

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saâd Dahleb Blida 1

Institut d'Architecture et d'Urbanisme

Laboratoire : Environnement et technologie pour l'architecture et le patrimoine ETAP



THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT D/LMD

Spécialité : Architecture, Patrimoine, Bâti et Environnement

Présentée par :

KHLEDJ Samir

Sous la direction de :

BENCHEIKH Hamida

TITRE

**ÉVALUATION ET AMÉLIORATION DU CONFORT
THERMIQUE ET VISUEL DANS LE PATRIMOINE
COLONIAL
CAS D'UN ÉTABLISSEMENT D'ENSEIGNEMENT
COLONIAL À MILIANA**

Devant le Jury composé de :

- Pr. HAMID Abdelkader, Président, Université Saâd Dahleb, Blida
- Dr. DAHMANI Krimo, Examineur, Université Saâd Dahleb, Blida
- Dr. KAOULA Dalel, Examinatrice, Université Saâd Dahleb, Blida
- Dr. BELHADJ Belkacem, Examineur, Université Ammar Téliidji, Laghouat
- Pr. BENCHEIKH Hamida, Rapporteur, Université Ammar Téliidji, Laghouat

Année universitaire : 2020/2021

RÉSUMÉ

Après une longue période de colonisation française qui a duré environ 132 ans, l'Algérie a hérité d'un nombre important de bâtiments, dont les anciens établissements d'enseignement. Dans la période de construction de ces lieux de savoir, l'architecture durable n'était pas connue comme elle l'est aujourd'hui, en particulier les effets du confort thermique et visuel sur la productivité et la santé des élèves qui les occupants. Malgré cela, ces vieux bâtiments répondaient, en grande partie, aux normes requises de confort thermique, en optant pour des méthodes traditionnelles telles que l'utilisation de matériaux de construction locaux et l'intégration du bâtiment dans son microclimat. De nos jours, l'attention s'est focalisée sur la nécessité d'assurer le confort à travers tous ses aspects, à l'intérieur des bâtiments, sans recourir à l'utilisation d'énergies non renouvelables et polluantes pour l'environnement, en particulier dans les établissements d'enseignement en raison de son impact sur la performance et la santé des usagers. Selon des statistiques récentes, le secteur de la construction est responsable de 30 % des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation d'environ 40 % des énergies non renouvelables. Tous ces facteurs précédents ont imposé plus de restrictions à la construction d'établissements d'enseignement, qui se construisent, actuellement, en intégrant des normes de confort intérieur et en rationalisant la consommation d'énergie.

Cette recherche vise à évaluer deux types de confort intérieur, qui se caractérisent par une forte corrélation avec la consommation d'énergie, en l'occurrence, le « confort thermique et lumineux », dans deux lycées construits à l'époque coloniale, situés dans la ville de Miliana, au nord d'Algérie.

La méthodologie de réalisation de ce travail de recherche était basée sur trois axes. Tout d'abord, une approche théorique utilisant la recherche bibliographique pour savoir comment évaluer le confort thermique et visuel dans les salles de classe, ainsi que l'ampleur de la consommation d'énergie dans les anciennes écoles. Deuxièmement, une approche analytique basée sur une batterie de critères, pour la sélection optimale des bâtiments scolaires cas d'étude. Troisièmement, une approche expérimentale en effectuant des travaux sur le terrain pendant la période

froide et chaude de l'année scolaire. Et cela à travers une enquête par questionnaire distribué auprès des élèves, et des campagnes de mesures de la température de l'air, la température de surfaces, des murs, l'humidité et les niveaux d'éclairage naturel à l'intérieur des salles de classe. En outre, une caméra thermique a été utilisée pour déterminer les ponts thermiques responsables des déperditions de chaleur dans les salles de classe. De plus, sur la base des valeurs de confort requises dans les salles de classe, une simulation numérique a été menée pour trouver les meilleures solutions de réhabilitation des anciens bâtiments, ce qui améliorerait les conditions de confort thermique et visuel dans les salles de classe.

Les résultats de cette étude aideront à développer une réglementation algérienne de confort thermique et visuel, consacrée à la restauration des bâtiments historiques, sans réduire le niveau de confort thermique et visuel à l'intérieur des espaces scolaires, et elle sera également utile pour la conception de futures écoles à haut niveau de confort ambiant et faible consommation d'énergie.

Mots clés : Patrimoine colonial d'Algérie, bâtiment d'enseignement, confort visuel, confort thermique.

ملخص

بعد فترة طويلة من الاستعمار الفرنسي دامت حوالي 132 عامًا، ورثت الجزائر عددا كبيرا من المباني من بينها المؤسسات التعليمية القديمة. في فترة بناء هذه المؤسسات لم تكن الهندسة المعمارية البيئة الخضراء معروفة كما هو الحال في ايامنا هذه، وخاصة اثار الراحة الحرارية والبصرية على مردودية وصحة التلاميذ المستعملين لهذه المؤسسات، وبرغم من هذا كانت هذه المباني القديمة تستجيب بنسبة كبيرة لمعايير الراحة الحرارية والبصرية المطلوبة بالاعتماد على طرق تقليدية كاستعمال مواد البناء المحلية وادماج المبنى في محيطه البيئي (المناخي). في ايامنا هذه، أصبح الاهتمام منصب أكثر على ضرورة توفير الراحة بكل انواعها داخل المباني دون اللجوء الى استعمال الطاقات الغير متجددة والملوثة للبيئة وخاصة في المؤسسات التعليمية لما لها من تأثير على مردودية وصحة المستعملين. وحسب الإحصائيات الحديثة فان قطاع البناء مسؤول على 30 % من انبعاث الغازات المتسببة في الاحتباس الحراري واستهلاك حوالي 40% من الطاقات الغير متجددة حيث وضعت كل هذه العوامل السابقة، المزيد من القيود عند تشييد المؤسسات التعليمية. ففي الوقت الحاضر، يتم بناؤها من خلال ادراج معايير الراحة البيئية واسس لترشيد استهلاك الطاقة.

تحقيقا لهذه الغاية، يهدف هذا البحث لتقييم نوعين من أنواع الراحة البيئية، التي تتميز بارتباط شديد باستهلاك الطاقة على غرار "الراحة الحرارية والضوئية"، في ثانويتين مبنيتين في الحقبة الاستعمارية، واقعتين في مدينة مليانة، شمال الجزائر.

اعتمدت منهجية انجاز هذا العمل البحثي على ثلاثة محاور؛ أولاً، نهج نظري باستخدام البحوث البيولوجرافية لمعرفة كيفية تقييم الراحة الحرارية والضوئية داخل الاقسام، فضلاً عن مدى استخدام الطاقة في المدارس القديمة. ثانياً، نهج تحليلي مرتكز على مجموعة من المعايير، للاختيار الامثل للمباني "دراسة الحالة". ثالثاً، نهج تجريبي من خلال إجراء عمل ميداني خلال الفترة الباردة والحارة من العام الدراسي. وذلك من خلال توزيع استبيانات على التلاميذ، القيام بقياسات ميدانية لدرجة حرارة الهواء، درجة حرارة الجدران، نسبة الرطوبة ومستويات الإضاءة الطبيعية داخل الاقسام، إضافة الى استخدام الكاميرا الحرارية لتحديد أماكن ضياع الطاقة على مستوى المباني المدروسة. علاوة على ذلك، وبناءً على قيم الراحة المطلوبة في الاقسام، اجريت محاكاة رقمية لإيجاد أفضل الحلول لإعادة تأهيل المباني القديمة، والتي من شأنها أن تحسن ظروف الراحة الحرارية والضوئية داخل الاقسام.

يمكن أن تساعد نتائج هذه الدراسة على تطوير دفاتر الشروط الوطنية المخصصة في ترميم المباني التاريخية في الجزائر، بالطريقة الصحيحة دون التقليل من الراحة البيئية الموجودة فيها، وستكون مفيدة أيضا لتحسين تصميم المدارس في المستقبل، من أجل أن تكون أكثر راحة واقل استخدام للطاقة.

الكلمات المفتاحية: تراث الجزائر في الحقبة الاستعمارية، المدارس، الراحة البصرية، الراحة الحرارية.

ABSTRACT

After a long period of French colonization that lasted about 132 years, Algeria inherited a large number of buildings including the old educational institutions. In the period of building these institutions, sustainable architecture was not known, as it is today, especially the effects of thermal and visual comfort on the cost-effectiveness and health of students using these institutions. Despite this, these old buildings were responding in large proportion to the thermal comfort standards required using traditional methods such as using local building materials and integrating the building into its environmental (climatic) surroundings. Nowadays, attention has become more focused on the necessity of providing the comfort of all kinds inside the buildings without resorting to the use of non-renewable and polluting energies for the environment, especially in educational institutions because of its impact on the cost-effectiveness and health of users. According to recent statistics, the construction sector is responsible for 30% of greenhouse gas emissions and the consumption of about 40% of non-renewable energies. All these previous factors put more restrictions on the construction of educational institutions. At present, it is being built by incorporating environmental comfort standards and rationalizing energy consumption.

This research aims, to evaluate two types of environmental comfort, which are characterized by a strong correlation with energy consumption such as “thermal and light comfort,” in two high schools built in the colonial era, located in Miliana city, in the north of Algeria.

The methodology of accomplishing this research work was based on three axes. Firstly, a theoretical approach using bibliographic research to know how to evaluate the thermal and visual comfort within the school classrooms, as well as the extent of energy use in old schools. Secondly, an analytical approach based on a set of criteria, for the optimal selection of buildings “case study. Thirdly, an experimental approach by conducting fieldwork during the cold and hot period of the year, through the student’s surveys, and field measurements of air temperature, wall surface temperature, humidity and natural lighting levels inside classrooms, in

addition, a thermal camera was used to determine the thermal bridges responsible for heat loss inside the classrooms. Moreover, based on the required comfort values in the sections, a numerical simulation was conducted to find the best solutions for rehabilitating the old buildings, which would improve the thermal and visual comfort conditions within the classrooms.

The results of this study help to develop an Algeria thermal and visual standard regulations devoted to the restoration of historical buildings, without reducing the level of thermal and visual comfort inside the school spaces, and it will also be useful to design of future schools with a high level of ambient comfort and low energy consumption.

Keywords: Algeria colonial heritage, school buildings, visual comfort, thermal comfort.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements sont adressés aux personnes qui ont contribué, de près ou du loin, à la réalisation de cette thèse. En premier lieu, je remercie M. Hamida BENCHEIKH, professeur au département d'architecture à l'université d'Ammar Tiledji de Laghouat. En tant que directeur de thèse, lui, qui m'a beaucoup orienté et aidé par ses conseils précieux, ses encouragements et ses remarques pertinentes tout au long de la réalisation de cette thèse de doctorat. Qu'il trouvera ici toutes les expressions de reconnaissance et de gratitude pour sa disponibilité et sa patience.

Je remercie aussi le personnel du lycée Mohamed ABDOU à sa tête le proviseur, M. Moussa MOKEDDEM et aussi mon ami Moussa OULDSAID, ainsi que le personnel du lycée Mustapha FERROUKHI, pour leur collaboration en me donnant accès aux établissements secondaires en temps voulu et en mettant les élèves à ma disposition pour mener à bien mon travail de recherche. Merci également au directeur des équipements publics de la wilaya d'Ain-Defla de m'avoir procuré la documentation relative à la réhabilitation des deux lycées cas d'étude.

Je tiens à remercier le Laboratoire Architecture et Environnement (LAE) de l'école d'architecture et d'urbanisme d'Alger (EPAU), de m'avoir emprunté les appareils de mesures, qui sans eux, ce travail n'aurait pas pu voir le jour. Mes remerciements sont adressés au CNERIB/Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment, en particulier, M. Mokhtar MEZIANE de m'avoir assisté à effectuer la caractérisation thermo-physique des pierres calcaires par méthode du CT-Metre. Je tiens à remercier tous mes camarades en particulier M. Naceur SAHEL de m'avoir aidé dans mon travail expérimental à Miliana ainsi que Mlle Darda BENCHEIKH de m'avoir beaucoup assisté à connaître les performances du logiciel de simulation Energyplus.

Mes remerciements vont également aux membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir accepter d'examiner cette thèse.

Enfin, un immense merci à ma mère, ma sœur, mes frères et tous mes amis particulièrement : Ayoub BAYADA et Abdenour CHICHA.

C'est grâce à la volonté de Dieu et à toutes ces personnes que ce travail de recherche a pu voir le jour.

