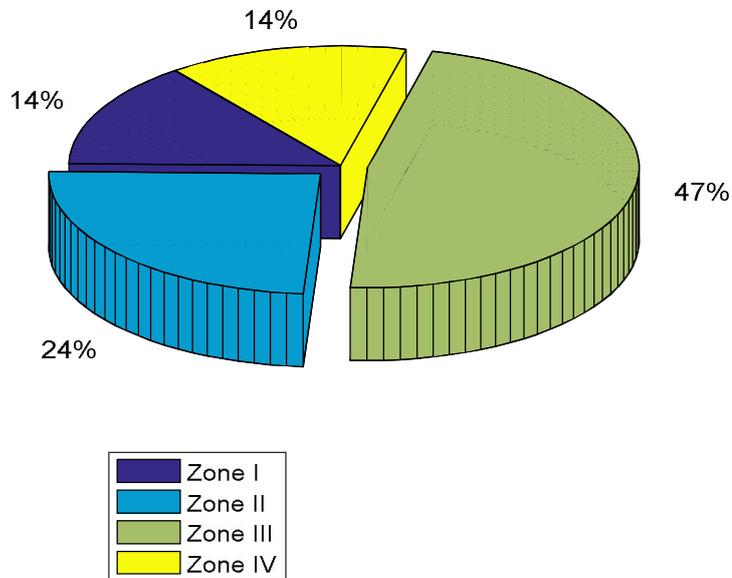


Fig.VI.33. Les surfaces proportionnelles à chaque zone distinguée à l'intérieur de la salle de classe.

Pour concrétiser l’ambiance lumineuse en trois termes qui sont respectivement, la quantité, le confort et l’agrément dans chacune des zones (I, II, III et IV) de la salle de classe, nous avons résumé dans le tableau Tab.VI.4. L’ensemble des critères décrivant la qualité de l’éclairage offerte ainsi que l’ambiance ressentie dans chacune des portions des zones considérées.

Tab.VI.4. l’emplacement de la zone considérée, impression de clarté, impression visuelle et enfin ambiance en fonction du facteur de lumière du jour dans chacune des zones considérées (Zones I, II, III et IV).

	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
Surface (m ²)	9	15.3	29.	9
Taux d’occupation (%)	14.28	24.28	47.1429	14.28
Emplacement de la zone par rapport aux façades principales	adjacente	Eloignée des fenêtres sur une distance d’environ ½ de la hauteur des fenêtres	Eloignée des fenêtres sur une distance d’environ 1 à 2.5 de la hauteur des fenêtres	Au centre de la salle de classe, Eloignée des fenêtres sur une distance d’environ 2.5 à 3.33 de la hauteur des fenêtres
Impression de Clarté	Très clair	Clair	Peu éclairé à clair	Peu éclairé
Ambiance	- Le local s'ouvre vers l'extérieur, - Eblouissement	- Le local s'ouvre vers l'extérieur, - Eblouissement	Le local s'ouvre vers l'extérieur	Le local semble être refermé sur lui-même
FLJ	Très élevé	Elevé	Moyen	Modéré

Après avoir présenté le comportement des salles de classe via leurs performances visuelles ainsi que l'ambiance ressentie à l'intérieur des édifices présentées, on peut dire que le code de calcul développé peut être considéré comme un outil prédictif exploité principalement à la modélisation du comportement visuel d'un édifice, quelque soit le type de ciel caractérisant l'environnement extérieur de n'importe quel projet et quelque soit son emplacement.

La question qui se pose, est ce qu'on peut déterminer, via le code de calcul développé, les paramètres optimales des surfaces des fenêtres qui permettent de donner les meilleurs valeurs d'éclairage à l'intérieur de la salle de classe (350lux ou 500lux) et d'avoir ainsi, les valeurs d'éclairage désirées en particulier au niveau du plan de travail de la salle de classe supposée maintenue à de $z = 0.9m$?.

VI.2. OPTIMISATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUES DES FENETRES INTEGREES AUX NIVEAUX DES FAÇADES NORD ET SUD :

Dans le but de déterminer les paramètres géométriques des ouvertures de la salles de classes, considérées comme le seul moyen de faire pénétrer l'éclairage naturel de l'extérieur vers l'intérieur, nous avons implémenté dans le code développé, des outils numériques d'optimisation qui permettent de déterminer certains paramètres géométriques et physiques, considérés comme optimaux, et qui permettent d'approcher au maximum la valeur de l'éclairage à une valeur désirée. Dans le cadre de ce travail, nous avons limité la présentation juste en adaptant les paramètres géométriques des fenêtres comme paramètres optimaux à déterminer. Aussi, nous avons ciblé la valeur d'éclairage sur le plan de travail où nous avons voulu avoir une valeur proche de 500 Lux, puis une valeur de 350 Lux.

MATLAB possède plusieurs outils d'optimisations utilisés souvent pour déterminer les paramètres optimaux dans un problème bien défini par une fonction objective. Qu'il soit un problème explicite ou implicite, MATABLAB offre un outil numérique basé sur l'exploitation des algorithmes génétiques pour minimiser la fonction objective du problème défini où il permet aussi d'introduire des contraintes d'égalités en imposant des limites supérieures et inférieures pour cerner les solutions proposées par l'algorithme. La fonction la plus utilisée pour résoudre sous type de problème est nommée 'ga'.

Malheureusement dans le cadre de notre travail, nous n'avons pas pu adopter cette fonction pour résoudre le problème d'optimisation. Ce dernier, définit par un problème qui dépend de plusieurs paramètres, tels que par exemple, le jour et l'heure de la simulation, l'orientation des façades principales. A partir de la fonction 'ga', nous avons obtenu plusieurs solutions, Chacune des solutions obtenue, permet de vérifier certaines conditions mais pas toutes, c'est-à-dire elle donne des valeurs optimales par exemples pour le mois de Mars à 10h où elle minimise la fonction objective pour ce mois et pour cette heure, mais elle diffère dans un autre mois, voire même dans une autre heure. Pour cela, nous avons adopté une méthode, que nous avons appelée, la méthode paramétrique. Celle-ci est basée sur le calcul de l'éclairement sur une grande marge de paramètres définissant les dimensions des fenêtres. Le calcul s'effectue pour les jours et les heures de références présentées précédemment. A partir de ce calcul paramétrique, nous définissons une erreur relative qui traduit l'écart entre la valeur de l'éclairement obtenue et celle de référence. L'erreur total fixant les écarts entre la valeur de référence et celle obtenue par le calcul, est calculée à partir de la somme des erreurs locales calculées dans chaque point P (j,k) du maillage. Celle-ci est donnée par :

$$(Erreurs) = \sum (Ec(i,j) - Ec_{réf})^2.$$

Où :

$Ec(i,j)$: Représente l'éclairement local, calculé dans chaque point P(j,k) du maillage adopté,

$Ec_{réf}$: Représente la valeur d'éclairement de référence où la valeur de l'éclairement désirée.

