

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences & Technologie

Département d'Architecture

Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de:

Doctorat en Architecture

Spécialité : Architecture, Environnement dans les Zones Arides

Optimisation du confort thermique et de l'efficacité énergétique dans les établissements scolaires : cas d'un climat chaud et aride

Présentée par :

MANSOURI Khaled

Soutenue publiquement le : 25/09/2023

Devant le jury composé de :

Dr. MEZERDI Toufik	MCA	Président	Université de Biskra
Dr. SRITI Leila	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. GUEDOUH Marouane Samir	MCA	Co-rapporteur	Université de Batna 1
Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine	MCA	Examineur	Université de Béjaia
Dr. BADACHE Halima	MCA	Examinatrice	Université de Biskra

Année Universitaire:2022/2023

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères de ma vie mes parents qu'Allah repose en paix.

A mes frères Taqy Eddine et Riadh et ma sœur Lina, à mes grands-parents à tous les membres de ma famille qui ont cru en moi et ne m'ont jamais abandonné dans mes moments les plus difficiles.

À tous mes proches que j'ai perdus ces dernières années.

À tous mes amis et collègues durant toute ma longue période d'études, et tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Louange à DIEU, Seigneur et Maître des Univers, merci à Allah de m'avoir donné la force, le courage et la patience pour mener à bien ce travail. Je voudrais exprimer ma plus profonde gratitude au Pr. SRITI Leila, ma directrice de thèse, pour son encadrement, ses conseils, sa confiance et ses encouragements tout au long de mon parcours. Mes remerciements vont également aux membres du jury : Dr. MEZERDI Toufik, Dr. KHADRAOUI Mohamed Amine et, DR. BADACHE Halima qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont également au Dr GUEDDOUH Marouane Samir pour son aide et ses conseils. J'exprime également ma gratitude au Pr. Fabio Fantozzi et Dr. Giulia Lamberti pour m'avoir accueilli et m'avoir fait partie du laboratoire T.E.A à l'Université de Pise et pour leurs conseils et orientations. Je tiens à remercier tous mes collègues de l'université de Biskra et du laboratoire LACOMOFA et particulièrement Mr. Khelaf Nacer, je tiens à remercier mes frères et sœurs et toute ma famille pour leur soutien indéfectible. Mes amis et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à développer cette recherche.

Résumé

Assurer le confort thermique intérieur des bâtiments tout en minimisant la consommation d'énergie constitue l'un des plus grands défis pour les concepteurs à l'ère moderne, en particulier à l'ombre de la crise climatique et économique actuelle. Dans les établissements scolaires, en particulier, fournir un environnement intérieur confortable a toujours été un problème complexe en raison, notamment, de la forte occupation et de l'utilisation fréquente de ce type de bâtiments. En outre, les conditions thermiques sont considérées parmi les principaux aspects qui influencent la santé des écoliers pouvant sensiblement affecter leurs capacités et performance scolaire.

En Algérie, où les trois quarts de son territoire sont caractérisés par un climat chaud et aride, les établissements scolaires sont très souvent marqués par le problème de l'inconfort thermique. De plus, le stress thermique est, généralement, à son extrême à cause du taux d'occupation élevé des salles de classe. Dans ce même contexte, la littérature existante a confirmé que les économies d'énergie pourraient atteindre 50 à 75 %, grâce à des mesures telles que l'amélioration de l'enveloppe et des systèmes des bâtiments. Plus précisément, la performance thermique et énergétique de l'enveloppe est tributaire des choix constructifs relatifs aux éléments architecturaux, notamment, les murs, la toiture et les ouvertures généralement considérés comme éléments déterminants dans les échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement. Considérant le nombre relativement réduit de travaux consacrés à l'étude de l'impact des matériaux de l'enveloppe sur la performance thermique et énergétique des bâtiments scolaires dans un climat chaud et sec, la présente recherche tente de combler les lacunes dans ce domaine et se propose d'investir les moyens d'atteindre le double objectif du confort thermique de l'utilisateur et de la performance énergétique du bâtiment scolaire en agissant sur les caractéristiques matérielles de l'enveloppe.

Pour ce faire, un cadre méthodologique a été élaboré ; il s'appuie sur trois approches fondamentales : conceptuelle, empirique et numérique. L'approche conceptuelle est fondée sur une revue de la littérature et une recherche bibliographique visant à approfondir la connaissance des concepts liés au sujet. D'autre part, l'approche empirique s'est appuyée sur des mesures in situ combinées à des enquêtes et des questionnaires pour étudier et évaluer quantitativement et

qualitativement le confort thermique et la performance énergétique dans trois établissements scolaires existants ayant servis comme cas d'étude. Les bâtiments sont situés dans la ville de Sidi Okba ; il est été choisi pour illustrer trois périodes de construction et ainsi différentes variantes d'enveloppe se distinguant selon les matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures. De ce point de vue, les établissements pris comme cas d'étude, ont permis de mener une analyse comparative concluante relative à l'influence des matériaux de l'enveloppe sur les performances thermiques et énergétiques du bâtiment et sur la sensation et la satisfaction des utilisateurs. Enfin, une étude numérique à l'aide des logiciels de simulation thermique et énergétique DesignBuilder et EnergyPlus, a été réalisée dans le but d'étudier et d'optimiser l'impact du choix des matériaux d'enveloppe et de leurs propriétés sur les performances du bâtiment scolaire. Une série de modèles et de scénarios ont été testés pour étudier l'impact des composants de l'enveloppe du bâtiment (matériaux des parois opaques, isolation, vitrage) et leurs propriétés (épaisseur des murs, type et positions d'isolation, type de verre et facteur d'ombrage, couleurs des surfaces et textures). Au final, les paramètres les plus performants ont été sélectionnés comme solution optimale.

Les résultats obtenus ont permis de mieux comprendre l'interaction entre les différents éléments de l'enveloppe et l'impact de leurs propriétés sur la performance thermique et énergétique du bâtiment scolaire dans un contexte climatique chaud et sec. En outre, l'étude a également mis en évidence le potentiel des différentes combinaisons d'enveloppes possibles relativement aux paramètres étudiés notamment le choix des matériaux. Enfin, les résultats ont montré qu'un choix approprié des éléments architecturaux et des propriétés matérielles de l'enveloppe prenant en compte les spécificités climatiques du contexte dans les premières étapes du processus de conception, peut améliorer substantiellement les conditions de confort thermiques tout en réduisant les besoins énergétiques du bâtiment scolaire.

Mots-clés

Confort thermique, efficacité énergétique, enveloppe du bâtiment, établissement scolaire, propriétés des matériaux, mesures in situ, simulation, climat chaude et aride.

Abstract

Ensuring the indoor thermal comfort of buildings while minimizing energy consumption is one of the greatest challenges for designers in the modern era, especially with the current climate and economic crisis. In schools, in particular, providing a comfortable indoor environment has always been a complex issue due, in particular, to the high occupancy and frequent use of this type of buildings. In addition, thermal conditions are considered among the main aspects that influence the health of school's children which can significantly affect their abilities and academic performance.

In Algeria, where three quarters of its territory are characterized by a hot and arid climate, schools are very often marked by the problem of thermal discomfort. In addition, heat stress is generally at its extreme due to the high occupancy rate of classrooms. In this same context, the existing literature has confirmed that energy savings could reach 50 to 75%, using different measures such as the improvement of the building envelope and systems. More specifically, the thermal and energy performance of the envelope depends on the construction choices relating to the architectural elements, in particular the walls, the roof and the openings generally considered as decisive elements in the heat exchanges between the building and its environment. Considering the relatively small number of works devoted to the study of the impact of envelope materials on the thermal and energy performance of school buildings in a hot and dry climate, the present research attempts to fill the gaps in this field and proposes to invest the means to reach the double objective of the thermal comfort of the user and the energy performance of the school building by acting on the material characteristics of the envelope.

To do this, a methodological framework has been developed; it is based on three fundamental approaches: conceptual, empirical and numerical. The conceptual approach is based on a review of the literature and a bibliographic research aimed at deepening the knowledge of the concepts related to the subject. On the other hand, the empirical approach was based on in situ measurements combined with surveys and questionnaires to study and evaluate quantitatively and qualitatively the thermal comfort and the energy performance in three existing schools chosen as case studies. The buildings are located in the town of Sidi Okba;

it was chosen to illustrate three periods of construction and thus different envelope variants differing according to the materials used for the construction of the exterior walls. From this point of view, the establishments taken as case studies have made it possible to carry out a conclusive comparative analysis relating to the influence of the materials of the envelope on the thermal and energy performance of the building and users satisfaction. Finally, a numerical study using the thermal and energy simulation software DesignBuilder and EnergyPlus was carried out with the aim of studying and optimizing the impact of the choice of envelope materials and their properties on the performance of the school buildings. A series of models and scenarios were tested to study the impact of building envelope components (opaque wall materials, insulation, and glazing) and their properties (wall thickness, type and positions of insulation, type of glass and shading factor, surface colors and textures). In the end, the best performing parameters were selected as the optimal solution.

The results obtained have made it possible to better understand the interaction between the different elements of the envelope and the impact of their properties on the thermal and energy performance of the school building in a hot and dry climatic context. In addition, the study also highlighted the potential of the different possible combinations of envelopes with respect to the parameters studied, in particular the choice of materials. Finally, the results showed that an appropriate choice of architectural elements and material properties of the envelope taking into account the climatic specificities of the context in the initial stages of the design process, can substantially improve the thermal comfort conditions while reducing the energy needs of the school building.

Keywords

Thermal comfort, Energy efficiency, Building envelope, School buildings, Materials properties, Field Measurements, Numerical Simulation, Hot and arid climates.

الملخص

يعتبر ضمان الراحة الحرارية الداخلية مع تقليل الاستهلاك الطاقوي في المباني أحد أكبر التحديات للمصممين والمعماريين في العصر الحديث، خاصة في ظل الأزمات المناخية والاقتصادية الحالية. في المباني المدرسية على وجه الخصوص ، حيث يمثل توفير بيئة داخلية مريحة تحديًا دائمًا بسبب كثرة المستخدمين والاستخدام المتكرر لهذا النوع من المباني ، خاصة في حين إن الظروف الحرارية تعتبر من العوامل الرئيسية التي تؤثر على صحة المستخدمين ويمكن أن تتعدى ذلك للتأثير على قدرات الطلاب وأدائهم الأكاديمي.

في الجزائر، أين تتميز ثلاثة أرباع أراضيها بمناخ حار وجاف، تعاني المدارس غالبًا مشكلة غياب الراحة الحرارية بالإضافة إلى ذلك ، يكون الإجهاد الحراري بشكل عام في ذروته بسبب ارتفاع معدل الإشغال الفصول الدراسية. في هذا السياق نفسه، أكدت الدراسات الحالية أن توفير الطاقة يمكن أن يصل إلى 50 إلى 75٪ ، بفضل الاعتماد على تدابير مثل تحسين غلاف المبنى وأنظمتها. وبشكل أكثر تحديدًا ، يعتمد الأداء الحراري والطاقوي لغلاف المبنى على الخيارات المتعلقة بالعناصر المعمارية ، ولا سيما الجدران والسقف والفتحات التي تعتبر بشكل عام العناصر الأساسية المتدخللة في التبادل الحراري بين المبنى وبيئته. بالنظر إلى العدد الصغير نسبيًا من الأعمال المخصصة لدراسة تأثير مواد الغلاف على الأداء الحراري والطاقة للمباني المدرسية في مناخ حار وجاف ، يحاول البحث الحالي سد الثغرات في هذا المجال ويقترح استثمار الوسائل للوصول إلى الهدف المزدوج المتمثل في توفير الراحة الحرارية للمستخدم وتحسين الأداء الطاقوي للمباني المدرسية من خلال العمل على الخصائص المادية للمغلف.

لهذا الغرض ، تم تطوير إطار منهجي ؛ يقوم على ثلاثة مناهج أساسية: المفاهيمية والتجريبية والعديدية. يعتمد النهج المفاهيمي على مراجعة الأدبيات والبحوث الببليوغرافية من أجل تحديد وتعميق المعرفة بالمفاهيم المتعلقة بالموضوع. من ناحية أخرى ، اعتمد النهج التجريبي على القياسات في الموقع جنبًا إلى جنب مع المسوحات والاستبيانات لدراسة وتقييم الراحة الحرارية وأداء الطاقة من الناحية الكمية والنوعية في ثلاث مدارس موجودة وقيد الاستخدام كانت بمثابة دراسات حالة. تقع المباني المختارة في مدينة سيدي عقبة. تم اختيارهم لتوضيح ثلاث فترات زمنية من البناء وبالتالي اختلاف متغيرات الغلاف المعماري وفقًا للمواد المستخدمة في بناء الجدران الخارجية. من وجهة النظر هذه ، فإن المؤسسات التي تم أخذها كدراسات حالة جعلت من الممكن إجراء تحليل مقارنة حاسم فيما يتعلق بتأثير مواد الغلاف على الأداء الحراري والطاقوي للمباني وعلى الإحساس بالراحة الحرارية. أخيرًا، تم إجراء دراسة عددية باستخدام برنامج المحاكاة الحرارية والطاقة DesignBuilder و EnergyPlus ، بهدف دراسة وتحسين تأثير اختيار مواد الغلاف وخصائصها على أداء مبنى المدرسة. وقد أتاحت هذه الدراسة إنشاء وتطوير سلسلة من النماذج والسيناريوهات لدراسة تأثير مكونات غلاف المبنى (مواد الجدران ، والعزل ، وزجاج النوافذ) وخصائصها (سمك الجدار ، ونوع العزل والمواقع ، ونوع الزجاج ، وعامل التظليل ، وألوان ومعالجة الأسطح) ، في النهاية ، يتم اختيار أفضل الخصائص كحل مثالي.

جعلت النتائج التي تم الحصول عليها من الممكن فهم التفاعل بين العناصر المختلفة لغللاف المباني بشكل أفضل وتأثير خصائصها على الأداء الحراري والطاقي لمباني المدرسية في سياق مناخي حار وجاف. بالإضافة إلى ذلك ، أبرزت الدراسة أيضًا إمكانات المجموعات المختلفة الممكنة لغللاف المباني ، ولا سيما اختيار المواد. أخيرًا ، أظهرت النتائج أن الاختيار المناسب للعناصر المعمارية وخصائص المواد لغللاف المباني مع مراعاة الخصائص المناخية للسياق في المراحل الأولى من عملية التصميم ، يمكن أن يحسن ظروف الراحة الحرارية بشكل كبير مع تقليل احتياجات الطاقة في المباني المدرسية.

الكلمات المفتاحية

الراحة الحرارية، الفعالية الطاقوية، غلاف المباني، المؤسسات التعليمية، خصائص المواد، القياسات في الموقع المحاكاة، المناخ الحار والجاف.

Table des matières

Résumé	I
Abstract	III
المخلص	V
Tables des matières	VI
Liste des Figures.....	XIV
Liste des tableaux	XX
Nomenclature:	XXI

Chapitre introductif

1. Introduction	1
2. Problématique.....	6
3. Les hypothèses	7
5. L'analyse conceptuelle.....	8
6. Méthodologie	9
7. Structure de la thèse	10

Première Partie : Partie Théorique

Chapitre I : Le Confort Thermique dans le bâtiment vers une efficacité énergétique

Introduction	14
I.1.Généralité sur la notion du confort thermique dans le bâtiment.....	15
I.1.1. Les paramètres affectant le confort thermique.....	16
I.2.1. Les paramètres liés à l'individu.....	16
I.2.1.2. L'habillement.....	18
I.2.2. Les paramètres liés à l'environnement	19
I.2.2.1. La température ambiante de l'air (Ta)	19
I.2.2.3. La température radiante des parois	19
I.2.2.4. La vitesse relative de l'air	20
I.3. Les approches du confort thermique.....	21
I.3.1. L'approche analytique statique	21
I.3.1.1. L'aspect physiologique : la thermorégulation.....	22
I.3.1.2. L'aspect physique	23
I.3.1.2. 1.Les changes thermique.....	23
I.3.1.2. 2.Le bilan thermique	24
I.3.1.3. L'aspect psychologique : la sensation thermique	25

I.3.1.3. 1.La sensation thermique	25
I.3.2. L'approche adaptative.....	26
I. 4. L'évaluation du confort thermique dans le bâtiment	27
I.4. 1.Evaluation par les indices thermiques.....	28
I.4. 1.1.les modèles environnementaux simple	28
I.4. 1.2. Les PMV et PPD	29
I.4. 2.Evaluation par des outils graphiques	30
I.4. 3.Evaluation par enquête en situ	31
I.4. 4.Evaluation par simulation numérique	32
I.5. Les normes et régulations du confort thermique.....	32
I.5. 1.la norme ISO	32
I.5. 2.Les norms d'ASHRAE	33
I.5. 3.Les normes et régulations en Algérie.....	34
I.2.le contexte et la consommation énergétique	34
I.2.1. Le contexte énergétique mondial	35
I.2.2. le contexte énergétique en Algérie.....	36
I.2.2.1. La consommation énergétique du secteur du bâtiment en Algérie	37
I.2.3. L'efficacité énergétique dans le bâtiment	38
I.2.4. Les mesures et les instruments de l'efficacité énergétique.....	39
I.2.4.1. Les instruments de l'efficacité énergétique en Algérie.....	40
I.2.5. La consommation d'énergies et le climat	41
I.2.6. Principaux consommateurs d'énergies dans les bâtiments	42
Conclusion :.....	43

Chapitre II : L'évolution de conception des Bâtiments Scolaire

Introduction :.....	44
II.1. L'évolution du concept d'établissement scolaire :.....	45
II.1.1. La Naissance d'un espace bâti destiné à l'éducation :.....	45
II.1.2. La Naissance et évolution d'une architecture scolaire :	45
II.1.2.1. École du père Grégoire Girard :.....	46
II.1.2.2. Les bâtiments scolaires à typologie 'Heimatstil' :.....	46
II.1.2.3. École en barre :	47
II.1.2.4. Les écoles pavillonnaires :.....	47
II.1.2.5. Les écoles de plein air :	48
II.1.2.6. Les écoles à aires ouvertes :.....	48
II.1.2.7. La préfabrication et standardisation du bâtiment scolaire :.....	49
II.1.2.8. Les écoles modulables :.....	49

II.1.3. L'Evolution spatiale des bâtiments scolaires en Algérie :.....	49
II.1.3.1. la période précoloniale avant 1830 :.....	50
II.1.3.2. la période coloniale de 1830 à 1962 :.....	50
II.1.3.3. La période postcoloniale (après 1962) :.....	51
II.2. L'Architecture des établissements scolaires :.....	52
II.2.1. L'Architecture des établissements scolaires en Algérie :.....	52
II.2.2. La programmation :.....	53
II.2.3. La conception des bâtiments scolaires :.....	53
II.2.3.1. L'implantation :.....	53
II.2.3.2. La flexibilité :.....	54
II.2.3.3. L'orientation :.....	54
II.2.4. La gestion et l'exploitation :.....	54
II.2.5. Les typologies des établissements scolaires :.....	55
II.2.5.1. Selon l'aspect pédagogique :.....	56
II.2.5.2. Selon la configuration spatiale :.....	56
II.2.5.2.1. Les bâtiments scolaires en Europe :.....	57
II.2.5.2.2. Les bâtiments scolaires au Royaume-Uni :.....	58
II.2.5.2.3. Typologies du bâtiment scolaire en Algérie :.....	59
II.2.6. Les salles de classe :.....	61
Conclusion.....	63

Chapitre III : L'enveloppe du bâtiment entre un élément de conception architectural et régulation thermique dans un climat chaud et aride

Introduction.....	64
III.1. L'enveloppe comme un élément de conception architectural :.....	65
III.1.1. Le développement de la notion d'enveloppe architectural :.....	65
III.1.2. Les types et classification de l'enveloppe architecturale.....	66
III.1.2.1. Les types de l'enveloppe architecturale.....	66
III.1.2.2. Les classifications de l'enveloppe architecturale :.....	67
III.1.2.2.1. Selon le principe d'opération :.....	68
III.1.2.2.2. Selon les fonctions :.....	68
III.1.2.2.3. Selon les matériaux utilisés :.....	70
III.1.2.2.4. Selon les composants :.....	71
III.1.2.2.5. Selon la forme :.....	71
III.1.3. Les éléments constructifs de l'enveloppe :.....	72
III.1.3.1. Les parois opaques :.....	73
III.1.3.1.1. Les Murs de façade :.....	73

III.1.3.1.2. Les toitures et les dalles :	73
III.1.3.2. Les parois transparentes :	74
III.1.3.2.1. Les ouvertures :	74
III.2. L'enveloppe comme un régulateur thermique	75
III.2.1. Le comportement thermique de l'enveloppe architecturale	76
III.2.1.1. Les comportements thermiques des parois opaques :	76
III.2.1.2. Les comportements thermiques des parois transparents :	77
III.2.2. Les modes de transfert de chaleur :	77
III.2.2.1. La conduction thermique :	78
III.2.2.2. La convection thermique :	78
III.2.1.3. Le rayonnement :	78
III.2.3. Les propriétés thermo-physiques des matériaux d'enveloppe :	78
III.2.3.1. La conductivité thermique (λ) :	78
III.2.3.2. La résistance thermique (R) :	79
III.2.3.3. La capacité thermique (pC) :	79
III.2.3.4. Le coefficient de transmission surfacique (U) :	80
III.2.3.5. L'inertie thermique :	80
III.2.3.6. La diffusivité thermique :	80
III.2.3.7. L'effusivité thermique :	81
III.2.3.8. Le déphasage thermique :	81
III.2.3.9. La texture :	81
III.2.3.10. Les couleurs :	81
III.2.4. L'effet thermique des matériaux d'enveloppe :	83
III.2.4.1. L'effet des ponts thermiques :	83
III.2.4.2. L'effet de compacité et factor de forme :	84
III.2.4.3. Déperdition thermique de l'enveloppe :	85
III.3. Le climat : le principal influenceur de la performance de l'enveloppe	86
III.3.1. Le climat :	86
III.3.1.1. Les types de climats :	86
III.3.1.2. Caractéristiques climatiques du climat chaud et sec :	88
Conclusion :	88

Chapitre IV : L'état de l'art et élaboration du modèle d'analyse

Introduction	90
IV.1. Etat de l'art sur l'étude et l'évaluation du confort thermique et l'efficacité énergétique des établissements scolaires	90
IV.1.1. Evaluation du confort thermique à travers les paramètres physiques caractérisant l'environnement thermique	91

IV.1.1.1. L'impact des températures d'environnement intérieur	92
IV.1.1.2. L'impact de l'humidité relative et la qualité de l'air intérieur	93
IV.1.2. Evaluation du confort thermique à travers son paramètres personnel d'occupation ...	94
IV.1.2.1. L'impact de métabolisme et niveau d'activité	95
IV.1.2.2. L'impact d'habillement et niveau vestimentaire	95
IV.2. Etude de l'impact des paramètres architectural et constructive des établissements scolaires sur le confort thermique et performance énergétique :	97
IV.1.3.1. Paramètres liés à l'espace (typologie, position et orientation) :	97
IV.1.3.2. L'impact des paramètres liés à l'enveloppe :	99
IV.1.3.2.1. La partie opaque d'enveloppe :	100
IV.1.3.2.2. La partie transparente d'enveloppe	102
IV.3. Etude de l'impact des paramètres mécaniques (les systèmes de chauffage /climatisation et ventilation mécanique) :	105
IV.4. Etude sur l'impact de type de climat	107
IV.5. Les méthodes utilisées pour évaluer le confort thermique dans les établissements scolaire	110
IV.5.1. Méthode de collecte et analyse des données préliminaires	111
IV.5.2. Méthode desmesures des paramètres physiques in situ	112
IV.5.2.1. Temps et périodes des mesures	112
IV.5.2.2. L'appareillageet les outils des mesures /position	113
IV.5.2.3. Les positions des mesures	114
IV.5.3. Méthode d'enquête par questionnaire	115
IV.5.4. Simulation thermique et énergétique	117
IV.5.4.1. Quelques outils de simulation thermique et énergétique	118
IV.6. Elaboration d'une méthodologie de recherche	120
Conclusion	121

Deuxième Partie : Partie Pratique

Chapitre V : Présentation du cadre de référence et des cas d'études

Introduction	123
V.1. Présentation de contexte climatique d'étude	123
V.1.1. Le climat de l'Algérie	124
V.1.2. Situation géographique de la willaya de Biskra	124
V.1.3. Données climatiques de la commune de Sidi Okba (Biskra)	125
V.1.3.1. La température d'air	126
V.1.3.2. L'humidité relative	126
V.1.3.3. Les vents dominants	127

V.1.3.4. Les précipitations	128
V.1.3.5. Les rayons solaires	128
V.2. Analyse bioclimatique	129
V.2.1. Déterminer la zone de surchauffe.....	129
V.2.2. Diagramme de Givoni	129
V.2.3. Tables de Mahoney	131
V.2.4. Synthèse et recommandations	132
V.3. Sélection et analyse des bâtiments scolaires utilisés comme cas d'étude	132
V.3.1. Bâtiments scolaires à Biskra.....	132
V.3.2. Enquête préliminaire sur les établissements scolaires à Biskra : critères de choix	132
V.3.3.1. Cas01 : l'établissement d'enseignement moyen : Chadli Ahmed Sidi Okba.....	136
V.3.3.2. Cas02 : l'établissement d'enseignement moyen : Cheikh Saleh Massoudi Sidi Okba	139
V.3.3.3. Cas03 : l'établissement d'enseignement moyen : Massoudi Mostapha Sidi Okba ..	142
Conclusion.....	145

Chapitre VI : Évaluation empirique de la performance thermique des bâtiments pris comme cas d'étude

Introduction	146
VI.1. Déroulement de la campagne de mesures in situ	146
VI.1.1. Etalonnage des instruments de mesure	147
VI.1.2. Les paramètres mesurés	147
VI.1.3. Choix des périodes de mesures	148
VI.1.4. Le protocole de prise des mesures	148
VI.1.5. Analyse et interprétation des résultats de la campagne de mesures in-situ durant la période estivale.....	149
VI.1.5.1. Résultats des mesures du Cas 01 ; CEM « Chadli Ahmed »	149
VI.1.5.1. Résultats des mesures du Cas 02 ; CEM « Cheikh Saleh »	151
VI.1.5.1. Résultats des mesures Cas 03 ; CEM « Massoudi Mustapha »	152
VI.1.6. Analyse et interprétation des résultats de la campagne de mesures in-situ durant la période hivernale	154
VI.1.5.1. Résultats des mesures du Cas 01 ; CEM « Chadli Ahmed »	154
VI.1.5.1. Résultats des mesures Cas 02 ; CEM « Cheikh Saleh »	156
VI.1.5.1. Résultats des mesures pour le Cas 03 ; CEM « Massoudi Mustapha »	157
VI.1.7. Etude comparative des résultats et synthèse générale.....	158
VI.1.7. 1. Impact des matériaux d'enveloppe sur la température ambiante Ta.....	159
VI.1.7. 2. Impact des matériaux d'enveloppe sur la température surfacique Ts	160

VI.1.7. 3. Impact des matériaux de l'enveloppe sur l'humidité relative (H_R).....	161
VI.1.7. 4. Synthèse générale.....	161
VI.2. L'enquête par questionnaire : une évaluation post-occupationnelle.....	162
VI.2.1. La conception du questionnaire	162
VI.2.2. Choix de l'échantillon.....	164
VI.2.3. Déroulement de l'enquête	165
VI.2.4. Analyse et interprétation des résultats de l'enquête par questionnaires.....	165
VI.2.4.1. Information générale : genre et âge des questionnés	166
VI.2.4.2. Les paramètres liés à l'individu comme facteurs influençant le confort	166
VI.2.4.2. 1. Métabolisme et activité physique.....	166
VI.2.4.2. 2. L'habillement et le niveau vestimentaire	167
VI.2.4.3. Evaluation des paramètres physiques du confort thermique dans les conditions naturelles	167
VI.2.4.3.1. Appréciation de l'environnement thermique	167
VI.2.4.3.2. La période la plus convenable « Température d'air ».....	168
VI.2.4.3.3. L'humidité de l'air	169
VI.2.4.3.4. Mouvement d'air.....	169
VI.2.4.4. Satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique.....	170
VI.2.4.5. L'utilisation des systèmes mécaniques pour les besoins de confort thermique	170
VI.2.4.6. Appréciations relatives à la taille des ouvertures	171
VI.2.4.7. L'appréciation de l'environnement général (thermique, lumineux, sonore).....	172
VI.2.4.8. Les facteurs les plus influents du confort dans la classe	172
VI.2.4.9. Possibilités de changement de l'environnement	173
VI.2.4.10. Les questions adressées aux enseignants	173
Conclusion.....	174

Chapitre VII : Étude par simulation paramétrique pour optimiser l'enveloppe du bâtiment scolaire

Introduction	176
VII.1. La simulation paramétrique outil d'évaluation et d'optimisation de la performance du bâtiment.....	176
VII.1.1. Présentation du logiciel de la simulation utilisé	177
VII.1.1.1. DesignBuilder V.6.1	177
VII.1.1.2. EnergyPlus V8.9	178
VII.2. Les étapes du processus de simulation avec DesignBuilder.....	179
VII.2.1. Les données relatives au site (données climatique)	182
VII.2.2. Type d'activité et mode d'occupation	182

VII.2.3. Modélisation des cas d'études	183
VII.2.3.1. La caractérisation physique et géométrique des cas d'études	183
VII.2.3.2. Les caractéristiques architecturales et matérielles de l'enveloppe	184
VII.2.4. Conditions de fonctionnement des bâtiments modélisés (HVAC, ventilation et éclairage)	186
VII.3. Simulation numérique et processus de validation	186
VII.3.1. Le protocole adopté	186
VII.3.2. Résultats de l'étude numérique par simulation.....	188
VII.3.2.1. Discussion des résultats : l'impact des matériaux opaques d'enveloppe sur la performance thermique et énergétique	189
VII.3.2.1.1. Résultats de la période estivale	190
VII.3.2.1.2. Résultats de la période hivernale	192
VII.3.3. La validation des résultats des simulations	194
VII.3.4. Elaboration des modèles virtuels	196
VII.4. Simulation et étude paramétrique des éléments de l'enveloppe	197
VII.4.1. Etude de l'impact des matériaux des parois opaques sur la performance de la façade	197
VII.4.2. Etude de l'impact des matériaux d'isolation	199
VII.4.3. Etude de l'impact des propriétés surfaciques des parois opaques	204
VII.4.4. Etude de l'impact du ratio d'ouvertures	205
VII.4.5. Etude de l'impact du type de vitrage	207
VII.4.6. Etude de l'impact du facteur d'ombrage.....	208
VII.4.7. L'impact des caractéristiques des ouvertures sur la performance énergétique	210
VII.5. Développer un model optimale pour améliorer la performance thermique et énergétique de l'enveloppe des bâtiments scolaires à Biskra	211
VII.5.1. L'optimisation de l'enveloppe en fonction des parois opaques	211
VII.5.2. L'optimisation de l'enveloppe en fonction des ouvertures	212
VII.5.3. Elaboration d'un modèle de salle de classe optimal en termes de murs de façade... ..	214
Conclusion.....	217
Conclusion générale	219
Recommandations	227
Limites de la recherche.....	229
Perspectives de recherche.....	229
Bibliographie.....	230
Annexes	243

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'analyse conceptuelle	9
Figure 2 : Schéma de la structure de la thèse	13
Figure. I.1 : Les paramètres affectant le confort thermique (Source : l'auteur)	16
Figure I.2: Relation entre la température du confort de l'activité métabolique. (Source: Liébard et De Herde, 2005 d'après Fanger)	17
Figure I.3 : Des valeurs exprimées en Clo des différents tenues vestimentaires, source : Mazari (2012).	18
Figure I.4 : La température de confort (Source : Liébard et De Herde, 2005).....	19
Figure I.5 : Les types et le mécanisme de thermorégulation humain (Source : Moujalled, 2007).....	22
Figure. I.6. Les modes de transfert de chaleur entre le corps et son environnement.(Source : Fabbri, 2015)....	23
Figure. I.7. Les Interactions thermique du corps humain et de l'environnement.(Source : ASHRAE ,1997)	25
Figure. I.8.Diagramme schématique du principe holistique des modèles adaptatifs (source : Croitoru et al, 2015 adaptés par l'auteur)	27
Figure. I.9.Le pourcentage de PPD en fonction de la PMV (source : Batier, 2016).....	30
Figure I.10.Le diagramme psychrométrique de Givoni, 1992 adapté par Manzano-Agugliaro et al. 2015 (source : Berkouk, 2017)	31
Figure I.11 : La consommation énergétique mondial en 2019 (Source : The Global Energy Statistical Yearbook, 2020)	36
Figure I.12.La production d'énergie en Algérie en 2017(source :le bilan énergétique national, 2017)	36
Figure I.12.La consommation d'énergie en Algérie en 2017(source :le bilan énergétique national, 2017)	37
Figure I.14 : La consommation énergétique en Algérie en 2019 (Source : The Global Energy Statistical Yearbook, 2020)	37
Figure I.15 : La Consommation énergétique finale de l'Algérie par secteur (Source: APRUE, 2009)	38
Figure I.16 : La Consommation énergétique finale du secteur par type d'énergie (Source: APRUE, 2009)	38
Figure I.17 : Répartition de la consommation du secteur de bâtiment par type d'énergie. (Source : L'APARUE 2017)	43
Figure II.1 : Frise chronologique de l'architecture scolaire en France (source : Barthelemy, 2019)	46
Figure II.2:L'école de père Grégoire Girard. Source :(Forster, 2004)	46
Figure II.3 : Bâtiment scolaire à typologie Heitmatstil. Source : (Foster S. et al., 2004).	47
Figure II.4 : École Meerweinstraße à Hambourg. 1927-1930. Source : (Châtelet & Le Cœur, 2004)	47
Figure II.5 : La typologie de bâtiment a cour. Source :(Riglion 2010)	57
Figure II.6 : La typologie de bâtiment type bloc. Source :(Riglion 2010)	58

Figure II.7 : La typologie de bâtiment type Grappe. Source :(Riglion 2010).....	58
Figure II.8 : La typologie de bâtiment type ville. Source :(Riglion 2010).....	58
Figure II.9 : Les différentes typologies des bâtiments scolaires au Royaume-Uni. Source : (SBDU, 2002)	59
La figure II.10 : exemple de la typologie de plan à coursive.	60
La figure II.11 : exemple de la typologie de plan à coursive. Source : (Tebbouche, 2010 adaptés par l'auteur)	60
Figures II.12 : Les différentes typologies et configuration spatiale des bâtiments scolaires in Algérie. Source : (Lakhdari, 2021)	61
Figure II.13 :L'aménagement et dimensions recommandées pour une salle de classe ordinaire. Source:(Ministère de l'éducation nationale, 1971 ; Saddok,2016 adaptés par l'auteur)	62
Figure III.1 : présente le développement du concept d'enveloppe. Source :(Emilie, 2009 adaptés par l'auteur)	66
Figure III.2 : Exemple d'une enveloppe porteur. Source : (L'auteur).....	67
Figure III.3 : Exemple d'une enveloppe non-porteuse. Source : (L'auteur)	67
Figure III.4 : Exemple d'enveloppe simple et ventilée (façade). Source : (l'auteur)	68
Figure III.5 : Le mur capteur et leurs composants. Source : (https://www.cobse.fr/)	69
Figure 3.6 : Le principe de mur trombe. Source : (Liebard et De Herde ,2005).....	70
Figure III.7 : Le principe de fonctionnement <i>desserres et vérandas</i> en hiver et en été. Source : (Liebard et De Herde ,2005)	70
Figure III.8 : des exemples d'une enveloppe monocouche et multicouche. Source : (l'auteur)	71
Figure III.9 : Les différentes formes d'enveloppe du bâtiment. Source : (l'auteur)	72
Figure III.10 : Les éléments constructifs de l'enveloppe du bâtiment. Source : (https://www.iko.com/)	73
Figure III.11 : Coupe détaillée sur une dalle /toit accessible et non accessible. Source : (Latreche, 2019).....	74
Figure III.12: Fenêtres de l'enveloppe du bâtiment. Source : (l'auteur).....	74
Figure III.13 : Une enveloppe transparente : murs et toits. Source : (L'auteur).....	75
Figure III.14: Les différentes agressions environnementales que subit l'enveloppe du bâtiment. Source : (Hauglustain, 2018).....	76
Figure III.15 : Le comportement thermique d'une paroi opaque. Source : (Nusrat, 2020)	77
Figure III.16 : Le comportement thermique de parties transparentes d'enveloppes (vitrage des fenêtres). Source : (https://www.yourhome.gov.au/passive-design/glazing)	77
Figure 3.17 :Les modes de transfert de chaleur. Source : (Hauglustain ,2018).	78
Figure III.18 : Les valeurs de conductivité de quelques matériaux d'enveloppe. Source :(Liebard et De Herde, 2005).....	79
Figure III.19 : Les coefficients d'absorption α pour différents matériaux et couleurs. Source : (Liebard et De Herde,2005)	83

Figure III.20 : Les ponts thermiques dans l'enveloppe et les problèmes occasionnés. Source : (Liebard et De Herde, 2005)	84
Figure III.21 : Les différents facteurs qui influent sur le coefficient de la forme. Source : (Liebard et De Herde, 2005)	85
Figure III.22 : Les déperdition thermique des parties d'enveloppe. Source : (https://www.ccpv-sud.fr/amenagement-isolation-thermique-combles.html)	86
Figure III.23. Les différents zonages et classification climatique mondiale de Koppen selon la dernière version de Beck. (Beck, 2018)	87
Figure III.24 : La situation géographique des climats désertiques chaude et aride <i>BWh</i> . Source : (Beck, 2018)	88
Figure IV.1 Les mots clés et les termes utilisés pour la revue de littérature	91
Figure IV.2 Les différents zonages climatiques de la littérature consultée.	107
Figure IV.3 les principales méthodes et techniques utilisées dans l'évaluation thermique et énergétique des bâtiments scolaire	111
Figure IV.4 Exemple des questions utilisées. (Haddad et al 2012)	116
Figure IV.5 Exemple des questions utilisées. (Rodriguez et al 2019)	117
Figure V.1 : Classification climatique mondial selon Köppen et les zones climatiques de l'Algérie (source : https://fr.wikipedia.org)	124
Figure V.2 : La situation de la wilaya de Biskra (source : https://fr.wikipedia.org)	125
Figure V.3 : La situation géographique de la commune de Sidi Okba dans la wilaya de Biskra (source : https://fr.wikipedia.org)	125
Figure. V.2 : Températures moyenne annuelle de Sidi Okba de période 2000-2009 (source : logiciel Meteonorm v7.2)	126
Figure V.5 : La distribution de la direction du vent et la rose des vents dans la région de Sidi Okba (source : https://www.windfinder.com/)	127
Figure V.6 : Les valeurs et fréquences des précipitations mensuelles à Sidi Okba; période 2000-2009 (source : logiciel Meteonorm v7.2)	128
Figure. V.7 : Les niveaux du rayonnement solaire quotidien et mensuel à Sidi Okba ; période 2000-2009 (source : logiciel Meteonorm v7.2)	128
Figure. V.7 : Matrice de la température sèche montrant la zone de surchauffe (source : logiciel climate consultant V 6.0)	129
Figure. V.8 : Diagramme psychrométrique de Givoni de la ville de Sidi Okba adapté par l'auteur (source : la logiciel climate consultant V 6.0)	130
Figure. V.9 : Les bâtiments scolaires de la présélection	134
Figure VI.1 : Les points des mesures et les paramètres mesurés (source : l'auteur)	149
Figure VI.2 : Lescourbes des températures ambiantes(à gauche) et surfaciques(à droite) dans les classes dubâtiment1 (B1) durant la journée du 8/9/2019 (source : l'auteur)	149

Figure VI.3 : Courbes des ratios de l'humidité relative (HR) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment1 (B1), durant la journée du 8/9/2019 (source : l'auteur)	150
Figure VI.4 : Les courbes des températures ambiante (à gauche) et surfacique (à droite) dans les classes du bâtiment2(B2) durant la journée du 9/9/2019 (source : l'auteur).....	151
Figure VI.5 : Courbes des ratios de l'humidité relative (HR) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment1 (B2), durant la journée du 9/9/2019 (source : l'auteur)	152
Figure VI.6 : Les courbes des températures ambiante (à gauche) et surfacique (à droite) dans les classes du bâtiment3 (B3) durant la journée du 10/9/2019 (source : l'auteur)	153
Figure VI.7 : Courbes des ratios de l'humidité relative (HR) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment3 (B3), durant la journée du 10/9/2019 (source : l'auteur).....	153
Figure VI.8 : Les courbes des températures ambiante (gauche) et surfacique (droite) dans les classes du bâtiment1 (B1) durant la journée du 12/01/2020 (source : l'auteur)	154
Figure VI.9 : Courbes des ratios de l'humidité relative (HR) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du Bâtiment1 (B1), durant la journée du 12/1/2020 (source : l'auteur)	155
Figure VI.10 : Les courbes des températures ambiante (gauche) et surfacique (droite) dans les classes du bâtiment2 (B2) durant la journée du 13/01/2020 (source : l'auteur)	156
Figure VI.11 : Courbes des ratios de l'humidité relative (HR) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du Bâtiment2 (B2), durant le 13/1/2020 (source : l'auteur)	157
Figure VI.12 : Les courbes des températures ambiante (gauche) et surfacique (droite) dans les classes du bâtiment1 (B3) durant la journée du 14/01/2020 (source : l'auteur)	158
Figure VI.13 : Courbes des ratios de l'humidité relative (HR) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment3 (B3), durant le 14/1/2020 (source : l'auteur)	158
Figure VI.14 : Comparaison des températures ambiantes pour les trois bâtiments.	159
Figure VI.15 : Comparaison des températures surfaciques pour les trois bâtiments.	160
Figure VI.15 : Comparaison des humidités relatives mesurées dans les trois bâtiments durant les deux périodes estivale et hivernale.	161
Figure VI.16 : Exemple de questionnaire remis aux élèves.	163
Figure VI.17 : Echantillons des groupes d'élèves questionnés.	166
Figure VI.18 : Niveau d'activité avant d'arriver à l'école.	166
Figure VI.19 : Appréciation de l'environnement thermique par les répondants.....	168
Figure VI.20 : La période la plus convenable de la journée selon la saison	168
Figure VI.21 : Appréciation de l'humidité relative (source : l'auteur).....	169
Figure VI.22 : L'impression sur le mouvement d'air intérieur.....	169
Figure VI.23.Satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique (source : l'auteur).....	170
Figure.VI.24 : L'utilisation des systèmes mécaniques.	171

Figure.VI.25.Appréciations relatives à la taille des ouvertures (source : l'auteur).....	171
Figure.VI.26.L'appréciation de (source : l'auteur).....	172
Figure VI.27 : Les facteurs les plus influents du confort dans la salle de classe	173
Figure VI.28 : Problèmes de santé causés par les températures élevées à l'intérieur des salles de classe.	174
Figure VII.1 : DesignBuilder interface ;(a) rendu de 3D, (b) graphes des calculs	178
Figure VII.2: (a) EnergyPlus extension sur DesignBuilder (b) ResultViewer interface	179
Figure VII.3 : Les inputs et les outputs du processus de simulation avec DesignBuilder.....	180
Figure VII.4 : Schéma de synthèse de l'étude numérique	181
Figure VII.5 : Les étapes de la simulation effectuée.	182
Figure VII.6 : Détermination des périodes d'occupation (occupancy pattern)sur DesignBuilder	183
Figure VII.7 : Les modèles 3Ddes cas d'études réalisés sur DesignBuilder	183
Figure VII.8 : Les étapes et le protocole de simulation	186
Figure VII.9 : Bâtiments modélisés sur DesignBuilder ;(a)Cas1 ;(b) Cas2 ;(c)Cas 3	187
Figure VII.10 : Les resultats des simulations : temperature operative, PMV et PPD ;.....	190
(a) Batiment B1, (b) Batiment B2, (c) Batiment B3.....	190
Figure VII.10 : Les résultats des températures opérative pendant une période estivale.....	191
Figure VII.11 : L'indice du vote moyen prévisible et le pourcentage prévisible d'insatisfaits pendant une période estivale	192
Figure VII.12 : Les résultats des températures opérative pendant une période hivernale.....	192
Figure VII.13 : L'indice du vote moyen prévisible et le pourcentage prévisible d'insatisfaits pendant une période hivernale.....	193
Figures VII.15 : Les températures et humidité intérieures et extérieures mesurées et simulées lors d'une journée représentative estivale.	194
Figure VII.14 : Résultats de la simulation énergétique de la consommation annuelle et de l'intensité énergétique annuelle utilisée pour les trois bâtiments étudiés.	194
Figure VII.16 : Le modèle de base représentant une salle de classe(en rouge) créé sous DesignBuilder	196
Figure VII.17 : Graphes des températures surfaciques internes simulées des modèles	198
(M1 Br, M2 Tr, M3 Pr).....	198
Figure VII.18 : Graphes des températures ambiantes simulées pour les modèles	198
(M1 Br, M2 Tr, et M3 Pr)	198
Figure VII.19 : Graphes de températures surfaciques internes simulées des modèles	199

(M Isol n, M Isol air, M isol EPS, M Isol ln vr).....	199
Figure VII.20 :Graphes des températures ambiantes internes simulées des modèles (M Isol n, M Isol air, M isol EPS, M Isol ln vr).....	200
Figure VII.21 : Graphes de températures surfacique simulées des modèles	201
(M Isol milieu, M Isol Ext, M isol Int)	201
Figure VII.22 : Graphes de températures ambiantes simulées des modèles (M Isol milieu, M Isol Ext, M isol Int)	202
Figure VII.23 : Graphes de la consommation énergétique annuelle en termes d'éclairage, climatisation, chauffage ainsi que les EUI des modèles testés.	203
Figure VII.24 : Graphes des températures surfaciques intérieures simulées des modèles avec différentes propriétés surfaciques.	204
Figure VII.25 : Graphes des températures ambiantes simulées des modèles avec différentes propriétés surfaciques.....	205
Figure VII.26 : Graphes de températures surfaciques internes simulées des modèles avec différents ratios d'ouvertures.	206
Figure VII.27 : Graphes de températures ambiantes simulées des modèles testés avec différents ratios d'ouvertures.	206
Figure VII.28 : Graphes de températures surfaciques internes simulées des modèles avec différents types de vitrage	207
Figure VII.29 : Graphes des températures ambiantes simulées des quatre modèles testés selon différents types de vitrage.	208
Figure VII.30 : Graphes de températures surfaciques internes simulées des modèles avec différents facteurs d'ombrage.	209
Figure VII.31 : Graphes de températures ambiantes simulées des modèles avec différents facteurs d'ombrage.	209
Figure VII.32 : Graphes de la consommation énergétique annuelle ainsi que les EUI des modèles testés en fonction des caractéristiques de l'ouverture.	210
Figure VII.33 : Graphes de températures surfaciques internes simulées du modèle de base et du modèle optimisé (M1Br Isol Mil Eps F ab0.2).	212
Figure VII.34 : Graphes de températures ambiantes simulées de modèle référence et le modèle optimisé (M1Br Isol Mil Eps Fab 0.2).	212
Figure VII.35 : Graphes de températures surfaciques internes simulées comparant le modèle de référence et le modèle optimisé (M Vdbl+gaz R ov20% F om0.8).	213
Figure VII.36 : Graphes de températures ambiantes simulées du modèle de base et du modèle optimisé (M Vdbl+gaz R ov20% F om0.8).	214
Figure VII.37 : Graphes des températures surfaciques internes simulées relatifs au modèle de base et au modèle optimisé global.	215

Figure VII.38 : Graphes de températures ambiantes simulées du modèle de base et du modèle optimisé global.	215
Figure VII.39 : Graphes de l'humidité relative simulée du modèle de base et du modèle optimisé global. ...	216
Figure VII.40 : Graphes de vote moyen prévisible « PMV » du modèle de base et celui du modèle optimisé global.	216
Figure VII.41 : Graphes de la consommation énergétique annuelle et de l'intensité énergétique annuelle simulées pour le modèle référence de base et le modèle optimisé global.	217

Liste des tableaux

Tableau 1.1.Taux et valeur métaboliques des différentes activités (Auliciems et Szokolay 1997 ; adapté par Berkouk ,2017)	14
Tableau. 1.2. L'échelle d'ASHRAE de sensation thermique (source : Moujalled, 2007).....	24
Tableau 4.1 Les études passées en revue et la zone climatique de chacun	107
Tableau 4.2.les instrument le plus utilisé dans la littérature pour les collectes des donnés	112
Tableau. 5.1 : Les températures moyenne annuelle de Sidi Okba de période 1998-2018 (source : https://fr.climate-data.org/)	125
Tableau. 5.2 : L'humidité relative mensuelle de Sidi Okba de période 2000-2009 (source : logiciel Meteonorm v7.2).....	125
Tableau 5.3 : les vitesse des vents mensuelle de Sidi Okba de période 2000-2009 (source : logiciel Meteonorm v7.2).....	126
Tableau. 5.4 : Limites de Zones du confort intérieur selon le diagramme psychométrique (source : Castilla et al. 2014 adaptés par Berkouk ,2017)	128
Tableau. 5.5 : Les différents zone et recommandation du diagramme de Givoni de la région de Sidi Okba (source : l'auteur).....	129
Tableau. 5.6 : La situation des cas choisi	132
Tableau 5.7 : détails constructifs du bâtiment de la 1 ^{er} Cas d'étude	134
Tableau 5.8 : détails constructifs du bâtiment de la 2eme Cas d'étude.....	137
Tableau 5.9 : détails constructifs du bâtiment de la 3 ^{eme} Cas d'étude	140
Tableau 6.1 : Les instruments des mesures utilisées	146
Tableau .6.2 : La distribution, La fiabilité et la taille de l'échantillon (source : l'auteur).....	162
Tableau 7.1 : Présentations des bâtiments choisis	180
Tableau 7.2 : Caractéristiques architecturales et matérielle des cas d'études.	181
Tableau 7.3 : Caractéristiques matérielles des toits, dalle et fenêtres.	182
Tableau 7.4 : Caractéristiques thermo-physique des matériaux d'enveloppe	183
Tableau 7.5 : Calculs horaires du MBE et du CV(RMSE).	190
Tableau 7.6 : Les caractéristique thermo-physique des modèles (M1 Br, M2 Tr, M3 Pr)	192
Tableau 7.7 : Les caractéristique thermo-physique des modèles (M n, M air, M EPS,M ln vr).....	193
Tableau 7.8 :les caractéristique thermo-physique des modèles (M Isol milieu, M Isol Ext, M isol Int)	195
Tableau 7.9 : les propriété surfacique physique des modèles simulés.	198
Tableau 7.10 : Les modèles crée sur DesignBuilder a diffrent ratio d'ouverture.....	199
Tableau 7.11 : les caréctiristiques des types de vitre choisi	201
Tableau 7.12 : Les modèles simulées avec des diffrents facteur d'ombrage.....	202

Nomenclature:

HVAC: Heating Ventilation and Air Conditioning

CVC : Chauffage Ventilation et Climatisation

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ISO : International Standard Organisation

T_a: Température ambiante

T_p: Température des parois

T_s: Temperature Surfaccique

T_o: Temperature Operative

HR : Humidité Relative

V_{air}: Vitesse d'air

Clo : Unité d'isolement vestimentaire.

Met : taux du métabolisme, W/m²

PMV: Predicted Mean Vote

PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied

DTR : *Documents techniques réglementaires*

CNERIB : Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment

Mtep : Tonne d'équivalent pétrole :unité de mesure de l'énergie

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement

APRUE : L'Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie

EED : directive sur l'efficacité énergétique

NZEB : NearlyZero Energy Building

PIB : produit intérieur brute

CIME : Comité intersectoriel de maîtrise de l'énergie

FNME : Fonds National de Maîtrise de l'Énergie,

EUI : Energy Use intensity

RMSE: Root Mean Square Error

MAE: Mean Absolute Error

WWR: Window-to-wall ratio

SHGC: solarheat gain coefficient

R : La résistance thermique (m².k/w).

S : La surface (m²).

C : Chaleur spécifique (Kj/kg. K).

D : Densité (Kg/m³).

U :Le coefficient de transmission surfaccique

Epw: Energy plus weather file

AWSG : Average Window Solar Gain

SHGC : coefficient de gain de chaleur solaire

POE : post occupancyevaluation

BWh : climat chaud et aride

DOE : *le département d'énergie américain*

E+: EnergyPlus Software

DB: DesignBuilder software

Production Scientifique

Publication :

Mansouri, K., Sriti, L., & Guedouh, M. S. (2022).Post-Occupancy Evaluation of Thermal Comfort Sensation of Pupils in School Establishments under Hot Arid Climate Conditions. *Technium Social Sciences Journal*, 34(1), 180–192. <https://doi.org/10.47577/tssj.v34i1.7096>

Latreche, S., Sriti, L., Mansouri, K., & Berbouche, C.(2022).Envelope design for thermal performance in residential buildings under hot arid climate conditions. *Technium Social Sciences Journal*, 38(1), 755–767. <https://doi.org/10.47577/tssj.v38i1.7866>

Zerari, S., Sriti, L., & Mansouri, K. (2019).*Dégradation du patrimoine ksourien du sudalgérien. Cas du tissu résidentiel des ziban (Biskra)*. Al-Sabîl : Revue d'Histoire, d'Archéologie et d'Architecture Maghrébines, 1-10.

Mansouri, K., Sriti, L. (2019).*The effects of envelope building materials on the indoor thermal comfort and energy efficiency*. The proceeding of the 2nd international conference of temporary affairs architecture and urbanism. ISBN 978-605-68243-4-0

Communications internationales :

Mansouri, K., Sriti, L. (2018).*Optimisation du confort thermique et de l'efficacité énergétique dans les établissements scolaire*. Communication présentée au: the international wetlands and sustainable cities workshop (University of Biskra).

Mansouri, K., Sriti, L. (2018).*Optimisation du confort thermique et de l'efficacité énergétique dans les établissements scolaire au climat chaud et aride*. Communication présentée au: The 1st Doctoral Colloquium on the methodology of elaboration of a thesis and a publication in doctorate (University of Eloued).

Guedouh, S.M, Zemmouri, N.Mansouri, K. (2019). *L'impact de l'introduction de patio a la performance thermiques et lumineuses des bâtiments dans les Zones aride*. Communication présentée au: The international conference on materials heritage and environment in dry zones (University of Adrar).

Mansouri, K., Sriti, L.Guedouh, S.M. (2019).*The Impact of Envelope Building Materials on The Thermal Comfort. Case of hot and dry climate*. Communication présentée au: the international symposium on technology & sustainable industry development (University of Eloued).

Mansouri, K., Sriti, L. (2019).*The effect of envelope building materials on indoor thermal comfort and energy consumption. Case of hot and dry climates*. Communication présentée au: the 2nd international conference of temporary affairs architecture and urbanism (University of Antalya, Turkey).

Mansouri, K., Sriti, L. (2019).*Building envelope materials as a passive strategy to ensure thermal comfort in hot and dry climates.* Communication présentée au:the 1st international conference“on materials, environment,mechanical and industrial systems (University of Djelfa,Algeria).

Mansouri, K., Sriti, L. Bensahla, S. (2019).*Optimizing natural lighting distribution in classrooms. Case of hot and dry climates of Biskra.*Communication présentée au:the international seminar “sustainable cities and local development VDDL19 (University of Guelma,Algeria).

Bensahla, S. Lazri, L. Mansouri, K. (2019). *The Analysis Process in Bioclimatic Architectural Design.* Communication présentée au:the international seminar “sustainable cities and local development VDDL19 (University of Guelma,Algeria).

Mansouri, K., Sriti, L. Zerari S. (2020).*The impact of envelope materials on buildings thermal performance and energy consumption in hot and dry climates.*Communication présentée au:the 1st international conference on Materials, Energy and Environment MEE2020(University of Eloued).

Mansouri, K., Sriti, L. (2020).*Thermal comfort assessment in educational buildings. Case of a middle school in a hot and dry climate.*Communication présentée au:the 1st international symposium on the built environment in oasis milieu BEO19(University of Biskra).

Mansouri, K., Sriti, L. (2022).*Post-occupancy evaluation of school building classroom thermal environment in hot and dry climates.*Communication présentée au: The 1st International Workshop on architectural and urban investigation tools (University of Biskra).

Mansouri, K., Sriti, L. (2022).Simulation-based Evaluation of Windows Opening Ratio Impact on Daylight Distribution of School Building under Hot and Dry Climate. Communication présentée au: The 3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences(University of Konya Turkey).

Communications nationales :

Mansouri, K., Sriti, L. (2018). Evaluation du confort thermique dans les bâtiments scolaires. Cas d’un Cem à Biskra.Communication présentée au :The second national seminar on architecture and environnement (University of Batna,Algeria).

Zerari, S. Sriti, L. Mansouri, K. (2019).*Dégradation des patrimoine Ksourien dans la région du Ziban (Biskra).*Communication présentée au :The 1st national seminar Habité Temporalité et Durabilité (University of Blida ,Algeria)

Chapitre introductif

1. Introduction

La contrainte environnementale a toujours été un souci majeur pour l'Homme depuis qu'il est sur Terre. Ainsi, la préoccupation première de l'homme primitif était de s'abriter en créant un territoire dont il marque les frontières par des limites devant le protéger contre toutes formes de nuisances extérieures et notamment celles climatiques. A cet égard, l'importance du climat en tant que facteur prépondérant dans l'élaboration de l'environnement bâti n'est plus à démontrer. L'adaptation de l'architecture vernaculaire aux conditions climatiques les plus diverses, montre à quel point l'aspect environnemental était naturellement intégré dans les pratiques des bâtisseurs primitifs qui ont dû créer, avec des matériaux et des techniques très limités, un cadre bâti qui soit en équilibre harmonieux avec les contraintes physiques imposées par le site et le climat étant donné que leur propre survie en dépendait. Les constructions ont alors répondu ingénieusement à leur contexte par leur forme et leurs matériaux, même si les conditions physiques et climatiques étaient extrêmes et parfois hostiles. Selon Rapoport, l'influence du climat serait d'autant plus visible que les conditions techniques et les moyens de domination de l'environnement seraient limités. Ainsi, il semblerait que plus les conditions climatiques étaient rigoureuses, plus l'ingéniosité des bâtisseurs primitifs se déployait, éprouvant « leur aptitude à utiliser un minimum de ressources pour un maximum de confort » (Rapoport ; 1973, p.116).

A partir du 19^e siècle, le monde a été témoin d'un progrès spectaculaire qui a touché tous les aspects de la vie humaine. D'une part, l'essor de la science a conduit à la révolution industrielle, ce qui a induit des changements dans les modes de vie ; et d'autre part, l'émergence de nouvelles tendances et techniques ont inévitablement conduit à des innovations dans la conception architecturale. Ainsi, de nouveaux matériaux et procédés constructifs ont été élaborés et utilisés, et progressivement, l'attention s'est déplacée vers l'usage (fonctionnalisme) et l'apparence (l'image et l'esthétique) du bâtiment au détriment de sa relation à son contexte. En faisant de la pratique architecturale un exercice plastique ou encore, pour reprendre une célèbre citation de Le Corbusier « *le jeu savant, correct et magnifique des volumes assemblés sous la lumière* », le mouvement moderne a entraîné la production d'un cadre bâti qui ignore le climat, le site et l'environnement. En surestimant

les possibilités technologiques, l'architecture moderne bien que parfaitement indifférente au climat était censée être universelle. Le bien être physiologique de l'utilisateur a été, quant à lui, délégué à des installations devant créer des microclimats artificiels : le tandem air conditionné-éclairage au néon. Pour leur fonctionnement, ces installations dépendaient d'une source épuisable (le pétrole) en pensant que l'énergie serait de plus en plus abondante et de plus en plus bon marché.

Jusqu'aux années 60, le développement technologique a permis aux ingénieurs et aux architectes de produire des conditions raisonnablement confortables dans presque tous les bâtiments et sous presque tous les climats grâce aux systèmes HVAC (chauffage, ventilation et climatisation). Cependant, ces systèmes étaient trop consommateurs d'énergie, ce qui a eu pour résultat la production d'une architecture « énergivore » à outrance (Gallo et al. 1998, Rendall, 2006). Cette situation perdure jusqu'au premier choc pétrolier de 1973 où la consommation d'énergie devient un problème mondial et une préoccupation majeure des gouvernements mondiaux. Le secteur du bâtiment qui a joué un rôle majeur dans cette crise représentait environ 40% de la consommation annuelle d'énergie mondiale et jusqu'à un tiers d'émissions de gaz à effet de serre (Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2007). Finalement, cette crise énergétique et l'épuisement imminent des ressources fossiles ont ravivé la nécessité de réfléchir à des solutions pour freiner la consommation d'énergie excessive et ainsi atténuer ses conséquences économiques, écologiques et environnementales. Des appels de spécialistes relayés par la presse internationale à la faveur de la protection de l'environnement et le recours aux énergies nouvelles et renouvelables, ont fini par alerter l'opinion publique et ont conduit les décideurs politiques à agir pour faire face aux conséquences désastreuses du changement climatique et plus généralement au problème énergétique mondial.

Dans ce sillage, différents sommets internationaux ont été organisés pour tenter de trouver des solutions à cette crise à la fois énergétique et environnementale, et notamment, le sommet international de la terre «Rio» tenu au Brésil en 1992. Celui-ci est considéré comme l'un des plus importants du fait qu'il a abouti à de nombreuses mesures, touchant entre autres, l'activité industrielle, les transports, la maîtrise de l'énergie et la gestion des déchets. Les résolutions de la Déclaration de Rio sont associées à l'élaboration d'un agenda pour le XXI^e siècle, appelé Agenda 21 ou Action 21, qui recommande une approche intégrée et créative pour assurer un développement durable. A cet égard, différentes mesures et décisions ont touché la production du cadre bâti et la pratique de l'architecture,

notamment, la création de différents labels, certifications et réglementations devant gérer et orienter les intervenants dans le secteur du bâtiment pour concrétiser les objectifs de l'énergie verte et de la durabilité.

Dès son indépendance, l'Algérie a ouvert de grands chantiers destinés à reconstruire le pays et à rattraper l'énorme retard de développement accumulé dans tous les domaines durant plus d'un siècle de colonisation et les innombrables dysfonctionnements qui en résultèrent. Pour faire face à l'énorme explosion démographique et à la demande urgente résultant d'un manque d'infrastructures de base, le redressement structurel de tous les secteurs était nécessaire et particulièrement celui de la construction et du bâtiment. Malheureusement, devant l'urgence et pour absorber la pression de la demande sociale, l'état algérien a dû opter pour une approche quantitative qui favorise la production du plus grand nombre de constructions au détriment de la qualité de la mise en œuvre. Ainsi, malgré l'évolution des conditions techno-économiques qui entourent la pratique architecturale, l'apparition de nouveaux matériaux et l'introduction de nouvelles techniques, la production du cadre bâti dans l'Algérie indépendante s'est surtout faite au détriment des conditions de confort et de l'usage des bâtiments. Les exemples qui illustrent cette situation ne manquent pas : choix aléatoire de l'orientation des bâtiments, tendance à la transparence avec des ouvertures surdimensionnées, absence de protections solaires, inadaptation du choix des matériaux de construction... et la liste est longue. Nul besoin de préciser que l'approche quantitative adoptée par l'Etat algérien a, non seulement, eu des effets négatifs sur la qualité de vie des citoyens en termes de confort thermique intérieur, de santé et de bien-être, mais ont, également, conduit à des bâtiments entièrement dépendants de la climatisation mécanique pour assurer le minimum requis pour le bien-être physique des occupants. Au final, ces bâtiments sont devenus d'énormes consommateurs d'énergie.

En effet, depuis l'indépendance jusqu'à nos jours, la consommation d'énergie en Algérie connaît une augmentation croissante estimée à 22 Mtoe¹ (Million Tonnes of Oil Equivalent) en 1990 et 62 Mtoe en 2019 (The Global Energy Statistical Yearbook, 2018). Selon l'APRUE² (2010), la consommation d'énergie du secteur du bâtiment (tertiaire et résidentiel) représente 41% de la consommation nationale globale, faisant de ce secteur le plus gros consommateur d'énergie. Ainsi, pour cacher d'innombrables défauts conceptuels en rapport avec le confort thermique des occupants, le recours systématique aux

¹Mtoe :Tonne d'équivalent pétrole :unité de mesure de l'énergie

²APRUE :Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

équipements et installations techniques était censé résoudre le problème mais la facture à payer était lourde en termes de consommation d'énergie et d'impacts sur l'environnement.

Récemment et avec l'avènement de la pandémie mondiale du Covid-19, la question sanitaire a suscité un intérêt particulier pour les conditions d'hygiène et d'ambiances environnementales. La recherche de la qualité intérieure suscite de plus en plus d'intérêt et est redevenue un sujet d'actualité, particulièrement, pour les bâtiments scolaires et d'enseignement, en raison de la forte densité d'occupation propre à ces établissements et leur taux de fréquentation de l'ordre du quotidien. Dans le contexte de propagation du COVID-19, les écoles étaient dans l'obligation de fermer et réouvrir constamment, tout en essayant de fournir un environnement sûr et sain aux élèves. Les mesures prises pour adapter le fonctionnement des bâtiments scolaires à ces conditions sanitaires exceptionnelles, y compris des mesures d'hygiène et d'organisation, sont apparues étroitement liées à la conception architecturale des bâtiments. Ceci laisse supposer qu'une réflexion profonde sur la manière de concevoir et d'exploiter ces établissements devrait être engagée, laquelle aura certainement un impact sur la pratique architecturale à l'avenir (Lovec, 2020).

En Algérie, les dernières décennies ont été marquées par la réalisation de multiples bâtiments à caractère public et, notamment, les établissements scolaires. Ces derniers représentent une grande partie des édifices relevant du secteur tertiaire ayant vu le jour dans le cadre d'une stratégie prônée par l'Etat pour développer l'éducation nationale et rattraper le retard accumulé durant la colonisation. Dans un contexte de crise et pour faire face à la pression de la demande, la plupart de ces bâtiments scolaire sont été réalisés en adoptant des plans standards dans un souci d'économie et de rapidité d'exécution. Des plans-types ont été largement reproduits dans tout le pays indépendamment des différences climatiques régionales. Les conséquences ont été désastreuses en termes de qualité des ambiances intérieures ; les écoles réalisées étaient incapables d'assurer de manière autonome les conditions minimales de confort hygrothermique pour leurs utilisateurs tout en étant très énergivores (Saddok, 2016 ; Lakhdari, 2021).

Or, pour assurer le bon déroulement des activités éducatives et d'apprentissage, les bâtiments scolaires sont tenus de garantir un environnement sain et confortable aussi bien pour les apprenants que pour les enseignants. En effet, des études récentes ont montré que l'architecture des établissements scolaires a une influence cruciale sur les activités

d'enseignements et d'apprentissage, et par conséquent, se répercute sur les taux de réussite scolaire. De plus, ces études ont démontré qu'il existe une relation forte entre la qualité de l'environnement intérieur, d'une part, et les performances intellectuelles et le comportement des élèves dans les écoles, d'autre part (Lakhdari, 2021). Plus précisément, les recherches dans le domaine de l'optimisation du confort thermique et de l'énergie dans le bâtiment sont arrivées à évaluer quantitativement le rôle joué par les différents paramètres de conception et les choix architecturaux et matériels (matériaux de construction, degré d'ouverture, etc.) sur les niveaux de confort physiologique (thermique et visuel) des bâtiments scolaires et leur taux de consommation d'énergie.

Ainsi, de nombreuses recherches ont porté sur l'impact des typologies architecturales et de la configuration des bâtiments scolaires sur le confort thermique de l'utilisateur (Monténégro, 2011 ; Zomorodian et al., 2013 ; Saddok et al., 2015 ; Afren et al., 2017). D'autres études se sont intéressées aux composants de l'enveloppe du bâtiment, notamment, les paramètres liés au système de fenestration : tels que taille des fenêtres, leur position et orientation, le ratio d'ouverture et le type de protection solaire (Zomorodian et al., 2013 ; Al-Arja, et al., 2015 ; Mezaoukh, 2012 ; Afren, 2019 ; Lakhdari, 2021). Tous ces travaux ont été menés dans l'objectif d'atteindre une meilleure efficacité thermique et énergétique des bâtiments scolaires, tout en assurant les conditions optimales de confort physiologique dans les salles de classe.

Cependant, si ces études ont été assez concluantes dans les pays développés où les réglementations mises en place et les normes rigoureuses ont permis d'atteindre des niveaux satisfaisant en termes de qualité environnementales et de performance énergétique, la situation est tout autre dans les pays moins développés. Dans ces pays où généralement les réglementations thermiques n'existent pas, les questions de qualité du cadre bâti, de protection de l'environnement ou encore d'économie d'énergie se posent, aujourd'hui, avec acuité dans le secteur du bâtiment et dans ce domaine un retard considérable a été accumulé. Ainsi, les quelques études réalisées dans ces pays ont conclu que l'état actuel des constructions scolaires, et presque dans tous les types de climat, échouent lamentablement à atteindre le confort de l'utilisateur sans consommer énormément d'énergie. De plus, d'après les études existantes, il apparait que l'impact des matériaux de l'enveloppe du bâtiment reste moins traité dans la littérature scientifique notamment en Algérie.

Pour combler cette lacune, la présente recherche tente d'optimiser le confort thermique et la consommation d'énergie passivement en agissant sur le choix des matériaux de construction de l'enveloppe des bâtiments scolaires dans un contexte climatique chaud et aride.

2. Problématique

Par définition, les établissements scolaires supposent une fréquence quotidienne d'utilisation s'étalant sur une période minimale de huit mois qui correspondent à l'année scolaire. Ces bâtiments sont, donc pour leurs utilisateurs qu'ils soient élèves ou enseignants, les lieux les plus fréquentés après leurs maisons. Or, comme tous les bâtiments situés dans les régions à climat chaud et aride où le confort thermique est difficile à réaliser de manière passive, les établissements scolaires sont très souvent marqués par le problème de l'inconfort thermique. De plus, le stress thermique est, généralement, à son extrême à cause du taux d'occupation élevé des salles de classe ; ce qui se répercute négativement sur les élèves du point de vue de leur apprentissage et performance.

Pour un pays comme l'Algérie, où ce problème se pose avec acuité, la solution a été de recourir à des bâtiments entièrement dépendants de la climatisation mécanique pour assurer le minimum requis pour le bien-être physique des occupants. Irrévocablement, cette approche a conduit à une consommation énergétique excessive et ce que cela induit en termes d'émissions de dioxyde de carbone, de réchauffement climatique et de dilapidation des énergies fossiles non renouvelables. De ce point de vue, il devient impératif de rationaliser la consommation énergétique attribuée au secteur du bâtiment en proposant des alternatives à long terme. Parmi ces solutions, l'enveloppe du bâtiment est l'un des éléments les plus importants qui peuvent réduire substantiellement la facture énergétique

En effet, les caractéristiques de conception de l'enveloppe affectent fortement le confort thermique des occupants, ainsi que la consommation énergétique dans le bâtiment. Dans ce même contexte, la littérature existante a confirmé que les économies d'énergie pourraient atteindre 50 à 75 %, grâce à des mesures telles que l'amélioration de l'enveloppe et des systèmes des bâtiments, sans que les coûts de construction soient plus élevés que ceux des solutions de conception conventionnelles (Zhang et al. 2020). Plus précisément, la performance thermique et énergétique de l'enveloppe est tributaire des choix constructifs relatifs aux éléments architecturaux, notamment, les murs, la toiture et les ouvertures généralement considérés comme éléments déterminants dans les échanges thermiques entre

le bâtiment et son environnement. De ce point de vue, un traitement approprié des composants de l'enveloppe en fonction des conditions climatiques chaudes et arides devrait permettre de réaliser un confort optimal à l'intérieur du bâtiment tout en assurant une facture énergétique modérée, même si les conditions extérieures sont défavorables.

Par ailleurs, il faut signaler que les études ayant porté sur l'optimisation du confort thermique et la performance énergétique des bâtiments scolaires en agissant sur l'enveloppe du bâtiment sont relativement nombreuses ; cependant, rares sont celles ayant discuté de l'impact des matériaux de l'enveloppe sur la performance thermique et énergétique des bâtiments dans un climat chaud et sec. Pour combler ces lacunes, la présente recherche investit la conception des bâtiments scolaires dans les zones chaudes et arides du point de vue environnemental afin de garantir des conditions intérieures confortables et saines avec un minimum de consommation d'énergie. Plus précisément, l'étude explore les moyens d'atteindre le double objectif du confort thermique de l'utilisateur et de la performance énergétique du bâtiment scolaire en agissant sur les caractéristiques matérielles de l'enveloppe. Les questions suivantes serviront de levier à la recherche.

- Quels sont les paramètres matériels de l'enveloppe du bâtiment à optimiser pour assurer le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les établissements scolaires dans les conditions d'un climat chaud et aride ?
- Comment ces paramètres interagissent avec les autres stratégies conceptuelles appliquées au niveau de l'enveloppe et à quel degré est-il possible d'assurer le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les établissements scolaires sous les conditions d'un climat chaud et aride ?

3. Les hypothèses

Afin de répondre aux questions précédentes, la présente étude admet les hypothèses suivantes :

- Les caractéristiques matérielles et proportionnelles des composants de l'enveloppe ont un impact sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments scolaires dans un climat chaud et aride.
- Un choix adéquat des matériaux opaques d'enveloppe combiné avec des dispositifs et stratégies de protection peut avoir un impact positif sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments scolaires dans un climat chaud et aride.

4. Les objectifs de recherche

La présente recherche se fixe comme objectifs majeurs d'étudier et d'optimiser la performance des établissements scolaires du point de vue du confort thermique et de l'efficacité énergétique, sous les conditions d'un climat chaud et sec. Plus précisément, l'étude vise également à :

- Analyser la situation actuelle des écoles publiques recensées dans la ville de Sidi Okba (Wilaya de Biskra) du point de vue du rapport performance thermique /consommation énergétique ;
- Étudier le comportement thermique d'enveloppe du bâtiment (les surfaces opaques et vitrées verticales et horizontales) et déterminer leur relation avec la performance thermique et énergétique du bâtiment ;
- Étudier et comparer le comportement thermique de différentes variantes d'enveloppe qui se distingueraient selon les matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures.
- Développer un modèle architectural performant de salles de classe qui soit adapté aux conditions d'un climat chaud et sec en termes de confort thermique et consommation énergétique ;
- Proposer un cahier de charge (check-list) qui organise et offre aux concepteurs des orientations et des recommandations pour la conception des établissements scolaires sous un climat chaud et aride.

5. L'analyse conceptuelle

Une analyse conceptuelle a été effectuée après avoir défini les variables dépendantes (**confort thermique et efficacité énergétique**) et indépendantes (**caractéristiques matérielles des parois (mur/toiture), les ouvertures et l'espace intérieur**) pour mettre en exergue leur aspects mesurables (fig.1).

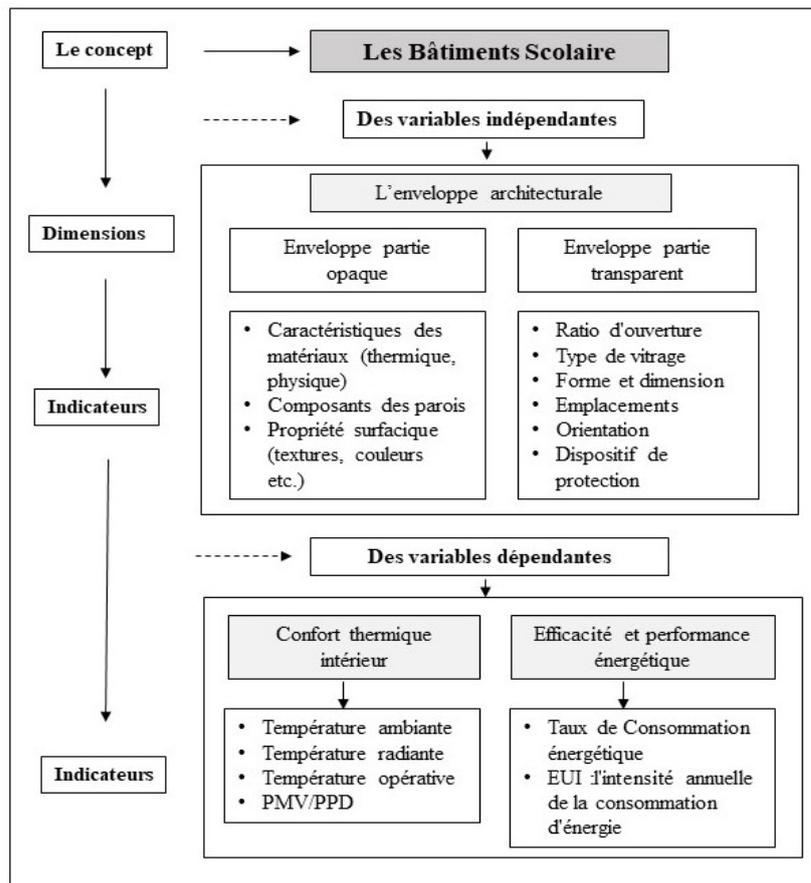


Figure 1 : Schéma de l'analyse conceptuelle

6. Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs escomptés par la présente recherche, un cadre méthodologique a été élaboré ; il s'appuie sur trois approches fondamentales : conceptuelle, empirique et numérique et se décline en deux phases principales : l'une présente l'étude conceptuelle et théorique de la recherche et l'autre présente le travail d'analyse et d'optimisation.