Samir KHLEDJ

Ain Defla, le 26 septembre 2020

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIÈRES	3
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	4
INTRODUCTION	6
1. CONFORT THERMIQUE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES BÂTIMENTS SCOLAIRES	13
1.1. Introduction	13
1.2. Énergie et développent durable	13
1.3. Survol de la littérature consacré aux bâtiments historiques	17
1.4. Types de bâtiments historiques	20
1.5. Stratégie d'amélioration du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments historiques	22
1.6. Contexte énergétique en Algérie	25
1.7. Efficacité énergétique et confort thermique des bâtiments scolaires anciens en Algérie	27
1.8. Définition du confort thermique	29
1.9. Modes de transfert de la chaleur	29
1.10. Confort thermique adaptatif	30
1.11. Impact du confort thermique en milieu scolaire	32
1.12. Critères d'évaluation du confort thermique	33
1.13. Évaluation du confort thermique	36
1.14. Conclusion	41
2. CONFORT VISUEL ET ÉCLAIRAGE NATUREL DANS LES BÂTIMENTS SCOLAIRES	44
2.1. Introduction	44
2.2. Définition du confort visuel	44
2.3. Grandeurs photométriques	45
2.4. Impact de la lumière naturelle en milieu scolaire	47

2.5. Critères du confort visuel	48
2.6. Évaluation du confort visuel	52
2.7. Éclairage naturel	53
2.8. Stratégie de l'éclairage naturel	59
2.9. Éclairage artificiel comme complément à l'éclairage naturel	66
2.10. Réglementation de l'éclairage dans les bâtiments scolaires	59
2.11. Conclusion	71
3. CAS D'ÉTUDE	73
3.1. Introduction	73
3.2. Présentation de la zone d'étude de Miliana.	73
3.3. Conditions climatiques de Miliana	76
3.4. Architecture coloniale à Miliana	79
3.5. Analyse bioclimatique de la ville de Miliana	81
3.6. Enquête de terrain sur les anciennes écoles des 19e et 20e siècles à Miliana	87
3.7. Choix et description des bâtiments cas d'étude	91
3.8. Conclusion	99
4. MÉTHODOLOGIE ET INVESTIGATION SUR TERRAIN	102
4.1. Introduction	102
4.2. Caractérisation thermo-physique des matériaux de construction	102
4.3. Analyse thermographique des bâtiments cas d'étude	106
4.4. Choix et description des espaces d'étude	113
4.5. Évaluation qualitative	119
4.6. Évaluation quantitative	121
4.7. Simulation numérique par EnergyPlus	128
4.8. Conclusion	129
5. INVESTIGATION IN SITU DU CONFORT THERMIQUE	131
5.1. Introduction	131
5.2. Évaluation quantitative	131
5.3. Évaluation qualitative	142

5.5. Discussion des résultats	179
5.6. Conclusion	181
6. INVESTIGATION IN SITU DU CONFORT VISUEL	183
6.1. Introduction	183
6.2. Évaluation quantitative	183
6.3. Évaluation qualitative	190
6.5. Discussion des résultats	234
6.6. Conclusion	237
7. AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES CAS D'ÉTUDE	239
7.1. Introduction	239
7.2. Interventions à réaliser	239
7.3. Simulation numérique	257
7.4. Résultats de simulation	263
7.5. Discussion des résultats	271
7.6. Conclusion	273
CONCLUSION GÉNÉRALE	276
Bibliographie	282
APPENDICE	283
A. Tables de Mahoney	284
B. Questionnaire de l'enquête	285
C. Fiches utilisées lors des campagnes de mesures	286
D. Niveaux d'éclairement naturel (21 juin)	287

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : Présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.	16
Figure 1.2 : Nombre de recherches portant sur l'efficacité énergétique et le confort thermique des bâtiments historiques.	18
Figure 1.3 : Âge des bâtiments historiques étudiés.	19
Figure 1.4 : Objectifs de recherches sur les bâtiments historiques.	20
Figure 1.5 : Photos des 4 bâtiments scolaires réhabilités "School of the Future."	24
Figure 1.6 : Comparaison des valeurs U des fenêtres et du toit dans les 4 bâtiments scolaires avant et après les rénovations.	25
Figure 1.7 : Algérie — Émissions de CO ₂ (kt).	26
Figure 1.8 : Le Lycée Lamoricière à Oran (néo-classique).	27
Figure 1.9 : Lycée Mohammed Abdou à Miliana (néo-classique).	28
Figure 1.10 : École primaire Larbi Tebessi à Miliana (néo-mauresque).	28
Figure 1.11 : Les modes de transmission de chaleur.	30
Figure 1.12 : Graphique de confort adaptatif proposé par la norme ASHRAE 55-2010.	31
Figure 1.13 : Les six critères de confort thermique.	33
Figure 1.14 : Structure globale d'EnergyPlus.	38
Figure 1.15 : Diagramme bioclimatique Olgyay (1963).	39
Figure 1.16 : Diagramme bioclimatique de Givoni (1992).	40
Figure 1.17 : Table de Mahoney pour la ville de Belém (Brésil).	41

Tableau 1.1 : Les réserves énergétiques mondiales.	14
Tableau 1.2 : Exemples des niveaux vestimentaires.	35
Tableau 1.3 : Niveaux de « met » selon des activités spécifiques.	35
Tableau 1.4 : Échelle thermique à 7 points.	37

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Les grandeurs photométriques.	45
Figure 2.2. Critères du confort visuel.	49
Figure 2.3 : Importance d'un éclairage suffisant et uniforme pour faciliter l'écriture et la lecture sur le tableau.	49
Figure 2.4 : Éblouissement provoqué par le rayonnement solaire direct.	50
Figure 2.5 : Réflexions du soleil sur le tableau blanc de la salle de classe.	50
Figure 2.6 : L'écriture est perturbée par la présence d'ombres gênantes.	51
Figure 2.7 : Importance de l'indice de rendu des couleurs (IRC).	51
Figure 2.8 : Absence de contrastes lumineux dans le champ visuel de l'élève.	52
Figure 2.9 : Ouverture zénithale.	54
Figure 2.10 : Solstices et équinoxes au cours d'une année.	55
Figure 2.11 : Éclairage diffus par ciel couvert.	56
Figure 2.12 : Le facteur de lumière de jour (FLJ).	57
Figure 2.13 : Les trois composantes du FLJ.	58
Figure 2.14 : Valeurs typiques du FLJ pour une salle de classe.	58
Figure 2.15 : Stratégie de l'éclairage naturel.	59

Figure 2.16 : Exemple de système de light shelves.	65
Figure 2.17 : Exemple de zonage des lampes.	66
Figure 2.18 : Exemple d'une ampoule à incandescence.	67
Figure 2.19 : Exemple d'une ampoule halogène.	67
Figure 2.20 : Exemple d'une ampoule fluo compacte spirale.	68
Figure 2.21 : Exemple d'une lampe LED.	68
Tableau 2.1 : Exemples de valeurs d'efficacité lumineuse.	46
Tableau 2.2 : Exemples de valeurs d'éclairement.	46
Tableau 2.3 : Exemples de valeurs de luminance.	47
Tableau 2.4 : Valeurs typiques et ambiances créées par le (FLJ).	57
Tableau 2.5 : Niveau d'éclairement à respecter pour les différents espaces d'un bâtiment scolaire.	69
CHAPITRE 3	
Figure 3.1 : Géolocalisation de Miliana en Algérie.	74
Figure 3.2 : Localisation de Miliana dans la wilaya d'Ain Defla.	74
Figure 3.3 : Situation de la ville perchée sur les contreforts du mont Zaccar.	74
Figure 3.4 : Remparts de la ville de Miliana.	75
Figure 3.5 : La Manufacture d'armes de l'Émir Abdelkader.	76
Figure 3.6 : Variation de la température à la ville de Miliana, période 2007 à 2016. Source : Station météorologique de Miliana (Ain-Defla).	77

Figure 3.7 : Variation du taux d'humidité relative à la ville de Miliana, période 2007 à 2016.	77
Figure 3.8 : Vitesse moyenne du vent (km/h) à la ville de Miliana, période 2018.	78
Figure 3.9 : La différence de précipitations entre les mois.	79
Figure 3.10 : Centre historique de Miliana.	80
Figure 3.11 : Ancienne demeure de l'Émir Abdelkader.	81
Figure 3.12 : Ancienne école à Miliana.	81
Figure 3.13 : Diagramme bioclimatique avec les profils thermo-hygrométriques pour la ville de Miliana.	82
Figure 3.14 : Les gains internes des occupants du bâtiment scolaire.	83
Figure 3.15 : Illustration du chauffage solaire passif.	84
Figure 3.16 : Protection solaire bioclimatique.	85
Figure 3.17 : Exemple de ventilation naturelle transversale.	86
Figure 3.18 : Ventilation naturelle par effet de cheminée.	86
Figure 3.19 : Typologie de forme éclatée (en L ou U) avec coursive non vitrée.	89
Figure 3.20 : Typologie de forme à patio (cour centrale) avec coursive vitrée.	90
Figure 3.21. Vue sur le centre historique de Miliana.	92
Figure 3.22 : Décrit de création de l'école normale d'institutrices à Miliana.	94
Figure 3.23 : Lycée Mohammed ABDYOU.	95
Figure 3.24 : Lycée Mustapha FERROUKHI.	97
Tableau 3.1 : Critères d'étude des anciennes écoles de Miliana.	88

CHAPITRE 4

Figure 4.1 : Trois blocs de tuf extraits des cas d'étude.	103
Figure 4.2 : Trois échantillons de tuf extraits des cas d'étude.	103
Figure 4.3 : Détermination de la conductivité thermique et chaleur spécifique à l'aide du CT Metre au niveau du CNERIB.	104
Figure 4.4 : Détermination de la masse volumique absolue par la méthode de déplacement d'eau.	105
Figure 4.5 : Caméra infrarouge FLIR i7.	106
Figure 4.6 : Appareil téléphonique Condor Plume P6 pro.	107
Figure 4.7 : Interface du logiciel FLIR Quickreport 1.2 SP2.	107
Figure 4.8 : Ponts thermiques au niveau des fenêtres de la façade est du lycée ABDOU.	108
Figure 4.9 : Ligne de profil de la thermographie extérieure (ABDOU).	108
Figure 4.10 : Pont thermique au niveau de la porte et la fenêtre.	109
Figure 4.11 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 1 (ABDOU).	109
Figure 4.12 : Infiltration d'air froid au niveau du faux plafond en laine de roche.	110
Figure 4.13 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 2 (ABDOU).	110
Figure 4.14 : Ponts thermiques horizontaux en haut des fenêtres (façade ouest du lycée Ferroukhi).	111
Figure 4.15 : Ligne de profil de la thermographie extérieure (FERROUKHI).	111
Figure 4.16 : Ponts thermiques des fenêtres (façade nord du lycée Ferroukhi).	112
Figure 4.17 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 1 (FERROUKHI).	112

Figure 4.18 : Le faux plafond en lattis roseaux n'est pas bien isolé.	113
Figure 4.19 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 2 (FERROUKHI).	113
Figure 4.20 : Emplacement des espaces d'étude (lycée Mohamed ABDOU).	114
Figure 4.21 : Vue intérieure des espaces d'étude (lycée Mohamed ABDOU).	115
Figure 4.22 : Emplacement des espaces d'étude (lycée Mustapha FERROUKHI).	117
Figure 4.23 : Vue intérieure des espaces d'étude (Lycée Mustapha FERROUKHI).	118
Figure 4.24 : Les lycéens en train de répondre aux questionnaires (salle de classe N° 4, lycée Mustapha FERROUKHI).	120
Figure 4.25 : Appareils de mesures utilisés lors des campagnes de mesures.	121
Figure 4.26 : Points de mesures dans les espaces d'étude (Lycée Mohammed Abdou).	125
Figure 4.27 : Points de mesures dans les espaces d'étude (Lycée Mustapha Ferroukhi).	126
Figure 4.28 : Prise de mesures en compagnie de mon camarade Naceur SAHEL.	126
Figure 4.29 : Relevé de l'éclairage naturel intérieur (à gauche), extérieur (à droite).	127
Figure 4.30 : Interface d'EnergyPlus (version 1.2.2).	129
Tableau 4.1 : Valeurs de conductivité thermique et chaleur spécifique de trois échantillons.	104

Tableau 4.2 : Valeurs de masse volumique des échantillons.	105
Tableau 4.3 : La description des espaces d'étude (lycée Mohamed ABDOU).	116
Tableau 4.4 : La description des espaces d'étude (Lycée Mustapha FERROUKHI).	118
Tableau 4.5 : Spécifications du thermo-hygromètre électronique HD 100.	121
Tableau 4.6 : Caractéristiques techniques du luxmètre LX105.	123
Tableau 4.7 : Fonctions du luxmètre LX105.	123
Tableau 4.8 : Détails sur les campagnes de mesures de février 2018.	124
Tableau 4.9 : Détails sur les campagnes de mesures de septembre 2018.	125
Tableau 4.10 : Détails sur les campagnes de mesures de l'éclairement naturel.	128

CHAPITRE 5

Figure 5.1 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 10, 11 et 12 février 2018 (ABDOU).	133
Figure 5.2 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurées les 10, 11 et 12 février 2018 (ABDOU).	134
Figure 5.3 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 22, 23 et 24 septembre 2018 (ABDOU).	135
Figure 5.4 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurée les 22, 23 et 24 septembre 2018 (ABDOU).	136
Figure 5.5 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 2, 3 et 4 février 2018 (FERROUKHI).	139