On peut rapporter la relation précédente pour exprimer l'erreur en relation relative en divisant l'écart présenté sur la valeur maximale de $Ec(i,j)$.

Les dimensions optimales retenues sont celles qui peuvent minimiser la fonction objective pour l'ensemble des cas où celles qui peuvent couvrir la majorité des cas, c'est-à-dire, on retient les dimensions, considérées comme optimales pour l'ensemble des mois et des heures présentés.

La méthode paramétrique que nous avons développé, à été adoptée dans le but d'optimiser le problème présenté précédemment. Celui-ci composé de six fenêtres réparties en deux façades juxtaposées. Par simplification, nous avons introduit comme contraintes, l'égalité de l'ensemble des dimensions, c'est-à-dire nous avons imposé des dimensions égales selon les axes, y (Ly) et z (Lz). Les calculs ont été présentés pour les jours de références qui sont : le 21

Mars, le 21 Juin, le 21 Septembre et enfin le 21 Décembre, respectivement à **10h** et à **14h**. Pour paramétrer le problème, nous avons calculé l'éclairement à l'intérieur de l'espace pour différentes valeurs de L_y et L_z , ces grandeurs ont été limitées par une valeur supérieure égale à **2.25 m** et une autre valeur inférieure limitée à **0.5m**. Dans nos calculs, nous avons adopté un pas paramétrique de **0.25 m**. les valeurs intermédiaires seront déduites par interpolation où nous avons adopté un profil linéaire entre deux valeurs adjacentes.

Pour fixer une valeur de référence au niveau du plan de travail, nous avons trouvé dans la littérature deux valeurs optimales, dans certaines références, la valeur de référence d'un plan de travail pour une salle de classe est fixée à 500 Lux. Dans d'autres références, nous avons trouvé la valeur de 350 Lux. Ces deux valeurs ont été pris en compte dans nos calculs où nous avons présenté les dimensions des fenêtres considérées comme optimales et qui permettent de se rapprocher au mieux de ces deux valeurs de références.

Les résultats présentant la variation de l'erreur relative traduisant les écarts entre les valeurs d'éclairement calculer et celles de référence en fonction des dimensions des sont présentés respectivement dans les Fig.VI.34 et Fig.VI.35.

Selon les résultats présentés, on peut dire que les dimensions des fenêtres qui peuvent réduire l'erreur différent et dépendent de la valeur de l'éclairement de référence. En effet, pour le cas où $E_{créf}=500\text{Lux}$, les dimensions qui permettent de réduire au maximum l'erreur et par conséquent, l'écart entre la valeur de l'éclairement calculer, considéré comme valeur réelle de l'éclairement, et la valeur de référence sont représentées par $L_y = 1.75\text{m}$ et $L_z = 1.75\text{m}$.

Ces valeurs ont été choisies car elles permettent de réduire au maximum l'erreur dans six cas différents qui sont : le mois de Mars à 10h et à 14h, le mois de Juin à 10h, le mois de septembre à 10h et à 14h et enfin le mois de Décembre à 14h. Pour le mois de décembre à 10h, l'erreur minimale est atteinte pour $L_y = L_z = 2\text{m}$. Pour le mois de Juin à 14h, l'erreur minimale est atteinte pour $L_y = L_z = 1.5-1.75\text{m}$. Selon le profil de l'erreur présenté dans la Fig.VI.34, on remarque que l'erreur décroît progressivement pour atteindre son minimum à $L_y = L_z = 1.75\text{m}$. A partir de ces dimensions, l'erreur accroît pour atteindre son maximum à $L_y = L_z = 2.2\text{m}$.

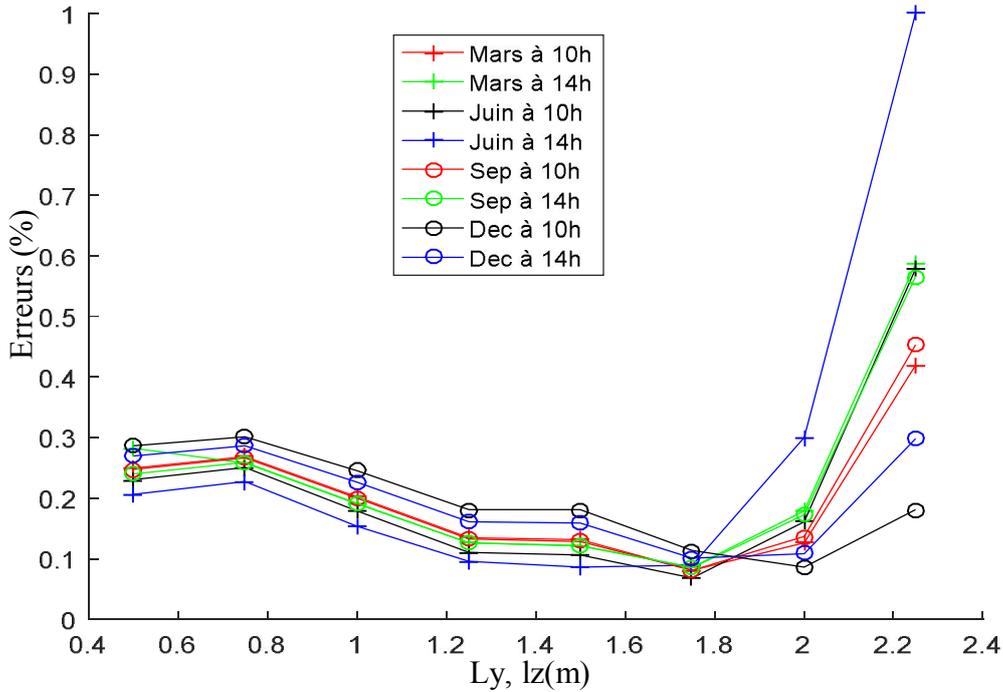


Fig.VI.34. Erreurs relative en fonction des dimensions des fenêtres pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h. Les résultats présentés sont ceux obtenus pour $E_{c_{réf}}=500\text{Lux}$.