- **La première phase** : concerne le cadre théorique du sujet. Elle est fondée sur une recherche bibliographique et documentaire qui permet d'expliquer et de clarifier les notions et concepts liés au sujet par l'exploitation des différents documents ; des livres, thèses et mémoires, articles, etc.
- **La deuxième phase** : de facture analytique et pratique commence par définir le contexte de l'étude selon une approche qualitative fondée sur l'observation, les

relevés des établissements scolaires choisis dans la ville de Sidi Okba. Cette étude préalable vise à prendre connaissance de la réalité de l'objet de la recherche et, par la suite, sélectionner un ensemble de bâtiments scolaires pouvant servir en tant que corpus d'étude. Ensuite, une partie expérimentale et empirique fondée sur une approche quantitative a été réalisée. Des mesures in situ de différents paramètres permettant de quantifier les conditions de confort thermique (températures intérieures, températures surfaciques, humidité relative de l'air, etc.) ont été effectuées dans trois établissements scolaires. Ces derniers ont été choisis pour illustrer trois périodes de construction et ainsi différentes variantes d'enveloppe se distingueraient selon les matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures. Une évaluation qualitative du confort ressenti a été réalisée à travers des questionnaires distribués en parallèle avec les mesures in situ. L'étude expérimentale (*in-situ*) s'est déroulée durant deux périodes représentant respectivement l'hiver et l'été. L'objectif étant de fournir une compréhension approfondie des conditions limites du bâtiment, de trouver une interprétation des paramètres de fonctionnement des systèmes de conditionnement d'air et du comportement des utilisateurs afin de connaître les charges internes (équipement, éclairage et occupation) des bâtiments de référence. Sur la base des données collectées et le traitement des résultats de la partie empirique, la dernière étape fondée sur une approche numérique a pu être entamée. Cette étape consistait à mener une étude paramétrique basée sur la simulation par le logiciel DesignBuilder. Le processus a commencé d'abord par la calibration-validation du modèle numérique ; une fois le modèle validé, la simulation numérique a été effectuée dans le but d'optimiser l'enveloppe des bâtiments scolaires et finalement améliorer les conditions de confort thermique tout en maintenant un niveau raisonnable de consommation énergétique.

7. Structure de la thèse

La présente recherche est répartie en deux parties et sept chapitres. La première partie est consacrée au développement théorique par la présentation et l'analyse des concepts clé et les notions de base, liés à la thématique de recherche. Cette partie se divise en trois chapitres théoriques. Le 4^{ème} chapitre établit un état de l'art sur le sujet tout en pointant les écrits et travaux qui l'ont traité et leurs aboutissements. Ce chapitre est considéré comme un point de jonction et de passage entre la partie théorique et pratique, par la présentation des différentes recherches menées sur le thème et les différentes méthodes et approches utilisées pour le

traiter. La deuxième partie est analytique et correspond au 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} chapitre. Le premier de ces chapitres est méthodologique, il décrit le contexte et le corpus de l'étude ainsi que les méthodes adoptées dans le traitement du sujet. Les deux autres chapitres sont respectivement, pratiques et analytique et, de fait, ils se focalisent sur le travail expérimental. Ainsi, ils présentent et expliquent le protocole de la prise de mesures, la simulation et l'interprétation des résultats afin de répondre à la problématique posée et vérifier les hypothèses fondant le travail de recherche. La structure de cette thèse se décline comme suit (fig.2):

- **Le chapitre introductif** : il comporte une introduction générale qui présente le contexte général de la recherche et expose le problème traité à travers la formulation des questions de la recherche, les hypothèses et les objectifs à atteindre. Une analyse conceptuelle des variables, la méthodologie adoptée et la structure de la thèse, sont également fournis.
- **Le premier chapitre** : il traite et définit les concepts principaux, en premier lieu, la notion du confort thermique et ses paramètres ainsi que les approches et outils de son évaluation. Ensuite, la deuxième partie aborde la notion de fonctionnement thermique du bâtiment, la problématique énergétique mondiale et le concept de l'efficacité énergétique.
- **Le deuxième chapitre** : il définit l'établissement scolaire et son évolution historique, spatiale et architecturale. Le bâtiment scolaire en Algérie et l'évolution de son architecture sont également traités. Ensuite, cette section examine les différentes typologies des établissements scolaires.
- **Le troisième chapitre** : il aborde la notion de l'enveloppe architecturale du bâtiment et met en exergue son double rôle d'élément architectural et de régulateur thermique. Il se concentre sur les paramètres matériels des éléments de l'enveloppe. Ainsi, les propriétés thermo-physiques et dynamiques des parois opaques sont explorées, alors qu'un aperçu des différentes solutions d'isolation est présenté. Le chapitre s'intéresse, également, aux méthodes de définition de l'inertie thermique des parois, de même qu'à l'influence de la texture de la surface et des propriétés des surfaces vitrées sur le fonctionnement thermique de la façade. Enfin, les solutions d'ombrage pour les surfaces vitrées et opaques sont étudiées.
- **Le quatrième chapitre** : fournit un état de l'art sur le sujet traité. Ainsi, une revue de littérature sur les études précédentes travaux qui traitent du confort thermique et son corollaire la consommation d'énergie dans les établissements scolaires, sont synthétisés

selon leurs différents paramètres, variables, et méthode d'évaluations afin de pouvoir définir un modèle d'analyse.

- **Le cinquième chapitre** : présente le contexte climatique de la recherche illustré par la ville de Sidi Okba ; il donne un aperçu sur l'objet de l'étude soient les établissements scolaires de la ville de Sidi Okba et décrit les 3 bâtiments choisis comme cas d'étude. Ainsi, le chapitre commence par présenter les données climatiques du contexte de l'étude qu'il soumet à une analyse bioclimatique selon le diagramme de Givoni ; ce qui permet d'identifier les stratégies de conception bioclimatique dominantes pour la région de Biskra et implicitement la ville de Sidi Okba. Ensuite, une étude typologique des différents établissements scolaires est réalisée pour aboutir à la sélection des cas d'étude qui sont à leur tour soumis à une analyse architecturale.
- **Le sixième chapitre** : est consacré à l'étude expérimentale réalisée sous forme de mesures in situ et d'une enquête au niveau des 3 bâtiments scolaires choisis comme cas d'étude. La première partie du chapitre décrit le protocole empirique élaboré pour la collecte de données. Il évalue quantitativement l'état de confort dans chaque corpus d'études par les mesures des paramètres du confort thermique interne. Parallèlement, une enquête par questionnaire est réalisée durant les journées de la prise de mesures, et ce, pour explorer l'appréciation du confort thermique par les utilisateurs.
- **Le septième chapitre** : est dédié au travail de simulation numérique et à l'analyse des résultats. Le chapitre commence par présenter l'outil de simulation dynamique utilisé (logiciel DesignBuilder) et décrit les modèles numériques simulés ainsi que le protocole de simulations. Une validation-calibration préliminaire du modèle a été effectuée avant de lancer le calcul numérique pour l'étude paramétrique et l'optimisation. Les paramètres ciblés étaient les composants opaques de l'enveloppe soient les matériaux et épaisseurs des murs et toitures ainsi que l'orientation et la teinte extérieure. Par la suite, une analyse des résultats obtenus est réalisée afin de démontrer l'impact de chaque paramètre sur le confort thermique des usagers et la performance énergétique du bâtiment. Enfin, l'optimisation paramétrique a permis de tester plusieurs scénarios et alternatives pour les paramètres ciblés par l'étude et d'évaluer leur impact isolé et combiné sur la performance thermique et énergétique du bâtiment scolaire sous les conditions d'un climat chaud et aride.
- **Conclusion générale** : elle résume la recherche, présente une synthèse des différentes parties réalisées, récapitule les résultats généraux obtenus et répond aux principales questions de la problématique. Des recommandations sont également suggérées,

notamment, certaines directives de construction concernant la conception de l'enveloppe des bâtiments scolaires relativement à un climat chaud et aride pouvant assurer un environnement intérieur confortable et une consommation énergétique rationnelle. Enfin, cette partie s'arrête sur les limites de l'étude et suggère de futures axes et perspectives de recherche.

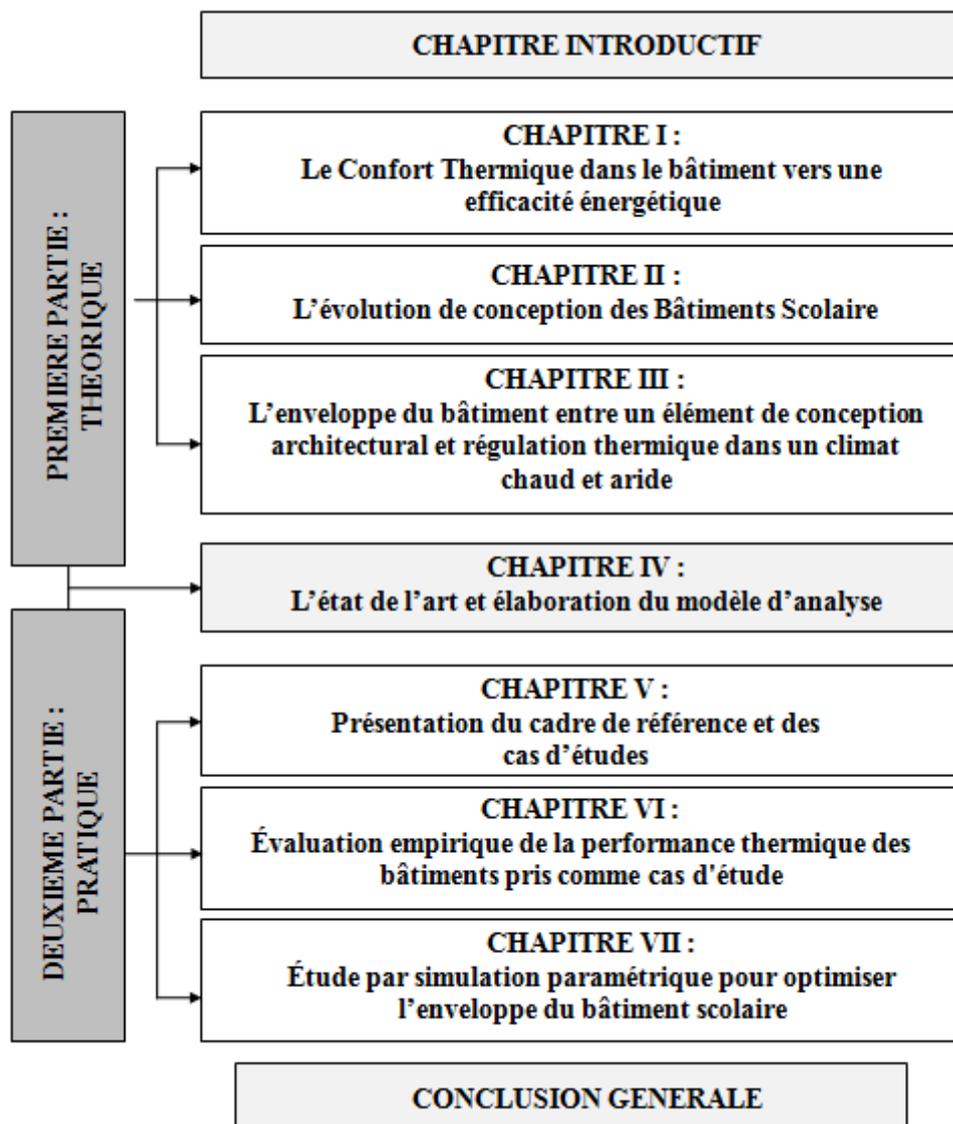


Figure 2 : Schéma de la structure de la thèse

CHAPITRE I :

Le Confort Thermique dans le bâtiment vers une efficacité énergétique

CHAPITRE I : Le Confort thermique dans le bâtiment vers une efficacité énergétique

« Le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur d'énergie parmi les autres secteurs, représentant environ 40 % de la consommation totale d'énergie et 36 % des émissions de dioxyde de carbone dans le monde »

(O.A. Hasan, D. Defer, I. Shahrour, 2014)

« Une grande partie de l'énergie consommée dans les bâtiments est destinée à améliorer le confort thermique intérieur »

Delgarm, N., Sajadi, B., & Delgarm, S. (2016).

Introduction

Le confort thermique et l'efficacité énergétique sont deux concepts distincts mais qui restent étroitement liés. D'une façon générale, deux cas de figures peuvent se présenter : soit le confort thermique est assuré moyennant une consommation d'énergie énorme ou, au contraire, le bâtiment demande moins d'énergie pour son fonctionnement mais les occupants subissent une situation d'inconfort thermique. Du fait de leur importance, les deux concepts ont été largement traités et définis dans la littérature. Ce premier chapitre est consacré à l'analyse de ses deux concepts-clés ; il passe en revue les connaissances théoriques en relation avec ces notions et tente de préciser le concept de sensation du confort thermique intérieur dans le bâtiment, ses paramètres, les méthodes et les approches employées pour son évaluation. De même, le concept d'énergie dans les bâtiments, la notion de niveau de consommation et les différentes stratégies et programmes pour atteindre une efficacité énergétique, sont également développées.

I.1.Généralité sur la notion du confort thermique dans le bâtiment

La notion du confort thermique est une notion très vaste et complexe du fait de son aspect subjectif. En raison de son importance, le concept de confort thermique a été traité dans différentes recherches et a été défini par différents chercheurs et experts au cours des dernières années. Ainsi, d'après Taleghani et al. (2013), la notion du confort thermique a été discutée depuis les années 1930. D'après Fabbri (2015) le concept de confort thermique est né au XXe siècle, lorsqu'il est devenu possible de contrôler directement le microclimat intérieur.

Généralement le terme confort signifie un sens de bien-être ou un état de satisfaction. Conformément aux normes internationales telles que (ISO7730 1994 ; ASHRAE55 1992) et aussi avec les travaux de (Fanger, 1973) le confort thermique a été défini comme : *Cette condition d'esprit qui exprime satisfaction avec l'environnement thermique* (Castilla et al.2014). Dans ce même esprit Liébard et De Herde (2005) ont défini le confort thermique comme : « *un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement* ».

De son côté, Enescu (2017) voit qu'avec le développement réalisé progressivement au fil des années, la définition classique du confort thermique comme la condition de la satisfaction de l'environnement thermique est devenue inadaptée pour prendre en compte le niveau de confort dans des situations réelles. Une autre définition donnée dans la norme ASHRAE 55-2004 est « *cette condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique et qui est évaluée par une évaluation subjective* ». Cependant, ces définitions générales doivent être quantifiées afin de réaliser des analyses techniques dans différents types d'applications.

Selon Taleghani et al. (2013) l'étude du confort thermique dans le bâtiment est très complexe, car elle intègre plusieurs sciences telles que la physiologie, la physique du bâtiment, le génie mécanique et la psychologie. Dans la même perspective, Moujalled (2007), voit que « *Le confort thermique n'est pas défini dans l'absolu. Il dépend du contexte et des caractéristiques individuelles. Il peut être conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques* ».

I.1.1. Les paramètres affectant le confort thermique

La sensation de confort thermique humain est affectée par différentes variables et paramètres de nature différente. Il est traditionnellement lié à 6 paramètres en relation avec d'une part l'environnement physique et l'espace et, d'autre part l'individu (Macpherson ,1962 ; Tham ,1993; Liébard et De Herde, 2005; Mazari, 2012; Berkouk, 2017). Comme illustré dans la **figure. I.1** plusieurs paramètres affectent le confort thermique.

La température de l'air (T_a) ;

L'humidité de l'air (R_h) ;

La vitesse relative de l'air (v) ;

La température radiante moyenne (la température moyenne des parois) (T_r) ;

Le métabolisme (M) ;

La résistance thermique des vêtements (ICL).

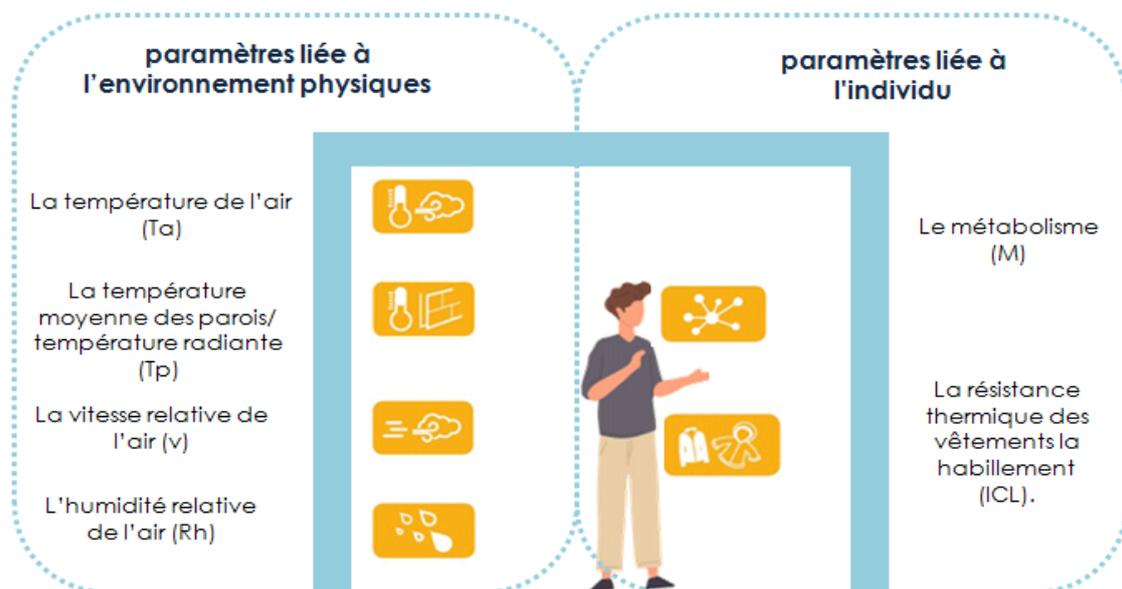


Figure. I.1 : Les paramètres affectant le confort thermique (Source : l'auteur)

I.2.1. Les paramètres liés à l'individu

L'homme qui considérait le cœur du bâtiment, les paramètres personnels sont très importants pour déterminer leur confort thermique. Le niveau d'activité et le niveau vestimentaire sont également considérés comme déterminants pour le niveau du confort thermique.

I.2.1.1. Le métabolisme

D'après Fabbri (2015) le métabolisme (m) c'est la production de la chaleur afin de maintenir la température du corps autour de $36,7\text{ °C}$. Il dépend de l'état de santé, de l'âge,

du sexe, et le type de régime, et est divisé en:« **Métabolisme énergétique basic**, besoins caloriques nécessaires au maintien des fonctions vitales dans des conditions de repos ou de neutralité thermique (température 29–31 ° C à nu, 25–29 ° C si habillé); **Métabolisme lié à la position du corps** (couché, assis, debout); **Métabolisme lié au type de travail et activités exercées** (repos, activité physique légère, moyenne, intense, etc.) alors Les valeurs du métabolisme varié selon rythme d'activité ce qui engendre la production de la chaleur et l'augmentation des échanges thermiques entre le corps et l'environnement » **Figure I.2.**

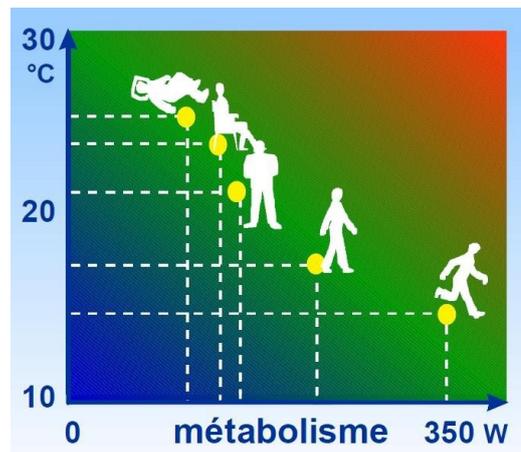


Figure I.2: Relation entre la température du confort de l'activité métabolique.

(Source: Liébard et De Herde, 2005 d'après Fanger)

La production de chaleur interne dans le corps humain est une grandeur qui dépend sur le métabolisme du corps humain (M) et de la puissance mécanique externe (W), exprimée par unité de surface du corps humain. Le **Tableau I.1** exprime des valeurs métaboliques des différentes activités variant selon leur degré d'intensité.

$$1 \text{ met} = 58.15 \text{ W/m}^2. \quad (1)$$

Tableau I.1.Taux et valeur métaboliques des différentes activités (Auliciems et Szokolay 1997 ; adapté par Berkouk ,2017)

Activité	Met	W/m ²	W (av)
Dormir	0,7	40	70
Couché, couché dans le lit	0,8	46	80
Assis, au repos	1,0	58	100
Travail debout, sédentaire	1,2	70	120

Travaux très légers (shopping, cuisine, industrie légère)	1,6	93	160
Moyen de travail léger (maison, machine-outil)	2,0	116	200
Travail moyen régulier (marteau-piqueur, danse sociale)	3,0	175	300
Travaux lourds (sciage, rabot à la main, tennis) jusqu'à	6,0	350	600
Travaux très lourds (course, travail des fours) jusqu'à	7,0	410	700

I.2.1.2. L'habillement

Dans une autre expression c'est la résistance thermique du vêtement ou une isolation vestimentaire. D'après Fabbri (2015) c'est la conduction thermique par le vêtement (K), exprime le transfert de chaleur par conduction à travers les vêtements, entre la température de la peau et l'environnement extérieur. Les vêtements sont le principal facteur d'adaptation climatique de l'homme à l'environnement, Dans la même perspective, Mazari (2012), voit que les résistances thermiques des vêtements, ils permettent de créer un microclimat sous-vestimentaire, par la modification les échanges de chaleur, entre la peau et l'environnement pour maintenir un niveau de chaleur acceptable.

D'après Fabbri (2015) une grandeur appelée «**Clo**», exprime la résistance au passage de la chaleur et est égal à $0,155 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ \text{C} / \text{W}$, soit pour chaque mètre carré de surface de vêtement, et pour chaque degré de différence de température entre la peau et les vêtements extérieurs, permet le passage à travers les vêtements de $0,155 \text{ W}$. **Clo** : Une unité pour exprimer les valeurs d'isolation thermique relatives de divers vêtements assemblés : $1 \text{ clo} = 0.18 (^\circ \text{Cm}^2/\text{kcal}) = 0.155(^\circ \text{Cm}^2/\text{W})$ ou $(\text{m}^2 \text{K}/\text{W})$ (2)

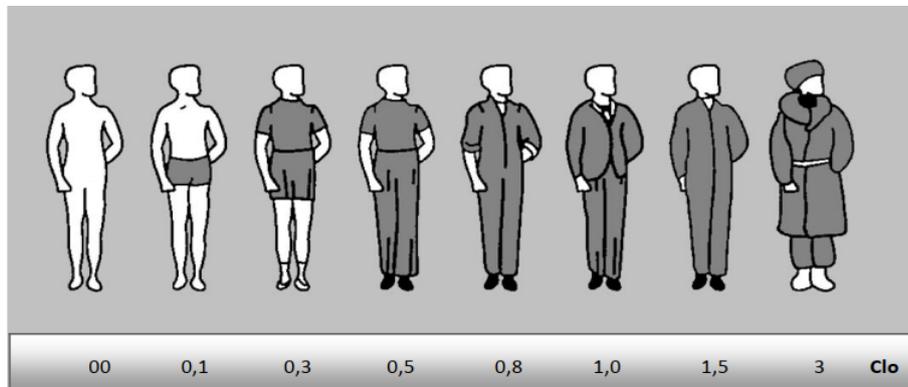


Figure I.3 : Des valeurs exprimées en **Clo** des différents tenues vestimentaires, source : Mazari (2012).

I.2.2. Les paramètres liés à l'environnement

Les paramètres physiques de l'environnement intérieur influent directement la sensation de confort thermique, car ce sont les éléments essentiels que l'individu ressent pour exprimer son confort.

I.2.2.1. La température ambiante de l'air (T_a)

La température ambiante de l'air se réfère à la température de l'air actuelle, elle correspond à la température mesurée à l'intérieur ou dans le milieu ambiant. D'après Berkouk (2017), elle est le paramètre le plus influent sur la sensation thermique de l'utilisateur d'espace. La température ambiante de l'air varie en fonction de l'activité de l'individu, aussi dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe (Mazari, 2012).

I.2.2.3. La température radiante des parois

D'après Liebard et De Herde (2005) la température des parois (T_p) représente la répartition des températures sur une paroi, elle est un phénomène complexe. La température des parois (T_p) est égale à la moyenne des températures des parois environnantes pondérées par leur surface, elle influence les échanges thermiques par rayonnement c'est pour cette raison qu'on peut appeler la température des parois une température radiante.

La sensation du confort dépend de la température ambiante et de la température des parois (**Figure I.4**). Une température de confort dite encore température opérative ou température résultante sèche T_{rs} est déterminée par la formule suivante:

$$T_{rs} = (T^{\circ} \text{ ambiante} + T^{\circ} \text{ paroi}) / 2. \text{ (Liébard et De Herde, 2005) (3)}$$

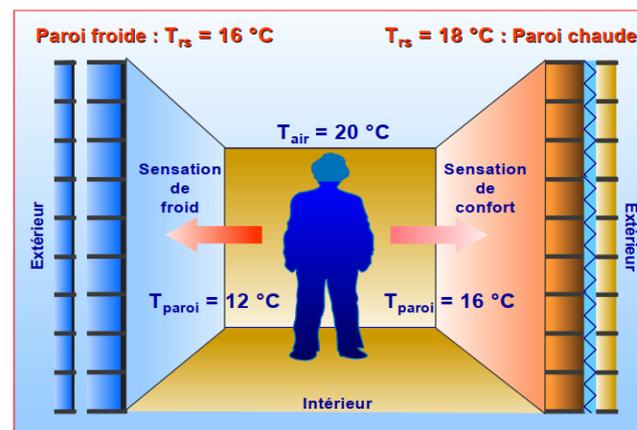


Figure I.4 : La température de confort (Source : Liébard et De Herde, 2005)

D'après Berkouk (2017), la température radiante moyenne des parois a un impact considérable sur le niveau du confort thermique des utilisateurs du bâtiment. La mesure de la température de surface d'une paroi se fait à l'aide d'une sonde de contact ou sonde à rayonnement infrarouge.

I.2.2.3. L'humidité relative

Selon Liébard et De Herde, 2005 « *L'humidité relative de l'air (HR) est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.* ». D'après Liébard et De Herde, 2005 comme cité dans Mazari (2012) entre 30% et 70%, l'humidité relative influence peu la sensation de confort thermique. Une humidité trop forte dérègle la thermorégulation de l'organisme car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration, le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort.

Selon McIntyre (1973) comme cité dans Berkouk (2017) « *il est difficile de donner des limites ou des chiffres exacts au pourcentage optimal de l'humidité relative de l'air, car il varie selon la sensation d'une personne à l'autre, on peut assurer le confort thermique de l'occupant lorsque le pourcentage de l'humidité relative de l'air varie objectivement entre 35% et 65%.* ». Alors avec un taux d'humidité inférieur de 30 à 35 % Un milieu sec et un taux d'humidité supérieur de 65% Un milieu très humide.

I.2.2.4. La vitesse relative de l'air

La vitesse d'air a un rôle important dans les échanges thermique à l'intérieur des bâtiments, principalement elle influe les échanges par convection et augmente l'évaporation de la surface de la peau (Liébard et De Herde, 2005).

D'après Liébard (2005) Dans l'habitat, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou un problème d'infiltration d'enveloppe et elle peut influencer la sensation thermique des occupants lorsqu' elle dépasse la gamme de 0.2 m/s et dans les cas des courants d'air indésirable chaud ou froid .selon Berkouk(2017), « *Dans les périodes chaudes, si la température de l'air est inférieure à la température de la peau, l'augmentation de la vitesse de l'air fait augmenter la sensation confortable* » ,à cet égard, la norme ASHRAE 55-2017 a souligné que lorsque la température ambiante dépasse la limite supérieure de température acceptable, elle peut être compensée en augmentant la vitesse de l'air.

Alors la vitesse d'air joue un rôle important de la sensation thermique et elle peut influencer la sensation des autres paramètres tel que la : température ambiante et l'humidité relative de l'air intérieur, à ce perspective Liébard (2005) voit que dans un climat chaud et humide ou la température ambiante et l'humidité relative sont élevées les courants d'air offrent une source de déperditions de chaleur supplémentaire par convection forcée.

I.3. Les approches du confort thermique

D'après Cantin et al. (2005), les recherches sur le confort thermique ont partagé entre deux approches ; une approche analytique qui étudie le confort thermique d'une façon statique analytique et l'autre une approche adaptative qui est basée sur l'incapacité de l'approche analytique à représenter la réalité du confort thermique dans les bâtiments. Dans la même perspective Moujalled (2007), voit que ces deux approches sont complémentaires. *« L'approche analytique réduit le confort thermique à son aspect physique et physiologique et L'approche adaptative traite le confort thermique à travers les réactions comportementales et adaptatives de l'occupant dans son lieu de vie habituel ».*

Selon Moujalled (2008), *« Chacune de ces deux approches repose sur ses principes et développent ses propres équations pour modéliser le confort thermique indépendamment de l'autre. Ces deux approches conjointement : l'approche analytique qui se focalise sur l'aspect physique et les échanges thermique entre l'occupant et son environnement thermique, et l'approche adaptative qui s'intéresse aux mécanismes rétroactifs de l'adaptation de l'occupant dans son environnement ».*

I.3.1. L'approche analytique statique

Cette approche du confort thermique est basée sur des analyses statiques faites par des calculs. Selon Cantin et al (2005), elle est basée sur des calculs du bilan thermique du corps humain, par des modèles physiques et physiologiques. L'objectif de l'approche statique est de prédire la sensation thermique des occupants à travers trois aspects principaux : un aspect physiologique liée à l'individu (la thermorégulation) ; un aspect physique (les échanges de chaleur entre l'occupant et son environnement par conduction, convection, rayonnement et évaporation) ; et un aspect psychologique.

I.3.1.1. L'aspect physiologique : la thermorégulation

L'être humain est considéré comme un mammifère homéotherme c'est à dire un animal à température moyenne constante et indépendante du milieu ambiant d'après

ASHRAE, (1997) l'être humain est à une température de l'ordre de 37 °C, elle est variée selon l'activité est d'environ 36,8 °C au repos et augmente à environ 37,4 °C en marchant et 37,9 °C en jogging. L'être humain est un animal endotherme qui est capable de produire et réguler leur chaleur interne par le mécanisme de thermorégulation. D'après Fabbri (2015) Le système de thermorégulation permet à la température du corps humain de se maintenir à environ 37 °C avec un changement de $\pm 0,5$ °C, qui varie essentiellement en fonction de l'activité métabolique de l'individu.

La section hypothalamus du cerveau est la responsable de contrôle de la température corporelle. Il dispose de capteurs de température chaude et froide, baignés de sang artériel. Le plus important et le plus souvent utilisé dans les processus physiologiques est la régulation du flux sanguin vers la peau qui est l'organe sensoriel du système de thermorégulation (ASHRAE, 1997). D'après Moujalled (2007) il y a deux types de thermorégulation comme présenté dans la **figure I.5**.

- Une thermorégulation physiologique végétative « maintenir une température interne du corps à 37°C » ;
- Une thermorégulation comportementale « changement des paramètres d'ambiances ou de vêtements ».

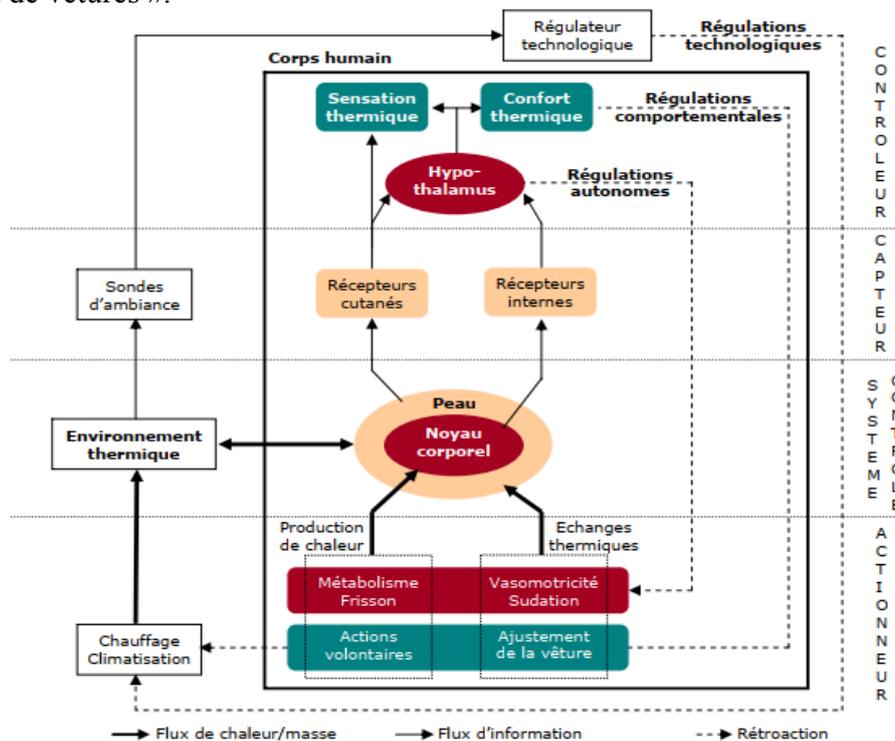


Figure I.5 : Les types et le mécanisme de thermorégulation humaine (Source : Moujalled, 2007)

I.3.1.2. L'aspect physique

La mécanique de thermorégulation assure un équilibre thermique du corps dans leur environnement. Alors, pour maintenir cet équilibre, le corps humain réagit à son environnement avec différentes interactions physiques.

I.3.1.2. 1. Les changes thermique

Les interactions et les échanges entre le corps humain et l'environnement se font principalement à travers les échanges cutanés et respiratoires à travers différents modes d'échange thermique. Ce sujet est l'intérêt de différentes recherche scientifique citons à titre d'exemple l'étude de Fanger (1970), Hardy (1949), Rapp and Gagge (1967), qui donner des informations quantitatives sur le calcul de l'échange thermique entre les personnes et l'environnement et équations mathématiques pour les différents modes de transfert de chaleur. Dans la physique, le transfert de chaleur d'une surface ou d'un environnement à un autre, lorsque les deux surfaces ont une température différente, de la plus chaude à la surface la plus froide. À ce regard et Selon Besancenot (1990) comme cité dans Berkouk (2017), ce transfert d'énergie thermique est mis en évidence avec quatre modes principaux différents, simultanés ou inverses : conduction, convection, rayonnement et évaporation, ces échanges se font sous l'effet de deux modes qui sont : l'effet vestimentaire et l'effet métabolique comme montre la **figure. I.**

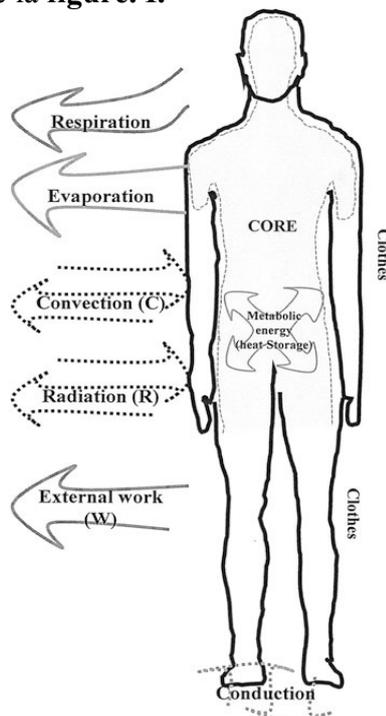


Figure. I.6. Les modes de transfert de chaleur entre le corps et son environnement. (Source : Fabbri, 2015)

-*Les échanges de chaleur par conduction* : C'est l'échange de chaleur par contact direct entre le corps ou certaines parties du corps et une surface

-*Les échanges de chaleur par convection* : C'est l'échange de chaleur entre la peau et l'air qui l'entoure sans contact.

-*Les échanges de chaleur par rayonnement* : C'est l'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques

-*Les échanges de chaleur par évaporation* : on distingue deux types ; la perspiration et la transpiration.

I.3.1.2. 2.Le bilan thermique

Fanger (1970) a défini trois conditions pour qu'une personne soit en confort thermique : le corps est en équilibre thermique ; le taux de transpiration est dans les limites de confort; et la température moyenne de la peau est dans les limites de confort; une quatrième condition est l'absence d'inconfort thermique local. L'objectif était de produire une équation de confort nécessitant une entrée des six paramètres de base seulement et sur la base des trois conditions, pour calculer les conditions de confort thermique. Ceci a été réalisé en utilisant un rationnel analyse du transfert de chaleur entre le corps habillé et l'environnement et une recherche expérimentale

D'après hall (2010) L'équation de bilan thermique, dans la formulation de Fanger (1970) est étant donné la formule suivante :

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = K = R + C \quad (4)$$

Le travail original de Fanger n'était pas en unités SI d'autre version de l'équation a été présentée, la version ci-dessous est tirée de manuel d'ASHRAE (1997) et adapté par Mazari (2007) :

$$\begin{aligned} M - W &= Q_{sk} + Q_{res} + S \\ &= (C + R + K + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + S_{sk} + S_c \end{aligned} \quad (5)$$

Avec :

- M =taux du métabolisme, W/m^2
- W = travail externe, W/m^2
- Q_{res} =flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m^2
- Q_{sk} =flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m^2
- C_{res} = flux de chaleur échangé par convection respiratoire, W/m^2

- E_{res} = flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire, W/m^2
- C = flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau, W/m^2
- R = flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau, W/m^2
- K = flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau, W/m^2
- E_{sk} = flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau, W/m^2
- S_{cr} = taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m^2
- S_{sk} = taux de chaleur stockée dans la peau, W/m^2

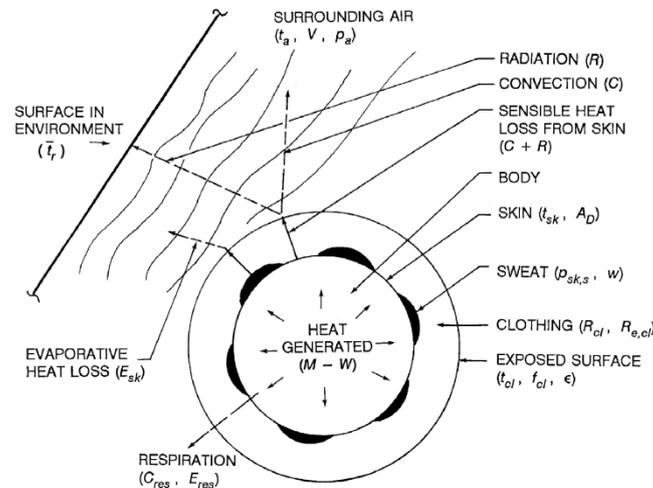


Figure. I.7. Les Interactions thermique du corps humain et de l'environnement.(Source : ASHRAE ,1997)

I.3.1.3. L'aspect psychologique : la sensation thermique

D'après Mazari (2012) la sensation en général de chacun dépend de nombreux paramètres liés à l'individu : l'âge, le sexe, le poids, la fatigue et l'état de santé... etc. L'aspect psychologique est très important pour la sensation thermique et la satisfaction vis-à-vis d'environnement thermique, à ce propos (Höppe, 2002 ; Moujalled, 2007 ; Berkouk, 2017) ils voient que l'aspect psychologique a un rôle très important dans sensation du confort thermique.

I.3.1.3. 1.La sensation thermique

Selon Narçon (2001) comme cité par Moujalled (2007) « La *sensation thermique* correspond à l'aspect qualitatif (chaud ou froid, localisation) et quantitatif (intensité) de la perception de l'état thermique personnel » aussi il atteste que la sensation thermique est liée aux différents messages sensoriels reçu par thermorécepteurs, cette sensation permette de identifier l'état thermique de l'individu.

I.3.2. L'approche adaptative

En contradiction avec la dernière approche et avec ses différents aspects physiologiques, physiques et psychologiques qui considèrent la personne dans un statut passif vis-à-vis de son environnement au lieu de cela l'approche adaptative voit la personne comme une entité active dont elle peut changer son environnement pour s'adapter à son besoin et à sa sensation de confort thermique comme Humphreys l'expriment « *les gens sont un système dynamique* ».

selon Humphreys (1998), le modèle adaptatif de confort thermique est principalement basé sur le principe de: si un changement se produit de manière à produire de l'inconfort, les personnes réagissent d'une manière qui tend à restaurer leur confort il voit en outre que « *ces réactions quelle que soit leur nature, nous les appelons adaptation au sens large pour inclure tous les aspects physiologiques, psychologiques, sociaux, technologiques, culturels et comportementaux* » cette approche visant à analyser l'acceptabilité réelle de l'environnement thermique.

L'approche adaptative a été le résultat des différentes études qui commence par des études dans des chambres climatique basé sur le modèle de Fanger, il est développé par utilisation des mesures in situ en conditions réelles, ces mesures en terrain ,ils ont conduit à considérer le confort thermique comme un système autorégulant (Nicol Humphreys ,1973;Auliciems,1981), à ce propos de Dear (1998) cité dans Croitoru et al(2015),a exprimé un certain nombre de réserves sur la validité des test au chambre climatique de Fanger, la première réservation concernait a été le manière non naturelle de juger la sensation thermique , l'autre était qu'ils ne semblent pas prendre en compte les dimension contextuelle culturelle, climatique et sociale du confort.

Cantin et al (2005), voit que l'approche adaptative est basée sur des investigations in situ sur des bâtiments dans différents types et des conditions climatique pour créer une base des données, ce dernier est fait par des mesures quantitatives des paramètres physique d'ambiance thermique et autre qualitative de la réponse subjectives des occupants et leur sensation thermique selon l'échelle de l'ASHRAE¹comme montre le tableau. I.2

¹ American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers

Tableau. I.2. l'échelle d'ASHRAE de sensation thermique (source :Moujalled, 2007)

L'échelle d'ASHRAE	Sensation thermique
• (+3)	• Très chaud
• (+2)	• Chaud
• (+1)	• Légèrement chaud
• (0)	• Neutre
• (-1)	• Légèrement froid
• (-2)	• Froid
• (-3)	• Très froid

Le modèle du confort thermique adaptatif résume les actions que les personnes entreprennent à travers trois mécanismes différents : comportementale d'ajustement, physiologique d'acclimatation et psychologique d'accoutumance comme le montre la figure. I.8 (de Dear, 1998 ; Moujalled, 2007 ;Croitoru et al, 2015 ; Fabbri, 2015)

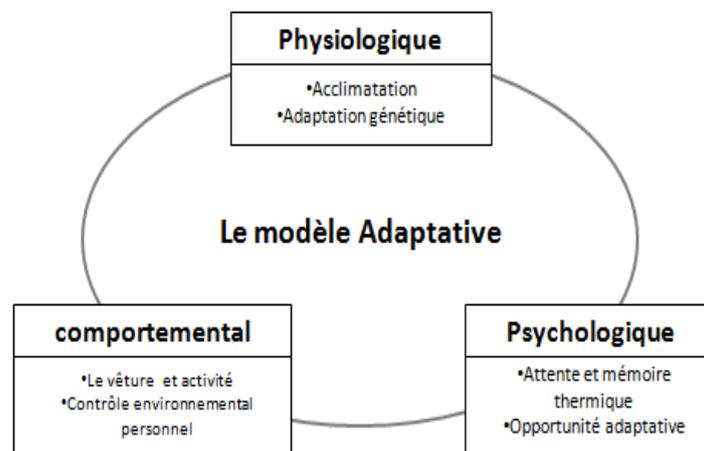


Figure. I.8.Diagramme schématique du principe holistique des modèles adaptatifs (source : Croitoru et al, 2015 adaptés par l'auteur)

I. 4. L'évaluation du confort thermique dans le bâtiment

L'évaluation du confort thermique dans le bâtiment permet de déterminer les conditions et les ambiances internes et les niveaux de confort des usages dans l'espace, pour une évaluation du confort thermiques des plusieurs méthodes ont été développées qui varient du subjectif aux objectifs et des évaluations quantitatives aux qualitatives et par différents approches et indices.

I.4. 1.Evaluation par les indices thermiques

Les indices thermiques sont des outils utiles pour décrire, concevoir et évaluer les environnements thermiques. D’après Givoni, 1978 Il est impossible d'exprimer les réponses humaines à l'environnement thermique en tant que fonctions d'un seul facteur environnemental tel que la température, l'humidité, la vitesse de l'air, etc., car ceux-ci affectent simultanément le corps humain et l'influence de quiconque dépend des niveaux des autres facteurs. Il est donc nécessaire d'évaluer l'effet combiné des facteurs environnementaux sur les réponses physiologiques et sensorielles du corps et d'exprimer toute combinaison de ceux-ci en un seul paramètre.

D’après Berkouk (2017),l'utilisation des indices thermiques est variée dans la littérature scientifique, des différents indices ont été utilisés pour évaluer le confort thermique, comme on peut citer la recherche de Hill, Barnard et Sequeira 1897 qu’était basée sur la théorie du transfert de chaleur, aussi la recherche de Winslow, Herrington et Gagge (1937), qui utilisaient les indices de température opératifs, à plus récente l'étude de Fanger (1970), qui reposait sur l'indice des votes principaux prédits par PMV, aussi l'ISO (2005), qui utilisait le PPD moyen, PPD cumulatif .On peut citer les suivants comme les principaux indices, couramment utilisés :

I.4. 1.1.les modèles environnementaux simple

Des différents facteurs physiques de l’ambiance et des indices ont été développés pour une évaluation simplifiée du confort thermique parmi ces indices on peut citer quelques-unes :

- **Température effective** : d’après Givoni (1978),l’indice incluse : la température, l’humidité et vitesse de l’air. Cet indice exige que les limites de confort doivent être établies pour chaque zone et région une température entre 22 et 27C°.leur value peut-être déterminité par la combinaison de la température de bulb humide et sec avec la vitesse de l’air ;
- **Température équivalente** : l’indice incluse : la température de l’air, de rayonnement et de la vitesse de l’air ;
- **Températures opératives** : aussi appelée température de confort ressentie et température résultante sèche. elle est défini par la température de l’air et des parois par la relation suivante : $T^{\circ} \text{ opérative} = (T^{\circ} \text{ ambiante} + T^{\circ} \text{ des parois}) / 2$

- **Température résultante :** Formée par des expériences dans lesquelles l'équilibre thermique est réalisé entre le corps et l'environnement.

I.4. 1.2. Les PMV et PPD

Fanger(1970), a développé ces deux indices ; le PMV (*Predicted Main Vote*) le vote moyen prévisible qui prédit la sensation thermique moyenne d'un groupe d'individus et le PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfaction*) Pourcentage Prévisible D'insatisfaits qui prédit le pourcentage d'insatisfaction aux l'environnement thermique.

- **Le vote moyen prévisible (PMV)**

Le PMV comme indice permet de mesurer la sensation thermique d'un large groupe d'individu. D'après Mazari, 2012 « *le PMV mesure la sensation thermique globale du corps à partir du métabolisme et donne la moyenne des votes en référence à une échelle.*» Les valeurs de PMV varient entre -3 et 3 à l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE, comme montre le tableau I.2.

D'après Hall (2010), la valeur numérique de PMV est calculée selon des équations développées à partir des mesures de stress thermique et le niveau d'activité ces équations sont développé à partir des données fournissent par Nevins et al. (1966), Mcnall et al. (1968) et Fanger (1970) pour quatre niveaux d'activité à partir de 1396 sujets exposés pendant 3 heures avec un niveau vestimentaire de 0.6 Clo dans des chambres climatiques. L'équation de calcul du PMV selon ISO 7730² (2005) est comme suivant :

$$PMV = (0.303e - 0.036M + 0.028) \{ (M - W) - 3.05 \times [5.733 - 0.007 (M - W) - pa] - 0.42 \times [(M - W) - 5815] - 0.0173 \times M (5.87 - pa) - 0.0014 \times M (34 - ta) - 3.96 \times 10^{-8} \times fcl \times [(tcl + 273)^4 - (tr + 273)^4] - fcl \times hc (tcl - ta) \}$$

- **Pourcentage prévu des insatisfaits (PPD)**

Cet indice fournit des informations pratiques concernant le nombre de plaignants potentiels est en relation direct avec le PMV, il peut être calculé selon l'équation suivant :

$$PPD = 100 - 95 \exp [- (0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2)] \text{ (ISO 7730, 2005).}$$

² ISO International Organization for Standardization

Le graph de la figure I.9 représente la répartition et variation du pourcentage de PPD en fonction du PMV, d'après le graph il a remarqué qu'avec un PMV égale à (0) exprime une sensation d'insatisfaction minimale alors une sensation de confort thermique.

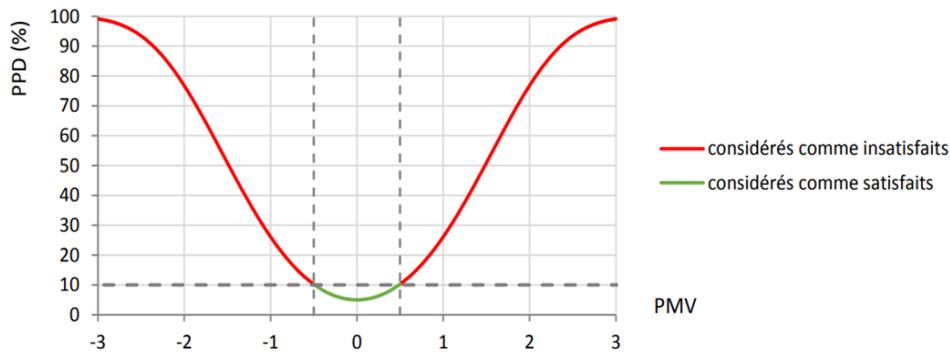


Figure. I.9.Le pourcentage de PPD en fonction de la PMV (source : Batier, 2016)

A ce sujet La norme (ISO 7730,2005) a été défini la zone de confort thermique en fonction de PMV et PDD comme suivant : $-0,5 < PMV < 0,5$ soit $PPD < 10 \%$

I.4. 2.Evaluation par des outils graphiques

Des différents outils graphiques ont été développés pour l'évaluation du confort thermique et pour étudier l'impact des conditions climatiques sur les bâtiments, ces outils graphiques sont des diagrammes bioclimatiques qui sont des outils de synthèse qui permettent de choisir les grandes options architecturales à partir des exigences du confort thermique et des profils du climat extérieur. Parmi ces outils on peut citer le diagramme bioclimatique d'Olgay, celui de Givoni, les tables de Mahoney, et la méthode de Szokolay.

Le diagramme d'Olgay en 1953, il est considéré comme le premier diagramme bioclimatique. Selon Givoni (1976), le diagramme d'Olgay a proposé une procédure systématique pour adapter la conception du bâtiment aux exigences humaines et aux conditions climatiques. Sa méthode montre la zone de confort humain en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant, la zone de confort est au centre avec les plages d'hiver et d'été indiquées séparément en tenant compte de l'adaptation saisonnière. Le diagramme de Givoni c'est un diagramme psychométrique qui évaluer le confort thermique des occupants à partir de la température et de l'humidité de l'air ambiant pour déterminer la zone de confort pour une certaine période et climat aussi les besoins de

chauffage et de refroidissement pour maintenir des conditions du confort. Le diagramme psychrométrique de Givoni est présenté dans la figure I.10.

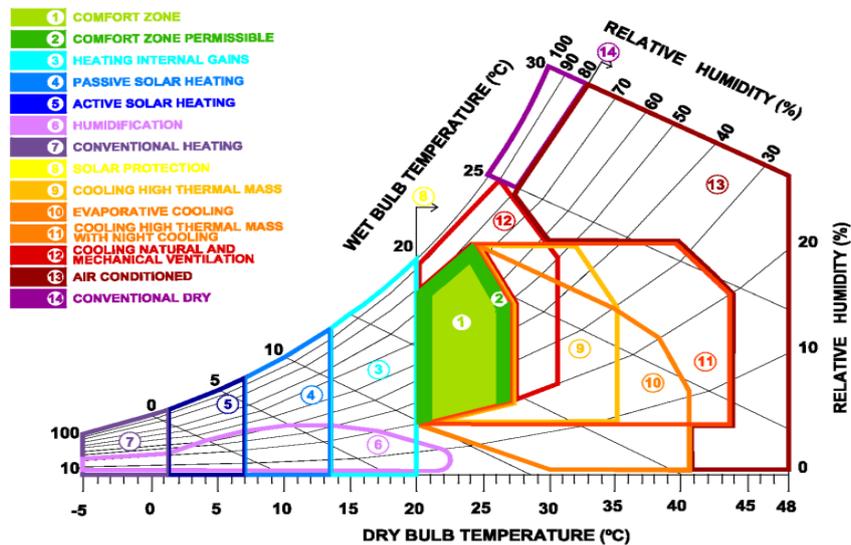


Figure I.10.Le diagramme psychrométrique de Givoni, 1992 adapté par Manzano-Agugliaro et al. 2015 (source : Berkouk, 2017)

I.4. 3.Evaluation par enquête en situ

Les études in situ sont considérées comme une étape importante dans le processus d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments. Ils évaluent le sujet d'étude en temps réel. Ils peuvent inclure des mesures physiques, des questionnaires, des observations, des entretiens... etc. D'après Fabbri (2015) la première étude qui a été faite par l'utilisation d'enquête in situ retour à Bedford (1936) qui a mesuré l'environnement thermique d'environ 2500 travailleurs dans une industrie britannique par un questionnaire sur le confort thermique en utilisant l'échelle de sensation thermique.

Nicol (1993) cité dans (Collard, 2001 ; Mazari ,2012) a proposé une classification des enquêtes in situ en trois niveaux comme suivant :

Niveau 1 : correspond à des mesures physiques de la température de l'air, avec ou sans l'humidité de l'air, sont effectués dans un endroit spécifique de bâtiment dans une période donnée, ces mesures ont été faites par différents outils et appareils de mesure. Ce niveau de mesure est objectif et quantitatif.

Niveau 2 : correspond à des mesures subjectives par les questionnaires classiques sur le confort thermique en parallèle avec des mesures des différentes grandeurs physiques de l'ambiance thermique comme température de l'air, température radiante, vitesse de l'air et humidité de l'air. Les mesures subjectives en fait à l'aide d'échelles de jugements subjectifs : (vote de perception, vote d'évaluation et vote de préférence).

Niveau 3 : correspond à des mesures et observations des vêtements et les niveaux activités des sujets étudiés pour permettre de calculer les différents indices de confort, notamment le PMV et le PPD. Le confort déduit de ces indices peut être comparé à celui perçu par les sujets in situ.

I.4. 4. Evaluation par simulation numérique

Cette méthode d'évaluation a été développée avec le développement technologique des systèmes de modalisation numérique, ce dernier il utilise des logiciels de simulations des différents comportements des bâtiments, il facilite de modéliser et simuler les différents éléments et variables des bâtiments.

I.5. Les normes et réglementations du confort thermique

Le confort thermique à l'intérieur de bâtiment a été l'objet de débats, des valeurs limites ou indicatives suggérées pour les bâtiments ont été proposées par un certain nombre d'institutions professionnelles et dans la législation au cours des années. D'après Hall(2010) Il y a un intérêt national et international croissant pour la fourniture d'orientations pour assurer la protection et bonnes pratiques particulièrement dans les zones avec des conditions climatique extrême.

I.5. 1. la norme ISO

L'ISO³ (organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation. Dans le domaine de thermique de bâtiment et le confort thermique, l'ISO a présenté plusieurs normes au cours des années on peut citer :

-ISO 7243, Ergonomie des Ambiances chaudes : Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail.

³ <https://www.iso.org/fr/standard/39155.html>

-ISO 7726, Ergonomie des ambiances thermiques : Appareils de mesure des grandeurs physiques.

-ISO 7933, Ergonomie des ambiances thermiques : Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible.

-ISO 8996, Ergonomie de l'environnement thermique : Détermination du métabolisme énergétique.

-ISO 9920, Ergonomie des ambiances thermiques : Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire.

-ISO 10551, Ergonomie des ambiances thermiques : Évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs.

-ISO/TR 11079, Évaluation des ambiances froides : Détermination de l'isolement requis des vêtements.

-ISO 7730 Ergonomie de l'environnement physique et les ambiances thermiques.

-ISO 7730 :1994, qui a fait l'objet d'une révision technique. Une méthode d'évaluation à long terme a été ajoutée, ainsi que des informations sur les inconforts thermiques locaux, sur les ambiances thermiques variables et sur l'adaptation. Une annexe informative, indiquant comment les exigences de confort thermique peuvent être exprimées dans différentes catégories, a également été ajoutée.

-ISO 7730:2005, fournit une méthode analytique pour évaluer environnements et est basé sur le modèle de Fanger le vote moyen prévu et le pourcentage prévu d'indice d'insatisfaction (PMV / PPD) et sur les critères d'inconfort thermique local.

Pour plus de détails et des applications pratiques, le lecteur est renvoyé à la norme originale.

I.5. 2. Les norms d'ASHRAE

L'ASHRAE⁴ (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers). D'après Jenkins (2020) La série ASHRAE contient plus de documents relatifs à

⁴ <https://www.simscale.com/blog/2019/08/what-is-ashrae-55-thermal-comfort/>

d'autres applications HVAC. Par exemple: ASHRAE 15 qui couvre les normes de sécurité pour les systèmes de réfrigération, Norme ASHRAE qui se concentre sur l'efficacité énergétique des bâtiments existants et L'ASHRAE 55 qu'est une norme de l'évaluation de l'environnement thermique a l'intérieur de bâtiment, elle a été publiée pour la première fois en 1966 et est mise à jour tous les 3 à 7 ans sur la base des recherches actuelles, de l'expérience pratique et des recommandations des concepteurs, des fabricants et des utilisateurs finaux. Les versions les plus notables, ainsi que les plus récentes de la norme, sont les versions mises à jour de 2004, 2010 et 2017.

ASHRAE 55-2004 : a introduit l'adoption de la méthode du modèle informatique, l'introduction de la méthode adaptative basée sur la recherche qui soutient les conceptions de ventilation naturelle, et la reconnaissance de la préférence de vitesse élevée pour la température générale de confort.

ASHRAE 55-2010 : a réintroduit la température d'effet standard (SET) comme méthode d'évaluation et de détermination de l'effet de refroidissement des vitesses élevées et du mouvement de l'air intérieur dans son ensemble.

ASHRAE 55-2017 : comprend un nouvel élément qui peut prendre en compte le changement du confort thermique des occupants par le rayonnement solaire direct.

I.5. 3.Les normes et réglementations en Algérie

D'après le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (2011) comme cité dans Imessad et al. (2017) le gouvernement algérien a imposé une politique d'amélioration de la gestion des ressources énergétiques à travers la loi N°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie et le décret exécutif N°2000- 90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs. La régulation thermique actuellement utilisée en Algérie est la DTR C3.2 / 4, les vérifications de conformité de la saison d'hiver et d'été à l'aide de cette régulation doivent se faire séparément.

Pour plus information voir le Document Technique Réglementaire, Réglementation Thermique Algérienne du Bâtiment, CNERIB, 2016.

I.2.le contexte et la consommation énergétique

Au cours des dernières décennies, le contexte énergétique a connu des changements majeurs en termes de niveau de consommation et de type d'énergie consommée. La

disponibilité des sources d'énergie sur terre a contribué de maintenance du développement des activités humaines. Les énergies sont partagent en deux type ; des énergies Non renouvelables dites énergies fossiles (pétrole, gaz, etc.), épuisables et des énergies renouvelable dites inépuisables tel que l'énergie solaire, éolienne, etc. (Liébard et al, 2005).

L'exploitation non rationnelle des énergies fossiles au début du XXI^{ème} et avec l'industrialisation qui a touché tous les aspects de la vie ont contribué à la naissance des catastrophes écologiques, par conséquence des différents sommets internationaux ont été organisés pour discuter ce défi croissant .Une Conférence sur l'environnement et le développement a été organisé à Rio en 1992 où le principe du développement durable a été présenté pour assurer la persévérance énergétique et remplacer l'utilisation des énergies fossiles par des énergies renouvelables .

I.2.1. Le contexte énergétique mondial

Le monde est confronté à une énorme augmentation démographique, selon Liébard (2005), la population mondiale atteindra environ 8 à 10 milliards d'habitats en 2050, forcément, la demande d'énergie pour le chauffage, le refroidissement, les transports, etc. augmentera avec une diminution des sources d'énergie, cela conduira à la crise énergétique mondiale.

En 1973, le monde a été confronté au premier choc pétrolier, qui a conduit les décideurs politiques internationaux à trouver une solution à cette crise, l'énergie étant le moteur du développement des sociétés modernes. Les solutions ont consisté à organiser des sommets mondiaux internationaux qui ont abouti à la création de différents nouveaux concepts et réglementations pour protéger l'environnement et rétablir l'équilibre écologique, ainsi que pour déplacer la consommation d'énergie fossile vers les énergies durables et renouvelables. Malheureusement, ces réglementations ont été ignorées par le pays industriel, leader mondial, comme le montre la figure **I.11**, qui sont les plus consommateurs d'énergie au monde, avec une consommation énorme de plus que 2000 Mtep⁵ (Tonne d'équivalent pétrole) pour les pays non industriels et pas plus de 100 Mtep pour les pays non industriels.

⁵Mtep : Tonne d'équivalent pétrole : unité de mesure de l'énergie

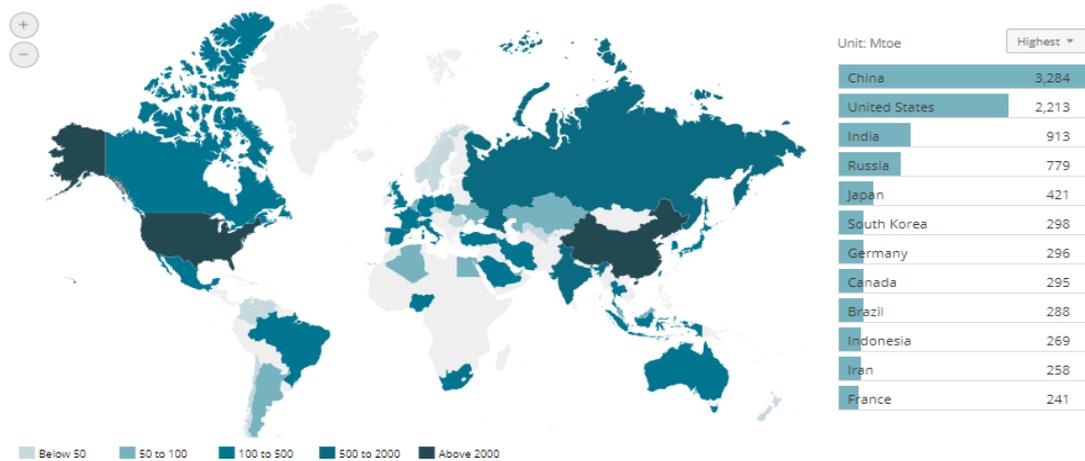


Figure I.11 : La consommation énergétique mondiale en 2019 (Source : The Global Energy Statistical Yearbook⁶, 2020)

I.2.2. le contexte énergétique en Algérie

Au cours des dernières décennies, l'Algérie a fait face à la crise énergétique comme toute partie du monde, par l'utilisation de l'énergie fossile comme principale source qui anime tous les secteurs et tous les aspects de la vie.

La production d'énergie : D'après le bilan énergétique national de 2017 la production commerciale des énergies primaires pour atteindre 165,9 Mtep comme montre la figure I.12. Ainsi, la hausse de production du gaz naturel a compensé partiellement la baisse de production de pétrole en raison notamment de l'application de l'accord de réduction de production de l'OPEC⁷, pour la production d'énergie dérivée une production de 64.2 Mtep tel que la production d'électricité primaire est passée de 336 à 635 GWh⁸.

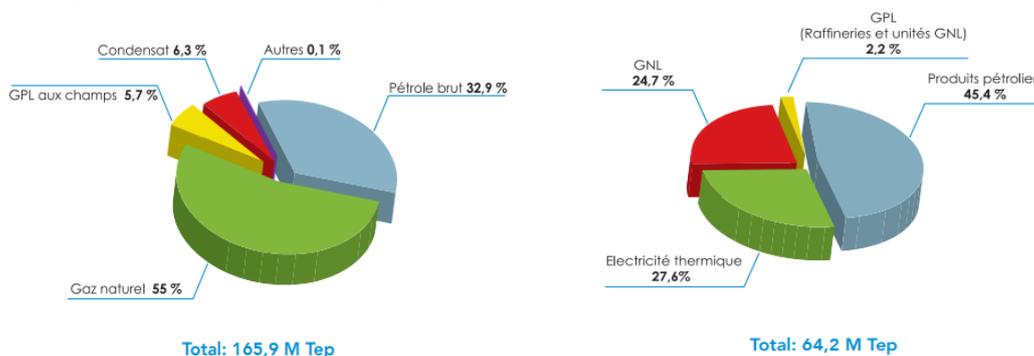


Figure I.12. La production d'énergie en Algérie en 2017 (source : le bilan énergétique national, 2017)

⁶ Annuaire statistique de l'énergie mondiale d'Enerdata, www.yearbook.enerdata.net

⁷ OPEC : L'Organisation des pays exportateurs de pétrole

⁸ 1GWh = 86 Tep

La consommation d'énergie :

D'après le bilan énergétique national de 2017 La consommation nationale d'énergie a atteint 59,6 M Tep en 2017 comme montre la figure. I.13.

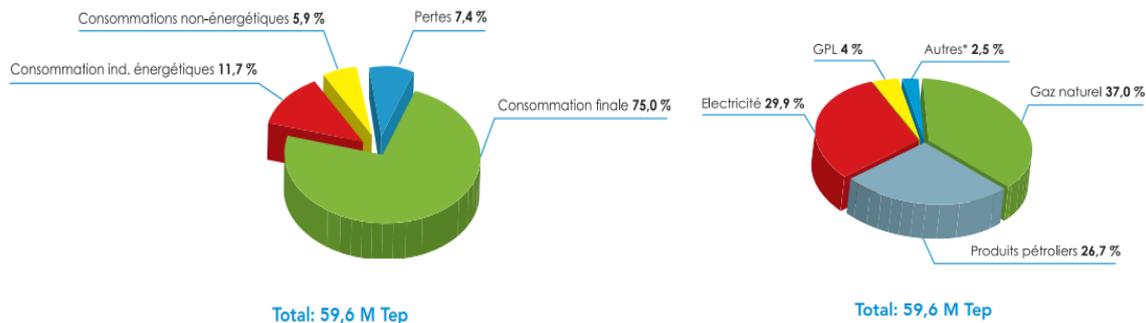


Figure I.12. La consommation d'énergie en Algérie en 2017 (source : le bilan énergétique national, 2017)

En 2019, La consommation énergétique a atteint 63 M Tep. D'après la figure. I.14 on constate que la consommation d'énergie en Algérie a doublé au cours des dernières décennies, passant d'environ 20 Mtep à plus de 60 Mtep en 2019.

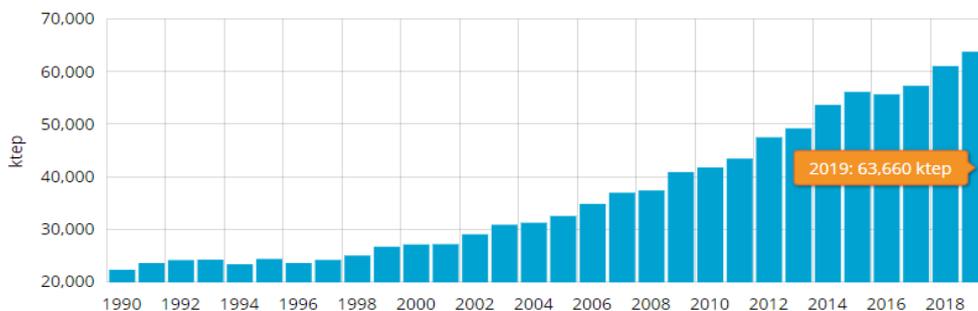


Figure I.14 : La consommation énergétique en Algérie en 2019 (Source : The Global Energy Statistical Yearbook, 2020)

I.2.2.1. La consommation énergétique du secteur du bâtiment en Algérie

Le bâtiment est un grand consommateur d'énergie, le secteur du bâtiment représente 41% de la consommation énergétique totale mondiale (PNUE⁹, 2007)

En Algérie, la consommation énergétique par le secteur de bâtiment l'ensemble résidentiel et tertiaire est 41 % de la consommation finale selon le rapport de l'APRUE¹⁰ (2009). comme montre la figure. I.15

⁹PNUE Programme des Nations Unies pour l'environnement

¹⁰APRUE : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

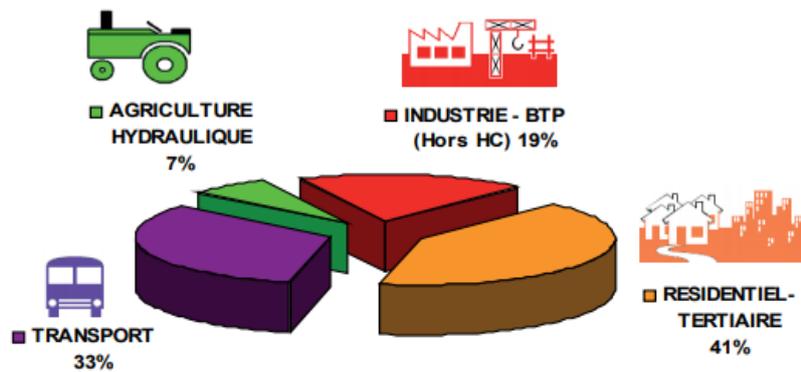


Figure I.15 : La Consommation énergétique finale de l'Algérie par secteur (Source: APRUE, 2009)

La consommation finale du secteur résidentiel a atteint 6 millions de tep en 2005, avec La consommation énergétique moyenne annuelle d'un logement est de 1,050 tep, et pour le secteur tertiaire a atteint 1 million de tep (Commerce : 39% ; Administration centrale : 19% ; Tourisme : 8% ; Santé : 12% ; Education : 8% ; Eclairage public : 5% ; Autres : 5%). la figure I.16. présente le pourcentage de consommations d'énergie du secteur résidentiel et tertiaire.

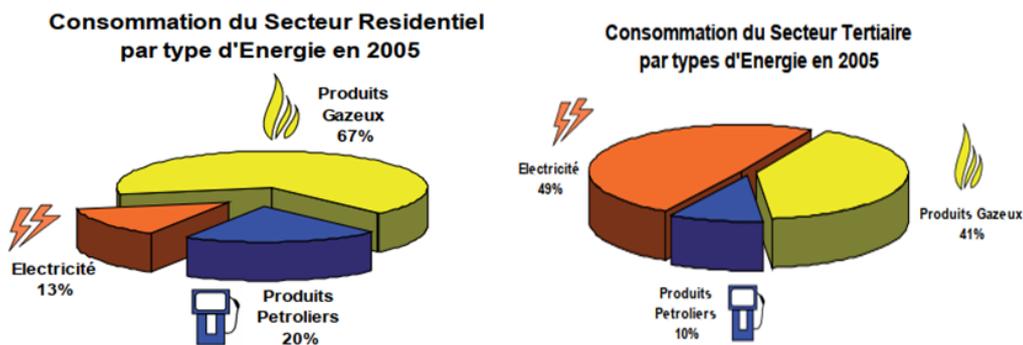


Figure I.16 : La Consommation énergétique finale du secteur par type d'énergie (Source: APRUE, 2009)

I.2.3. L'efficacité énergétique dans le bâtiment

L'efficacité énergétique est devenue un enjeu mondial étant donné son importance et l'état actuel du monde. Selon Patterson (1996), l'efficacité énergétique occupe désormais une place importante dans la politique publique de la plupart des pays développés, son importance est liée aux avantages commerciaux, de compétitivité industrielle, d'environnement et de sécurité énergétique.

L'efficacité énergétique est un terme générique, il s'appuie sur différents indicateurs pour quantifier les changements. En général, l'efficacité énergétique fait référence à

l'utilisation de moins d'énergie pour produire la même quantité de services ou une production utile. Par conséquent, l'efficacité énergétique est souvent définie au sens large par le simple ratio : Sortie utile d'un processus / Entrée d'énergie dans un processus (Patterson, 1996). Dans le domaine de bâtiment l'efficacité énergétique signifie que le bâtiment est consommé moins d'énergie pour assurer les conditions du confort.

Dans le secteur du bâtiment, l'application de l'efficacité énergétique prend la forme de différents termes et concepts tels que :

- **Maison passive**
- **Bâtiment basse consommation d'énergie** : bâtiment pour lequel la consommation en énergie finale pour le chauffage varie entre 30 et 60 kWh/(m².an).
- **Bâtiment très basse énergie** : bâtiment pour lequel la consommation en énergie finale pour le chauffage varie entre 10 et 15 kWh/ (m².an).
- **Bâtiment à zéro énergie** : Bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme en utilisant des énergies renouvelables.
- **Bâtiment à énergie positive** : Bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme (dans le même esprit que les bâtiments à énergie zéro).

1.2.4. Les mesures et les instruments de l'efficacité énergétique

Différentes mesures ont été prises globalement, afin de réduire la consommation d'énergie et d'atteindre l'efficacité énergétique une politique mondiale d'économie d'énergie est poussée et réformée comme une solution urgente pour atténuer les problèmes actuels des crises énergétiques. La conservation de l'énergie et l'amélioration de l'efficacité joueraient un rôle vital et pourraient être une solution à long terme si les objectifs/instruments politiques utilisés aujourd'hui sont revus et intégrés dans la politique d'efficacité énergétique existantes et transférées à toute nation qui en a besoin (Khatiwora, 2009).

D'après L'Union européenne (UE)¹¹ le futur objectif d'efficacité énergétique est de 20 % d'économies d'énergie par 2021 et de 27 % par 2032. Dans l'ensemble, le potentiel d'économies d'énergie est le plus élevé dans le secteur du bâtiment, qui représente 40 % de la consommation finale d'énergie de l'UE et 36 % de ses émissions de gaz à effet de serre. Différents programmes et directives ont été annoncés à savoir :

¹¹L'Union européenne (UE) https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings_en

- La directive sur l'efficacité énergétique (EED 2012) et la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD 2010) sont les principaux éléments de l'UE. Législation pour atteindre ces objectifs.
- La directive modificative (2018/844/CE) couvre un large éventail de politiques et de mesures de soutien qui aideront les gouvernements nationaux de l'UE à accroître la performance énergétique des bâtiments et à améliorer le parc immobilier existant. La directive exige également que les pays de l'UE fixent des exigences de performance énergétique minimales optimales en fonction des coûts pour les nouveaux bâtiments, pour les bâtiments existants faisant l'objet de rénovations majeures et pour le remplacement ou la modernisation d'éléments de construction tels que les systèmes de chauffage et de refroidissement, les toits et les murs.

À partir de 2021, tous les nouveaux bâtiments doivent être des bâtiments à Zéro-Energie (NZEB) et depuis 2019, tous les nouveaux bâtiments publics devraient être des NZEB. Lorsqu'un bâtiment est vendu ou loué, des certificats de performance énergétique doivent être délivrés et des programmes d'inspection des systèmes de chauffage et de climatisation doivent être établis.