Figure 5.6 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurées les 2, 3 et 4 février 2018 (FERROUKHI).	140
Figure 5.7 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 22, 23 et 24 septembre 2018 (FERROUKHI).	141
Figure 5.8 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurées les 22, 23 et 24 février 2018 (FERROUKHI).	142
Figure 5.9 : Réponses au questionnaire du confort thermique de la période froide (ABDOU).	142
Figure 5.10 : Réponses au questionnaire du confort thermique de la période chaude (ABDOU).	151
Figure 5.11 : Réponses au questionnaire du confort thermique de la période froide (FERROUKHI).	162
Figure 5.12 : Réponses au questionnaire du confort thermique de la période chaude (FERROUKHI).	169
Tableau 5.1 : Statistiques des sujets de la période froide (ABDOU).	143
Tableau 5.2 : Statistiques des sujets de la période chaude (ABDOU).	152
Tableau 5.3 : Statistiques des sujets de la période froide (FERROUKHI).	162
Tableau 5.4 : Statistiques des sujets de la période chaude (FERROUKHI).	170

CHAPITRE 6

Figure 6.1 : Réponses au questionnaire du confort visuel de la période froide (ABDOU).	190
--	-----

Figure 6.2 : Réponses au questionnaire du confort visuel de la période chaude (ABDOU).	202
Figure 6.3 : Réponses au questionnaire du confort visuel de la période froide (FERROUKHI).	213
Figure 6.4 : Réponses au questionnaire du confort thermique de la période chaude (FERROUKHI).	224
Tableau 6.1 : Mesures d'éclairement naturel, sous ciel clair, 26 décembre 2016 (ABDOU).	184
Tableau 6.2 : Mesures d'éclairement naturel, sous ciel clair, 25 mars 2017). (ABDOU).	185
Tableau 6.3 : Mesures d'éclairement naturel, sous ciel couvert, 21/12/2016 (ABDOU).	186
Tableau 6.4 : Mesures d'éclairement naturel, sous ciel couvert, 24 mars 2017 (ABDOU).	186
Tableau 6.5 : Mesures d'éclairement naturel, sous ciel clair, 28 mars 2018 (FERROUKHI).	188
Tableau 6.6 : Mesures d'éclairement naturel, sous ciel couvert (9 février 2018) (FERROUKHI).	189
Tableau 6.7 : Mesures d'éclairement naturel, sous ciel couvert, 21 mars 2018 (FERROUKHI).	190
CHAPITRE 7	
Figure 7.1 : Grenier du cas amélioré (Lycée ABDOU).	240
Figure 7.2 : Isolation par laine de bois en rouleaux du plancher d'un grenier.	242

Figure 7.3 : Application d'enduit-ciment sur murs extérieurs du lycée ABDOU.	242
Figure 7.4 : Réhabilitation des murs anciens pour retrouver les qualités d'origine.	243
Figure 7.5 : Réhabilitation des planchers bas « sur terre-plein ».	244
Figure 7.6 : Réhabilitation des planchers bas « espaces non chauffés » et planchers intermédiaires.	245
Figure 7.7 : Exemple de nouvelles fenêtres « maison passive ».	246
Figure 7.8 : Chaudières installées en 2013 suite aux travaux de réhabilitation.	247
Figure 7.9 : Pave lumineux encastré 4x18W du cas amélioré.	249
Figure 7.10 : (a) Zonage des commandes pour les salles de classe. (b) Luminaire LED encastré pour l'éclairage des salles de classe.	250
Figure 7.11 : Ambiance lumineuse dans la salle de classe N° 6 (Lycée ABDOU).	251
Figure 7.12 : Gamme de peinture à utiliser pour créer un environnement doux dans les salles de classe.	252
Figure 7.13 : Choix approprié des coloris pour le mur supportant le tableau.	253
Figure 7.14 : Couleurs foncées sur la partie basse des murs pour éviter les salissures.	253
Figure 7.15 : Choix des couleurs claires pour la cage d'escalier du cas amélioré.	254
Figure 7.16 : Teinte claire sur la partie basse des murs favorise les salissures (coursive du cas amélioré).	254
Figure 7.17 : Exemples de coloris à utiliser pour les espaces de circulation.	255

Figure 7.18 : Revêtement spécifique de teinte foncée pour la cage d'escalier minimise les salissures.	255
Figure 7.19 : Couleurs plus attrayantes pour créer un environnement énergétique.	256
Figure 7.20 : Exemples de coloris pour la bibliothèque.	256
Figure 7.21 : Planches de bois entravant la pénétration de lumière du jour.	257
Figure 7.22. Zone de simulation thermique.	258
Figure 7.23 : Simulation numérique du Lycée Mohammed Abdou.	259
Figure 7.24 : Grille de simulation d'éclairage naturel.	260
Figure 7.25 : Insertion des paramètres de simulation relatifs aux matériaux de construction.	261
Figure 7.26 : Insertion des paramètres de simulation relatifs au type de vitrage.	262
Figure 7.27 : Simulation numérique de la période hivernale (12 février 2018).	264
Figure 7.28 : Simulation numérique de la période chaude (24 septembre 2018).	264
Figure 7.29 : Simulation numérique après amélioration du cas d'étude (12 février 2018).	265
Figure 7.30 : Simulation numérique après amélioration du cas d'étude (24 septembre 2018).	266
Figure 7.31 : Profil transversal d'éclairage mesuré et simulé le 25 mars à 12 h, sous un ciel clair.	267
Figure 7.32 : Profil transversal des niveaux d'éclairage mesuré et simulé le long de la rangée des points N° 2, 5,8 et 11 (surlignés en rouge, voir figure 7.26) le 26 mars à 12 h, sous un ciel clair	269

Figure 7.33 : Charge thermique dans la salle de classe N° 5 pendant les heures d'occupation du 12 février 2018.	271
Figure 7.34 : Charge de refroidissement dans la salle de classe N° 5 pendant les heures d'occupation du 24 septembre 2018.	271
Tableau 7.1 : Les matériaux de réhabilitation des planchers sur terre-plein.	244
Tableau 7.2 : Les matériaux de réhabilitation des planchers intermédiaires.	245
Tableau 7.3 : Consommation du gaz naturel avant et après remplacement de chaudière (consommation enregistrée en 2018).	248
Tableau 7.4 : Différence de consommation en électricité entre les deux installations.	250
Tableau 7.5 : Dimensions et propriétés des matériaux de la salle de classe N° 5.	258
Tableau 7.6 : Propriétés thermiques de la laine de bois.	261
Tableau 7.7 : Propriétés de l'argon des fenêtres de maison passive.	262
Tableau 7.8 : Comparaison entre les niveaux d'éclairement mesuré et simulé dans la salle de classe N° 5 (à 12h, le 25 mars sous des conditions de ciel clair).	268

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ces dernières années, la qualité du confort intérieur dans les bâtiments scolaires a suscité un intérêt croissant, puisque les élèves passent 30 % de leur vie à l'intérieur des salles de classe [1]. Les bâtiments scolaires représentent une partie du secteur de bâtiments, qui consomment 40 % de l'énergie produite non renouvelable, comme le pétrole et le gaz, et émettent 36 % des émissions de CO₂ [2]. Selon Wong et al [3], cette qualité environnementale recommande d'assurer un bon confort thermique et visuel, ainsi qu'une bonne qualité de l'air dans les salles de classe, afin de contribuer positivement au rendement scolaire et à préserver la santé des usagers [4, 5, 6].

Plusieurs chercheurs ont étudié le confort thermique et visuel dans les bâtiments scolaires. Ils relèvent l'importance de fournir des conditions intérieures confortables, et de leur influence sur les économies d'énergie, le bien-être et la productivité des élèves [7, 8, 9]. L'évaluation du confort thermique et visuel a été d'abord effectuée sur la base d'enquêtes in situ, qui combine de façon simultanée des questionnaires et des campagnes de mesures. En outre, diverses études ont eu recours à la simulation [10, 11], pour prévoir le confort thermique et visuel des occupants dans les salles de classe et aussi pour vérifier l'efficacité des stratégies et de rénovations possibles.

L'évaluation de la qualité de l'environnement intérieur devient un sujet plus important, lorsqu'il s'agit de bâtiments scolaires anciens, généralement caractérisés par une qualité médiocre de confort et souvent construits sans normes de durabilité et d'efficacité énergétique [12]. Martínez-Molina et al [13] ont indiqué qu'il y avait peu de recherches spécifiquement sur l'efficacité énergétique et le confort thermique dans les bâtiments scolaires historiques. Nous soulignons ici l'étude de Lassandro et al [14], qui a évalué, à l'aide de campagnes de mesures et de simulations, l'efficacité énergétique et les conditions thermiques et d'éclairage, dans une école qui présente une valeur patrimoniale en Italie. Cette étude a montré comment des solutions éventuelles de réhabilitation pourraient améliorer les performances des bâtiments et le confort des élèves. Zinzi et al [15] ont démontré

la nécessité de rénover une école ancienne, après avoir évalué une mauvaise qualité de l'environnement intérieur.

Partant du principe de bien évaluer pour mieux agir et prendre les mesures appropriées, ce travail de thèse vise à évaluer les deux paramètres cruciaux, caractérisant la qualité de l'environnement intérieur et la consommation d'énergie, en l'occurrence, le confort thermique et lumineux. L'étude s'effectue dans deux lycées anciens situés à Miliana, dans le nord de l'Algérie, à 120 km de la capitale Alger. Cette ville millénaire est caractérisée par un climat méditerranéen avec un hiver froid, une température moyenne de 10,5 °C et un été légèrement chaud avec une température moyenne de 28,1 °C.

1. Problématique Cet état de lieux nous a poussés à formuler la problématique suivante :

Dans quelle mesure le confort thermique et visuel est-il atteint dans les établissements d'enseignement hérités de la période coloniale française ?

Quels sont les méthodes et les moyens à utiliser lors de la restauration et de la réhabilitation de ces établissements d'enseignement afin que le confort thermique et visuel soit atteint sans l'utilisation d'énergies fossiles non renouvelables ?

2. Objectifs de la recherche

L'évaluation du confort thermique et visuel dans les écoles anciennes du 19e et du 20e siècle en Algérie permet d'atteindre les objectifs ci-dessous :

1- Tirer tout un enseignement sur la manière d'adaptation des anciennes écoles à leurs microclimats. Ceci va permettre d'améliorer la qualité de la conception des futurs bâtiments scolaires et de procurer un meilleur confort visuel et thermique, qui est devenu de nos jours, une exigence urgente en particulier dans les écoles actuelles du nord de l'Algérie.

2- Ressortir des recommandations appropriées pour mieux intégrer la dimension environnementale au cahier des charges des projets de réhabilitation des anciens lieux de savoir en Algérie, afin d'en assurer l'efficacité énergétique et le confort intérieur [16].

3. Hypothèses

À partir de la problématique énoncée, deux hypothèses pertinentes ont été émises pour conduire ce travail de recherche à savoir :

1- S'il y avait du confort thermique et visuel dans les anciens lieux de savoir, c'est parce que les concepteurs des bâtiments scolaires ont respecté le microclimat de Miliana !

- L'unité d'observation : Bâtiment d'enseignement colonial
- L'unité d'analyse : Confort thermique et visuel
- Le prédicat : bonne ambiance thermique et visuelle
- Les variables : Les bases de conception d'ensemble (localisation du bâtiment, orientation, forme et compacité, organisation intérieure) ; les bases de conception de détail (Matériaux de construction et leurs performances thermiques, vitrages et propriétés thermiques, l'inertie thermique du bâtiment, l'isolation thermique de l'enveloppe) ; les paramètres du confort thermique tels que la température et l'humidité... etc. ; les paramètres du confort visuel tels que l'éclairage naturel... etc.

2- Si les projets de réhabilitation en Algérie n'aboutissent pas à une bonne qualité environnementale, c'est parce qu'ils optent pour des actions affectant le confort et la consommation énergétique des anciennes écoles.

- L'unité d'observation : Bâtiment d'enseignement colonial
- L'unité d'analyse : Enveloppe du bâtiment, Confort thermique et visuel
- Le prédicat : Faible performance thermique de l'enveloppe, manque de confort visuel et thermique, Isolation faible
- Les variables : Les ponts thermiques sur l'enveloppe du bâtiment, les paramètres du confort thermique tels que la température et l'humidité... etc. Les paramètres du confort visuel tels que l'éclairage naturel et artificiel suffisant, absence d'éblouissement... etc.

4. Méthodologie de la recherche

Ce travail de recherche est basé sur une méthodologie descriptive qui combine trois approches différentes :

4.1. Approche théorique

Elle est fondée sur une recherche bibliographique permettant d'établir l'état de l'art de notre sujet de recherche et mettre le point sur les notions de confort dans les bâtiments scolaires ; les valeurs recommandées par les normes internationales (température, taux d'humidité, vitesse de l'air, niveaux d'éclairage... etc.) ; le protocole d'investigation et les appareils de mesures appropriés, ainsi que la conception d'un questionnaire adéquat.