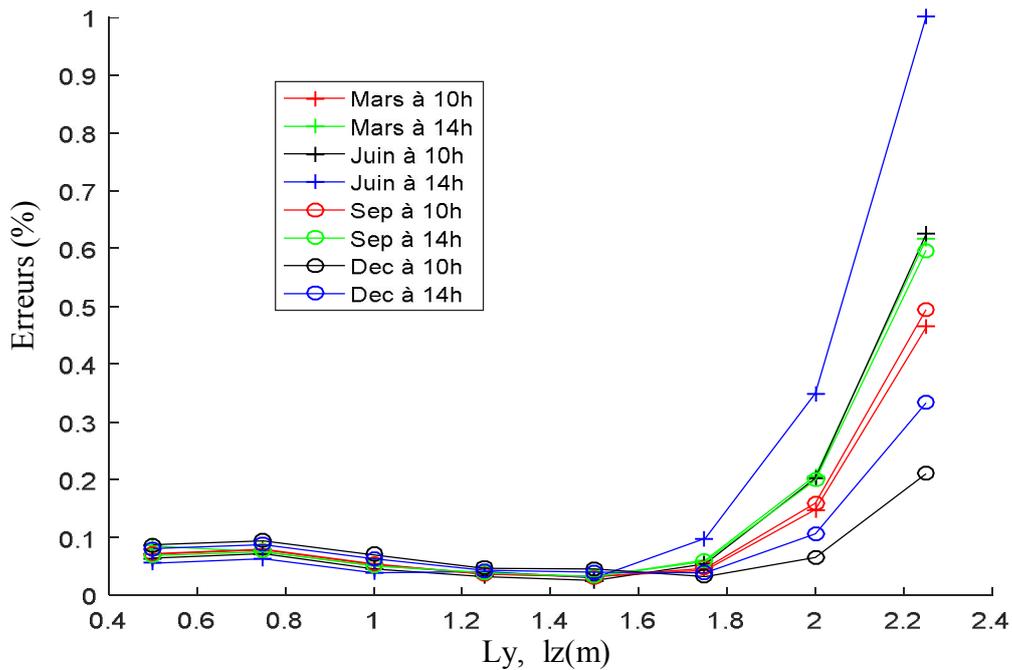


Fig.VI.35. Erreurs relative en fonction des dimensions des fenêtres pour les journées du 21 Mars, 21 Juin, 21 Septembre et 21 Décembre, respectivement à 10h et à 14h. Les résultats présentés sont ceux obtenus pour $E_{c_{réf}}=350\text{ Lux}$.

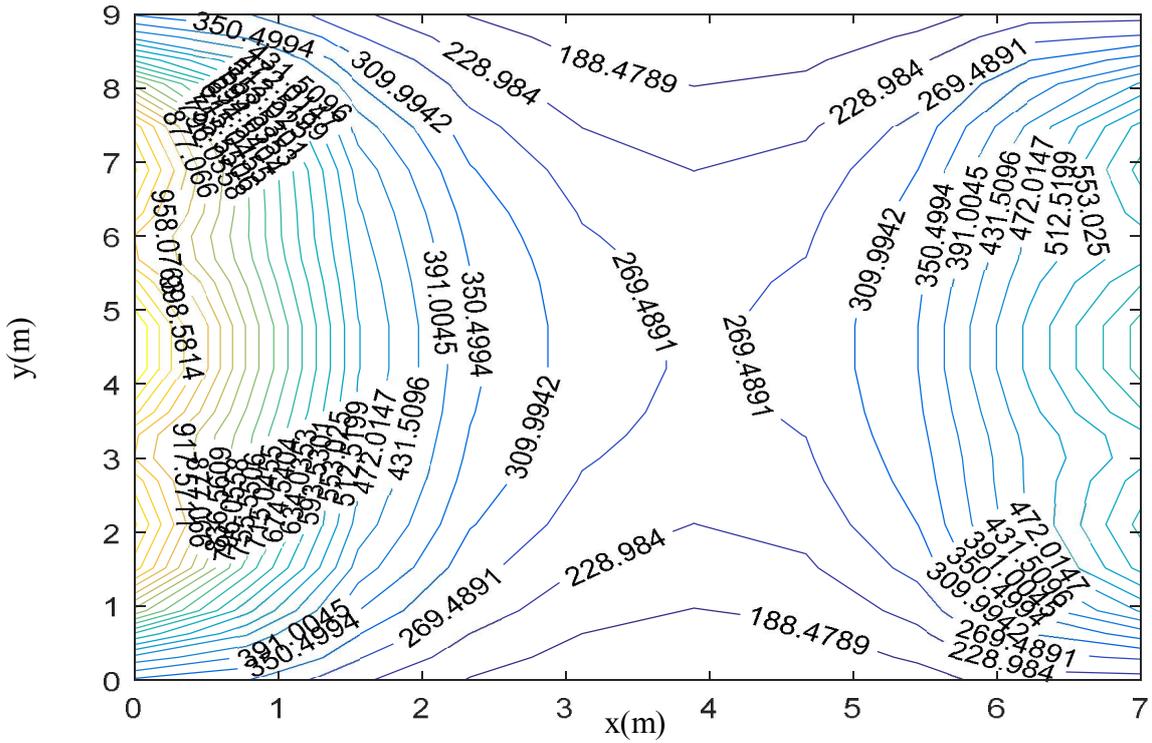


Fig.VI.36. Profil bidimensionnel de l'éclairage dans le plan de travail pour des dimensions optimisées, les résultats sont présentés à titre indicatif à 14h pour le mois de Septembre.

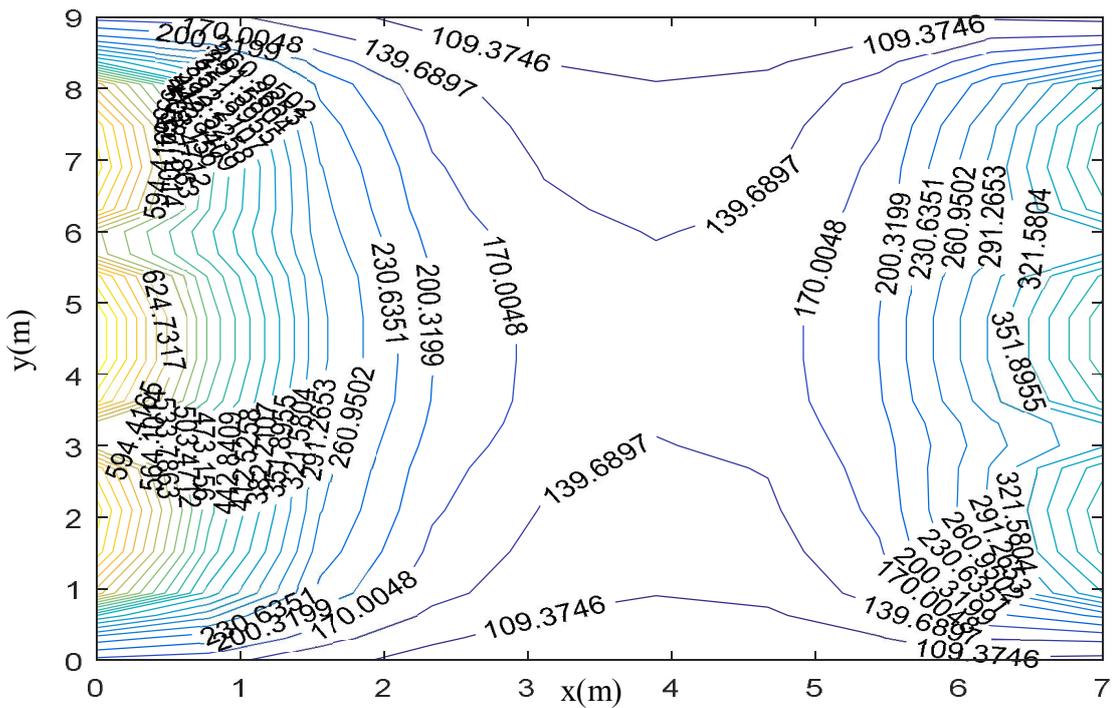


Fig.VI.37. Profil bidimensionnel de l'éclairage dans la plan de travail avec $L_y = L_z = 1.2m$, les résultats sont présentés à titre indicatif à 14h pour le mois de Septembre.