1.2.4.1. Les instruments de l'efficacité énergétique en Algérie

En Algérie, les ressources en hydrocarbures représentent 97 % des recettes d'exportation, 41 % du PIB (produit intérieur brute) et 77 % du budget de l'État. Afin de stabiliser voire de diminuer la consommation énergétique nationale, un programme d'efficacité énergétique dans le secteur de bâtiment doit être mis en place. La création d'une stratégie d'efficacité énergétique pour le secteur du bâtiment pourrait également avoir des effets sociaux importants. Cela protégerait le client en lui permettant de gérer sa consommation d'énergie et de réduire ainsi ses coûts énergétiques. L'Algérie a adopté en février 2011, un programme ambitieux des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Toute l'attention des pouvoirs publics est mobilisée afin de réussir ce programme basé sur une stratégie verte tracée à l'horizon 2030. Le programme de l'efficacité énergétique affiche la volonté de l'Algérie de préserver les ressources du pays et optimiser leurs utilisations. (Bouamama, 2013).

D'après Bouamama 2013 les moyens d'encadrement de la politique nationale d'efficacité énergétique ont été définis dans le cadre de la loi n° 99-09 du 28 juillet 1999

relative à la maîtrise de l'énergie « *Suite à une réflexion sur la consommation active et passive des logements neufs initiée en 1995. Le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme met en place des Documents techniques réglementaires (DTR) en 1997. Ceux-ci déterminent notamment les valeurs de référence relatives aux déperditions et aux apports calorifiques concernant les bâtiments neufs à usage d'habitation et tertiaire, les méthodes de calcul des déperditions et des apports calorifiques, les valeurs limites pour le climat intérieur des locaux et les zonages climatiques* ». Ainsi les instruments prévus sont :

- L'Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie, (APRUE) ;
- Le Fonds National de Maîtrise de l'Énergie, (FNME) pour objet de contribuer à l'impulsion et au développement, à terme, d'un marché de l'efficacité énergétique ;
- Le Comité intersectoriel de maîtrise de l'énergie (CIME) ;
- Le Programme National de l'efficacité énergétique.
- Eco-bât qui consiste à la réalisation de 600 logements sociaux locatifs répartis sur trois zones climatiques, assurant une optimisation du confort intérieur en réduisant la consommation énergétique liée au chauffage et à la climatisation.

L'efficacité énergétique un rôle stratégique important, il présente qu'il est un passage essentiel pour le développement durable. L'Algérie à travers son programme durable met l'accent sur la nécessité d'impliquer toutes les parties impliquées afin de parvenir à un véritable résultat matérialisé par des projets d'envergure exploitant d'où l'énorme potentiel d'économie d'énergie.

1.2.5. La consommation d'énergies et le climat

La consommation d'énergie des bâtiments a une relation directe avec les conditions climatique de leur environnement. Le changement climatique et la hausse des prix de l'énergie sont devenus des problèmes mondiaux dans l'industrie de la construction et obligent les architectes et les ingénieurs à proposer des concepts passive durable et avec moins de besoins énergétiques.

Le concept de « Conception spécifique au climat » n'était pas un nouveau concept c'est un ancêtre activé qui a été pratiqué pendant des siècles, et avec le développement des technologies a malheureusement été dissipé, cependant avec les dernières crises énergétiques et les conditions climatiques les concepts ont refait surface et sont devenus la

base de nouveaux programmes durables. Pour réussir à concevoir un bâtiment, il faut comprendre les principes de conception spécifiques au climat. Cela signifie que le concept global de la construction doit répondre à l'environnement local ainsi qu'à l'utilisation prévue du bâtiment (Christoph Mitterer et al., 2012). Ces principes de conception de base en fonction du climat doivent être pris en compte au cours des premières étapes du processus de conception. Une fois le concept de construction terminé, ces spécifications des composants de construction individuels et les détails ainsi que la définition de l'équipement de HVAC.

I.2.6. Principaux consommateurs d'énergies dans les bâtiments

Les bâtiments sont de gros consommateurs d'énergie, cette consommation peut se différencier selon le type, la taille et la fonction principale de l'espace, et aussi selon les conditions climatiques extérieures.

D'après le ministère d'énergie algérienne¹², en Algérie la consommation nationale d'énergie a atteint 66,9 M Tep en 2019, reflétant une hausse de 3,0% par rapport à 2018. Le secteur de bâtiments tertiaire et résidentiel présente 40% de cette consommation, récemment dans le secteur du bâtiment la demande en électricité a connu une évolution importante et particulièrement en période estivale, atteignant des pics de consommation importants. Cette forte augmentation de la demande est une conséquence directe du changement des habitudes du consommateur et l'amélioration de sa qualité de vie, et pour adapter avec les conditions climatiques.

Une consommation finale du secteur résidentiel a atteint 15 M de tep/pcs soit 11.6 M de tep/pc et une consommation énergétique du secteur tertiaire a atteint 4M de tep/pcs soit 2.5M de tep/pci.

Le graph de la figure I.17 présente la répartition de la consommation du secteur de bâtiment par type d'énergie.

¹²<https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>

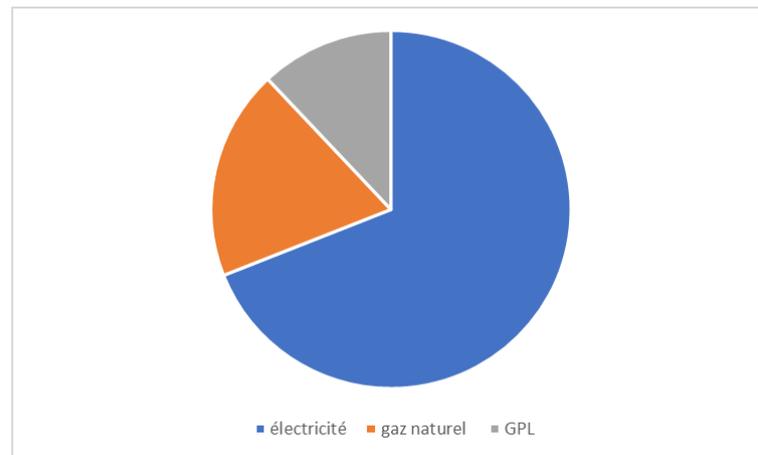


Figure I.17 : Répartition de la consommation du secteur de bâtiment par type d'énergie. (Source : L'APARUE 2017)

La répartition de la consommation montre que l'électricité est prédominante. Cela s'explique par l'introduction massive des équipements de chauffage et de climatisation.

Des températures ambiantes plus élevées affectent la demande d'électricité. Il a été constaté que la hausse d'électricité maximale correspondante par degré d'augmentation de température varie entre 0,45 % et 4,6 %, correspondant à une pénalité électrique supplémentaire proche de 21 Watts ($\pm 10,4$) par degré d'augmentation de température et par personne (Santamouris et al, 2021)

Conclusion :

Le confort thermique a été défini comme un état d'esprit et une sensation de satisfaction thermique environnementale qui en font un concept très subjectif et complexe à évaluer et à atteindre. L'état d'inconfort thermique conduit les utilisateurs de l'espace à essayer de faire face et d'atteindre leur confort thermique grâce à l'utilisation de l'énergie par les systèmes HVAC. L'utilisation excessive des systèmes HVAC, très courante en particulier dans les régions aux conditions climatiques difficiles et extrêmes, affecte négativement la performance énergétique du bâtiment et lui donne un aspect énergivore. Une orientation globale vers des bâtiments économes en énergie a émergé pour assurer le confort thermique de l'utilisateur du bâtiment et un bâtiment à faible consommation par l'adoption de différents programmes d'efficacité énergétique et l'application de différentes stratégies sur l'enveloppe du bâtiment pour relever le défi d'une architecture climatiquement intégrée et économe en énergie.

CHAPITRE II :
**L'évolution de conception des Bâtiments
Scolaire**

CHAPITRE II : L'évolution de conception des Bâtiments Scolaire

"On façonne les plantes par la culture et l'homme par l'éducation "

J-j, Rousseau

"Les établissements scolaires sont des lieux d'éducation et de transmission des savoirs et des valeurs, représentent des témoins vivants de nombreux aspects d'une société."

Labreche, S 2014

Introduction :

Les bâtiments scolaires représentent une part importante des bâtiments publics dans le monde entier en raison de l'importance de l'éducation dans toutes les sociétés.

Le concept des bâtiments scolaires a évolué au fil des années et a dû s'adapter aux grands changements du monde : social, économique, environnemental etc. Cette évolution avait influencé le concept et l'architecture des établissements scolaire pour devenir plus adaptable aux nouveaux besoins du monde par la développant des nouvelles stratégies et programmes pour guider la conception de l'espace éducatif.

L'étude des espaces scolaire est très importante en raison des spécificités de ces espaces telles que les longues heures d'utilisation et surtout la fragilité des utilisateurs.

Ce chapitre présente l'évolution du concept de bâtiment scolaire au fil des années au niveau international et en Algérie, les caractéristiques architecturales et spécificités de ce type de bâtiment et ses principes de conception, l'influence des paramètres environnementaux sur ce bâtiment et le processus éducatif et enfin un aperçu des programmes et normes actuels et futurs pour un bâtiment scolaire plus performante.

II.1. L'évolution du concept d'établissement scolaire :

Les établissements scolaires présentent l'ensemble des bâtiments dédiés à l'éducation des enfants à travers leurs différentes étapes, allant des écoles maternelles aux écoles primaires, collèges et lycées. Les établissements scolaires présentent une part importante de toute société en raison de l'importance du processus éducatif dans le développement des sociétés, de la conception d'un espace destiné aux activités éducatives face aux multiples transformations avec l'évolution culturelle, sociale et économique, l'évolution du le concept d'établissement scolaire s'est développé au fil du temps où, dans les premiers âges, ces établissements avaient un caractère religieux et au fil du temps, il a changé pour répondre aux besoins des sociétés.

II.1.1. La Naissance d'un espace bâti destiné à l'éducation :

D'après Foster (2004) l'espace éducatif a changé au fil du temps, alors que dans le passé, le processus éducatif n'avait pas d'une place réservée, mais l'enseignement était dispensé dans des espaces ouverts tels que des jardins ou dans les maisons des enseignants. Ce n'est qu'au Moyen Âge que le concept de classes a été introduit et que différentes classes ont été ouvertes, cependant, il s'agissait simplement d'une pièce intégrée dans un bâtiment public ou la maison du professeur ou les chapiteaux des monastères. Les premiers établissements scolaires ont été des collèges prestigieuses réservées aux enfants des familles bourgeoises, par contre les enfants qui travaillaient pouvaient étudier parfois à la fin de la journée dans les écoles du soir. L'année 1877 a marqué l'introduction des lois anti-travail des enfants qui interdisaient aux enfants de travailler, ces lois ont été le point de départ pour créer un espace dédié à l'éducation de ces enfants (Foster S. et al, 2004).

II.1.2. La Naissance et évolution d'une architecture scolaire :

D'après Foster (2004) l'émergence d'une architecture spécifiquement scolaire est tardive contrairement aux bâtiments militaires, religieux et de l'habitat et bâtiments résidentiels. La naissance d'une architecture scolaire proprement dit à l'occident débute à partir de XIX^{ème} siècle, elle correspond au passage de la prise en charge de l'école par l'état. À cette époque en Europe, le model Prussien a connu un grand essor. Il s'agit d'un ensemble de salles de cours regroupées autour d'un hall central utilisé pour les enseignements communs et les rassemblements. A titre d'exemple En France, le

développement et l'évolution de l'architecture scolaire ont traversé différentes étapes au cours des siècles, comme le montre la figure II.1

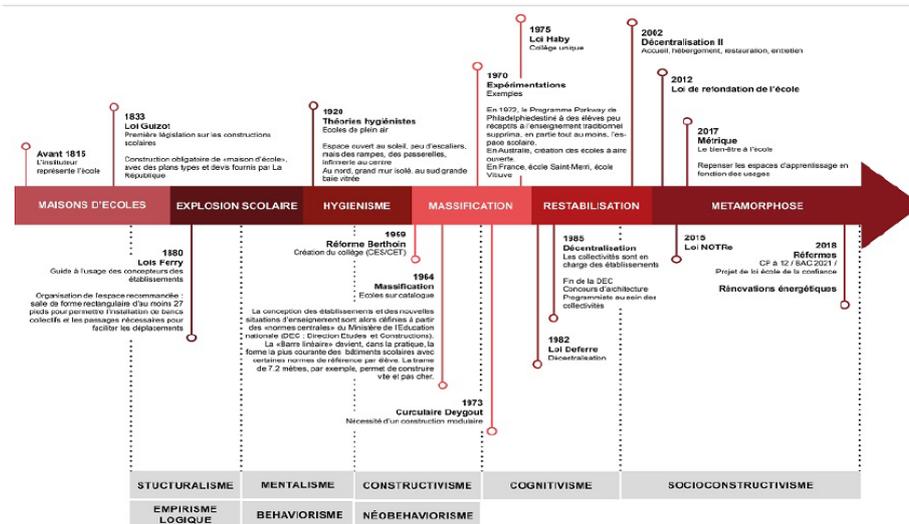


Figure II.1 : Frise chronologique de l'architecture scolaire en France (source : Barthelemy, 2019)

II.1.2.1. École du père Grégoire Girard :

Une des premières étapes pour la naissance des établissements scolaires, entre les années entre 1818 et 1823 le père Grégoire Girard a fait un exploit étonnant lorsqu'il a reçu l'autorisation de construire une école pour son éducation par la ville de Fribourg. Il a lui-même prévu une salle assez grande pour que tous les élèves puissent s'asseoir devant le tableau noir, avec des rangées de tables et beaucoup d'espace mobile pour l'enseignement comme présent la figure II.2. Après cette première expérience, la création d'un espace pour l'éducation des enfants remonte à 1877, lorsque l'Europe a promulgué une loi interdisant le travail des enfants. Les salles de classe de cette époque comportaient de grandes baies vitrées et des formes rectangulaires avec des tables en face du bureau de l'enseignant (Forster, 2004 ; Lakhdari, 2021).

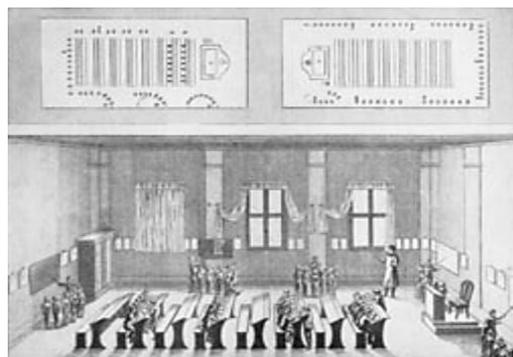


Figure II.2:L'école de père Grégoire Girard. Source :(Forster, 2004)

II.1.2.2. Les bâtiments scolaires à typologie 'Heimatstil' :

Le début du 19ème siècle et exactement l'année 1907 a marqué la naissance de la construction scolaire, où des écoles ont commencé à être construites dans les villes et villages et un langage architectural a commencé à être créé comme des temples, des églises, des prisons et des usines. Le « *Heimatstil* » qui est un style suisse est apparu à la fin du XIXe siècle et s'est répandu dans toute l'Europe (Delaune, 2003), ce style se caractérisait par ses toits à forte pente, ses cheminées, ses petites tourelles et ses pinacles comme présent la figure II.3. Les salles de classe étaient rectangulaires avec de grandes fenêtres organisées le long des couloirs (Forster, 2004).



Figure II.3 : Bâtiment scolaire à typologie Heimatstil. Source : (Foster S. et al., 2004).

II.1.2.3. École en barre :

Selon Lakhdari (2021), le style d'école en barre a gagné en popularité après le (CIAM) le congrès international d'architecture moderne qui a promu la simplicité de la forme et la fonctionnalité de l'architecture et de l'industrialisation. L'école Meerweinstraße à Hambourg, comme le montre la figure II.4, était un représentant de ce style conçu par l'architecte Fritz Schumacher. Cette typologie était caractérisée par un couloir central avec deux rangées des salles de classe séparées par un corridor central (Deleval, 2016 ; Lakhdari 2021).

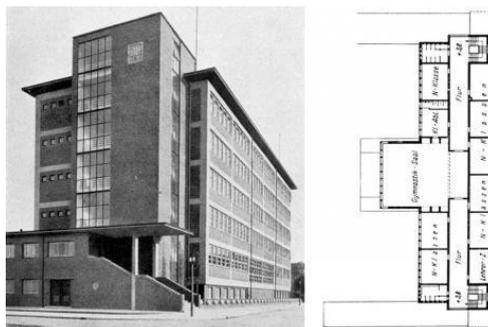


Figure II.4 : École Meerweinstraße à Hambourg. 1927-1930. Source : (Châtelet & Le Cœur, 2004)

II.1.2.4. Les écoles pavillonnaires :

Ce style est apparu dans les années 1950 qui ont marqué l'avènement de l'architecture moderne une architecture plus sobre et fonctionnelle, les bâtiments scolaires étaient conçus comme de longues barres d'acier et de verre, des cours de récréation en surplomb plantées de pelouses et ombragées, des compartiments scolaires avec des ailes, des portiques et des cours ouvertes. L'émergence des écoles pavillonnaires ou école de banlieue liée à l'Architecte français Tony Garnier qui s'inscrivait dans sa vision utopique où il envisageait une future ville industrielle avec de petites écoles parsemées d'espaces verts, dans le but de recréer une ambiance familiale propice au développement des enfants tout en offrant de bonnes conditions d'apprentissage et de sécurité (Deleval, 2016 ; Saddok, 2015).

II.1.2.5. Les écoles de plein air :

Le début du XXe siècle a marqué l'initiation du concept d'écoles et d'espaces d'apprentissage ouverts, en particulier par les pays industrialisés qui se consacraient à l'enseignement aux enfants atteints de tuberculose afin de créer une atmosphère stimulante, propice à la santé et à l'apprentissage (Berger, 2004). Dans les années 1920, c'est l'affaire des architectes où le design scolaire adapte ce modèle en associant l'air et la lumière pour améliorer le développement de l'enfant. Le modèle d'open-air se caractérisait par : un plan modulable en supprimant les cloisons non porteuses et en créant des espaces de travail communs, de vastes salles de travail regroupées autour d'un hall central ainsi que des tables pour le travail en groupe et des cloisons mobiles pour la flexibilité des espaces (Berger, 2004 ; Forster, 2004).

II.1.2.6. Les écoles à aires ouvertes :

À la fin des années 1960, la pédagogie a subi un changement majeur et une plus grande attention a été accordée à l'individualité des enfants. À la lumière de cette orientation, de nouvelles installations ont été construites. Les enfants ont ensuite été divisés en groupes d'âges et de capacités différentes, les enseignants travaillaient en équipe plutôt que seuls. Il a également été recommandé de créer des espaces partagés qui encouragent les enfants à interagir et à travailler ensemble. Généralement, ces écoles étaient constituées d'un espace central dans lequel étaient regroupées des zones de travail individuelles ou collectives. De plus, dans la salle de classe elle-même, il y avait de nombreux domaines où différentes activités pouvaient être menées. Le coin lecture ressemblait à un petit salon avec plein

d'oreillers. Les murs de la salle de classe étaient recouverts de dessins d'enfants, dans le but principal de faire en sorte que les enfants se sentent chez eux. En 1970, le bâtiment de l'école est intégré à l'espace de vie, reliant les mondes extérieur et intérieur, et sur ordre des autorités politiques, de nouvelles salles sont créées au sein de l'école, comprenant la bibliothèque, des ateliers, des toilettes et des salles de jeux et de sport. Cependant, ces innovations architecturales ont provoqué l'opposition des enseignants et des parents. Cela a conduit dans les années 1980 à un retour à la redistribution des salles au sein des écoles (Delaval, 2016 ; Lakhdari, 2021).

II.1.2.7. La préfabrication et standardisation du bâtiment scolaire :

Dans la seconde moitié du 20ème siècle et après la seconde guerre mondiale en conséquence, le besoin de nouveaux équipements s'est fait sentir pour faire face à l'augmentation de la population et au besoin de nouvelles infrastructures et établissements scolaires. Ainsi, trois mille cinquante collèges ont été construits entre 1966 et 1975, durant cette période, une grande phase d'industrialisation de l'architecture scolaire a commencé avec l'adaptation de constructions rapides et économiques. Dans la foulée, l'architecture de l'école a été normalisée et standardisée : le couloir était d'un module et la salle de classe était de quatre modules sur cinq, la hauteur sous plafond était de trois mètres. Le rythme des fenêtres était régulier, et le même schéma s'appliquait à la salle de classe. L'ère de l'architecture scolaire standardisée et industrialisée quelle qu'elle soit répond aux exigences de quantité, de légèreté, de rapidité et d'économie, elle présente des limitations sur le choix de la forme et de l'aspect architectural des bâtiments. (Berger, 2004 ; Tebbouche, 2010).

II.1.2.8. Les écoles modulables :

Dans l'architecture contemporaine des bâtiments scolaires, les caractéristiques essentielles des environnements d'apprentissage sont clairement définies et l'idée de flexibilité de l'espace revient avec un contexte différent compte tenu de la nouvelle évolution technologique et de son impact sur le processus éducatif. Les nouvelles pratiques pédagogiques nécessitent une grande flexibilité des espaces pour pouvoir passer du travail de groupe au travail individuel et doivent offrir une variété d'espaces adaptables et évolutifs (Saddok, 2015).

II.1.3. L'Evolution spatiale des bâtiments scolaires en Algérie :

Le bâtiment scolaire a changé au fil du temps avec l'impact des différentes conditions et événements, dans l'Algérie l'évènement le plus important et mémorable de l'histoire c'est la colonisation française qui impacte tous les couté de la vie et avec une période de 130 ans de colonisation a influencé le bâtiment scolaire comme un espace, trois périodes fondamentales ont donc marqué l'évolution de l'école algérienne la période précoloniale, la période coloniale et la post colonial.

II.1.3.1.la période précoloniale avant 1830 :

Avant la colonisation française et comme tout autre pays islamique, le système éducatif en Algérie était une éducation basée sur la religion et était réservé aux seuls garçons. D'après Tebbouche (2010) Dans la période pré colonial, le système éducatif algérien avait trois types d'espaces d'éducation correspondant aux trois niveaux d'enseignements prodigués durant cette période à savoir :

- **Des établissements pour l'enseignement primaire** se déroulait dans **les écoles coraniques** appelées '*Msids*', c'étaient de petites écoles fréquentées pour enseigner aux jeunes enfants âgés de six à dix ans la lecture et l'écriture et quelques versets du Coran.
- **Des établissements pour l'enseignement secondaire** s'effectuaient dans **les *Kuttab* ou les *zaouïas*** appelées aussi mosquées pour enseigner des enfants âgés de dix à quinze ans, ces écoles enseignaient le saint Coran et ses commentaires ainsi que la grammaire et l'arithmétique.
- **Des établissements pour l'enseignement supérieur** s'effectuaient dans les **Médersas**, dans ce type d'établissement l'étudiant reçoit une éducation plus approfondie dans différentes matières les sciences islamiques, les langues, la littérature, les maths, la physique, etc.

II.1.3.2.la période coloniale de 1830 à 1962 :

Cette période a été caractérisée par une dualité dans le système éducatif qui a été mis en place par l'administration coloniale l'un pour les Français et l'autre pour la population indigène ou musulmane locale, les deux se situant dans des espaces différents (Tebbouche, 2010 ; Saddok, 2016).

Ecoles primaires : dans les années 1850, les Français ont créé six écoles françaises musulmanes pour les garçons et trois écoles pour les filles, qui apprenaient à lire et à écrire en français et quelques mathématiques.

Ecoles secondaire : deux types de lycées ont été créés Les Medersas et les collèges musulmans français.

- a- Les Medersas : placées à proximité des mosquées, les programmes éducatifs étaient suivis pour développer la culture arabe et surtout la législation islamique afin de former des fonctionnaires pour l'administration civile.
- b- Les collèges musulmans français : dans ces établissements l'enseignement visait à atteindre les mêmes niveaux que les collèges français afin de permettre aux élèves de ces établissements de poursuivre leurs études dans les lycées.

Ces programmes et diplômes spécifiques, distincts de l'enseignement général dispensé aux enfants européens.

Entre 1931 et 1939, l'association Oulémas crée 260 médersas gratuites pour aider à la scolarisation des jeunes Algériens non scolarisés dans une école publique française (Tebbouche, 2010 ; Saddok, 2016).

II.1.3.3. La période postcoloniale (après 1962) :

Après l'indépendance, l'Algérie a fait face à la dure réalité du taux élevé d'analphabétisme causé par le colonisateur et sa politique, c'est pourquoi des réformes majeures ont été mises en œuvre par le gouvernement algérien pour accroître l'éducation, la période post-colonisation a été caractérisée par deux périodes de réforme :

La période 1 de 1962 à 1976 :

Cette époque a été marquée par différentes périodes, d'abord il a commencé avec l'ordonnance 76-35 du 16 avril 1976 qui introduit des changements radicaux dans l'organisation de l'enseignement, cette ordonnance a également prescrit l'enseignement obligatoire et l'enseignement gratuit.

La période 2 de 1976 à 2008 :

Cette période a été marquée par différentes étapes pour développer le système éducatif ; d'abord il a commencé avec l'ordonnance 76-35 du 16 avril 1976 qui introduit des changements radicaux dans l'organisation de l'enseignement cette ordonnance a également prescrit l'enseignement obligatoire et l'enseignement gratuit.

La période de 1980 à 1989 : l'objectif principal était d'accroître les capacités coïncide avec la phase d'expansion des capacités, de diversification des méthodes pédagogiques et de formation (Gustin S., 2008 ; Saddok, 2016).

La période de 1990 à 2008 : a été caractérisée par l'adoption de nouvelles réformes visant à doter le système national de formation des moyens nécessaires, et à s'adapter aux changements institutionnels, économiques et sociaux initiés dans le pays durant cette période (Gustin S., 2008 ; Saddok, 2016).

La période 3 de 2008 à nos jours :

Cette période la plus récente a été caractérisée par la mise en place des nouvelles stratégies pédagogiques pour améliorer les conditions scolaires et l'acceptabilité et les performances scolaires des élèves Cela peut se traduire par :

-L'extension des infrastructures scolaires, en 2009 a marqué l'accueil de 15 000 salles de classe, environ 1 100 nouveaux collèges, 500 lycées, 500 équipements sportifs, 1 800 cantines scolaires (Tebbouche H., 2010 ; Saddok, 2016).

-La rénovation et la réhabilitation des écoles anciennes et endommagées ;

-Le renouvellement du mobilier et des équipements scolaires ;

Cependant, durant cette période d'extension du système scolaire, l'aspect quantitatif a prévalu sur l'aspect qualitatif (Lakhdari, 2021).

II.2. L'Architecture des établissements scolaires :

Tout au long de l'histoire, les bâtiments ont reflété les différents enjeux sociaux actuels. Il en va de même pour l'architecture scolaire, qui était et est toujours le reflet des sociétés, cette sorte d'attention qui a été portée à ce type de construction vient de l'importance émergente des espaces éducatifs qui sont devenus au cours des derniers siècles une nécessité pour le développement sociétés. La notion d'architecture scolaire est apparue au début du XIXe siècle, avec l'avènement et l'apparition de guides scolaires faisant référence à la construction d'écoles, comme évoqué dans la partie précédente, le développement de l'architecture scolaire était et est toujours lié aux différents enjeux sociaux, politiques, les conditions économiques et même les facteurs environnementaux.

II.2.1. L'Architecture des établissements scolaires en Algérie :

Comme tout autre pays d'Algérie, l'architecture de l'école s'est développée au fil du temps et, comme mentionné précédemment, la construction de l'école a été influencée par

différents styles allant du concept d'espace ouvert, avec une influence religieuse à la colonisation lorsqu'elle est influencée par un nouveau style européen à la poste colonisation et l'émergence du besoin de nouvelle structure. Selon Saddok (2016) le ministère de l'éducation nationale a produit trois guides définissant les programmes et les normes à respecter dans la conception des établissements scolaires, et afin de mettre fin à la disparité de l'architecture des bâtiments scolaires dans les différentes régions du pays en établissant des typologies et des styles normalisés pour les constructions scolaires suivant les Document ministériel de 1982.

II.2.2. La programmation :

Le programme de bâtiment scolaire a pour objectif principal de retranscrire les besoins de ce type de fonction de bâtiments et de ses utilisateurs pour la réalisation des différentes activités pédagogiques. Le processus de programmation de la construction scolaire est très important et complexe en raison de la nécessité de trouver un équilibre entre les exigences pédagogiques à partir de surfaces, de volumes, etc. suffisants et le coût total. Selon Tebbouche (2010), ces programmes dépendent des élèves et du type de la formation. Outre la détermination du nombre, de la nature et des surfaces des différents locaux à aménager, ils doivent également décrire en détail les exigences d'esthétique, de confort, d'intégration à l'environnement extérieur et de sécurité. La taille et les programmes techniques de ces établissements sont principalement déterminés par les critères suivants :

La population : l'âge des élèves dans la zone considérée ;

Le curriculum à l'école ;

La structure pédagogique de l'établissement ;

Les taux d'occupation de l'immeuble (La salle de classe a servi de référence pour déterminer la nature et la taille des autres composantes de l'établissement).

La capacité d'accueil de l'établissement sert généralement à calculer les surfaces, il faut donc prévoir :(Pour une utilisation en classe : 1,40 à 1,50 m² d'espace utilisable par élève (suffisamment d'espace pour 40 élèves par classe). Chaque étudiant reçoit 4 à 6 m³ de volume, pour les lieux de loisirs : 3 à 5 m² à usage sanitaire par élève, 1 WC pour 20 filles, et 1 WC pour + 1 WC pour quarante garçons).

II.2.3. La conception des bâtiments scolaires :

La conception architecturale des établissements d'enseignement vise à répondre favorablement aux besoins éducatifs nombreux et changeants par les propositions des espaces pédagogiques adaptables, confortables et respectueux de l'environnement, à la lumière de

cela, le ministère de l'éducation nationale algérien donne les recommandations et guides suivants aux intervenants dans la conception des établissements scolaires :

II.2. 3.1. L'implantation :

Le guide du ministère de l'éducation nationale (1982) avait recommandé plusieurs critères d'implantation à respecter dans l'implantation des bâtiments scolaire :

- Les bâtiments construits au centre de la zone la plus peuplée.
- L'emplacement doit être constructible, libre de mitoyens et de servitudes.
- La construction doit être éloignée des routes très fréquentées, des sources de pollution et de bruit.

II.2. 3.2. La flexibilité :

Selon Saddok (2016) la flexibilité architecturale du bâtiment scolaire vise à le rendre évolutif, il y a trois domaines dans lesquels la flexibilité est recherchée :

1-L'extension et l'ajout : Lors de la phase d'esquisse, l'architecte doit prévoir une extension couvrante 20 à 30% de la surface du programme et réserver le terrain nécessaire.

2-Polyvalence : l'aménagement du bâtiment doit permettre d'accueillir une variété d'activités sans nécessiter de changements de construction.

3-Reconversion : les transformations intérieures (telles que la construction ou la suppression de cloisons) ne doivent pas compromettre l'intégrité structurelle du bâtiment.

II.2. 3.3. L'orientation :

L'orientation du bâtiment est un facteur très important à prendre en compte dans la phase initiale de la conception du bâtiment, car c'est un facteur majeur dans la détermination de l'interaction des bâtiments avec leur environnement.

L'orientation du bâtiment doit tenir compte de tous les facteurs environnementaux :

Les niveaux de rayonnement et les effets de l'ensoleillement :

Les vents dominants, leur fréquence et leur force, et la disposition de la ventilation naturelle ;

La topographie du terrain ;

L'élévation et l'altitude ;

Selon Saddok (2016), les installations et les espaces d'enseignement seront généralement orientées nord-sud, pendant la saison chaude, cette disposition permet de réduire les effets du soleil. D'autres orientations, du sud-est au sud, peuvent, le cas échéant, être acceptées si des

brise-soleils mobiles et une ventilation efficace sont prévus, compte tenu des considérations précitées.

Tebbouche (2010) a des autres recommandations qui peuvent être résumées comme

- Economique : (éviter l'organisation dispersée des bâtiments scolaires) ;
- Limitation de la hauteur des bâtiments à 3 niveaux au maximum (R+2) ;
- La surface des circulations intérieures ne devra, en aucun cas, excéder 20% de la surface totale construite.

II.2.4. La gestion et l'exploitation :

La gestion et l'exploitation sont des étapes très importantes dans chaque cycle de vie des bâtiments, pour la gestion de l'établissement scolaire en Algérie, l'enseignement fondamental et secondaire est placé sous la tutelle du ministère de l'éducation nationale, et l'apprentissage sous celle du ministère de la formation professionnelle. Tandis qu'au niveau local, les directions de l'éducation sont chargées de la gestion administrative et pédagogique, des programmes d'enseignement et du suivi de tous les établissements scolaires, ainsi que de la mise en œuvre et sont supervisées par les directions de l'éducation et de la formation professionnelle. Différents arrêtés numérotés ont traité de la gestion des bâtiments scolaires dans d'autres cas que les heures d'enseignement, l'article n°03 suggère que les écoles puissent accueillir, en dehors des heures de classe, des activités liées à l'éducation et à la promotion de la jeunesse et à la formation des travailleurs. Tandis que l'article n°05 du même décret qui porte sur la protection et l'utilisation des établissements d'enseignement, lorsqu'en cas de force majeure et pour une durée maximale de huit jours, les sinistrés ou les victimes de catastrophes naturelles s'adressent aux établissements d'enseignement et de formation pour se loger (Tebbouche, 2010). Pour l'exploitation et l'entretien des établissements scolaires, le gouvernement algérien a créé un programme de financement spécialement pour l'entretien des écoles dégradées, où 14,5 milliards de dinars ont été accordés pour les opérations d'entretien des établissements scolaires dans le cadre de la loi de finances 2008, dont 4 milliards pour le cycle primaire, 3,17 milliards pour le cycle moyen, et 7,33 milliards pour le secondaire, dont 4,50 milliards pour la réhabilitation des anciens lycées (B. Fatma-Zohra, 2008 tel que cité dans Tebbouche, 2010).

II.2.5. Les typologies des établissements scolaires :

En architecture, le terme typologie fait référence à la classification des types spatiaux, des modèles, des prototypes ou des formes architecturales primaires (Saddok, 2016).

Le large éventail de bâtiments scolaires construits au cours des dernières décennies montre comment les modèles morphologiques et spatiaux sont utilisés. Certains bâtiments scolaires sont construits avec des types traditionnels, tandis que d'autres sont différents. Les caractéristiques spécifiques de l'école, ainsi que le niveau d'enseignement et le nombre d'élèves, influenceront le choix d'un type particulier. Cependant, cela dépendra également de la philosophie pédagogique de l'école, du climat et de l'emplacement de la région (urbaine, suburbaine ou rurale). En particulier, la disposition spatiale du bâtiment est souvent fortement influencée par le type pédagogique, qui englobe diverses modalités d'apprentissage. Par exemple, les concepts d'espaces desservis et d'espaces de serviteurs devraient être soigneusement pris en compte lors du choix de salles de classe ouvertes flexibles par rapport à la disposition conventionnelle de type cellule. De plus, afin d'accueillir des activités d'apprentissage, les espaces de circulation doivent être réfléchis et élargis en raison de la demande croissante d'espaces de pause et de travail collaboratif. Cependant, comme les directeurs d'école changent fréquemment, du moins en Italie, la décision de concevoir un bâtiment scolaire selon un style pédagogique peut être très risquée. Par conséquent, il apparaît que l'établissement de lignes directrices identifiant des critères de conception et didactiques serait une stratégie efficace (Rigolon, 2010). On peut donc classer les typologies d'établissement scolaire en fonction de deux facteurs l'aspect pédagogique et leur configuration spatiale.

II.2.5.1. Selon l'aspect pédagogique :

Basé sur le volet pédagogique et conformément à l'article n°81 de la loi d'orientation de l'éducation nationale algérienne, l'enseignement est dispensé dans les établissements publics d'instruction et d'enseignement comme : école préparatoire ; École primaire ; École intermédiaire ; et secondaire (les lycées).

Pour les premiers et deuxièmes cycles (écoles préparatoires et primaires) la typologie suivante a été adoptée :

- Ecole fondamentale de type A avec 03 salles de classe pour une capacité de 120 élèves ;
- Ecole fondamentale de type B avec 06 salles de classe pour une capacité de 240 élèves ;
- Ecole fondamentale de type C avec 09 salles de classe pour une capacité de 360 élèves ;
- Ecole fondamentale de type D avec 12 salles de classe pour une capacité de 480 élèves.

Pour les écoles fondamentales du troisième cycle e (collèges), ces établissements sont classés en cinq catégories

- École fondamentale Base 03, pour une capacité de 360 élèves ;

- -École fondamentale Base 04, pour une capacité de 480 élèves ;
- -École fondamentale Base 05, pour une capacité de 660 élèves ;
- -École fondamentale Base 06, pour une capacité de 720 élèves ;
- -École fondamentale Base 07, pour une capacité de 840 élèves.

Pour l'enseignement secondaire, il est dispensé dans trois types d'établissements :

- -Lycées d'enseignement général ;
- -Lycées d'enseignement technique (technicums) ;
- -Lycées polyvalents (enseignement général et technologique).

Ils sont classés en 03 catégories selon leurs capacités d'accueil, à savoir : 800, 1000 et 1300 places pédagogiques (Tebbouche, 2010).

II.2.5.2. Selon la configuration spatiale :

Comme il a été mentionné précédemment, la typologie architecturale des bâtiments scolaires est basée sur une classification basée sur plusieurs niveaux, cette partie porte sur le classement des bâtiments scolaires selon le critère de la configuration spatiale du plan, ce qui indique le mode de composition, l'organisation des salles de classe entre elles, et la forme générale qui fait ressortir cette composition (Saddok, 2016).

II.2.5.2.1. Les bâtiments scolaires en Europe :

La configuration spatiale des bâtiments scolaires est définie sur la base d'une analyse morphologique de l'organisation spatiale, comme cela a été cité dans Saddok (2016) en Europe et sur la base de l'analyse spatiale morphologique, Riglion (2010) a identifié quatre types de configurations de bâtiments scolaires :

- *Type Cour* : Dans cette typologie, les bâtiments sont disposés autour d'une cour centrale avec des blocs prenant une disposition linéaire avec des couloirs qui mènent aux salles de classe, sous ce type, on peut trouver des sous-types : -Cour fermée, Cour ouvert L ou U et Cour a espace multiple avec une combinaison des deux type L et U comme montre la figure II.5.

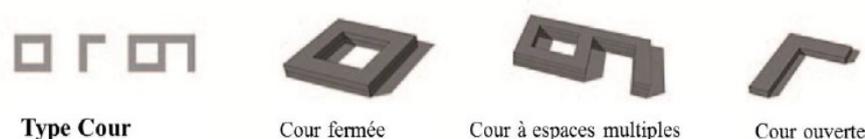


Figure II.5 : La typologie de bâtiment a cour. Source :(Riglion 2010)

- *Type Bloc* : Cette typologie se caractérise par un volume compact et un aménagement intérieur facile avec un seul grand espace commun polyvalent menant directement aux principaux espaces d'apprentissage (salles de classe, ateliers, laboratoires). L'espace commun peut prendre la forme d'atrium collectif ou de galeries pédagogiques comme la montre la figure II.6.

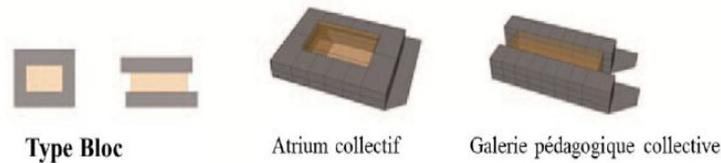


Figure II.6 : La typologie de bâtiment type bloc. Source :(Riglion 2010)

- *Type Grappe* : Ce type se caractérise par la fragmentation des volumes qui peuvent représenté des unités pédagogiques indépendantes comme la montre la figure II.7.



Figure II.7 : La typologie de bâtiment type Grappe. Source :(Riglion 2010)

- *Type Ville* : Ce type est caractérisé par la multiplicité des espaces et des fonctions qui est la raison du nom de « ville ». Doté d'une hiérarchie, l'espace public est entouré d'espaces communs comme la bibliothèque et l'auditorium dont les rues donnent accès à des espaces de plus en plus privés comme le montre la figure II.8.



Figure II.8 : La typologie de bâtiment type ville. Source :(Riglion 2010)

II.2.5.2.2. Les bâtiments scolaires au Royaume-Uni :

Selon Saddok (2016), les bâtiments scolaires au Royaume-Uni ont six types de plans répétés qui ont été identifiés par les bâtiments scolaires et l'unité de conception (SBDU, 2002) :

1) **Plan des rues** : Cette typologie est structurée par un maillage de couloirs principaux et secondaires, assurant une meilleure circulation et communication entre les différentes salles de classe.

2) **Plan du campus** : Dans cette typologie, l'école est considérée comme différents blocs divisés en groupes.

3) **Plan de pavillons reliés** : Les bâtiments de cette typologie consistent en une série de blocs similaires reliés les uns aux autres et disposés autour d'un espace central, généralement de double hauteur.

4) **Plan pavillonnaire** : cette typologie se caractérise par un plan compact, avec des espaces de circulation linéaires centraux et des espaces pédagogiques des deux côtés.

5) **Plan linéaire** : dans cette typologie, les salles de classe sont organisées le long d'un espace circulaire linéaire, et placées sur des côtés opposés.

6) **Plan en profondeur** : les salles de classe sont organisées linéairement de part et d'autre d'un espace central polyvalent (circulation, bibliothèque, etc.).

La figure II.9 illustre les différentes typologies des bâtiments scolaires au Royaume-Uni.

Source : (SBDU, 2002).

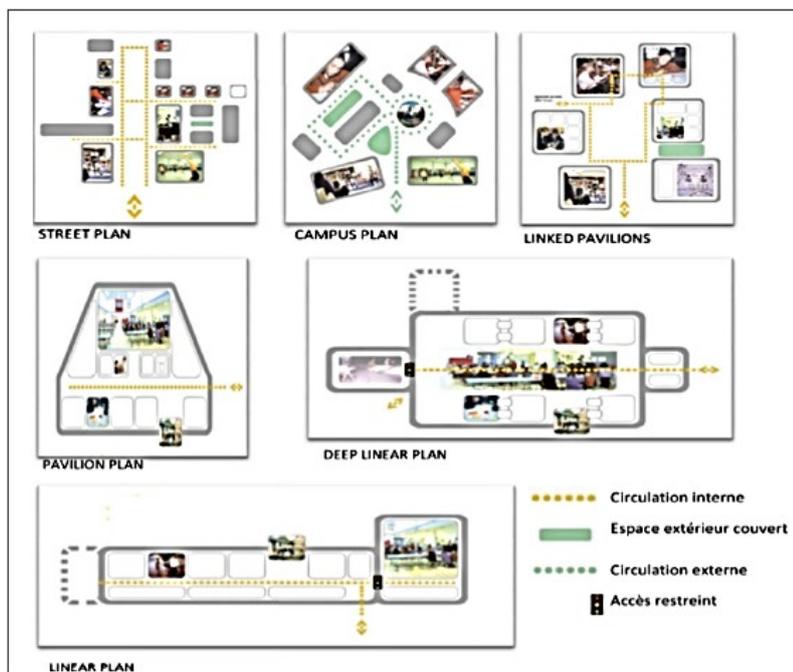


Figure II.9 : Les différentes typologies des bâtiments scolaires au Royaume-Uni. Source :

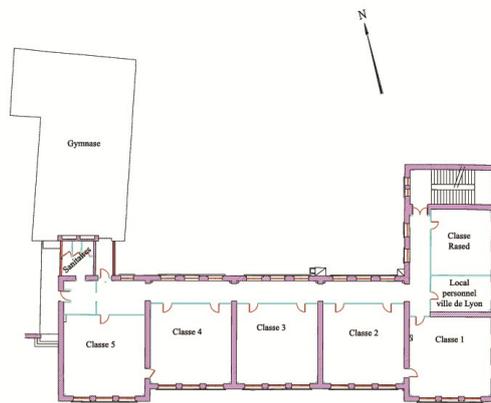
(SBDU, 2002)

II.2.5.2.3. Typologies du bâtiment scolaire en Algérie :

Selon (Tabbouche, 2010 ; Saddok, 2016 ; Lakhdari,2021) les typologies des bâtiments scolaires en Algérie se rapproche de trois typologies spatiales distinctes :

-Typologie de plan à coursive (simple distribution) :

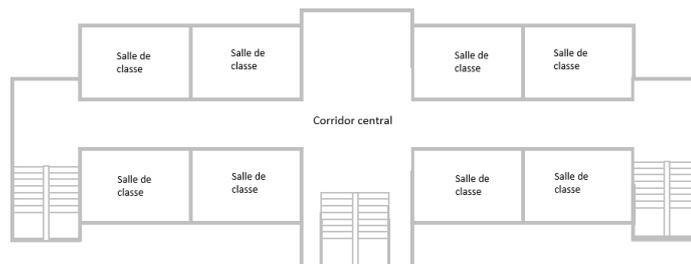
Cette typologie est la plus répandue dans les constructions d'établissement scolaires en Algérie, c'est la configuration la plus courante, surtout dans les écoles primaires. Ce type se caractérise par une longue galerie distribuant selon un seul côté des salles de classe (distribution unilatérale) par des coursives, les forme sont généralement rectangulaire et bénéficient d'une double orientation. La figure II.10 présente un exemple de ce type de configuration spatiale.



La figure II.10 : exemple de la typologie de plan à coursive.

- Typologie à corridor central (double distribution) :

Cette configuration se caractérise par une distribution bilatérale avec un couloir linéaire central qui mène aux salles de classe des deux côtés. La figure II.11 présente un exemple de ce type de configuration spatiale.

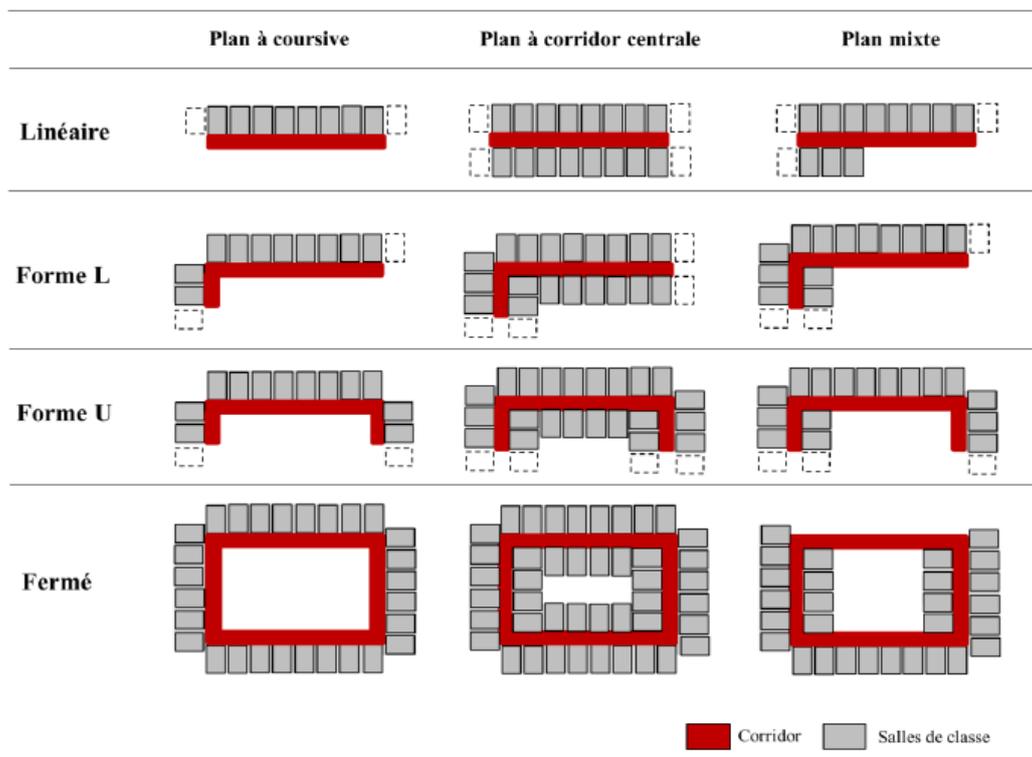


La figure II.11 : exemple de la typologie de plan à coursive. Source : (Tebbouche, 2010 adaptés par l'auteur)

-Typologie Mixte :

Le type mixte combine les deux typologies le plan à coursive et le corridor central, dans ce type les blocs pédagogiques se retrouvent sous différentes formes : fermées, en forme de L, H, U ou fermées.

La figure II.12 illustre les différentes typologies de bâtiments scolaires en fonction du type de plan et de la forme du bâtiment.



Figures II.12 : Les différentes typologies et configuration spatiale des bâtiments scolaires in Algérie. Source : (Lakhdari, 2021)

II.2.6. Les salles de classe :

Selon Labrèche (2014), les salles de classe sont le lieu où se déroule le processus éducatif, elles sont considérées comme le cœur des installations éducatives, où les élèves passent la plupart de leur temps à l'intérieur, par conséquent, cela nécessite une attention particulière, en raison de l'importance des écoles et de la conception des salles de classe sur le développement des individus, la salle de classe ne doit pas être considérée comme un espace rectangulaire avec du mobilier scolaire, mais plutôt comme une interaction de divers facteurs d'ambiance. Le plan carré, ou toute autre forme qui s'en rapproche, est la forme la plus rationnelle pour une salle de classe. Sa taille est déterminée par le nombre d'élèves, leur capacité à voir et à entendre le professeur, les méthodes pédagogiques utilisées, la matière et les dimensions horizontales du mobilier. La salle de classe est généralement

aménagée selon une disposition standard dans laquelle les tables sont disposées en colonnes. La santé, le confort et le bien-être des élèves et des enseignants sont affectés par l'environnement de la classe, qui peut encourager ou décourager leurs activités. Il remplit sa fonction et améliore les performances d'étude lorsqu'il est soigneusement étudié et conçu.

Selon Saddok (2016) le ministère algérien de l'Éducation nationale et leur guide émis en 1971 et 1982 ont fixé la conception des salles de classe qui doit suivre certaines règles à savoir :

Les salles de classe avec des formes rectangulaires.

- La surface de la salle de classe est comprise entre 60 m² à 62 m² avec une surface et pas plus de moins de 56 m².
- La hauteur est d'au moins 3m et pas plus de 3,50m.
- La surface d'occupation par élève est fixée de 1,40 m² à 1,50 m² (avec une capacité de 40 élèves/classe).
- Le volume d'air nécessaire est de 4 à 6 m³ par élève.
- La surface des aires de loisirs est de 3 à 5 m² par élève.
- Les espaces sanitaires humides : 1 w.c pour 20 filles et 1 w.c. + 1 urinoir pour 40 garçons.
- Les portes : l'entrée de la salle de classe doit être de préférence côté tableau noir, la porte doit être pleine à un seul vantail (2mx 0,9m), ouvrant vers l'extérieur.
- Les fenêtres : afin de concilier contraintes climatiques et besoins d'éclairage, la surface vitrée variera selon les régions de 10 à 15% du sol.
- Toutes les fenêtres seront ouvrantes. L'éclairage unilatéral ne peut être accepté que si la classe ne dépasser 7,20 m de profondeur.
- L'éclairage bilatéral est recommandé, il offre un meilleur éclairage, une bonne répartition de la lumière et une ventilation transversale efficace.

La figure II.13 présente l'aménagement et dimensions recommandées par Ministère de l'éducation nationale pour une salle de classe ordinaire.

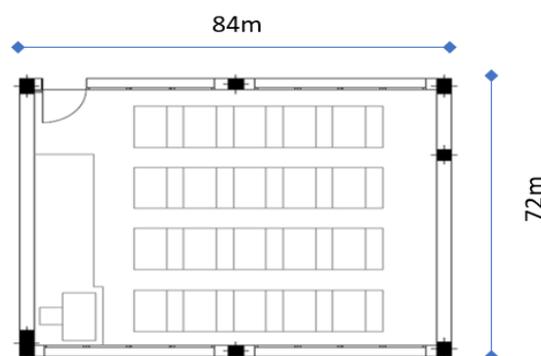


Figure II.13 : L'aménagement et dimensions recommandées pour une salle de classe ordinaire.

Source:(Ministère de l'éducation nationale, 1971 ; Saddok,2016 adaptés par l'auteur)

Conclusion

Ce chapitre présente un aperçu de l'évolution des établissements scolaires et de leurs concepts architecturaux, qui a conclu que l'architecture des écoles était le produit de différents contextes historiques, politiques, économiques et environnementaux qui ont influencé la conception et le concept de ces établissements. Ce type de bâtiment était et est toujours caractérisé par son importance dans le développement des sociétés. Les concepts de l'établissement scolaire se sont développés au fil du temps avec l'émergence de nouveaux styles et matériaux.

Dans ce chapitre, différentes typologies ont été introduites au niveau national et international. En Algérie, en raison de la croissance démographique du pays et de la politique générale d'enseignement gratuit et obligatoire, la construction de bâtiments scolaires a été nécessaire pour répondre à une demande importante. Les politiques de construction de bâtiments qui ont guidé la construction d'établissements scolaires reposaient sur une démarche quantitative qui visait à construire le plus grand nombre possible de bâtiments pour faire face à l'explosion démographique, surtout après l'indépendance. Cependant, les modèles proposés sont complètement dénués de considérations qualitatives et ne sont régis que par des soucis d'efficacité et de rapidité d'exécution.

De nos jours, et avec l'émergence de la crise environnementale et économique mondiale, l'aspect qualitatif est devenu un élément important dans la conception des bâtiments afin de faire face à ces conditions, en particulier dans les bâtiments scolaires qui représentent une grande partie du secteur de la construction tertiaire. , et caractérisé par l'utilisation quotidienne fréquente, le taux d'occupation élevé et les fragilités des usagers.

La pandémie mondiale la plus ressentie de Covid-19 où les écoles ont continué à fermer et à rouvrir par mesure de précaution contre cette crise sanitaire mondiale qui a révélé la fragilité de ce type de construction et l'échec du programme actuel à fournir un environnement intérieur sain

Par conséquent, un nouveau programme doit être développé pour guider le concept des établissements scolaires et spatialement en Algérie où la construction a été construite et suit toujours les mêmes typologies et aspects de conception indépendamment de la crise énergétique et environnementale mondiale.

CHAPITRE III :

**L'enveloppe du bâtiment entre un élément
de conception architectural et régulation
thermique dans un climat chaud et aride**

CHAPITRE III : L'enveloppe du bâtiment entre un élément de conception architectural et régulation thermique dans un climat chaud et aride

“The envelope of a building is like the skin on our bodies, is called upon to perform a multitude of simultaneous functions in a relatively thin dimension. These functions can be energy-related or non-energy related to present an aesthetic position.”

(Prowler. D et Kelbaugh .D,1990)

Introduction

Dans un bâtiment, l'enveloppe est considérée comme la peau qui recouvre et sépare l'extérieur des organes intérieurs. Au fil du temps, le rôle de l'enveloppe a changé et évolué. Dans le passé, le rôle principal de l'enveloppe était cependant de protéger et d'agir comme bouclier de défense, avec le temps et la révolution industrielle et le développement technologique ; son rôle s'est élargi pour devenir davantage un moyen d'atteindre le confort des usagers et une vue vers l'extérieur, aussi un rôle esthétique qui donne au bâtiment une identité et un style.

Ce chapitre traite des deux principaux rôles de l'enveloppe du bâtiment; comme moyen d'expression architecturale de l'architecte, également en tant que régulateur thermique et le compartiment de ses composants principaux aux facteurs environnementaux tels que la chaleur, la lumière, le son etc. aussi, il discute de l'évolution de ce concept au fil du temps et du développement de nouvelles techniques et matériaux, et de la façon dont l'enveloppe du bâtiment contrôle le facteur climatique dans un contexte climatique chaud et sec.

III.1. L'enveloppe comme un élément de conception architectural :

L'enveloppe du bâtiment est l'assemblage de différents composants de construction à partir de surfaces verticales et horizontales qui séparent l'intérieur de l'extérieur et protègent des facteurs environnementaux extérieurs difficiles.

L'enveloppe du bâtiment a toujours été représentative de l'identité du bâtiment et du style architectural puisqu'elle reflétait le style et les tendances de l'architecte, la région et l'époque.

L'enveloppe du bâtiment a été définie dans toute la littérature comme une couche de protection entre les espaces intérieurs et extérieurs, Cependant, une définition exacte de l'enveloppe du bâtiment était difficile à établir puisque chaque domaine l'a défini avec ses propres termes, donc Selon Latreche (2019) définition différente peut être établie à savoir :

- Pour les thermiciens est une zone de transition d'ambiances
- Pour les architectes est un représentant du style de l'architecte est le visage de la peau du bâtiment et la surface de contact entre un bâtiment et l'environnement urbain.
- Pour les ingénieurs, c'est un point de liaison entre les systèmes actifs et passifs.
- Pour les occupants, ce sont les limites et l'environnement intérieur qui le protègent et le cachent des éléments extérieurs.

III.1.1. Le développement de la notion d'enveloppe architectural :

La notion de concept d'enveloppe s'est développée au fil du temps. L'être humain et par son instinct et sa nature biologique a toujours été à la recherche d'un abri à des fins de protection et de confort, se créant dans le ventre de sa mère, une enveloppe naturelle et sûre qui est la première forme primitive de l'enveloppe pour l'être humain.

La deuxième forme d'enveloppe est un abri trouvé que l'être humain n'a pas construit, mais a découvert et s'est approprié comme des grottes. L'habitat troglodytique représente la prochaine forme d'enveloppe du bâtiment qui utilise l'élément naturel lui-même comme enveloppe, avec le temps, le concept et la fonction de l'enveloppe se sont développés en accélérant différents éléments et styles. La figure III.1 présente le développement du concept d'enveloppe.

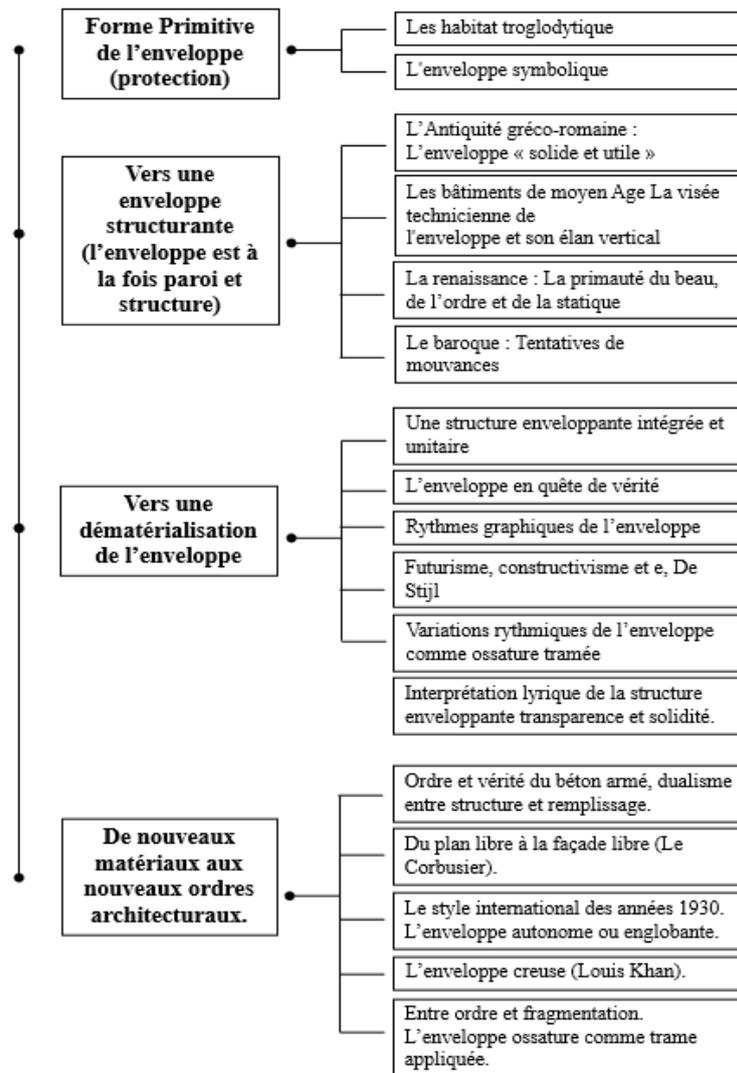


Figure III.1 : présente le développement du concept d'enveloppe. Source : (Emilie, 2009 adaptés par l'auteur)

III.1.2. Les types et classification de l'enveloppe architecturale

L'enveloppe du bâtiment peut prendre de nombreuses typologies dans les bâtiments en fonction de sa composante, de son rôle, de sa dimension, etc. Elle peut également être classée en fonction de différents critères tels que les matériaux, les typologies, et leur fonctions.

III.1.2.1. Les types de l'enveloppe architecturale

L'enveloppe du bâtiment peut prendre différentes typologies selon le rôle et la matérialité selon Bernstein (1997) l'enveloppe du bâtiment peut prendre deux types distincts :

a) L'enveloppe porteuse :

Ce type, comme son nom l'indique, est une coque porteuse qui supporte le plancher et la charpente et est généralement en béton armé très épais. La figure III.2 présente un exemple d'enveloppe porteur.



Figure III.2 : Exemple d'une enveloppe porteur. Source : (L'auteur)

b) L'enveloppe non-porteuse :

Ce type est l'opposé de l'enveloppe porteuse, il ne joue pas de rôle dans le support des charges et la stabilité de la construction sous ce type deux sous-types peuvent être distingués : l'enveloppe légère et l'enveloppe maçonnée (<15cm d'épaisseur). La figure III.3 présente des exemples d'enveloppe non-porteuse et légère.



Figure III.3 : Exemple d'une enveloppe non-porteuse. Source : (L'auteur)

III.1.2.2. Les classifications de l'enveloppe architecturale :

L'enveloppe du bâtiment peut prendre de nombreuses formes et jouer diverses fonctions dans les bâtiments. Par conséquent, de nombreuses classifications peuvent être distinguées

pour l'enveloppe du bâtiment en fonction de cette multitude d'éléments de formes, de matériaux, des fonctions, etc.

III.1.2.2.1. Selon le principe d'opération :

En fonction du mode d'opération de l'enveloppe du bâtiment, deux types peuvent être distingués :

a) L'enveloppe simple :

Est une simple barrière contre les éléments environnementaux extérieurs, elle est utilisée pour clôturer un espace et principalement à des fins de protection, elle peut être caractérisée comme une simple façade ou toute surface sans ouvertures.

b) L'enveloppe ventilée :

Contrairement à l'enveloppe simple l'enveloppe ventilée de son nom, ce type acquiert des ouvertures qui permettent la circulation de l'air et évitent la surchauffe et/ou la condensation du mur et de la couche isolante grâce à la ventilation où l'air circulant entre l'isolant et le revêtement différent de l'enveloppe. La figure III.4 montre une enveloppe (façade) simple et ventilée.



Figure III.4 : Exemple d'enveloppe simple et ventilée (façade). Source : (l'auteur)

III.1.2.2.2. Selon les fonctions :

L'enveloppe des bâtiments et en étant le visage et la peau du bâtiment, elle avait une double fonction qui peut être distinguée comme suit :

a) Enveloppe décorative et esthétique :

Les enveloppes décoratives ont un rôle ornemental qui s'est manifesté tout au long des différentes décennies où l'enveloppe du bâtiment était une représentation du style et des tendances des architectes.

b) Enveloppe active (ingénieuse) :

La signification de l'enveloppe active est qu'elle joue un rôle de dispositif actif dans le bâtiment passivement en contribuant à un rôle majeur dans la réalisation du confort ; thermique, visuel, acoustique, etc. et dans un but d'économie d'énergie, on peut distinguer de nombreux types et exemples d'enveloppe active à savoir :

○ **Le mur capteur :**

Selon Liebard et De Herde (2005), les murs capteur captent l'énergie solaire, la stockent en masse, l'atténuent et la restituent dans l'atmosphère sous forme de chaleur, à l'intérieur après plusieurs heures de déphasage. La paroi du collecteur est en verre à haute émissivité devant une paroi à haute inertie thermique. Le rayonnement solaire arrive et chauffe la lame d'air entre le vitrage et le mur. Cette chaleur est redistribuée à l'intérieur avec un certain déphasage. L'énergie solaire transmise à travers le verre et absorbée par la paroi chauffe la surface extérieure de la paroi du capteur. La chaleur est ensuite transférée vers l'intérieur par conduction de masse de la paroi.

Les performances du mur du capteur varient en fonction de la latitude du site, de l'emplacement, de l'orientation et de la pente du mur. La meilleure orientation est toujours le sud. Plus la pente est proche de la verticale, plus la latitude est grande. Le site ne doit pas avoir d'effets de masquage significatifs. La performance du mur capteur dépend également du type de vitrage et d'absorbeur utilisé (le coefficient d'absorption sera proche de 1). La figure III.5 présente une illustration et les composants des murs capture.

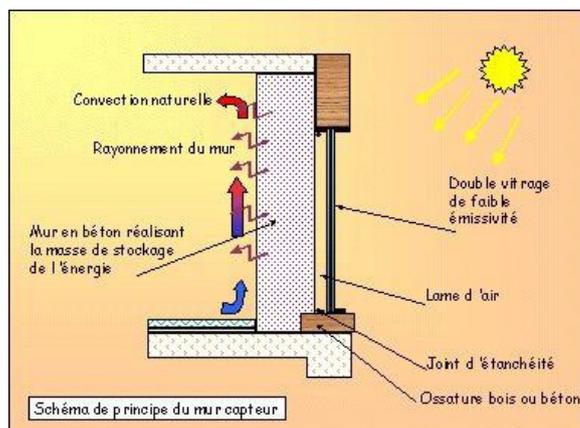


Figure III.5 : Le mur capteur et leurs composants. Source : (<https://www.cobse.fr/>)

○ **Le mur trombe :**

Le mur Trombe est basé sur le même phénomène physique que le mur de captation mais possède également des volets situés en haut et en bas du mur permettant la circulation de l'air pour éviter de les surchauffer en été. La figure III.6 présente le principe de mur trombe.

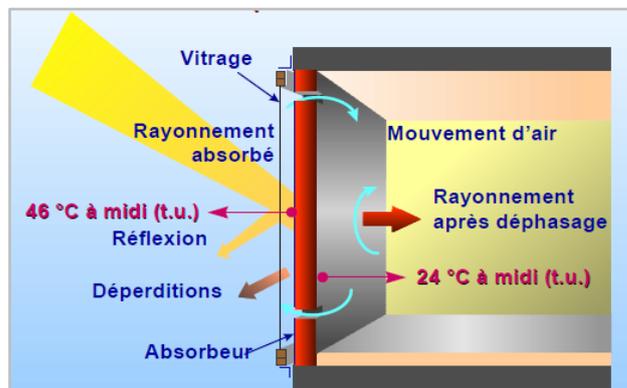


Figure 3.6 : Le principe de mur trombe. Source : (Liebard et De Herde ,2005)

○ **Les serres et vérandas :**

Selon Liebard et De Herde (2005), le principe de la véranda ou serre bioclimatique est similaire à celui des troncs de murs, à la seule différence que la lame d'air se transforme en espace de vie, ce sont des espaces tampons qui favorisent la captation du rayonnement solaire. Ce rayonnement est transformé en chaleur par l'effet de serre et se retrouve piégé dans l'espace tampon. La Figure III.7 illustre le fonctionnement des serres et vérandas en hiver et en été.

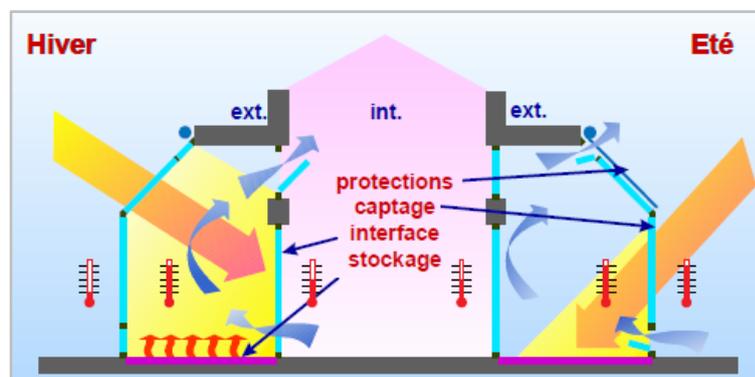


Figure III.7 : Le principe de fonctionnement des serres et vérandas en hiver et en été.

Source : (Liebard et De Herde ,2005)

III.1.2.2.3. Selon les matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans l'enveloppe du bâtiment ont changé et se sont développés au fil du temps, avec le développement technologique et la découverte constante de nouveaux matériaux, l'enveloppe du bâtiment est passée de l'utilisation de matériaux lourds tels que la

terre, les pierres, les briques et le béton à de nouveaux matériaux légers et plus transparents tels que : le verre, plastique et textile. Donc On distingue plusieurs types :

- L'enveloppe de pierre ;
- L'enveloppe de briques ;
- L'enveloppe en béton armé ;
- L'enveloppe du carter métallique ;
- L'enveloppe de verre ;
- L'enveloppe plastique ;
- L'enveloppe végétale ;
- L'enveloppe textile ;
- L'enveloppe mixte ;
- L'enveloppe Matériaux à changement de phase.

III.1.2.2.4. Selon les composants :

L'enveloppe du bâtiment peut être composée d'un seul et simple matériau ou couche ou d'un multi-composant et multicouches et matériaux donc On distingue deux enveloppes selon les composants :

a) L'enveloppe monocouche :

L'enveloppe est composée d'une seule couche (Peau) ordinairement étanche.

b) L'enveloppe multicouche :

L'enveloppe est constituée de plusieurs couches (Peaux), un ordinairement étanche et une autre extérieure ventilée. Concernant la façade double peau.

La figure III.8 présente des exemples d'une enveloppe monocouche et multicouche.

□



Figure III.8 : des exemples d'une enveloppe monocouche et multicouche. Source : (l'auteur)

III.1.2.2.5. Selon la forme :

Selon Khadraoui (2019), l'enveloppe du bâtiment peut prendre plusieurs formes, les murs de la façade en tant que principal représentant de l'enveloppe du bâtiment prend quatre formes principales :

- **Une forme géométrique droite :**

Ce type présente comme une projection verticale, du plan, une forme et des formes droites purement géométriques, comme présente la figure 3.9 (a).

- **Une forme inclinée :**

Ce type est caractérisé par des formes non verticales inclinées, comme présente la figure 3.9 (b).

- **Une forme organique (courbée) :**

Une enveloppe fluide et dynamique caractérisée par des courbes en l'absence des lignes droites, comme présente-la figure III.9 (c).

- **Une forme mixte :**

Un mélange entre la géométrie et les formes organiques, comme présente la figure 3.9 (d).

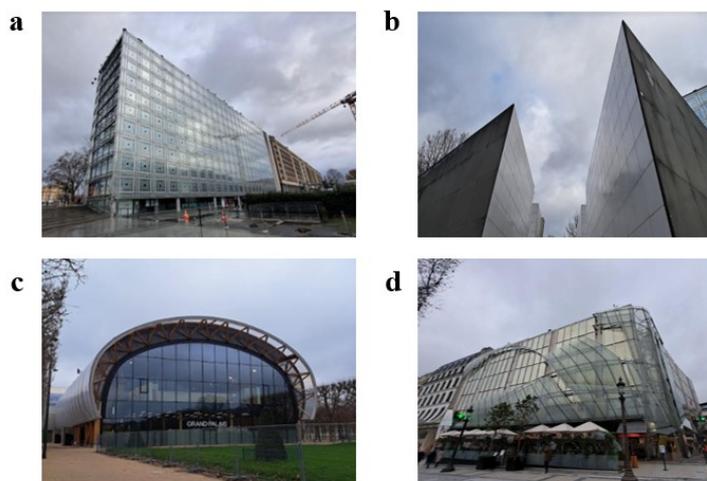


Figure III.9 : Les différentes formes d'enveloppe du bâtiment. Source : (l'auteur)

III.1.3. Les éléments constructifs de l'enveloppe :

Comme il a été mentionné précédemment, l'enveloppe du bâtiment présente tous les composants du bâtiment qui séparent l'intérieur de l'extérieur et protègent contre les conditions environnementales extérieures, d'un point de vue constructif l'enveloppe est composée de différents éléments des parois verticaux et horizontaux opaques et transparents (murs, toits, sols, les ouvertures etc.) comme le montre la figure III.10.

Deux parties principales composent l'enveloppe du bâtiment : des parties opaques (murs, toiture, sols, isolation) et des parois transparentes (fenêtres).



Figure III.10 : Les éléments constructifs de l'enveloppe du bâtiment. Source : [\(https://www.iko.com/\)](https://www.iko.com/)

III.1.3.1. Les parois opaques :

Les parties opaques de l'enveloppe du bâtiment présentent toutes les surfaces horizontales et verticales constructives et les matériaux des murs aux toits et leur composition et matériaux.

III.1.3.1.1. Les Murs de façade :

Selon Latreche (2019), les murs du bâtiment sont les éléments les plus fondamentaux de toute construction, le mur du bâtiment a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières décennies pour comprendre leurs compartiments et leur importance. Selon Nguyen (1997), les murs du bâtiment sont un élément architectural vertical utilisé pour créer et séparer les différents espaces d'un bâtiment, c'est la principale structure porteuse d'une maison. Les murs de l'enveloppe ont été construits avec des matériaux différents selon les époques et les régions, et avec l'application de différentes techniques.

III.1.3.1.2. Les toitures et les dalles :

La toiture et les dalles sont les parties horizontales de l'enveloppe du bâtiment. Selon Latreche (2019), les toits plats sont principalement en béton armé et peuvent également être appelés plancher et leurs principaux composants ou revêtements dépendent de leur surface accessible ou non accessible. La figures III.11 présente une coupe détaillée sur une dalle /toit accessible et non accessible.

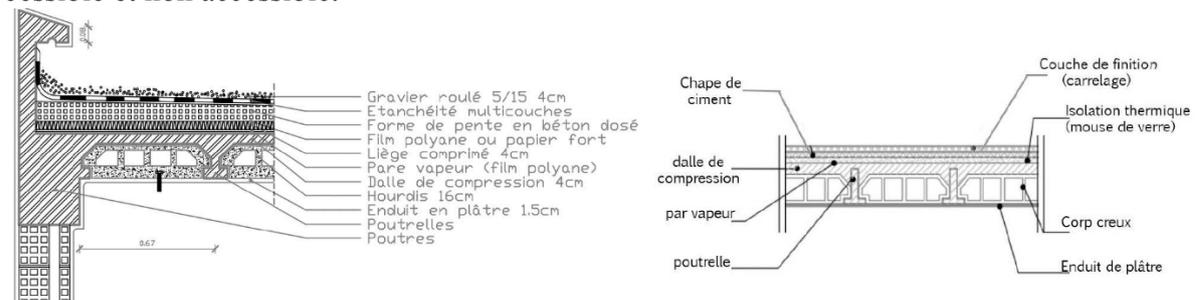


Figure III.11 : Coupe détaillée sur une dalle /toit accessible et non accessible. Source : (Latreche, 2019)

III.1.3.2. Les parois transparentes :

Les parties transparentes de l'enveloppe du bâtiment sont toutes les parties recouvertes de verre et peuvent établir une vue directe sur l'extérieur et permettre l'incidence de la lumière.

III.1.3.2.1. Les ouvertures :

Selon Latreche (2019) l'ouverture joue une caractéristique majeure du concept et du design du bâtiment et joue un rôle majeur dans le confort thermique et visuel et dans la relation des occupants du bâtiment avec leur environnement. Les ouvertures sont ce qui donne à l'ouverture l'aspect transparent, et joue un rôle de l'esthétique du bâtiment et sont responsables du gain et de la perte de chaleur.

L'ouverture de l'enveloppe peut prendre plusieurs formes, la forme la plus simple étant les fenêtres comme le montre la figure III.12.

Les fenêtres sont constituées d'un cadre avec différentes parties qui contiennent et maintiennent le verre qui peut avoir plusieurs types, formes, couleurs et épaisseurs.



Figure III.12: Fenêtres de l'enveloppe du bâtiment. Source : (l'auteur)

L'ouverture ou la partie transparente de l'enveloppe du bâtiment peut être plus que les fenêtres, il peut s'agir de grands bords vitrés, mur rideau en verre, mur en verre, ouverture zénithal, des atrium et vérandas etc.

La figure III.13 présente une enveloppe transparente : murs et toits.