4.2. Approche analytique

Cette approche est basée sur les méthodes ci-après :

- **Enquête :**

Une enquête est effectuée dans ce sens sur l'ensemble des anciennes écoles de la ville de Miliana pour tout d'abord analyser les typologies existantes et ensuite en choisir des cas d'étude selon une batterie de critères proposés.

- **Étude bioclimatique**

En s'appuyant sur le diagramme bioclimatique de Givoni et les tables de Mahoney, une analyse bioclimatique des cas d'études est effectuée pour faire une comparaison entre d'une part les recommandations bioclimatiques propres aux bâtiments scolaires de Miliana qui seraient en mesure d'assurer le confort thermique et l'efficacité énergétique, et d'autre part les caractéristiques architecturales et constructives des anciennes écoles choisies comme d'étude.

4.3. Approche expérimentale

- **Caractérisation des matériaux**

Une caractérisation thermo-physique a été utilisée pour déterminer les propriétés thermiques des pierres calcaires extraites des cas d'études, à savoir ; la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique.

- **Thermographie**

L'isolation des cas d'étude a été examinée par la thermographie infrarouge. Ceci a été effectué sur les surfaces externes et internes de l'enveloppe, afin de visualiser les déperditions d'énergie, les infiltrations d'air, les ponts thermiques et les défaillances de rénovation.

- **Évaluation quantitative**

Des campagnes de mesures ont été effectuées durant la période chaude et froide de l'année scolaire pour évaluer le confort thermique, ainsi que des campagnes de mesures en fonction des solstices et équinoxes ont été faites pour évaluer le confort visuel.

- **Évaluation qualitative**

Des questionnaires destinés aux occupants des espaces d'études ont été distribués simultanément avec les mesures in situ, pour déterminer leur ressenti vis-à-vis de l'ambiance thermique et lumineuse.

4.4. Approche simulation numérique

Une évaluation numérique à l'aide du logiciel de simulation « EnergyPlus » est effectuée, permettant à la fois de valider les mesures in situ et de proposer des solutions susceptibles d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort intérieur des cas d'études.

5. Structure de la thèse

Notre thèse s'articule autour de deux parties principales. La première constituant notre cadrage théorique, réparti en trois chapitres, tandis que la deuxième réservée à l'aspect purement expérimental, réparti à son tour en quatre chapitres :

5.1. Partie théorique

Le premier chapitre présente un état de l'art sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments historiques, en particulier les bâtiments scolaires, et qu'ils doivent jouer un rôle crucial dans la démarche du développement durable et la lutte contre le réchauffement climatique, à travers l'adaptation en fonction des normes actuelles de confort thermique et d'efficacité énergétique. Le chapitre souligne aussi l'importance d'assurer des conditions thermiques intérieures confortables dans les bâtiments scolaires, au vu de plusieurs considérations, en l'occurrence, l'amélioration de la performance scolaire et faire des économies d'énergie. Ce chapitre présente par ailleurs les différents facteurs affectant le confort thermique des bâtiments scolaires, les critères d'évaluation du confort thermique et aussi les normes requises pour assurer de bonnes conditions thermiques. Le chapitre passe en revue sur la méthodologie d'évaluation du confort thermique par enquête in situ, à l'instar de l'évaluation quantitative par des questionnaires et l'évaluation quantitative par des compagnes de mesures. De plus, autres outils d'évaluation du confort thermique sont mis en évidence, à l'image des indices thermiques, des diagrammes bioclimatiques et aussi des logiciels de simulation.

Le deuxième chapitre examine l'aspect du confort visuel, la terminologie relative aux grandeurs photométriques et met le point sur l'importance de la lumière naturelle en milieu scolaire. En outre, il passe en revue sur les critères principaux du confort visuel, les différents outils de son évaluation ainsi que la réglementation relative à l'éclairage des salles de classe. Le chapitre se termine par relevé l'aspect du facteur de lumière du jour (FLJ), les deux aspects de l'éclairage naturel et les diverses stratégies d'optimisation de la lumière naturelle dans les bâtiments scolaires.

Le troisième chapitre s'intéresse à la zone d'étude de Miliana à travers la présentation de sa situation géographique, sa morphologie urbaine, les critères de choix, un aperçu historique de la région, ses conditions climatiques ainsi que son architecture et son urbanisme. De plus, il aborde l'analyse bioclimatique de la zone de Miliana par le biais des diagrammes bioclimatiques. Il passe en revue sur l'enquête effectuée sur terrain pour l'identification et le classement du corpus

d'étude (écoles anciennes datant des 19e et 20e siècles). À la fin, ce chapitre présente une comparaison entre d'une part les recommandations bioclimatiques conformes à la région de Miliana et d'autre part les caractéristiques architecturales et constructives des bâtiments cas d'études.

5.2. Partie expérimentale

Le quatrième chapitre traite de la caractérisation thermo physique des matériaux pour déterminer la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique des échantillons de pierre extraits des bâtiments cas d'étude (pierre de tuf). En outre, le chapitre présente la thermographie infrarouge, la méthodologie d'élaboration du questionnaire destiné aux usagers des espaces d'étude et aussi les instruments de mesure utilisés pour mener l'enquête in situ. À la fin, le chapitre met le point sur le logiciel de simulation numérique « Energyplus » et tous les paramètres d'entrées.

Le cinquième et le sixième chapitre mettent en exergue l'interprétation des résultats de l'évaluation qualitative et quantitative des confort thermique et visuel dans les salles de cours, ainsi qu'une présentation d'une comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales. Ce qui aboutit à connaître la performance thermique et lumineuse des bâtiments scolaires cas d'étude.

Le septième chapitre, à l'aide d'une simulation numérique, propose une multitude de bonnes interventions en vue d'améliorer le confort thermique et visuel, ainsi que l'efficacité énergétique des cas d'étude. Ces interventions visent aussi à respecter la valeur patrimoniale des bâtiments de peur de ne pas dénaturer l'aspect architectural ni créer de désordres techniques.

Enfin, viendra la conclusion générale, cette dernière présentera une série de recommandations intégrables au cahier des charges mis à la disposition des instances concernées afin d'inclure la démarche environnementale et l'efficacité énergétique dans les travaux de réhabilitation des anciennes écoles en Algérie, et aussi des recommandations relatives à la proposition d'un modèle conceptuel adapté au microclimat de Miliana afin d'assurer des ambiances thermiques et visuelles optimales.

Première partie : Cadrage théorique

CHAPITRE 1

CONFORT THERMIQUE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES BÂTIMENTS SCOLAIRES

1. Introduction

Le confort thermique est un aspect très important dans les bâtiments d'enseignement. Ces dernières années, son évaluation dans les salles de cours a suscité énormément d'intérêt. Cela est dû à plusieurs raisons. Tout d'abord, il est considéré comme le paramètre de la qualité environnementale, le plus lié à la consommation énergétique. Aussi, assurer de conditions thermiques confortables est, de nos jours, une condition essentielle pour améliorer la productivité des étudiants, leur développement ainsi que la préservation de leur santé.

En ce qui concerne le contenu de ce chapitre, il commence par mettre le point sur le rôle crucial que jouent les bâtiments anciens, en particulier les bâtiments scolaires, pour agir dans la démarche du développement durable à travers leur adaptation aux normes actuelles d'efficacité énergétique et de durabilité. Ensuite, il met un éclairage sur la situation des écoles anciennes en Algérie dans ce contexte énergétique et environnemental particulier. En outre, le chapitre passe en revue sur la définition théorique du confort thermique et son impact en milieu scolaire, ainsi que les critères, les normes internationales relatives à l'ambiance thermique et la méthodologie appropriée permettant son évaluation de façon subjective et objective.

2. Énergie et développement durable

2.1. Contexte énergétique et environnemental

2.1.1. Énergie fossile

Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) dominent fortement nos ressources énergétiques. Elles sont exploitées à l'échelle mondiale surtout par les grandes puissances, à l'instar des États-Unis et la Chine. Cependant, cette

dépendance nous exige de payer aujourd'hui lourdement le prix et elle provoque deux soucis majeurs. Le premier s'agit de l'aggravation des tensions géopolitiques pour servir les intérêts des grandes puissances, en créant des guerres sous différents prétextes dans les pays qui importent ces énergies fossiles, tout en cachant leurs véritables raisons dans ces guerres, qui se résument bien évidemment dans la couverture de leurs besoins grandissants en matière énergétique. Tandis que le second souci relève de l'augmentation du niveau de CO2 dans l'atmosphère et ce gaz à effet de serre est considéré comme le premier contributeur au réchauffement climatique de la planète.

2.1.2. Ressources énergétiques non renouvelables

Les énergies fossiles sont des ressources non renouvelables (voir **tableau 1.1**), constituées depuis des millions d'années, à la suite de la fossilisation de végétaux enfouis dans le sous-sol et avec cette hausse de consommation, ces réserves énergétiques s'épuisent à un rythme alarmant.

Tableau 1.1 : Les réserves énergétiques mondiales [17]

Source d'énergie	%		Durée de vie (année)
Pétrole	34	86 %	45
Charbon	35		200
Gaz naturel	21		65
Nucléaire	6		60
Hydraulique	3	14 %	∞
E. Renouvelables	11		∞

2.1.3. Dépendance énergétique alarmante

Avec la croissance démographique, la situation énergétique mondiale s'aggrave de plus en plus, notamment dans les pays de l'Asie, à l'image de la Chine et l'Inde. Selon l'agence internationale de l'énergie [18], la dépendance énergétique a augmenté de 92 % dans la période qui découle de 1971 à 2014. Si des mesures nécessaires ne sont pas prises en compte, cette demande énergétique pourrait

grimper de plus de 50 % d'ici dix ans. Les spécialistes relèvent que les énergies fossiles devraient représenter en 2030 près de 80 % des énergies exploitées dans différents domaines. Cette situation risque de ne pas pouvoir subvenir aux besoins de cette population grandissante [19].

2.1.4. Impacts environnementaux

D'un point de vue climatique et environnemental, la dépendance énergétique aux ressources fossiles est aujourd'hui l'une des plus grandes préoccupations. Elle est en constante augmentation et cause de sérieux problèmes environnementaux, à savoir, le phénomène du réchauffement climatique, qui est le résultat de la hausse des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, en particulier, le dioxyde de carbone CO₂, qui en constitue presque 56 % (voir **figure 1.1**).

Les effets du changement climatique sont déjà présents et devraient s'intensifier au cours des prochaines années [20].

- Fonte des glaciers et hausse du niveau des mers : à l'image de la fonte de la banquise, qui a perdu près de 45 % de sa superficie globale et 80 % de son volume depuis 1979. Quant aux mers, devraient atteindre des niveaux supérieurs à 65 cm d'ici 2100 [21].
- Accentuation des phénomènes extrêmes et modification des précipitations comme la canicule, les inondations, les sécheresses... etc.
- Conséquences pour les pays en développement : Ils sont plus vulnérables que les pays développés, puisque, ils dépendent fortement de leur environnement naturel.
- Risques pour la santé humaine : Ces dernières années, l'augmentation de la chaleur a fait plus de décès.
- Pertes pour la société et l'économie : Les catastrophes naturelles comme les inondations causent des pertes économiques très considérables.
- Conséquences pour la vie sauvage : Si la température moyenne de la planète continue de grimper, quelques espèces de faune et flore seraient menacées d'extinction.

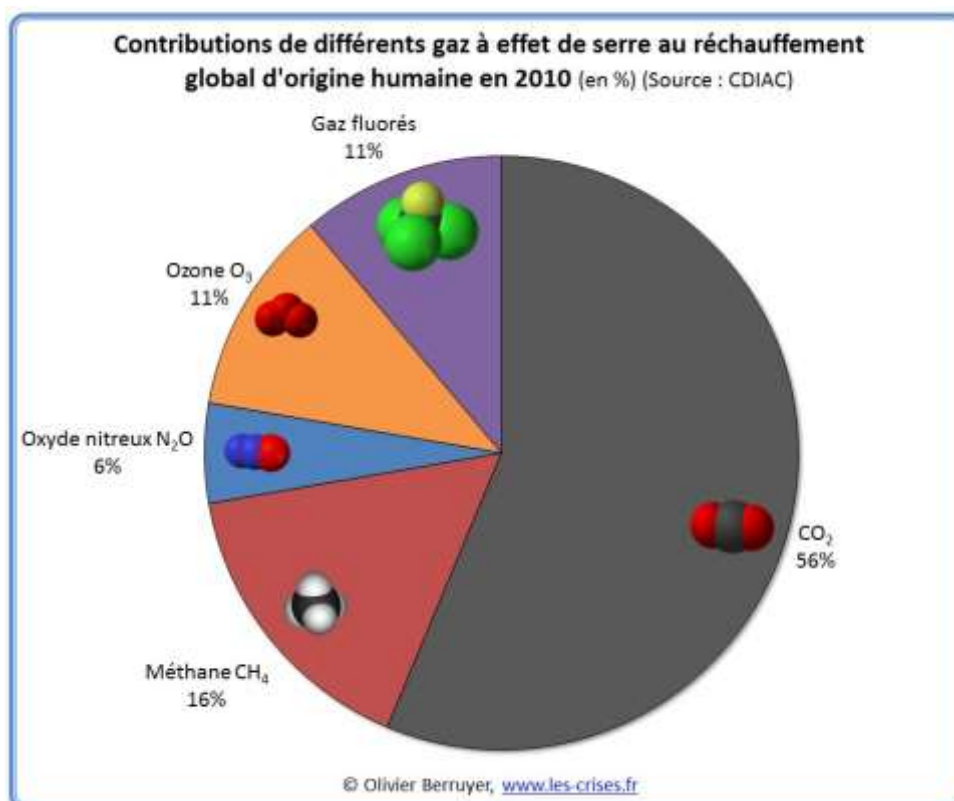


Figure 1.1 : Présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère [22].