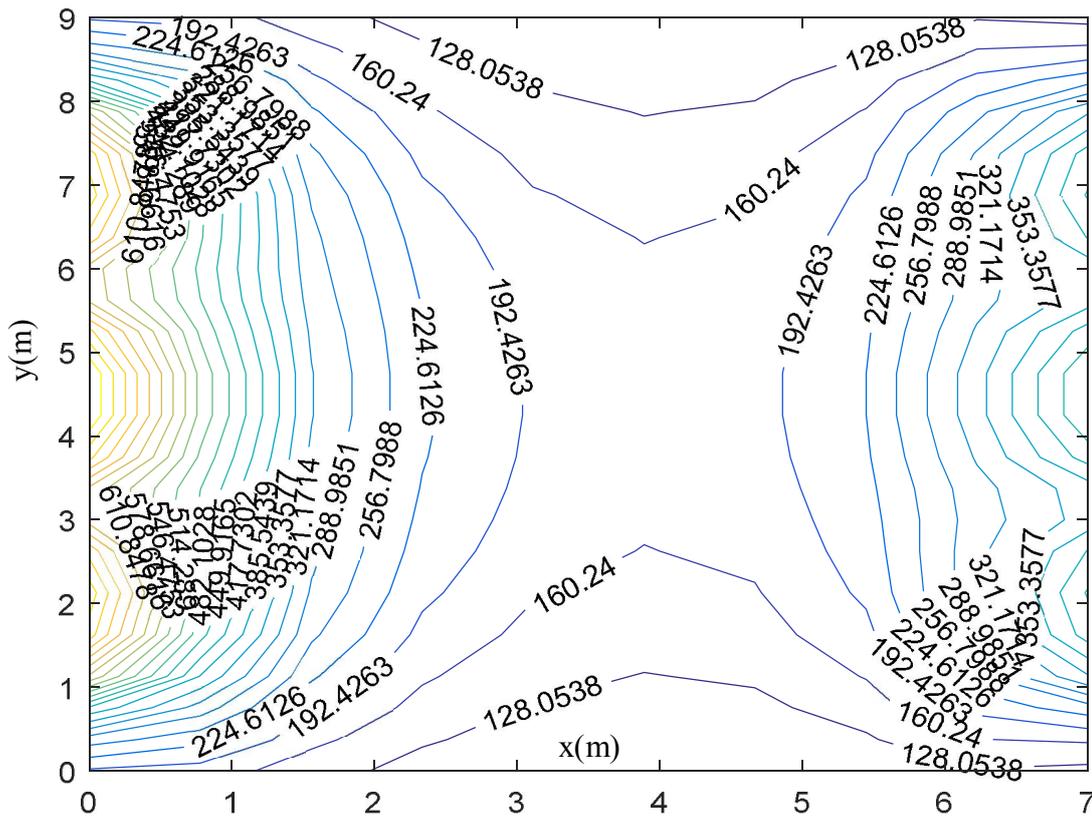


Fig.VI.38. Contours représentant la répartition de l'éclairage sur le plan de travail, les dimensions des ouvertures sont celles obtenues par optimisation.

Ceci peut être expliqué par la valeur moyenne de l'éclairage sur le plan de travail de la salle de classe, cette valeur est considérée comme inférieure à la valeur de référence (500 Lux) pour $(L_y, L_z) < 1.75\text{m}$, où elle dépassera largement la valeur de référence pour $(L_y, L_z) > 1.75\text{m}$, mais avec $(L_y, L_z) = 1.75\text{m}$, l'éclairage se rapproche au mieux de la valeur de référence. On remarque aussi et quelque soit les dimensions des fenêtres, on ne pourra jamais atteindre une erreur nulle, c'est-à-dire on ne pourra jamais avoir un éclairage de référence dans tous les points du plan de travail, cependant on peut améliorer considérablement le profil de l'éclairage en se rapprochant de la valeur de référence dans un maximum de points. Pour mener une étude comparative, nous avons présenté le profil de l'éclairage sur le plan de travail atteint à partir des dimensions optimisées et celui présenté précédemment, c'est-à-dire le profil de l'éclairage obtenu pour des dimensions $L_y = L_z = 1.5\text{m}$. Selon les deux profils présentés on peut dire que l'éclairage à l'intérieur de la salle de classe, en particulier sur le plan de travail, est considérablement amélioré où nous avons un

éclairage dans plusieurs points du plan de travail qui se rapproche à la valeur de référence de 500 Lux. Les dimensions des fenêtres optimisées ont permis alors d'améliorer le profil de l'éclairement en se rapprochant de la valeur de référence et aussi d'élargir la zone, où l'éclairage est considéré comme optimal.

Pour le second cas où nous avons fixé une valeur de référence $E_{créf}=350$ Lux. Les résultats des simulations présentés en Fig.VI.35, indiquent qu'on peut minimiser l'erreur avec $L_y = L_z = 1.5m$. L'erreur accroit considérablement à partir de ces dimensions indiquant ainsi, que la valeur d'éclairement dépasse largement celle considérée comme référence. En dessous de ces valeurs considérées comme optimales, l'erreur décroît indiquant que l'éclairement est inférieur à la valeur de référence désirée (350 Lux). Selon les résultats des simulations présentant le profil d'éclairements et présentés en Fig.VI. 38, on peut dire que l'optimisation des dimensions des fenêtres a permis d'améliorer considérablement le profil de l'éclairement, en particulier sur le plan de travail, où celui-ci se rapproche de la valeur de référence imposée.

Pour conclure et pour répondre à la question posée au début de cette partie, on peut dire que la modélisation, permet de prédire le profil d'éclairage au sein d'un édifice. Elle permet aussi, d'apporter des améliorations si celles-ci, adoptent les méthodes d'optimisations, en identifiant des propriétés géométriques qui peuvent améliorer considérablement la qualité de l'éclairage à l'intérieur d'un espace en se rapprochant au maximum, de la valeur de référence imposée dans un plan bien défini.