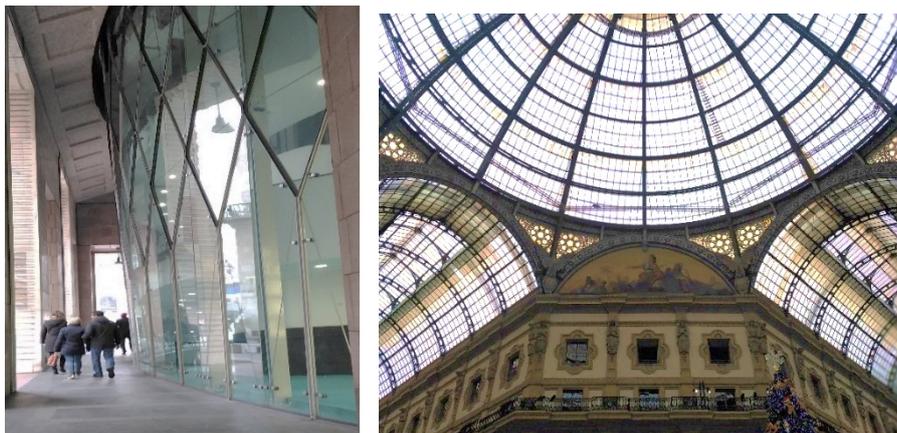


Figure III.13 : Une enveloppe transparente : murs et toits. Source : (L'auteur)

III.2. L'enveloppe comme un régulateur thermique

L'enveloppe joue différents rôles dans les bâtiments, selon Hauglustain (2018), l'architecture de l'enveloppe et tous ses constituants doivent :

- Maîtriser le climat local : l'eau sous toutes ses formes ; air et vent ; la chaleur ; radiation solaire ; variations de température ;
- Maîtriser l'environnement : bruit ; lumière ;
- Remplir d'autres fonctions telles que le contrôle des points sensibles tels que l'accès ;
- Résistance aux charges (fonction structurelle) ;
- Fonctions visuelles et « apparence ».

La figure III.14 présente l'enveloppe du bâtiment et les différentes agressions climatiques et environnementales.

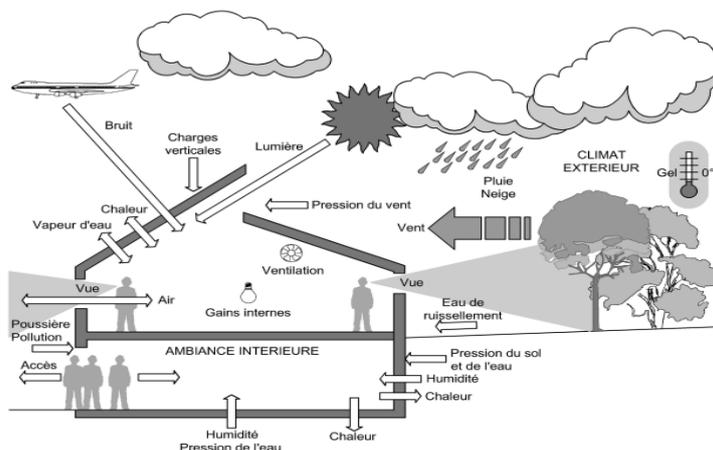


Figure III.14: Les différentes agressions environnementales que subit l'enveloppe du bâtiment. Source : (Hauglustain, 2018)

L'un des rôles majeurs dont le bâtiment protège est : la chaleur et le froid, où il est considéré comme un régulateur thermique puisqu'il contrôle les différentes températures extérieures et prévient son impact sur les températures intérieures et les conditions thermiques.

III.2.1. Le comportement thermique de l'enveloppe architecturale

Salon Benhouhou (2012), l'enveloppe du bâtiment joue un rôle majeur dans le bilan thermique et ses caractéristiques thermiques qui déterminent les flux et échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur.

La performance thermique de l'enveloppe du bâtiment dépend principalement des caractéristiques matérielles des parties opaques et transparentes (Latreche, 2019).

III.2.1.1. Les comportements thermiques des parois opaques :

Les parties opaques de l'enveloppe du bâtiment sont en contact direct avec le rayonnement solaire et séparent deux ambiances avec des températures différentes qui conduisent au processus de perte et de gain de chaleur à travers ces parties, avec le processus de transfert de chaleur, les parties opaques absorbent et stockent la chaleur dans leurs matériaux en fonction des propriétés thermo physiques du matériau (Latreche, 2019). La performance dépend principalement du niveau de rayonnement que la surface reçoit qui dépend principalement de l'orientation du bâtiment. D'après Hauglustain (2018), l'enveloppe extérieure doit limiter les pertes de chaleur en hiver et protéger de la radiation solaire en été. Cette propriété d'atténuation dépend des caractéristiques de transmission thermique des parois par conduction, convection et radiation. La figure III.15 présente le comportement thermique d'une paroi opaque.

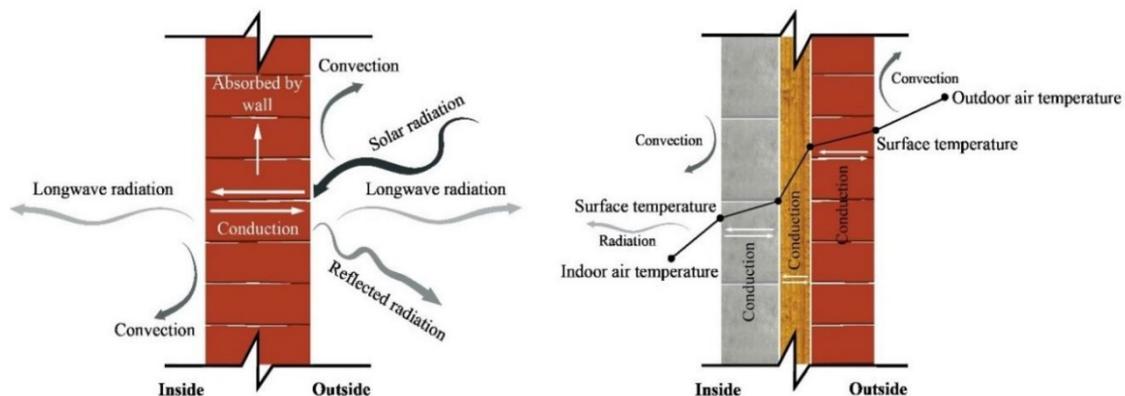


Figure III.15 : Le comportement thermique d'une paroi opaque. Source : (Nusrat, 2020)

III.2.1.2. Les comportements thermiques des parois transparentes :

Les parties transparentes de l'enveloppe et en raison de l'aspect transparent, leur comportement thermique peut être plus important dans le processus de gain de chaleur, car la surface de vitre a une faible résistance au rayonnement solaire.

Selon Mazari (2012) la performance thermique de la partie transparente de l'enveloppe des bâtiments dépend : de la taille de l'ouverture et de l'orientation, du type et de l'épaisseur du vitrage et de l'étanchéité à l'air des ouvertures. La figure III.16 présente le comportement thermique de parties transparentes d'enveloppes (vitrage des fenêtres).

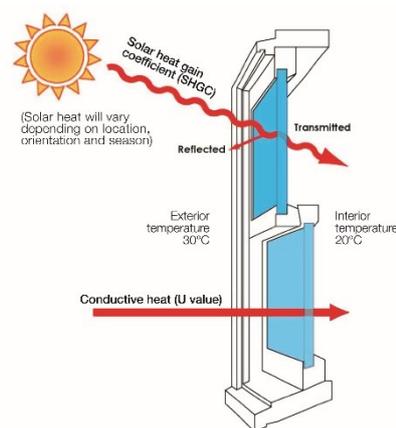


Figure III.16 : Le comportement thermique de parties transparentes d'enveloppes (vitrage des fenêtres). Source : (<https://www.yourhome.gov.au/passive-design/glazing>)

III.2.2. Les modes de transfert de chaleur :

En général le transfert de chaleur s'effectue entre deux espaces de températures différentes, ce transfert s'effectue par déplacement de chaleur des espaces à la température la plus élevée vers les plus faibles, on distingue donc trois modes de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement (Latreche, 2019). La figure 3.17 présente les modes de transfert de chaleur

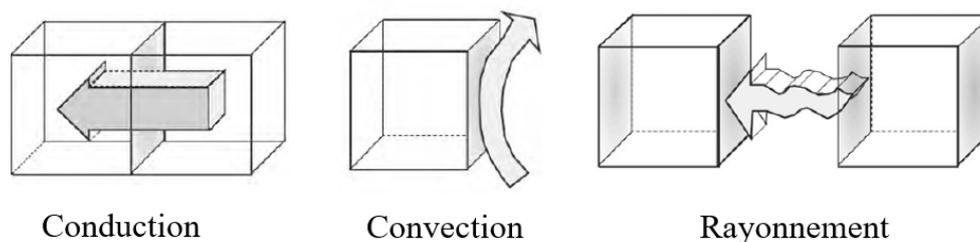


Figure 3.17 : Les modes de transfert de chaleur. Source : (Hauglustain ,2018).

III.2.2.1. La conduction thermique :

Dans ce mode de transfert de chaleur, transfert de chaleur entre deux corps en contact direct de l'élément le plus chaud vers le plus froid, cette chaleur qui se propage est proportionnelle à la conductivité thermique du matériau et à la différence de température entre les deux faces.

III.2.2.2. La convection thermique :

Dans ce mode transfert de chaleur entre la surface d'un corps solide à l'autre à l'état gazeux. L'intensité de l'échange dépend de la différence de température entre la paroi et l'air, de la vitesse de l'air et des caractéristiques géométriques des parois.

III.2.1.3. Le rayonnement :

Dans ce mode, la chaleur est transférée par le rayonnement infrarouge à travers un vide ou un gaz ou un corps transparent infrarouge, la composition spectrale de ce rayonnement dépend de la nature et de la température de la surface du corps émetteur.

III.2.3. Les propriétés thermo-physique des matériaux d'enveloppe :

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation de température telles que la résistance, la conductivité, la densité d'un matériau, tandis que les propriétés physiques caractérisent l'aspect avec une caractéristique quantitative et qualitative telle que : épaisseur, couleurs et textures.

III.2.3.1. La conductivité thermique(λ) :

Selon Liebard et De Herde (2005), la conductivité thermique (λ) est la quantité de chaleur traversant un mètre carré d'une couche de matériau homogène d'un mètre d'épaisseur soumise à une différence de température d'un degré et dans un temps donné. Plus la conductivité est faible ($\lambda < 0,060$ w/m. k) plus le matériau est isolant et inversement. Plusieurs facteurs qui influencent la conductivité thermique d'un matériau : le poids spécifique ; teneur en eau ; la taille de ses pores d'air ; la nature du solide qui les contient. La figure III.18 présente les valeurs de conductivité de quelques matériaux d'enveloppe.

	sec	hum.	
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane
	0,040		laine minérale, liège
	0,058		vermiculite
	0,065		perlite
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs
	0,12	0,13	résineux
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1 000 kg/m ³
	0,54	0,75	briques 1 000-1 600 kg/m ³
	0,90	1,1	briques 1 600-2 100 kg/m ³
Verre	1,0	1,0	
Béton armé	1,7	2,2	
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre
	2,91	3,49	granit, marbres
Métaux		45	acier
		203	aluminium
		384	cuivre

Conductivité thermique λ des matériaux en W/m.K

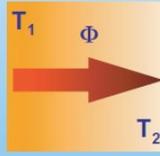


Figure III.18 : Les valeurs de conductivité de quelques matériaux d'enveloppe.

Source :(Liebard et De Herde, 2005).

III.2.3.2. La résistance thermique (R) :

La résistance thermique d'un matériau représente sa capacité à empêcher le flux de chaleur qui le traverse. Cette capacité isolante du mur est définie par un coefficient R, s'exprime en m².K/W.

Un matériau à haut pouvoir isolant thermique a une haute résistance thermique (et inversement).

- Pour une couche thermiquement homogène, c'est-à-dire composée de matériaux ayant à peu près les mêmes valeurs de conductivité thermique (à l'exception des lames d'air), et avec un flux de chaleur perpendiculaire au système, on aura :

$$R = e / \lambda$$

Avec(e) l'épaisseur de la couche et (λ) la conductivité thermique (W/m. K).

- Pour une couche thermiquement hétérogène, c'est-à-dire composée de matériaux ayant des valeurs de conductivité thermique différentes, et avec un flux de chaleur perpendiculaire au système, on aura :

$$R = 1/U - R_{si} - R_{se}$$

Avec(U) coefficient de transmission surfacique de la couche, R_{si} la résistance superficielle vis-à-vis de l'intérieur, et R_{se} la résistance superficielle vis-à-vis de l'extérieur (Liebard et De Herde ,2005).

III.2.3.3. La capacité thermique (pC) :

La capacité thermique d'un matériau ou appelée chaleur massique ou chaleur spécifique indique la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur, s'exprime en (Wh/ml. K). Selon Latreche(2019) plus la capacité thermique d'un matériau est importante plus le matériau est capable de stocker et de restituer de la chaleur en hiver et de se rafraîchir en été, ce paramètre dépend de La conductivité thermique (λ), de la chaleur spécifique et de la densité d'un matériau.

III.2.3.4. Le coefficient de transmission surfacique (U) :

Le coefficient de transmission surfacique U désigne la capacité d'une paroi à laisser passer la chaleur, il est l'opposé du coefficient de résistance thermique R. Il mesure l'énergie (chaleur) perdue à travers un mètre carré de matériau pour chaque degré de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur (Zhang et al, 2011). Techniquement, il mesure la transmission thermique d'un matériau en $W/m^2 \cdot K$ (watts par mètre carré kelvin).

La valeur U est l'inverse de toutes les résistances des matériaux trouvés dans l'élément de construction. Pour calculer la valeur U de l'élément de construction, la valeur R de tous les différents composants qui composent cet élément sera prise en compte.

- Valeur $U = 1 / (\text{Somme de toutes les valeurs } R)$
- Valeur U (de l'élément de construction) = $1 / (R_{se} + R_{si} + R_1 + R_2 \dots)$

Où R_{se} est la résistance externe fixe, R_{si} est la résistance interne fixe et R_1, R_2 , etc. sont la résistivité de tous les éléments de l'application, y compris celle des cavités de la construction.

III.2.3.5. L'inertie thermique :

Selon Hauglustain (2018), Le terme « inertie thermique », peut être défini comme la capacité d'un corps ou un matériau à stocker de la chaleur pour une durée et puis restituer. L'objectif de l'inertie thermique d'une paroi opaque est de restituer la chaleur ou la fraîcheur stockée en décalage avec les variations thermiques en dehors et dans le bâtiment. L'inertie thermique influe sur la réaction de l'intérieur du bâtiment aux oscillations du flux de chaleur autour de sa moyenne journalière ou décennale, on peut donc constater que : plus l'inertie thermique est importante, plus la température intérieure restera proche de A l'état stationnaire déterminé, plus l'inertie thermique est faible, plus la température interne variera avec les variations de débit.

III.2.3.6. La diffusivité thermique :

D'après Latreche (2019) la diffusivité thermique indique la capacité et la vitesse d'un matériau à diffuser et à transmettre la chaleur ou à transmettre rapidement une variation des températures. Plus la diffusivité thermique d'un matériau est grande et plus le matériau s'échauffe et se refroidit et vice versa. La diffusivité thermique a une relation directe avec les autres propriétés thermiques d'un matériau : la conductivité, la capacité thermique et la masse volumique, il est la conductivité thermique divisée par la densité et la capacité thermique spécifique à pression constante donc on aura :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

- λ : est la conductivité thermique (W/(m·K))
- C_p : est la capacité thermique spécifique (J/(kg·K))
- ρ : est la masse volumique (kg/m³).

III.2.3.7. L'effusivité thermique :

Il indique la capacité des matériaux à absorber plus ou moins rapidement un apport de chaleur. Plus cette valeur est élevée, plus le mur se réchauffe ou se refroidit rapidement. Elle s'exprime en (W.S/m².C°), c'est une mesure de sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement (Dante,2016). Elle est définie comme la racine carrée du produit de la conductivité thermique du matériau (λ) et de sa capacité calorifique volumétrique (ρC_p) :

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p}$$

III.2.3.8. Le déphasage thermique :

Le déphasage thermique est défini comme le retard que prend un front d'onde de chaleur à traverser une épaisseur de matériau donnée. Cela dépend également principalement de la densité et de la capacité thermique spécifique du matériau, il s'exprime généralement par l'unité de temps (heure).

III.2.3.9. La texture :

Selon Zhang (2011), la texture est une impression globale donnée par l'apparence d'un matériau, telle que la rugosité, les irrégularités, le grain, les motifs et les différences de couleur. Par exemple, la surface rugueuse du béton ou de la brique apparaît relativement massive et rugueuse ; et la surface du verre ou de l'alliage d'aluminium est lisse et délicate, ce

qui semble léger et vif. La texture est liée aux caractéristiques, aux degrés de traitement, aux méthodes de construction et aux types et styles d'élévation de bâtiments.

La texture de l'enveloppe du bâtiment a un impact sur les performances thermiques de l'enveloppe, traditionnellement, une technique de décapage très intéressante était utilisée pour ombrager au maximum la façade, cette technique de décapage était réalisée en réalisant différents éléments et aspérités dans le traitement de la façade pour faire de l'ombrage à l'intérieur de la façade elle-même.

III.2.3.10. Les couleurs :

Dans l'enveloppe du bâtiment, les couleurs jouent un double rôle ;

un rôle esthétique : les couleurs sont un facteur important pour l'apparence des bâtiments, où la teinte d'élévation blanche ou de couleur claire donne souvent une sensation de propreté et de fraîcheur ; l'élévation de couleur foncée semble digne et stable; les gens se sentent généralement enthousiastes, excités et chaleureux lorsqu'ils voient du rouge, de l'orange, du jaune et d'autres couleurs chaudes à l'intérieur; et le vert, le bleu, le violet et d'autres couleurs froides peuvent permettre aux gens d'être paisibles, élégants et cool.

Un rôle thermique : Ce paramètre varie avec le facteur d'absorption de la couleur des surfaces extérieures, les surfaces blanches n'absorbent qu'environ 15% du rayonnement incident, les couleurs claires ordinaires, comme le blanc crème ou le gris clair absorbent 40 à 50% des couleurs surfaces moyennement foncées (gris foncé, vert, rouge...) 60 à 70 % surfaces noires 80 à 90 % (GIVONI. B, 1978).

La couleur de l'enveloppe contribue soit au refroidissement, soit à l'échauffement le bâtiment ; les couleurs claires absorbent moins la lumière du soleil que les couleurs foncées.

Selon Liebard et De Herde (2005) plus la couleur est claire, plus la réflexion est importante. A l'inverse, plus le mur est foncé, plus la capacité d'absorption est importante. Le coefficient d'absorption α est le rapport entre l'énergie solaire absorbée et l'énergie solaire incidente. La valeur de α varie de 0 à 1 ; ça dépend de la couleur.

La figure III.19 présente les coefficients d'absorption α pour différents matériaux et couleurs.

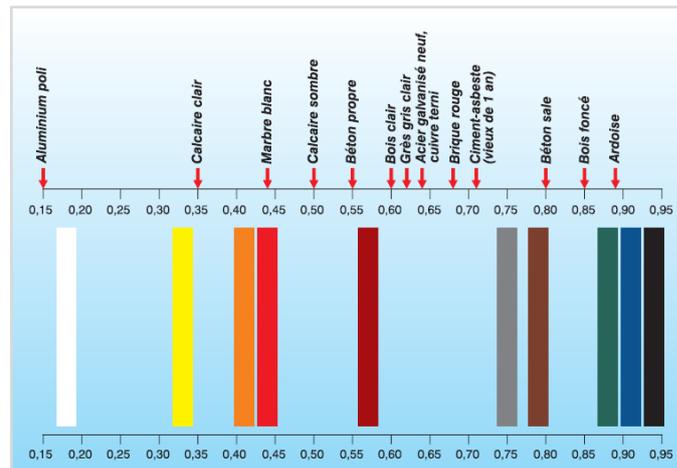


Figure III.19 : Les coefficients d'absorption α pour différents matériaux et couleurs. Source : (Liebard et De Herde, 2005)

III.2.4. L'effet thermique des matériaux d'enveloppe :

L'enveloppe du bâtiment joue un rôle important dans la performance thermique du bâtiment et le processus d'équilibre thermique en fonction des propriétés des matériaux qui le composent qui ont un impact sur les quantités de flux de chaleur entrant dans l'ambiance intérieure (Benhouhou, 2011).

III.2.4.1. L'effet des ponts thermiques :

Selon Courgey (2007), les ponts thermiques sont les points faibles de l'enveloppe du bâtiment, les ponts thermiques se trouvent généralement à la jonction des différents éléments de l'enveloppe du bâtiment : entre la façade, les murs et les dalles, entourant la menuiserie des fenêtres et ouverture etc.

Le pont thermique se produit à partir du matériau à haute transmission thermique dans les structures isolées des bâtiments, ce qui entraîne une augmentation significative du flux de chaleur à travers le mur. En conséquence, les ponts thermiques augmentent la perte de chaleur supplémentaire en hiver et gain de chaleur en été. De plus, la perte de chaleur causée par le pont thermique en hiver entraîne une diminution de la température de la surface intérieure et une augmentation de condensation dans les bâtiments, les fenêtres, les portes et les jonctions sont des points faibles qui peuvent former des ponts thermiques. La dalle du balcon est le deuxième composant le plus important du pont thermique dans les bâtiments, à l'exception des fenêtres et des portes. Une solution efficace pour réduire les déperditions thermiques dues aux

ponts thermiques est d'améliorer. La résistance thermique des endroits où se forment les ponts thermiques. Pour prévenir perte de chaleur due aux ponts thermiques, la première étape consiste à appliquer plus d'isolation au bâtiment enveloppes (Zhang et al ,2022).

D'après Liebard et De Herde (2005) les ponts thermiques sont des défauts dans la conception et/ou dans la réalisation de l'enveloppe isolante qui sont responsables de problèmes d'inconfort. La figure III.20 décrit les problèmes occasionnés par les ponts thermiques.

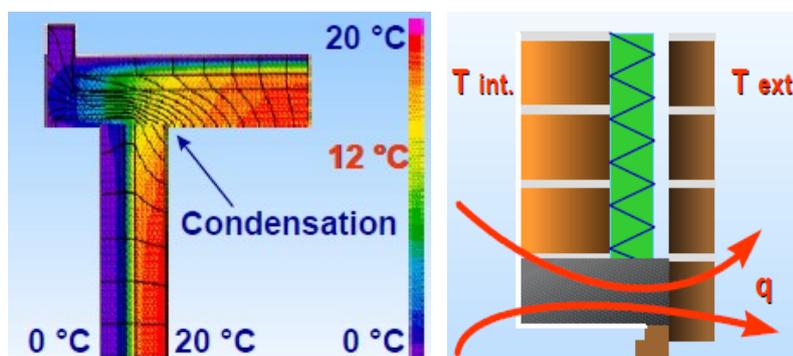


Figure III.20 : Les ponts thermiques dans l'enveloppe et les problèmes occasionnés. Source : (Liebard et De Herde, 2005)

III.2.4.2. L'effet de compacité et factor de forme :

Les surfaces d'une enveloppe de bâtiment ont un impact sur son interaction avec l'environnement extérieur et l'échange thermique. Selon Latreche (2019) la compacité et le facteur de forme ont un impact sur la performance thermique et la consommation d'énergie du bâtiment. La confession de la forme représente le rapport entre la surface de l'enveloppe du bâtiment S (exprimée en m^2) et le volume habitable du bâtiment V_h (exprimé en m^3) :

$$Cf=S/V_h$$

According to Liebard et De Herde (2005) for the same volume, the losses will be more important as the surface of the envelope increases, known as the surface loss. La compacité de la forme est un facteur important dans la performance thermique du bâtiment, elle dépend généralement de la forme à volume constant, de la taille à forme constante et du mode de contact à forme et volume constants. La figure III.21 présente les différents facteurs qui influent sur le coefficient de la forme.

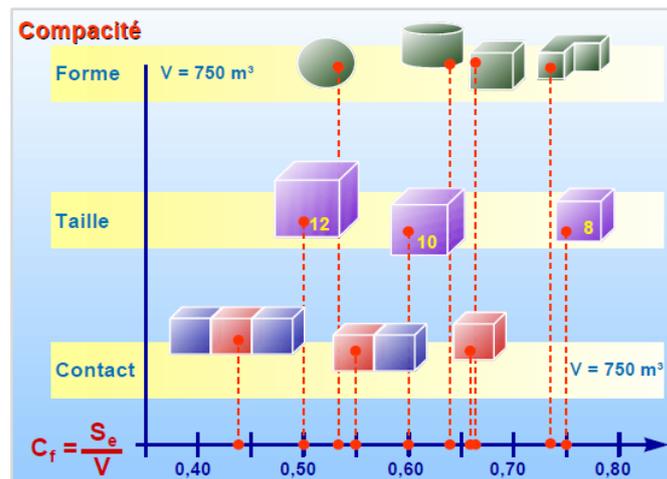


Figure III.21 : Les différents facteurs qui influent sur le coefficient de la forme. Source : (Liebard et De Herde, 2005)

III.2.4.3. Déperdition thermique de l'enveloppe :

Selon Liebard et De Herde (2005), la réglementation thermique « RT2000 a créé un nouveau coefficient pour caractériser l'isolation de l'enveloppe du bâtiment appelé l'Ubât, qui indique le coefficient moyen de transmission surfacique de l'enveloppe.

Le coefficient Ubât intègre les ponts thermiques et prend en compte les déperditions vers les locaux non chauffés, il représente les déperditions moyennes par m² de mur pour 1 degré d'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Ce coefficient est calculé comme la valeur moyenne des coefficients surfaciques et linéaires des éléments de l'enveloppe, pondérés par leurs surfaces ou linéaires correspondantes. Les formules exactes sont données dans les règles Th-U, la formule générale de ce coefficient exprimée en (W/m².K) :

Ubât = HT/AT avec :

- AT : surface intérieure totale des murs qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol et des pièces non chauffées (m²).
- HT : coefficient de perte par transmission entre le volume chauffé, d'une part, et l'extérieur, le sol, et les locaux non chauffés, d'autre part (W/K).

La déperdition thermique la plus importante dans le bâtiment se situe dans l'enveloppe des toits et des murs avec

Toits 30 %, Murs 25 %, Fenêtres 13 %, Sols 7 %, Ponts thermiques 5 % et Rénovation de l'air et ventilation naturelle avec 20 % comme le montre la figure III.22 (Benhouhou, 2011 ; Latreche, 2019).



Figure III.22 : Les déperdition thermique des parties d'enveloppe. Source : (<https://www.ccpv-sud.fr/amenagement-isolation-thermique-combles.html>)

III.3. Le climat : le principal influenceur de la performance de l'enveloppe

L'état des environnements extérieurs joue un rôle essentiel dans la performance du bâtiment et la performance de l'enveloppe. Selon Givoni (1978), il est nécessaire de prendre en considération le climat en ayant une idée des spécificités climatiques lors de la conception pour assurer une bonne intégration du bâtiment dans son environnement.

III.3.1. Le climat :

Le climat comprend plusieurs paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité de l'air, les précipitations, l'ensoleillement, la pression, les vents et tout ce qui caractérise un lieu ou un contexte géographique, ce paramètre varie en fonction de plusieurs paramètres tels que le relief, la latitude, la végétation etc. (Khadraoui, 2019).

III.3.1.1. Les types de climats :

Selon Liebard et De Herde (2005), Les principaux climats sont définis en fonction des facteurs hygrothermiques : température et humidité.

Selon le facteur de **température**, on distingue 4 catégories de climats :

- **Froid**, pour des températures moyennes annuelles inférieures à 10°C ;

- **Tempéré**, pour des températures annuelles moyennes comprises entre 10 et 20°C ;
- **Chaud**, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 20 et 30°C ;
- **Très chaud**, pour des températures moyennes annuelles supérieures à 30°C.

Selon le facteur d'**humidité**, 2 autres sous-catégories peuvent être distinguées :

- **Sec**, pour une humidité relative inférieure à 55 % ;
- **Humide**, pour une humidité relative supérieure à 55 %.

La classification climatique de Köppen-Geiger est l'un des systèmes de classification climatique les plus largement utilisés.

La classification climatique de Köppen divise les climats en cinq groupes climatiques principaux, chaque groupe étant divisé en fonction des précipitations saisonnières et des modèles de température. Les cinq principaux groupes sont A (tropical), B (aride), C (tempéré), D (continental) et E (polaire). Chaque groupe et sous-groupe est représenté par une lettre. Tous les climats sont attribués à un groupe principal (la première lettre). Tous les climats, à l'exception de ceux du groupe E, se voient attribuer un sous-groupe de précipitations saisonnières (la deuxième lettre).

D'après Beck (2018), le système Köppen-Geiger classe le climat en cinq classes principales et 30 sous-types. La classification est basée sur les valeurs seuils et la saisonnalité de la température de l'air et des précipitations mensuelles. la figure III.23 présente les différentes zones climatiques mondiale selon la dernière version améliorée de Köppen classification.

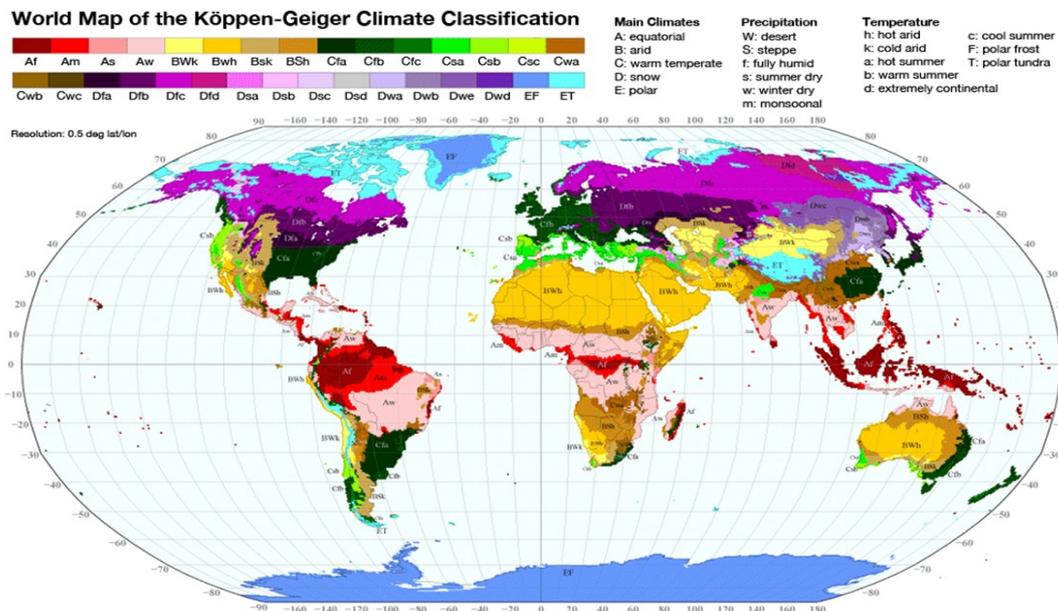


Figure III.23. Les différents zonages et classification climatiques mondiale de Köppen selon la dernière version de Beck. (Beck, 2018)

III.3.1.2. Caractéristiques climatiques du climat chaud et sec :

Les climats désertiques chauds (BWh) se trouvent généralement sous la crête subtropicale dans les latitudes moyennes inférieures ou subtropicales, souvent entre 20 ° et 33 ° de latitudes nord et sud comme montre la figure III.24. À ces endroits, l'air descendant stable et les hautes pressions en altitude dégagent des nuages et créent des conditions chaudes et arides avec un ensoleillement intense. Les climats désertiques chauds se trouvent dans de vastes régions d'Afrique du Nord, d'Asie occidentale, du nord-ouest du sous-continent indien, de l'intérieur de l'Australie, du sud-ouest des États-Unis, du nord du Mexique, de la côte du Pérou et du Chili. Cela rend les déserts chauds présents sur tous les continents sauf deux : l'Antarctique et l'Europe (Beck et al, 2018).

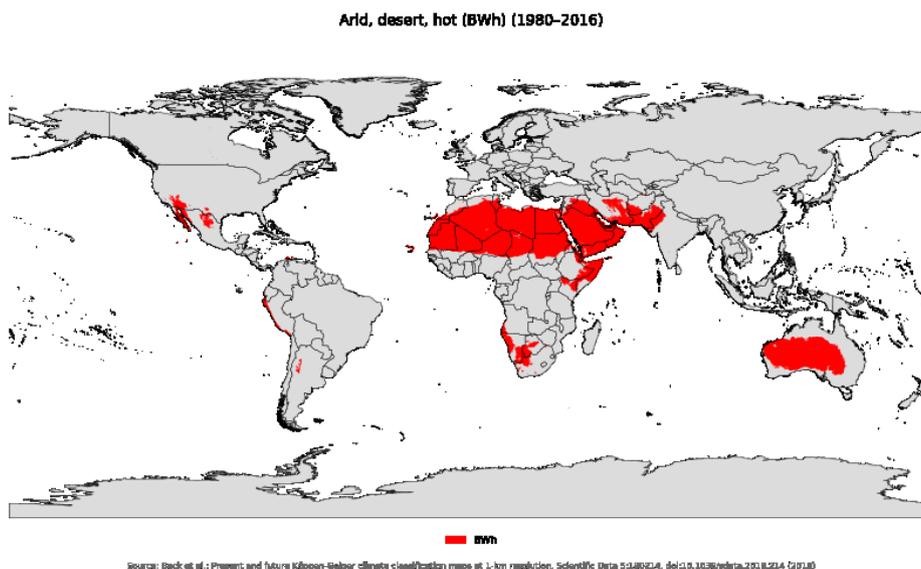


Figure III.24 : La situation géographique des climats désertiques chaude et aride *BWh*.
Source : (Beck, 2018)

Conclusion :

L'enveloppe du bâtiment présente la peau du bâtiment en contact direct avec les conditions climatiques extérieures et le lieu où se produit l'échange thermique avec l'environnement extérieur. L'objectif principal d'une enveloppe thermiquement et énergétiquement performante est de réduire la transmission de chaleur dans l'environnement intérieur en été et la perte calorifique en hiver, ce qui peut être possible avec le bon choix des formalités et de la matérialité de l'enveloppe du bâtiment.

Ce chapitre a abordé la dualité de fonction de l'enveloppe du bâtiment, entre un élément de conception et un rôle esthétique au rôle de régulation thermique et de protection contre les

conditions climatiques difficiles, en particulier dans un contexte chaud et aride. Ce chapitre a présenté les éléments de conception de l'enveloppe du bâtiment et leurs propriétés à partir des propriétés thermo physiques et leur impact sur le confort thermique et la performance énergétique d'un bâtiment avec un focus sur le contexte climatique chaud et aride.

CHAPITRE IV :
**L'état de l'art et élaboration du modèle
d'analyse**

CHAPITRE IV : L'état de l'art et élaboration du modèle d'analyse

“If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants”

Isaac Newton, 1675

Introduction

Ce chapitre fait le lien entre la partie théorique et la partie pratique de la recherche, en passant en revue la littérature sur le sujet et en cernant l'état des connaissances sur les questions relatives à l'optimisation de la performance thermique et énergétique des bâtiments scolaires. L'état de l'art permettra d'identifier et de dévoiler les études précédentes sur le sujet et notamment les différentes approches qui ont été utilisées pour le traiter ; ce qui permettra de positionner épistémologiquement la présente recherche et de développer un cadre méthodologique propre au sujet traité.

Ainsi, la question du confort thermique en corolaire avec d'utilisation de l'énergie dans les bâtiments scolaires sera traitée en premier en raison de l'importance des activités éducatives dans la société et du grand nombre d'établissements scolaires où ont lieu ces activités. En outre, sachant que des efforts permanents sont développés pour améliorer la conception de ce type d'infrastructure, l'évaluation de l'impact des matériaux employés au niveau de l'enveloppe du bâtiment scolaire comme stratégie passive pour l'amélioration des conditions de confort et l'optimisation de la performance énergétique du bâtiment, seront également examinées en analysant les recherches ayant traité cette thématique. En dernier lieu, l'impact des paramètres mécaniques, du type de climat ainsi que les méthodes utilisées pour évaluer le confort thermique seront exploré à travers la littérature existante.

IV.1. Etat de l'art sur l'étude et l'évaluation du confort thermique et l'efficacité énergétique des établissements scolaires

Au cours de la dernière décennie, la littérature a montré une tendance croissante des travaux réalisées sur les bâtiments scolaires. Bien que la plupart d'entre eux aient analysé

vitesse de l'air, etc. Dans les sections suivantes, les différentes publications se rapportant à l'environnement hygrothermique propre au bâtiment scolaire sont examinées et synthétisées.

IV.1.1.1. L'impact des températures d'environnement intérieur

Différentes recherches ont été consacrées à l'impact de la température de l'air sur le confort thermique intérieur et la performance énergétique d'un bâtiment scolaire en raison de son importance comme un paramètre principal d'appréciation et d'évaluation des conditions hygrothermiques. De ce point de vue, divers chercheurs ont fourni une masse de littérature sur l'impact des conditions intérieures du bâtiment sur le confort de l'utilisateur ; parmi les premières recherches consacrées aux bâtiments scolaires, l'étude effectuée par Harner (1974) fait une analyse des plages de températures optimales pour la compréhension des élèves. Cette étude arrive à démontrer que la plage de température idéale pour un apprentissage efficace de la lecture et des mathématiques se situe entre 20°C et 24 °C.

En outre, l'auteur a trouvé qu'une réduction significative de la performance de la lecture et la vitesse de compréhension se sont produites entre 22.7°C et 27 °C. Plus récemment, des recherches menées pour investiguer l'impact de la température dans les bâtiments scolaires ont révélé que les variations des températures dans l'espace éducatif et les salles de classe ont un impact significatif sur le niveau de concentration, l'apprentissages et la productivité des élèves et leur attention (Zeiler et Boxem, 2009 ; Abdallah, 2015 ; Lakhdari et al., 2021).

Dans une autre recherche, Fatma et al. (2017) ont constaté que les basses températures hivernales dans les salles de classe dans une région à climat froid ont un impact significatif sur la santé des élèves, ce qui peut causer des problèmes de santé comme la grippe. Les auteurs sont rapportés que chaque année scolaire et précisément durant la saison hivernale, un nombre important d'élèves sont touchés par les rhumatismes dus aux chocs thermiques ou aux variations de température au cours de la journée et des saisons qui vont augmenter l'absentéisme et diminuer la qualité de l'enseignement. En contrepartie, la recherche de Cho (2017) sur les effets de la température intérieure, a révélé que les niveaux de température élevés ont un impact négatif sur la capacité de réflexion des élèves. Ainsi, l'étude a montré que les capacités de réflexion et la concentration des élèves commencent à décliner lorsque la température intérieure dépasse le pic de 26 °C.

IV.1.1.2. L'impact de l'humidité relative et la qualité de l'air intérieur

L'humidité relative de l'air intérieur et la concentration des niveaux de CO₂ sont considérés comme les paramètres les plus importants dans les études du confort thermique dans les établissements scolaires en raison de haut taux d'occupation de ces derniers. Selon Shenglan et al. (2012), l'humidité relative est un facteur thermique important qui pourrait avoir un effet sur la réponse physiologique humaine et la sensation thermique. L'effet d'humidité relative est reconnu depuis longtemps et est inclus dans l'échelle de température effective pour l'évaluation de zone de confort thermique (Houghten et al., 1935)

En raison des variations des humidités relatives dans les écoles, les élèves peuvent souffrir d'une humidité extrêmement élevée et extrêmement faible selon la période de l'année, et les deux ont été associés à des effets négatifs sur la santé (Angelon-Gaetz et al. 2015). Ces variations extrêmes du taux d'humidité sont une cause majeure de maladies respiratoires telles que l'asthme, la toux, la respiration sifflante, la bronchite et les infections des voies respiratoires supérieures (Fisk et al. 2010), par contre un faible taux d'humidité relative peut causer un dessèchement et une irritation de la peau et des muqueuses, augmentant ainsi la vulnérabilité aux infections virales (Ukawa et al. 2013).

De nombreuses recherches ont porté sur l'impact de la vitesse de l'air et l'impact de la ventilation naturelle sur le confort thermique intérieur, selon (Gil-Baez et al., 2021) la ventilation naturelle, est considérée comme l'une des stratégies fondamentales dans la conception éco-énergétique des bâtiments, fonctionne avec des flux d'air entraînés par des forces de gravité, sans consommation d'électricité. Dans un environnement chaud, de nombreuses études ont montré que le changement de vitesse de l'air a principalement affecté le transfert de chaleur par convection entre le corps humain et l'environnement, modifiant ainsi la dissipation thermique du corps humain et améliorant ainsi le confort thermique humain (Huang et al. 2013).

Les salles de classe naturellement ventilées sont répandues dans la plupart des pays en raison de leur fonctionnement le plus simple et de leur investissement initial plus faible, ou dans les régions froides et chaudes, la ventilation naturelle est exploitée au printemps et à l'automne, alors qu'elle peut être utilisée toute l'année dans les régions tropicales (Jia et al., 2021) pour la raison de contrôler passivement les températures et les niveaux d'humidité relative, à cet égard, Wang et al. (2015) ont recommandé une ventilation nocturne en été qui pourrait réduire considérablement la température intérieure diurne maximale dans les

bâtiments, en particulier, ce qui convient au bâtiment scolaire public inoccupé pendant la nuit.

Liés au confort thermique intérieur et à la qualité de l'air intérieur dans les salles de classe, récemment et avec l'émergence de l'épidémie mondiale de COVID-19 la qualité de l'air l'intérieur dans l'espace est devenu particulièrement évident, depuis, plusieurs recherches se sont penchées l'impact de ce dernier sur l'environnement interne dans les bâtiments scolaires, en raison à la nécessité d'assurer aux élèves des conditions de santé et de sécurité car ils passent beaucoup de temps à l'intérieur(Fantozi et al.2022 ; Zivelonghi et al 2021).Le problème de la qualité de l'air intérieur et de la propagation des virus est particulièrement critique dans les espaces ventilés naturellement qui est le cas de plusieurs bâtiments scolaires (Fantozi et al.2022).

Dans de nombreuses recherches récentes, l'évaluation de la qualité de l'air intérieur était basée sur la mesure et l'évaluation des niveaux de concentration de CO₂. D'après Di Gilio(2021) dans les bâtiments à ventilation naturelle, l'utilisation de l'indice de la concentration de CO₂ peut être favorable pour déterminer la probabilité d'infection. En outre, considérant que le CO₂ est émis par tous les occupants, certaines études ont recommandé de maintenir la concentration intérieure de CO₂ en dessous de 1000 ppm pour réduire la transmission dans l'air (Du et coll. 2019).Selon Kuru et al 2018, la sensation thermique peut être influencée par les niveaux de CO₂ et il existe une forte corrélation positive entre les valeurs de PMV et la concentration de CO₂, ce qui suggère que la perception du CO₂ des occupants est influencée par la sensation thermique ainsi que par l'humidité relative et les perceptions de la vitesse de l'air.

IV.1.2. Evaluation du confort thermique à travers son paramètre personnel d'occupation

Plusieurs recherches ont évalué et étudié le confort thermique et sa sensation à travers des paramètres personnels qui sont liés aux utilisateurs de l'espace, une attention particulière a été accordée dans la littérature au bâtiment scolaire en raison de leur occupation et de leurs utilisateurs spécifiques où il est occupé par des utilisateurs fragiles allant de 5 ans à 17 ans. Les paramètres personnels ont été introduits dans le modèle et l'équation de Fanger pour évaluer le confort thermique, ces paramètres subjectifs sont liés à l'âge, au sexe et à l'activité de l'utilisateur.

IV.1.2.1. L'impact de métabolisme et niveau d'activité

Le niveau d'activité qui se traduit par un taux métabolique est un paramètre important dans l'évaluation du confort thermique car c'est ce qui sépare les différents espaces où chaque espace a sa propre fonction et donc un niveau d'activité et un taux métabolique différents. Plusieurs études ont abordé ce sujet Singh et al (2019) ont indiqué que dans la théorie du confort thermique existante, le taux métabolique est l'un des paramètres clés, et la méthode d'estimation du taux métabolique a été effectuée simplement en faisant correspondre la valeur du taux métabolique avec les niveaux d'activité dans la norme ISO8996, l'ISO7730 et l'ASHRAE 55 par le biais d'un questionnaire, puis se réfère à un tableau pour obtenir la valeur de taux métabolique correspondante.

Selon Mishra et al 2013, le taux métabolique est supposé lors de la session de questionnaire sur la base du niveau d'activité observé de l'étudiant, où cette recherche a trouvé un taux de *1,6 met* rencontré comme indiqué pour « Debout, activité légère (commerces, laboratoire, industrie légère) » dans ISO 7730-2005. Par ailleurs, la plupart des études d'évaluation du confort thermique dans les bâtiments scolaires à l'aide d'enquêtes débutent au moins une heure après l'arrivée de l'élève pour laisser les sujets s'installer et éliminer l'impact de leur activité extérieure sur la sensation thermique à l'intérieure (Kumar et al 2020, Zomorodian et al 2016). Généralement, une sensation thermique neutre correspond à une valeur métabolique plus basse, tandis que le taux métabolique augmente lorsque la sensation thermique s'écarte du côté neutre vers le côté froid ou chaud (Luo et al, 2016).

De leur côté, Luo et al (2016) ont indiqué que l'environnement thermique intérieur et la température ambiante affectent le taux métabolique et que la méthode d'évaluation du taux métabolique par l'activité standard est moins précise. L'étude a conclu que lorsque le taux métabolique passe de 0,9 met à 1,5 met (1 met équivaut à 58,2 w/m²), il peut se produire une variance de plus de 2 °C dans la température neutre prédite (températures lorsque PMV égale à 0) ou une échelle d'environ 1,5 unité de différence PMV.

IV.1.2.2. L'impact d'habillement et niveau vestimentaire

Le niveau vestimentaire est considéré comme l'un des principaux facteurs déterminant les niveaux de confort thermique, ils déterminent l'effet isolant des vêtements. Les vêtements réduisent la perte de chaleur du corps. Si le porteur ne doit pas transpirer en été et avoir froid en hiver, pour son confort thermique, il doit porter des vêtements adaptés. En enfilant des

vêtements appropriés, le porteur peut intentionnellement aider le corps à maintenir son équilibre thermique approprié pendant les situations d'exposition. Par conséquent, l'isolation des vêtements est cruciale pour maintenir une température corporelle confortable (Oğulata, 2007).

Ce sujet a été étudié dans de nombreuses d'études, l'un des premiers projets de recherche sur l'impact des niveaux de vêtements sur le confort thermique des élèves des bâtiments scolaires a été la recherche de Nicol et Humphreys (1973) qui a indiqué que les gens réagissent positivement à leur environnement thermique en changeant de vêtements et l'ajustement des vêtements en tant que mécanisme pour atteindre le confort thermique où il est fréquemment observé qu'il s'agit d'une stratégie de modération utilisée par l'élève envisageant de retirer ou d'ajouter un vêtement entier.

Wyon et Holmberg (1973) ont observé les choix vestimentaires des écoliers de 9 et 11 ans et sont arrivés à la conclusion opposée. Ils ont noté de petits ajustements vestimentaires, tels que l'ouverture d'un col ou le retroussement des manches, et ont conclu que l'isolation des vêtements devait être considérée en fonction de la température. L'étude de Katafygiotou et al, 2014 a trouvé une différence dans le sens du confort thermique entre les deux sexes en raison des différents niveaux de vêtements, où les basses températures hivernales ont plus affecté les femmes que les hommes.

La recherche de Nam et al 2015 s'est concentrée sur les caractéristiques de confort thermique et d'isolation des vêtements des enfants d'âge préscolaire en Corée âgés de 4 à 6 ans, l'étude a révélé que les quantités moyennes saisonnières de vêtements étaient de 0,29 clo en été et de 0,81 clo en hiver, ce qui étaient inférieures à la quantité de vêtements des adultes présentée par l'ASHRAE et les changements dans la quantité de vêtements dus aux températures opératoires étaient plus importants que ceux dus aux températures extérieures.

Dans l'étude d'Aparicio-Ruiz et al 2021, les données sur le niveau d'isolation des vêtements (clo) étaient recueillies à l'aide de questionnaires, les résultats ont montré que la plupart des niveaux de clo étaient concentrés entre 0,29 et 0,32, l'isolation moyenne des vêtements étant d'environ 0,3 pour la saison estivale et que le comportement d'adaptation vis-à-vis du clo dans une saison estivale avec des températures extérieures plus chaudes est moindre que dans une saison hivernale. De plus, le niveau de clo diminue à mesure que la

température extérieure augmente et cette réduction est plus importante dans les environnements ventilés naturellement que dans les espaces équipés d'un système HVAC.

IV.2. Etude de l'impact des paramètres architectural et constructive des établissements scolaires sur le confort thermique et performance énergétique :

De nombreuses études ont étudié l'impact des caractéristiques architecturales et constructives du bâtiment sur le confort thermique intérieur et donc sur la performance énergétique. Selon Heracleous et al 2014 L'identification des paramètres architecturaux les plus importants pour la consommation d'énergie et le confort thermique est essentielle pour améliorer les performances du bâtiment dans le processus de conception en fonction des conditions climatiques. L'absence de toute norme ou document de référence relatif à la conception de salles de classe ou de bâtiments scolaires adaptés en général a contribué à de nombreuses études sur le potentiel des différents éléments constructifs et architecturaux des bâtiments et leur utilisation potentielle comme stratégies passives pour assurer le confort thermique.

Selon Alghamdi et al 2022, l'identification de l'effet des paramètres architecturaux des bâtiments tels que : enveloppe du bâtiment, propriétés des matériaux, formes du bâtiment, orientation du bâtiment, etc. sur la consommation d'énergie et le confort thermique au stade de la conception est une étape importante pour réduire les charges énergétiques de chauffage/refroidissement et augmenter le niveau de confort thermique des élèves dans les bâtiments scolaires.

IV.1.3.1. Paramètres liés à l'espace (typologie, position et orientation) :

Les conditions thermiques à l'intérieur d'un bâtiment sont directement liées aux caractéristiques architecturales et constructives du bâtiment, y compris la disposition, les dimensions de l'espace, les rapports des murs des fenêtres, les ombrages extérieurs et les propriétés de l'enveloppe thermique du bâtiment. Par conséquent, le confort thermique doit être étudié en relation avec les paramètres mentionnés ci-dessus (Zomorodian et al 2016).

De nombreuses études ont étudié l'impact de différentes stratégies conceptuelles et architecturales sur l'environnement thermique intérieur des bâtiments scolaires, de nombreuses recherches se sont concentrées sur l'impact des typologies et des orientations des bâtiments comme variables architecturales majeures ; Da Garça et al 2007, ont évalué le confort thermique dans des bâtiments scolaires avec différentes typologies dans l'État de Sao

Paulo au Brésil, classés en sept typologies spatiales avec différents pourcentages d'ouvertures et d'orientations l'évaluation a révélé que les modèles avec typologie spatiale de passage avec double Nord /Les orientations Sud et Nord-est sont les plus confortables dans le contexte climatique chaud de Sao Paolo. À cet égard, Montenegro (2011) a également étudié la performance thermique et énergétique de trois bâtiments scolaires avec différentes configurations spatiales ; plan à coursive, le modèle à corridor central et le modèle concentré, avec différentes formes, proportions et dimensions des salles de classe dans deux contextes climatiques ; froid et tempéré, l'étude a révélé que les typologies les plus performantes étaient la typologie plan à coursive dans les climats froids et la typologie à corridor central dans les climats froids tempérés, où dans les deux contextes climatiques les typologies allongées avaient obtenu des meilleurs résultats en termes de consommation d'énergie indiquant que la compacité de la forme n'est pas une stratégie optimale pour l'économie d'énergie du moins ni dans tous les types de climats. Une autre étude dans ce contexte est la recherche de Zomorodian et al (2013) où une simulation a été réalisée pour évaluer l'impact de différents paramètres de conception architecturale tels que l'orientation, le pourcentage de fenêtres, la forme et la configuration spatiale sur le confort thermique et la performance dans les bâtiments scolaires, deux typologies de base ont été comparées : plan à corridor central et le plan à coursive avec différentes options d'orientation, les simulations thermiques ont mis en évidence que la meilleure typologie avec les meilleures performances thermiques dans le contexte climatique chaud et sec de l'Iran était celle exposée au nord, plan de circulation suivi d'un même plan face au sud .En général, la compacité des formes a un impact positif sur le confort thermique intérieur et les économies d'énergie.

En Algérie, plusieurs études ont été menées sur l'impact des caractéristiques architecturales et spatiales des bâtiments scolaires sur le confort thermique, l'étude de Fatma et al 2017 a été réalisée en comparant les performances thermiques de deux bâtiments scolaires avec le mêmes typologie plan à coursive dans deux contextes climatiques différents ; un climat méditerranéen et un climat chaud et sec ont trouvé un état d'inconfort thermique dans les deux climats à différentes saisons et une énorme dépendance à l'HVAC pour atteindre le confort thermique indiquant que le plan standard présente un comportement thermique différent entre les deux zones climatiques sans fournir un confort atmosphère. Dans le même sujet, Saddok et al (2016) ont étudié le confort thermique des usagers des bâtiments scolaires à l'aide d'une évaluation subjective et objective et la corrélation entre les deux typologies dans une ville méditerranéenne algérienne Tizi Ouzou, la typologie du plan à corridor central et plan à coursive, l'étude a révélé que la typologie de plan à corridor central

avec une orientation nord-sud a montré des niveaux de confort thermique plus préférables et peut offrir des conditions plus modérées car elle se caractérise par une conception plus compacte et moins ouverte, conformément à ces résultats, Afren et al (2017) ont constaté que dans les climats chauds et secs de Biskra, une typologie de plan compact avec une salle de classe orientée au nord est plus favorable par les utilisateurs et offre de meilleures conditions thermiques.

Des autres études ont étudié l'impact de la position et des orientations de l'espace, l'étude de James et al 2012 où une étude objective et subjective a eu lieu pour évaluer la sensation de confort thermique et les conditions thermiques dominantes dans un bâtiment scolaire à Accra, au Ghana avec un climat humide, en étudiant l'impact de la position de l'espace en comparant deux salles de classe, une au rez-de-chaussée et une au premier étage, les résultats ont montré que les espaces de classe au rez-de-chaussée connaissent des températures plus basses, tandis que ceux du premier étage avaient une température plus élevée (différence de 2°C) en raison de l'exposition directe du plafond au soleil, l'étude a également montré que les répondants dans les pays tropicaux comme le Ghana peuvent avoir une tolérance à la chaleur plus élevée et sauf des températures plus élevées. Dans le même contexte climatique, Rajkumar et al 2015 ont mené une étude dans le climat chaud et humide de Chennai en utilisant une approche subjective et objective ont constaté que les caractéristiques architecturales des bâtiments scolaires telles que l'orientation de la position de l'espace et l'ombrage ont un impact important sur la température intérieure, sensation de confort et l'environnement thermique.

IV.1.3.2. L'impact des paramètres liés à l'enveloppe :

L'enveloppe du bâtiment représente tous les matériaux et éléments de construction d'un bâtiment qui sont en contact direct avec l'environnement extérieur : la fondation, l'assemblage des murs, les systèmes de toiture, les vitrages, les ouvertures ou toute autre zone de pénétration qui protègent de l'environnement extérieur et empêchent les éléments climatiques d'affecter directement le bâtiment (Givoni, 1978). D'après Elghamry et al (2020) l'enveloppe du bâtiment est l'élément le plus important concernant le bilan énergétique total des bâtiments, il est la première responsable du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur, et les gains et pertes de chaleur par les murs, le sol, le toit, les fenêtres et les ponts thermiques.

Plusieurs recherches ont étudié l'impact des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment et leur impact sur la consommation énergétique totale et les ambiances thermiques intérieures.

Étant donné que les bâtiments scolaires constituent une partie importante du bâtiment du secteur public, plusieurs recherches ont été menées pour étudier l'impact des différentes parties de l'enveloppe sur le confort thermique intérieur des salles de classe et la consommation d'énergie des bâtiments scolaires, des études de cas spécifiques dans le but de quantifier les avantages et les pénalités des solutions de rétrofit testées lorsqu'elles sont exposées à différentes conditions climatiques.

IV.1.3.2.1. La partie opaque d'enveloppe :

La partie opaque de l'enveloppe du bâtiment comprend tous les matériaux et compositions des murs, des toitures et des sols. Une conception soignée de l'enveloppe du bâtiment est considérée comme la principale stratégie passive qui a un impact sur les conditions intérieures (Lakhdari et al.2021 ; Basarir et al.2012). Le choix approprié des matériaux d'enveloppe du bâtiment était une stratégie ancestrale qui a été utilisée pour adapter les bâtiments aux conditions climatiques et à leur environnement (Latha et al.2015 ; Kükrer et al.2021). Dans le passé, les bâtiments étaient construits avec des matériaux d'enveloppe lourds comme principale méthode passive de contrôle de l'environnement intérieur (Orosa et al.2012).

D'autres recherches ont montré que les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment sont directement affectées par les conditions climatiques et environnementales ainsi que par les propriétés thermo physiques de ses composants, à cet égard ont révélé que les propriétés thermiques telles que la résistance thermique (valeur R), la transmission thermique (valeur U), la diffusivité thermique et l'effusivité permettent de déterminer et de prédire le comportement thermique de tout assemblage de mur (Dhaka et al 2014 ; Toure et al. 2020 ; Jannat et al 2021).

Selon Homod et al 2021, le potentiel d'économie d'énergie du bâtiment en 2020 est fortement affecté par la masse thermique et l'isolation du bâtiment. Une inertie thermique élevée est fournie par les murs d'enceinte lourds, et cette structure peut entraîner d'importantes économies d'énergie. L'enveloppe traditionnelle des bâtiments passifs se caractérise généralement par une grande résistance thermique, qui évite leur surchauffe. Le modèle de construction vernaculaire et les matériaux de construction traditionnels utilisés, qui représentent le simple agencement des besoins humains directs, sont négligés dans un système de construction moderne.

Par ailleurs, d'autres recherches se sont concentrées sur la partie opaque de l'enveloppe principalement à travers la position et le type d'isolant dans les murs et les toits, où (Ali

Hussein 2018 ; Youcefi et al.2014) ont constaté que la consommation d'énergie était réduite en ajoutant 0,20 m d'isolant dans les murs et les toits de l'enveloppe du bâtiment scolaire, Dimoudi (2009) a constaté que l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation des murs entraînait une économie d'énergie globale d'environ 28,75 %, à cet égard, Ali (2019) recommande l'utilisation de revêtements extérieurs à faible valeur U isolation des murs et isolation PSE de 0,10 m pour améliorer les performances thermiques des bâtiments en réduisant les apports de chaleur à travers l'enveloppe.

Plusieurs études ont examiné l'impact des propriétés matérielles de composition des parois d'enveloppe opaques sur les performances thermiques et énergétiques. en comparant l'impact de différents matériaux de murs sur les performances des bâtiments dans les climats chauds, a constaté que les propriétés thermo physiques des matériaux jouent un rôle important dans les performances thermiques et énergétiques, où les matériaux à faible valeur U et diffusivité thermique sont les meilleurs, également plus épais les matériaux étaient meilleurs en termes de conduction de moins de chaleur (Mohammad et al.2013 ; Sadeghifam et al.2016).

De plus, plusieurs auteurs se sont concentrés uniquement sur l'épaisseur des matériaux des murs de l'enveloppe qui ont un impact sur le décalage temporel et le facteur de décrémentation (Orosa et al. 2012), tandis que d'autres ont constaté que l'inertie thermique associée à la construction de murs lourds peut aider à réduire la consommation d'énergie, améliorer le confort, voire remplacer les systèmes HVAC (Anbouhi et al.2016 ; Bellahcene et al.2017). En mettant l'accent sur l'impact des différents matériaux d'isolation et leurs positions dans les murs, d'autres études ont montré que les doubles murs avec isolation en polyisocyanurate, polyuréthane et kénaf obtenaient les meilleurs résultats en termes de conductivité thermique (Yu et al.2009 ; Daouas et al.2011).

D'autres ont étudié l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) dans l'enveloppe du bâtiment et leur impact sur la performance thermique et la demande d'énergie. la recherche (Bilgin et al.2017; Arici et al.2019) a constaté que l'application de PMC sur les murs extérieurs augmentait les températures de surface en hiver et diminuait en été, ce qui améliorait l'amplitude thermique et les potentiels d'économie d'énergie. De plus, Athienitis (1997) a constaté que l'application PCM a aidé à augmenter la température intérieure de 4C° pendant l'hiver. Une étude portant sur les toits de l'enveloppe des bâtiments scolaires dans un climat chaud et humide a révélé que l'application de PMC améliorait le confort intérieur et les économies d'énergie avec une épaisseur optimale de 0,20 m (Hwang et al.2021)

Dans la région algérienne chaude et sèche, plusieurs études ont examiné l'impact des matériaux d'enveloppe des bâtiments sur les performances thermiques intérieures ; des recherches menées dans des maisons unifamiliales de la ville de Biskra ont indiqué que la sélection des bons matériaux d'enveloppe et l'utilisation de murs à double paroi avec brise-soleil régulent les échanges thermiques et améliorent les conditions thermiques intérieures (Latreche et al.2018). Par ailleurs, une étude de l'impact de différents matériaux de façade d'immeuble de bureaux sur l'environnement thermique a montré que l'augmentation de l'inertie thermique des matériaux de façade a une influence positive sur le comportement thermique du bâtiment et le confort des usagers (Khadraoui et al.2018).

IV.1.3.2.2.La partie transparente d'enveloppe

Les parties transparentes de l'enveloppe du bâtiment sont présentées principalement par les fenêtres de la façade du bâtiment. Les fenêtres sont considérées comme l'un des éléments fonctionnels les plus importants des enveloppes de bâtiments en raison de leur impact significatif sur le comportement thermique des bâtiments, puis sur la quantité d'énergie consommée à l'intérieur (Elghamry et al, 2020).

Selon Laustsen (2008) l'impact d'une fenêtre est déterminé par de nombreux facteurs tels que : la position de ces ouvertures, l'orientation en plus des dimensions et de la surface des ouvertures, et les types d'ombrages.

Plusieurs recherches ont étudié l'impact des paramètres des fenêtres des façades des salles de classe des bâtiments scolaires et leur effet et leur rôle dans la garantie d'un environnement intérieur acceptable et leur potentiel d'économies d'énergie, en ce qui concerne l'impact de la taille des fenêtres et du taux d'ouverture.

Différentes études ont tenté de déterminer les ratios d'ouvertures appropriés pour différents climats et pour les différentes orientations d'ouvertures en se basant sur la règle générale selon laquelle plus le taux d'ouverture augmente, plus l'échange thermique entre l'environnement et le bâtiment augmente également, ce qui affecte les conditions de confort intérieur et conduit potentiellement à des demandes énergétiques plus élevées dues au chauffage ou au refroidissement (Lakhdari et al, 2021). Dans un climat chaud et sec, Zhang et al.2017 ont recommandé un WWR de 20 à 40 %, tandis que d'autres chercheurs ont lié ce rapport à l'orientation de la fenêtre, au type de vitrage et à l'ombrage, tandis que Zomorodian (2016) a recommandé un WWR de 20 % au sud et 15% au nord, et 5% à l'est et à l'ouest avec un ombrage vertical en surplomb de 0,6 m, également Lakhdari (2021) a recommandé un WWR de 40% au sud et 30% pour le nord avec un ombrage horizontal et du verre clair

fenêtres, Alwetaishi (2020) a recommandé que le WWR ne dépasse pas 35 %, 25 % et 20 % pour les façades des bâtiments nord-ouest, sud-est et sud-ouest, respectivement. Ces recommandations étaient basées sur des performances thermiques, lumineuses et énergétiques optimales.

De nombreuses autres études se sont concentrées sur les matériaux, le type de vitrage et les propriétés des fenêtres de l'enveloppe du bâtiment. Liang et al 2012 se sont concentrés sur les propriétés du verre des fenêtres et ont illustré comment le niveau de confort thermique dans une salle de classe changeait en fonction de l'AWSG (Average Window Solar Gain) où la salle de classe avec l'AWSG le plus élevé offrait le meilleur confort thermique pendant la période fraîche. Cependant, l'avantage de réduire l'inconfort thermique en période fraîche en augmentant l'AWSG n'était que marginal par rapport à l'impact négatif que l'augmentation de l'AWSG pourrait exercer sur le confort thermique en période chaude où un grand AWSG entraînait inévitablement un inconfort thermique important dans la période chaude ou même pendant les journées chaudes et ensoleillées de la période fraîche.

De nombreuses autres études ont évalué la contribution des différents matériaux et propriétés des fenêtres pour déterminer leur impact sur la performance du bâtiment et le potentiel d'économie d'énergie.

Lee et al. (2013) ont examiné différents composants de fenêtres et propriétés des matériaux pour déterminer leur impact sur la consommation d'énergie des bâtiments pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage dans cinq zones climatiques typiques en Chine. Les paramètres pris en compte étaient : le coefficient de transfert de chaleur (valeur U de conductivité), le coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC), la transmission visible et le taux d'ouverture de la façade (taille de la fenêtre). L'étude a révélé que la valeur U du verre des fenêtres avait un impact direct sur le chauffage, et la consommation d'énergie de refroidissement, et dans les zones chaudes et froides, triple vitrage avec un SHGC entre -0,2 et -0,4 dans différentes orientations pour réduire la conductivité thermique et avoir un avantage dans l'amélioration de l'efficacité énergétique et offre un avantage de performance, en particulier dans l'économie d'énergie de chauffage.

De nombreuses autres études ont évalué la contribution de différents matériaux de fenêtres aux économies d'énergie. Gasparella et al 2011 ont évalué l'impact de différents types de systèmes de vitrage (double et triple vitrage) sur un bâtiment résidentiel bien isolé et les gains internes en hiver et en été, la demande d'énergie et les charges de pointe, la recherche a révélé que l'utilisation de grands vitrages améliore les performances hivernales mais aggrave légèrement le pic des charges hivernales et que la transmission solaire plus élevée aggrave

considérablement les performances estivales. Dans un contexte climatique chaud et sec, de nombreuses études se sont penchées sur ce sujet ; Khadraoui (2019) a étudié l'impact de différents types de verre, de tailles de fenêtres et de surplombs d'ombrage dans les immeubles de bureaux sur les performances thermiques et énergétiques, ainsi que sur les gains et les pertes de chaleur. L'étude a recommandé l'utilisation d'un taux de vitrage et d'un rapport d'ouverture faibles de 20 à 25 %, l'utilisation de vitrages performants (double vitrage peu émissif avec gaz), l'utilisation d'ouvrants à faible diffusivité et effusivité thermique (éviter l'utilisation de cadres de couleur foncée ou aluminium) ; une intégration réfléchie des protections solaires au niveau des zones les plus exposées au rayonnement solaire (ombrage maximal des vitrages).

Labib et al (2015) ont évalué les performances thermo-visuelles d'un bâtiment aux façades vitrées dans le climat chaud et sec de l'Égypte. Les résultats montrent que la transparence de la façade dans un environnement chaud et sec est une source indésirable de gain de chaleur ainsi que d'éblouissement, et la meilleure configuration qui améliore le confort thermique et l'uniformité de la lumière du jour est celle qui combine le verre clair et une étagère lumineuse. Une autre étude d'Alhagla et al. (2019) ont évalué l'effet du type de vitrage sur la consommation d'énergie, six types de vitrage avec une valeur U, une transmission visuelle et un SHGC différents ont été sélectionnés et comparés. Les résultats indiquent que le type de vitrage est l'un des facteurs les plus influents sur le fonctionnement thermique du bâtiment, il contribue à l'économie d'énergie. Selon la comparaison de différents types de vitrage avec différentes valeurs U et transmittances, une valeur U plus élevée était bénéfique pour les économies d'énergie. De plus, sur la base de l'effet de la valeur U sur la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement, le double vitrage low-E, le double vitrage low-E-Argon et le triple vitrage Krypton se révèlent respectivement les plus efficaces pour réduire la consommation d'énergie.

Selon Lakhdari 2021 pour les climats chauds, la préférence pour les façades vitrées a de graves conséquences environnementales et économiques. Des tentatives sont toujours en cours pour trouver le meilleur équilibre entre la minimisation du gain de chaleur et la maximisation des avantages de la lumière du jour de manière rentable. En règle générale, l'utilisation de vitrages spécifiques à faible transmission réduit la conductivité U du vitrage et réduit la consommation d'énergie.

Il est à noter que la majorité de ces études concernaient les immeubles de bureaux en raison du niveau d'importance des ouvertures dans ce type de construction qui ont un WWR plus important que les autres constructions.

IV.3. Etude de l'impact des paramètres mécaniques (les systèmes de chauffage /climatisation et ventilation mécanique) :

Les systèmes mécaniques actifs sont devenus la principale solution aux problèmes d'adaptabilité des bâtiments et la source de confort dans tout bâtiment sous différents climats, d'autre part, la principale source de consommation excessive d'énergie dans les bâtiments. Selon Zomorodian et al (2016), le confort thermique en relation avec différents systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation a été une question intéressante pour les chercheurs ces dernières années, en particulier dans un environnement de bâtiment scolaire. De nombreuses recherches ont étudié l'impact de l'utilisation de différents systèmes CVC sur l'environnement thermique intérieur et la perception thermique des utilisateurs des bâtiments scolaires.

En mettant l'accent sur l'impact des systèmes de chauffage, plusieurs recherches ont étudié l'utilisation de systèmes de chauffage actifs et leur impact sur le confort thermique intérieur et la sensation thermique de l'utilisateur. Zeiler et al 2009 ont évalué la différence des niveaux de confort thermique des élèves dans des salles de classe avec différents systèmes de chauffage. , les résultats ont montré que les conditions thermiques intérieures mesurées ont indiqué un confort thermique légèrement supérieur à celui perçu par les utilisateurs indiqués par les questionnaires, l'application de systèmes de construction thermoactifs a conduit à une légère amélioration du confort thermique perçu pour les occupants de bâtiments scolaires en hiver.

D'autres recherches se sont concentrées sur l'impact et l'utilisation des systèmes de refroidissement et de climatisation actifs, plus intenses dans les climats chauds. Kükrer et al 2021 ont étudié l'effet du mode opérationnel sur le confort thermique et la productivité dans les bâtiments scolaires à l'aide d'une approche d'évaluation subjective et objective. La recherche a révélé qu'en utilisant la climatisation pendant les heures de classe, les heures d'inconfort étaient réduites de 17,6 % à une augmentation de la consommation annuelle d'énergie de 11,7 % en termes de productivité des étudiants, elle a augmenté de 46% et en général, la recherche a indiqué que l'enveloppe du bâtiment et les spécifications de conception devraient être prises en compte lors de l'élaboration de stratégies opérationnelles et de conception CVC pour assurer un meilleur confort thermique et une meilleure productivité. Dans une autre recherche Romero-Lara et al 2021 ont comparé les performances de trois systèmes de refroidissement par air innovants différents sur le confort thermique, la qualité de l'air et la consommation d'énergie dans une salle de classe standard. Plusieurs simulations

énergétiques annuelles ont été réalisées pour évaluer les trois différents systèmes de refroidissement par air innovants : les refroidisseurs par évaporation indirecte (RIEC), les refroidisseurs par évaporation indirecte à régénération par dessiccation (DRIEC) et les systèmes de refroidissement par air à détente directe (DX). Les résultats ont montré que le DRIEC et DX amélioré de 29,8 % et 14,6 % par rapport à RIEC en ce qui concerne le confort thermique, pour les conditions climatiques les plus chaudes. Cependant, DX a montré une consommation d'énergie trois et quatre fois supérieure à DRIEC pour ces conditions climatiques, respectivement. RIEC a fourni le pourcentage le plus élevé d'heures avec une qualité de l'air intérieur favorable pour toutes les zones climatiques, entre 46,3 % et 67,5 % généralement, les résultats ont révélé que les systèmes de refroidissement par air DRIEC et RIEC ont un potentiel significatif de réduction de la consommation d'énergie, atteignant le confort thermique de l'utilisateur et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur.

Plusieurs autres recherches ont porté sur l'impact des systèmes de ventilation mécanique sur le confort thermique des étudiants et la consommation d'énergie des bâtiments, concernant les conditions de confort thermique des salles de classe Modeste et al (2014) ont suggéré une augmentation de la vitesse de l'air comme un phénomène essentiel pour obtenir un environnement de confort thermique. Selon Zomorodian et al (2016) ont indiqué que le remplacement de la climatisation par une ventilation mécanique améliore le confort des bâtiments ventilés naturellement et réduit la consommation d'énergie, et offre un confort thermique à des températures plus élevées en augmentant le taux de ventilation dans les salles de classe. La recherche de Gao et al (2014) a révélé que les salles de classe ventilées présentaient des températures plus contrôlées lorsqu'elles étaient ventilées par des systèmes mécaniques et/ou par des fenêtres à commande automatique, permettant d'obtenir une ventilation croisée, par rapport aux salles de classe ventilées avec des fenêtres à commande manuelle, de plus, les niveaux de concentration de CO₂ dans les anciennes salles de classe étaient plus faibles, ce qui suggère que les taux de ventilation étaient plus élevés, ce qui se traduisait par une meilleure qualité de l'air dans la salle de classe.

Le sujet de l'importance de la ventilation et de la qualité de l'air intérieur et de la perception du confort a attiré plus d'attention avec l'épidémie de Covid 19 et l'importance de fournir une qualité d'air intérieur saine, en particulier dans les espaces clos à haute densité comme les salles de classe des bâtiments scolaires, différentes recherches ont été et sont en cours sur ce sujet (Fantozi et al.2022 ; Zivelonghi et al.2021 ; Di Gilio et al.2021 ; Du et coll.2019).

IV.4. Etude sur l'impact de type de climat

De la littérature examinée, il ressort clairement que plusieurs recherches relatives au confort thermique et à l'énergie dans les bâtiments scolaires ont été entreprises avec une préoccupation du contexte climatique. La figure IV.2 présente les différentes zones climatiques de la littérature examinée selon la carte mondiale de zonage climatique de Köppen.

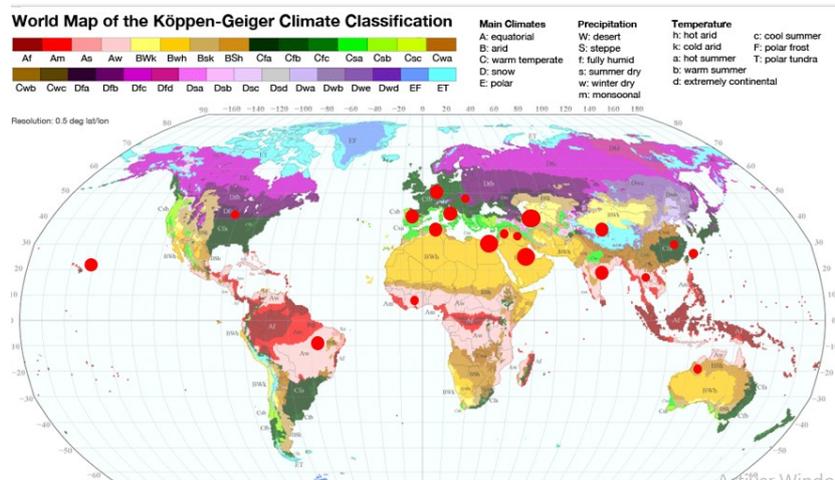


Figure IV.2 Les différents zonages climatiques de la littérature consultée.

Les différentes études examinées ont été classées selon leur contexte climatique, la classification climatique de Köppen-Geiger a été utilisée pour regrouper les différentes études de confort thermique des bâtiments scolaires. Le tableau IV.1 présente les différentes études et leur classification climatique ainsi que les différentes méthodes et approches appliquées dans chaque étude.