2.3. Contribution de la construction à la lutte contre le changement climatique

Notre planète est manifestement menacée par le réchauffement climatique. Ce phénomène pèse lourdement sur la qualité de notre cadre de vie. Afin d'y faire face, le cap doit être changé dans tous les secteurs responsables d'émission des gaz à effet de serre (GES), principalement le secteur du bâtiment. Celui-ci consomme trop d'énergie (40 %) et émet (36 %) de dioxyde de carbone (CO₂). Ces émissions correspondent à l'exploitation habituelle des bâtiments (chauffage, air conditionné, eau chaude...). À cet effet, il est temps de transformer positivement ce secteur, à travers la construction des bâtiments respectueux de l'environnement, le choix des équipements énergétiquement économes pour assurer notre confort (chauffage et refroidissement... etc.), l'intégration des énergies renouvelables... etc.

2.4. Patrimoine architectural et efficacité énergétique

La lutte contre le réchauffement climatique ne concerne pas uniquement la construction des bâtiments neufs, mais aussi les bâtiments anciens. Ces derniers représentent une partie énorme des bâtiments existants. Bien qu'ils soient souvent

construits avec des normes dépourvues de durabilité et d'efficacité énergétique, ces bâtiments anciens se caractérisent généralement par une très mauvaise efficacité énergétique et ils sont, de nos jours, appelés à faire l'objet d'une intervention rigoureuse pour satisfaire les exigences actuelles en matière d'énergie [13].

3. Survol de la littérature consacré aux bâtiments historiques

3.1. Contributions scientifiques sur les bâtiments historiques

Martínez-Molina et al [13] met en évidence que les premières études relatives à l'efficacité énergétique des bâtiments historiques ont commencé à apparaître à la fin des années 1970 (**figure 1.2**). À partir de cette date, les recherches se sont multipliées et ont connu un intérêt grandissant. La problématique fondamentale était comment trouver des solutions efficaces pour à la fois protéger la valeur patrimoniale des bâtiments et réaliser des économies d'énergies.

Pour ce qui concerne, les années 2000, Martínez-Molina et al [13] soulignent que les chercheurs ont abordé différemment les bâtiments historiques. Par exemple, à partir de 2005, certains chercheurs ont lancé des projets dans la préservation des œuvres d'art. Entre 2005 et 2010, les chercheurs se sont penchés sur la problématique de l'amélioration du confort thermique des bâtiments historiques, qui hébergent des œuvres d'art tout en respectant leurs valeurs patrimoniales et en maintenant la consommation d'énergie dans des niveaux contrôlés.

De 2011 à 2014, Martínez-Molina et al [13] clarifient que le volume de recherches a considérablement augmenté. L'intégration de la notion du développement durable à la réhabilitation des bâtiments historiques a été le thème de plusieurs études de cette période. L'article souligne également que la plupart des études récentes de 2014 portent sur la réutilisation des bâtiments patrimoniaux et proposent des solutions techniques appropriées pour améliorer l'efficacité énergétique tout en préservant les valeurs patrimoniales des bâtiments.

De 2014 à nos jours, nous relevons que les dernières recherches s'intéressent à la question de l'adaptation des bâtiments anciens vis-à-vis des questions de la durabilité et l'efficacité énergétique. En effet, La Fleur et al [23] relèvent des recherches qui portent sur la réduction significative de la

consommation énergétique à la suite de travaux de rénovation [24, 25] et mettent en évidence par ailleurs des études [25, 26, 27, 28] démontrant l'impact positif de la rénovation des bâtiments existants sur l'amélioration de la qualité environnementale, notamment le confort thermique.

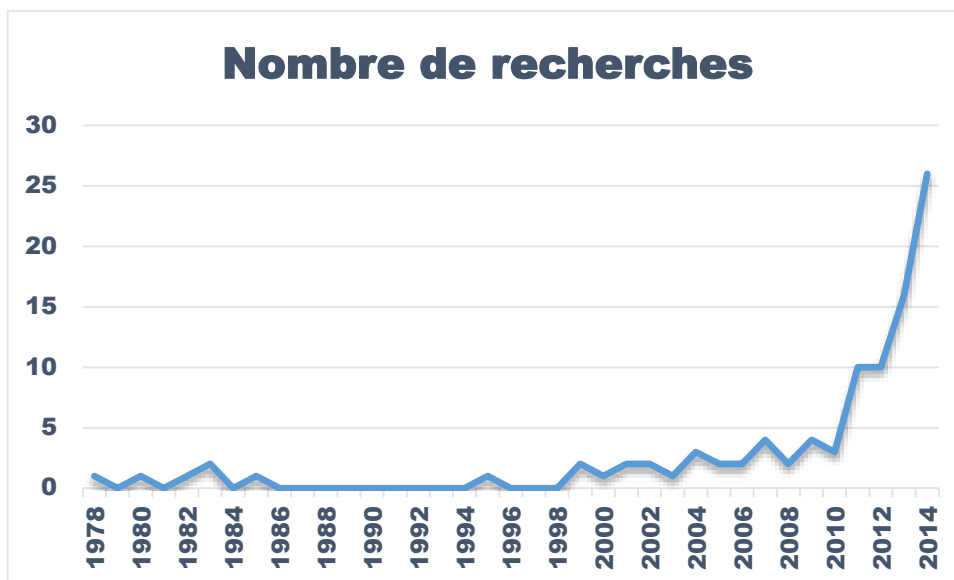


Figure 1.2 : Nombre de recherches portant sur l'efficacité énergétique et le confort thermique des bâtiments historiques [13].

3.2. Intérêt grandissant pour les bâtiments historiques à l'échelle mondiale

Le patrimoine architectural possède non seulement une importance culturelle, vu que sa perte est synonyme de la perte d'une part de notre identité. Mais aussi, il a une importance capitale sur le plan économique. La chose que plusieurs pays l'ont compris pour construire une économie durable à travers la conservation des bâtiments et monuments historiques, notamment les pays européens. En effet, Martínez-Molina et al [13] relèvent que l'Italie mène la course en matière de recherches sur les bâtiments historiques, suivie par le Royaume-Uni, l'Espagne et la Chine. Cela est attribué, non seulement au nombre important de bâtiments historiques dans ces pays (par exemple, l'Italie possède le plus grand patrimoine bâti au monde. Sur les 5 367 000 monuments enregistrés en Europe, plus de

4 000 000 sont situés en Italie). Mais aussi, par rapport aux recettes du tourisme, principale source de devises extérieures et moteur essentiel de la croissance économique en Italie, avec un chiffre d'affaires estimé à 136,1 milliards

d'euros, ce qui peut expliquer la nécessité économique pour la préservation du patrimoine architectural et culturel.

3.3. Âge des bâtiments historiques étudiés

La **figure 1.3** montre l'âge des bâtiments historiques pris comme cas d'études. Martínez-Molina et al [13] justifient le nombre important des recherches menées jusqu'à présent sur les constructions du XXe siècle, par les raisons suivantes :

- La difficulté de trouver des cas d'étude suffisamment bien conservés pour les autres périodes notamment ceux construits avant le 12e siècle ;
- Les bâtiments du XXe siècle sont en bon état de conservation et leurs structures sont intactes et sont toujours en utilisation ;
- Les mesures d'efficacité énergétique et d'amélioration du confort thermique pour les bâtiments du XXe siècle sont faciles à mettre en œuvre et les bâtiments peuvent donc être rapidement adaptés aux besoins actuels.

Dans ce cas, il y a concordance entre les révélations de l'article de synthèse de Martínez-Molina et al [13] et la nature de notre recherche portant sur le confort et l'efficacité énergétique des bâtiments scolaires anciens en Algérie datant de l'époque coloniale française des XIXe-XXe siècles.

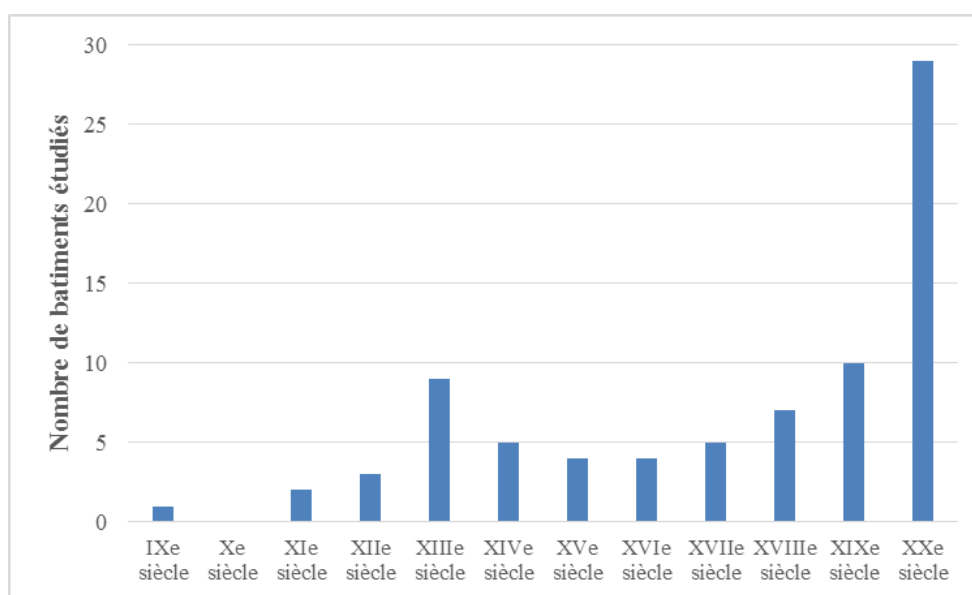


Figure 1.3 : Âge des bâtiments historiques étudiés [13].

3.4. Objectifs des recherches

La **figure 1.4** illustre que les recherches menées sur les bâtiments historiques ont porté sur différents objectifs :

- 72 % visent comme objectif principal, l'amélioration du confort thermique et l'efficacité énergétique.
- 16 % des études ont porté sur la conservation des œuvres d'art, en menant des enquêtes l'analyse des conditions thermiques intérieures (température, humidité et qualité de l'air).
- 4 % ont porté sur le même objectif précédent (la conservation des œuvres d'art), mais cette fois-ci en effectuant des tests empiriques tels que l'analyse de la performance des murs extérieurs.
- Enfin, 8 % des études ont eu plusieurs objectifs, notamment le développement de méthodologies de réhabilitation et l'examen théorique et statistique de la performance énergétique des villes et des quartiers.



Figure 1.4 : Objectifs de recherches sur les bâtiments historiques [13].

4. Types de bâtiments historiques

Martínez-Molina et al [13] relèvent que les chercheurs ont étudié différents types de bâtiment historique. En l'occurrence, des édifices à usage résidentiel, des édifices à usage religieux, des musées, des théâtres, des bibliothèques, des palais ainsi que des bâtiments d'enseignement. Plus de détails sur l'état de l'art de ces derniers vont être donnés en ci-dessous.

4.1. Bâtiments historiques utilisés à des fins didactiques

Martínez-Molina et al [13] soulignent que les bâtiments historiques consacrés à l'usage didactique sont ceux qui ont reçu le moins d'études. Cela est probablement dû au fait que, par rapport à d'autres types de bâtiments, les bâtiments d'enseignement ont une flexibilité d'utilisation et de conception limitée et ne sont donc pas aussi accessibles que d'autres structures. Les auteurs ajoutent aussi que, la plupart de ces écoles anciennes étudiées datent des XIIIe, XIVe et XXe siècles.

À l'exception de l'étude menée par Butera et al [29] rentrant dans le cadre d'un projet de réhabilitation d'un ensemble de bâtiments scolaires anciens à Palerme (Italie), Martínez-Molina et al [13] mettent en évidence que la plupart des études relatives aux bâtiments d'enseignement historiques ont vu le jour entre 2002 et 2014. Sauchelli et al [30] ont montré que la simulation énergétique joue un rôle essentiel dans l'analyse de la performance des mesures de rénovation. Lagüela et al [31] ont utilisé une approche qui combine thermographie et données laser pour analyser une école ancienne à Vigo, en Espagne. De Santoli et al [32] ont évalué les écoles publiques de Rome (Italie) afin de définir des stratégies d'intervention possibles pour réduire la consommation d'énergie. La recherche de Hanna [33] a évalué et quantifié la lumière du jour, l'acoustique et le confort thermique dans une école d'art « Glasgow School of Art ». Ensuite, ils ont comparé les mesures in situ aux perceptions subjectives des clients et des visiteurs. Les articles relatifs au projet international de « School of the Future » mené dans 4 pays européens, Allemagne [34], Italie [35], Danemark [36] et Norvège [37], ont démontré l'impact positif d'un projet de rénovation sur les performances énergétiques et environnementales. Plus de détails sur ce projet de réhabilitation exemplaire seront présentés par la suite.