VI.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des simulations présentant la répartition bidimensionnelle et tridimensionnelle de l'éclairement au sein d'une des salles de classe située dans la ville de BISKRA. Les résultats des simulations sont obtenus à partir d'un code de calcul développé et qui est implémenté sous environnement MATLAB. Ce code est employé pour le calcul de l'éclairage à l'intérieur d'un édifice, en particulier, dans une salle de classe. L'avantage du code de calcul développé est de pouvoir calculer l'éclairement intérieur pour différents types du ciel, ainsi, d'implémenter des modèles numériques qui permettent d'améliorer la qualité de l'éclairage offerte à l'intérieur de l'espace. Le code de calcul développé est conçu à partir d'un modèle analytique et qui a permis d'effectuer un calcul tridimensionnel du profil de l'éclairage. Pour l'optimisation, nous avons proposé une

approche paramétrique dans laquelle nous avons déterminé le profil de l'éclairage à l'intérieur de la salle de classe, pour une série de dimensions décrivant les propriétés géométriques des fenêtres. Cette série est limitée par une valeur minimale et une autre valeur maximale représentant les limites des dimensions des fenêtres permises. Le calcul paramétrique s'effectue en adaptant un pas paramétrique au moyen duquel, nous avons réalisé une série de simulations. Ces simulations, considérées comme une base de données, ont permis de prédire le comportement de la salle de classe via un éclairage parfaitement naturel selon les dimensions des fenêtres adoptées.

Le code développé a permis de quantifier la qualité des ambiances lumineuse offerte à l'intérieur des espaces architecturaux.

Les résultats des simulations ont montré que le profil de l'éclairage pour le cas mono-latéral, c'est-à-dire le cas où les fenêtres sont réparties selon une seule façade, n'apporte aucun avantage vis-à-vis d'un éclairage purement naturel. Dans ce type de conception, les simulations ont montrées que le profil de l'éclairage à l'intérieur des salles de classe est fortement non-homogène. Celui-ci, atteint des valeurs maximales aux voisinages des ouvertures et diminue considérablement en s'éloignant de la façade principale portant les fenêtres. L'éclairage intérieur adopte ce même profil sur le plan vertical où il diminue aussi, en allant du sol vers le plafond offrent ainsi, des conditions d'éclairage caractérisées par une répartition fortement non-homogène. Sur le plan de travail et dans ce type de conception, les conditions d'éclairages offertes ne peuvent répondre en aucun cas présenté, aux attentes des occupants de la salle, vis-à-vis d'un éclairage parfaitement naturel, où le niveau d'éclairage est lointain des valeurs de référence exigées, en particulier sur ce niveau.

Pour la configuration bilatérale où nous avons considéré que les fenêtres sont réparties en deux façades orientées vers le Nord et vers le Sud. Le profil de l'éclairage a été considérablement amélioré avec un profil plus homogène et un niveau d'éclairage plus important est adéquat à une salle de classe. Ce type de conception peut offrir une tache solaire qui occupe une portion beaucoup plus importante à celle d'une salle de classe ayant des

fenêtres réparties sur une seule façade. Le niveau d'éclairement sur le plan de travail est plus important à celui présent dans les conceptions unilatéral.

Dans les simulations présentées, nous avons adopté un autre paramètre qui peut traduire correctement la qualité du confort visuel offert à l'intérieur de la salle de classe. Il s'agit du facteur de la lumière du jour 'FLJ', calculé par le code développé sous conditions d'un site parfaitement dégagé et par un ciel couvert. Calculés sur le plan de travail, les résultats obtenus ont montré que le profil du FLJ est parfaitement symétrique. Ceci est dû non seulement à la symétrie du problème modélisé, composé des deux façades ayants les mêmes propriétés physiques et géométriques des ouvertures, mais aussi aux conditions du calcul, supposées sous un ciel couvert, où l'orientation, le jour et l'heure de la simulation n'ont aucune influence sur la valeur de l'éclairement. Grâce aux valeurs du FJL, nous avons subdivisés la salle de classe en quatre zones différentes en adoptant les valeurs du FLJ comme critères de subdivision. Aux valeurs du FLJ, nous avons associé les valeurs de l'éclairement dans chacune des zones considérées. A partir des valeurs du FLJ et du niveau d'éclairement, nous avons présenté dans chaque zone considérée, l'impression de clarté, l'impression visuelle et enfin l'ambiance ressentie.

Enfin, la méthode paramétrique proposée et adoptée dans ce travail a permis de déduire les dimensions optimales des fenêtres. Ces dimensions ont contribué à l'amélioration du profil de l'éclairement, ainsi de la qualité d'éclairage offerte à l'intérieur d'une salle de classe, en particulier sur le plan de travail.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche est consacré principalement à la modélisation et à l'optimisation de l'éclairage naturel aux seins des édifices, en particulier, dans une salle de classe située dans la ville de BISKRA. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons fixé un objectif et qui consiste à développer un outil d'aide à la conception et qui peut contribuer à l'amélioration de la qualité des ambiances lumineuses et thermiques.

Le développement des outils de modélisation à nécessiter une étude détaillée sur l'ensemble des modèles mathématiques et numériques exploités dans le domaine de la modélisation dans le cas général et en particulier, ceux utilisés dans la modélisation des aspects liés à l'éclairage naturel et aux phénomènes thermiques dans les édifices. Les modèles développés ont permis de quantifier les ambiances lumineuses et thermiques dans les édifices.

Comme méthode de résolution, nous avons adopté la méthode de SPLIT FLUX FORMULA pour résoudre le problème lié au calcul directe de l'éclairage naturel. Une nouvelle méthode, que nous avons appelée, méthode paramétrique a été couplée avec la méthode directe pour résoudre le problème d'optimisation et dans le but était de déterminer les paramètres architecturaux optimaux qui permettent d'avoir des niveaux d'éclairiments optimaux. Le couplage entre les deux méthodes ont permis de développer un code de calcul tridimensionnel, implémenté sous environnement MATLAB et dédié principalement à la simulation de l'éclairage naturel aux seins des édifices. Comparé aux autres modèles, le code de calcul développé présente les avantages suivants :

- il est conçu à partir d'un modèle tridimensionnel qui permet de prendre en compte l'ensemble des composantes de l'éclairage naturel, comparé à d'autres modèles, monodimensionnel ou bidimensionnel.
- Le modèle de l'éclairage adopté permet de prendre en compte, les quinze types de ciels normalisés par la CIE.

- Il s'agit d'un code local conçu par nous même où nous pouvons intégrer d'autres modèles ou même d'autres méthodes dans le but d'améliorer la qualité des résultats et de proposer des modèles de calcul et d'optimisations.
- Il permet d'atteindre n'importe quel point dans l'espace intérieur et il peut même atteindre les divers plans d'un espace intérieur. Ceci déterminera les valeurs de l'éclairage dans tout l'espace architectural.

Au cours du travail présenté, nous avons montré qu'il existe une relation entre le confort thermique et le confort visuel. Nous avons alors entamé une étude où nous avons montré l'influence de certains paramètres et qui peuvent intervenir à la fois dans le confort visuel et dans le confort thermique. Pour résoudre le problème thermique, nous avons adopté l'équation de diffusion de la chaleur où nous avons exploitée, la méthode des volumes finis dans sa version tridimensionnelle pour résoudre le problème thermique caractérisé par une équation aux dérivées partielles.