Tableau IV.1 Les études passées en revue et la zone climatique de chacun

L'étude référencée	Pays	Climat (Zone climatique)	Période d'étude	L'approche utilisée
Prescott et al. (2001)	Archipelago, Hawaii	As : Climat de savane tropicale	Pendant deux saisons les saisons les plus chaudes et les plus fraîches	Mesures in-situ et questionnaire , et observations comportementales
Gado et al. (2005)	Al-Minya, Egypte	BWh : climat désertique tropical et subtropical	Mesures et simulations pour un mois de mai 2007 le mois le plus chaud de l'année scolaire	Mesures in-situ et simulations avec Ecotect et HTB2
Abanomi et al. (2005)	Riyadh, Arabie Saoudite	BWh : climat désertique tropical et subtropical	Jour de refroidissement d'été journée de chauffage d'hiver	Simulations avec 'HTB2'.
Becker et al. (2007)	Jérusalem, Palestine	Csa : Climat méditerranéen	Annuel	Analyse des performances thermiques et énergétiques avec E+
Da Graça et al. (2007)	São Paulo Brazil	Cfa : climat subtropical humide	Annuel	Évaluation post occupationnel à l'aide d'un questionnaire et Optimisation à l'aide de simulations
Theodosiou et al. (2008)	Kozani, Grèce	Cfa : climat subtropical humide	Les données quotidiennes de consommation d'énergie ont été enregistrées pour une semaine de travail complète du 14 mars au 20 mai	Mesures in-situ et questionnaire

Dimoudi et al. (2009)	Grevena, Grèce	Csb : Climat Méditerranéen	Annuel	Mesures in-situ et simulations thermique énergétique
Zeiler et al. (2009)	Pays-Bas	Cfb : climat marin modéré	Saison de chauffe pendant une durée d'environ 7 jours pour chaque bâtiment Du 29 janvier au 31 mars 200413 janvier au 22 février 2005	Mesures in-situ et questionnaire
Mors et al. (2011)	Eindhoven, Pays-Bas	Cfb : climat marin modéré	24 jours, couvrant les conditions d'hiver, de printemps et d'été (année 2010).	Mesures in-situ et questionnaire
James et al. (2012)	Accra, Ghana	Aw : Savane Tropicale Climat chaud et humide	Mesure : quatre semaines (du 1er au 30 novembre 2011) questionnaire : en fin de période de mesure	Mesures in-situ et questionnaire
Basarir et al. (2012)	Istanbul, Turquie	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Annuel	Des Calcul énergétique
Liang et al. (2012)	Taichung, Taiwan	Cfa : climat subtropical humide, pas de saison sèche	1er septembre 2005 au 5 février 2006semaine la plus chaude (24-29/06) semaine la plus froide (23-26/01)	Mesures in-situ, questionnaire et des Calculs thermique
Ukawa et al. (2013)	Hokkaido, Japan	Dfb : climat continental frais et humide	Saison de chauffage	Questionnaire
Zomorodian et al. (2013)	Shiraz, Iran	BSk : climat semi-aride froid	Annuel	Simulations
Perini et al. (2013)	Genoa, Italie	Csa : Climat méditerranéen	Annuel	Évaluations analytiques Analyse de rénovation verte
Saleem et al. (2014)	Assiout, Égypte	BWh : climat désertique tropical et subtropical	Trois jours durant la période du 29 au 31 octobre 2013	Trois jours durant la période du 29 au 31 octobre 2013
Mishra et al. (2014)	Kharagpur, Inde	Aw : Savane Tropicale Climat chaud et humide	Mois de printemps	Mesures in-situ et questionnaire
Katafygiotou et al. (2014)	Limassol Chypre	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Sur les quatre saisons d'une année scolaire	Questionnaire
Gao et al. (2014)	Denmark	Cfb : Climat marin de la côte ouest	Le mois pendant la saison de chauffage en 2012	Mesures in-situ
Katafygiotou et al. (2014)	Neapolis, Cyprus	Csa : climat méditerranéen d'été chaud	Mesures : pendant sept jours en continu pendant chaque saison différente	Mesures in-situ et questionnaire
Abdallah (2015)	Assiout Egypte	BWh : climat désertique chaud	La période de 24 avril-20 à mai 2014	Mesures in-situ et questionnaire
Angelon- Gaetz et al. (2015)	Caroline du Nord États-Unis	Cfa : climat subtropical humide	Annuel	Mesures in-situ
Wang et al. (2015)	Munich, Allemagne	Cfb : Climat marin de la côte ouest	Annuel	Mesures in-situ et Simulations
Nam et al. (2015)	Séoul, Corée du Sud	Dwa : climat continental d'été chaud	Les quatre saisons d'une année scolaire de Juin 2013 à Mai 2014	Mesures in-situ et questionnaire
Rajkumar et al. (2015)	Chennai, Inde	Aw : Savane Tropicale Climat chaud et humide	Une Semaine chaude d'été	Mesures in-situ et questionnaire
Yousefi et al. (2015)	Ilam, Tabriz, and Yazd, IRAN	Ilam : CsaClimat méditerranéen Tabriz :Bsk climat frais semi-aride Yazd : BwkClimat désertique tropical et subtropical	Annuel	Simulations énergétiquesavec eQUEST
Tahsildoost et al. (2015)	Tehran, Iran	Csa : Climat méditerranéen	Annuel (de septembre 2013–août 2014)	Évaluation préliminaire des performances du bâtiment : imagerie thermique et mesures sur le terrain Modélisation énergétique à l'aide de DB présentant des propositions de rénovation, et optimisant et priorisant des scénarios basés sur la simulation énergétique et le temps de retour (PBT)

Saddok et al. (2016)	Tizi Ouzou Algérie	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Deux périodes une période estivale en septembre 2015 et hiver janvier 2016	Évaluation post occupationnel par Mesures in-situ et questionnaire
Zahiri et al. (2016)	Tahran, Iran	Csa : Climat méditerranéen	La période printanière chaude de mai 2010 pendant 1 semaine, qui comprenait une journée d'enquête. (4 mai 2010)	Mesures in-situ, questionnaire et des Simulations avec DesignBuilder
Fatma et al. (2017)	Biskra Algérie Alger Algérie	BWh : climat désertique chaud Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Période d'hiver : février Période de printemps : mars	Mesures in-situ et questionnaire
Cho et al. (2017)	Corée du Sud	Dwa : climat continental d'été chaud	Une période estivale	Des calculs et comparaison
Afren et al. (2017)	Biskra Algérie	BWh : climat désertique chaud	Lors d'une journée en période chaude de septembre	Mesures in-situ et questionnaire
Zhang et al. (2017)	Tianjin, Chine	Dwa : climat continental semi-aride d'été chaud	Annuel	Simulations avec DesignBuilder et questionnaire
Alwetaishi et al. (2017)	Mecca and Abha, Arabie Saoudite	BWh : climat désertique tropical et subtropical	Mesure pendant une journée et simulations annuelles	Simulation avec TAS et mesure in-situ pour valider le logiciel
Hammad et al. (2017)	Le Caire, Egypte	BWh : climat désertique tropical et subtropical	Simulations annuelles Mesures : en juin 2016 pour une journée scolaire entière de 8h30 à 14h30	Mesures in-situ et simulations avec DB/E+
Kuru et al. (2018)	Turquie	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Dix jours dans la saison de chauffage	Mesures in-situ et questionnaire
Ali Hussein et al. (2018)	Sulaimani, Iraq	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Annuel	Mesures in-situ et simulations (par IDA ICE) 4.7.1)
Martinez-Molina et al. (2018)	Arzobispo, Espagne	Csa : Climat méditerranéen	Mesures sur trois mois et données recueillies à intervalles d'une heure d'octobre à décembre 2015 Questionnaire : sur une journée	Évaluation post-occupationnelle ; mesure in situ (data logger), questionnaire et Calcul thermique à l'aide de DesignBuilder et EnergyPlus
Alwetaishi et al. (2018)	Jeddah, Arabie Saoudite	BWh : climat désertique tropical et subtropical	Une journée d'hiver Un jour d'été	Mesures sur le terrain Data logger/ thermomètre infrarouge
Ali et al. (2019)	Amman, Jordan	Bsh : Steppe des latitudes moyennes et climat désertique	Mesures : le 23 octobre 2016 Simulation annuelle	Analyse physique, données des archives nationales, questionnaires et suivi sur le terrain des paramètres environnementaux à l'intérieur des salles de classe. Simulation énergétique et analyse économique à l'aide de la méthode d'analyse de période de récupération simple avec le logiciel DesignBuilder
Kumar et al. (2020)	Jalandhar Inde	Cfa : climat subtropical humide	Sur deux saisons (Automne et Hiver).	Mesures in-situ et questionnaire
Heracleous et al. (2020)	Nicosie, Chypre	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Du 10 au 13 février 2018, et du 19 mai au 25 mai 2018	Mesures in-situ et questionnaire
Alwetaishi et al. (2020)	Taif, Arabie Saoudite	BWh : climat chaud aride des basses latitudes désertique	Hiver 2017, entre le 8 et le 22 janvier	Mesures in-situ et image thermique, simulations à l'aide de TAS EDSL
Lakhdari et al. (2021)	Biskra Algérie	BWh : Climat des déserts chauds	Une journée d'hiver (21 décembre 2017) et une journée d'été (27 juin 2018)	Mesures in-situ et simulations (grasshopper)
Gil-Baez et al. (2021)	Andalousie, l'Espagne	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Mesures dans deux bâtiment deux jours par école	Mesures in-situ
Zivelonghi et al. (2021)	Italie du Nord	Cfa : climat subtropical humide	Mois d'été : juin 2021	Mesures et analyse quantitative
Aparicio-Ruiz et al. (2021)	Séville, Espagne	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	21 jours pendant une saison estivale	Mesures in-situ et questionnaire
Kükrer et al. (2021)	Istanbul, Turquie	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Annuel	Simulations
Hwang et al. (2021)	Taipei et Kaohsiung, Taiwan	Cfa : climat subtropicale humide	Annuel : période de climatisation d'août à novembre et saisons de ventilation naturelle (VN) d'avril	Simulations thermiques et énergétiques avec EnergyPlus

Romero-Lara et al. (2021)	Lampedusa Séville Thessaloniki Zagreb	Bsh: Steppe des latitudes moyennes et climat désertique Csa: climat Méditerranéen Cfa: climat subtropical humide Cfb : Climat marin de la côte ouest	Annuel	Simulations
Fantozzi et al. (2022)	Pise Italie	Csa : Climat méditerranéen d'été chaud	Le mois le plus froid de la saison scolaire Décembre	Mesures in-situ
Alghamdi et al. (2022)	Newcastle, Australie	Cfa : climat subtropical humide	Annuel	Simulations et analyse d'erreurs

D'après la littérature examinée, il est clair que des différentes études ont été réalisées dans différents contextes climatiques à travers le monde, les différentes études avec l'application de différentes méthodes et approches de recherche ont montré que le contexte climatique a un grand impact sur la performance du bâtiment et la sensation des utilisateurs de confort, et dans la plupart des études et dans les différents climats, le confort thermique était difficile à atteindre à la fois le confort d'hiver et le confort d'été, également dans tous les climats, les utilisateurs ont préféré l'utilisation d'un certain type de dispositif mécanique pour le chauffage, le refroidissement et les ventilations pour atteindre leur confort thermique qui fait du secteur des bâtiments scolaires un grand consommateur d'énergie et un besoin majeur de solutions passives et de stratégies appliquées aux projets en phase de démarrage et le développement de certifications qui régissent la conception des bâtiments scolaires.

Le contexte climatique chaud et sec de notre étude présente un pourcentage de 22% de la littérature de revue. Dans le contexte algérien, quelques recherches ont abordé ce sujet en mettant l'accent sur l'impact de quelques paramètres architecturaux tels que l'orientation des bâtiments et les propriétés des fenêtres (Lakhdari et al 2021), et l'impact des typologies de bâtiments (Saddok et al 2016 ; Afren et al 2019).

IV.5. Les méthodes utilisées pour évaluer le confort thermique dans les établissements scolaire

L'évaluation du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments scolaires utilise généralement les différentes approches et modèles mentionnés au « Chapitre I » le modèle analytique rationnel et le modèle adaptatif. Dans les bâtiments scolaires, il convient de prendre en compte le fait que les enfants et les adultes n'ont pas toujours la même perception thermique, donc la préférence des élèves sur l'environnement thermique doit être considérée, car cela pourrait aider à la conceptions des salles de classe, d'où la question de l'adaptabilité est importante car l'adaptation des différents niveaux peut différer entre les différents niveaux d'enseignement, en particulier aux niveaux d'enseignement inférieurs tels que les écoles primaires où les enseignants sont le principal contrôleur qui peut modifier et ajuster les environnements thermiques (Lamberti et al, 2021).

Dans les bâtiments scolaires, les méthodes d'évaluation des environnements intérieurs qui ont été largement utilisées reposent principalement sur des recherches de terrain et de laboratoire pour collecter et évaluer des données quantitatives et qualitatives. La figure IV.3 présente les principales méthodes et techniques utilisées dans l'évaluation thermique et énergétique des bâtiments selon la littérature examinée.

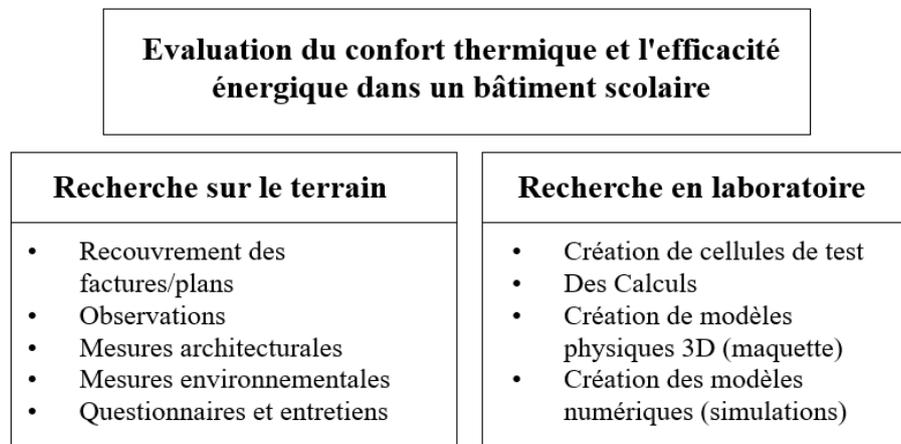


Figure IV.3 les principales méthodes et techniques utilisées dans l'évaluation thermique et énergétique des bâtiments scolaire

IV.5.1. Méthode de collecte et analyse des données préliminaires

Dans la recherche préliminaire, la collecte et la sélection des données sont nécessaires pour une analyse et des enquêtes plus approfondies, les objectifs de l'analyse préliminaire des données sont de modifier les données et de les préparer pour l'étude principale, de décrire les principales caractéristiques des données et de résumer les résultats. Le processus d'évaluation thermique et énergétique des bâtiments, différents types de données peuvent être recueillies et sélectionnées, allant des factures de consommation d'énergie des bâtiments aux documents architecturaux, aux fichiers météorologiques, etc. plusieurs recherches ont utilisé la méthode de collecte et de sélection de données primaires. Plusieurs autres études ont collecté les factures de consommation d'énergie du bâtiment et sur la base des résultats de la comparaison, des sélections préliminaires de bâtiments ayant la consommation la plus élevée ont été sélectionnées pour une optimisation plus poussée (Ali et al. 2019 ;Theodosiou et al. 2008), tandis que d'autres recherches ont utilisé la thermographie thermique comme outil pour l'évaluation préliminaire de la performance de l'enveloppe du bâtiment (Tahsildoost et al 2015). Dans d'autres recherches, la sélection principale était basée sur l'accessibilité aux

bâtiments de l'étude de cas et sur la volonté des personnes à collaborer pendant les campagnes des mesures.

IV.5.2. Méthode des mesures des paramètres physiques in situ

Les campagnes de mesures sur le terrain sont une étape essentielle dans la recherche sur le confort thermique. Dans les bâtiments scolaires, la majorité des études d'évaluation du confort thermique utilisent des mesures in situ pour collecter des données quantitatives, comme le montre le tableau IV.1 la majorité des recherches qui ont été menées au fil des années ont utilisé cet outil avec différentes techniques, marches et instruments.

IV.5.2.1. Temps et périodes des mesures

Selon Lamberti (2021), la durée des études de terrain qui ont été menées dans les bâtiments scolaires variait largement de moins d'une semaine à une année entière et pendant les heures de classe, ce qui ressort clairement de la littérature examinée, et elle est également liée à le contexte climatique du cas choisi où la plupart des mesures ont été effectuées pendant les conditions météorologiques extrêmes et pendant les périodes de climatisation et de chauffage, pour la littérature examinée et comme le montre le tableau IV.1, nous pourrions classer les campagnes de mesures en fonction de leur période où il y avait:

Mesures pendant une journée : avec des conditions estivales ou hivernales extrêmes ou les deux jours présélectionnés à partir des données météorologiques (Alwetaishi et al. 2017 ; Alwetaishi et al. 2018 ; Ali et al. 2019 ; Lakhdari et al.2021).

Mesures pendant une semaine/semaine de travail à un mois : lors de conditions météorologiques extrêmes des périodes estivales et hivernales en fonction du contexte climatique pour une meilleure compréhension et pour plus de précision des données collectées (Liang et al. 2012 ; Saddok et al. 2016 ; Zahiri et al. 2016 ; Fantozzi et al. 2022).

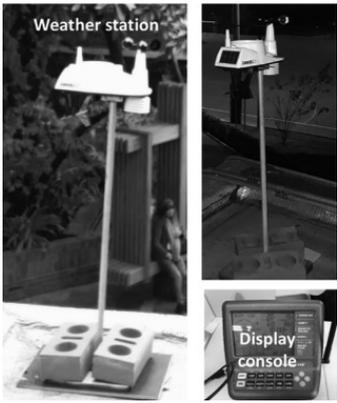
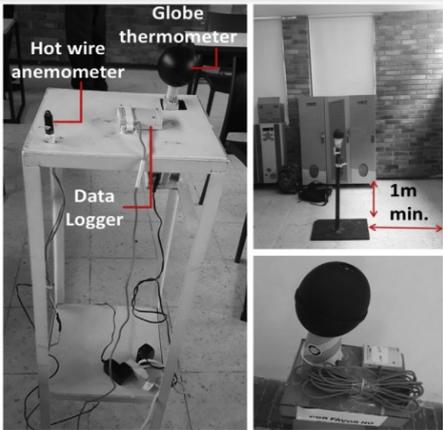
Mesure au cours d'une année : pour une meilleure compréhension de la performance du bâtiment en toutes saisons et des variations climatiques saisonnières et des adaptations comportementales des utilisateurs (Angelon Gaetz et al. 2015).

IV.5.2.2. L'appareillage et les outils des mesures /position

Les outils utilisés dans les campagnes de mesure dépendent du type et de la nature du paramètre mesuré. Dans l'étude et l'évaluation des performances thermiques et énergétiques des bâtiments scolaires, plusieurs outils et instruments ont été développés et utilisés au fil des ans. Selon la norme ASHRAE 55-2010, les instruments de mesure utilisés doivent répondre

aux exigences de plage de mesure et de précision données dans la norme ASHRAE 70 ou la norme 113 ou dans la norme ISO 7726, et la source référencée doit être ainsi identifiée. La littérature examinée a révélé plusieurs instruments qui ont été utilisés pour recueillir des paramètres physiques dans les bâtiments scolaires en fonction des paramètres mesurés et du type de données. Les instruments varient entre : instruments fixes et instruments à usage manuel, le tableau 2 montre un exemple de l'instrument le plus utilisé dans la littérature examinée.

Tableau IV.2.les instrument le plus utilisé dans la littérature pour les collectes des donnés

L'instrument	Les caractéristiques
<p style="text-align: center;">Station météo portable</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Collecte de données physiques extérieures • Fixé, il doit être placé sur le toit d'un bâtiment, loin de tout obstacle. • Paramètres mesurés : température de l'air extérieur, humidité relative, vitesse et direction du vent, rayonnement solaire, précipitations • Fournir des résultats plus précis. $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ <p style="text-align: right;">D'après (Rodriguez et al.2021)</p>
<p style="text-align: center;">Data Logger avec différentes sondes</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Collecte de donnée physique intérieure • Fixé, il doit être placé au centre d'espace • Paramètres mesurés : température de l'air intérieur, humidité relative, vitesse d'air, les niveaux de Co2 <p style="text-align: right;">D'après (Rodriguez et al.2021)</p>
<p style="text-align: center;">Thermo-anémomètre avec différentes sondes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Collecte de données physiques intérieur/extérieur • Fixé ou placé manuellement • Paramètres mesurés : température de l'air intérieur, humidité relative, vitesse d'air, les niveaux de Co2, niveau d'éclairement, Température surfacique et des fluides ...

	<ul style="list-style-type: none"> • Précision : Température $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$; Humidité $\pm 2 \%$; V d'air : $\pm 0.2 \text{ m/s}$; l'intensité lumineuse : $\pm 5\% \pm 10d$ D'après (Lakhdari et al.2021)
<p style="text-align: center;">Thermomètre infrarouge</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures des températures surfaciques à distance (sans contact) • Placé manuellement • Précision : $\pm 2.0 \%$ ou $2 \text{ }^\circ\text{C}$ D'après Alwetaishi et al. (2020)
<p style="text-align: center;">Caméra Thermique</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures des températures surfaciques à distance Image thermique • Fixé ou placé manuellement • Précision : $\pm 2.0 \%$ ou $2 \text{ }^\circ\text{C}$ D'après Ariwoola et al. (2016)

IV.5.2.3. Les positions des mesures

La norme ANSI/ASHRAE 55 recommande de prendre des mesures dans les zones occupées du bâtiment à des endroits où les occupants sont connus ou sont censés passer leur temps en fonction de la fonction de l'espace, en particulier dans les endroits où les valeurs les plus extrêmes de la température paramètres sont observés ou estimés se produire (par exemple, les zones potentiellement occupées près des fenêtres, des sorties de diffuseur, des coins et des entrées). D'autre part, dans les pièces inoccupées, l'évaluateur doit faire une estimation des emplacements des futurs occupants les plus importants dans la pièce et effectuer les mesures appropriées.

La norme ANSI/ASHRAE 55 a fourni des positions de mesure recommandées en cas de distribution d'occupation inconnue, les emplacements de mesure doivent inclure les deux éléments suivants : au centre de la pièce ou de l'espace ou à 1,0 m vers l'intérieur du centre de

chacun des murs de la pièce. En ce qui concerne la hauteur de l'équipement, la norme 55 conseille de mesurer la température de l'air et la vitesse moyenne à 0,1, 0,6 et 1,1 m au-dessus du sol pour les occupants assis et à 0,1, 1,1 et 1,7 m pour les occupants debout. De plus, il suggère que la température opératoire ou le modèle PMV soit calculé à 0,6 m pour les occupants assis et à 1,1 m pour les occupants debout. Selon Rodriguez et al (2019) ces recommandations sont basées sur les proportions et les dimensions corporelles des occupants adultes et qu'il n'y a pas de recommandations spécifiques dans le cas des enfants et du bâtiment scolaire, cependant il est conseillé de faire des mesures au niveau du lieu des activités spécifiques qui sont l'écriture la lecture qui s'exercent au niveau des tables de 1m de haut .

L'étude de Rodriguez et al (2019) a révélé que lors de la campagne de mesure dans les salles de classe des bâtiments scolaires, les enfants sont souvent curieux au sujet de l'équipement et sont tentés de le toucher ou d'interagir avec lui. Par conséquent, le placer au centre de la pièce s'est avéré peu pratique et dangereux, en particulier pour les mesures à long terme. Au lieu de cela, il est conseillé de placer l'équipement au fond de la classe, surtout s'il doit être laissé pendant plusieurs jours. Idéalement, placez-le à 1,0 m du mur et loin de tout rayonnement infrarouge (IR) ou de sources de chaleur telles que la lumière directe du soleil, les lampes à incandescence, les radiateurs, les téléviseurs, les ordinateurs ou les projecteurs. Les données de ces équipements peuvent être complétées par des mesures de courte durée réalisées avec des équipements supplémentaires au centre de la salle lors des visites encadrées, par exemple, au moment des enquêtes.

IV.5.3. Méthode d'enquête par questionnaire

D'après la littérature examinée, il est clair que la méthode des questionnaires d'enquête auprès des occupants est un outil courant dans l'évaluation du confort thermique et de l'acceptabilité de l'environnement thermique des utilisateurs des bâtiments scolaires, en raison de l'importance d'évaluer les paramètres personnels de confort thermique en tant qu'approche subjective.

La plupart des études sur le confort thermique se sont concentrées sur les adultes. Par conséquent, les résultats et les méthodes utilisés dans ces études ne devraient pas être appliqués aux enfants, en raison de leur capacité limitée à répondre aux questions de l'enquête qui sont affectées par le développement de leurs compétences cognitives (Borgers et al 2000). Dans l'étude et l'évaluation des environnements thermiques, différentes échelles subjectives ont été développées principalement basées sur l'échelle catégorielle et l'échelle ASHRAE et

basées sur la physiologie humaine et l'ergonomie. Tel qu'il a été défini par l'ASHRAE, le confort thermique est un état d'esprit qui en fait un phénomène psychologique qui peut être évalué à l'aide d'échelles visuelles analogiques (EVA) utilisées en psychologie pour évaluer les réponses subjectives des personnes concernant leurs humeurs, leurs douleurs et leurs sentiments, etc. (Ares et al 2006 ; Nahano et al 2005).

Plusieurs recherches ont appliqué les échelles visuelles analogiques afin de développer une enquête par questionnaire adaptée aux compétences cognitives et langagières des enfants afin de recueillir des données valides. Dans l'étude de Haddad et al 2012, un questionnaire a été développée pour les collégiens dans les écoles iraniennes, la question a été conçue en tenant compte d'une formulation appropriée des questions et examine les options de réponse alternatives pour une échelle d'évaluation (échelle visuelle analogique et numérique). échelle visuelle analogique, échelle de Likert, illustration) l'étude a recommandé ce qui suit lors de la conception d'un questionnaire destiné aux enfants :

- **La simplicité et clarté des questions** : un langage clair que chaque enfant pourrait comprendre. Par exemple, la catégorie centrale de l'échelle ASHRAE à 7 points de la sensation thermique neutre peut être difficile à comprendre. Par conséquent, il peut être plus souhaitable de remplacer par : «ni cool ni chaud ».
- **L'usage d'images et de couleurs** : Utilisation d'images et d'illustrations, également en utilisant des dessins animés. La figure IV.4 présente un exemple des questions utilisées.

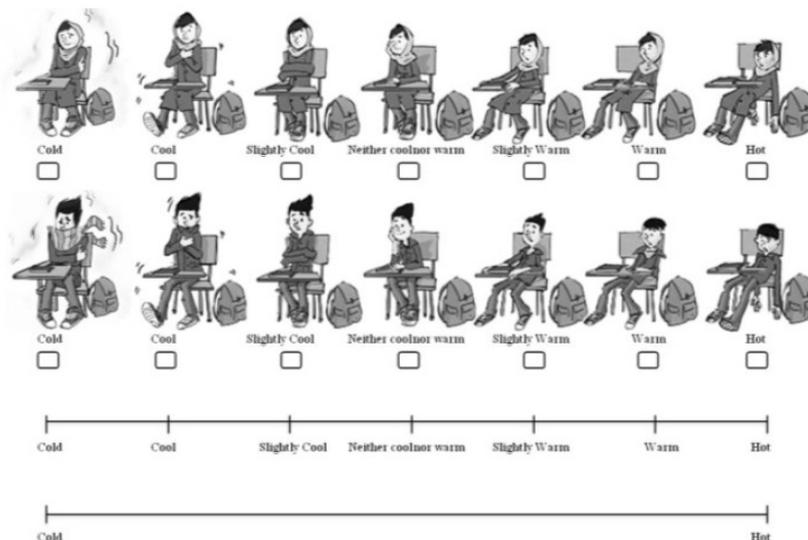


Figure IV.4 Exemple des questions utilisées. (Haddad et al 2012)

Dans une autre recherche Rodriguez et al 2019 a conçu un questionnaire destiné aux enfants et usagers des bâtiments scolaires pour évaluer leur confort thermique, la recherche a élaboré un questionnaire basé sur les orientations et recommandations suivantes :

- L'utilisation d'un questionnaire papier est plus pratique pour les enfants, tandis que les sondages en ligne sont utiles pour joindre les parents ou le personnel administratif
- Toutes les enquêtes doivent comprendre une introduction avec des questions générales et un ensemble de questions principales visant à collecter une variété de données.
- Les questions doivent être aussi simples que possible avec des illustrations graphiques adaptées à l'âge des groupes ciblés.
- Une pré-enquête en petit groupe est nécessaire pour ajuster la forme finale du questionnaire et comprendre le niveau de clarté des questions.

En effet, les auteurs ont remarqué que pour certains enfants le sens de termes tels que légèrement, neutre, inacceptable ou satisfait n'était pas toujours clair. Par conséquent, la terminologie a été remplacée par des mots tels que peu, ni chaud ni froid, mal à l'aise ou heureux avec des illustrations pour faciliter la compréhension. La figure IV.5 présente un exemple de questions utilisées.

Code SR04/7

Signature _____

Age: 20-30 / 30-40 / 40-50 / 50- Approx. weight: Kg: _____

Male Female Other

Date: _____ Time: _____ CO2: _____

From the following garments, enclose the ones you are wearing at this moment:
 Shirt - Trousers - Dress - T-shirt underneath - Shirt - T-shirt - Sack - jacket - Coat - Scarf or pashmina

1. How do you describe the climate of this classroom AT THIS TIME? Mark with an X a response for each row.

TEMPERATURE	Very cold 	Cool 	A little cool 	Neither cool nor warm	A little warm 	Warm 	Very hot
HUMIDITY	Very humid 	Humid 	A little humid 	Neither humid nor dry 	A little dry 	Dry 	Very dry
AIR	Very windy 	Windy 	Breezy 	Neither breezy nor stuffy 	A little stuffy 	Stuffy 	Very stuffy
LIGHT	Very bright 	Bright 	A little bright 	Neither bright nor dim 	A little dark 	Dark 	Very dark

2. AT THIS TIME, how does the climate in this classroom make you feel? Mark with an X your opinion for each row.

TEMPERATURE	Very comfortable	A little comfortable	Neither	A little uncomfortable	Very uncomfortable
HUMIDITY	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
AIR	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
LIGHT	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. What elements do you think affect your comfort THE MOST? And WHY?

TEMPERATURE AIR SOUND

HUMIDITY LIGHT OTHER

Please, explain your answer here: _____

Figure IV.5 Exemple des questions utilisées. (Rodriguez et al 2019)

IV.5.4. Simulation thermique et énergétique

La simulation est une méthode largement utilisée dans le processus d'évaluation des performances des bâtiments, elle peut offrir des solutions de conception dans le processus de conception à un stade précoce. Récemment, il est devenu un processus et une méthode couramment utilisés. Il permet la modélisation et l'évaluation de différents paramètres liés au bâtiment à partir des performances thermiques, d'éclairages, acoustiques et énergétiques.

La littérature consultée a révélé que la méthode de simulation thermique et énergétique est largement utilisée dans l'évaluation du confort thermique et des performances thermiques et énergétiques des bâtiments et notamment des bâtiments scolaires. Le logiciel de simulations

permet la modélisation du bâtiment sur la base de la géométrie réelle du bâtiment et des paramètres physiques et des données climatiques météorologiques d'une région sélectionnée pour prédire les performances du bâtiment et les comportements de ses composants.

IV.5.4.1. Quelques outils de simulation thermique et énergétique

La revue de la littérature de différentes recherches qui se sont basées ou ont utilisé des simulations pour évaluer les performances thermiques et énergétiques ont révélé que certains logiciels ont été largement utilisés dans la littérature à savoir : DesignBuilder/ EnergyPlus/ Grasshopper/ TAS EDSL/ IDA ICE/ eQUEST/HTB 2.

DesignBuilder¹ : C'est un logiciel de simulation dynamique, possédant une interface graphique offrant de nombreuses fonctionnalités, le logiciel est basé sur le moteur de calcul EnergyPlus, qui est un moteur de calcul développé par le DOE (département de l'énergie des US), et qui permet d'effectuer une simulation couplée du bâtiment et des systèmes CVC et d'éclairage naturel et artificiel, parmi ces fonctionnalités : les calculs des déperdition et gain de chaleur, Simulation dynamique (STD) restituant des données de confort, de bilan thermique, ventilation etc. (Batisim, 2018).

EnergyPlus² : C'est un programme complet de simulation énergétique des bâtiments que les ingénieurs, les architectes et les chercheurs utilisent pour modéliser à la fois la consommation d'énergie - pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'éclairage et les charges de prise et de processus et l'utilisation de l'eau dans les bâtiments qui a été développé par le DOE (département de l'énergie des États-Unis). EnergyPlus est un programme basé sur une console qui lit les entrées et écrit les sorties dans des fichiers texte. Il est livré avec un certain nombre d'utilitaires, notamment IDF-Editor pour créer des fichiers d'entrée à l'aide d'une interface simple de type tableur, EP-Launch pour gérer les fichiers d'entrée et de sortie et effectuer des simulations par lots, et EP-Compare pour comparer graphiquement les résultats de deux ou plusieurs simulations. Plusieurs interfaces graphiques complètes pour EnergyPlus sont également disponibles. Le DOE effectue la majeure partie de son travail avec EnergyPlus en utilisant le kit de développement logiciel Open Studio et la suite d'applications (EnergyPlus, 2020).

Grasshopper : C'est un logiciel ou un langage de programmation visuel et un environnement qui s'exécute dans l'application de conception assistée par ordinateur (CAO) Rhinoceros 3D.

¹<https://www.batisim.net/designbuilder.html>

²<https://energyplus.net>

les programmes sont créés en faisant glisser des composants sur un canevas. Les sorties de ces composants sont ensuite connectées aux entrées des composants suivants. Le plug-in Grasshopper fonctionne en associant certaines parties de géométrie créées dans Rhinoceros ou créées de novo à un éditeur algorithmique graphique. Une telle géométrie est pré visualisée dans la fenêtre d'affichage de Rhinoceros, et toute modification des chaînes de transformation graphique scriptée entraîne une mise à jour visuelle immédiate (Lagios et al 2010).

TAS EDSL³: C'est un logiciel de simulation dynamique de bâtiments et de systèmes, doté d'un moteur de calcul propriétaire rapide et fiable. Il est composé de quatre modules principaux : Modeleur 3D, Simulateur de bâtiment, Visualiser de résultats et Systèmes. Tas est équipé d'un modeleur tridimensionnel interne, intuitif et facile à utiliser, mais il permet également d'effectuer la simulation d'un bâtiment importé au format gbXML, simplifiant le travail du concepteur. Le programme est doté de nombreux utilitaires, dont celui de la certification LEED et est certifié selon les principales normes internationales de calcul dynamique (EDSL, 2020).

IDA ICE⁴ :C'est un logiciel innovant et fiable de simulation multizone détaillée et dynamique toute l'année pour l'étude du climat thermique intérieur ainsi que de la consommation d'énergie de l'ensemble du bâtiment, les modèles physiques d'IDA ICE reflètent les dernières recherches et les meilleurs modèles disponibles, et les résultats calculés se comparent bien aux données mesurées. Tout en servant un marché mondial, IDA ICE est adapté aux langues et aux exigences locales (données climatiques, normes, systèmes spéciaux, rapports spéciaux, données sur les produits et les matériaux (equa, 2020).

eQUEST: C'est un logiciel qui permet aux utilisateurs de créer des simulations qui intègrent l'emplacement du bâtiment, l'orientation, la construction des murs et toits, les propriétés des fenêtres, ainsi que les systèmes CVC, l'éclairage naturel et diverses stratégies de contrôle (Youcefi et al 2015).

IV.6. Elaboration d'une méthodologie de recherche

La revue approfondie de la littérature a révélé un manque de recherche dans le domaine du confort thermique et de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments scolaires surtout dans le contexte des climats chauds et secs et, notamment, l'Algérie. Le choix approprié d'une méthode et d'une approche pour évaluer le confort thermique, la performance thermique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment dépend des méthodes les plus utilisées dans

³<https://www.edsl.net>

⁴<https://www.equa.se/en/ida-ice/>.

le domaine et est également affecté par certains facteurs tels que la capacité des mesures en termes de temps et des moyens. Afin d'évaluer et d'optimiser les niveaux de confort thermique et d'efficacité énergétique dans les bâtiments scolaires et de mieux comprendre et optimiser l'utilisation des matériaux de construction d'enveloppe comme stratégie de conception passive pour améliorer la performance thermique et énergétique des bâtiments scolaires dans des conditions climatiques chaudes et arides, cette étude dans son volet analytique sera fondée sur deux méthodes fondamentales : empirique et numérique. Ces deux méthodes (empirique et numérique) serviront au traitement de la problématique posée et à la vérification des hypothèses.

Plus précisément, le cadre analytique envisagé relève de deux approches : qualitative et quantitative. Les deux approches seront utilisées pour : d'abord, collecter différents types de données afin d'évaluer la situation actuelle d'un corpus d'études regroupant des exemples de bâtiments scolaires sélectionnés ; ensuite, réaliser différents scénarios d'optimisation qui porteront sur l'enveloppe du bâtiment de référence ; puis enfin, évaluer leur impact sur la performance du bâtiment et les conditions de confort générées. Cette partie de la recherche repose en premier lieu sur une approche qualitative fondée sur l'observation, les relevés des établissements scolaires choisis dans la ville de Sidi Okba. Cette étude préalable vise à prendre connaissance de la réalité de l'objet de la recherche et, par la suite, sélectionner un ensemble de bâtiments scolaires pouvant servir en tant que corpus d'étude.

Une partie expérimentale et empirique fondée sur une approche quantitative est ensuite réalisée. Des mesures in situ de différents paramètres permettant de quantifier les conditions de confort thermique (températures intérieures, températures surfaciques, humidité relative de l'air, etc.) seront effectuées dans trois établissements scolaires. Ces derniers seront choisis pour illustrer trois périodes de construction et ainsi différentes variantes d'enveloppe se distingueront selon les matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures. Simultanément, une évaluation qualitative du confort ressenti sera réalisée à travers des questionnaires distribués en parallèle avec les mesures in situ. L'étude expérimentale (in situ) se déroulera durant deux périodes représentant respectivement l'hiver et l'été. L'objectif étant de fournir une compréhension approfondie des conditions limites du bâtiment, de trouver une interprétation des paramètres de fonctionnement des systèmes de conditionnement d'air et du comportement des utilisateurs afin de connaître les charges internes (équipement, éclairage et occupation) des bâtiments de référence.

La dernière étape de l'analyse est fondée sur une approche numérique ; elle portera sur les données collectées préalablement durant la partie empirique. Cette étape consiste à mener

une étude paramétrique basée sur la simulation par le logiciel DesignBuilder. Le processus commence d'abord par la calibration-validation du modèle numérique ; une fois le modèle validé, la simulation numérique pourra être effectuée dans le but d'optimiser l'enveloppe des bâtiments scolaires et finalement améliorer les conditions de confort thermique tout en maintenant un niveau raisonnable de consommation énergétique.

Conclusion

L'étude du confort thermique et de l'optimisation énergétique dans les bâtiments scolaires ainsi que l'évaluation de l'impact des matériaux d'enveloppe du bâtiment comme stratégie passive pour l'amélioration de la performance thermique du bâtiment s'inscrit dans un domaine de recherche très large. Les travaux qui ont été menés sur ce sujet s'appuient sur des méthodes analytiques, des études de terrain empiriques, numériques, expérimentales, et différents types de simulations selon l'objet de l'étude. Néanmoins, la variété des contextes et des conditions climatiques nécessite de mener des études approfondies et personnalisées pour chaque région et type de bâtiment et leurs cahiers des charges afin de trouver des solutions adéquates et bien adaptées pour assurer le confort des usagers et la meilleure performance des bâtiments.

Pour mener à bien cette recherche consacrée à l'étude de l'impact et le potentiel de l'utilisation de matériaux d'enveloppe comme stratégie passive pour optimiser le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments scolaires, le présent chapitre fournit un état de l'art sur le sujet traité. Ainsi, une revue de littérature sur les études précédentes travaux qui traitent du confort thermique et son corolaire la consommation d'énergie dans les établissements scolaires, sont synthétisés selon leurs différents paramètres, variables, et méthode d'évaluations. Par ailleurs, ce chapitre qui constitue un point de jonction et de passage entre la partie théorique et la partie pratique de la recherche a été envisagé afin de définir un modèle d'analyse.

À cet égard, cette revue de la littérature sur les concepts clé de la recherche, bien que non exhaustive, a confirmé l'influence des éléments de l'enveloppe sur le confort thermique et la consommation énergétique du bâtiment. Plus précisément, il est apparu que le rôle de la protection contre les rayonnements solaires en été et la réduction des déperditions thermiques en hiver, est conditionné par le choix adéquat des matériaux et une bonne conception de l'enveloppe architecturale. En général, la plupart des études s'accordent sur la nécessité d'un choix judicieux des matériaux qui constituent l'enveloppe du bâtiment ; c'est, en effet, une condition sine qua non pour assurer un niveau de confort acceptable pour les occupants. Par

ailleurs, sur la base de la revue de la littérature réalisée un cadre méthodologique a pu être développé pour évaluer et optimiser les performances de bâtiments d'études de cas réels sélectionnés sous des climats chauds et secs ; ce cadre d'analyse est fondé sur une combinaison d'approches quantitative et qualitative.

CHAPITRE V :

Présentation du cadre de référence et des cas d'études

CHAPITRE V : Présentation du cadre de référence et des cas d'études

Introduction

Le bâtiment est considéré comme faisant partie de l'environnement global, il est donc important d'étudier les différentes interactions entre lui et les éléments environnementaux en fonction de son comportement vis-à-vis des sollicitations externes. De fait, une analyse du mode d'intégration du bâtiment scolaire dans son contexte physique et climatique est nécessaire avant de commencer l'étude empirique et la simulation.

Ce chapitre est une présentation analytique du cadre de l'étude en termes de contexte géographique et environnemental ainsi qu'architectural en allant du macro au micro, soit de l'échelle du climat de la région au détail des constructions des différents bâtiments choisis comme exemples. Ainsi, le chapitre présentera en premier lieu le contexte géographique, climatique et bioclimatique de la ville de Sidi Okba située dans la wilaya de Biskra où domine un climat chaud et sec. Deuxièmement, il présentera un échantillon de différents bâtiments scolaires sélectionnés pour servir de cas d'études et qui seront étudiés plus en détail dans les deux chapitres analytiques suivants.

Considérant les objectifs de la recherche, les bâtiments choisis illustrent trois périodes de construction et ainsi différentes variantes d'enveloppe se distinguant selon les matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures. A ce titre, l'étude typologique des différents établissements scolaires de la ville de Sidi Okba qui a abouti à la sélection des cas d'étude sera également présentée.

V.1.Présentation de contexte climatique d'étude

Cette étude a été effectuée dans un contexte climatique chaud et aride du sud de l'Algérie ; exactement dans une commune de la wilaya de Biskra, la ville de Sidi Okba.

V.1.1. Le climat de l'Algérie

L'Algérie est un pays nord-africain doté d'un littoral sur la mer Méditerranée. C'est le pays africain le plus large en termes de superficie, par conséquent, le climat de l'Algérie est très varié. Selon la classification climatique de Köppen¹, l'Algérie a différents types de climats qui varient du méditerranéenne (Classification de Köppen Csa) au désertique (Classification de Köppen BWh et BWk), en passant par le climat semi-aride de haute altitude. Cependant, du fait de sa situation en zone subtropicale le pays possède en majorité un climat désertique (Classification de Köppen BWh) chaud et sec dominant, comme montre la **Figure V.1**.

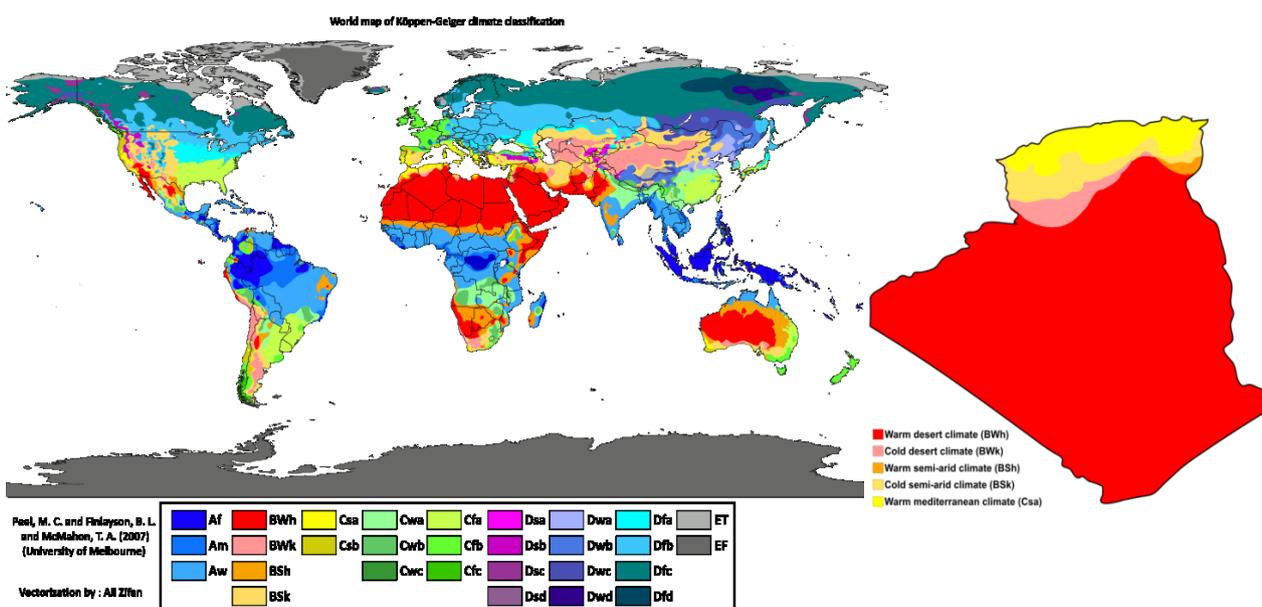


Figure V.1 : Classification climatique mondiale selon Köppen et les zones climatiques de l'Algérie (source : <https://fr.wikipedia.org>)

V.1.2. Situation géographique de la wilaya de Biskra

Biskra est située au nord du Sahara algérien à plus de 400km distance de la capitale Alger. Elle correspond à une latitude de 34° 51' 00" nord, une longitude de 5° 44' 00" est, et à une altitude de 87 m. Administrativement, Biskra est une wilaya de sud-est algérien. Elle est délimitée : au nord par la wilaya de Batna, au nord-ouest par Msila, à l'est par Khenchela, à l'ouest par Djelfa, au sud-est par la wilaya d'El Oued et au sud par la wilaya d'Ouargla (**Figure V.2**).

¹Classification de Köppen source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_de_K%C3%B6ppen



Figure V.2 : La situation de la wilaya de Biskra (source : <https://fr.wikipedia.org>)

V.1.3. Données climatiques de la commune de Sidi Okba (Biskra)

D'après la classification climatique de Köppen comme indiqué dans la **Figure V.1**, Biskra est située dans une zone climatique classé (**BWh**) qui signifie : **B** : climat sec, **W** : climat désertique sec avec précipitations annuelles < 50 % du seuil, et **h** : climat sec et chaud avec température moyenne annuelle > 18 °C. La région de Biskra correspond donc à une zone chaude et aride avec un climat désertique sec de températures très élevées et de faibles précipitations.

La ville de Sidi Okba situé à une distance de 18 km à l'est de Biskra est la commune la plus proche par rapport au chef-lieu de la wilaya (**Figure V.3**). Ainsi, les caractéristiques climatiques de la ville de Sidi Okba sont les mêmes que celles de Biskra.

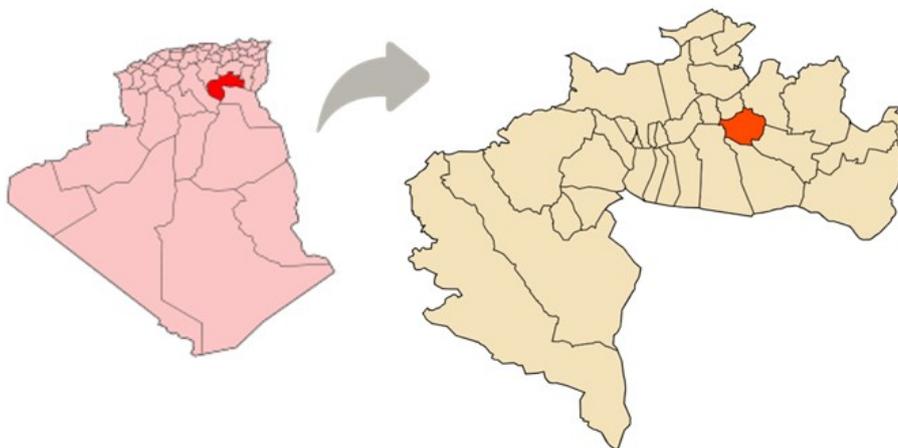


Figure V.3 : La situation géographique de la commune de Sidi Okba dans la wilaya de Biskra (source : <https://fr.wikipedia.org>)

V.1.3.1. La température d'air

Les régions chaudes et arides sont caractérisées par une grande amplitude journalière, mensuelle et annuelle comme montre le **tableau. V.1** et la **figure. V.4**. Le mois le plus chaud est Juillet avec une température maximale égale ou dépassant 41°C, des pics de 50°C sont également atteints. Janvier est le mois le plus froid avec une température minimale de l'ordre de 5.8 °C **tableau. V.1**.

Tableau. V.1 : Les températures moyennes annuelles de Sidi Okba durant la période 1998-2018 (source :<https://fr.climate-data.org/>)

Les mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Température moyenne (°C)	10.9	12.8	16.3	20.3	25.2	30.4	33.6	32.9	28.4	22.2	16.1	12
Température minimale (°C)	5.8	7.6	10.2	13.8	18.2	23.7	26.6	26.4	22.5	16.4	11	7
Température maximale (°C)	16.1	18	22.4	26.8	32.2	37.2	40.6	39.5	34.4	28	21.3	17

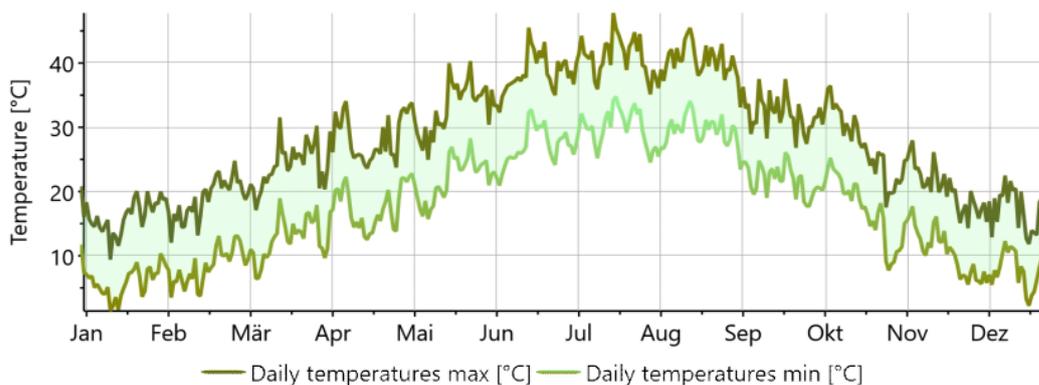


Figure. V.2 : Températures moyenne annuelle de Sidi Okba de période 2000-2009 (source : logiciel Meteonorm v7.2)

V.1.3.2. L'humidité relative

Les régions chaudes et arides sont caractérisées par une faible humidité relative comme illustré dans le **tableau V.2**. Les mois les plus froids sont également les plus humides avec un taux d'humidité relative entre 40 et 60% ; le mois de Décembre est le plus humide avec un taux d'humidité de 62%. Les mois les plus chauds sont les plus secs avec

un taux d'humidité relative entre 39% et 24% et Juillet est le mois le plus sec avec un taux d'humidité de 24%.

Tableau. V.2 : L'humidité relative mensuelle de Sidi Okba de période 2000-2009(source : logiciel Meteonorm v7.2)

MOIS	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy
HR %	56	46	39	35	31	26	24	27	39	46	52	62	40

V.1.3.3. Les vents dominants

Le régime des vents dans la région de Sidi Okba est le suivant : pendant l'été, les vents dominants chauds soufflent du sud-est ; alors que pendant l'hiver, les vents dominants froids soufflent du nord-ouest. La **Figure V.5**.présente la distribution des vents selon la direction (la rose des vents).

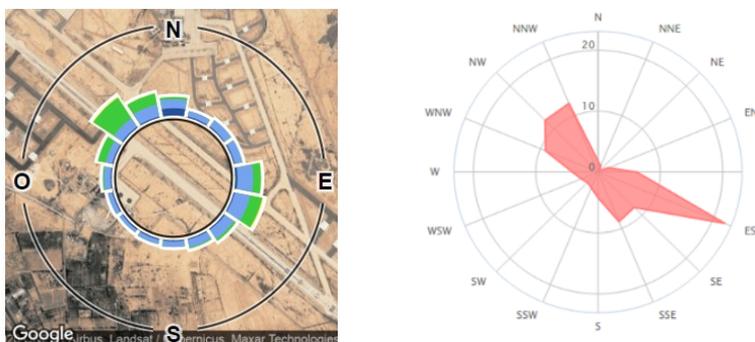


Figure V.5 : La distribution de la direction du vent et la rose des vents dans la région de Sidi Okba (source : <https://www.windfinder.com/>)

La vitesse du vent varie pendant l'année et les saisons avec une vitesse minimale de 3.6 m/s au mois d'Octobre et avec une vitesse maximale de 6.0 m/s au mois d'Avril. La vitesse moyenne annuelle est de l'ordre de 4.4 m/s comme le montre le **Tableau V.3**.

Tableau V.3 : Vitesses des vents mensuelle de Sidi Okba, période 2000-2009(source : logiciel Meteonorm v7.2)

MOIS	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy
Vents m/s	4.2	4.3	5.1	6.0	5.7	4.3	3.9	3.8	4.1	3.6	4.2	4.0	4.4

V.1.3.4. Les précipitations

Selon le graphe (Figure. V.6) il est observé que le taux de précipitations dans la ville de Sidi Okba est très faible à rare. Durant les mois de la saison chaude de Mai à Aout, de faibles précipitations sont enregistrées et le mois de Juillet enregistre la valeur minimale de 0 à 2 mm. En contrepartie, la valeur maximale est atteinte en Octobre et Mars avec 25 mm mais avec un maximum de 2 jours de précipitations ; alors que Décembre et Janvier sont les mois les plus pluvieux avec plus de 3 jours de précipitation.

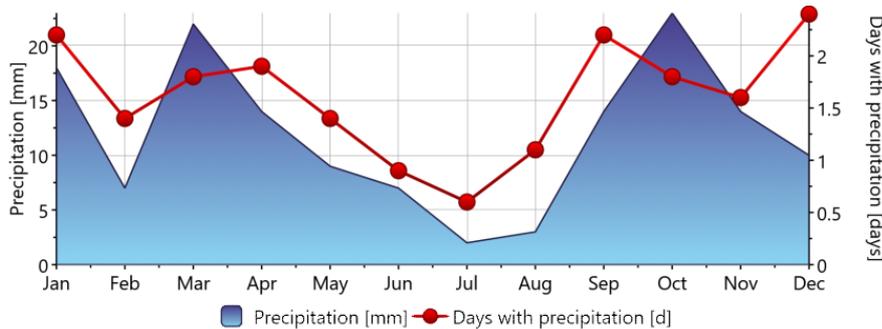


Figure V.6 : Les valeurs et fréquences des précipitations mensuelles à Sidi Okba; période 2000-2009(source : logiciel Meteonorm v7.2)

V.1.3.5. Les rayons solaires

Le climat chaud et aride est caractérisé par son rayonnement solaire intense durant les mois d'été soit de la fin d'Avril jusqu'à la fin d'Aout avec une radiation globale supérieure à 7 kWh/m² ; le mois de Juillet est le mois où le rayonnement solaire est le plus intense avec une valeur de radiation mensuelle globale de l'ordre de 240 kWh/m² et un pic de radiation journalière de 8 kWh/m² qui est atteint le 10 Juillet. Inversement, le mois de Décembre est le mois le plus sombre avec une valeur de radiation mensuelle minimale de 90 kWh/m² et une intensité minimale de 2.8 kWh/m² enregistrée le 16 Décembre (Figure .V.7).

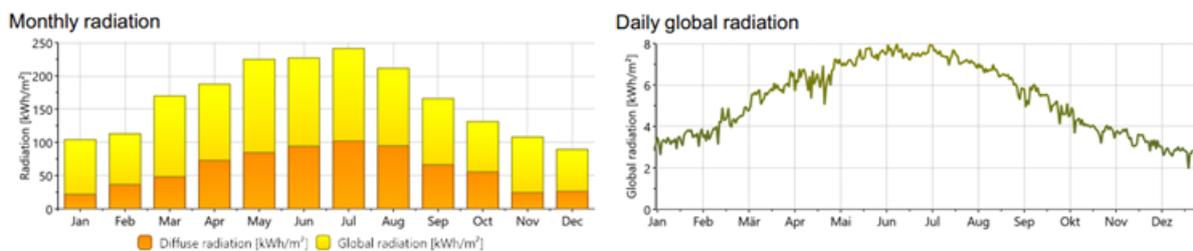


Figure.V.7 : Les niveaux du rayonnement solaire quotidien et mensuel à Sidi Okba ; période 2000-2009 (source : logiciel Meteonorm v7.2)

V.2. Analyse bioclimatique

Une analyse bioclimatique est nécessaire pour déterminer les potentialités d'une région du point de vue des données climatiques et facteurs environnementaux et notamment connaître les périodes de confort et d'inconfort. Dans cette partie, une analyse bioclimatique de la ville de Sidi Okba est effectuée ; les méthodes et les outils les plus courants seront utilisés pour déterminer des recommandations de conception adaptées au climat chaud et sec du contexte de l'étude.

V.2.1. Déterminer la zone de surchauffe

Selon la méthode de Givoni la zone de confort de Sidi Okba est située entre 20°C et 24°C (**Figure. V.7**). D'après la matrice des températures, il est observé que la période de surchauffe s'étend de Juillet à Aout entre 11.00 du matin à 20.00 du soir avec une température de l'ordre de 38°C. Les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre sont dans la zone d'inconfort toutes les journées du mois avec des température variant entre 24°C et 38°C. Les périodes considérées comme thermiquement confortable avec une température entre 20°C et 24°C (zones de confort) sont observées durant le mois de Mars pendant l'après-midi, Avril (nuit), Mai (au matin) et octobre dans quelque heure du matin et la nuit.

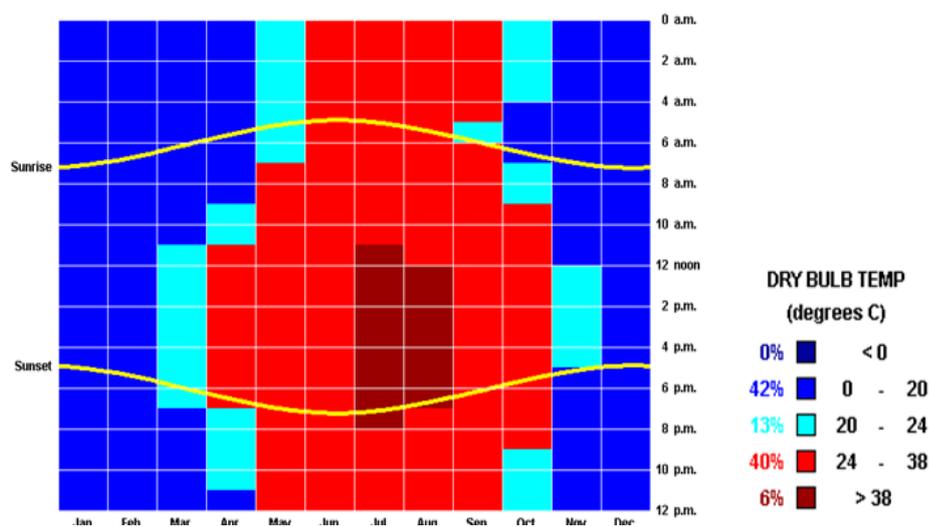


Figure. V.7 : Matrice de la température sèche montrant la zone de surchauffe
(source : logiciel climate consultant V 6.0)

V.2.2. Diagramme de Givoni

Un diagramme psychromètre a été développé par Givoni en 1963 pour évaluer le confort thermique se basant sur des caractéristiques hygrothermiques d'un climat. Ce

diagramme a été modifié et amélioré en 1992 lorsque Givoni a proposé deux zones de limite du confort qui varient selon les saisons incluant une période estivale et une période hivernale et donc qui étaient plus adaptées aux régions à climats chauds(Berkouk, 2017). Les caractéristique et limites de chaque zone sont motionnées dans le tableau V.5.

Tableau. V.5 : Limites des zones du confort selon le diagramme psychométrique (source : Castilla et al. 2014 adapté par Berkouk,2017)

Paramètres	Période estivale	Période hivernale
Température d'air C°	23°C à 26°C	20°C à 24°C
Humidité relative %	40 % à 60%	40 % à 60%

Le diagramme psychométrique dit de Givoni est aujourd'hui utilisé comme un outil d'aide à la décision permettant de déterminer plusieurs paramètres de conception architecturale en fonction des données climatiques du lieu considéré. Il indique en termes de zones, les périodes de confort saisonnier ainsi que les besoins et des recommandations pour chaque mois de l'année (**Figure. V.8**).

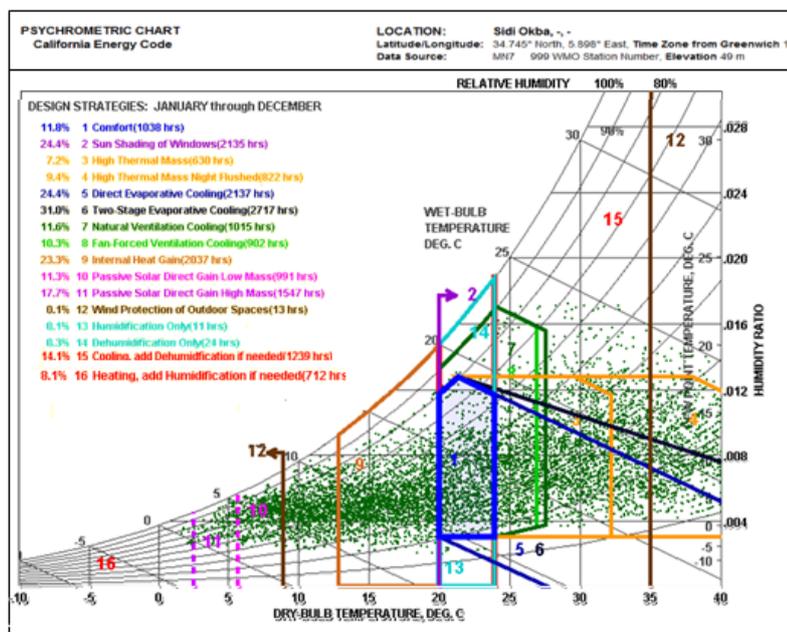


Figure. V.8 : Diagramme psychométrique de Givoni de la ville de Sidi Okba adapté par l'auteur (source : la logiciel climate consultant V 6.0)

Par l'adaptation du diagramme de Givoni au cas d'étude soit le climat chaud et aride de la ville de Sidi Okba, le diagramme fournit des données et des recommandations d'adaptions selon chaque mois de l'année comme présenté au **tableau. V.6**.

Tableau. V.6 : Les différentes recommandations tirées du diagramme de Givoni valables pour la région de Sidi Okba (source : l'auteur)

Le mois	La zone /recommandations	Le mois	La zone /recommandations
Janvier	H1 : chauffage solaire passif H2 : chauffage solaire actif ou conventionnel IG : gain interne	Juillet	I : fort inertie Refroidissement par évaporation INV : Très Fort Inertie & Ventilation Nocturne.
Février	H1 : chauffage solaire passif IG : gain interne	Aout	V : ventilation AC : refroidissement INV : Très Fort Inertie & Ventilation Nocturne.
Mars	H1 : chauffage solaire passif IG : gain interne C : confort	Septembre	C : confort V : ventilation AC : refroidissement évaporation INV : Très Fort Inertie & Ventilation Nocturne
Avril	IG : gain interne C : confort I : fort inertie	Octobre	V : ventilation AC : refroidissement évaporation INV : Très Fort Inertie & Ventilation Nocturne
Mai	C : confort V : ventilation AC : refroidissement I : fort inertie	Novembre	H1 : chauffage solaire passif IG : gain interne C : confort
Juin	I : fort inertie C : confort V : ventilation	Décembre	H1 : chauffage solaire passif IG : gain interne

V.2.3. Tables de Mahoney

Les **tables de Mahoney**² « sont une série de tables de référence d'architecture utilisées comme guide pour obtenir des bâtiments au design adapté aux conditions climatiques. Elles tirent leur nom de l'architecte Carl Mahoney qui les a créées avec John Martin Evans et Otto Königsberger. ».

Les tables de Mahoney sont utilisées pour proposer des recommandations sous forme d'aide à la conception architecturale selon un certain type de climat. Elles se basent sur les facteurs climatiques : température mensuelle, température moyenne annuelle, humidité relative et taux de précipitation. Ainsi, en complétant les tableaux selon les données climatiques de Sidi Okba, les recommandations suivantes sont fournies.

L'orientation : doit se faire suivant l'axe longitudinal Est-Ouest afin de diminuer l'exposition solaire ; une double orientation est recommandée pour favoriser les circulations d'air intermédiaire et accélérer la ventilation transversale.

Le plan de masse : doit être compacte à bâtiments introvertis avec des cours intérieures.

Les ouvertures: de dimensions variant de 25% à 40% de la surface des murs.

Les murs, planchers et toiture : construction massive ; décalage horaire (time lag) supérieur à 08 heures pour assurer une forte inertie thermique.

Les espaces extérieurs : emplacement pour le sommeil en plein air.

² Les tables de Mahoney : https://fr.wikipedia.org/wiki/Tables_de_Mahoney

V.2.4. Synthèse et recommandations

L'analyse bioclimatique qui s'est basée sur les méthodes de Givoni et Mahoney nous a permis de faire une synthèse sur les besoins en termes de conception architecturale adaptée au climat chaud et aride de Sidi Okba. Ainsi, après avoir défini la zone de confort la zone de surchauffe estivale et celle de l'inconfort hivernal, des recommandations de conception ont été déterminées.

On retiendra notamment : une orientation selon l'axe longitudinal Est-Ouest afin de diminuer l'exposition solaire avec une orientation favorable Nord –Sud ; des constructions massives ; un décalage horaire supérieur à 08 heures pour assurer une forte inertie thermique ; des plans compacts, des ratios d'ouverture moyens à grands de 25% à 40% ; et enfin, le besoin de la protection solaire à l'échelle urbaine et architecturale pour minimiser les gains thermiques extérieurs.

V.3.Sélection et analyse des bâtiments scolaires utilisés comme cas d'étude

V.3.1. Bâtiments scolaires à Biskra

Comme toutes les régions de Algérie, la conception des établissements scolaires a vu une évolution avec le temps allant des écoles coraniques, les Zaouïas et les Médersas aux collèges français introduits durant la période postcoloniale, jusqu'à l'apparition du nouvel établissement scolaire standard qui a vu le jour après l'indépendance.

Dès la première décennie de l'indépendance, l'institutionnalisation du droit à l'éducation est proclamée ; simultanément, la réalisation des écoles a dû faire face à la demande urgente et pressante pour combler le manque d'infrastructures résultant de la période coloniale et qui a été accentué du fait de la croissance démographique. Il fut alors décidé que la construction des établissements scolaires soit régie par des plans standards largement reproduit pour répondre aux critères d'économie et de rapidité d'exécution.

Selon les données de la DPAT, la wilaya de Biskra dispose actuellement de 530 établissements scolaires dont 356 écoles primaires, 127 CEM et 47 lycées. A cet égard, le Ministère de l'Education Algérienne recommande à travers le Guide des Constructions Scolaires que le bâtiment éducatif soit construit au centre de la zone la plus peuplée.

V.3.2. Enquête préliminaire sur les établissements scolaires à Biskra : critères de choix

Comme il a été mentionné précédemment, la wilaya de Biskra compte 530 établissements publics d'enseignement (primaires, moyens et secondaires). Pour des raisons de faisabilité de la recherche, il fut décidé de circonscrire l'objet d'étude aux bâtiments scolaires de type CEM et Lycée ; les écoles primaires ont donc été écartées. Cependant, du fait du nombre important des bâtiments concernés par l'étude soient 127 CEM et 47 lycées, il fallait procéder à une présélection d'un nombre restreint d'écoles dont le choix répondrait aux objectifs initiaux de la recherche. A ce titre, plusieurs critères ont été fixés qui devaient définir l'échantillon final regroupant les exemples à analyser. Finalement, les cas d'étude sélectionnés doivent être :

- Des bâtiments construits à différentes périodes et notamment illustrer différents matériaux de construction d'enveloppe.
- Des bâtiments qui offrent une diversité architecturale (typologique /spatiale...).
- Des bâtiments en cours d'exploitation pour permettre l'évaluation post occupationnelle ; ce qui élimine tous les bâtiments qui sont : abandonnés, transformés ou non-utilisés.
- La proximité des cas d'étude les uns des autres pour faciliter le déplacement entre eux lors des prises de mesures in-situ. Ceci suppose que les données sont collectées presque en même temps et donc permettent de procéder à des analyses comparatives.
- Des bâtiments qui n'ont pas fait l'objet d'études antérieures du point de vue de la performance thermique et énergétique.
- La volonté de l'administration de chaque établissement de collaborer à l'enquête notamment en autorisant l'accès aux locaux, le contact avec les utilisateurs, etc.

Sur la base de ces critères, il a été procédé à une investigation prospective couvrant l'ensemble des établissements scolaires de type CEM et Lycées de Biskra, suivie d'une analyse typologique des exemples présélectionnés dans l'aire d'étude, selon la période (coloniale, indépendance, contemporaine) et l'année de leurs réalisations. À ce titre, le travail d'investigation a été focalisé sur la collecte de documents graphiques sous forme de plans architecturaux. En outre, des visites sur terrain ont été effectuées avec prise de photos et parfois élaboration des relevés pour compléter les informations manquantes. Au total, vingt et une (21) écoles ont été visitées et analysées (**Figure V.9**).



Figure. V.9 : Les bâtiments scolaires de la présélection

À l'issue de ce travail de terrain, trois (03) bâtiments scolaires situés dans la ville de Sidi Okba ont été sélectionnés pour servir comme cas d'étude. Le **Tableau. V.7** présente les exemples choisis.

Tableau. V.7 : La situation des cas d'étude choisis

La situation par rapport la ville		
<p>Cas 01 : Etablissement scolaire moyen Chadli Ahmed</p>	<p>Cas 02 : Etablissement scolaire moyen cheikh Saleh Massoudi</p>	<p>Cas 03 : Etablissement scolaire primaire Massoudi Moustapha</p>



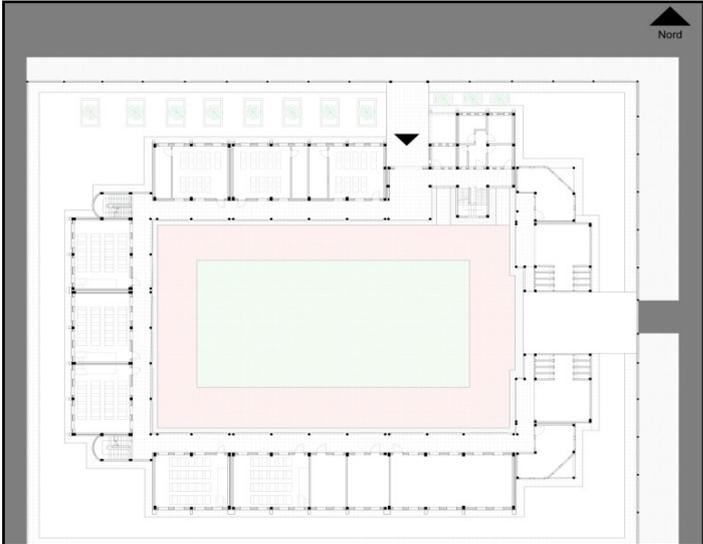
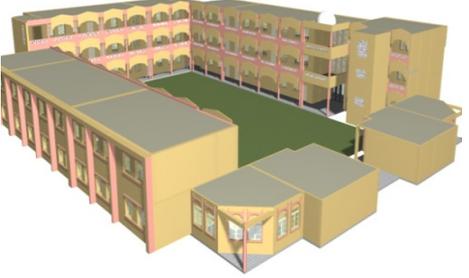
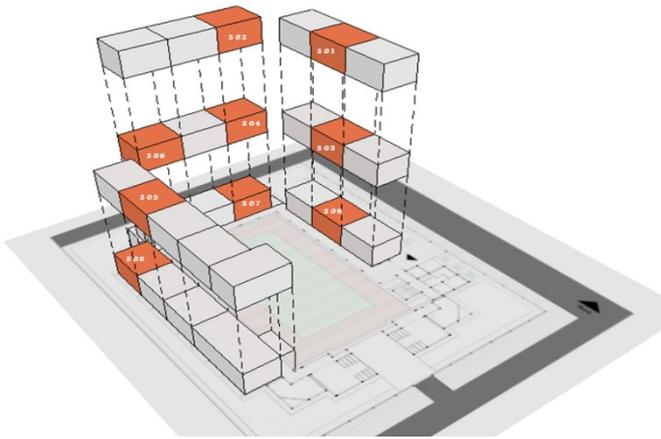
Le 1^{er} établissement scolaire est : l'établissement scolaire moyen CEM Chadli Ahmed qui est situé dans la ville de Sidi Okba à Biskra. Le bâtiment a débuté ses activités en 2017 ; il est représentatif du type de construction contemporaine. D'un point de vue structurel, la construction des murs extérieurs est en briques creuses. Tous les détails constructifs du bâtiment sont indiqués dans le tableau V.8.

Le 2^{ème} établissement scolaire est : l'établissement scolaire moyen Cheikh Saleh Massoudi qui est situé dans la ville de Sidi Okba à Biskra, le bâtiment est entré en service en 1977; il est représentatif du type postcolonial qui regroupe les constructions réalisées durant la première décennie de l'indépendance. Ses murs extérieurs sont réalisés en maçonnerie de parpaing creux. Tous les détails constructifs du bâtiment sont indiqués dans le tableau V.9.

Le 3^{ème} établissement scolaire est : l'établissement scolaire moyen Massoudi Mostapha qui est situé dans la ville de Sidi Okba à Biskra, le bâtiment est une construction coloniale qui a débuté ses activités en 1949. La construction est en murs porteurs de parpaings pleins. Tous les détails constructifs du bâtiment sont indiqués dans le tableau V.10.

V.3.3.1. Cas01 : l'établissement d'enseignement moyen : Chadli Ahmed Sidi Okba

Tableau V.8 : Détails constructifs du bâtiment représentant le 1^{er} Cas d'étude

Description architecturale et constructif de bâtiment	
Date des visites :	De 08/09/2019 à 14/09/2019; de 11/01/2020 à 17/01/2020
Situation :	Sidi Okba Biskra
Date/période de construction :	2016/2017
CARACTERISTIQUES DU BATIMENT	
La typologie :	Bâtiment à coursive
Surface :	Bâti = 910 m ² Non Bâti = 3595 m ²
Nombre des étages :	R+2
Nombre des classes :	25 salles de classe (20 salles de cours + 3 Laboratoires + 2 ateliers)
Type de structure :	Structure porteuse poteau poutre en béton armé
Couleurs et textures :	Jaunes claires et rouges avec une texture lisse
ASSEMBLAGE DU BATIMENT	
	 
<p>Les salles de classe choisies</p> 	 

V.3.3.2. Cas02 : l'établissement d'enseignement moyen : Cheikh Saleh Massoudi Sidi Okba

Tableau V.9 : Détails constructifs du bâtiment représentant le 2^{ème} Cas d'étude

Date de visite :	De 08/09/2019 à 14/09/2019 ; de 11/01/2020 à 17/01/2020	
Situation :	Sidi Okba Biskra	
Date/période de construction :	1975/1977	
CARACTERISTIQUES DU BATIMENT		
La typologie :	Bâtiment à coursive	
Surface :	Bâti = 3320 m ² Non Bâti =18492.5 m ²	
Nombre des étages :	RDC	
Nombre des classes :	21 salles de classe (18 salles du coures+amphi+3 ateliers)	
Type de structure :	Structure porteuse poteau poutre en béton armé	
ASSEMBLAGE DU BATIMENT		
		
<p>Les salles de classe choisie</p> 		
		

V.3.3.3. Cas03 : l'établissement d'enseignement moyen : **Massoudi Mostapha Sidi Okba**

Tableau V.10 :Détails constructifs du bâtiment représentant le3^{eme} Cas d'étude

Date de visite :	De 08/09/2019 à 14/09/2019 ; de 11/01/2020 à 17/01/2020	
Situation :	Sidi Okba Biskra	
Date/période de construction :	Partie ancien 2class 1949 / partie nouveau 1975	
CARACTERISTIQUES DU BATIMENT		
La typologie :	Bâtiment à coursive	
Surface :	Bâti = 925.68 m ² Non Bâti = 3668m ²	
Nombre des étages :	R+1	
Nombre des classes :	13 salles de classe	
Type de structure :	Structure porteuse poteau poutre en béton armé	
ASSEMBLAGE DU BATIMENT		
		
		
		
Les salles de classes		

Conclusion

Ce chapitre a présenté le cadre général de l'étude, notamment, les données climatiques et le contexte géographique de la région choisie pour représenter les conditions environnementales chaudes et arides. Il fait également la description architecturale et spatiale des bâtiments scolaires pris comme cas d'étude.