5. Stratégies d'amélioration du confort thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments historiques

5.1. Projet de réhabilitation de quatre anciennes écoles « School of the Future »

5.1.1. Brève description "School of the Future"

Le projet international « School of the Future » rentre dans le cadre du 7e programme de l'Union européenne. Son objectif était de concevoir, démontrer, évaluer et communiquer des exemples parfaits sur la réalisation d'une « réhabilitation à haute efficacité énergétique et environnementale ». Les performances énergétiques et environnementales de 4 bâtiments scolaires situés dans 4 pays européens ayant des climats différents ont été significativement améliorées grâce à la rénovation de l'enveloppe du bâtiment, des systèmes de service (chauffage, électricité et ventilation), ainsi que l'intégration des énergies renouvelables et des systèmes de gestion du bâtiment [38].

5.1.2. Objectifs du projet

Sensibiliser les gens à faire des économies d'énergie en réalisant des réhabilitations à haute efficacité énergétique et environnementale pour des bâtiments scolaires. Cela ouvrira la voie à l'adoption des approches sobres en carbone, tout en garantissant un environnement intérieur confortable. Le succès des travaux de rénovation sera mesuré en fonction des points suivants :

- ✓ Réduction de la consommation énergétique des écoles d'environ 67 % ;
- ✓ Réduction de la consommation d'énergie de chauffage par 75 % ;
- ✓ Amélioration de la qualité de l'environnement intérieur (qualité de l'air, lumière du jour, acoustique, confort thermique), avec évaluation par des mesures in situ et des questionnaires pour mettre le point sur l'impact des travaux de réhabilitation sur les performances ;
- ✓ Démontrer qu'il est possible de faire des économies d'énergie avec des budgets limités à (<100 €/m²). Cela motivera les autres acteurs du secteur à faire des projets similaires.

5.1.3. Mesures de rénovation

Le gymnase Solitude à Stuttgart, en Allemagne, a fortement amélioré la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment (**voir figure 1.5, a**). Cela est dû aux mesures d'isolation et au remplacement des fenêtres par un triple vitrage. L'installation d'un système de ventilation mécanique à base de capteurs de CO₂. Le chauffage de tout le bâtiment scolaire sera assuré par une unité de cogénération. L'installation des panneaux photovoltaïques sur le toit, destinée à produire de l'électricité, et tout ce système sera connecté au celui de surveillance de la ville.

Le collège Tito Maccio Plauto de Cesena, en Italie (**voir figure 1.5, b**). Les actions de rénovation comprennent l'isolation des murs extérieurs, le plancher du sous-sol et le grenier, ce qui élimine divers ponts thermiques existants. Des chaudières avec système de contrôle avancé et une subdivision du circuit assureront l'efficacité du système de chauffage. L'adaptation du fonctionnement du chauffage et de la ventilation mécanique en fonction de l'utilisation réelle des espaces. Cela réduira encore la consommation d'énergie. Installation d'un système photovoltaïque sur le toit va diminuer la consommation d'électricité du réseau.

Hedegårdsskolen à Ballerup, au Danemark (**voir figure 1.5, c**). Il a été décidé de mettre une isolation par l'extérieur, après avoir démoli un parement en briques externes. Installation des panneaux photovoltaïques sur le toit et différents systèmes d'éclairage dans les salles de cours.

Le skole Brandengen à Drammen (**voir figure 1.5, d**) en Norvège possède des bâtiments historiques précieux datant de 1914, conçus par le célèbre architecte norvégien Arnstein Arneberg. La rénovation de cette école a débuté en 2011 pour une durée de 5 ans. Les actions de rénovation pour ce bâtiment classé sont comme suit : le remplacement des fenêtres par des triples vitrages. L'isolation des murs entre les fenêtres mansardées et le plancher du grenier. L'installation d'une pompe à chaleur géothermique pour assurer le chauffage du bâtiment scolaire.



a) Gymnase Solitude à Stuttgart (Allemagne)



b) Tito Collège Maccio Plauto à Cesen (Italie)



c) Hedegårdsskolen à Ballerup (Danemark)



d) Hedegårdsskolen à Ballerup (Norvège)

Figure 1.5 : Photos des 4 bâtiments scolaires réhabilités “School of the Future” [34].

5.1.4. Résultats préliminaires du projet

Les premiers résultats, liés à une mise en œuvre partielle des mesures de rénovation énergétique, donnent déjà satisfaction. En effet, les performances obtenues sont meilleures que les prévisions. Par exemple, pour l'école italienne, la consommation d'énergie pour le chauffage des locaux a été réduite par 4, alors que l'on estime que le bâtiment deviendra indépendant en matière d'électricité.

Pour ce qui concerne les performances de l'enveloppe du bâtiment, la **figure 1.6** présente les valeurs U (coefficient de transmission thermique) des fenêtres et le toit des 4 écoles. Avant la rénovation, les valeurs U ont été assez différentes, en particulier, dans le cas des fenêtres à vitrage simple de l'école italienne. Après la rénovation, elles atteignent approximativement $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ aux fenêtres et entre $0,11$ et $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ au toit.

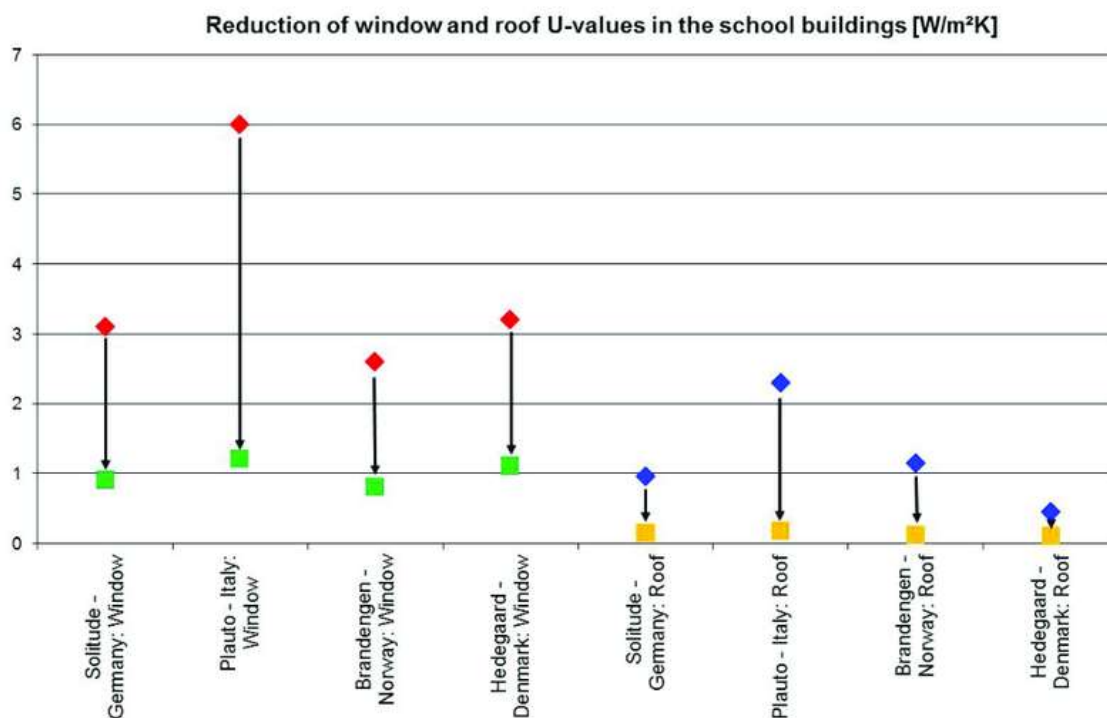


Figure 1.6 : Comparaison des valeurs U des fenêtres et du toit dans les 4 bâtiments scolaires avant et après les rénovations [34].

6. Contexte énergétique en Algérie

6.1. Le bâtiment en Algérie, un secteur énergivore

En matière de consommation énergétique par secteur en Algérie, il convient de constater que le secteur du bâtiment est le premier consommateur, avec 41 % de l'énergie finale. Suivi par le secteur agricole avec 33 %, le secteur industriel avec 19 % et finalement, celui des transports avec un taux de 7 %. En termes d'efficacité énergétique, le secteur du bâtiment en Algérie est « obsolète », et nécessite un véritable plan d'action pour modérer sa consommation énergétique. Plusieurs facteurs accélèrent cette demande en termes d'énergie en particulier, l'augmentation constante du parc immobilier, les services (écoles, hôtelleries, hôpitaux...), la croissance démographique et économique... etc. Sur le volet législatif, la réglementation concernant les normes thermiques des bâtiments neufs figure dans la nouvelle loi, cependant, elle ne concerne pas les bâtiments individuels, ni la réhabilitation thermique du vieux bâti [39].

6.2. Émissions de CO2 en Algérie

La consommation énergétique est intimement liée à la première cause du réchauffement climatique, en l'occurrence, le dioxyde de carbone « CO2 ». À l'image des autres pays, l'Algérie a connu une hausse en termes d'émissions de CO2 (voir **figure 1.8**). Les statistiques de « perspective Monde » relèvent qu'il y a très forte augmentation de ce gaz durant les années précédant l'indépendance 1962. En effet, pour la période découlant de 1960 à 2014, une moyenne annuelle de 65 903,46 kt est enregistrée. Le changement constaté entre la première et la dernière année est estimé à 2260 %. La valeur la plus élevée (145 400,22 kt) est enregistrée en 2014, tandis que la valeur la plus basse (5 427,16 kt) est enregistrée en 1963.

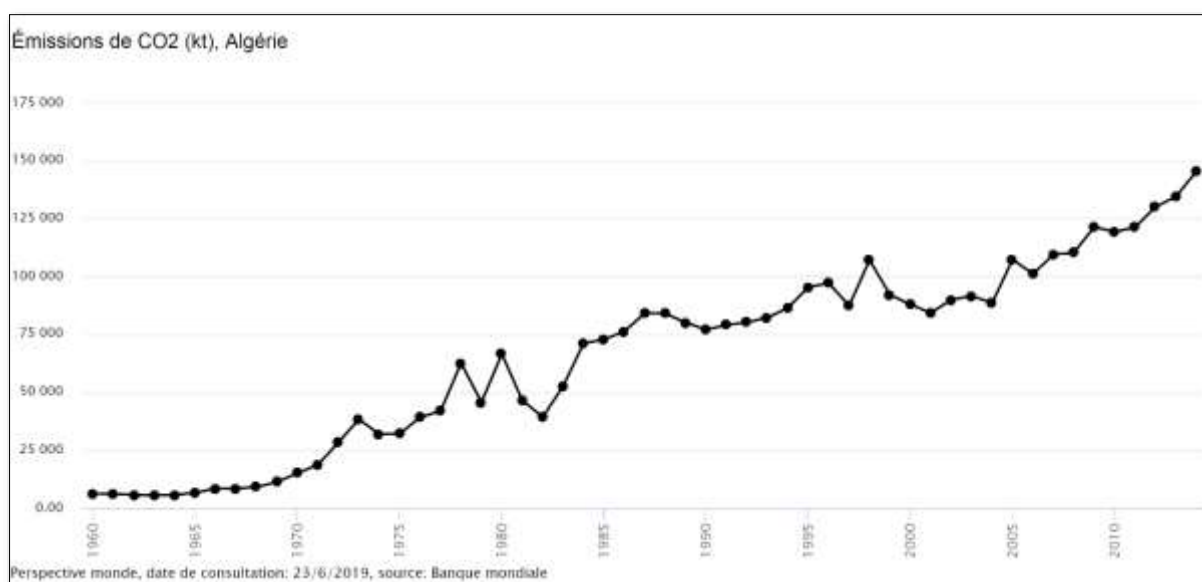


Figure 1.7 : Algérie — Émissions de CO2 (kt) [40].