Comme cas d'étude, nous avons simulé le comportement thermique et visuel d'une salle de classe située dans la ville de BISKRA.

Du point de vue thermique, les constatations faites selon nos simulations mène à dire que les salles de classe étudiées possèdent tous les critères d'un lieu thermiquement inconfortable durant les deux périodes, chaude ou froide. Ces critères sont :

- Un taux d'échange thermique très important entre l'extérieur et l'intérieur où la température intérieur dépend essentiellement de la température imposé par les conditions climatique à l'extérieur de la salle de classe. Ceci mène à des températures élevées durant la période chaude et des températures basses durant la période froide.
- L'échange thermique entre les deux milieux, extérieur et intérieur, est très important, via les parois constituant l'enveloppe de la salle de classe, en particulier au niveau de la façade portante les fenêtres. Cet échange thermique à modifié considérablement la température intérieur de la salle de classe en particulier dans les zones voisines aux fenêtres offrant ainsi une répartition spatiale de la température fortement non-homogène et non-uniforme. Ceci a donné une naissance aux gradients de température à l'intérieur avec des écarts qui peuvent atteindre 3 à 3.5°C durant les périodes froide ou chaude.

- La présence des fenêtres contribue à l'apparition d'un inconfort thermique à l'intérieur des salles par la contribution de l'apparition des gradients de températures importants, en particulier aux voisinages des façades principales. Cette présence n'affecte pas vraiment la valeur moyenne de la température intérieure ou nous avons enregistré une différence maximale de 0.25°C entre une salle n'ayant aucune fenêtre et une autre ayant sept fenêtres réparties sur une seule façade est de 0.55°C entre une salle de classe n'ayant aucune fenêtre et une autre dotée de quatorze fenêtres réparties sur deux façades.
- Les surfaces des parois de la salle (les parois latérales, le sol et le plafond de la salle) présentent un inconvénient majeur pour le confort thermique. Celles-ci offrent des températures basses durant la période froide et des températures élevées durant une période chaude.
- Outre que l'inconfort enregistré à l'intérieur des salles de classe, on peut dire que leur enveloppe est mal conçue pour assurer une bonne isolation thermique entre les milieux. La conception des salles de classes étudiées présente alors des inconvénients majeurs du point de vue économique et même écologique où le coût du chauffage ou du refroidissement doit être très élevé.

Dans les conditions d'étude présentés et selon les conceptions présentés, on peut dire que l'amélioration du confort thermique des salles de classe de la ville de BISKRA repose essentiellement sur l'utilisation des moyens et des techniques d'isolation thermique qui doivent être intégrés dans les parois enveloppant un environnement.

L'inconvénient majeur des ouvertures repose sur l'apparition d'un gradient de température en particulier aux voisinages des façades principales portant les fenêtres de la salle de classe. Ceci peut être évité par l'adaptation d'un vitrage qui peut assurer une isolation thermique parfaite (un double vitrage par exemple). Même si le coût de ces ouvertures est considéré comme élevé, mais ceci devient bénéfique comparé au coût du chauffage ou du refroidissement durant les périodes froide ou chaude.

Les simulations de l'éclairage naturel ont montré que le profil de l'éclairement pour le cas mono-latéral, c'est-à-dire le cas où les fenêtres sont réparties selon une seule façade, n'apporte aucun avantage vis-à-vis un éclairage purement naturel. Dans ce type de conception, les simulations ont montré que le profil de l'éclairement à l'intérieur des salles de classe est

fortement non-homogène. Celui-ci, atteint des valeurs maximales aux voisinages des ouvertures et diminue considérablement en s'éloignant de la façade principale portant les fenêtres. L'éclairage intérieur adopte ce même profil sur le plan vertical où il diminue aussi, en allant du sol vers le plafond offrant ainsi, des conditions d'éclairage caractérisées par une répartition fortement non-homogène. Sur le plan de travail et dans ce type de conception, les conditions d'éclairage offertes ne peuvent répondre en aucun cas présentés, les attentes des occupants de la salle, vis-à-vis un éclairage parfaitement naturel, où le niveau d'éclairage est loin des valeurs de référence exigées, en particulier sur ce niveau.

Pour la configuration bilatérale où nous avons considéré que les fenêtres sont réparties en deux façades orientées vers le Nord et vers le Sud. Le profil de l'éclairage a été considérablement amélioré avec un profil plus homogène et un niveau d'éclairage plus important est adéquat à une salle de classe. Ce type de conception peut offrir une tâche solaire qui occupe une portion beaucoup plus importante à celle d'une salle de classe ayant des fenêtres réparties sur une seule façade. Le niveau d'éclairage sur le plan de travail est plus important à celui présent dans les conceptions unilatérales.

Dans les simulations présentées, nous avons adopté un autre paramètre qui peut traduire correctement la qualité du confort visuel offert à l'intérieur de la salle de classe. Il s'agit du facteur de la lumière du jour 'FLJ', calculé par le code développé sous les conditions d'un site parfaitement dégagé et par un ciel couvert. Calculé sur le plan de travail, les résultats obtenus ont montré que le profil du FLJ est parfaitement symétrique. Ceci est dû non seulement à la symétrie du problème modélisé, composé des deux façades ayant les mêmes propriétés physiques et géométriques des ouvertures, mais aussi aux conditions du calcul, supposées sous un ciel couvert, où l'orientation, le jour et l'heure de la simulation n'a aucune influence sur la valeur de l'éclairage.

La méthode paramétrique proposée et adoptée dans ce travail a permis de déduire les dimensions optimales des fenêtres. Ces dimensions ont contribué à l'amélioration du profil de l'éclairage, ainsi de la qualité d'éclairage offerte à l'intérieur d'une salle de classe, en particulier sur le plan de travail.

Les modèles développés ainsi que les résultats obtenus confirment l'ensemble des hypothèses proposées au début de ce travail de recherche.

PERSPECTIVES

- Amélioration du maillage en exploitant d'autres formes des éléments adoptés pour la discrétisation. Ceci est dans le but de pouvoir modéliser n'importe quelle forme géométrique. D'autres logiciels peuvent être exploités tel-que par exemple, le MGSH.
- L'intégration de d'autres modèles, mathématiques ou numériques, dans le but d'élargir les domaines qui peuvent être traité par les modèles développés, tel-que, l'ambiance acoustique, olfactif et autres.
- Une comparaison avec d'autres logiciels peut être menée, et une confrontation expérimentale s'impose pour la validation de l'ensemble des modèles mathématique et numériques développés.
- Développement d'un outil d'optimisation qui permet de prendre l'ensemble des paramètres architecturaux dans l'optimisation de l'ensemble des ambiances.

BIBLIOGRAPHIE :

ADER. (1997). L'énergie au futur: propositions pour une politique responsable', Editions d'en bas.