Dans un premier temps, le contexte géographique et climatique de la ville de Sidi Okba située dans la wilaya de Biskra dans le sud de l'Algérie, a été défini en présentant les données climatiques de la ville choisie. Dans un second temps, une étude bioclimatique a été menée afin de déterminer les potentialités de la région d'étude du point de vue des données climatiques et facteurs environnementaux et notamment connaître les périodes de confort et d'inconfort. Dans cette partie, les méthodes et les outils les plus courants ont été exploités utilisés et finalement des recommandations de conception adaptées au climat chaud et sec du contexte de l'étude ont été proposées.

Dans la dernière partie du chapitre, une étude typologique sélective a été effectuée pour sélectionner des exemples représentatifs à prendre comme cas d'étude qui soient les plus appropriés pour la recherche. L'analyse architecturale et typologique menée dans cette ville sur les différentes écoles a conduit à une première sélection de 21 établissements scolaires pouvant figurer comme cas d'étude. Une analyse plus approfondie a été conduite sur la base de documents graphiques, des pré-enquêtes, de visites de terrain, de prises de photo, etc. qui a permis de sélectionner trois (03) établissements scolaires d'enseignement moyen (CEM) en fonction de paramètres préalablement fixés, et principalement, le critère du système constructif et des matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures. Ces trois bâtiments ont fait l'objet d'une analyse architecturale afin d'identifier leurs caractéristiques architecturales et constructives lesquelles seront exploitées pour les besoins de l'étude empirique.

CHAPITRE VI :

Évaluation empirique de la performance thermique des bâtiments pris comme cas d'étude

CHAPITRE VI : Évaluation empirique de la performance thermique des bâtiments pris comme cas d'étude

Introduction

L'évaluation empirique est très importante pour l'étude des comportements thermiques des bâtiments lequel varie selon plusieurs paramètres dont les plus influents sont les caractéristiques matérielles et structurelles de l'enveloppe (matériaux, épaisseur, etc.) et les conditions climatiques dominantes (températures, humidité, vitesse du vent, précipitations, etc.). Cette évaluation est généralement effectuée dans des conditions réelles sous forme de mesures in situ, de modèles réduits, d'enquête par questionnaires, etc.

Ce chapitre est consacré à l'évaluation empirique de l'environnement thermique à l'intérieur des salles de classe de 3 bâtiments scolaires à Sidi Okba(Biskra) durant deux périodes représentant les conditions extrêmes des deux saisons estivale et hivernale. L'objectif étant l'évaluation quantitative et qualitative des conditions de confort hygrothermique dans les salles de classe qui se distinguaient principalement par les caractéristiques matérielles et structurelles de parois extérieures. Dans chaque cas d'étude les mesures ont porté sur certains paramètres de confort, notamment, les températures et l'humidité relative ; en parallèle une enquête par questionnaires administrés aux utilisateurs a été réalisée dans le but d'explorer qualitativement le confort thermique intérieur et la sensation thermique et la satisfaction des usagers. Le chapitre présente également le protocole de prises de mesure, la collecte de données et le traitement des résultats. Cette partie empirique permettra d'identifier les problèmes puis de les corriger.

VI.1. Déroulement de la campagne de mesures in situ

La campagne de mesures in situ a été réalisée dans le but d'évaluer quantitativement et qualitativement les conditions de confort hygrothermique dans les salles de classe des 3 bâtiments scolaires sélectionnés pour servir de cas d'étude dans le cadre du travail empirique. Chaque exemple retenu représente un type d'enveloppe se distinguant selon les caractéristiques matérielles et structurelles de parois extérieures des salles de classe.

VI.1.1. Etalonnage des instruments de mesure

Les instruments de mesure ont été choisis en fonction des résultats de l'état de l'art effectué sur les études précédentes qui ont indiqué le type d'instruments le plus couramment utilisés pour mesurer les paramètres physiques du confort thermique. Cependant, la disponibilité des outils et des instruments a également influé ce choix. Les différents instruments utilisés, leurs caractéristiques ainsi que les paramètres ciblés sont présentés dans le **Tableau VI.1**.

Tableau VI.1 :Les principaux instruments de mesure utilisés

L'instrument de mesure	Ses caractéristiques	Les paramètres mesurés
<p>Anémomètre Multifonction Testo 480¹</p> 	<p>Etendue de mesure Plage de = -20 à 70 ° C</p> <p>Précision ± 0.2 °C (+15 ... +30 °C) ± 0.5 °C (étendue restante)</p>	<ul style="list-style-type: none"> -La température -La température ambiante -La température surfacique -Humidité relative -Vitesse d'air -L'éclairement -Niveau de CO2 -PMV/PPD
<p>Thermomètre Infrarouge MT-4612²</p> 	<p>Etendue de mesure Plage de = -50 à 580 ° C</p> <p>Précision ± 2 ° C ou ± 2% ° C</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Température radiante surfacique

VI.1.2. Les paramètres mesurés

Pour une évaluation quantitative du confort thermique, les paramètres physiques générant les conditions de l'environnement intérieur sont :

- La température intérieure moyenne de l'air dite température ambiante (T_a) ;
- La température extérieure moyenne (T_{ext}) ;
- La température radiante moyenne des parois d'enveloppe (T_p) ;
- La température surfacique (T_s);

¹Anémomètre Multifonction Testo 480 : <https://www.testo.com/fr-FR/anemometre-multifonction-testo-480/p/0563-4800>

²Thermomètre Infrarouge MT-4612: <https://www.orbit-dz.com/product/mt-4612/>

-L'humidité relative moyenne à l'intérieur et l'extérieur (H_R).

VI.1.3. Choix des périodes de mesures

Les mesures ont été effectuées pendant deux périodes représentatives des deux principales saisons de l'année à savoir l'été et l'hiver. Chaque période de prises de mesure devait faire prévaloir les conditions extrêmes pour chaque saison, notamment, le mois, la semaine et le jour. A cet égard, après avoir analysées données métrologiques de la Sidi Okba pour les 20 dernières années (2000 – 2019), la semaine type "design week" et par la suite la journée type "design day" ont été déterminées (Voir Annexe). Cette méthode qui permet de choisir rationnellement la période la plus adéquate durant laquelle se feront les prises de mesure, est basée sur les travaux de Hong et al. (1999) cité par Khadraoui (2019). Ainsi, la période de prise des mesures a été déterminée comme suit :

-La période estivale : Septembre est le mois le plus chaud dans l'année scolaire ; la semaine type "design week" correspond à la période du 08 au 12 septembre 2019.

-La période hivernale : Janvier est le mois le plus froid dans l'année scolaire ; la semaine type "design week" s'étale du 12 au 16 janvier 2020.

VI.1.4. Le protocole de prise des mesures

-Les prises de mesures ont été effectuées pendant une semaine scolaire (durant les sessions des cours).

-Les mesures concernent toutes les journées de 08.00h du matin à 17.00h de l'après-midi.

-L'enregistrement des mesures se fait chaque 2 heures ; il est bi-horaire dans le sens où il couvre deux heures de temps (des périodes : de 08h à 10h, de 10h à 12 h ...).

-Les mesures ont été effectuées à l'intérieur et à l'extérieur de 3 salles de classes (S1, S2 et S3) selon différentes orientations et à différents niveaux.

-Les mesures ont été effectuées avec des conditions naturelles en l'absence de la climatisation, chauffage ou ventilation mécanique et avec un éclairage naturel.

-Les paramètres suivants ont été mesurés : la température de l'air extérieur (T_{ext}) ; température ambiante (T_a) ; la température surfacique d'enveloppe (T_s) ; l'humidité relative (H_R).

-Les mesures ont été effectuées dans des salles de classe naturellement ventilées.

-Les mesures ont été effectuées dans des jours ouvrables et des jours non ouvrables durant le weekend ; cela induit des mesures dans des salles de classe occupées et non occupées.

-Le choix des points de mesure a été effectué en prenant en considération plusieurs paramètres notamment : l'organisation de l'espace du cours, l'occupation, l'emplacement des ouvertures et l'orientation. La figure VI.1 montre l'emplacement des points de prises de mesure ainsi que les paramètres mesurés dans une salle de classe typique.

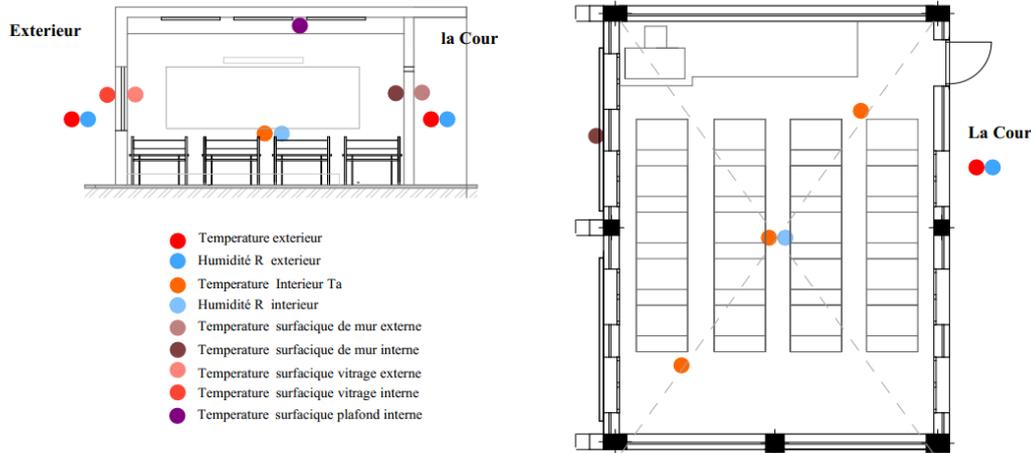


Figure VI.1 : Les points des mesures et les paramètres mesurés (source : l'auteur)

VI.1.5. Analyse et interprétation des résultats de la campagne de mesures in-situ durant la période estivale

VI.1.5.1. Résultats des mesures du Cas 01 ; CEM « Chadli Ahmed »

a- Les températures

La figure VI.2 présente les courbes des mesures de la température ambiante (Ta) et surfacique intérieure et extérieure mesurée dans l'établissement scolaire Cas 01 (B1) dans trois salles de classe (S1, S2 et S3) pendant la période estivale représentée par le 8 septembre 2019 (design day).

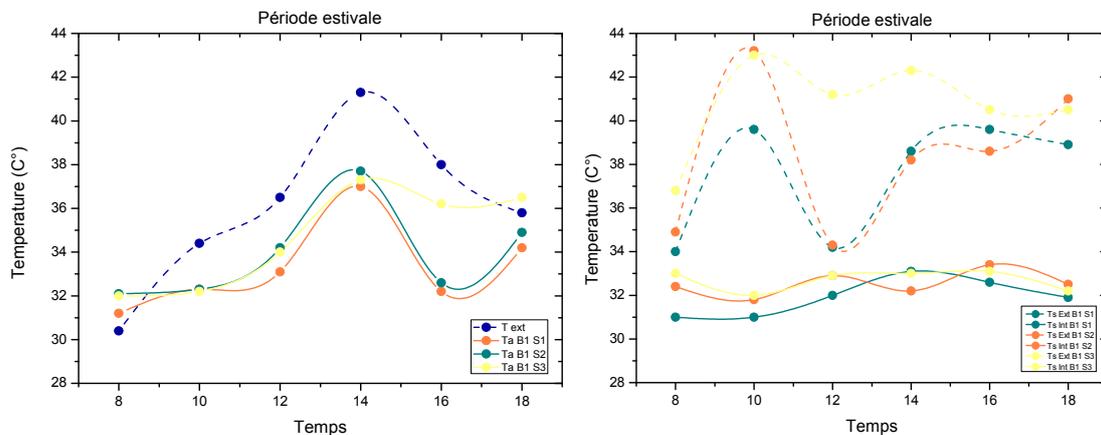


Figure VI.2 : Les courbes des températures ambiantes (à gauche) et surfaciques (à droite) dans les classes du bâtiment 1 (B1) durant la journée du 8/9/2019 (source : l'auteur)

On remarque que les températures extérieures (Text) varient de 31°C à 41.5°C avec une valeur maximale atteinte à 14.00h. Les températures ambiantes dans les trois salles de classe sont proches et varient entre 31°C et 38°C avec un maximum dans la salle 2 à 14.00 en raison de son orientation Sud. On remarque, également, que dans la salle 3 orientée Ouest, les températures sont très élevées à la fin de la journée. En générale, dans toutes les salles de classe, les températures sont hors de la zone de confort (23°C à 26°C).

Concernant les températures surfaciques (Ts), celles enregistrées à l'extérieur sont plus élevées qu'à l'intérieur ; du fait que les parois sont exposées directement aux rayons solaires comme indiqué dans le graphique (Fig. V.2). D'autre part, la salle de classe (S1) d'orientation Nord présente des valeurs (Ts) les moins élevées fluctuant entre 30°C et 39°C ; par contre, la salle (S3) d'orientation Ouest enregistre le plus haut (Ts) qui varie entre 37°C et 43°C. Parallèlement, les températures surfaciques mesurées de l'intérieur des parois, sont toujours plus basses qu'à l'extérieur et varient entre 31°C et 33°C ; les valeurs minimales variant entre 31°C et 32°C avec un max à 14.00h correspondent à S1 (orientation nord). En générale les températures surfaciques (Ts) varient en fonction de l'orientation de la paroi et son degré d'exposition solaire.

b- L'humidité Relative

La figure VI.3 présente les niveaux d'humidité relative mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des salles de classe dans l'établissement scolaire Cas 01 (B1) durant le 8 septembre 2019.

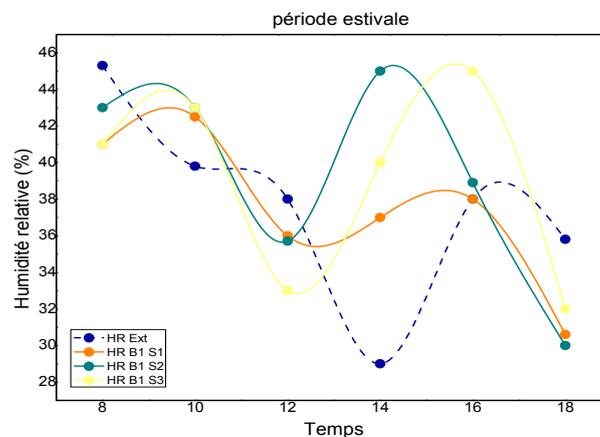


Figure VI.3 : Courbes des ratios de l'humidité relative (HR) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment 1 (B1), durant la journée du 8/9/2019 (source : l'auteur)

On remarque que les niveaux d'humidité relative mesurés à l'extérieur varient au cours de la journée entre 29% et 45% ; avec un ratio qui atteint son maximum au début de la journée 08.00h et un minimum à 14.00h au moment où le niveau d'ensoleillement est au maximum. On remarque, également, que l'humidité relative extérieure n'impacte pas l'humidité à l'intérieur des salles comme indiqué dans le graphique (Fig. V.3). En effet, à 14.00h pendant que l'humidité relative est au minimum à l'intérieur avec 29% ; elle est au niveau maximal pour la salle 2. D'autre part, les niveaux d'humidité relative sont les plus élevés dans la salle qui porte une orientation Sud en comparaison avec les deux autres salles.

VI.1.5.1. Résultats des mesures du Cas 02 ; CEM « Cheikh Saleh »

a- Les températures

La figure VI.4 présente les résultats des mesures de la température ambiante et surfacique intérieure et extérieure relativement à l'établissement scolaire Cas 02 (B2) pendant la période estivale représentée par le 9 septembre 2019.

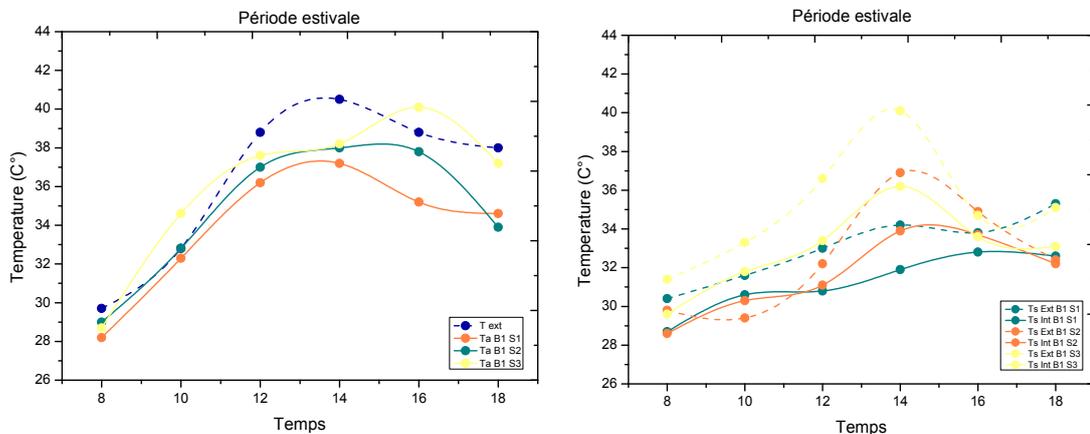


Figure VI.4 : Les courbes des températures ambiante (à gauche) et surfacique (à droite) dans les classes du bâtiment 2 (B2) durant la journée du 9/9/2019 (source : l'auteur)

Les courbes indiquent une variation entre 29.5°C et 41.5°C des températures extérieures (Text) avec un pic atteint à 14.00h ; les températures ambiantes dans les trois salles de classe sont proches et varient entre 28°C et 40°C. Le maximum est enregistré dans la salle S3 à 14.00 qui présente deux façades orientées Ouest (vers l'extérieur) et Est (vers la cour). On remarque aussi que dans la salle S1 orientée Nord, les températures ambiantes sont les moins élevées et varient entre 28°C et 37°C au maximum. En général, les températures dans toutes les salles sont hors de la zone de confort (23°C à 26°C).

Les températures surfaciques mesurées à l'extérieur(T_s), pour leur part, sont plus élevées que celles enregistrées à l'intérieur et varient entre 28°C mesurées au niveau de la façade Sud de S2 à 8.00h du matin et 40°C au niveau de la façade Ouest de S3. Par contre, la salle S1 d'orientation Nord enregistre (T_s) la moins élevée variant entre 28°C et 33°C.

b- L'humidité relative

La figure VI.5 présente les niveaux d'humidité relative mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des salles de classe dans l'établissement scolaire Cas 02 (B2) en le 9 septembre 2019.

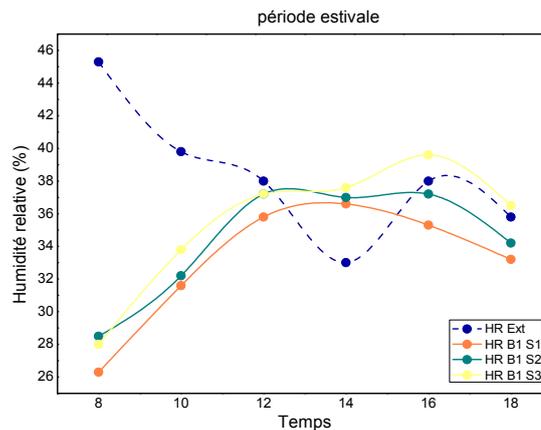


Figure VI.5 : Courbes des ratios de l'humidité relative (H_R) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment 1 (B2), durant la journée du 9/9/2019 (source : l'auteur)

Une lecture des courbes montre que les niveaux d'humidité relative extérieure varient au cours de la journée entre 29% et 45% ; avec un maximum au début de la journée vers 08.00h et un minimum à 14.00h pendant que l'ensoleillement est au maximum de son intensité. La figure indique aussi que l'humidité relative extérieure n'impacte pas l'humidité à l'intérieur des salles ; ainsi, à 14.00h l'humidité relative est au minimum avec 29% alors qu'à l'intérieur elle est au niveau maximal pour S2. De plus, les niveaux d'humidité relative les plus élevés sont atteints dans les salles orientées Sud et Ouest en comparaison avec la salle d'orientation Nord.

VI.1.5.1. Résultats des mesures Cas 03 ; CEM « Massoudi Mustapha »

a- Les températures

La figure VI.6 présente les résultats des mesures de la température ambiante et surfacique intérieure et extérieure mesurée dans l'établissement scolaire Cas 03 (B3) pour la journée du 10 septembre 2019.

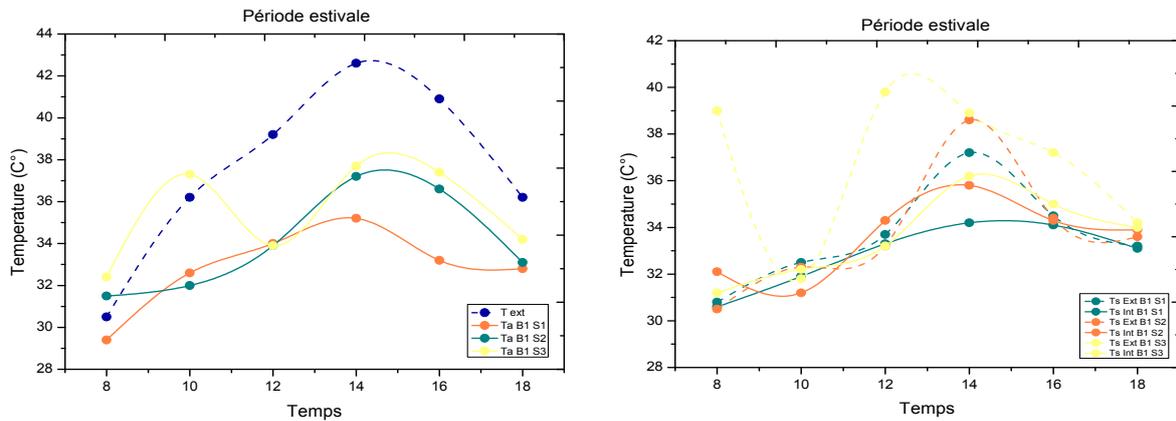


Figure VI.6 : Les courbes des températures ambiante (à gauche) et surfacique (à droite) dans les classes du bâtiment3 (B3) durant la journée du 10/9/2019 (source : l'auteur)

Les courbes indiquent une variation des températures extérieures (Text) entre 29.5°C à 41.5°C ; avec une valeur maximale atteinte entre 14.00h et 16.00h. Les températures ambiantes dans les trois salles de classe varient entre 29.5°C et 38°C avec des pics atteints à 10.00h et 15.00h pour la salle S3 et un autre enregistré également à 15.00h pour la salle S2. A l'opposé, les valeurs minimales de Ta correspondent à S1 du fait de son orientation Nord ; les températures ambiantes fluctuaient entre 28°C et 34°C. Cependant, pour ce troisième cas d'étude, toutes les salles indiquaient des températures hors de la zone de confort. Pour ce qui est des températures surfaciques (Ts), la figure VI.6 montre que les mesures effectuées sur les surfaces externes des parois indiquent des valeurs plus hautes qu'à l'intérieur et varient entre un minimum de 30°C mesuré au niveau de la façade Sud de S2 à 8.00h du matin et un maximum de 40°C correspondant à la façade Ouest de S3.

b- L'humidité relative

La figure VI.7 présente les niveaux d'humidité relative mesurés à l'intérieur et extérieur des salles de classe dans l'établissement scolaire Cas 03 (B3) le 10/09/2019.

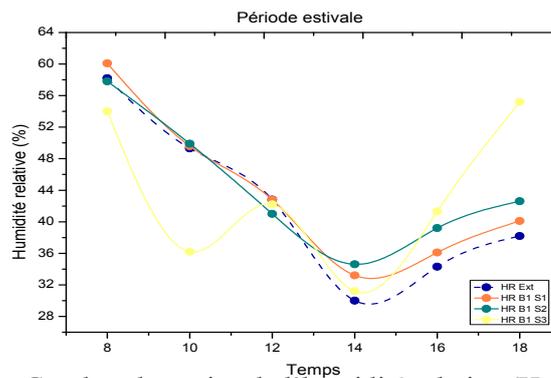


Figure VI.7 : Courbes des ratios de l'humidité relative (H_R) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment3 (B3), durant la journée du 10/9/2019 (source : l'auteur)

Après analyse des courbes, il apparaît que les niveaux d'humidité relative extérieure varient au cours de la journée entre 29% et 46% avec un maximum en début de journée vers 08.00h et un minimum atteint vers 14.00h au moment où le niveau d'ensoleillement est au maximum. Dans ce cas d'étude, on remarque également que l'humidité relative extérieure et intérieure fluctuent de la même façon avec des ratios maximaux au début et fin de la journée quand l'ensoleillement est relativement peu intense ; et des ratios minimaux durant la période s'étalant de 14.00 à 16.00 h. Cependant, durant la majorité des heures de la journée, l'humidité est dans la zone de confort.

VI.1.6. Analyse et interprétation des résultats de la campagne de mesures in-situ durant la période hivernale

VI.1.5.1. Résultats des mesures du Cas 01 ; CEM «Chadli Ahmed»

a- Les températures

Les graphes de la figure VI.8 présentent les résultats des mesures hivernales des températures ambiante et surfacique intérieure et extérieure mesurées dans l'établissement scolaire Cas 01 (B1) dans trois salles de classe (S1, S2 et S3) pendant la période hivernale représentée par le 12 janvier 2020 (design day).

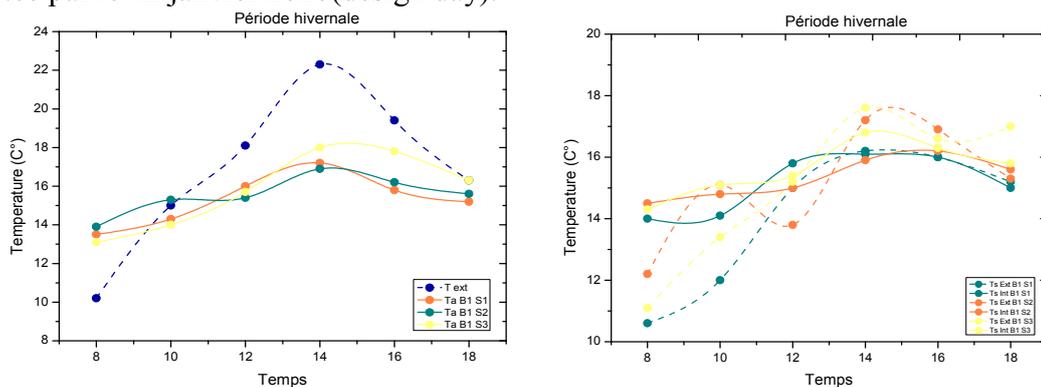


Figure VI.8 : Les courbes des températures ambiante (gauche) et surfacique (droite) dans les classes du bâtiment1 (B1) durant la journée du 12/01/2020 (source : l'auteur)

Les valeurs de la température extérieure (Text) moyenne varient au cours du jour entre 10°C et 21°C, les valeurs maximales sont enregistrées l'après-midi de 14.00h à 16.00h. Les températures ambiantes (Ta) dans les trois salles de classe sont proches et varient de 13.5°C à 18°C ; le maximum correspond à la salle S3 durant la période s'étalant de 14.00h à 16.00h. La salle S1 qui correspond à une orientation Nord présente les températures ambiantes les plus basses entre 13°C et 15°C au maximum presque stable toute la journée. En générale, pour les trois bâtiments et dans toutes les salles examinées, les

températures étaient en dehors de la zone de confort qui s'étale de 20°C à 24°C selon le diagramme de Givoni.

Concernant les températures surfaciques (T_s), on remarque que les températures de surfaces intérieures sont plus élevées que celles des surfaces extérieures en début de journée à cause de l'impact de l'inertie thermique qui permet à la paroi d'emmagasiner la chaleur et de maintenir la surface interne à une température supérieure à celle de l'extérieur. Vers midi les températures surfaciques extérieures et intérieures sont presque égales ou avec une légère différence de 0.5°C ; à partir de 14.00h les T_s extérieures deviennent plus élevées que T_s intérieures en raison de l'exposition solaire.

b- L'humidité relative

Pour le l'établissement scolaire pris comme cas d'étude N01 (B1), les niveaux d'humidité relative durant la période hivernale sont mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des 3 salles de classe (S1, S2 et S3) durant le 12 janvier 2020 (design day).

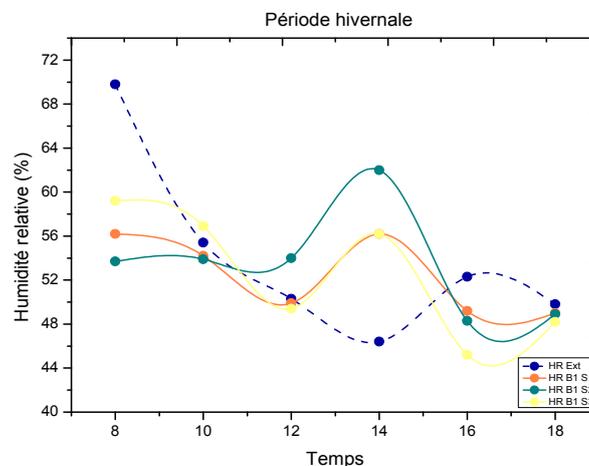


Figure VI.9 : Courbes des ratios de l'humidité relative (H_R) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du Bâtiment1 (B1), durant la journée du 12/1/2020 (source : l'auteur)

A partir des courbes présentées dans de la figure VI.9, il apparaît que les niveaux d'humidité relative extérieure varient au cours du jour entre 48% et 69% avec un maximum en début de journée à 08.00h et un minimum à 14.00h quand le niveau d'ensoleillement est au maximum. L'humidité relative à l'intérieur est élevée en début de journée et atteint des niveaux maximaux vers l'après-midi dans les trois salles de classe ; la salle S3 indique un niveau maximal de (H_R) de 62% et les conditions de confort ne sont pas réalisées pour B1.

VI.1.5.1. Résultats des mesures Cas 02 ; CEM « Cheikh Saleh »

a- Les températures

Les graphes de la figure VI.10 présentent les résultats des mesures hivernales des températures ambiante et surfacique intérieure et extérieure mesurées dans l'établissement scolaire Cas 02 (B2) dans trois salles de classe (S1, S2 et S3) pendant la période hivernale représentée par le 13 janvier 2020 (design day).

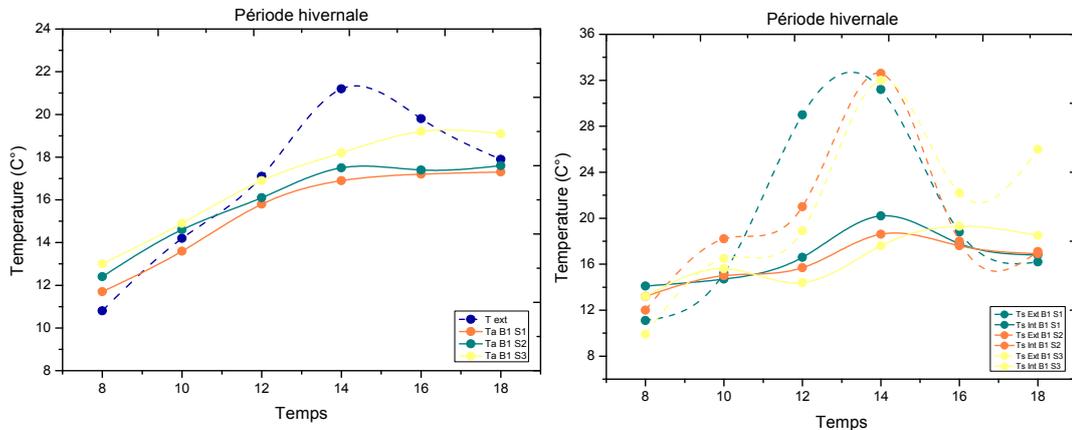


Figure VI.10 : Les courbes des températures ambiante (gauche) et surfacique (droite) dans les classes du bâtiment2 (B2) durant la journée du 13/01/2020 (source : l'auteur)

On remarque que les valeurs des températures extérieures (Text) moyennes varient au cours de la journée entre 10°C et 21°C avec un maximum de 14.00h à 16.00h. Les températures ambiantes dans les trois salles de classe sont proches et varient entre 11°C et 19°C avec un maximum de 16.00h à 18.00h pour la salle S3 orientée Ouest. A l'opposé, la salle S1 qui est orientée Nord enregistre les températures ambiantes les plus basses entre 11°C et 17°C. En générale, toutes les salles sont loin d'assurer les conditions de confort qui nécessite des températures de l'ordre de 23°C à 26°C d'après la zone de confort du diagramme de Givoni. Concernant les températures surfaciques (Ts), on remarque que les températures de surfaces intérieures sont plus élevées que celles de l'extérieur pour les mêmes raisons mentionnées pour le bâtiment B2. D'autre part, à partir de midi, les températures surfaciques extérieures commencent à monter pour atteindre des niveaux maximaux de 33°C en raison de l'exposition solaire.

b- L'humidité relative

La figure VI.11 présente les niveaux d'humidité relative hivernale mesurés à l'intérieur et à l'extérieur de 3 salles de classe (S1, S2 et S3) durant la journée du 13/01/2020.

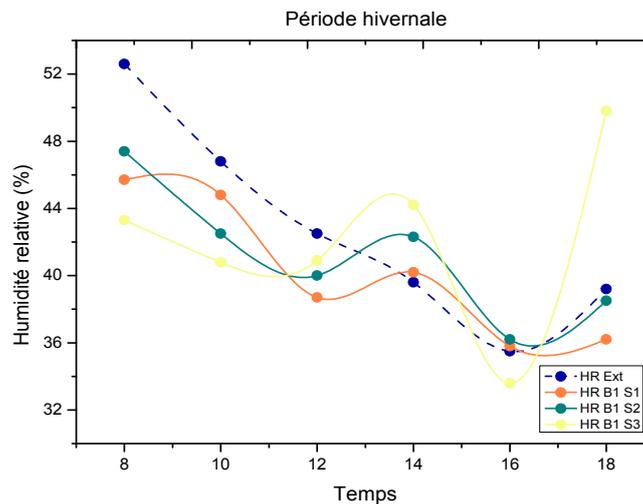


Figure VI.11 : Courbes des ratios de l'humidité relative (H_R) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du Bâtiment2 (B2), durant le 13/1/2020 (source : l'auteur)

On remarque que les niveaux d'humidité relative extérieure varient au cours de la journée entre 46% et 7% mesurés respectivement à 08.00h et 14.00h. L'humidité relative à l'intérieur est relativement élevée en début de la journée et atteint des niveaux maximaux de 50% dans les trois salles de classe ; par contre, le ratio est le plus bas vers 12.00h, car les classes sont vides du fait de la récréation et de la pause déjeuner.

VI.1.5.1. Résultats des mesures pour le Cas 03 ; CEM «Massoudi Mustapha »

a- Les températures

La figure VI.12 présente les mesures hivernales des températures ambiantes et surfaciques intérieures et extérieures effectuées dans les salles de classe de (B3) au cours de la journée du 14/1/2020.

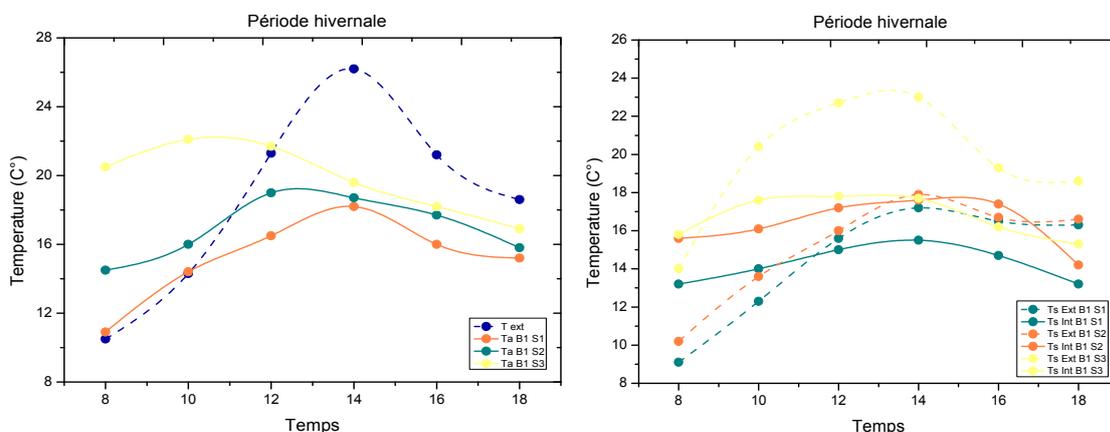


Figure VI.12 : Les courbes des températures ambiante (gauche) et surfacique (droite) dans les classes du bâtiment1 (B3) durant la journée du 14/01/2020 (source : l'auteur)

Les températures ambiantes dans les trois salles de classe sont proches et varient entre 11°C et 22 °C ; le maximum est atteint le matin dans la salle 3 durant la période de 10.00h à 12.00h. La salle 1 qui est orientée Nord enregistre les températures ambiantes les plus basses entre 11°C et 18°C. En générale, les températures obtenues dans toutes les salles sont hors de la zone de confort. Concernant les températures surfaciques (Ts), on remarque que les températures de surfaces intérieures ont plus élevées qu'à l'extérieur en début de journée.

b- L'humidité relative

La figure VI.13 présente les niveaux d'humidité hivernale mesurés à l'intérieur et à l'extérieur de 3 salles de classe (S1, S2 et S3) durant la journée du 14/01/2020.

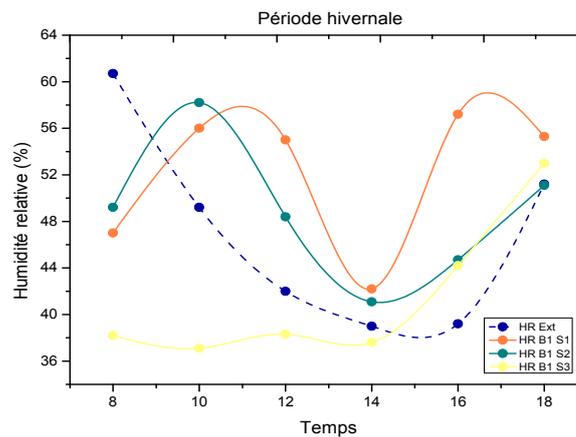


Figure VI.13 : Courbes des ratios de l'humidité relative (H_R) mesurés à l'intérieur et à l'extérieur des classes du bâtiment 3 (B3), durant le 14/1/2020 (source : l'auteur)

L'humidité relative à l'intérieur est relativement élevée vers 10.00h et 16.00h atteignant des niveaux maximaux jusqu'à 60% dans les trois salles de classe ; alors que les ratios les plus bas de l'ordre de 36% sont enregistrés en début et vers la fin de la journée et durant la récréation et la pause déjeuner vers 12.00h. Dans la salle 3 orientée Est-Ouest l'humidité relative est basse et presque stable de l'ordre de 36% toute la période matinale en raison de l'exposition solaire direct de cette salle.

VI.1.7. Etude comparative des résultats set synthèse générale

Pour comparer la performance thermique des trois bâtiments étudiés en faisant prévaloir le principal critère qui les distingue à savoir leurs matériaux d'enveloppe, une salle de classe représentative de chaque bâtiment a été choisie en veillant à ce que les trois salles de classe qui seront comparées soient dans les mêmes conditions en termes d'orientation, de localisation et d'occupation. Ainsi, en neutralisant toutes les autres

variables, l'impact des différents matériaux d'enveloppe relativement aux deux saisons de mesures, a pu être étudié.

VI.1.7. 1. Impact des matériaux d'enveloppe sur la température ambiante Ta

La figure VI.14 présente les résultats de l'étude comparative des températures ambiantes mesurées à l'intérieur des salles de classe représentatives des trois bâtiments et soumises aux mêmes conditions à l'exception du système constructif et des matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures.

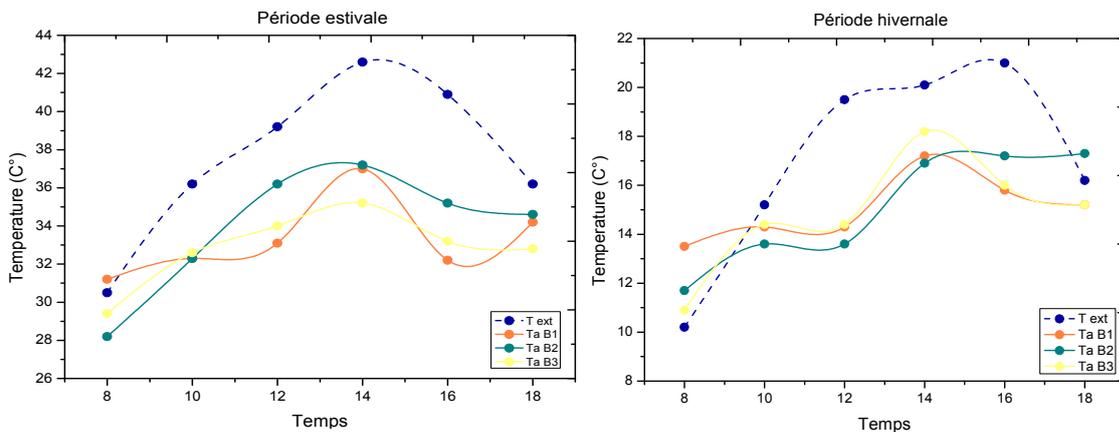


Figure VI.14 : Comparaison des températures ambiantes pour les trois bâtiments.

A partir de la lecture des courbes correspondant à Ta durant la période estivale, il apparaît que les valeurs de Ta les plus basses pendant la majorité de la journée sont enregistrées dans le bâtiment B3 dont les parois extérieures sont construites en blocs de parpaings pleins. Ainsi, la salle de classe de B3 admet une valeur Ta maximal de 35°C à 14.00h et présente une meilleure performance en comparaison avec les deux autres systèmes constructif et matériaux utilisés au niveau des parois extérieures. Cependant, les 3 bâtiments ne parviennent pas à atteindre la zone de confort thermique pendant période l'estivale.

Pour la période hivernale, les températures ambiantes dans les trois bâtiments varient de manière similaire ; les valeurs de Ta sont au plus bas tôt le matin et élevées durant l'après-midi. Le bâtiment B1 dont la paroi extérieure est en briques creuses donne les meilleurs résultats pour Ta en comparaison avec les 2 autres avec une Ta presque stable entre 14°C. Le bâtiment B3, quant à lui, présente des valeurs de Ta similaires à B1 sauf en début de matinée où des valeurs de Ta sont basses (10°C). Enfin, le bâtiment B2 dont les parois extérieures sont construites en parpaing creux présente des valeurs de Ta les plus basses durant la matinée ; mais ces valeurs commencent à s'élever progressivement pour

atteindre 18°C vers la fin de l'après-midi. Malheureusement, les 3 bâtiments ne parviennent pas à atteindre la zone de confort thermique pendant période hivernale.

VI.1.7. 2.Impact des matériaux d'enveloppe sur la température surfacique Ts

La figure VI.15 présente les valeurs des mesures des températures surfaciques intérieures et extérieures effectuées au niveau des salles de classe représentatives des trois bâtiments se distinguant par leur système constructif et les matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures.

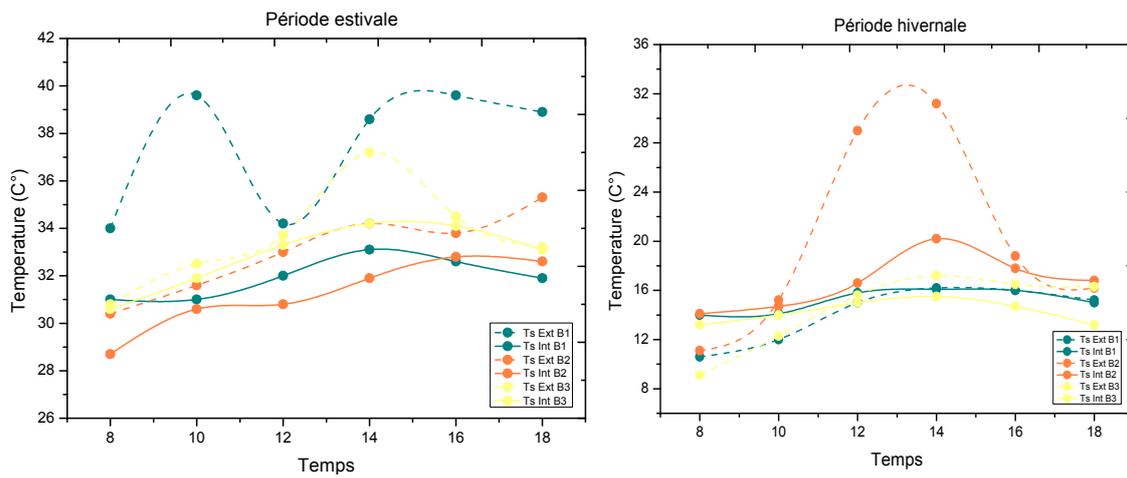


Figure VI.15 : Comparaison des températures surfaciques pour les trois bâtiments.

Pour la période estivale, l'analyse comparative entre les courbes des températures surfaciques indique que le bâtiment B1 (brique creuse) et le bâtiment B2 (parpaing creux) ont des comportements similaires en termes de leurs enveloppes respectives avec des Ts intérieures pendant la journée variant de 29°C à 33°C. De son côté, la paroi extérieure du bâtiment B2 présente des températures surfaciques les plus stables même si sa face externe enregistre les températures les plus basses ; ce qui signifie que l'enveloppe du bâtiment B2 est la plus isolée et la plus performante pendant l'été.

Pour la période hivernale, l'analyse comparative montre que presque tous les bâtiments ont des températures surfaciques basses durant une grande partie de la journée avec des Ts max de 14°C. Cependant, le bâtiment B2 qui se caractérise par une double paroi en parpaing creux présente des valeurs de Ts extérieure assez élevées atteignant à 13.00h une valeur maximale de 35°C ; ce qui impacte les Ts intérieures qui enregistrent une valeur maximale de 21°C à la même période.

VI.1.7. 3. Impact des matériaux de l'enveloppe sur l'humidité relative (H_R)

La figure VI.16 présente des résultats de l'étude comparative relative aux niveaux d'humidité relative mesurés dans les salles de classe représentatives des trois bâtiments et soumises aux mêmes conditions à l'exception du système constructif et des matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures.

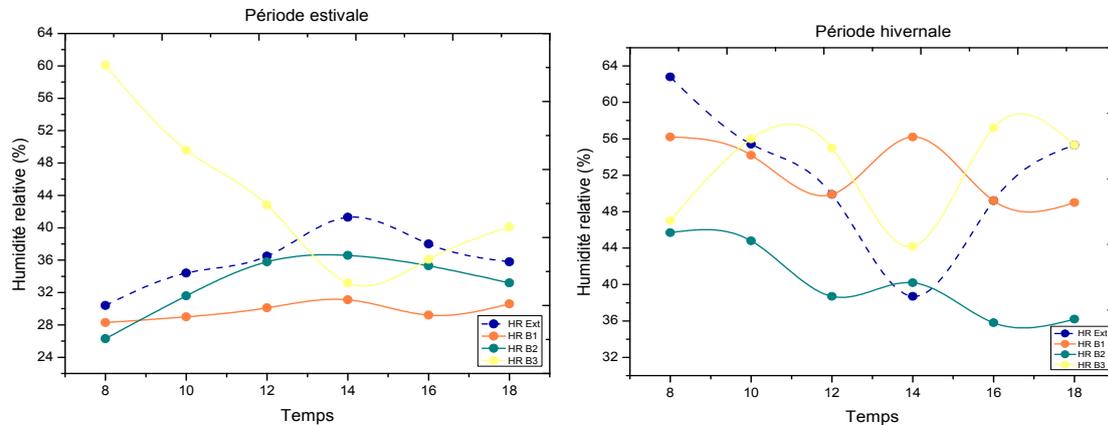


Figure VI.15 : Comparaison des humidités relatives mesurées dans les trois bâtiments durant les deux périodes estivale et hivernale.

A partir de la lecture des courbes correspondant à HR durant la période estivale, il apparaît que les niveaux d'humidité sont généralement assez bas à l'intérieur des bâtiments pendant la journée et hors de la zone de confort à l'exception du bâtiment B3 qui enregistre des niveaux d'humidité confortable pendant la matinée.

Pour la période hivernale, les niveaux d'humidité relative à l'intérieur des bâtiments varient entre 35% et 58%. Les bâtiments B1 et B3 sont dans la zone de confort avec des niveaux de HR entre 46% et 58% durant la matinée et en fin de journée. Le bâtiment B2 présente des niveaux d'humidité réduits pendant toute la journée et hors la zone de confort.

VI.1.7. 4. Synthèse générale

D'après l'analyse de la performance thermique des différents bâtiments sélectionnés pour représenter l'utilisation de système constructifs et de matériaux différents au niveau des parois extérieures, et par référence aux exigences de confort thermique du climat chaud et aride, les remarques suivantes sont à retenir :

- Les trois bâtiments n'ont pas réussi à atteindre les conditions de confort thermique que ce soit pour la saison estivale ou hivernale ; les salles de cours présentent une ambiance thermique inconfortable pratiquement tout au long de la journée.
- Les matériaux d'enveloppe influencent directement la température ambiante et surfacique et par conséquent le confort thermique
- L'orientation des bâtiments, a un grand impact sur la température ambiante et surfacique et implicitement le confort thermique.
- La température des parois extérieures, a un impact sur celle des parois intérieures par l'effet de transfert de chaleur.
- Le bâtiment avec une enveloppe en brique creuse présente un comportement thermique assez stable par rapport aux deux autres bâtiments respectivement construits en parpaing creux et parpaing plein mais les 3 bâtiments restent incapables d'assurer le confort thermique.
- Les murs doubles et isolés sont plus performants que des murs porteurs en maçonnerie de parpaings pleins et des murs à simples parois.

VI.2. L'enquête par questionnaire : une évaluation post-occupationnelle

VI.2.1. La conception du questionnaire

Une évaluation par questionnaire a été effectuée dans les établissements scolaires choisis pour investiguer la sensation et la satisfaction thermique des usagers. Le questionnaire a été distribué aux usagers des bâtiments scolaires, notamment, les élèves et les enseignants pendant les séances de cours et durant les journées des prises de mesure estivale et hivernale. L'élaboration du questionnaire s'est basée sur une revue de la littérature en consultant des études précédentes. Il a été développé en tenant compte du fait qu'il sera distribué aux élèves des établissements scolaires primaires et moyens, autrement dit, il vise des enfants âgés de 6 à 16 ans. Avant de commencer l'enquête par questionnaire, une première version du formulaire de questions a été testée auprès d'un échantillon de taille réduite constitué principalement d'élèves faisant partie de nos connaissances (proches, amis, voisins, ...) pour s'assurer de la clarté des questions, et éventuellement corriger les parties qui présenteraient des ambiguïtés où qui seraient difficiles à comprendre. En général, la conception du questionnaire a tenu compte des règles suivantes :

- Des questions courtes et directes.
- Des questions avec des expressions simples et précises.

- Des questions adaptées au vocabulaire des enfants âgés de 6 à 16 ans avec un langage simple et non-formel.
- Des questions fermées, ou présentant des choix ; en évitant le plus possible les questions à réponse ouverte.
- Des questionnaires rédigés en arabe qui est la langue maternelle des élèves.
- Des questions animées avec des couleurs, illustrations schématiques, et des figures avec un format papier et crayon comme illustré par la figure VI.16.

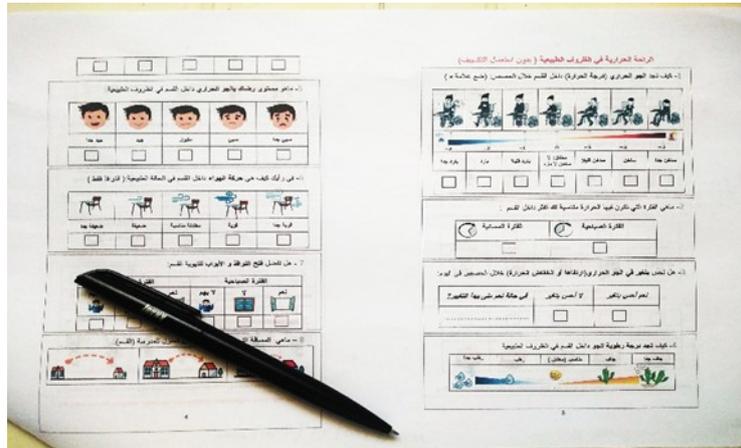


Figure VI.16 : Exemple de questionnaire remis aux élèves.

En outre, avant chaque séance de distribution des questionnaires, des consignes expliquant l'objectif de l'étude et des recommandations pour les élèves ont été promulguées. Nous avons insisté sur le fait que toutes les réponses doivent être authentiques et non-influencées par les réponses de quelqu'un d'autre.

Le questionnaire final qui a été distribué est composé de 25 questions de type fermé ; il était principalement destiné aux élèves ; cependant, 8 autres questions ont été ajoutées à l'intention des enseignants. En effet, pour examiner certains aspects en relation avec la sensation de confort thermique et par rapport auxquels les élèves risquaient de ne pas répondre, des questions liées au confort et à sa relation avec les performances scolaires de l'élève et l'efficacité énergétique, ont été ajoutées et adressées aux enseignants.

Après l'avoir testé et arrangé, le questionnaire dans sa version définitive comporte cinq parties (rubriques) correspondant aux aspects et thèmes suivants (voir Annexe D) :

1-Des informations générales sur le concerné en tant qu'usager d'espace : élève, enseignant (le sexe, l'âge et la place occupée dans la salle de classe).

2-Evaluation de la sensation du confort thermique dans les conditions naturelles (sans climatisation ou chauffage) pendant les séances de cours relativement aux paramètres thermiques incluant : la température ambiante et ses variations, l'humidité relative ressentie, la vitesse et qualité de l'air, ainsi que : type d'activité physique avant d'entrer en classe pour déterminer le taux métabolique, et le niveau vestimentaire.

3-Evaluation de la sensation du confort thermique avec l'utilisation des appareils de climatisation ou chauffage dans la classe pendant les séances de cours.

4-Sensation du confort global dans la salle de classe : thermique, visuel, lumineux, acoustique. Le paramètre le plus influent de la sensation de confort ; les sources inconfort éventuelles et leur effet sur la concentration ; enfin, les stratégies d'adaptations pour atteindre le confort désiré.

5 –Conditions de confort et sa relation avec les performances scolaires de l'élève et l'efficacité énergétique (questions réservées aux enseignants).

Il faut également signaler que le questionnaire a été conçu selon l'échelle ASHRAE et le modèle de Fanger pour évaluer l'environnement thermique intérieur et en utilisant l'approche adaptative du confort thermique

VI.2.2. Choix de l'échantillon

Après la pré-enquête et les visites préalables des bâtiments scolaires choisis comme cas d'étude, le questionnaire a été administré aux élèves et enseignants présents dans la salle de classe aux moments des prises de mesures. Le tableau VI.2 présente le questionnaire final.

Tableau .VI.2 : Le questionnaire administré : distribution, fiabilité et taille de l'échantillon

Nombre		Salle 01		Salle 02		Salle 03		Total Fiable	
Taille et fiabilité de l'échantillon Cas 01	Période	Eté	Hiver	Eté	Hiver	Eté	Hiver	Eté	Hiver
	Exclus	4	5	1	2	7	5	101	101
	Valide	35	32	36	36	30	33		
	Total	39	37	37	38	37	35		
Taille et fiabilité de l'échantillon Cas 02	Exclus	1	1	0	2	5	8	113	97
	Valide	39	34	38	33	36	30		
	Total	40	35	38	35	41	38		
Taille et fiabilité de l'échantillon Cas 03	Exclus	6	10	6	2	3	2	67	66
	Valide	24	20	21	25	22	21		
	Total	30	30	27	27	25	23		
Nombre final de questionnaires fiables à traiter =								281	264

VI.2.3. Déroulement de l'enquête

Le bon déroulement de l'enquête par questionnaire ne pouvait pas être envisagé sans la collaboration des enseignants, des directeurs et du personnel administratif des trois (03) établissements scolaires choisis comme cas d'étude et les neuf (09) salles de classe où ont eu lieu les prises de mesures. D'autres précautions et dispositions ont été suivies, notamment :

- Pour chaque établissement, la période de la distribution des questionnaires correspond à une journée-type choisie dans la semaine représentative du mois le plus chaud (saison estivale) et celui le plus froid (saison hivernale) relativement à l'année scolaire. La journée-type est déterminée en appliquant la méthode du «design week» et «design day» de sorte que le questionnaire soit complété en parallèle avec les mesures *in situ*. Finalement, les journées choisies étaient les 08,09 et 10 Septembre 2019 pour la période estivale, et les 12,13 et 14 de Janvier 2020 pour la période hivernale en consacrant une journée pour chaque établissement.
- Les questionnaires ont été distribués en notre présence et sous notre supervision directe.
- Les questions ont été expliquées une par une et nous avons insistées pour faire comprendre aux élèves qu'il ne s'agissait pas d'un test et qu'il n'y avait pas de mauvaises réponses.
- Les questionnaires sont été distribués lors d'une session de classe à 09h00.
- Les questionnaires ont été collectés le jour même.
- La sélection des salles de classe a été effectuée en tenant compte du niveau scolaire le plus élevé (les élèves les plus âgé sont été questionnés). On a également à ce que la distribution des questionnaires pour la période estivale et hivernale soit réalisée dans les mêmes classes avec les mêmes personnes.
- Le traitement des résultats a été manuel et les graphes ont été produits à l'aide de logiciels graphiques.

VI.2.4. Analyse et interprétation des résultats de l'enquête par questionnaires

Les résultats sont présentés sous forme de graphique en utilisant le logiciel « Microsoft Office Excel » et « Originlab Pro 8 ». Parmi les 314 questionnaires qui ont été distribués, le nombre final des questionnaires fiables pour le traitement a été arrêté à

281 questionnaires destinés aux élèves soit 89 %, et 11 questionnaires pour les enseignants soit 4%.

VI.2.4.1. Information générale : genre et âge des questionnés

Parmi les 281 élèves questionnés 64% étaient des filles et 36% étaient des garçons, les deux catégories présentaient une moyenne d'âge de 14 ans. La figure VI.17 présente un échantillon des groupes d'élèves questionnés.



Figure VI.17 : Echantillons des groupes d'élèves questionnés.

VI.2.4.2. Les paramètres liés à l'individu comme facteurs influençant le confort

VI.2.4.2. 1. Métabolisme et activité physique

La figure VI.18 présente le résultat de l'état avec lequel l'élève arrive à l'école pour déterminer son niveau métabolique. Plusieurs alternatives étaient possibles, notamment : venir en marchant (à pied), venir en courant (courir), venir en pédalant (à vélo) et enfin, venir en voiture (passager).

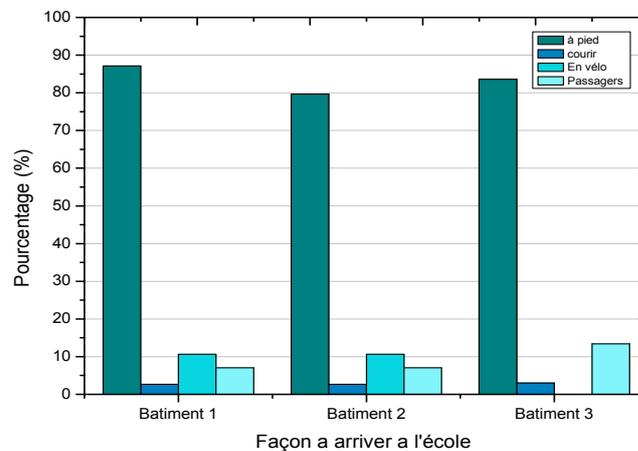


Figure VI.18 : Niveau d'activité avant d'arriver à l'école.

Comme présenté dans la figure IV.18, la majorité des élèves (soit 79.64 %) arrivent à l'école à pied; cela correspond à une valeur métabolique de 3met. En comparaison, le travail scolaire a une valeur métabolique de 1.2 met (lecture, assis, debout, mouvements légers). Les élèves ont été également questionnés sur la distance parcourue entre leurs maisons et l'école ; la majorité (78%) a répondu que le trajet était court et que l'école était proche de leurs maisons. A partir de cette rubrique, le taux métabolique a été déterminé en fonction du type d'activité en classe. Par conséquent, les paramètres personnels et leur impact sur la sensation thermique des élèves sont été neutralisés.

VI.2.4.2. 2.L'habillement et le niveau vestimentaire

Pour répondre à la question de l'habillement, les répondants devaient informer sur les vêtements qu'ils ont l'habitude de porter dans la classe dans les deux saisons en faisant leur choix dans une liste qui leur est présentée(voir tableau des choix des vêtements dans le questionnaire en Annexe).Ainsi, pour la saison chaude, la totalité des répondants ont choisi des vêtements légers avec un clo totale de 0.6 comme et des vêtements très lourds avec un clo totale de 1.2à 2clo dans la saison froide pour assurer leur confort thermique ; ce qui signifie que les conditions de confort thermique ne sont pas satisfaites dans tous les bâtiments pendant toute l'année.

VI.2.4.3. Evaluation des paramètres physiques du confort thermique dans les conditions naturelles

VI.2.4.3.1. Appréciation de l'environnement thermique

Comme illustré par la figure VI.19, la majorité des utilisateurs ont répondu que durant la saison chaude, ils ressentaient des environnements thermiques très chauds à chauds dans les 3 bâtiments. D'autre part, 68.08 % ont ressenti un environnement thermique très chaud dans le bâtiment B3. Pendant la saison froide, la majorité des répondants qualifient l'environnement thermique comme très froid ; alors que 73.72 % considèrent qu'il fait froid dans les 3 bâtiments.

Pour la période estivale, les résultats montrent que la majorité ont voté pour une sensation de chaleur avec des pourcentages compris entre 50 % et 90,47 % avec une moyenne PMV égale à 2,48 ; le bâtiment B3 a obtenu le PMV le plus élevé de 2,9 ce qui indique un pourcentage d'insatisfaction de plus de 95% des répondants. Pendant la journée d'hiver, la plupart des utilisateurs de la classe ont voté pour une sensation de froid à

légèrement frais avec un PMV moyen de -2,56 indiquant que près de 90 % étaient insatisfaits des niveaux de température basse.

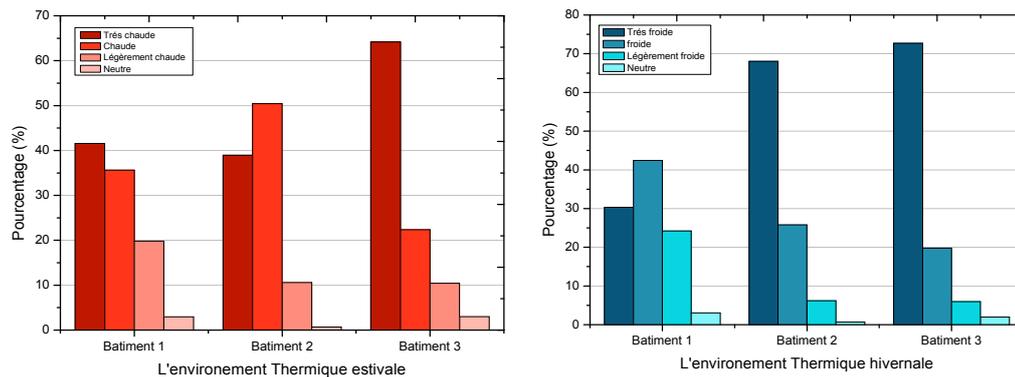


Figure VI.19 : Appréciation de l'environnement thermique par les répondants

Finalement, les résultats des évaluations d'été et d'hiver indiquent que la plupart des élèves et des enseignants n'étaient pas dans des conditions thermiques acceptables dans les salles de classe.

VI.2.4.3.2. La période la plus convenable « Température d'air »

La figure VI.20 présente les périodes de la journée considérées comme convenables en termes de conditions thermiques pour les trois bâtiments scolaires pour les deux saisons estivale et hivernale. Ainsi, durant la saison chaude, la majorité des usagers des 3 bâtiments ont favorisé la période de matinale ; plus de 80 % considèrent que l'environnement thermique est moins chaud le matin. Par contre, pour la saison froide, la majorité des usagers préfèrent la période de l'après-midi, lorsque les conditions thermiques sont plus chaudes en raison du rayonnement solaire.

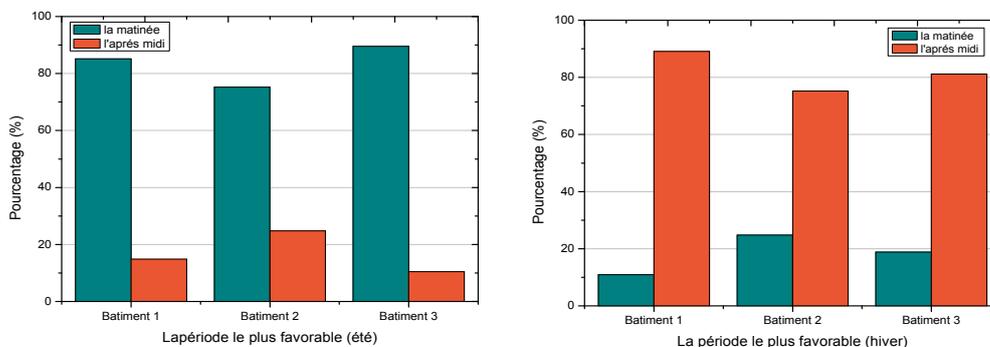


Figure VI.20 : La période la plus convenable de la journée selon la saison

VI.2.4.3.3. L'humidité de l'air

La figure VI.21 présente les appréciations de l'humidité de l'air intérieur pendant les 2 périodes estivale et hivernale dans les trois bâtiments.

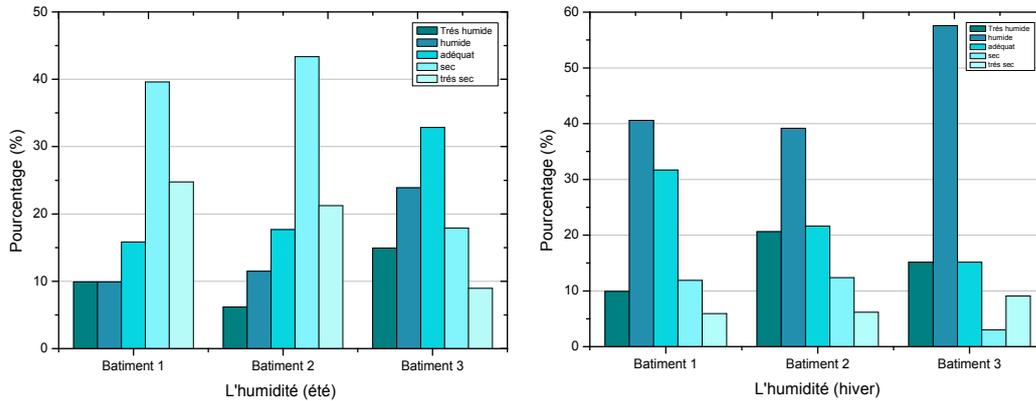


Figure VI.21 : Appréciation de l'humidité relative (source : l'auteur)

Dans la saison chaude, la majorité des usagers ont ressenti un environnement sec dans les bâtiments 1 et 2, alors que plus de 46% considèrent que le bâtiment B3 assure un environnement adéquat. En contrepartie, la majorité des usagers des 3 bâtiments ressentent un environnement humide durant la saison froide ; avec un pourcentage de plus de 40%. Pour les deux saisons, on observe qu'un pourcentage élevé de votes des répondants se situent dans les catégories centrales juste à droite, légèrement sec et humide (-1, 0, 1), indiquant que les occupants étaient à l'aise et acceptaient mieux la variation des niveaux d'humidité relative, malgré une certaine sensation d'humidité élevée en hiver et une certaine sensation de sécheresse en été.

VI.2.4.3.4. Mouvement d'air

La figure VI.22 présente les appréciations de la vitesse d'air intérieur pendant la période estivale et hivernale dans les trois bâtiments. Pendant les deux saisons une variété de réponses est observée, les usagers des trois bâtiments considèrent que le mouvement d'air est adéquat avec des pourcentages moyens de 52 % et 59 % respectivement pour la saison chaude et la saison froide. Cependant, la majorité des répondants étaient à l'aise avec le mouvement d'air intérieur.

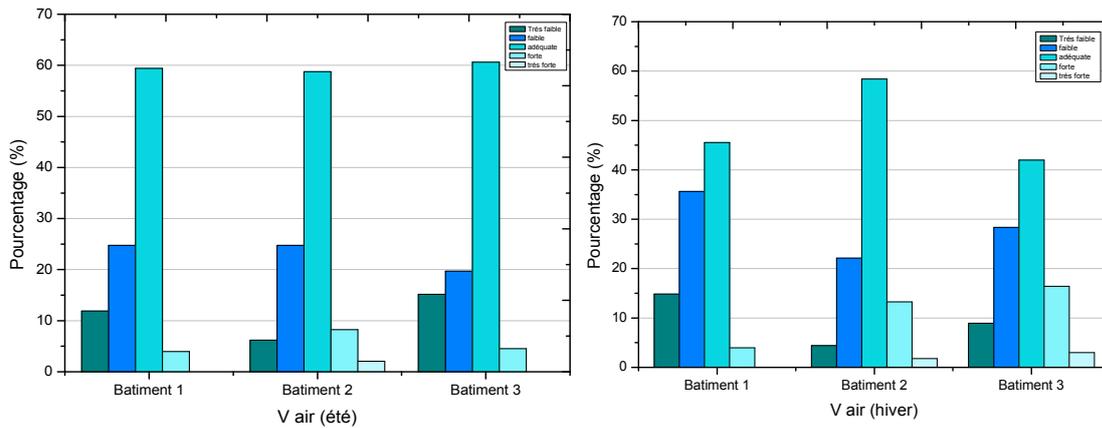


Figure VI.22 : L'impression sur le mouvement d'air intérieur

VI.2.4.4. Satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique

La figure VI.23 présente les satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique intérieur pendant la période estivale et la période hivernale dans les trois bâtiments.

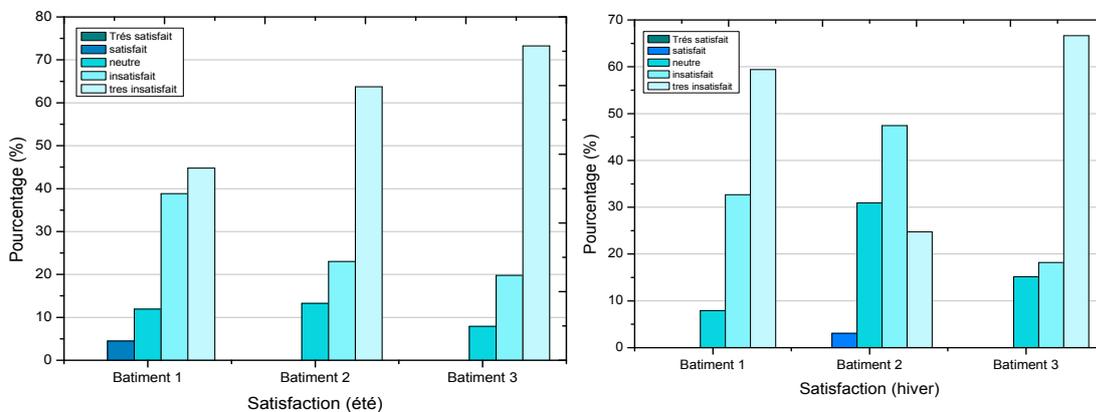


Figure VI.23. Satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique (source : l'auteur)

L'impression principale dans tous les bâtiments et dans les 2 saisons varie de l'état d'insatisfait à très insatisfait ; dans la saison chaude 44% à 73% des répondants sont très insatisfaits ; de même que dans la saison froide où 34 % 66 % des répondants considèrent qu'ils sont très insatisfaits. Cependant, les réponses indiquent que l'environnement thermique de la saison froide est plus acceptable que la saison chaude.

VI.2.4.5. L'utilisation des systèmes mécaniques pour les besoins de confort thermique

La figure VI.24 présente l'opinion des utilisateurs sur la nécessité d'utiliser les systèmes HVAC pendant la période estivale et hivernale dans les trois bâtiments. Comme illustré par la figure.VI.24, la majorité des usagers des bâtiments préfèrent l'utilisation des systèmes mécaniques de chauffage, climatisation et ventilation pour assurer leur confort

thermique à l'intérieur des salles de classe. En effet, 98% des répondants étaient favorables à l'utilisation de la climatisation artificielle en été et 89% des répondants étaient favorables pour le recours au chauffage en hiver ; ce qui indique que les trois bâtiments sont incapables d'assurer des conditions thermiques acceptables dans des conditions naturelles.

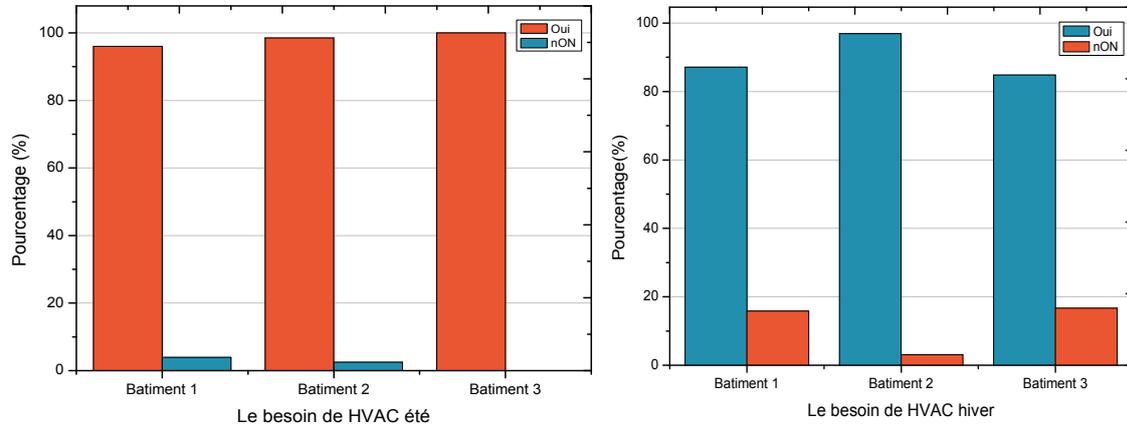


Figure.VI.24 : L'utilisation des systèmes mécaniques.

VI.2.4.6.Appréciations relatives à la taille des ouvertures

La figure VI.25 présente les réponses obtenues sur l'appréciation des usagers vis-à-vis de la taille des ouvertures dans les trois bâtiments.

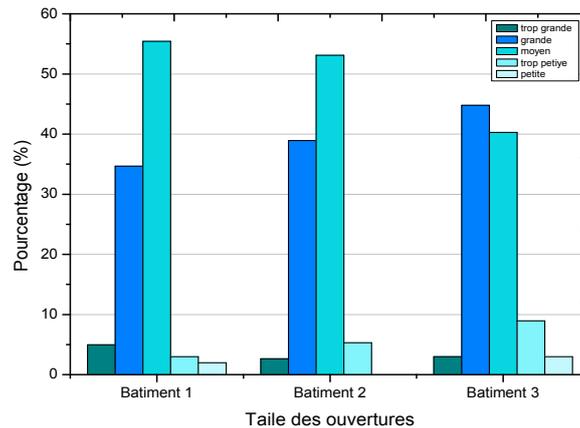


Figure.VI.25.Appréciations relatives à la taille des ouvertures (source : l'auteur)

La majorité des répondants (55 %) considèrent que les ouvertures dans les salles de classe sont de tailles moyennes. Par contre, 40 %des répondants les trouvent trop grandes, et pensent que c'est la principale source de chaleur. Ils proposent également que les ouvertures devraient être plus petites ou plus protégées.

VI.2.4.7. L'appréciation de l'environnement général (thermique, lumineux, sonore)

La figure VI.26 présente l'appréciation globale vis-à-vis de l'environnement thermique, lumineux et sonore ressenti dans la salle la classe pendant la période estivale et la période hivernale dans les trois bâtiments.