6.3. Efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment en Algérie

En février 2011, le gouvernement algérien a adapté un programme très important, intitulé « développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique 2011-2030 ». Il constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles (pétrole, gaz et charbon), de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable. Parmi les enjeux de ce programme est l'introduction de la sobriété énergétique dans le secteur du bâtiment. Pour ce faire, des solutions idoines doivent être trouvées

pour permettre la réduction de cette dépense énergétique. Comme la révision de l'architecture actuelle des bâtiments, qui est non seulement, inadaptée au climat, mais également intègre des équipements (chauffage, climatisation, éclairage) à faible efficacité énergétique. En outre, la rénovation énergétique des bâtiments, notamment ceux qui datent des 19 et 20 siècles, est l'un des moteurs les plus importants pour atteindre les objectifs du programme. Cette rénovation devrait viser l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

7. Efficacité énergétique et confort thermique des bâtiments scolaires anciens en Algérie

7.1. Anciennes écoles des 19e et 20e siècles en Algérie

Le bâti ancien des 19e et 20e siècles en Algérie, en l'occurrence les écoles anciennes, occupe une grande partie des villes algériennes. Cela est dû à la longue période de la colonisation française, allant de 1830-1962. Cette époque coloniale a abouti à une production architecturale de plusieurs lieux de savoir, caractérisés par trois styles architecturaux ; style néo-classique (vainqueur) 1830 – 1900, style néo-mauresque (protecteur) 1900 –1950 et style moderne depuis 1950. Leurs symboles sont illustrés sur les **figures 9 et 10**.



Figure 1.8 : Le Lycée Lamoricière à Oran (néo-classique) [41].



Figure 1.9 : Lycée Mohammed Abdou à Miliana (néo-classique) [42].



Figure 1.10 : École primaire Larbi Tebessi à Miliana (néo-mauresque) [43].

7.2. Confort dans les bâtiments scolaires anciens en Algérie

L'école joue un rôle fondamental pour construire le citoyen de l'avenir et l'insérer positivement au sein de la société. Mais pour jouer ce rôle, les écoles doivent offrir des lieux d'apprentissage de qualité, sur tous les plans, notamment celui de la qualité environnementale, qui comprend le confort thermique, visuel, acoustique et respiratoire. Malheureusement, ce n'est pas toujours le cas en Algérie. Beaucoup de lieux de savoir datant de l'époque coloniale sont dans un état déplorable. Dans lesquels, les enfants évoluent dans un environnement défavorable, les systèmes de chauffage, ventilation, et d'éclairage sont caducs et ne fonctionnent pas correctement. Cet état d'inconfort a des conséquences négatives, non seulement sur la performance scolaire, la santé des élèves et leur processus d'apprentissage, mais aussi sur la consommation et l'efficacité énergétique [44].

8. Définition du confort thermique

Le confort thermique est une sensation subjective vis-à-vis de l'ambiance thermique existant dans le local. Il est propre à chaque individu et dépend des saisons. Pendant l'hiver, le confort thermique est synonyme d'une sensation suffisante de chaleur. Pour l'été, il est synonyme d'être à l'abri des surchauffes. Il existe d'autres définitions dans la littérature :

« Le confort thermique est défini 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 » [45].

Selon la norme ISO 7730, « il y a situation de confort thermique si deux conditions sont satisfaites : le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que ses mécanismes autorégulateurs ne soient pas trop sollicités ».

D'après la norme ASHRAE 55-2010, le confort thermique est « cette condition d'esprit qui exprime la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique et qui est évaluée par une évaluation subjective ».

9. Modes de transfert de la chaleur

Il y a trois modes fondamentaux de transfert thermique (**figure 1.12**) :

9.1. La conduction

Il s'agit d'un transfert progressif de chaleur dans les matières (principalement dans les corps à l'état solide).

9.2. La convection

Contrairement à la conduction, le transfert de la chaleur par convection se fait par des déplacements macroscopiques (courant de convection) au sein d'un gaz ou d'un liquide.

9.3. Le rayonnement

Ce mode de transfert de chaleur se définit comme une propagation d'un rayonnement électromagnétique dans le vide.

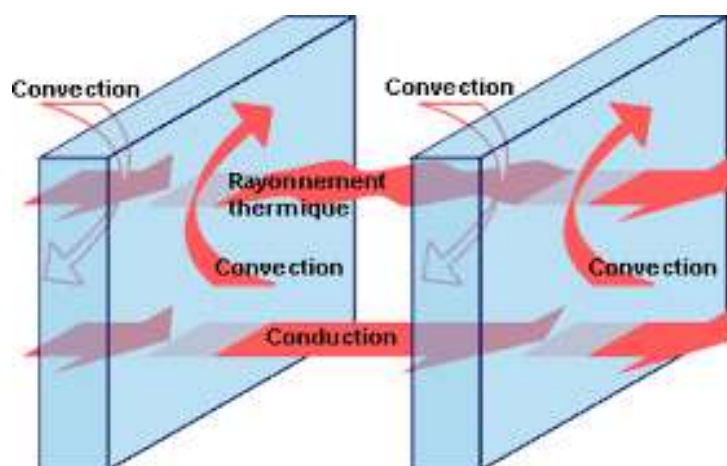


Figure 1.11 : Les modes de transmission de chaleur [46].

10. Confort thermique adaptatif

Le confort adaptatif se définit comme un modèle de confort thermique et propose que les occupants participent à rétablir de bonnes conditions thermiques dans leur environnement de travail. Il montre aussi que l'utilisateur peut s'y adapter via quelques comportements, comme ouvrir ou fermer les fenêtres, rajouter un vêtement... etc. Ainsi, ce modèle permet de donner des températures de confort plus larges que le modèle stable.

L'approche adaptative de confort thermique est appliquée pour les bâtiments sans climatisation centralisée et prend en considération la fluctuation de température extérieure. Autrement dit, elle n'est pas basée sur des conditions thermiques stables comme le cas de l'approche statistique avec des températures constantes. De nombreuses recherches mettent en exergue que l'approche adaptative est plus appropriée pour les bâtiments non climatisés [47, 48, 49, 50]. Le principe de cette approche est décrit par la citation suivante « s'il se produit un changement de nature à produire un inconfort, les gens réagissent de manière à rétablir leur confort » [51].

Cette approche met en évidence que la température de confort n'est pas uniquement liée à la température intérieure, mais plutôt à la température extérieure [52]. Cette compréhension du nouveau modèle thermique adaptatif a été normalisée dans la norme ASHRAE-55/2004. Ensuite, une mise à jour dans la norme ASHRAE-55 2010. La **figure 1.13** décrit le lien direct qui existe entre la température opérative avec les températures extérieures moyennes. Il nous montre que le confort

thermique est atteint dans les bâtiments non climatisés dans des gammes de températures plus larges que dans des bâtiments climatisés.

Dans la norme D'ASHRAE 55, il y a deux expressions pour calculer la température de confort.

- La formule de Brager et de Dear : $T_{\text{confort}} = 0,31 T_{\text{ex}} + 17,8$ [53].
- La formule de Nicol et Humphrey : $T_{\text{confort}} = 0,534 T_{\text{ex}} + 11,9$ [54].

Sur le plan énergétique, il permet de réaliser des économies d'énergie significatives, que ce soit en termes de chauffage en hiver, ou en termes de climatisation en été. Selon De Dear et Brager [53], la consommation énergétique d'un bâtiment à ventilation naturelle est réduite à moins de 50 % par rapport à un bâtiment climatisé. Cela est dû à la variation des températures intérieures en fonction des températures extérieures, au lieu de les maintenir selon une approche statique, dans des fourchettes étroites.

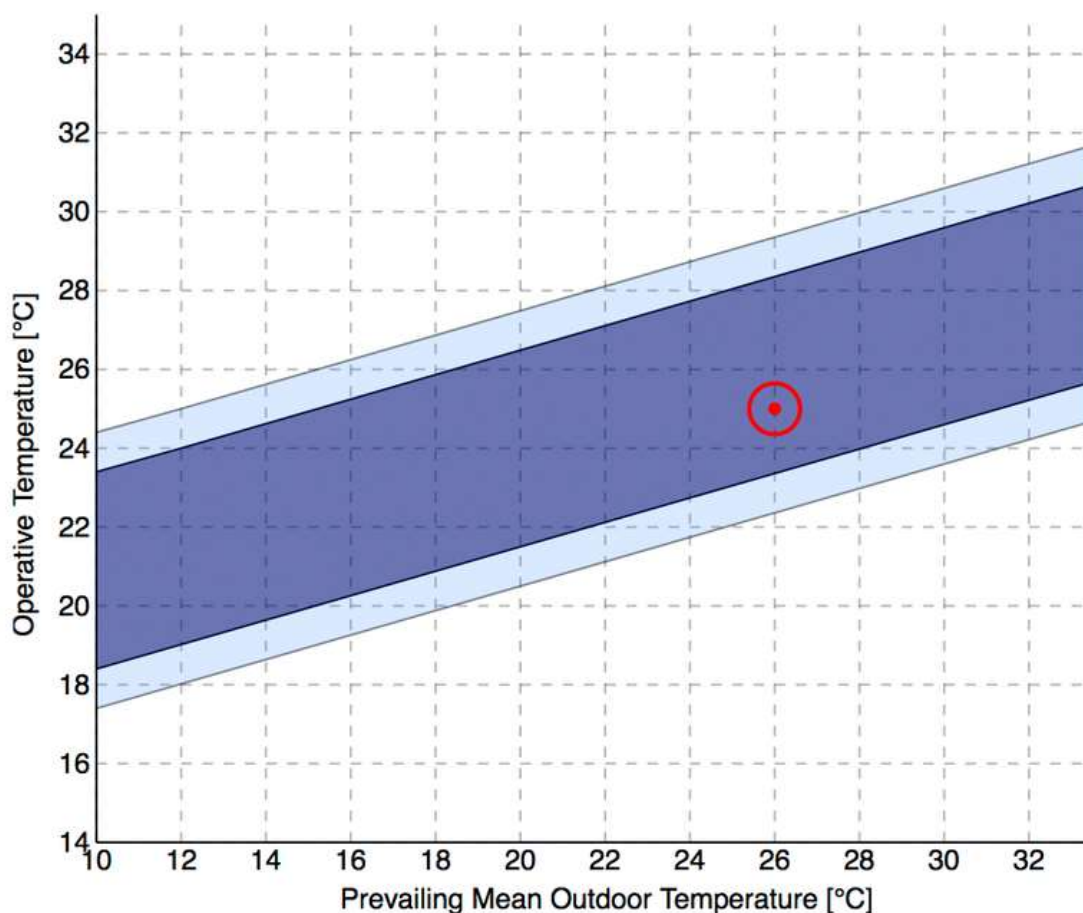


Figure 1.12 : Graphique de confort adaptatif proposé par la norme ASHRAE 55-2010 [55].

11. Impact du confort thermique en milieu scolaire

L'école est un type spécial de bâtiments, dans lequel les élèves passent beaucoup de temps. À cet effet, il demeure nécessaire d'assurer un environnement propice à la promotion de l'enseignement et de l'apprentissage, en particulier le confort thermique. C'est scientifiquement prouvé que la présence de bonnes conditions thermiques peut influencer positivement la capacité d'apprentissage des étudiants [56].

Mendell et Heath [57] ont examiné si les polluants intérieurs et les conditions thermiques dans les écoles influencent les performances des élèves. Pour ce faire, un lien a été établi entre d'une part, les polluants intérieurs et les conditions thermiques dans les écoles ou dans d'autres environnements intérieurs, et d'autre part, les performances des occupants ou l'assiduité. L'étude a conclu qu'il y avait des effets néfastes sur la santé, la concentration et les performances des occupants.

Dans un rapport de recherche sur les effets de la climatisation sur les performances des élèves, Wargocki et Wyon [58] ont mis en exergue que la qualité de l'air et les températures dans les salles de classe sont des facteurs importants dans le processus d'apprentissage et leur amélioration doit recevoir la même priorité que l'amélioration du matériel et des méthodes pédagogiques.

Wargocki et Wyon [59] ont réalisé cinq expériences indépendantes dans des salles de classe. Les chercheurs ont mesuré la performance du travail scolaire après avoir instauré les conditions suivantes : amélioration de la qualité de l'air intérieur et réduction de la température de l'air. Les résultats ont mis en évidence que le fait de doubler les taux de ventilation avait hissée les performances de 14 % et la réduction des températures de 1 °C avait amélioré les performances de 4 %.

Jiang et al [60] ont examiné les performances d'apprentissage des élèves et le confort thermique des écoles primaires en Chine. L'expérimentation était axée sur la relation entre les paramètres de confort thermique (température de l'air, humidité relative et vitesse de l'air) et les performances d'apprentissage. Il a été conclu que l'inconfort thermique causé par des températures élevées ou basses avait un impact négatif sur les performances d'apprentissage des élèves. La

variation de température a affecté non seulement le confort thermique, mais également le bien-être des élèves.

12. Critères d'évaluation du confort thermique

Il existe six paramètres fondamentaux qui influencent le confort thermique, dont quatre variables sont physiques et en lien avec l'ambiance thermique intérieure, alors que les deux autres sont en lien avec l'occupant. Ces principaux critères sont nécessaires pour maintenir un état d'équilibre et de satisfaction pour les occupants avec leur environnement.



Figure 1.13 : Les six critères de confort thermique [45].