Adolphe, L. (1998). Ambiances architecturales et urbaines. Editions Parenthèses.

Atkinson, J. & Chartier, Y. (2011). Utilisation de la ventilation naturelle pour lutter contre les infections en milieu de soins. World Health Organization.

Batier, C. (2016). Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen : d'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales. Thèse de doctorat, Université de Montpellier.

Bendekkiche, S. (2014). Optimisation de l'éclairage naturel dans les salles de classe par simulation inverse. Thèse de Magister. Université de Biskra.

Bendekkiche, S. (2017). Optimisation de l'éclairage naturel dans les salles de classe par simulation inverse. Thèse de magister. Université de Biskra.

Benharkat, S. (2006). Impact de L' éclairage Naturel Zénithal Sur le Confort Visuel Dans Les Salles de Classe Cas d'étude : Bloc des Lettres de L'université Mentouri Constantine. Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine.

Berachi, M. (2010). Algorithme Évolutionnaire à États pour l'Optimisation Difficile. Algorithme et structure de données [cs.DS]. Université Nice Sophia Antipolis.

Boulfani, W. (2010). Les Ambiances Thermiques d'été dans l'habitat de la période coloniale a patio. Thèse de magister, Université de Biskra.

Brun, G. (2014). Caractéristiques générales de l'art gothique en Alsace. Base numérique du patrimoine d'Alsace, Source : <http://www.crdp-strasbourg.fr>.

Caumont, A. (1841). Histoire de l'architecture religieuse au Moyen-Age. Editeur. Hardel.

Cantin, F. (2008). Evaluation de la Qualité Lumineuse d'un Environnement de Travail Eclairé Naturellement. Maîtrise en sciences de l'architecture. Université Laval Québec.

Chaabouni, S. (2008). Conception des ambiances lumineuses: Navigation et raisonnement par l'image pour la formulation des intentions. 1st International Congress on Ambiances. Grenoble.

Chaabouni, S. (2011). Voir, savoir, concevoir : une méthode d'assistance à la conception d'ambiances lumineuses par l'utilisation d'images références. Architecture, aménagement de l'espace. Institut National Polytechnique de Lorraine.

Corblet, J. (1860). L'architecture du moyen-âge jugée par les écrivains des deux derniers siècles. Editeur. Pringuet.

Dachelet, M. (2007). Aménagement du territoire, urbanisme, architecture...plus durables ? Editions Mardaga.

Darula, S. & Kittler, R. (2002). Cie General Sky Standard Defining Luminance Distributions. Proc. Conf. eSim. The Canadian conference on building energy simulation., At Montreal, Canada.

Daiche, A. M. (2015). Vers un outil d'aide à l'optimisation de l'éclairage naturel dans le processus de conception architecturale -Approche inverse. thèse de magister, Université de Batna.

Dahech, S. (2014). Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude, Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage, document 695.

Delsaux, C. (1847). L'architecture et les MONUMENTS DU MOYEN AGE A LIEGE. Editeur, Felix Oudart.

Deroisy, B & Deneyer, A. (2011). Evaluation de l'éclairage naturel par simulations informatiques. lien : <https://www.cstc.be/homepage/download>.

Devely, G. (2000). Chauffage par induction électromagnétique : principes. Techniques d'ingénieurs. Article D5935. Vol. DAC.

Dubois, C. (2006). CONFORT ET DIVERSITÉ DES AMBIANCES LUMINEUSES EN ARCHITECTURE. L'influence de l'éclairage naturel sur les occupants. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'Architecture. Université Laval.

ED 82. (2008). Fiche pratique de sécurité, L'éclairage naturel, <http://www.mysti2d.net>.

Fanelli, G. & Gargiani, R. (2008). Histoire de l'architecture moderne: stucture [i.e. structure] et revêtement. Editeur. PPUR presses polytechniques.

Gallas, M, A. (2013). De l'intention à la solution architecturale, proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases amont de conception. Thèse de doctorat. Université de lorraine.

Gratia, E. (2006). Thermique des immeubles de bureaux. Editeur. Presses univ. de Louvain.

GREGOIRE, F. (2017). ECLAIRAGE : CONCEPTION ET REGULATION.

Hegger, M. (2011). Construction et énergie: architecture et développement durable. Editeur. PPUR Presses polytechniques.

Hégron, G & Torgue, H. (2010). Ambiances architecturales et urbaines. De l'environnement urbain à la ville sensible. Ecologies urbaines : Etat des savoirs et perspectives, Economica - Anthropos, pp.184-198.

Lesage, K. (2013). La lumière naturelle favorise-t-elle la création d'un environnement sain confortable pour les occupants des bâtiments écologiques certifiés. Maitrise en environnement, 2013.

Lhomme, M. (2017). Architecture de lumière et spiritualité des lieux de cultes. Mémoire de Master. Ecole nationale supérieur d'architecture de Strasbourg.

Laporte, A & Tixier, N. (2007). Ambiance(s). Ville, architecture, paysages. [coord. dossier N° 113 de Culture et Recherche]. France. 113, Ministère de la culture et de la communication. pp.8-39.

Maamari, F. (2004). La Simulation numérique de l'éclairage, limites et potentialités. Thèse de doctorat en génie civil, Lyon, Insa. 2004.

Magali, B & Arnaud, D. Guide d'aide à l'interprétation et à l'amélioration des résultats des mesures sous les ciels et soleil artificiels du CSTC.

Marin, P. & Lequay, H & Bignon, J, C. (2009). OUTIL EVOLUTIONNAIRE D'AIDE A LA CONCEPTION ARCHITECTURALE CREATIVE. Mise en œuvre d'un algorithme génétique et prise en compte des paramètres environnementaux'. CAAD futures, Montréal, France. Page 159 à 172.

Marsault, X & Lequay, H. (2016). Éco-conception pré-architecturale générative : jusqu'où peut-on aller ? Enjeux, possibilités, méthodes. Conférence parper.

Meiss, P, V & Radu, F. (2004). Vingt mille lieux sous les terres: espaces publics souterrains, Editeur. PPUR presses polytechniques.

M'Sellem, H. (2007). Le Confort Thermique Entre Perception et Evaluation Par les Techniques d'Analyse Bioclimatique cas des Lieux de Travail à Biskra. Thèse de magister. Université de Biskra.

Patankar, S. (1981). Numérical heat transfer and fluid flow. Series in computational methods in mechanics and thermal sciences.

Piombini, A. (2013). Contexte spatial des ambiances urbaines et usage des lieux. Ambiances, Environnement sensible, architecture et espace urbaine AAU.

Podbelski, P, L. (2017). Laissez Entrer la Lumière : les Bienfaits de la Lumière Naturelle, 2017. <https://www.sageglass.com/fr/article/bienfaits-de-la-Lumiere-Naturelle>.

Reiter, S. & Herde, A, D. (2005). L' éclairage naturel des bâtiments. Editeur, Presses universitaires de Louvain.