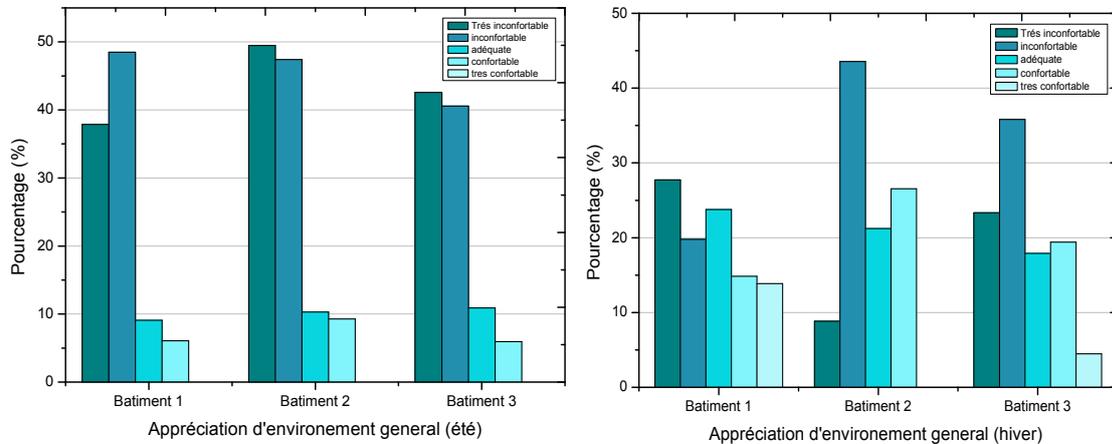


Figure.VI.26.L'appréciation de (source : l'auteur)

Les avis des répondants au sujet de leurs impressions concernant l'environnement général thermique, lumineux et sonore, ont été mitigées ; cependant, une analyse fine des réponses indique que l'impression dominante pour la saison chaude (été) varie entre « inconfortable à très inconfortable » avec un pourcentage de 40 à 50%. En contrepartie, pendant la saison froide (hiver), les avis tendaient vers « confortable à très inconfortable ».

D'un autre côté, les résultats des votes PMV obtenus ont montré que la tendance allait de « très inconfortable à neutre » dans la plage négative de l'échelle ASHRAE (-1, -2, -3), par conséquent, la majorité des votes mentionnaient des sensations « inconfortable à très inconfortable » à la fois en été et en hiver dans tous les bâtiments. Il est à noter que l'impression hivernale est plus acceptable que l'été et le degré d'appréciation positive du confort est important avec un pourcentage moyen de 20%. Le bâtiment B1 en général a le plus de votes de satisfaction indiquant un meilleur environnement intérieur.

VI.2.4.8. Les facteurs les plus influents du confort dans la classe

Le degré d'influence des différents facteurs qui affectent le niveau de confort global dans la salle de classe a été classé par les élèves questionnés du plus important au moins important (fig. VI.27).

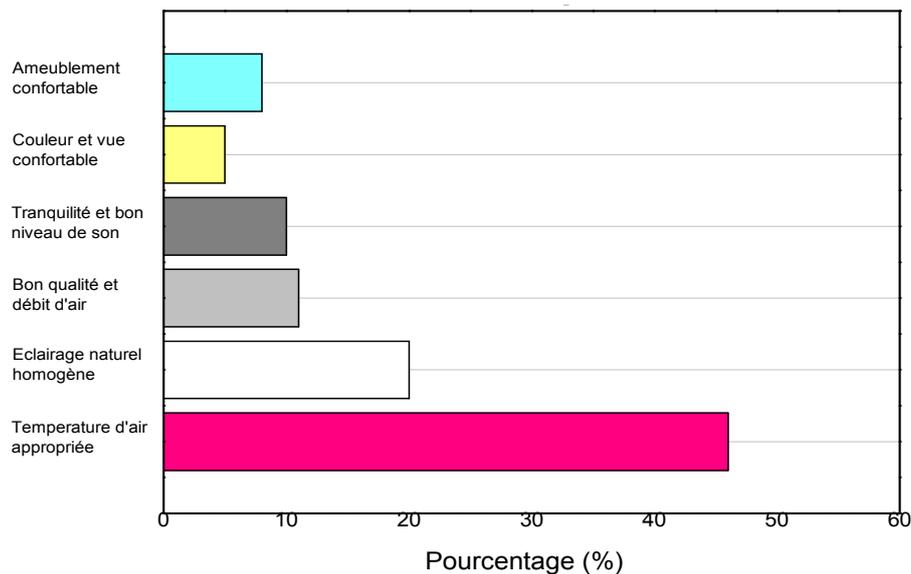


Figure VI.27 : Les facteurs les plus influents du confort dans la salle de classe

Ainsi : au 1^{er} rang, c'est « une température appropriée » qui est considérée comme facteur le plus influent pour 46.66 % des répondants; à la 2^{ème} place, « un éclairage naturel homogène » est considéré comme influent pour 20.03 %, au 3^{ème} rang c'est « un bon débit d'air » avec 11.05 % des avis, suivi de près dans la 4^{ème} place par « des couleurs et vue agréable » avec 10.44 % des répondants, et en dernière position « un bon niveau de sons » est le facteur choisi par 10.44 % des répondants et « ameublement confortable » par 8.77 % d'entre eux.

VI.2.4.9. Possibilités de changement de l'environnement

Différentes possibilités ont été proposées aux élèves en vue de changer leur espace de cours ; la majorité des répondants ont choisi les solutions en relation avec le confort thermique comme (ajouter/activer les systèmes de chauffage, climatisation) qui enregistre plus de 90% des avis pendant les deux périodes estivale et hivernale dans les trois bâtiments. Par contre, des alternatives comme : ouvrir/fermer : la fenêtre, les rideaux, ou encore allumer/éteindre l'éclairage électrique, étaient les moins choisies.

VI.2.4.10. Les questions adressées aux enseignants

Dans la partie du questionnaire qui s'adressait aux enseignants, tous étaient d'accord sur le fait que l'environnement thermique a un impact considérable sur la réussite scolaire des élèves surtout durant les mois aux conditions extrêmes. Les enseignants signalent que pendant les mois d'extrême chaleur, les élèves se sentent épuisés, moins concentrés surtout

pendant les après-midis ; ils ont également confirmé que les températures élevées ont un impact négatif sur la concentration de l'élève et son rendement scolaire. En outre, ils ont remarqué que pendant les saisons chaudes, même avec l'utilisation de la ventilation, certains élèves ont une transpiration excessive et même des saignements du nez comme illustré par la figure VI.28.



Figure VI.28 : Problèmes de santé causés par les températures élevées à l'intérieur des salles de classe.

Les enseignants sont, par ailleurs, indiqués que l'utilisation des systèmes HVAC relève de l'administration de l'école et de la disponibilité des systèmes car la plupart d'entre eux sont en panne ou hors service. D'autre part, il semble que l'utilisation de ces appareils est soumise à des restrictions, sachant que la climatisation n'est autorisée que pendant la saison chaude pour la fin Mai et début Septembre et uniquement l'après-midi, alors que les systèmes de chauffage ne sont pas utilisés. À la fin, les enseignants indiquent que dans les programmes enseignés, il n'y a malheureusement pas de leçons destinées à sensibiliser les élèves sur les questions d'économies d'énergie et de la protection de l'environnement.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude expérimentale réalisée sous forme de mesures in situ et complétée par une enquête par questionnaire au niveau des 3 bâtiments scolaires choisis en amont comme cas d'étude. Cette partie du travail consistait à évaluer quantitativement les conditions hygrothermiques réelles à l'intérieur des salles de classe dans chaque exemple étudié en mesurant certains paramètres de confort. Ensuite, il a été procédé à une évaluation post-occupationnelle par questionnaires administrés aux

utilisateurs dans le but d'explorer qualitativement le confort thermique intérieur et la sensation thermique et la satisfaction des usagers.

Deux campagnes de mesures *in situ* ont été conduites couvrant les deux périodes estivale et hivernale ; les prises de mesures ont été réalisées dans 3 salles de classe de chacun des établissements scolaires étudiés. Les données obtenues ont été traitées et traduites en graphes, comparées et analysées à l'environnement physique de référence (zone de confort).

Les résultats de l'évaluation quantitative effectuée par la prise de mesures *in situ*, ont révélé que les conditions minimales du confort thermique n'étaient réalisées dans aucune des trois écoles étudiées que ce soit pour la saison chaude ou froide. Pratiquement, les salles de classe présentaient un environnement thermique inconfortable tout au long de la journée avec une température moyenne élevée de plus de 30°C pendant la saison chaude et moins de 15°C en saison froide ; et donc dans les deux cas de figures, l'environnement intérieur était en dehors des limites de confort.

L'étude a également mis en évidence l'impact des matériaux de construction de l'enveloppe sur la performance thermique du bâtiment ; ainsi, les murs de briques sont mieux performants que les murs de parpaing et de béton, et les murs isolés résistent nettement mieux aux fluctuations thermiques quotidiennes.

Les résultats de l'enquête par questionnaire ont révélé une situation prédominante d'insatisfaction à l'égard de l'environnement thermique, surtout pendant la saison chaude. Cependant, durant la saison froide la sensation d'inconfort était moindre en raison des comportements adaptatifs et du taux d'occupation élevé. En définitive, l'étude empirique présentée dans ce chapitre a révélé un manque de confort thermique dans le bâtiment scolaire d'où le besoin de corriger cette situation en développant un modèle architectural performant de salles de classe qui soit adapté aux conditions d'un climat chaud et sec en termes de confort thermique et de consommation énergétique.

CHAPITRE VII :

**Étude par simulation paramétrique pour
optimiser l'enveloppe du bâtiment scolaire**

CHAPITRE VII : Étude par simulation paramétrique pour optimiser l'enveloppe du bâtiment scolaire

Introduction

Dans ce chapitre, une étude paramétrique par simulation numérique a été effectuée dans le but d'améliorer les conditions de confort thermique et les niveaux d'éclairement tout en maintenant un niveau raisonnable de consommation énergétique. Le chapitre commence par présenter les outils de simulation dynamique utilisés (DesignBuilder et EnergyPlus) et décrit les modèles numériques simulés ainsi que le protocole de simulations. Une validation-calibration préliminaire du modèle a été effectuée avant de lancer le calcul numérique pour l'étude paramétrique et l'optimisation.

Les paramètres ciblés étaient les composants opaques de l'enveloppe soient les matériaux et épaisseurs des murs, l'orientation, les tailles des fenêtres, le type de vitrage, la localisation de la salle de classe/bâtiment ainsi que la teinte extérieure. Par la suite, une analyse des résultats obtenus est réalisée afin de démontrer l'impact de chaque paramètre sur le confort thermique des usagers et la performance énergétique du bâtiment. Enfin, l'optimisation paramétrique permettra de tester plusieurs scénarios et alternatives relativement aux paramètres ciblés par l'étude et d'évaluer leur impact isolé et combiné sur la performance thermique et énergétique du bâtiment scolaire sous les conditions d'un climat chaud et aride.

VII.1. La simulation paramétrique outil d'évaluation et d'optimisation de la performance du bâtiment

Les études d'optimisation paramétrique est l'une des techniques les plus utilisées pour évaluer les performances des bâtiments en raison de la précision et de la fiabilité des résultats. L'optimisation généralement numérique utilise des logiciels de simulation qui sont considérés comme de puissants outils d'aide à la décision (Kaboré, 2015). De plus, ces logiciels sont capables de donner une analyse globale primaire et un aperçu en temps réel du comportement potentiel du bâtiment en se basant sur différentes données d'entrée dites «inputs». Ces données une fois introduites, permettent de prédire divers paramètres

physiques qui ont lieu dans le modèle numérique tels que la température intérieure, l'éclairage, les mouvements d'air et les phénomènes énergétiques liés aux bâtiments et leurs composants. De ce point de vue, l'une des principales utilisations de la simulation reste l'évaluation et l'optimisation de la conception du bâtiment pour obtenir les environnements intérieurs désirés selon des périodes définies en faisant prévaloir différents scénarios où des paramètres sont manipulés pour atteindre les objectifs visés.

Cette technique est en constante évolution, elle permet de disposer de modèles détaillés prenant en compte les connaissances actuelles des phénomènes physiques en interactions dans le bâtiment et de faire des études de faisabilité technique en comparant différentes solutions techniques sur une construction (enveloppe, isolations, menuiseries, traitement des ponts thermiques, prises en compte des énergies renouvelables, systèmes, fluides...). Elle permette aussi de mener des études diagnostiques précises, afin de préconiser des mesures correctives.

VII.1.1. Présentation du logiciel de la simulation utilisé

D'après Khadraoui (2019) La simulation numérique représente la technique de recherche la plus exploitée par les chercheurs. DesignBuilder l'un des logiciels les plus utilisés car il présente un outil convivial pour les architectes, il tente de répondre à la demande de l'architecte par une interface visuelle et des entrées à différents niveaux de détail. (Lieve Weytjens et al, 2012).

VII.1.1.1. DesignBuilder V.6.1

DesignBuilder¹ est un logiciel de simulation qui permet de modéliser le fonctionnement du bâtiment et d'évaluer ses performances. Il fournit une interface utilisateur graphique au moteur de simulation **EnergyPlus** pour générer des données de performances. Il est développé pour être utilisé dans toutes les étapes de conception. Pour un bâtiment neuf, il permet d'optimiser la conception du bâtiment à différentes étapes du processus conceptuel. Pour un bâtiment existant, il permet de proposer des scénarios d'amélioration selon des objectifs à atteindre et ensuite évalue les actions d'amélioration selon leur performance.

¹ <https://designbuilder.co.uk/helpv6/>

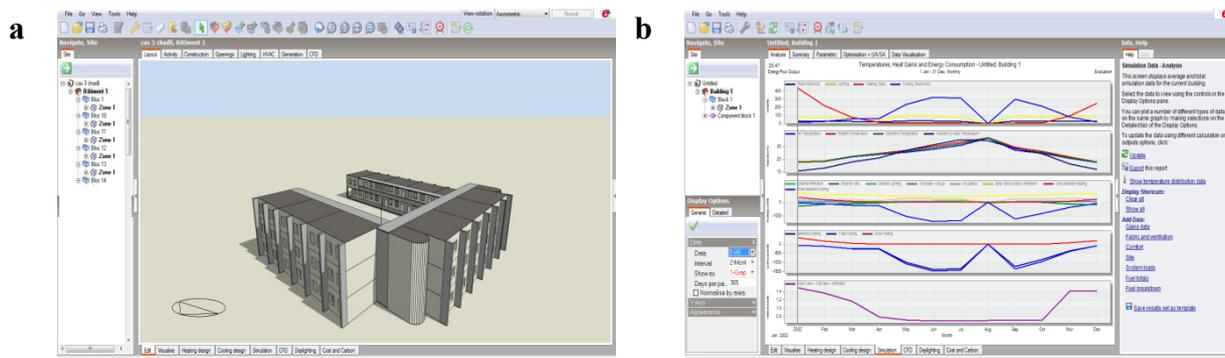


Figure VII.1 : DesignBuilder interface ;(a) rendu de 3D, (b) graphes des calculs

DesignBuilder possède une interface graphique (fig. VII.1) offrant de nombreuses fonctionnalités telles que :

- Construction d'un modèle virtuel en 3D réaliste avec vue des ombres portées (maquette BIM).
- Modeleur du bâtiment incluant des assistants de création de fenêtre, composition de la construction, détection automatique du type de paroi.
- Calcul des déperditions/gains thermiques de l'enveloppe.
- Dimensionnement du chauffage, climatisation et ventilation naturelle.
- Simulation dynamique (STD) restituant des données de confort, de bilan thermique, ventilation, etc.
- Gestion de l'occupation, de la ventilation mécanique, des ouvertures de fenêtre, de l'occultation des baies, des apports internes.
- Carte d'éclairement naturel en FLJ et Autonomie lumineuse.
- Calculs RT2012.
- Calcul en coût global à l'aide de fonction puissante d'estimation des coûts de construction, d'énergie, de cycle de vie basé sur la maquette BIM.
- Module d'optimisation permettant de déterminer les paramètres du bâtiment offrant le meilleur compromis coût, confort, GES.

VII.1.1.2. EnergyPlus V8.9

EnergyPlus² est un programme de simulation énergétique des bâtiments développé par le DOE (*le département d'énergie américain*) pour la modélisation du chauffage, du refroidissement, de l'éclairage, de la ventilation et d'autres flux d'énergie des bâtiments. Il comprend également de nombreuses capacités de simulation innovantes telles que des pas de temps de moins d'une heure, des systèmes modulaires et des installations intégrées avec une simulation de zone basée sur le bilan thermique, un flux d'air multizone, un le confort et les systèmes photovoltaïques. EnergyPlus est un programme de simulation autonome sans

²https://designbuilder.co.uk/helpv2/Content/_EnergyPlus_background_information.htm

interface graphique "conviviale" - c'est là qu'intervient DesignBuilder qui intègre EnergyPlus dans son environnement et permet d'afficher ses résultats avec une extension (ResultViewer) comme illustré par la figure VII.2.

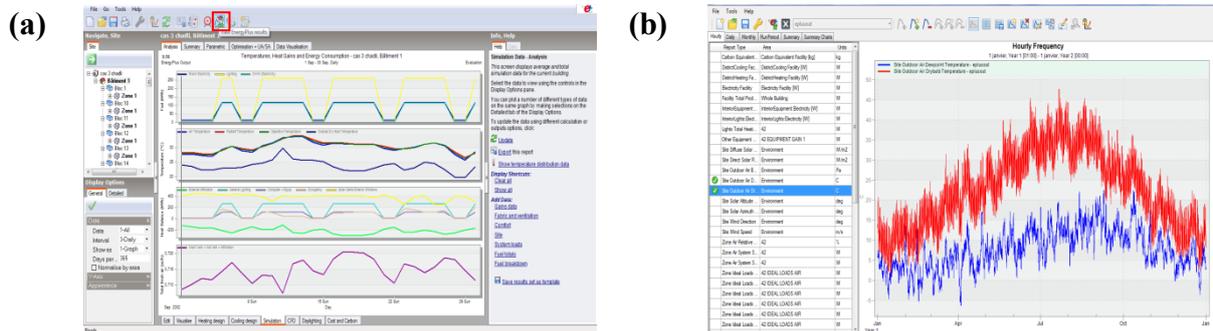


Figure VII.2: (a) EnergyPlus extension sur DesignBuilder (b) ResultViewer interface

VII.2. Les étapes du processus de simulation avec DesignBuilder

La simulation de la performance d'un bâtiment avec DesignBuilder est un processus qui nécessite certaines données à introduire comme préliminaire avant d'entamer les calculs. L'une des principales entrées est le fichier climatique de la ville concernée par l'étude ; généralement, ce fichier est généré par le logiciel « Meteonorm V7.2 » sous format «EPW».

DesignBuilder a également besoin d'autres paramètres d'entrées (inputs) pour faire la simulation et générer des résultats (outputs). La figure VII.3 synthétise les inputs et les outputs d'une simulation effectuée avec DesignBuilder.

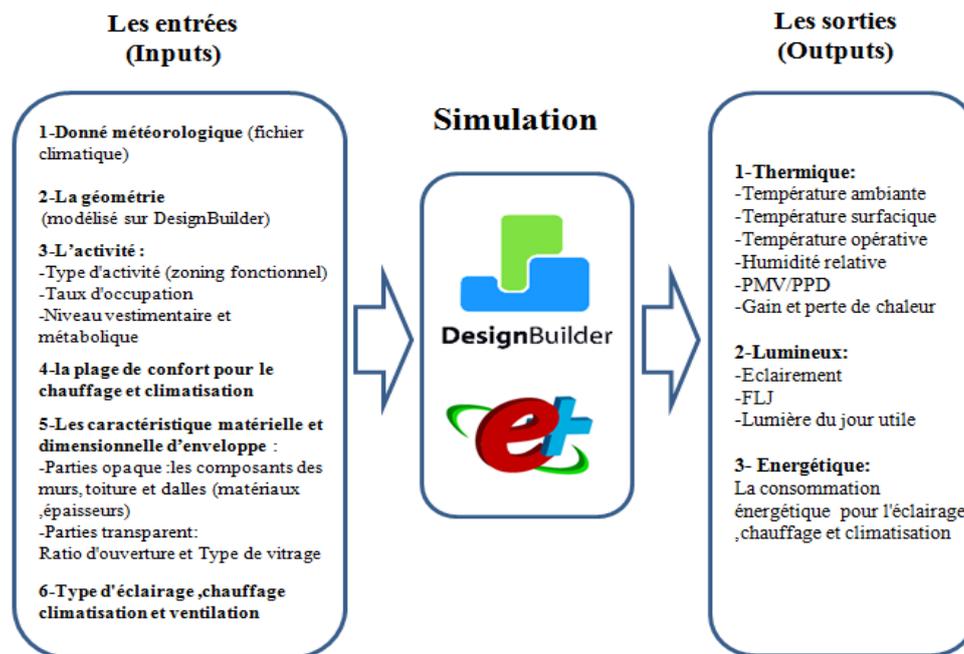


Figure VII.3 : Les inputs et les outputs du processus de simulation avec DesignBuilder

Après avoir importé le fichier climatique Epw dans le logiciel comme une première étape de simulation (inputs), DesignBuilder permet la modélisation de la géométrie du bâtiment simulée (forme et dimensions, orientation). Ensuite, il faut spécifier les types d'activité et occupation des espaces ou zones considérés ainsi que la plage de confort souhaitée pour actionner les systèmes HVAC. Successivement, il est nécessaire de fournir les caractéristiques matérielles des parois (mur, plafond, dalles) et des ouvertures. Enfin, le taux d'infiltration, l'exploitation du chauffage ou de la climatisation, ventilation et éclairage, etc. doivent être spécifiés.

DesignBuilder donne la possibilité de simuler plusieurs paramètres de natures différentes comme montre la figure 7.3. Ces paramètres de sortie (outputs) peuvent être de nature thermique (la température ambiante, la température surfacique, l'humidité relative, le PMV et le PPD) ou relatifs aux ambiances lumineuses (éclairage, FLJ, UDI) ou encore en rapport avec l'énergie pour le fonctionnement du bâtiment afin d'assurer l'environnement intérieur désiré (consommation énergétique pour le chauffage et la climatisation, ventilation mécanique, éclairage artificiel, ...).

Pour notre cas, l'étude par simulation numérique a été réalisée selon les étapes suivantes :

- Générer un fichier climatique EPW avec METENORM et l'incorporer à DesignBuilder ;
- Modéliser les bâtiments à simuler avec tous ses composants ;

- Générer les résultats comme des graphs et tableaux ;
- Interpréter les résultats obtenus de chaque cas d'étude ;
- Effectuer une étude comparative de la performance des cas d'études ;
- Choisir le bâtiment le plus performant comme un modèle de référence ;
- Optimiser ce modèle de base selon les objectifs prédéfinis.

La figure VII.4 illustre un schéma de synthèse représentant le processus de la simulation numérique et les logiciels exploités.

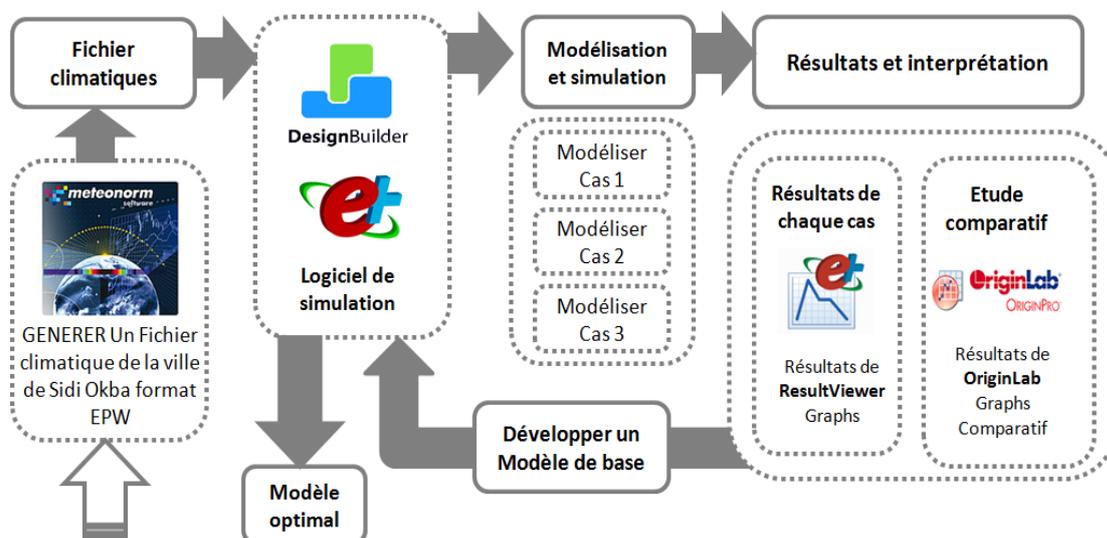


Figure VII.4 : Schéma de synthèse de l'étude numérique

La simulation paramétrique s'est déroulée en deux étapes ; dans la première étape, il a été procédé à l'évaluation de la performance thermique et énergétique des 3 bâtiments choisis comme cas d'étude qui se distinguaient selon des paramètres prédéfinis puis les résultats obtenus en termes de températures et consommation énergétique ont été comparés afin de sélectionner un bâtiment de référence. Le bâtiment sélectionné était le plus performant du point de vue de l'environnement intérieur et de la consommation énergétique.

Dans la deuxième étape, le bâtiment de référence a servi à élaborer un modèle de base virtuel créé avec *DesignBuilder*. Ce modèle de base qui réunit les caractéristiques architecturales et dimensionnelles récurrentes des salles de classe, a été utilisé durant le processus d'optimisation qui s'est déroulé en deux étapes : l'une était dédiée à l'optimisation des parois opaques qui se distinguaient par leurs compositions murales et l'autre était consacrée à l'optimisation des ouvertures en agissant sur leurs caractéristiques.

Les étapes de la simulation sont présentées dans la figure VII.5 et sont détaillées dans les sections suivantes.

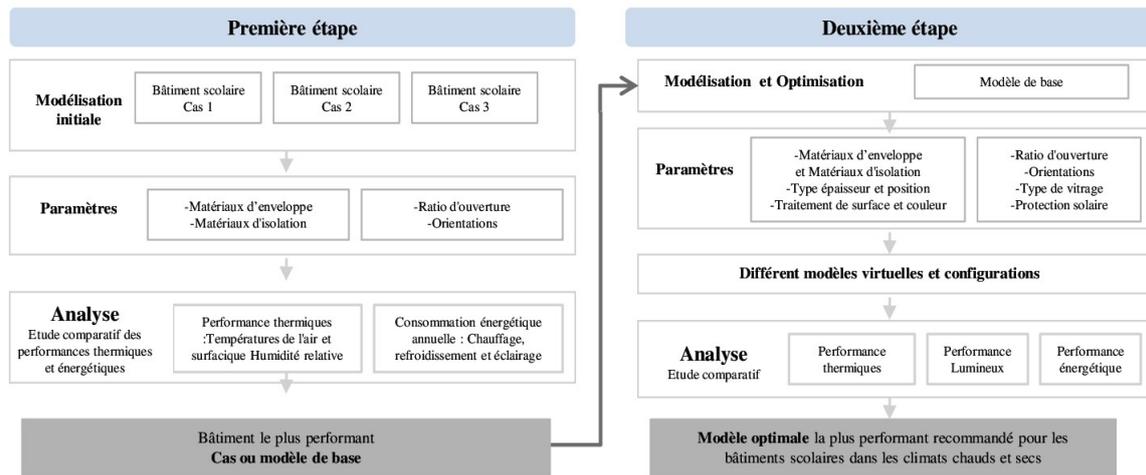


Figure VII.5 : Les étapes de la simulation effectuée.

VII.2.1. Les données relatives au site (données climatique)

L'une des premières étapes de la simulation dans DesignBuilder, est la définition de l'emplacement géographique et des données climatiques du lieu considéré. En l'absence d'un fichier climatique spécifique à Sidi Okba, celui-ci a été remplacé par celui de Biskra qui se situe à une distance de 20 Km. Ainsi, un fichier climatique horaire « EPW » de la station météorologique de Biskra a été généré à l'aide de Meteonorm V7, puis importé dans DesignBuilder comme illustré à la figure VII.3.

VII.2.2. Type d'activité et mode d'occupation

Dans le logiciel DesignBuilder, le type d'activité doit d'abord être défini pour chaque zone créée, afin que le logiciel détermine le mode d'occupation (occupancy pattern) : le mode et les heures d'occupation, les jours d'occupation et les jours fériés.

Etant donné que l'étude porte sur un établissement d'enseignement dont la fonction principale est d'assurer des cours, les zones modèles ont été définies en tant que salles de classe. L'horaire d'occupation a été fixée à une occupation de 08h00 à 17h00, avec cinq jours ouvrables et deux jours de week-end et avec un congé d'été de Juin à fin Août comme montre la figure VII.6.

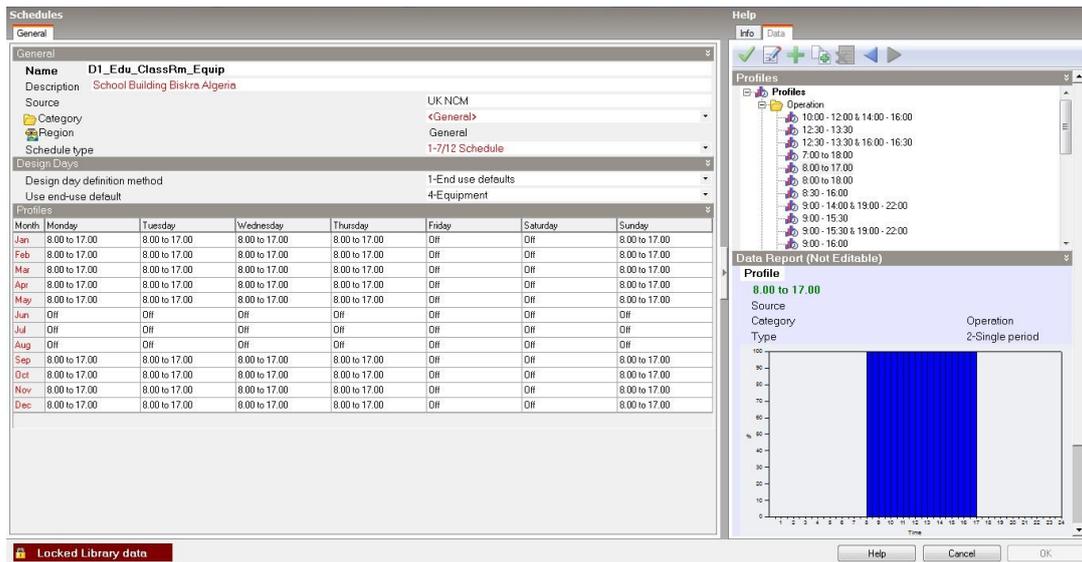


Figure VII.6 : Détermination des périodes d'occupation (occupancy pattern) sur DesignBuilder

VII.2.3. Modélisation des cas d'études

Les trois bâtiments pris comme cas d'étude ont été modélisés sur DesignBuilder avec tous leurs détails constructifs réels (figure VII.7).

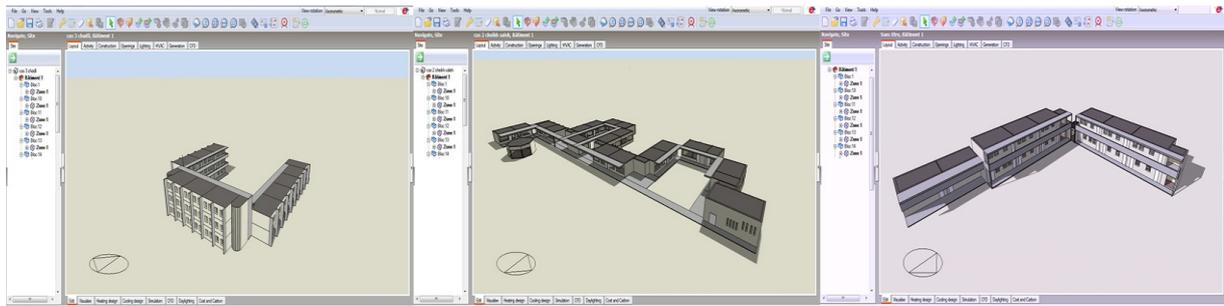


Figure VII.7 : Les modèles 3D des cas d'études réalisés sur DesignBuilder

VII.2.3.1. La caractérisation physique et géométrique des cas d'études

Les simulations ont pris comme point de départ trois bâtiments scolaires représentatifs des systèmes constructifs répandus dans le contexte d'étude. Ces trois bâtiments sont décrits en détails dans le chapitre VI ; la sélection s'est basée sur les matériaux de construction des parois opaques de l'enveloppe comme une variable principale.

Le tableau 7.1 présente les caractéristiques générales des bâtiments choisis comme cas d'études.

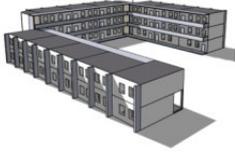
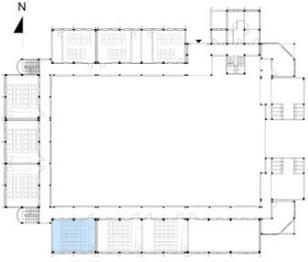
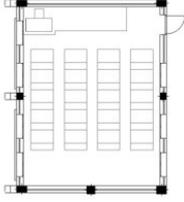
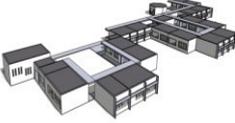
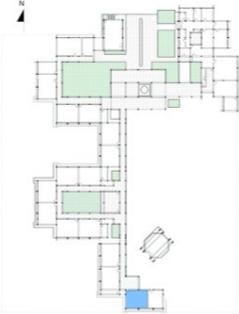
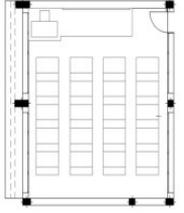
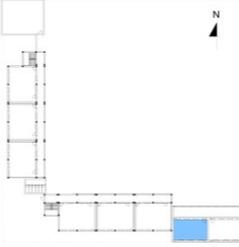
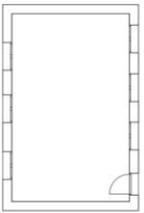
Tableau 7.1 : Présentations des caractéristiques des 3 bâtiments cas d'étude

	Bâtiment 1	Bâtiment 2	Bâtiment 3
Bâtiments			
Période de construction	Bâtiment Contemporain Construit en 2016	Bâtiment Postcolonial Construit en 1977	Bâtiment Colonial Construit en 1945
Surface total	Surface Total construite 1290 m ² Salle de classe 60.075m ²	Surface Total construite 3320 m ² Salle de classe 52.84 m ²	Surface Total construite 925 m ² Salle de classe 45.68 m ²
Niveaux étages	Bâtiment à trois 3 étages	Bâtiment à RDC	Bâtiment à deux 2 étages
Les Orientations	Nord/Sud/Est/Ouest	Nord/Sud/Est/Ouest	Nord/Sud/Est/Ouest
L'enveloppe structure	Brique rouge creuse	Brique de parpaing creux	Parpaing plein et béton
Fenêtre	Vitrage simple avec un ratio d'ouverture WWR= of 20%	Vitrage simple avec un ratio d'ouverture WWR= 30%	Vitrage simple avec un ratio d'ouverture WWR= 25%
Les Systèmes HVAC	Système de climatisation (climatiseur) et ventilation mécanique, aucun système de chauffage	Système de climatisation (climatiseur) et ventilation mécanique, aucun système de chauffage	Système de climatisation (climatiseur) et ventilation mécanique, système de chauffage à gaz

VII.2.3.2. Les caractéristiques architecturales et matérielles de l'enveloppe

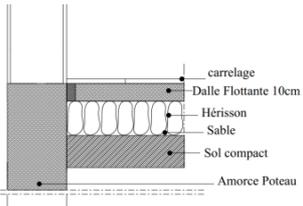
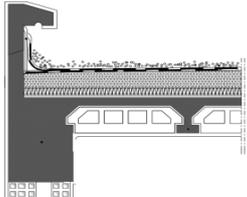
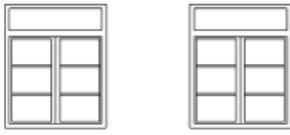
La caractérisation des bâtiments sélectionnés pour l'étude a été établie comme première étape à la simulation. Le tableau 7.2 présente les caractéristiques architecturales des bâtiments et ainsi que les matériaux de construction des parois opaques de l'enveloppe (les murs).

Tableau 7.2 : Caractéristiques architecturales et matérielle des cas d'études.

La Géométrie	Plan de RDC	Salles de class	Composants des Mur
<p>Bâtiment 1</p> 			 <p>0.02m enduit de plâtre +0.1m Brique rouge creuse +0.05m Lame d'air +0.15m Brique rouge creuse +0.02m enduit de ciment</p>
<p>Bâtiment 2</p> 			 <p>0.02m enduit de plâtre +0.1m parpaing creux +0.05m Lame d'air +0.15m parpaing creux +0.02m enduit de ciment</p>
<p>Bâtiment 3</p> 			 <p>0.02m enduit de plâtre +0.1m parpaing plein +0.15m parpaing plein +0.02m enduit de ciment</p>

Pour les matériaux des toitures et planchers, tous les bâtiments sélectionnés présentent les mêmes composants comme indiqué dans le tableau 7.3 à savoir : des dalles flottantes, dalle intermédiaire et des toitures-terrasses en corps creux avec étanchéité. Les fenêtres sont à simple vitrage de (3 à 4 mm) avec une menuiserie en bois.

Tableau 7.3 : Caractéristiques matérielles des toitures, planchers et fenêtres.

Composant de la dalle	Composant de toit	Type de fenêtre
		

VII.2.4. Conditions de fonctionnement des bâtiments modélisés (HVAC, ventilation et éclairage)

Les bâtiments ont été modélisés comme des espaces multizones naturellement ventilés ; les systèmes de ventilation, climatisation et chauffage sont considérés à manipulation manuelle (les systèmes HVAC étaient maintenus inactifs durant la simulation). En ce qui concerne l'éclairage, les fenêtres étaient la source de lumière naturelle toute la journée sans stores ni technique d'ombrage et sans l'utilisation de l'éclairage artificiel.

VII.3. Simulation numérique et processus de validation

VII.3.1. Le protocole adopté

Après la détermination des caractéristiques physiques, architecturales et matérielles, les calculs et les tests par simulation sous DesignBuilder ont été réalisés selon un protocole illustré par la figure VII.8.

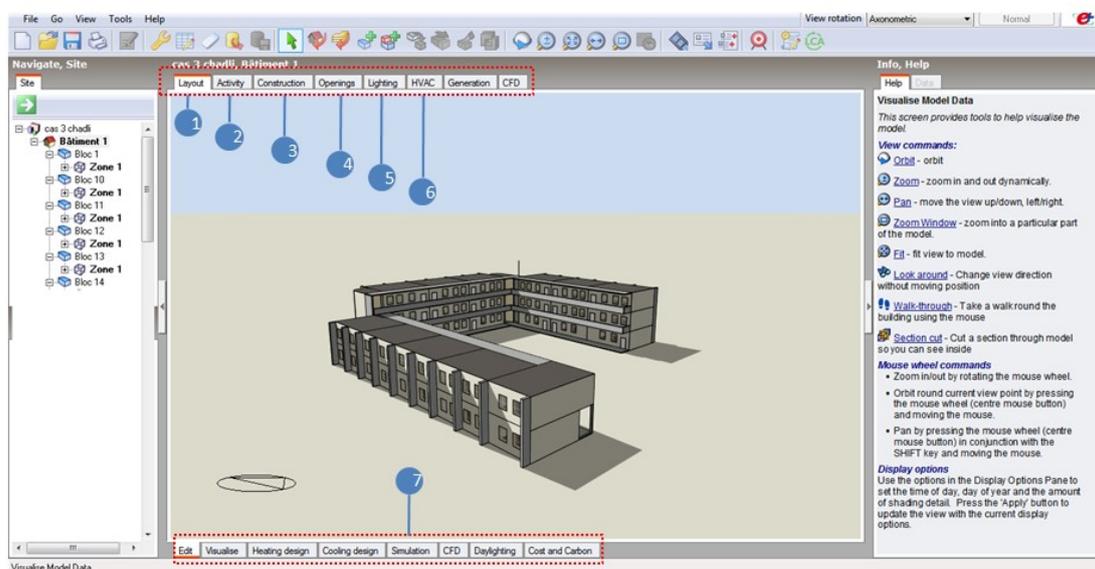


Figure VII.8 : Les étapes et le protocole de simulation

Comme exigé par la plateforme numérique de DesignBuilder, les simulations ont été soumises au protocole qui inclut plusieurs étapes successives.

A/ Introduction des inputs

1-La géométrie : les trois bâtiments ont été modélisés ainsi que tous leurs composants notamment : l'enveloppe du bâtiment, la planimétrie des différents niveaux, les matériaux utilisés aux niveaux des murs, des toits et des vitrages, les ouvertures, les caractéristiques des surfaces,...etc. La figure VII.9 présente les modèles des bâtiments modélisés sur DesignBuilder.

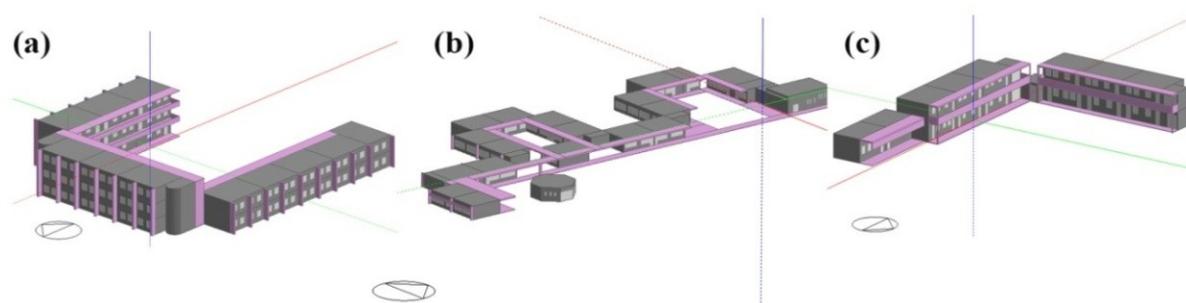


Figure VII.9 : Bâtiments modélisés sur DesignBuilder ;(a)Cas1 ;(b) Cas2 ;(c)Cas 3

2-Type d'activité et habillement : dans le processus de modélisation, les bâtiments ont été définis comme des **établissements d'enseignement** avec un taux d'occupation élevé de 2personnes par m² et en spécifiant un taux d'activité de 0.9. En ce qui concerne l'habillement ; un vêtement d'hiver de 1.00 clo et un vêtement d'été de0.5 clo, ont été utilisés.

3-Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux : pour de chaque cas d'étude les caractéristiques similaires au cas réelle ont été utilisées. Le tableau 7.4 fournit les caractéristiques thermo-physique des matériaux d'enveloppe tels que déterminés par le (D.T.R. C3-2 1997) et le logiciel de simulation DesignBuilder lui-même.

Tableau 7.4 : Caractéristiques thermo-physique des matériaux d'enveloppe

Matériaux	Epaisseur (m)	Densité (Kg/m ³)	Chaleur spécifique(j/KG.K)	Conductivité thermique (W/m.k)	Résistance thermique (m ² /W)	Inertie thermique Effusivité	Diffusivité thermique (m ² /s)
Matériaux des murs							
Parpaing plein	0.20	975	1080	1.25	0.16	1147.27	1.18x10e-6
Parpaing plein	0.15	1880	1080	1.07	0.14	1473.94	5.26x10e-7
Parpaing creux	0.20	900	1080	0.71	0.28	830.73	7.30x10e-7
Parpaing creux	0.15	900	1080	0.71	0.21	830.73	7.30x10e-7

Brique rouge creuse	0.10	1900	900	0.50	0.20	924.66	2.43x10e-7
Brique rouge creuse	0.15	1900	936	0.50	0.30	924.97	2.43x10e-7
Enduit de Ciment	0.02	2200	1080	1.40	0.010	1823.84	5.90x10e-7
Enduit de plâtre	0.02	1800	1080	0.87	0.042	1300.49	4.47x10e-7
Lame d'air	0.05	1.22	1000	0.047	0.11	6.85	4.70x10e-5
Matériaux des toits							
Dalle de Compression	0.2	1450	1080	1.46	0.13		
Enduit de Ciment	0.02	2200	1080	1.40	0.010	1823.84	5.90x10e-7
Enduit de plâtre	0.02	1800	1080	0.87	0.042	1300.49	4.47x10e-7
Corps creux	0.16	1300	1000	1.20	0.133		
Matériaux des dalles							
Carrelage	0.02	2200	336	2.10	0.095		
Dalle de Compression	0.1	1450	1080	1.46	0.13		

4-Les ouvertures : sont des fenêtres claires à simple vitrage (3 à 4 mm) avec une menuiserie en bois sans aucun dispositif de protection solaire.

5-Le type d'éclairage artificiel : des lampes fluorescentes inactives.

6-Les systèmes mécaniques de chauffage, refroidissement et chauffage (HVAC) : La simulation a été réalisée dans des conditions naturelles où les systèmes mécaniques étaient inactifs (ventilation, chauffage, climatisation).

B/ Les Outputs générés

Des simulations ont été menées en vue d'évaluer la performance thermique et énergétique des bâtiments sélectionnés. Les simulations étaient horaires et couvraient deux périodes : une période estivale (au cours de Septembre en tant que mois le plus chaud à l'année scolaire) ; et une période hivernale (en Janvier en tant que mois le plus froid à l'année scolaire) dans des journées représentatives (Design Day). Les résultats sont présentés dans la partie suivante.

VII.3.2. Résultats de l'étude numérique par simulation

La performance thermique et énergétique des bâtiments est largement contrôlée par la conception de l'enveloppe et leur comportement (Subhashini et al., 2018 ; Yao et al., 2018).

En effet, chaque élément de l'enveloppe du bâtiment influe sur son efficacité thermique et énergétique en fonction du climat. Dans cette perspective, la présente recherche tente de mettre en lumière l'impact de certaines propriétés de l'enveloppe, précisément les matériaux des parois opaques, sur l'environnement intérieur du bâtiment et ses performances thermiques et énergétiques.

Dans cet objectif, une étude par simulation numérique a été réalisée sur les trois différents bâtiments choisis. Les tests ont porté sur l'impact des matériaux et des composants de l'enveloppe du bâtiment sur l'amélioration de la performance thermique et énergétique des bâtiments scolaires. Les paramètres étudiés étaient respectivement : les matériaux opaques des murs, le type d'isolation, la position de l'isolation, le type du vitrage, le facteur d'ombrage et l'absorption de la surface extérieure. Les résultats obtenus en termes de confort thermique, de performances thermiques et énergétiques (température ambiante, température radiante, humidité relative, PMV, PPD et UDI) ont été comparés afin de sélectionner un bâtiment de référence. Le bâtiment sélectionné était le plus performant du point de vue de l'environnement intérieur et de la consommation énergétique.

Les calculs ont été lancés pour couvrir une année représentée par deux périodes -la plus chaude (estivale) et la plus froide (hivernale)-avec des conditions extrêmes par référence à l'année scolaire. Les trois jours sélectionnés durant chaque période ont été le 12, 13 et 14 Janvier pour la période froide et le 8, 9 et 10 Septembre pour la période chaude. Les résultats obtenus ont été exportés sous forme de tableaux (xls). Par la suite, sur la base de ces tableaux, des graphes ont été élaborés par le programme Origin Pro.

VII.3.2.1. Discussion des résultats : l'impact des matériaux opaque d'enveloppe sur la performance thermique et énergétique

D'après (Basarir et al. 2012) une conception soignée de l'enveloppe du bâtiment est considérée comme une stratégie passive cruciale qui impact les conditions intérieures et prédit la consommation d'énergie du bâtiment. La performance thermique de l'enveloppe du bâtiment varie en fonction des conditions climatiques et environnementales (Dhaka et al., 2014). Elle dépend également des propriétés thermo-physiques qui à leur tour influent la demande énergétique (Jannat et al., 2020).

Pour étudier l'impact des matériaux des parois opaques (murs de façades) des trois bâtiments scolaires choisis des simulations ont été effectuées en tenant compte de la différence entre les matériaux des murs de l'enveloppe comme présenté dans le tableau VII.2

Ainsi, dans chacun des trois bâtiments qui ont presque la même typologie, deux salles classe à orientations différentes ont été choisies pour effectuer l'analyse comparative et déterminer l'impact des matériaux et l'orientation. Les graphes de la figure VII.10 présentent les graphes obtenus pour les trois cas d'étude.

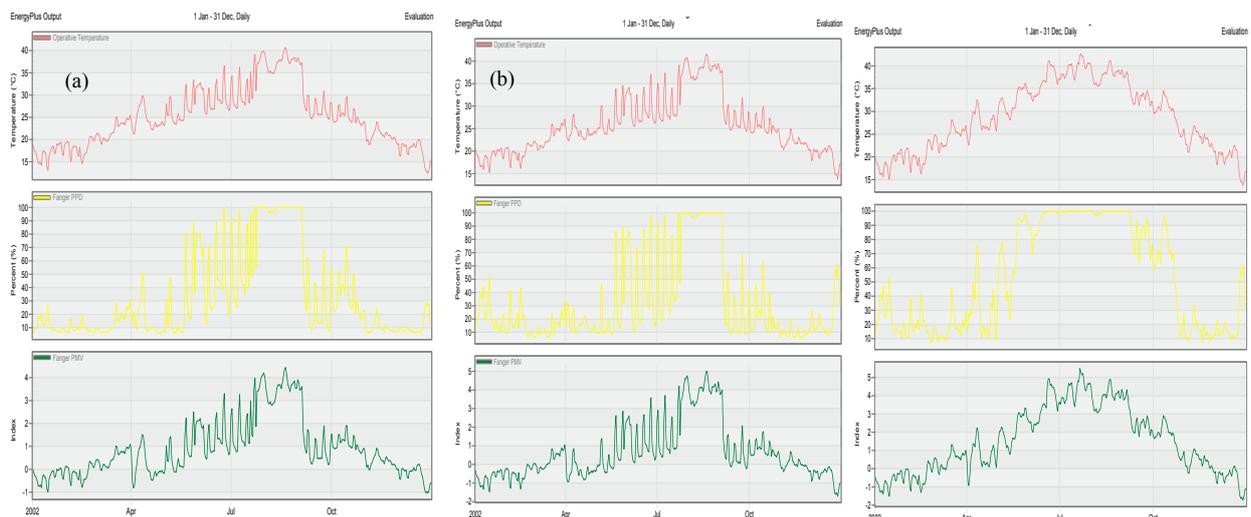


Figure VII.10 : Les résultats des simulations : température opérative, PMV et PPD ;
(a) Bâtiment B1, (b) Bâtiment B2, (c) Bâtiment B3.

Les résultats montrent que la période de surchauffe s'étend de Juin à Septembre et que ce dernier est le mois le plus chaud de l'année scolaire tandis que Janvier est le plus froid. Le bâtiment B3 a la plus grande période de surchauffe avec un pourcentage élevé de mécontentement. Les niveaux de PMV sont alignés de manière similaire avec les températures opératoires de telle sorte que plus les températures sont élevées, plus le PPD est élevé. En outre, dans tous les bâtiments, les conditions de froid hivernal étaient en quelque sorte acceptables.

VII.3.2.1.1. Résultats de la période estivale

La période estivale choisie pour effectuer la simulation est la même période que celle des campagnes de mesures *in-situ* définie par la semaine du *design week* (du 8 au 10 Septembre). Dans cette partie, les résultats des simulations horaires seront présentés sous forme de graphes illustrant pour chaque bâtiment les températures opératives, l'indice du vote

La figure indique que le bâtiment 1 (avec les murs d'enveloppe en briques rouges creuses) a la

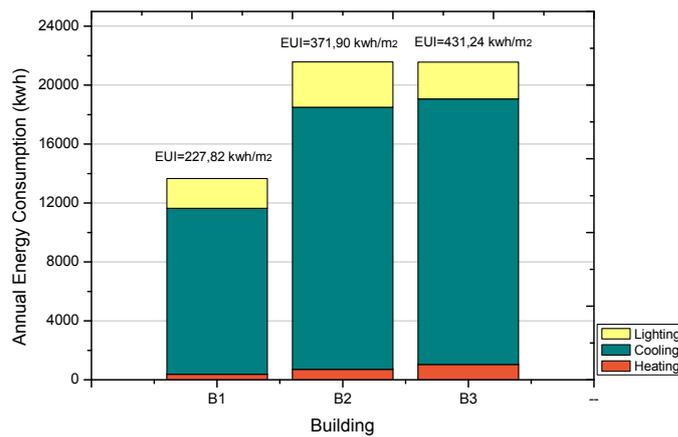


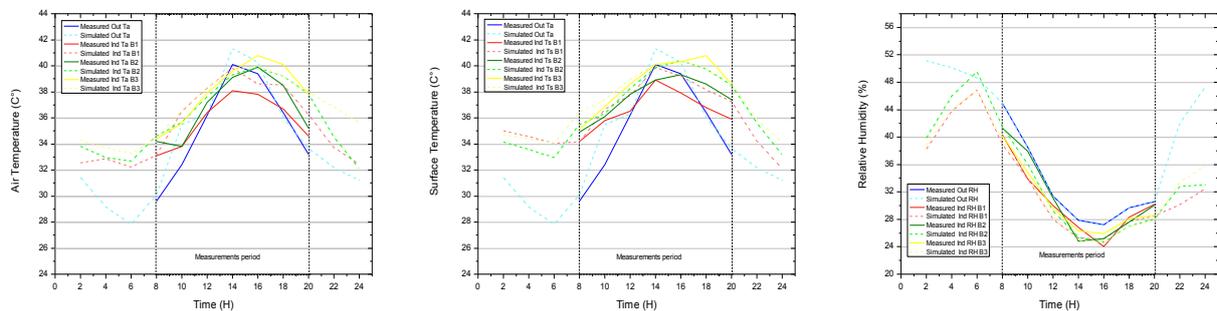
Figure VII.14 : Résultats de la simulation énergétique de la consommation annuelle et de l'intensité énergétique annuelle utilisée pour les trois bâtiments étudiés.

consommation d'énergie annuelle et l'EUI la plus faible (227,82 kWh/m²). Par conséquent, le bâtiment B1 a été choisi pour servir comme modèle de base pour la deuxième partie de la recherche.

VII.3.3. La validation des résultats des simulations

Pour réaliser l'étude paramétrique, une comparaison plus approfondie entre les valeurs obtenues par simulation et les valeurs des mesures réelles et des calculs d'erreur ont été effectués. Notamment, il fallait calculer le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne comme mentionné dans ASHRAE 14-2014, CV(RMSE) et le MBE.

Les graphs dans la figure VII.15 présentent une comparaison entre les paramètres thermiques calculés et mesurés.



Figures VII.15 : Les températures et humidité intérieure et extérieure mesurées et simulées lors d'une journée représentative estivale.

La validation du modèle est un processus essentiel pour calibrer les données de surveillance et les résultats de simulation. Selon la directive ASHRAE 14 (ASHRAE 2014 ; Semahi et al., 2019), la technique du calibrage repose sur différentes étapes. La première étape consiste à utiliser une technique de comparaison statistique comme méthode quantitative pour déterminer le niveau de conformité de deux indices statistiques : l'erreur de biais moyenne

(MBE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne CV(RMSE). Les indices ont été calculés manuellement à l'aide de l'équation (1) et de l'équation (2) :

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{Np} (Mi - Si)}{\sum_{i=1}^{Np} Mi} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Np} (Mi - Si)^2}{Np}} \times 100(\%) \quad (2)$$

Où,

Mi et Si : sont les données mesurées et simulées à un intervalle de temps ; Np : est le nombre total de valeurs de données utilisées pour le calcul, et \bar{y} est la valeur moyenne des données mesurées.

Selon la directive ASHRAE 14, le modèle de simulation énergétique et thermique est considéré comme calibré si les valeurs horaires de l'indice MBE sont à $\pm 10\%$. Les valeurs horaires de CV(RMSE) sont inférieures à 30 %, tandis que les valeurs mensuelles de l'indice MBE sont à $\pm 5\%$, et les valeurs mensuelles de CV(RMSE) sont inférieures à 15 %. De faibles valeurs d'erreur indiquent un étalonnage élevé (Royapoor et al., 2015 ; Semahi et al., 2019), et il est beaucoup plus facile d'observer une faible valeur d'indice MBE que l'indice CV(RMSE). Le tableau 7.5 résume les résultats du calcul du MBE horaire et du CV(RMSE) pour le paramètre thermique du modèle des trois bâtiments pour les jours de référence d'hiver et d'été.

Tableau 7.5 : Calculs horaires du MBE et du CV(RMSE).

Indice	B	Température de l'air extérieur		Température ambiante		Température surfacique		Humidité Relative	
		Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver
MBE (%)									
	B1	-2.35	-4.38	-3.31	-3.54	-5.15	-4.94	2.87	-1.21
	B2			-2.43	-1.23	0.45	-4.22	2.76	-1.65
B3	-0.10			-4.17	1.52	-3.88	3.48	0.74	
CV(RMSE) (%)									
	B1	13.72	20.23	27.65	14.26	10.38	28.84	17.59	5.51
	B2			15.33	1.30	0.53	21.92	16.64	10.01
B3	0.03			19.86	6.26	18.44	25.95	2.09	

Les résultats des calculs montrent que le MBE de la température extérieure était de -2,35 % en été et de -4,38 % en hiver, et le CV(RMSE) était de 13,72 % et 20,23 % en été et en hiver, respectivement. Le MBE de la température de l'air intérieur était compris entre -0,10% et -4,17 %, et le CV(RMSE) était compris entre 0,03 % et 27,65 % dans les trois bâtiments. Tandis que pour les températures de surface, le MBE était compris entre -5,15 % et 1,52 % et le CV(RMSE) était compris entre 0,53 % et 28,84 % dans les trois bâtiments.

Les résultats de l'étalonnage indiquent que dans tous les 3 cas étudiés et pour les jours de référence d'été et d'hiver, les pourcentages horaires de MBE et de CV(RMSE) pour tous les paramètres thermiques se sont avérés être dans la plage des recommandations ASHRAE-14En

Pour la période hivernale le modèle optimisé arrive à réaliser un PMV allant de -1.5 à 0.1 indiquant une sensation neutre à légèrement froide et traduisant un pourcentage d'insatisfaction de 5 à 50%, tandis que le modèle de base enregistrait un PMV plus faible indiquant une plus grande sensation de froid et plus d'insatisfaction.

De manière générale, les résultats prouvent que le modèle optimisé global est arrivé à améliorer la sensation de confort thermique de même qu'il a diminué sensiblement l'insatisfaction en période estivale et hivernale.

La figure 7.41 présente les résultats de la consommation énergétique annuelle et de l'intensité énergétique annuelle simulée pour le modèle de base et le modèle optimisé global.

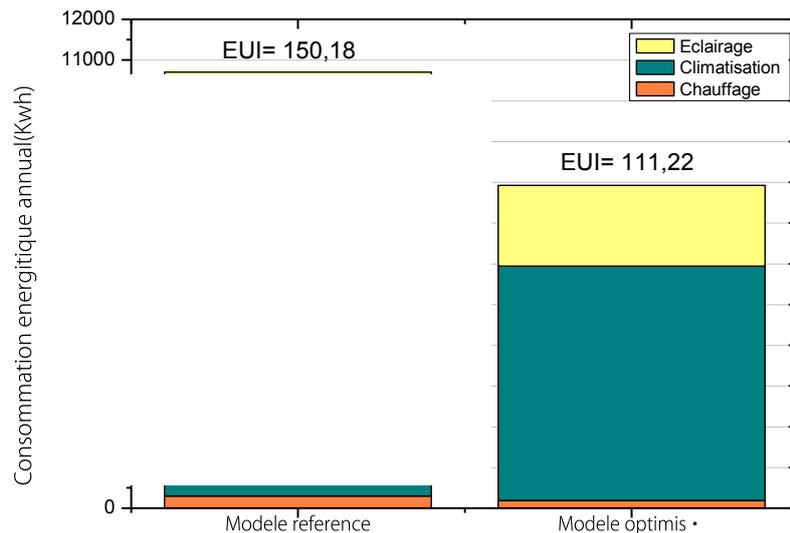


Figure VII.41 : Graphes de la consommation énergétique annuelle et de l'intensité énergétique annuelle simulées pour le modèle référence de base et le modèle optimisé global.

Le graphe montre qu'une baisse importante de la consommation totale d'énergie et de l'intensité énergétique a pu être réalisée. Ainsi, une baisse totale de 2775,02 kWh avec un pourcentage de réduction de 26,12 %, est possible grâce au traitement judicieux des parois opaques et des ouvertures ; en même temps, la baisse majeure concerne les besoins énergétiques dus à la climatisation qui ont pu être abaissés à 2570,13 kWh avec un pourcentage de réduction de 31,88%.

Conclusion

L'enveloppe du bâtiment est la barrière entre l'environnement intérieur et extérieur, ce qui en fait le lieu où se déroulent toutes les interactions thermiques majeures. Par conséquent, les différentes caractéristiques des composants de l'enveloppe ont un impact significatif sur la performance du bâtiment. Le présent chapitre a été consacré à l'étude paramétrique et l'optimisation des composants de l'enveloppe sachant que les paramètres ciblés étaient les parois opaques et les ouvertures.

Sur la base des données collectées et le traitement des résultats de la partie empirique notamment les données météorologiques de la ville de Sidi Okba, le processus de simulation a d'abord comparé les performances thermiques et énergétiques de trois CEM choisis comme cas d'étude dans le but de sélectionner un bâtiment qui a servi de modèle de référence pour l'optimisation qui s'est déroulée en deux étapes : l'une était dédiée à l'optimisation des parties opaques de l'enveloppe, notamment, les propriétés des matériaux et la composition murales ; et l'autre était consacrée à l'optimisation des caractéristiques des fenêtres en termes de rapport ratio d'ouverture, type de vitrage et facteur d'ombrage.

Une validation-calibration préliminaire du modèle a été effectuée avant de lancer le calcul numérique pour l'étude paramétrique et l'optimisation. Ensuite, le processus d'optimisation des murs de l'enveloppe (parois opaques) est passé par la simulation de différents modèles créés de certains scénarios d'optimisation puis les modèles testés étaient à chaque fois comparés au modèle de base pour déterminer l'ampleur des améliorations globales qu'il est possible d'attendre en termes de confort thermique et de performance énergétique. Dans ce volet de l'étude, les principaux paramètres optimisés étaient le choix du matériau soit : murs en briques creuses, briques de terre, pierres, parpaing et béton ; l'épaisseur de la paroi ; différents types d'isolants ; la localisation de l'isolation, ainsi que différentes couleurs et textures.

Pour l'optimisation des ouvertures, différents modèles ont été créés et optimisés en fonction de différents paramètres tels que le taux d'ouverture de la fenêtre, le type de vitrage des fenêtres et les facteurs d'ombrage. Les performances des scénarios proposés simulés ont d'abord été évaluées séparément pour montrer à chaque fois les paramètres optimaux, lesquels ont été ensuite réunis pour générer le cas optimisé global.

Les résultats ont montré que les composants de l'enveloppe de par leurs propriétés ont un impact sur les performances thermiques et énergétiques du bâtiment scolaire dans sa globalité. Par conséquent, des choix adéquats des matériaux, des couleurs et des textures des murs, ainsi que le meilleur type de vitrage et les meilleurs attributs formelles, dimensionnelles des ouvertures, etc. doivent être faits afin d'améliorer les performances du bâtiment et d'assurer un environnement intérieur favorable.

Au final, l'étude a prouvé que l'utilisation d'éléments et de matériaux d'enveloppe appropriés tenant compte des spécificités climatiques a une grande contribution à l'amélioration et à la préservation des conditions de confort thermique dans les salles de classes tout en minimisant les besoins énergétiques du bâtiment scolaire.

Conclusion générale

1. Synthèse de l'étude et principaux résultats

Cette recherche a été menée dans le but d'étudier et d'optimiser les performances des écoles, en termes du niveau de confort thermique généré à l'intérieur des salles de classe et de l'efficacité énergétique du bâtiment scolaire, dans un contexte climatique chaud et sec en agissant sur les caractéristiques matérielles de l'enveloppe. De ce point de vue, l'interaction des différents éléments de l'enveloppe et leurs impacts sur le fonctionnement thermique et énergétique du bâtiment scolaire ont été examinées en fonction de leurs propriétés matérielles sous les conditions d'un climat chaud et sec.

L'étude a porté sur des bâtiments existants recensés dans la ville de Sidi Okba (Wilaya de Biskra) et considérés comme représentatifs des caractéristiques typologiques, architecturales et matérielles les plus récurrentes des écoles publiques algériennes. Les exemples étudiés ont été choisis pour illustrer trois périodes de construction et ainsi différentes variantes d'enveloppe se distinguant selon les matériaux utilisés pour la construction des parois extérieures. De ce point de vue, les établissements pris comme cas d'étude, ont permis de mener une analyse comparative concluante relative à l'influence des matériaux de l'enveloppe sur les performances thermiques et énergétiques du bâtiment et sur la sensation et la satisfaction des utilisateurs.

Pour réaliser la recherche, un cadre méthodologique s'appuyant sur trois approches fondamentales : conceptuelle, empirique et numérique, a été élaboré. Ainsi, l'approche conceptuelle a porté sur une revue de la littérature et une recherche bibliographique visant à approfondir la connaissance des concepts liés au sujet. De son côté, l'étude empirique a été effectuée après avoir réalisé une analyse typologique visant à prendre connaissance de la réalité de l'objet de la recherche et, par la suite, sélectionner un ensemble de bâtiments scolaires pouvant servir en tant que corpus d'étude. A l'issue de ce travail de terrain, des mesures in situ combinées à des enquêtes et des questionnaires ont été menés pour étudier et évaluer quantitativement et qualitativement le confort thermique et la performance énergétique dans trois établissements scolaires existants ayant servis comme cas d'étude. A ce titre, les bâtiments situés dans la ville de Sidi Okba ont été choisis pour illustrer trois périodes de construction et ainsi différentes variantes d'enveloppe se différenciant en termes de matériaux et de procédés techniques utilisés pour la construction des parois extérieures. Pour sa part, l'étude numérique réalisée à l'aide des logiciels de simulation thermique et énergétique DesignBuilder et EnergyPlus, a permis d'évaluer et d'optimiser

l'impact du choix des matériaux d'enveloppe et de leurs propriétés sur les performances du bâtiment scolaire. Une série de modèles et de scénarios ont été testés pour étudier l'impact des composants de l'enveloppe du bâtiment (matériaux des parois opaques, isolation, vitrage) et leurs propriétés (épaisseur des murs, type et positions d'isolation, type de verre et facteur d'ombrage, couleurs des surfaces et textures). Au final, les paramètres les plus performants ont été sélectionnés comme solution optimale.

Le manuscrit se présente en deux parties et sept chapitres ; la première partie est consacrée à l'élaboration du cadre théorique et conceptuel dans lequel ont été définis les concepts clés liés aux hypothèses ainsi que les notions de base fondant le sujet et permettant de l'expliquer et de le clarifier. La seconde partie analytique est dédiée à la vérification empirique et expérimentale ; elle est basée sur un cadre méthodologique préalablement développé.

Le **premier chapitre** : traite de deux concepts majeurs du sujet de recherche, en premier lieu, la notion de confort thermique, ses paramètres ainsi que les approches et outils de son évaluation. Plus particulièrement, les exigences relatives au confort thermique dans le secteur tertiaire et dans l'environnement intérieur des bâtiments scolaires, sont explorées. Ainsi, par définition le concept de confort thermique est très complexe, car il s'agit d'une notion subjective difficilement mesurable et qui relève de plusieurs sciences et domaines tels que la physiologie, la physique du bâtiment, le génie mécanique et la psychologie. De plus, différentes variables et paramètres peuvent affecter la sensation de confort thermique humain. Traditionnellement, 6 paramètres sont directement impliqués dans l'évaluation de la sensation de confort thermique humain ; ces paramètres sont liés à l'environnement physique et à l'individu, notamment, son âge, son genre, son état de santé, les vêtements portés et la nature de l'activité physique. Les conditions géographiques et climatiques jouent également un rôle majeur en raison du comportement et de l'adaptabilité de l'homme. Dans les études consacrées à l'évaluation du confort thermique, deux approches distinctes peuvent être distinguées : la première est une approche statistique et analytique basée principalement sur le calcul du bilan thermique en s'appuyant sur les modèles physiques et physiologiques du corps humain. En contrepartie, le second fait prévaloir une approche adaptative basée sur des études empiriques et des mesures quantitatives et qualitatives sur le terrain. En usant de l'une ou l'autre de ses approches, le confort thermique dans le bâtiment a fait l'objet de débats et des valeurs limites ou guides suggérés pour les bâtiments ont été proposés par un certain nombre d'institutions professionnelles et dans la législation au fil des ans, telles que ISO 7730, CEN 15251 et ASHRAE Standard 55.

La deuxième notion traitée dans ce premier chapitre aborde la question de l'énergie dans le bâtiment, la problématique énergétique globale, et le concept d'efficacité énergétique. A cet égard, le secteur du bâtiment est considéré comme l'un des principaux contributeurs à la crise énergétique mondiale résultant de la surconsommation des énergies fossiles par les bâtiments en vue d'assurer le fonctionnement des systèmes de conditionnement d'air utilisés pour assurer le confort thermique intérieur. Il faut souligner également que l'énergie devenant un enjeu mondial, le concept d'efficacité énergétique a commencé à occuper une place importante dans les politiques publiques de la plupart des pays développés. De ce point de vue, l'efficacité énergétique est un terme générique qui s'appuie sur différents indicateurs pour quantifier les changements ; il vise à utiliser moins d'énergie pour produire la même quantité de service ou de production utile. Par conséquent, l'efficacité énergétique est souvent définie au sens large par le simple rapport : rendement utile d'un procédé / apport d'énergie dans un procédé. Par extension, dans le domaine du bâtiment, l'efficacité énergétique signifie que le bâtiment consomme moins d'énergie pour assurer les conditions de confort. En outre en vue d'assurer des résultats substantiels et rapides, une politique globale d'économie d'énergie est souvent établie comme une solution urgente pour atténuer les problèmes actuels de crises énergétiques. Ainsi, divers programmes et directives européens ont été annoncés, à savoir : la directive sur l'efficacité énergétique (EED 2012) et la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD 2010), directive modificative (2018/844/CE). En Algérie et à partir de février 2011, différentes mesures et programmes ambitieux pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique ont été adoptés en vue de préserver les ressources du pays et optimiser leur utilisation. Parmi ces mesures, il y a eu la création de différentes agences telles que : APRUE, FNME et des programmes tels que : le Programme National d'Efficacité Energétique, Eco-Bat qui consiste en la construction de 600 logements locatifs sociaux assurant une optimisation du confort intérieur en réduisant la consommation énergétique due au chauffage et à la climatisation.

Le **deuxième chapitre** a porté sur le bâtiment scolaire ; il s'est intéressé aux notions fondamentales liées à ce type de bâtiment et à son évolution. Ainsi, du point de vue de son développement historique, le bâtiment scolaire a traversé plusieurs étapes qui ont abouti à un nouveau mode de concevoir l'espace consacré aux activités d'enseignement et d'apprentissage. D'une façon générale, une lecture détaillée de l'évolution architecturale de l'école et des équipements scolaires dans le monde et en Algérie a permis de mettre en évidence différentes typologies de constructions scolaires du point de vue de leur

organisation spatiale, à savoir : type cour, type bloc, type grappe, et type ville. Toutes les typologies sont générées à partir d'une unité répétitive représentée par la classe, par contre, elles diffèrent dans les articulations et les modes de distribution de ces unités. Les caractéristiques architecturales de la salle de classe ont ensuite été présentées étant donné que cette dernière constitue l'espace principal de ce type de construction ; soit un lieu où se déroule le processus éducatif et où les utilisateurs un lieu passent la majorité de leurs journées tout au long de l'année scolaire.

Le **troisième chapitre** : traite la notion d'enveloppe du bâtiment et de sa dualité fonctionnelle. Ainsi, la première partie présente l'enveloppe du bâtiment en tant qu'élément essentiel lors de la conception du bâtiment. Elle a été définie dans la littérature comme une couche de protection entre les espaces intérieurs et extérieurs. Alors que la façade en tant que partie principale de l'enveloppe a toujours été le lieu d'expression de l'identité et du langage architectural, de ce fait, elle est souvent représentative des styles et des courants architecturaux dominants propres à une région et à une époque. La notion d'enveloppe du bâtiment s'est développée au fil du temps avec le développement de l'homme et son style de vie. Différents types et classifications de l'enveloppe du bâtiment ont été introduits en considérant la fonction, le mode de construction, les matériaux, etc. Ainsi, sur la base du système structurel, deux types peuvent être distingués, à savoir, l'enveloppe porteuse et non porteuse. D'autres typologies ont également été employées pour caractériser certains de ses éléments, notamment, la façade ventilée, double peau, transparente etc.

La deuxième partie du chapitre aborde l'enveloppe du bâtiment en tant que régulateur thermique en insistant sur le comportement thermique de ses différentes parties. L'enveloppe du bâtiment joue un rôle majeur dans le calcul du bilan thermique du fait qu'elle contrôle les flux et les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. En outre, la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment dépend principalement des caractéristiques matérielles des parties opaques et transparentes.

Dans la troisième partie de ce chapitre, la notion de climat a été examinée en relation avec l'enveloppe et sa performance environnementale. A ce titre, l'influence des éléments du climat sur le comportement thermique de l'enveloppe varie d'une région à l'autre ; la création de méthodes et d'outils d'aide à la décision a permis de mieux comprendre les caractéristiques du climat et d'adapter la conception du bâtiment et de l'enveloppe en fonction des spécificités climatiques. Le climat chaud et sec prévalent dans le sud de l'Algérie a été analysé et ses principales caractéristiques ont été relevées. Compte tenu de ses caractéristiques, la configuration d'une enveloppe dans ce type de climat a été

déterminée afin d'assurer des conditions de confort favorables et de réduire l'impact de la chaleur et de la sécheresse, et en particulier, de protéger contre le rayonnement solaire élevé.

Le **quatrième chapitre** a été réalisé sous forme d'une revue de littérature sur les études précédentes. De ce point de vue, il constitue la partie de liaison entre les chapitres du socle théorique où les différents concepts ont été introduits et définis, et les chapitres analytiques où l'interaction entre les variables de l'étude a été étudiée. Son but était de permettre l'élaboration d'un modèle d'analyse. A ce titre, le chapitre fournit un état de l'art sur le sujet traité. Ainsi, les travaux qui traitent du confort thermique et son corolaire la consommation d'énergie dans les établissements scolaires, ont été synthétisés selon leurs différents paramètres, variables, et méthode d'évaluations afin de pouvoir définir un modèle d'analyse. Les nombreuses études qui ont été menées sur ce sujet s'appuient sur des méthodes analytiques sous forme d'études de terrain (empiriques), ainsi que, numériques et expérimentales où différents types de simulations sont appliqués.

A la fin, un cadre méthodologique a été élaboré pour évaluer et optimiser la performance de bâtiments scolaires en se basant sur des approches quantitatives et qualitatives et en se référant à des cas réels sélectionnés dans des conditions d'un climat chaud et sec. Plus précisément, la méthodologie qui a été développée consistait à mettre en œuvre deux approches principales qui permettraient de collecter des données quantitatives et qualitatives. De ce point de vue, des enquêtes et des campagnes de questionnaires orientées vers les usagers des bâtiments scolaires pour évaluer leur sensation du confort thermique et leur satisfaction vis-à-vis de l'environnement intérieur ont permis de disposer des données qualitatives ; alors que la méthode expérimentale utilisant des mesures in situ relatives aux paramètres physiques de l'environnement intérieur ainsi que des tests effectués par simulation numérique à l'aide du logiciel DesignBuilder ont permis de recueillir les données quantitatives.

Pour sa part, la deuxième partie de la recherche s'est focalisée sur le traitement du problème posé avec une approche analytique et expérimentale en présentant le cas de l'étude, en décrivant les techniques d'investigation et les outils utilisés, l'analyse des données, et les étapes de la simulation numérique. Les résultats obtenus sont ensuite présentés, discutés et interprétés.

Le **cinquième chapitre** décrit le cadre de l'étude, notamment, les conditions climatiques ainsi que le contexte géographique, architectural et spatial. Le chapitre commence par présenter les données climatiques et géographiques de la ville de Sidi Okba

située dans la wilaya de Biskra dans le sud de l'Algérie, puis effectuée une brève analyse de son climat chaud et aride. Une étude architecturale prospective a ensuite été effectuée pour sélectionner des exemples représentatifs à prendre comme cas d'étude qui soient les plus appropriés pour la recherche. L'analyse architecturale et typologique menée dans cette ville sur les différentes écoles a conduit à une première sélection des différents cas d'étude. Une analyse plus approfondie a été conduite sur la base de documents graphiques, des pré-enquêtes, de visites de terrain, de prises de photo, etc. qui a permis de sélectionner trois établissements scolaires en fonction de paramètres préalablement fixés. Ces trois bâtiments ont fait l'objet d'une analyse architecturale afin d'identifier leurs différentes caractéristiques architecturales et constructives les quelles ont été utilisées et analysées dans l'étude empirique.

Le **sixième chapitre** a été consacré à l'étude expérimentale réalisée sous forme de mesures in situ et complétée par une enquête au niveau des 3 bâtiments scolaires choisis comme cas d'étude. Cette partie de l'étude consistait à évaluer quantitativement les conditions hygrothermiques à l'intérieur des salles de classe dans chaque exemple étudié en mesurant certains paramètres de confort, notamment, les températures et l'humidité relative; en parallèle une enquête par questionnaires administrés aux utilisateurs a été réalisée dans le but d'explorer quantitativement et qualitativement le confort thermique intérieur et la sensation thermique et la satisfaction des usagers.

Les résultats de l'évaluation quantitative effectuée par la prise de mesures in situ, ont révélé que les conditions minimales du confort thermique n'étaient réalisées dans aucune des trois écoles étudiées que ce soit pour la saison chaude ou froide. Pratiquement, les salles de classe présentaient un environnement thermique inconfortable tout au long de la journée avec une température moyenne élevée de plus de 30°C pendant la saison chaude et moins de 15°C en saison froide ; et donc dans les deux cas de figures, l'environnement intérieur était en dehors des limites de confort. L'étude a également mis en évidence l'impact des matériaux de construction de l'enveloppe sur la performance thermique du bâtiment ; ainsi, les murs de briques sont mieux performants que les murs de parpaing et de béton, et les murs isolés résistent nettement mieux aux fluctuations thermiques quotidiennes. Les résultats de l'enquête par questionnaire révèlent une situation prédominante d'insatisfaction à l'égard de l'environnement thermique, surtout pendant la saison chaude. Cependant, durant la saison froide la sensation d'inconfort était moindre en raison des comportements adaptatifs et du taux d'occupation élevé. En définitive, l'étude empirique présentée dans ce chapitre a révélé un manque de confort thermique dans le bâtiment scolaire d'où le besoin

de corriger cette situation en développant un modèle architectural performant de salles de classe qui soit adapté aux conditions d'un climat chaud et sec en termes de confort thermique et de consommation énergétique.

Le **septième chapitre** a été consacré à l'étude paramétrique par simulation numérique en utilisant le logiciel (DesignBuilder). Grâce à une comparaison entre les résultats de la simulation via le logiciel DesignBuilder/EnergyPlus et les mesures réelles in situ, la validation thermique de la maquette numérique a été effectuée au préalable. Ensuite, des simulations ont été réalisées dans le but d'améliorer et d'optimiser les performances thermiques et énergétiques des cas modélisés. Les tests ont porté sur l'impact des matériaux et des composants de l'enveloppe du bâtiment sur l'amélioration de la performance thermique et énergétique des bâtiments scolaires. Les paramètres étudiés étaient respectivement : les matériaux opaques des murs, le type d'isolation, la position de l'isolation, le type du vitrage, le facteur d'ombrage et l'absorption de la surface extérieure.

L'étude numérique comportait deux parties ; la première partie a été consacrée à la modélisation et à la simulation des performances thermiques et énergétiques des trois bâtiments pris comme cas d'étude pour effectuer les mesures in situ. L'interprétation des résultats a révélé que tous les bâtiments ne pouvaient pas fournir des conditions thermiques adéquates pendant la saison estivale face à des températures extérieures extrêmement chaudes. Cependant, le bâtiment de l'école aux doubles murs de briques rouges présentait les températures intérieures et l'amplitude thermique les plus basses par rapport aux autres bâtiments.

En outre, l'évaluation énergétique à l'aide de simulations a également révélé que le même bâtiment était le plus performant en termes de consommation d'énergie totale avec l'IUE le plus bas de 227,82 kWh/m². Par conséquent, en fonction des caractéristiques de ce bâtiment, différents modèles numériques ont été développés pour étudier l'impact de différents paramètres d'enveloppe et, ainsi, arriver au modèle le plus optimal pour l'enveloppe du bâtiment. Les résultats obtenus ont montré que les matériaux d'enveloppe opaques à doubles parois avec une cavité d'air et les parois avec une isolation intermédiaire en polyester enregistraient les meilleures performances en termes de conductivité thermique, indiquant que les types de matériaux d'isolation ont un impact imminent sur l'environnement intérieur et le processus de gain et de perte de chaleur. A ce titre, ce cas de figure a permis d'atteindre une réduction de 4°C en termes de température intérieure ambiante et, simultanément, la plus faible consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement, soit une dépense énergétique annuelle estimée à 9748,37 kWh.

Pour ce qui est de l'impact de la surface vitrée, les résultats obtenus ont confirmé l'effet négatif de l'augmentation de la surface vitrée et du type de vitrage sur le confort thermique et la consommation d'énergie. A ce titre, les résultats ont démontré que le type de vitrage, notamment, le double vitrage à faible émissivité avec gaz, a une grande influence sur la performance du bâtiment en termes de réduction des gains de chaleur transférés et d'amélioration de la température ambiante. En ce qui concerne l'impact de la protection solaire (le facteur d'ombrage), la protection contre le rayonnement solaire a un impact positif sur l'amélioration des conditions thermiques en été. De plus, les modèles relatifs à l'impact de l'absorption de surface extérieure démontrent que la performance des façades qui ont une faible absorption et une réflectivité élevée était plus efficace.

Un modèle unique optimisé a été défini en combinant tous les paramètres optimaux en relation avec l'enveloppe, à savoir : des murs de type doubles parois en brique creuse avec isolation thermique intermédiaire en polystyrène expansé, surface extérieure lisse et claire avec un faible facteur d'absorption de 0,2, un ratio d'ouvertures de l'ordre de 20%, utilisation d'un double vitrage avec gaz argon et protection solaire avec un facteur d'ombrage de 0,8. Ce modèle optimisé a, ensuite, été comparé au modèle de base initial ; les résultats obtenus pour le modèle optimisé ont révélé une réduction de la température ambiante de 8°C, alors que l'amélioration de la sensation de confort thermique était de l'ordre de 16% avec une nette diminution du niveau d'insatisfaction en été comme en hiver. Simultanément, une diminution de la consommation énergétique estimée à 26,12%, a pu être atteinte, ce qui a induit une réduction majeure des besoins énergétiques liés à la climatisation de 2570,13 kWh soit un pourcentage de 31,88%. Au final, l'étude a prouvé que l'utilisation d'éléments et de matériaux d'enveloppe appropriés tenant compte des spécificités climatiques a une grande contribution à l'amélioration et à la préservation des conditions de confort thermique dans les salles de classes tout en minimisant les besoins énergétiques du bâtiment scolaire.

2. Recommandations

Les résultats obtenus dans cette recherche ont été exploités pour formuler un ensemble de recommandations destinées à fournir des orientations pour guider la conception des bâtiments scolaires dans des contextes climatiques chauds et secs. Ces recommandations dans l'ensemble permettront d'améliorer le confort thermique des utilisateurs et la performance énergétique des bâtiments.

Pour les parties opaques de l'enveloppe :

- L'utilisation de matériaux opaques à faible conductivité et de grande résistance thermique;
- L'utilisation de matériaux à forte inertie thermique et à haute capacité thermique;
- L'utilisation de matériaux de bonne épaisseur pour assurer l'inertie thermique exigée ;
- L'utilisation de doubles parois avec isolation médiane (lame d'air, isolation polyester, etc.);
- L'utilisation d'isolants thermiques dans les différentes parties de l'enveloppe (enveloppe isotherme) ;
- Les traitements et l'isolation de la jonction entre les parties de l'enveloppe pour éviter l'effet des ponts thermiques ;
- Le choix d'un matériau à faible diffusivité et à forte effusivité ;
- L'emplacement de l'isolation thermique doit être dans la couche la plus proche des surfaces externes ;
- La compacité de l'enveloppe et de la forme du bâtiment en général ;
- L'orientation nord-sud des murs de façades des salles de classe est recommandée pour mieux contrôler le rayonnement solaire et ainsi diminuer les risques de surchauffe et d'éblouissement ;
- L'utilisation d'un traitement superficiel d'enveloppe de couleur claire et d'une texture lisse à haute réflectance solaire et faible absorbance.

Pour la partie transparente de l'enveloppe les (fenêtres) :

- L'isolation des fenêtres et des encadrements de fenêtres et l'utilisation de scellement pour éviter les déperditions thermiques et les ponts;
- L'utilisation d'un taux d'ouverture faible à moyen de 20 à 25 % ;
- Le choix du ratio d'ouverture par façade doit suivre l'orientation et l'emplacement de la fenêtre ;
- L'utilisation de cadres de fenêtres aux couleurs claires en bois ou en PVC (faible conductivité thermique) ;
- L'utilisation de vitrages de type hautes performances pour diminuer le transfert de chaleur à travers le vitrage (doubles vitrages à faible émissivité, à lame d'air ou à gaz d'argon) ;
- L'intégration de protections solaires au niveau des surfaces les plus exposées au rayonnement solaire (maximiser l'ombrage des surfaces vitrées et opaques) ;
- Les caractéristiques et le choix de la protection solaire doivent tenir compte de l'orientation et du type de surface.

3. Limites de la recherche

Le manque de moyens est considéré comme une contrainte majeure qui a entraîné le choix d'un corpus d'étude assez réduit (trois bâtiments). L'idéal aurait été d'investir un nombre plus important de cas d'études qui auraient permis d'aboutir à des résultats plus exhaustifs en termes d'impact des matériaux sur la performance de l'enveloppe du bâtiment scolaire. En outre, l'accessibilité limitée aux écoles a rendu difficile le travail de terrain (mesures et enquête) ; ce qui a finalement contrôlé le choix des bâtiments et les variables étudiées.

Un autre obstacle était dû au manque d'instruments de mesure permettant d'enregistrer des valeurs sur de longues périodes (jours, mois, années) afin de bien comprendre le fonctionnement et le comportement thermique des bâtiments et l'impact des différentes conditions. De plus, la disponibilité des instruments de mesure (un de chaque type) qui auraient permis d'enregistrer les valeurs dans une multitude de points du plan de travail en même temps et à plusieurs moments de la journée et à différents endroits simultanément, a influencé les résultats expérimentaux en limitant l'étude comparative et son exhaustivité. Celle-ci aurait pu être plus précise si les instruments de mesure disponibles étaient plus nombreux, tel que recommandé dans la littérature.

4. Perspectives de recherche

Le sujet traité dans cette recherche est loin d'être clos et de nouveaux questionnements liés à ce thème émergent et se développent constamment. De ce point de vue, d'autres perspectives et aspects liés à cette recherche pourraient être traités et d'autres axes pourraient être développés à savoir :

- L'étude de l'impact de la forme et de la géométrie de l'enveloppe du bâtiment sur les parties opaques et les fenêtres ;
- L'optimisation des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment scolaire pour arriver à un équilibre entre le confort thermique, l'éclairage et la consommation d'énergie pour les climats chauds et secs et d'autres types de conditions climatiques ;
- L'étude de l'impact des systèmes actifs sur le comportement thermique des bâtiments scolaires et sur l'assurance du confort thermique avec une moindre consommation d'énergie ;
- L'exploration de l'effet de différents matériaux innovants tels que l'influence des matériaux à changement de phase (MCP) ;

- L'étude de l'impact des paramètres architecturaux tels que la distribution spatiale et la conception globale, ainsi que l'organisation spatiale à l'échelle du plan de masse sur la performance énergétique ;
- L'étude de différents contextes climatiques afin de proposer un modèle de conception ou des lignes directrices pour chaque type de climat.

Annexes

**Annexe A : Les données météorologiques de
la ville de Sidi Okba**

Les valeurs des températures moyennes mensuelles de la ville de Sidi Okba Biskra sont présente dans le tableau A.1 pendant 19 ans (entre 2000 et 2019).

Tableau A.1 : Les températures moyennes mensuelles sous abri de Biskra entre 2000 et 2015(Source : Station météorologique de Biskra, 2017 - adaptée par l'auteur, 2019)

	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	AVERAGE
2000	9,7	14,05	18	22,3	28,25	34,95	34,3	34,32	29,2	22,35	17,45	13,8	23,22
2001	12,65	13,5	20,3	20,85	26,1	32,5	35,1	34,1	29,25	25,75	16,65	11,55	23,19
2002	11,2	12,85	18,35	21,25	25,6	32,45	34,4	33	28,65	23,45	17,75	13,95	22,75
2003	12,35	12,4	17,1	21,55	26,45	33,85	36,75	35,7	29,05	24,7	17,55	11,8	23,27
2004	12,2	14,6	17,25	20,65	24,2	30,85	34,25	34,7	29	25,5	15,5	12,6	22,6
2005	9,55	11,1	17,1	21,25	27,55	32,4	35,3	33	28,45	24,15	16,85	11,45	22,34
2006	10,3	12,85	18	23,3	28,35	32,2	35,25	33,2	28,55	25,65	18,35	13,15	23,26
2007	13,2	15,5	16,65	21,1	26,6	32,25	34,3	33,85	29,05	22,95	15,7	9,8	22,57
2008	12,15	14,1	17,2	22,15	26,95	31	35,5	34,05	29,45	23,45	15,85	11,55	22,78
2009	11,9	12,7	16,75	19,7	26,95	32,25	36,5	34,55	27,8	22,5	17,15	12,4	22,59
2010	12,6	15,15	18,05	21,95	25,3	30,8	35,05	33,7	28,7	22,7	16,7	10,85	22,62
2011	12,1	12,35	17,1	22,5	26,35	30,9	35,1	34,1	29,8	22,8	17,75	13,1	22,82
2012	11,6	10,6	17,15	21,35	26,8	34,05	35,8	35,45	29,3	24,5	18,6	12,95	23,17
2013	12,25	12,3	18,65	21,85	25,5	29,8	34,3	33,15	28,5	26,4	16,25	12,35	22,6
2014	13,05	14,95	16,55	21,8	26,15	31,65	34,35	32,6	31,25	24,95	19	12,65	23,24
2015	11,6	12,3	17,15	22,05	27,85	31,75	35,4	34,5	29,5	24,1	17,25	13,05	23,04
2016	10,9	15,35	17,15	22,35	26,65	31,9	34,85	33	29	25,255	17,8	13,85	23,17
2017	11,75	15,2	18,55	21,6	28,05	33,5	36,05	35,45	28,85	22,85	16,3	11,8	23,32
2018	13,2	12,7	17,95	21,95	25,35	31,05	36,05	32,85	30,2	22,9	16,95	13,25	22,86
2019	11,6	13,25	17,65	20,85	25,05	35,1	36,65	35,95	30,75	24,65	15,75	15,35	23,55
AVERAGE	11,79	13,39	19,33	21,61	26,5	32,26	35,26	34,06	29,21	24,07	17,05	12,56	23,09

L'année scolaire

Vacances d'été

L'année scolaire

Généralement et à partir des données de température moyenne comme montre le tableau A.1, il est clair que le mois de juillet est le mois le plus chaud de l'année et janvier le mois le plus froid. Cependant, les bâtiments scolaires ne fonctionnent pas toute l'année et en juillet, le mois le plus chaud de l'année, les écoles sont en vacances d'été qui s'étendent de juin à fin août. Par conséquent, il convient de prendre en considération ce fait et le choix doit être basé sur une année scolaire, pas toute l'année. D'après les données, il est clair que le mois le plus chaud d'une année scolaire est Septembre et le plus froid est Janvier.

Les données de température moyenne du mois de septembre et du mois de janvier d'une année scolaire représentative ont été exploitées et utilisées pour calculer la semaine représentant la "design week" de chaque période puis la sélection de la journée type

"Design Day" pour la prise de mesures sur le terrain, de questionnaires et de simulations basés sur la méthode présentée dans (Khadraoui,2019).

Le tableau A.2 présente la température moyenne journalière des deux mois retenus pour l'étude et pour la détermination de la semaine type "semaine de conception" et le choix du jour type de la sortie jour de conception mesures du mois le plus chaud (septembre) et le mois le plus froid (janvier) pour l'étude de terrain (tableau A.2).

Table A.2: La détermination de "design week" pour la période estivale et hivernale
(Source: Auteur, 2019).

Month January 2019	Daily average temperature	Month September 2019	Daily average temperature
01/01/2019	10.8	01/09/2019	31.5
02/01/2019	10.5	02/09/2019	31.7
03/01/2019	10.5	03/09/2019	30.9
04/01/2019	11.3	04/09/2019	31.3
05/01/2019	12.4	05/09/2019	33.2
06/01/2019	12.1	06/09/2019	32.9
07/01/2019	11.3	07/09/2019	31.2
08/01/2019	11.1	08/09/2019	30.4
09/01/2019	11.6	09/09/2019	30.4
10/01/2019	11.3	10/09/2019	29.8
11/01/2019	11.3	11/09/2019	30.1
12/01/2019	11	12/09/2019	30.6
13/01/2019	12.2	13/09/2019	20.1
14/01/2019	11.9	14/09/2019	29.9
15/01/2019	11.9	15/09/2019	29.7
16/01/2019	11.6	16/09/2019	29.3
17/01/2019	11.8	17/09/2019	29.6
18/01/2019	11.9	18/09/2019	29.8
19/01/2019	12.1	19/09/2019	29.9
20/01/2019	12.4	20/09/2019	29.2
21/01/2019	12.5	21/09/2019	29.1
22/01/2019	12.2	22/09/2019	28.6
23/01/2019	12.4	23/09/2019	28
24/01/2019	12.4	24/09/2019	28.8
25/01/2019	12.3	25/09/2019	27.3
26/01/2019	11.1	26/09/2019	27
27/01/2019	11.6	27/09/2019	27.7
28/01/2019	12.1	28/09/2019	27.2
29/01/2019	12.1	29/09/2019	27.1
30/01/2019	12.8	30/09/2019	27

La semaine typique "Designweek" choisie pour la période chaude a été déterminée entre le 5 et le 12 septembre en tenant également compte de l'accessibilité au bâtiment et des manœuvres d'exploitation et pour la période froide du 12 au 19 janvier.

Le logiciel des données météorologiques "Meteonorm V.7.2" a été utilisé pour générer un fichier climatique de la ville de Sidi Okba sous format "EPW" pour importer et utiliser dans la phase de simulation avec le logiciel "DesignBuilder".

La figure A.1 illustre les valeurs de la température annuelle maximale et minimale de la ville de Sidi Okba créée par le logiciel "Meteonorm V.7.2".

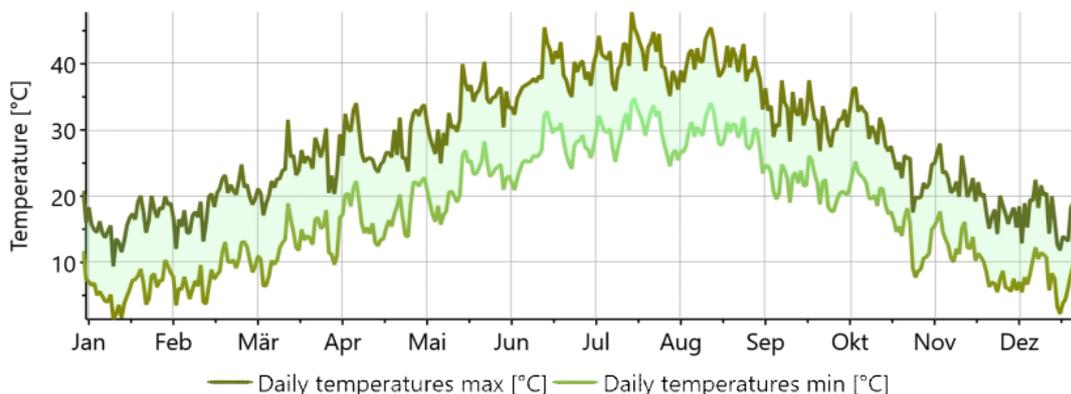


Figure A.1 : Les températures maximales et minimales de la ville de Sidi Okba pendant une année (Source : Meteonorm V.7.2)

Les graphes de la figure A2 présente les valeurs des radiations mensuelles et journaliers de la ville de Sidi Okba créées par le logiciel Meteonorm V.7.2

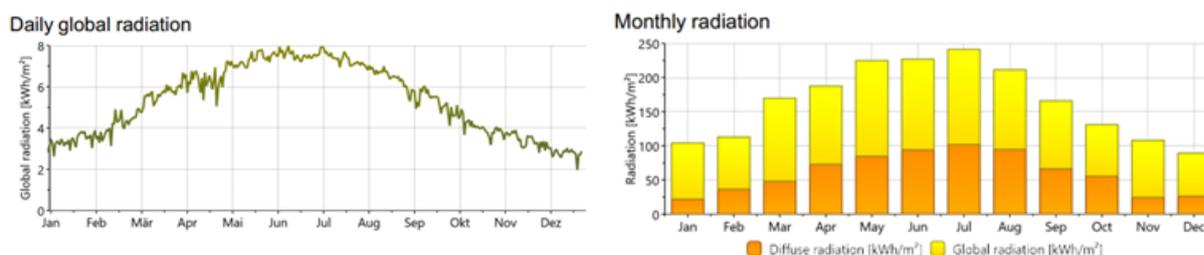


Figure A.2 : Les températures maximales et minimales de la ville de Sidi Okba pendant une année (Source : Meteonorm V.7.2)

La figure A.3 illustre les valeurs de précipitations de la ville de Sidi Okba créée par le logiciel "Meteonorm V.7.2"

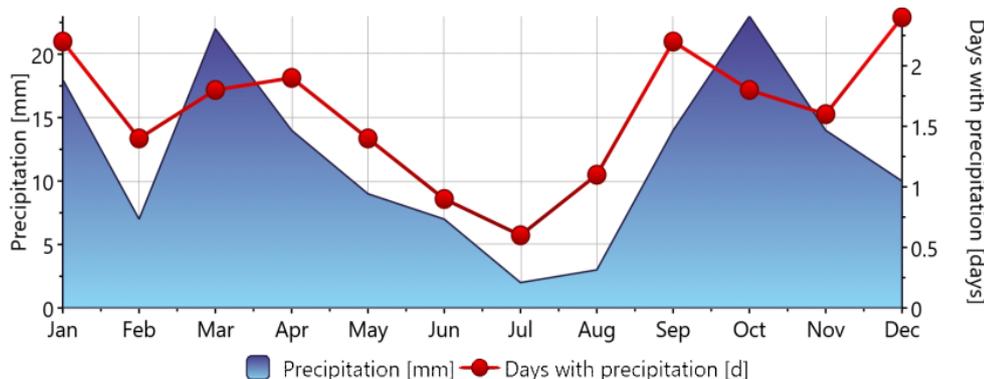


Figure A.3 : Les températures maximales et minimales de la ville de Sidi Okba pendant une année (Source : Meteonorm V.7.2)

La figure A.4 présente l'isotherme ou le graphe de la température de bulb sèche et la zone de surchauffe de la ville de Sidi Okba créée par le logiciel 'climate consultant V6.0'

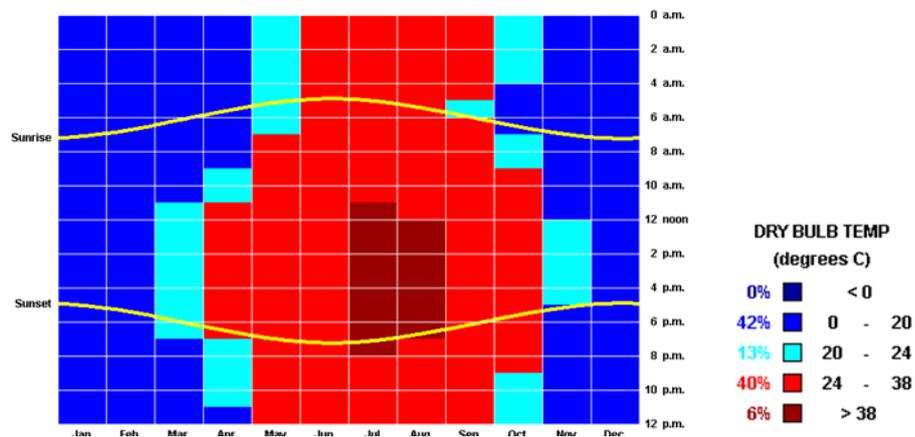


Figure A.4 le graphe de la température de bulb sèche et la zone de surchauffe L'isotherme (source : logiciel climate consultant V 6.0)

Le diagramme psychrométrique qui est montré dans la figure A.5 a été créé à l'aide de la logiciel 'Climate consultant 6.0' permettant de déterminé plusieurs paramètres et zones à part les zones du confort saisonnier, les besoins et des recommandations de chaque mois d'années.

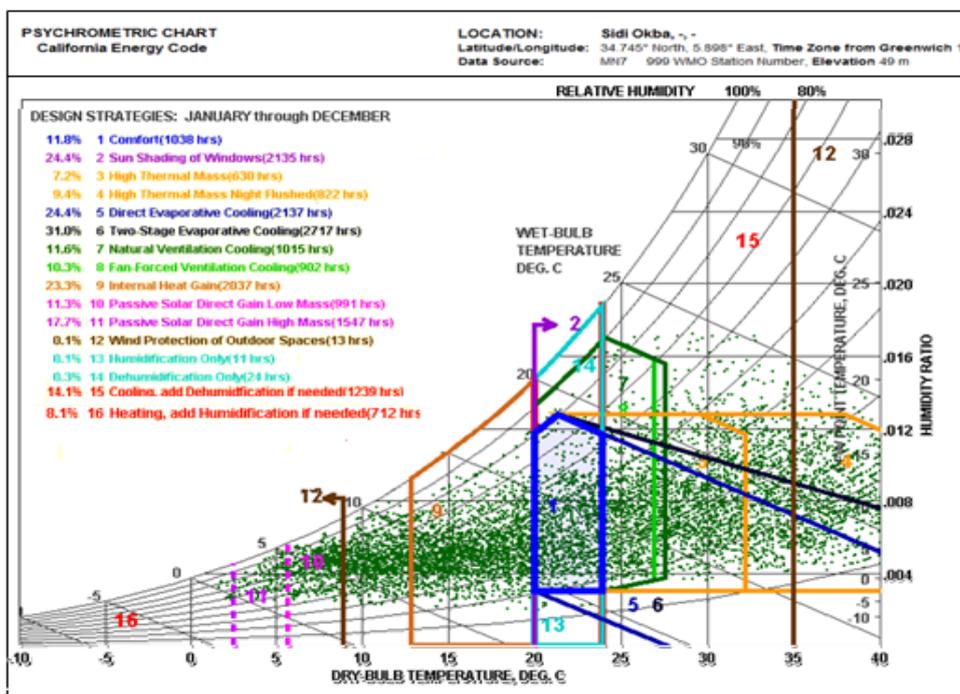


Figure A.5 Diagramme psychrométrique de Givoni de la ville de Sidi Okba adapté par l'auteur (source : la logiciel climate consultant V 6.0)

Annexe F : Les Etape de modélisation et simulation

1- Importer et intégrer un fichier climatique au format EPW généré à partir du logiciel Meteonorm V 7.2 ,un fichier EPW de la ville de Sidi Okba a été généré et importé dans le logiciel comme le montre la figure F.1.

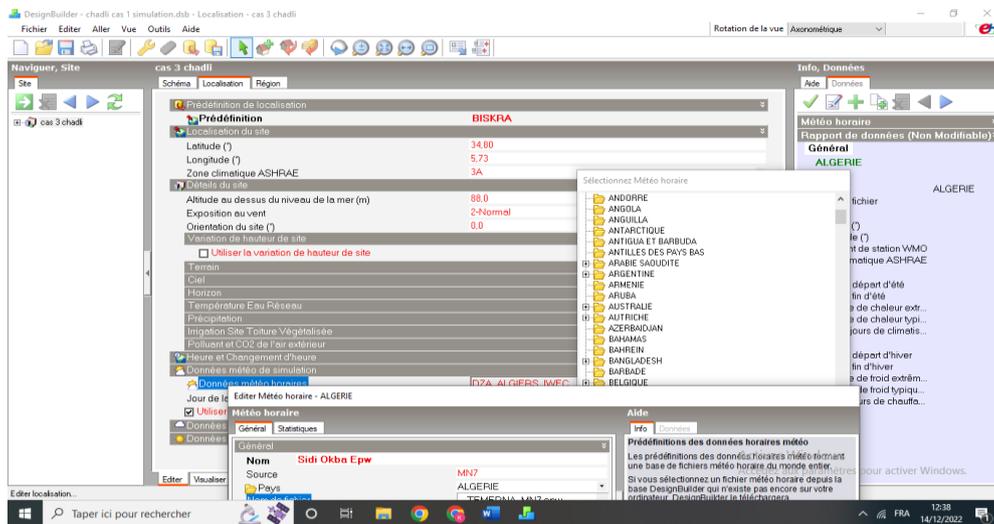


Figure F.1.L'importation et l'intégration de la fichier climatique format EPW de la ville

2- La modélisation de la géométrie du bâtiment et le 3D avec tous ses composants où DesignBuilder offre les différentes options de modélisation architecturale pour modéliser le bâtiment avec une précision parfaite comme le montre la figure F.2.

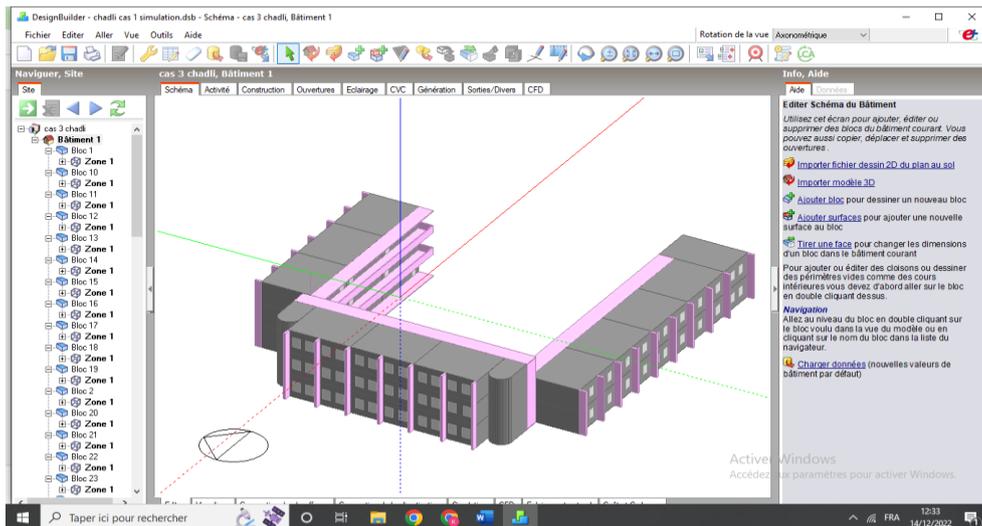


Figure F.2.La modélisation du bâtiment choisi avec tous ces composants architecturaux.

3-Définir le type d'activité des espaces intérieurs ainsi que l'horaire et le taux d'occupation comme indiqué à la figure F.3 les espaces ont été définis comme des espaces pédagogiques occupés de 8h à 17h du dimanche au jeudi.

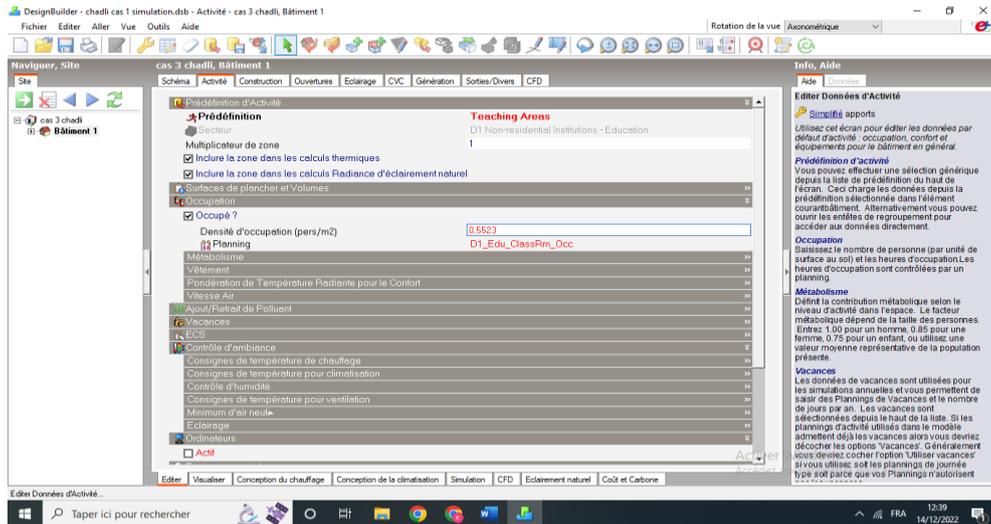


Figure F.3. Le type d'activité des espaces intérieurs

4-Définir le composant de la partie opaque de l'enveloppe: matériaux murs, toits et sols, et propriétés comme le montre la figure F.4 à partir de la bibliothèque DesignBuilder ou manuellement.

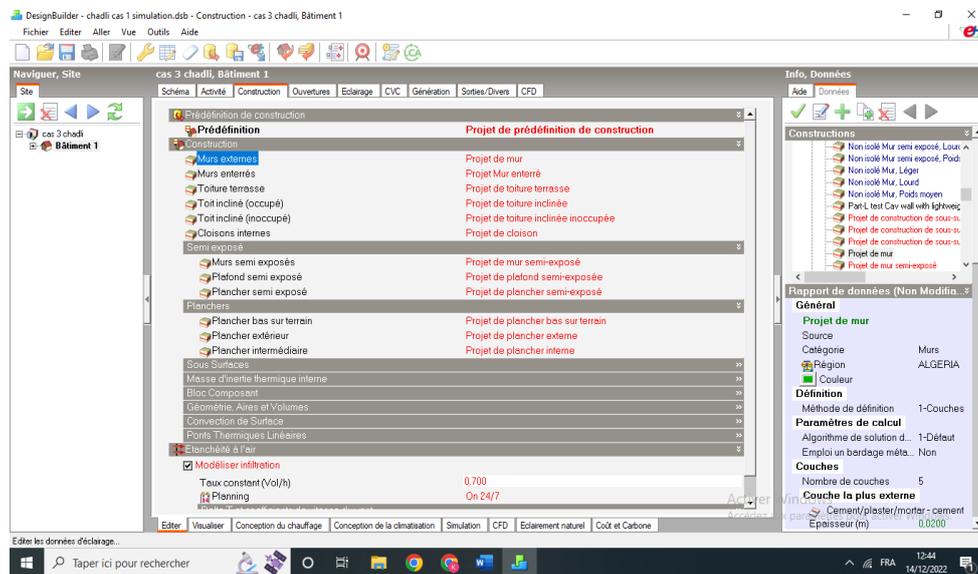


Figure F.4. Définir les composants et les propriétés des parties opaques d'enveloppe.

5-Définir le composant des portes et fenêtres et leurs propriétés à partir des matériaux, du rapport d'ouverture, de la position ainsi que des dispositifs d'ombrage utilisés et de leurs propriétés comme indiqué dans la figure F.5.

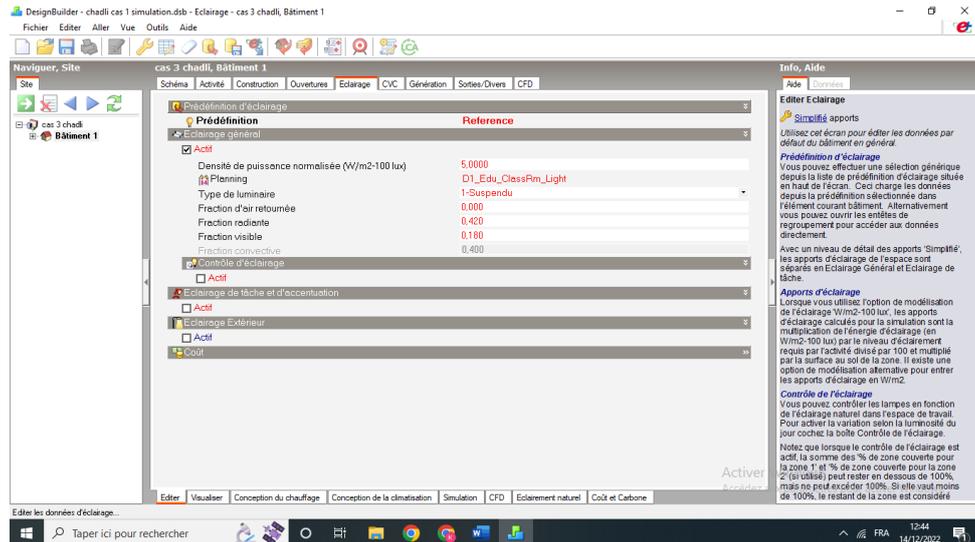


Figure F.5. Définir les composants et les propriétés des parties transparentes d'enveloppe.

6-Définir l'utilisation des systèmes/type CVC, le temps d'utilisation, les points de consigne de température et le type général d'utilisation comme indiqué dans la figure F.6.

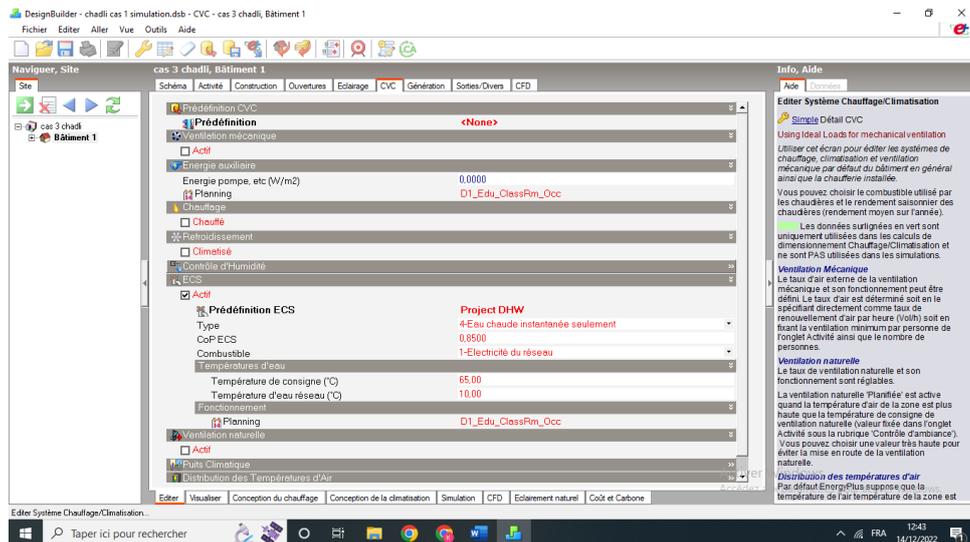


Figure F.6. Définir les systèmes et type de CVC utilisés.

7-Commencer la simulation en définissant le type de besoins de résultats de la température de l'air à la température opératoire en passant par l'humidité de l'air, la vitesse de l'air, l'infiltration, la consommation d'énergie, etc. et en définissant la période de simulations, les résultats sont présentés dans le robinet de simulation sous forme de graphiques ou sous forme de données numériques qui peuvent être importées comme le montre la figure F.7.

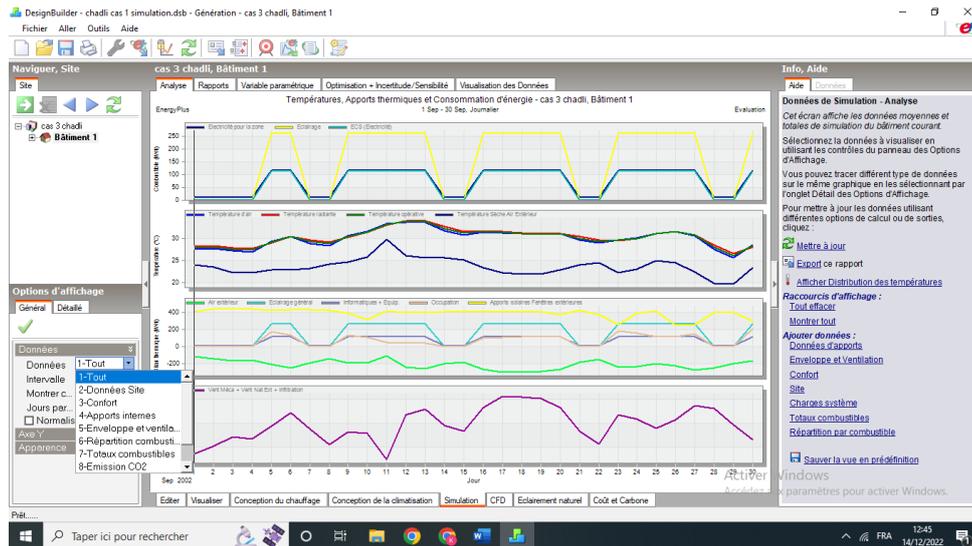


Figure F.7. Résultats de simulation de différents paramètres

8-DesignBuilder offre la possibilité d'afficher les résultats de la simulation dans différents logiciels qui peuvent être installés et intégrés dans DesignBuilder appelé "ResultViewer" qui permet de présenter les données de sortie de la simulation de manière plus détaillée et organisée, et de créer des graphiques et des tableaux de données définis basés uniquement sur les données nécessaires la figure F.8 présente l'interface du logiciel et comment les données sont présentées.

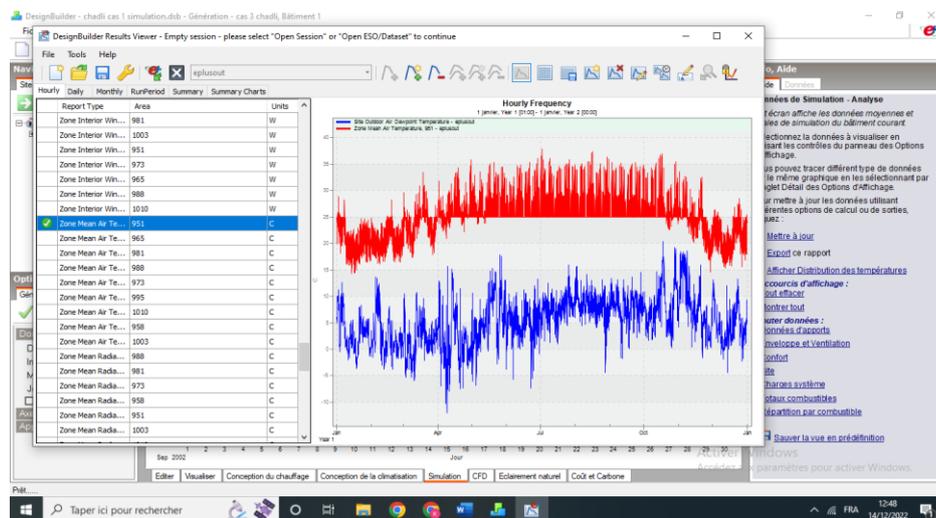


Figure F.8. Résultats de simulation et l'interface de ResultViewer

Bibliographie

Bibliographie

- **Abdallah, A. S. H. (2015).** Analysis of thermal comfort and energy consumption in long time large educational halls (Studios), Assiut University, Egypt. *Procedia Engineering*, 121, 1674-1681. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.115>
- **Afren, R., Benabbas, M., Zemmouri, N., & Djaghroui, D. (2017).** Impact of the typology of school buildings on the internal thermal conditions, in a hot and dry climate. *Energy Procedia*, 122, 505-510.
- **Alhagla, K., Mansour, A., & Elbassuoni, R. (2019).** Optimizing windows for enhancing daylighting performance and energy saving. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.01.004>
- **Ali Husein, H. (2018).** Energy Efficient Optimization in a Typical School Building: Kurdistan Typical School Buildings as a Case Study. *Eurasian Journal of Science and Engineering*, 3(3), 83-91. ISSN 24145629
- **Ali, H., & Hashlamun, R. (2019).** Envelope retrofitting strategies for public school buildings in Jordan. *Journal of Building Engineering*, 25, 100819. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100819>
- **Alghamdi, S., Tang, W., Kanjanabootra, S., & Alterman, D. (2022).** Effect of Architectural Building Design Parameters on Thermal Comfort and Energy Consumption in Higher Education Buildings. *Buildings*, 12(3), 329. <https://doi.org/10.3390/buildings12030329>
- **Alwetaishi, M., & Taki, A. (2020).** Investigation into energy performance of a school building in a hot climate: Optimum of window-to-wall ratio. *Indoor and Built Environment*, 29(1), 24-39. <https://doi.org/10.1177/1420326X19842313>
- **Abanomi, W., & Jones, P. (2005, May).** Passive cooling and energy conservation design strategies of school buildings in hot, arid region: Riyadh, Saudi Arabia. In *Proceedings of the International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, Santorini, Greece* (pp. 19-21).
- **Alwetaishi, M., & Balabel, A. (2019).** Numerical study of micro-climatically responsive school building design in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31(3), 224-233. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.005>
- **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 55. (1992).** ASHRAE standard thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, Ga. :The Society,
- **Anbouhi, M. H., Farahza, N., & Ayatollahi, S. M. H. (2016).** Analysis of thermal behavior of materials in the building envelope using building information modeling (BIM)—A case study approach. *Open Journal of Energy Efficiency*, 5(3), 88-106. <https://doi.org/10.4236/ojee.2016.53009>
- **Angelon-Gaetz, K. A., Richardson, D. B., Lipton, D. M., Marshall, S. W., Lamb, B., & LoFrese, T. (2015).** The effects of building-related factors on classroom relative humidity among North Carolina schools participating in the 'Free to Breathe, Free to Teach' study. *Indoor Air*, 25(6), 620-630.
- **Annuaire statistique mondial de l'énergie, (2020),** consulté le 10 janvier 2020, < [https:// www. yearbook.enerdata.net](https://www.yearbook.enerdata.net) >.
- **APRUE, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie. (2009).** *Consommation énergétique finale de*

- l'Algérie, chiffres clés Année 2007*. Algérie : Ministère de l'Énergie et des Mines.
- **Aparicio-Ruiz, P., Barbadilla-Martin, E., Guadix, J., & Munuzuri, J. (2021)**. A field study on adaptive thermal comfort in Spanish primary classrooms during summer season. *Building and Environment*, 203, 108089.
 - **Auliciems, A. (1981)**. Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception. *International Journal of Biometeorology*, 25, 109-122. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02184458>
 - **Auliciems, A. and Szokolay, S. (2007)**. Thermal Comfort. 2nd Revised Edition, Brisbane, PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland.
 - **Arıcı, M., Bilgin, F., Nižetić, S., & Karabay, H. (2020)**. PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114560. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114560>.
 - **Alwetaishi, M., Alzaed, A., Sonetti, G., Shrahily, R., & Jalil, L. (2018)**. Investigation of school building microclimate using advanced energy equipment: Case study. *Environmental Engineering Research*, 23(1), 10-20. doi: <http://dx.doi.org/10.4491/eer.2017.010>
 - **Arens, E., Zhang, H. and Huizenga (2006)**. 'Partial- and whole-body thermal sensation and comfort— Part I: Uniform environmental conditions', *Journal of Thermal Biology*, 31(1–2), 53-59.
 - **Ariwoola, Raheem Taiwo.(2016)**. "Use of Drone and Infrared Camera for a Campus Building Envelope Study" .Electronic Theses and Dissertations.Paper 3018. <https://dc.etsu.edu/etd/301>
 - **ASHRAE 55 (2004)**. ASHRAE Standard 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
 - **ASHRAE 55, A. (2010)**. ANSI/ASHRAE 55–2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering: Atlanta, GA, USA*.
 - **ASHRAE, S. (2017)**. Thermal environmental conditions for human occupancy.
 - **Athienitis, A. K., Liu, C., Hawes, D., Banu, D., & Feldman, D. (1997)**. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Building and environment*, 32(5), 405-410. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00009-7)
 - **Basarir, B., Diri, B. S., & Diri, C. (2012)**. Energy efficient retrofit methods at the building envelopes of the school buildings. *Retrieved*, 10(12), 2016.
 - **Batisim (2018)**, consulté le 17 juin 2021, < <https://www.batisim.net/designbuilder.html>
 - >
 - **Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018)**. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
 - **Boualem, F.Z. (2008)**. Etablissements scolaire -14.5 milliards de dinars octroyés en 2008 pour les opérations de maintenance.in journal Le soir d'Algérie au jeudi 13 mars 2008,p.4.

- **Bellahcene, L., Cheknane, A., Bekkouche, S. M. A., & Sahel, D. (2017).** The effect of the thermal inertia on the thermal transfer in building wall. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 22, p. 00013). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200013>
- **Benhouhou, M.N. (2012).** *L'impact des matériaux sur le confort thermique dans les zones semi-arides* (Mémoire de magister). EPAU, Algérie.
- **Berger, C. (2004).** L'ARCHITECTURE SCOLAIRE. *Bulletin CIIP no.*
- **Berkouk, D. (2017).** *Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif: Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra.* Université Mohamed Khider-Biskra.
- **Bilgin, F., & Arici, M. (2017).** Effect of phase change materials on time lag, decrement factor and heat-saving. *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 1102-1105. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.1102>
- **Bilan énergétique national, (2017),** consulté le 10 janvier 2020, <<https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>>.
- **Borgers, N., de Leeuw, E. and Hox, J. (2000).** 'Children as respondents in survey research: Cognitive development and response quality 1', *Bulletin de Méthodologie Sociologique*, 66(1), 60-75.
- **Bouamama, W. (2013).** *Au sujet de la politique d'efficacité énergétique en Algérie : approche systémique pour un développement durable cas de : programme éco-bat* (Mémoire de Magister). Université Abou BekrBelkaid, Algérie.
- **Cantin, B., Moujalled, B., Guarracino, G. (2005).** *Complexité du confort thermique dans les bâtiments.* Communication présentée au 6ème congrès Européen de science des systèmes, Paris, France.
- **Castilla, M., Álvarez, J. D., Normey-Rico, J. E., & Rodríguez, F. (2014).** Thermal comfort control using a non-linear MPC strategy: A real case of study in a bioclimatic building. *Journal of Process Control*, 24(6), 703-713. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.08.009>
- **CCPV toiture. (2021).** consulté le 7 juin 2021, (<https://www.ccpv-sud.fr/amenagement-isolation-thermique-combles.html>)>.
- **Cho, H. (2017).** The effects of summer heat on academic achievement: a cohort analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 83, 185-196. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.03.005>
- **Climate France. (2019).** consulté le 14 juillet 2019, <<https://fr.climate-data.org/>>.
- **CNERIB,(2016).** « Règlement thermique des bâtiments d'habitation et règles de calcul des déperditions calorifiques ». DTR/C3-4 Alger.
- **Cobse. (2020),** consulté le 14 juin 2020, <<https://www.cobse.fr/>>.
- **Collins, C., Gonzalez Block, M. A., & Tang, S. (2012).** Disease control and health systems in low-and middle-income countries: enhancing positive interrelation. *Tropical Medicine & International Health*, 17(5), 646-651.
- **Courgey, & Oliva. (2006).** *La conception bioclimatique: Des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation.* Terre vivante.
- **Croitoru, C., Nastase, I., Bode, F., Meslem, A., & Dogeanu, A. (2015).** Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles—Current capabilities and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 304-318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.105>

- **Da Graça, V. A. C., Kowaltowski, D. C. C. K., & Petreche, J. R. D. (2007).** An evaluation method for school building design at the preliminary phase with optimisation of aspects of environmental comfort for the school system of the State São Paulo in Brazil. *Building and Environment*, 42(2), 984-999.
- **Daouas, N. (2011).** A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads. *Applied Energy*, 88(1), 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.030>
- **Dante, Roberto C. (2016).** *Handbook of Friction Materials and Their Applications*. Elsevier. pp. 123–134. [doi:10.1016/B978-0-08-100619-1.00009-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100619-1.00009-2)
- **De Dear, R., Brager, G., Cooper, D. (1997).** Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference (Rapport ASHRAE RP- 884). Cooperative Research between the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., and Macquarie Research, États-Unis.
- **Delaune, M. (2003).** *William Henssler (1875-1951)*. University of Geneva.
- **Deleval, E. (2016).** *Architecture scolaire et pédagogie*. Partie d'une mémoire de magistère, Université Catholique de Louvain, Saint-Luc, Tournai. Retrieved from https://issuu.com/elinedelevel/docs/m__moire/144
- **Delgarm, N., Sajadi, B., & Delgarm, S. (2016).** Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). *Energy and Buildings*, 131, 42-53. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.08.024](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.024)
- **DesignBuilder. (2020).** consulté le 17 juin 2020, <<https://designbuilder.co.uk/helpv6/>>.
- **Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., & de Gennaro, G. (2021).** CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental research*, 202, 111560. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>
- **Dimoudi, A., & Kostarela, P. (2009).** Energy monitoring and conservation potential in school buildings in the C' climatic zone of Greece. *Renewable energy*, 34(1), 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.025>
- **Dhaka, S., Mathur, J., Brager, G., & Honnekeri, A. (2015).** Assessment of thermal environmental conditions and quantification of thermal adaptation in naturally ventilated buildings in composite climate of India. *Building and Environment*, 86, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.024>
- **EDSL (2020)**, consulté le 11 janvier 2020, <<https://www.edsl.net/>>.
- **Elghamry, R., & Hassan, H. (2020).** Impact of window parameters on the building envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment. *International Journal of Ventilation*, 19(4), 233-259. <https://doi.org/10.1080/14733315.2019.1665784>
- **Emilie, (2009)**, consulté le 04 février 2020, <<http://lespacedelentredeux.blogspot.com/>>.
- **EnergyPlus (2020)**, consulté le 17 juin 2020, <<https://energyplus.net/>>.
- **Enescu, D. (2017).** A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1353-1379. [ps://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175)

- **Equa (2020)**, consulté le 11 janvier 2020, < <https://www.equa.se/en/ida-ice/>>.
- **Fabbri, K. (2015)**. Indoor thermal comfort perception. *A Questionnaire Approach Focusing on Children*; Springer: New York City, NY, USA. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18651-1>
- **Fanger, P. O. (1970)**. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- **Fanger, P.O. (1973)** Thermal Comfort. McGraw-Hill Book Company, New York, 224 p.
- **Fantozzi, F., Lamberti, G., Leccese, F., &Salvadori, G. (2022)**. Monitoring CO2 concentration to control the infection probability due to airborne transmission in naturally ventilated university classrooms. *Architectural Science Review*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/00038628.2022.2080637>
- **Fatma, A. S., Boualem, D., & Hemza, S. (2017)**. Post-Occupancy Assessment of Thermal Environment in Classrooms. *International Journal of Environmental and Science Education*, 12(5), 1233-1247.
- **Fisk, W. J., Eliseeva, E. A., & Mendell, M. J. (2010)**. Association of residential dampness and mold with respiratory tract infections and bronchitis: a meta-analysis. *Environmental Health*, 9(1), 1-11.
- **Forster, S., & IRDP, C. S. (2004)**. Architecture scolaire: regard historique tourné vers l'avenir. *Bulletin CIIP*, 15.
- **Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., & Hardy, J. D. (1967)**. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmentalresearch*, 1(1), 1-20.[https://doi.org/10.1016/0013-9351\(67\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0013-9351(67)90002-3)
- **Gagge, A. P., Herrington, L. P., & Winslow, C. E. A. (1937)**. Thermal Interchanges between the Human Body and its Atmospheric Environment. *American Journal of Hygiene*, 26, 84-102.
- **Gao, J., Wargocki, P., & Wang, Y. (2014)**. Ventilation system type and the resulting classroom temperature and air quality during heating season. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning* (pp. 203-214). Springer, Berlin, Heidelberg.https://doi.org/10.1007/978-3-642-39584-0_23
- **Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011)**. Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43(4), 1030-1037.<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.032>
- **Gil-Baez, M., Lizana, J., Villanueva, J. B., Molina-Huelva, M., Serrano-Jimenez, A., &Chacartegui, R. (2021)**. Natural ventilation in classrooms for healthy schools in the COVID era in Mediterranean climate. *Building and Environment*, 206, 108345.
- **Givoni, B. (1978)** L'homme l'architecture et le climat. Editions Le Moniteur, Paris, France.
- **Gustin S., (2008)**. « La formation Professionnelle en Algérie :de la colonisation à nos jours »Mémoire de master soutenu à l'université Lumière. Lyon
- **Haddad, S., King, S., Osmond, P., & Heidari, S. (2012, November)**. Questionnaire design to determine children's thermal sensation, preference and acceptability in the classroom. In *Proceedings-28th international PLEA*

- conference on sustainable architecture+ urban design: opportunities, limits and needs-towards an environmentally responsible architecture.*
- **Hall, M.R. (2010).** *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings* (1ère éd.). New Delhi : Woodhead Publishing
 - **Hammad, H., Abdelkader, M., & Atef Faggal, A. (2017).** Investigating the thermal comfort conditions in an existing school building in Egypt. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 45(3), 344-359. DOI: [10.21608/jesaun.2017.116274](https://doi.org/10.21608/jesaun.2017.116274)
 - **Hardy HB, Ballou JW, Wetmore OC.(1953).** The Prediction of Equilibrium Thermal Comfort from Physical Data on Fabrics. *Textile Research Journal*. 23(1):1-10. doi:[10.1177/004051755302300101](https://doi.org/10.1177/004051755302300101)
 - **Harner, D. P. (1974).** Effects of Thermal Environment on Learning Skills. *CEFP Journal*, 12(2), 4-6.
 - **Hasan, O. A., Defer, D., & Shahrour, I. (2014).** A simplified building thermal model for the optimization of energy consumption: Use of a random number generator. *Energy and Buildings*, 82, 322-329. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.023>
 - **Hauglustaine, J. M., Simon, F., & Monfils, S. (2018).** La conception globale de l'enveloppe et l'énergie. *Guides pratiques pour les architectes.*
 - **Heracleous, C., & Michael, A. (2020).** Thermal comfort models and perception of users in free-running school buildings of East-Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 215, 109912. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109912>
 - **Homod, R. Z., Almusaed, A., Almssad, A., Jaafar, M. K., Goodarzi, M., & Sahari, K. S. (2021).** Effect of different building envelope materials on thermal comfort and air-conditioning energy savings: A case study in Basra city, Iraq. *Journal of Energy Storage*, 34, 101975. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101975>
 - **Hong, T., Chou, S.K., Bong, T.Y. (1999).** A design day for building load and energy estimation. *Building and Environment*, 34 (4), 469-477. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00035-3)
 - **Höppe, P. (2002).** Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings*, 34(6), 661-665. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8)
 - **Huang, L., Ouyang, Q., Zhu, Y., & Jiang, L. (2013).** A study about the demand for air movement in warm environment. *Building and Environment*, 61, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.002>
 - **Hwang, R. L., Chen, B. L., & Chen, W. A. (2021).** Analysis of Incorporating a Phase Change Material in a Roof for the Thermal Management of School Buildings in Hot-Humid Climates. *Buildings*, 11(6), 248. <https://doi.org/10.3390/buildings11060248>
 - **IKO. (2020).** consulté le 14 juin 2020, <<https://www.iko.com/>>.
 - **Imessad, K. and Messaoudène, N. A. (2008).** 'Modèle mathématique de prédiction de la sensation thermique et de la réponse physiologique chez l'être humain', *Revue des Energies Renouvelables*, 11(4), pp. 545–556.
 - **ISO 7730, (1994).** Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique. *Paris, AFNOR, 1995, 40 p.*

- **ISO7730** .(2005). 'ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria', *Management*, 3, pp. 605–615. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0267726105000503>.
- **Jannat, N., Hussien, A., Abdullah, B., & Cotgrave, A. (2020)**. A comparative simulation study of the thermal performances of the building envelope wall materials in the tropics. *Sustainability*, 12(12), 4892. <https://doi.org/10.3390/su12124892>
- **James, A. D., & Christian, K. (2012)**. An assessment of thermal comfort in a warm and humid school building at Accra, Ghana. *Advances in Applied Science Research*, 3(1), 535-547.
- **Jia, L. R., Han, J., Chen, X., Li, Q. Y., Lee, C. C., & Fung, Y. H. (2021)**. Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: A comprehensive review. *Buildings*, 11(12), 591. <https://doi.org/10.3390/buildings11120591>
- **Kaboré, M. (2015)**. *Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement).
- **Khadraoui, M. A., & Sriti, L. (2018)**. The impact of facade materials on the thermal comfort and energy efficiency of offices buildings. *Journal of Building Materials and Structures*, 5(1), 55. <https://doi.org/10.34118/jbms.v5i1.44>
- **KHADRAOUI, M. A. (2019)**. *Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique (Cas des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride)* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA).
- **Labreche, S. (2014)**. *Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs, cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides*. Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra.
- **Labib, R., & Mayhoub, M. (2015)**. Towards A Solution for the Inevitable Use of the Glazed Façades in the Arid Regions via the Parametric Design Approach. The 29th International CIE Conference.
- **Lagios, K., Niemasz, J., & Reinhart, C. F. (2010)**. Animated building performance simulation (ABPS)—linking Rhinoceros/Grasshopper with Radiance/Daysim. *Proceedings of SimBuild*, 4(1), 321-327.
- **LAKHDARI, K. (2021)**. *Impact du ratio d'ouverture des murs de façade sur la performance lumineuse, thermique et énergétique d'un bâtiment. Cas des régions chaudes et arides* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- **Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021)**. Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, 204, 108173. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>
- **Latha, P. K., Darshana, Y., & Venugopal, V. (2015)**. Role of building material in thermal comfort in tropical climates—A review. *Journal of Building Engineering*, 3, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2015.06.003>

- **Latreche, S., & Sriti, L. (2017).** The effect of building materials choice on the thermal comfort in the auto-produced individual housing in Biskra. *Journal of Building Materials and Structures*, 4(2), 50. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1165204>
- **LATRECHE, S. (2019).** *Étude et amélioration des performances climatiques de l'enveloppe architecturale en milieux chauds et arides. Cas de l'architecture domestique autoproduite à Biskra.* Doctoral thesis, Université Mohamed Khider-Biskra.
- **Laustsen, J. (2008).** Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings. IEA Information Paper.
- **Lee, D. H. (1935).** The Human Organism and Hot Environments. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 29(1). [https://doi.org/10.1016/S0035-9203\(35\)90014-1](https://doi.org/10.1016/S0035-9203(35)90014-1)
- **Liang, H. H., Lin, T. P., & Hwang, R. L. (2012).** Linking occupants' thermal perception and building thermal performance in naturally ventilated school buildings. *Applied Energy*, 94, 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.004>
- **Liébard, A., De Herde, A. (2005).** *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* (1ère éd.). Paris : Observ'ER.
- **Luo, M., Zhou, X., Zhu, Y., & Sundell, J. (2016).** Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate. *Energy and Buildings*, 118, 152-159.
- **Macpherson, R. K. (1962).** The assessment of the thermal environment. A review. *Occupational and Environmental Medicine*, 19(3), 151-164. doi: [10.1136/oem.19.3.151](https://doi.org/10.1136/oem.19.3.151)
- **Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A. and García-Cruz, A. (2015)** 'Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, pp. 736–755. doi: [10.1016/j.rser.2015.04.095](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095).
- **Martinez-Molina, A., Boarin, P., Tort-Ausina, I., & Vivancos, J. L. (2017).** Post-occupancy evaluation of a historic primary school in Spain: Comparing PMV, TSV and PD for teachers' and pupils' thermal comfort. *Building and Environment*, 117, 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.010>
- **Mazari, M. (2012).** *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public: Cas du département d'architecture de Tamda « Tizi-Ouzou »* (Mémoire de Magister). Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.
- **McIntyre, D. (1973).** A guide to thermal comfort. *Applied ergonomics*, 4(2), 66-72. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(73\)90079-3](https://doi.org/10.1016/0003-6870(73)90079-3)
- **Ministère de l'enseignement primaire et secondaire, (1971).** « *Construction scolaire recueils de normes* »
- **Ministère de l'éducation nationale, (2008).** « *Loi d'orientation sur l'éducation nationale Bulletin officiel de l'éducation nationale, N.08-04* »
- **Mishra, A. K., & Ramgopal, M. (2014).** Thermal comfort in undergraduate laboratories—A field study in Kharagpur, India. *Building and environment*, 71, 223-232. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.006>
- **Mitterer, C., Künzle, H. M., Herkel, S., & Holm, A. (2012).** Optimizing energy efficiency and occupant comfort with climate specific design of the

- building. *Frontiers of Architectural Research*, 1(3), 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.06.002>
- **Modeste, K. N., Tchinda, R., & Ricciardi, P. (2014).** Thermal comfort and air movement preference in some classrooms in Cameroun. *Journal of Renewable Energies*, 17(2), 263-278.
 - **Mohammad, S., & Shea, A. (2013).** Performance evaluation of modern building thermal envelope designs in the semi-arid continental climate of Tehran. *Buildings*, 3(4), 674-688. <https://doi.org/10.3390/buildings3040674>
 - **Montenegro Iturra, E. E. (2011).** Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique.
 - **Moujalled, B., Cantin, R., & Guarracino, G. (2008).** Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings. *Energy and buildings*, 40(12), 2215-2223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.014>
 - **Nagano, K., Takaki, A., Hirakawa, M. and Tochihara, Y. (2005).** 'Effects of ambient temperature steps on thermal comfort requirements', *International Journal of Biometeorology*, 50(1), 33-39.
 - **Nam, I., Yang, J., Lee, D., Park, E., & Sohn, J. R. (2015).** A study on the thermal comfort and clothing insulation characteristics of preschool children in Korea. *Building and Environment*, 92, 724-733.
 - **NARÇON, S. (2001).** *Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire - Contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort.* Thèse Neurosciences et Comportement. Paris: Ecole Pratique des Hautes Etudes.
 - **Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (1973).** Thermal comfort as part of a self-regulating system.
 - **Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002).** Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings*, 34(6), 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
 - **Nguyen, M., Paevere, P., Leicester, R., & Syme, M. (2008).** Models for prediction of microclimate and timber moisture content within the building envelope. In *10th World Conference on Timber Engineering WCTE2008*.
 - **Katafygiotou, M. C., & Serghides, D. K. (2014).** Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus. *Sustainable Cities and Society*, 13, 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.004>
 - **Khatiwora, N. B. (2009).** Energy efficiency policy instruments and measures. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 4(1), 13-26.
 - **Kükrer, E., & Eskin, N. (2021).** Effect of design and operational strategies on thermal comfort and productivity in a multipurpose school building. *Journal of Building Engineering*, 44, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102697>
 - **Kumar, S., Singh, M. K., Mathur, A., & Košir, M. (2020).** Occupant's thermal comfort expectations in naturally ventilated engineering workshop building: A case study at high metabolic rates. *Energy and Buildings*, 217, 109970.
 - **Kuru, M., & Calis, G. (2018, June).** Investigating the link between CO2 concentration, thermal comfort and occupant perception in educational buildings. In *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design* (pp. 1-7). <https://doi.org/10.22360/simaud.2018.simaud.011>

- **Oğulata, R. T. (2007)**. The effect of thermal insulation of clothing on human thermal comfort. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15(2), 61.
- **Orbit DZ. (2020)**.consulté le 7 janvier 2020, <<https://www.orbit-dz.com/product/mt-4612/>>.
- **Orosa, J. A., & Oliveira, A. C. (2012)**. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. *Renewable Energy*, 37(1), 89-96.<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.009>
- **Patterson, M. G. (1996)**, 'What is energy efficiency? concepts, indicators and methodological issues', *Energy Policy*, Vol. 24, pp.377-390.DOI: 10.12691/ajer-2-1-2
- **Perini, K. (2013)**. Retrofitting with vegetation recent building heritage applying a design tool—the case study of a school building. *Frontiers of Architectural Research*, 2(3), 267-277.
- **Prescott, K. (2001)**. Thermal comfort in school buildings in the tropics. *Environment design guide*, 1-5.
- **Rajkumar, S., Amirtham, L. R., & Horrison, E. (2015)**. Thermal Comfort assessment of a Studio Classroom in Hot & Humid Climate Conditions. In *ICUC9-9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*.
- **Rigolon, A. (2010)**. European design types for 21st century schools: an overview
- **Rodriguez, C. M., Coronado, M. C., & Medina, J. M. (2019)**. Classroom-comfort-data: A method to collect comprehensive information on thermal comfort in school classrooms. *Methods*, 6, 2698-2719.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.004>
- **Rodriguez, C. M., Coronado, M. C., & Medina, J. M. (2021)**. Thermal comfort in educational buildings: The Classroom-Comfort-Data method applied to schools in Bogotá, Colombia. *Building and Environment*, 194, 107682.<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107682>
- **Romero-Lara, M. J., Comino, F., & Ruiz de Adana, M. (2021)**. Seasonal Analysis Comparison of Three Air-Cooling Systems in Terms of Thermal Comfort, Air Quality and Energy Consumption for School Buildings in Mediterranean Climates. *Energies*, 14(15), 4436.<https://doi.org/10.3390/en14154436>
- **Royapoor, M., & Roskilly, T. (2015)**. Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and buildings*, 94, 109-120.<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.050>
- **Saddok, A. (2015)**. *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*. Mémoire de Magistère, Université de Tizi-Ouzou
- **Saddok, A., & Djebri, B. (2016)**. Confort thermique et intégration à l'environnement climatique des typologies des bâtiments scolaires. Cas du plan à coursive et à corridor central dans le contexte climatique méditerranéen en Algérie. *Journal of Renewable Energies*, 19(2), 165-180.
- **Sadeghifam, A. N., Marsono, A. K., Kiani, I., Isikdag, U., Bavafa, A. A., & Tabatabaee, S. (2016)**. Energy analysis of wall materials using building information modeling (BIM) of public buildings in the tropical climate countries. *JurnalTeknologi*, 78(10).<https://doi.org/10.11113/jt.v78.7591>

- **Saleem, A., Abel-Rahman, A., Ali, A. H., & Ookawara, S. (2012).** Experimental study on thermal comfort conditions in existing public primary schools buildings in Upper Egypt. *Sustainability in Energy and Buildings: Research Advances ISSN 2054-3743*, (3), 58.
- **Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021).** Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>
- **SBDUSchool Buildings and Design Unit, (2002).** “Schools for the future design for learning communities. *Building Bulletin 95*”, éd. The Stationery Office, London.
- **Semahi, S., Zemmouri, N., Singh, M. K., & Attia, S. (2019).** Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Building and Environment*, 161, 106271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106271>
- **Semahi, Samir (2021)** *Development of a decision-support model based on fuzzy logic for optimizing of High Energy Performance (HPE) housing design in Algeria*. Doctoral thesis, Université Mohamed Khider –Biskra.
- **Singh, M. K., Ooka, R., Rijal, H. B., Kumar, S., Kumar, A., & Mahapatra, S. (2019).** Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward. *Energy and Buildings*, 188, 149-174.
- **Subhashini, S., & Thirumaran, K. (2018).** A passive design solution to enhance thermal comfort in an educational building in the warm humid climatic zone of Madurai. *Journal of Building Engineering*, 18, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.014>
- **Tahsildoost, M., & Zomorodian, Z. S. (2015).** Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran. *Energy and Buildings*, 104, 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.079>
- **Taleghani, M., Tenpierik, M., Van Den Dobbelen, A., & De Dear, R. (2013).** Energy use impact of and thermal comfort in different urban block types in the Netherlands. *Energy and Buildings*, 67, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.024>
- **Tamer Gado , Mady Mohamed (2014).** Investigating the Process of Exporting Autodesk Ecotect Models to Detailed Thermal Simulation Software. *Environment and Ecology Research*, 2(5), 209 - 220. DOI: 10.13189/eer.2014.020504.
- **Tebbouche, H. (2010).** *L'impact de la qualité environnementale des établissements scolaires sur la performance du système éducatif en Algérie - cas des lycées de la ville de Jijel*. Mémoire de Magistère, Université de Jijel.
- **Ter Mors, S., Hensen, J. L., Loomans, M. G., & Boerstra, A. C. (2011).** Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: Creating and validating PMV-based comfort charts. *Building and Environment*, 46(12), 2454-2461. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.025>
- **Testo. (2020).** consulté le 7 janvier 2020, <<https://www.testo.com/fr-FR/anemometre-multifonction-testo-480/p/0563-4800>>.
- **Tham, K. W. (1993).** Conserving energy without sacrificing thermal comfort. *Building and Environment*, 28(3), 287-299. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(93\)90034-Z](https://doi.org/10.1016/0360-1323(93)90034-Z)
- **Theodosiou, T. G., & Ordoumpozanis, K. T. (2008).** Energy, comfort and

- indoor air quality in nursery and elementary school buildings in the cold climatic zone of Greece. *Energy and Buildings*, 40(12), 2207-2214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.011>Get
- **Toure, P. M., Dieye, Y., Gueye, P. M., Faye, M., & Sambou, V. (2020).** Influence of envelope thickness and solar absorptivity of a test cell on time lag and decrement factor. *Journal of Building Physics*, 43(4), 338-350. <https://doi.org/10.1177/1744259119863446>
 - **Ukawa, S., Araki, A., Kanazawa, A., Yuasa, M., & Kishi, R. (2013).** The relationship between atopic dermatitis and indoor environmental factors: a cross-sectional study among Japanese elementary school children. *International archives of occupational and environmental health*, 86(7), 777-787. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108345>
 - **Union européenne (UE), (2020),** consulté le 10 janvier 2020, <<https://european-union.europa.eu/>>.
 - **Wang, Y., Kuckelkorn, J., Zhao, F. Y., Liu, D., Kirschbaum, A., & Zhang, J. L. (2015).** Evaluation on classroom thermal comfort and energy performance of passive school building by optimizing HVAC control systems. *Building and Environment*, 89, 86-106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.023>
 - **Weytjens, L., & Verbeeck, G. (2012).** Simplified calculation model for predicting overheating in early design phases. A trade-off between simplicity and accuracy. In *Proceedings of 7th Windsor Conference: The Changing Context of Comfort in an Unpredictable World*.
 - **Wikipédia. (2020).** consulté le 10 mai 2020, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_de_K%C3%B6ppen>.
 - **Windfinder. (2019).** consulté le 14 juillet 2019, <<https://www.windfinder.com>>.
 - **Wyon, D. P., & Holmberg, I. (1972).** Systematic observation of classroom behaviour during moderate heat stress. In *Proceedings of the CIB (W45) Symposium "Thermal Comfort and Moderate Heat Stress", September* (pp. 13-15).
 - **Yourhome.,(2020).** consulté le 14 juin 2020, <<https://www.yourhome.gov.au/passive-design/glazing>>.
 - **Yousefi, Y., Yousefi, S., & Yousefi, Y. (2015).** Energy efficiency in educational buildings in Iran: Analysis and measures. In *Proceedings* (pp. 169-174).
 - **Yu, J., Yang, C., Tian, L., & Liao, D. (2009).** A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China. *Applied energy*, 86(11), 2520-2529. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.010>
 - **Zahiri, S., & Altan, H. (2016).** The effect of passive design strategies on thermal performance of female secondary school buildings during warm season in a hot and dry climate. *Frontiers in built environment*, 2, 3.
 - **Zeiler, W., & Boxem, G. (2009).** Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. *Building and Environment*, 44(11), 2308-2317. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.005>

- **Zhang, H. (2011).** *Building Materials in Civil Engineering // The Basic Properties of Building Materials.* , (), 7–423. <https://doi:10.1533/9781845699567.7>
- **Zhang, A., Bokel, R., Van den Dobbelsteen, A., Sun, Y., Huang, Q., & Zhang, Q. (2017).** The effect of geometry parameters on energy and thermal performance of school buildings in cold climates of China. *Sustainability*, 9(10), 1708.<https://doi.org/10.3390/su9101708>
- **Zomorodian, Z. S., & Nasrollahi, F. (2013).** Architectural design optimization of school buildings for reduction of energy demand in hot and dry climates of Iran. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, 23(1), 41-50.
- **Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016).** Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and sustainable energy reviews*, 59, 895-906.