Renoue, M. (2001). Sémiotique et Perception Esthétiques : Pierre Soulage et Sainte-Foy de Conques. Editeur. Presses Univ. Limoges.

Riou-Milliot, S & Sender, E. (2005). 7 bienfaits de la lumière du soleil. Extrait d'un dossier sur le soleil, publié dans Sciences et Avenir n°809.

Roulet, C, A. (2004). Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments. Volume 22 de Collection Gérer l'environnement. Editeur. PPUR presses polytechniques.

Roulet, C, A. (2012). Éco-confort: pour une maison saine et à basse consommation d'énergie. Editeur. PPUR Presses polytechniques.

Siret, D. (1997). Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural : application à l'ensoleillement. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Nantes.

Sacadura, J, F. (1993). Initiation aux transferts thermiques. Editeur. Lavoisier.

Saddok, A. (2016). Etude du confort thermique des salles de cours des établissements scolaires à différentes typologie : cas des établissements d'enseignements moyens et secondaires à Tizi-Ouzou. Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizzi-Ouzou.

Salvione-Deschamps, M, D. (2013). Décrire l'indicible : connaissance et sauvegarde de l'éclairage naturel dans l'architecture sacrée moderne occidentale. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Schittich, C. (2001). Construire en verre. ', Editeur. PPUR presses polytechniques.

Sutter, Y. (2014). L'éclairage naturel, les guides Bio-tech. Mars 2014.

Stellman, M, J. (2000). Encyclopédie de sécurité et de santé au travail. Volume 2., Editeur, International Labour Organization.

Tourre, V. (2007). Simulation inverse de l'éclairage naturel pour le projet architectural. Interface homme-machine. Thèse de doctorat. Université de Nantes, 2007.

Vittone, R. (2010). Bâtir : manuel de construction. Editeur. PPUR Presses polytechniques.

Zemmouri, N. (2005). Daylight availability integrated modelling and evaluation: A fuzzy logic based approach. Thèse de doctorat, Université de Setif, Algerie.

WEBSITES ET SITOLOGIE :

AMBIANCE "CÉLESTE" POUR UN PROJET D'ARCHITECTURE D'INTÉRIEUR,
[En ligne]. (page consulté le 22/02/2019).
<http://www.lilylatifi.com/actualites/textile-et-architecture-interieur/ambiance-celeste-pour-un-projet-architecture-interieur>

Ambiances en architecture Lumière et Espace Architectural Azeddine BELAKEHAL,
https://cours-xamens.org/images/Etudes_superieures/Architecture_et_urbanisme/2eme_annee

Arch&Lumière. Site : <https://expositions-virtuelles.citedelarchitecture.fr>.

CSTB logiciels, modélisation d'illumination globale avec la radiosité.
<https://logiciels.cstb.fr/batiments-et-villes-durables/performances-energetiques/trnsys/>

Dictionnaire environnement.

https://www.actu-nvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement

DIALux Support, Assistance with questions and technical problems. [En ligne]. (page consulté le 26/04/2019). <https://www.dial.de/en/dialux/support/>

Guide de Barcelone. [En ligne]. (page consulté le 10/04/2019).
<http://www.apartime.com/fr/guide-de-barcelone/attractions-touristiques/mies-van>.

<https://fr.wikiloc.com/itineraires-marcher/dresden-de-norte-a-sur-9709713>.

I3ER, Ingénierie de l'Efficacité Energétique et des Energies Renouvelables. [En ligne]. (page consulté le 13/01/2019). <http://logiciels.i3er.org/ecotect.html>.

La Luminance.

Site : http://colbertserv.lyceecolbert-tg.org:3007/cours_eclairage/viewer/visu.php?f=211.

La lumière en architecture d'intérieur.
<https://www.linkedin.com/pulse/20140707173530-26370643-la-lumi%C3%A8re-en-architecture-d-int%C3%A9rieur>.

Le Corbusier, les cinq point de l'architecture moderne. [En ligne]. (page consulté le 10/04/2019). Site : <http://www.art-twenty.com/le-corbusier-les-cinq-points-de-larchitecture-moderne>.

Le confort visuel et la normalisation (Normes & Règlements)" éditée par le CSTC en 2003. Site : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php>

Le confort visuel, Document de synthèse.

<http://www.mysti2d.net/legarros/AC/07/Le%20confort%20visuel/Le%20confort%20Visuel.ht>

Le confort thermique,

<https://www.energieplus-esite.be/index.php?id=10250#c20964493+c2912+c2913+c2914>

L'éclairage naturel dans les bâtiments. https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm#ancree04

L'éclairage naturelle confort visuel et la normalisation (Normes & Règlements) éditée par le CSTC en 2003. <https://www.energieplus-lesite.be/index.php>

l'éclairage naturel des bâtiments,

https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm

Luminance, Wikipédia.

Site : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Luminance>

Lux, la revue de l'éclairage, Eclairage Public, Lieux de Travail, Stade. [En ligne]. (page consulté le 03/03/2019). <http://www.afe-eclairage.fr/docs/362-ext.pdf>

Modélisation d'illumination globale avec la radiativité. [En ligne]. (page consulté le 18/01/2019). <http://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2016/FRA/?guid=GUID-C5A3C77B-794B-4444-9783-7F2EA11C16B>.

Outil pour les consommateurs et les concepteurs de l'énergie solaire. [En ligne]. (page consulté le 13/01/2019). www.sunearthtools.com.

Panthéon de Rome. [En ligne]. (page consulté le 10/07/2019). Site : <https://commons.wikimedia.org>.

PENS-313 : Espace et lumière : le projet d'éclairage. [En ligne].

QUELLE EST L'INFLUENCE DE LA LUMIÈRE SUR L'ÊTRE HUMAIN ?. [En ligne]. (page consulté le 04/03/2019). <https://www.eclairage-veranda.com/nl/node/99>.

Revue des principes d'éclairagisme. [En ligne]. (page consulté le 26/02/2019). <https://www.standardpro.com/fr/revue-des-principes-declairagisme/>

Sciences Luminance. Futura Sciences.

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-luminance-2510/>

Simulation thermique dynamique avec EnergyPlus™. [En ligne]. (page consulté le 20/01/2019). <http://exportation-a-energyplus.cype.fr/>

Temple égyptien. [En ligne]. (page consulté le 10/04/2019).
Site : <http://www.passion-egyptienne.fr/Abou%20Simbel.htm>.

XPAIR, Logiciels du bâtiment - Acoustique - Ventilation - Qualité d'Air - Eclairage - Puits Climatiques. https://outils.xpair.com/logiciels_batiment/acoustique.htm

3DVF, Logiciels 3D : Lightscape-autodesk.
http://www.3dvh.com/modules/publish/Logiciels_4821.html

7 bienfaits de la lumière du soleil. [En ligne]. (page consulté le 15/03/2019). https://www.sciencesetavenir.fr/sante/7-bienfaits-de-la-lumiere-du-soleil_19492