12.1. Paramètres en lien avec les conditions thermiques intérieures

12.1.1. Température ambiante de l'air (T_a)

C'est la température de l'air qui entoure le corps et s'exprime généralement en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Elle est mesurée à l'aide d'appareils de mesures comme un thermomètre. C'est le critère le plus important pour exprimer le confort thermique. La température de l'air influence grandement la consommation énergétique. Le fait de passer de 20°C à 21°C est l'équivalent d'environ 7 % sur la facture énergétique. La plage du confort pour la température ambiante se situe entre 19°C et 20°C . Pendant la nuit ou les périodes d'inoccupation, la température de l'appareil de chauffage pourra être réglée sur une valeur fixe et moins par rapport la température de consigne de 2 à 3°C [61].

12.1.2. Température moyenne des parois (Tp)

C'est la température moyenne pondérée de toutes les surfaces exposées dans la pièce, à savoir murs, fenêtres et planchers. Elle s'exprime souvent en degrés Celsius (°C) et mesurée souvent à l'aide d'un thermomètre infrarouge ou une caméra thermique. Elle sert à définir la température de confort ressentie appelée également « température opérative » ou « température résultante sèche ». Lorsque la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s, la température opérative est la moyenne entre la température des parois et la température ambiante de l'air [61].

12.1.3. Humidité relative de l'air (HR)

Le taux d'humidité s'exprime en « % » et évalué à l'aide d'un hygromètre. Il est indissociable à la température ambiante de l'air et veut littérairement dire la quantité d'eau contenue dans l'air. Pour assurer un bon confort thermique, le taux d'humidité doit être dans une fourchette de 40 % à 60 % [61].

12.1.4. Vitesse de l'air (Va)

La vitesse de l'air a un impact sur les échanges de chaleur par convection. Elle est mesurée à l'aide d'un anémomètre. À l'intérieur d'un local, sa valeur ne dépasse pas souvent 0,2 m/s (0,7 km/h). Si elle le dépasse, elle sera prise en considération pour estimer la température ressentie des occupants [61].

12.2. Paramètres en lien avec l'occupant

12.2.1. Habillement

Le niveau d'habillement des occupants exprime la valeur de résistance thermique que procurent les vêtements à son propriétaire, séparant ainsi la peau de l'environnement thermique du local. Ce facteur personnel s'exprime en l'unité de « clo » (voir **tableau1.2**) [62].

Tableau 1.2 : Exemples des niveaux vestimentaires [62].

Tenue vestimentaire	Habillement (clo)
Nu.	0
Short.	0,1
Tenue tropicale type (short, chemise à col ouvert et à manches courtes, chaussettes légères et sandales).	0,3
Tenue d'été légère (pantalon léger, chemise à col ouvert et à manches courtes, chaussettes légères et chaussures).	0,5
Tenue de travail légère (chemise de travail en coton à manches longues, pantalon de travail, chaussettes de laine et chaussures).	0,7
Tenue d'intérieur pour l'hiver (chemise à manches longues, pantalon, pull-over à manches longues, chaussettes épaisses et chaussures).	1,0
Tenue de ville traditionnelle (complet avec pantalon, gilet et veston, chemise, chaussettes de laine et grosses chaussures).	1,5

12.2.2. Métabolisme

Le métabolisme est le fait de produire la chaleur par le corps humain. Il s'exprime en « met » et dépend du type d'activité exercée par la personne. Plus l'activité est intense, plus le niveau de « met » est élevé [62]. Le **tableau 1.3** met en exergue des niveaux de « met » qui correspondent à des activités spécifiques.

Tableau 1.3 : Niveaux de « met » selon des activités spécifiques [62].

Activité	W/m ²	met
Repos, couché	45	0,8
Repos, assis	58	1
Activité légère, assis (bureau, école)	70	1,2
Activité légère, debout (laboratoire, industrie légère)	95	1,6
Activité moyenne, debout (travail sur machine)	115	2
Activité soutenue (travail lourd sur machine)	175	3

13. Évaluation du confort thermique

13.1. Par enquête in situ

Selon Zomorodian et al [9], le confort thermique est évalué par des enquêtes objectives et subjectives, qui se déroulent simultanément. Ces enquêtes in situ sont menées conformément à la norme ISO 7730 ou à la norme ASHRAE 55 et sont souvent effectuées dans la période la plus chaude et la plus froide de l'année scolaire. Les espaces d'études dans les bâtiments scolaires sont généralement des salles de cours et sont choisis par rapport à une batterie de critères, à savoir des critères architecturaux, constructifs ou en fonction des équipements dédiés à assurer le confort thermique (systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation).

13.1.1. Évaluation objective (compagne de mesures)

Les études antérieures relèvent que le confort thermique a été évalué en fonction d'un protocole d'investigation [9], les compagnes de mesures prennent en considération tous les quatre critères qui sont en lien l'environnement thermique (température de l'air, température des parois, humidité relative, vitesse de l'air). Ainsi que, les deux paramètres qui sont en lien avec l'occupant (le niveau d'habillement et l'activité). La température de l'air a été mesurée, au centre de chaque espace d'étude, à une hauteur variant de (0,6 - 1,1 m).

13.1.2. Évaluation subjective (questionnaire)

Les études antérieures ont accordé une attention considérable à l'évaluation du confort thermique de façon subjective par des questionnaires. Les questions se sont penchées sur tous les paramètres du confort thermique (température de l'air, température des parois, humidité relative, vitesse de l'air, niveau d'habillement et activité). Ces questions ont été conçues selon des échelles ASHRAE à sept points (voir **Tableau 1.4**) et des listes pour choisir le type de vêtements et l'activité [9].

Tableau 1.4 : Échelle thermique à 7 points.

+3	Très chaud
+2	Chaud
+1	Légèrement chaud
0	Ni chaud, ni froid
-1	Légèrement froid
-2	Froid
-3	Très froid

13.2. Par simulation énergétique

La simulation énergétique est une analyse, faite par des logiciels multiples tels qu'Energyplus, Ecotect et autres. Elle a pour objectif d'analyser les performances énergétiques dans un bâtiment et permet de faire des comparaisons entre les impacts des différentes mesures d'efficacité énergétique appliquées sur un bâtiment, que ce soit nouvelle construction ou rénovation. Elle se présente donc, comme un outil puissant pour anticiper un meilleur confort et une consommation d'énergie minimale [63].

Cette simulation se réalise en entrant une description détaillée du bâtiment à étudier, telle que la surface, le volume, les matériaux de construction, l'orientation des murs, du toit et du plancher, le type de menuiserie... etc. Ainsi que les données climatiques de la région du bâtiment dans un fichier météorologique spécifique. Par la suite, le logiciel calcule la consommation d'énergie des équipements ou étudie les ambiances architecturales intérieures du bâtiment pour une période souhaitée [63]. La présente recherche opte pour le programme de simulation énergétique « Energyplus » (voir **figure 1.15**).

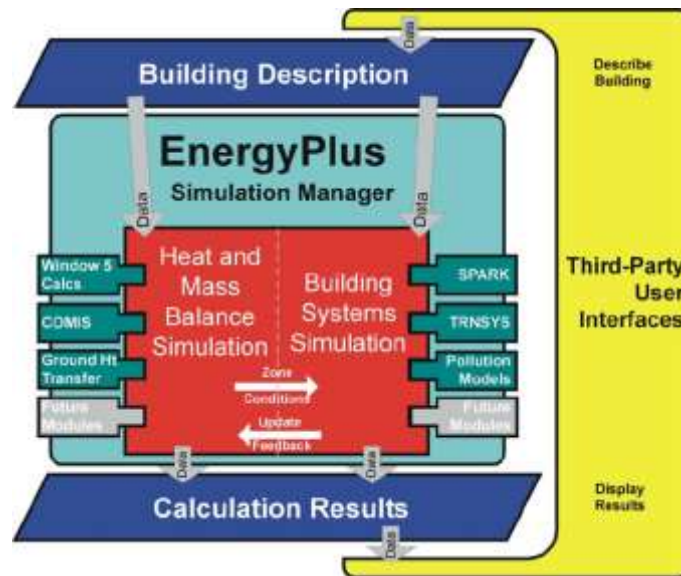


Figure 1.14 : Structure globale d'EnergyPlus [64].

13.3. Par diagrammes bioclimatiques

13.3.1. Définition du diagramme bioclimatique

C'est un graphique utilisé dans la conception des bâtiments, mettant en exergue la variation mensuelle d'un ou plusieurs paramètres climatiques en l'occurrence ; température, précipitations, hygrométrie, ensoleillement, etc. Cet outil permet d'identifier les stratégies d'architecture bioclimatique pour concevoir un bâtiment adapté à son microclimat, permettant ainsi à la fois de réduire le recours excessif à la consommation énergétique et d'assurer le confort thermique intérieur.

Les diagrammes bioclimatiques proposent des stratégies actives et passives pour assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments [65]. Ces stratégies peuvent être réparties en trois zones, à savoir une première zone de confort, une deuxième zone de surchauffe et une troisième zone et sous chauffe. Elles sont définies sur la base de la température et de l'humidité. Ainsi, les stratégies architecturales, notamment passives, sont identifiées pour les comparer avec la réponse des architectures de l'époque au micro climat du bâtiment. Ci-dessous sont expliqués les diagrammes bioclimatiques les plus connus.

13.3.2. Diagrammes bioclimatiques (Olgay, Givoni, Mahoney)

- Diagramme bioclimatique d'Olgay

Les frères V. Olgay ont proposé en 1953 une approche bioclimatique de la conception des bâtiments pour atteindre un certain niveau de confort thermique pour les occupants (voir **figure 1.16**). Cette approche se présente comme étant un diagramme servant à concevoir un bâtiment adapté à son microclimat et définit une zone de confort en lien avec les facteurs climatiques, à savoir (température, humidité, vitesse du vent, rayonnement solaire et perte de chaleur par évaporation). Par ailleurs, il déduit que la température de l'air demeure le paramètre crucial du confort thermique et que les autres facteurs y interviennent pour le mettre en évidence. Néanmoins, ce diagramme est limité puisqu'il établit des analyses des exigences physiologiques, en se basant sur les données météorologiques, qui se trouvent à l'extérieur du bâtiment et non pas à l'intérieur. Il est recommandé donc d'appliquer ce diagramme dans les régions dotées d'un climat humide, qui se caractérisent par des écarts insignifiants de température entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments [65].

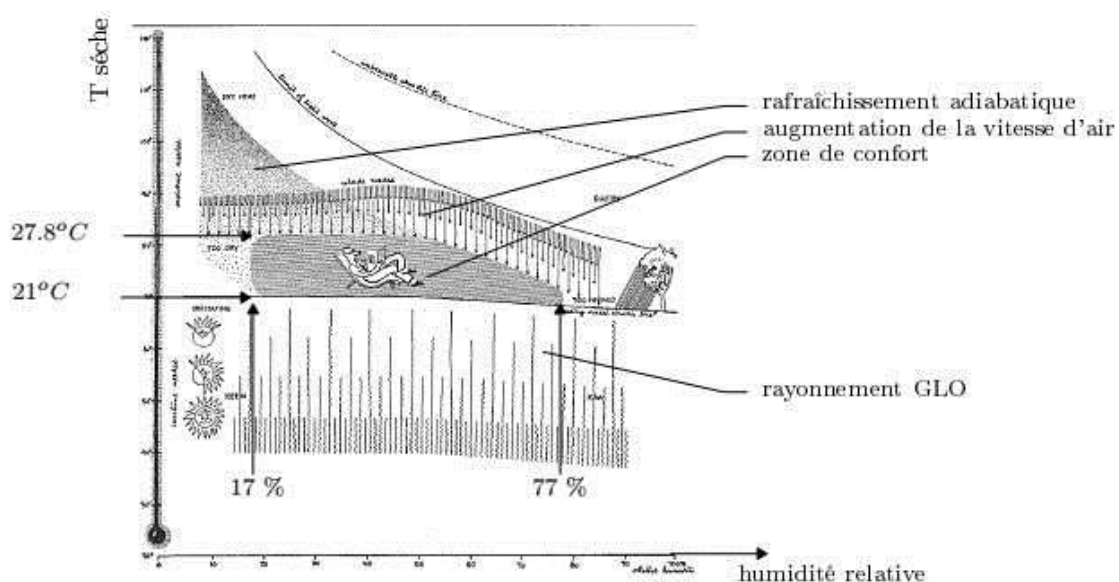


Figure 1.15 : Diagramme bioclimatique Olgay (1963) [66].

- Diagramme bioclimatique de Givoni

Le diagramme bioclimatique de Givoni a été conçu en 1978 à partir du diagramme psychométrique (voir **figure 1.17**). Contrairement au diagramme des

frères V. Olgyay, Givoni a intégré dans sa démarche bioclimatique, les exigences physiologiques du confort thermique, en estimant que l'occupant est en état d'activité à l'intérieur du bâtiment. Il met principalement en relation les paramètres climatiques suivants, la température de l'air sec, la température de l'air humide et l'humidité relative. En traçant les facteurs cités précédemment, des stratégies appropriées sont obtenues, en l'occurrence sept stratégies passives, notamment le chauffage, les gains internes, la ventilation naturelle, le refroidissement par masse thermique élevée, refroidissement par masse thermique élevée avec ventilation nocturne, refroidissement par évaporation et dispositifs d'ombrage [67].

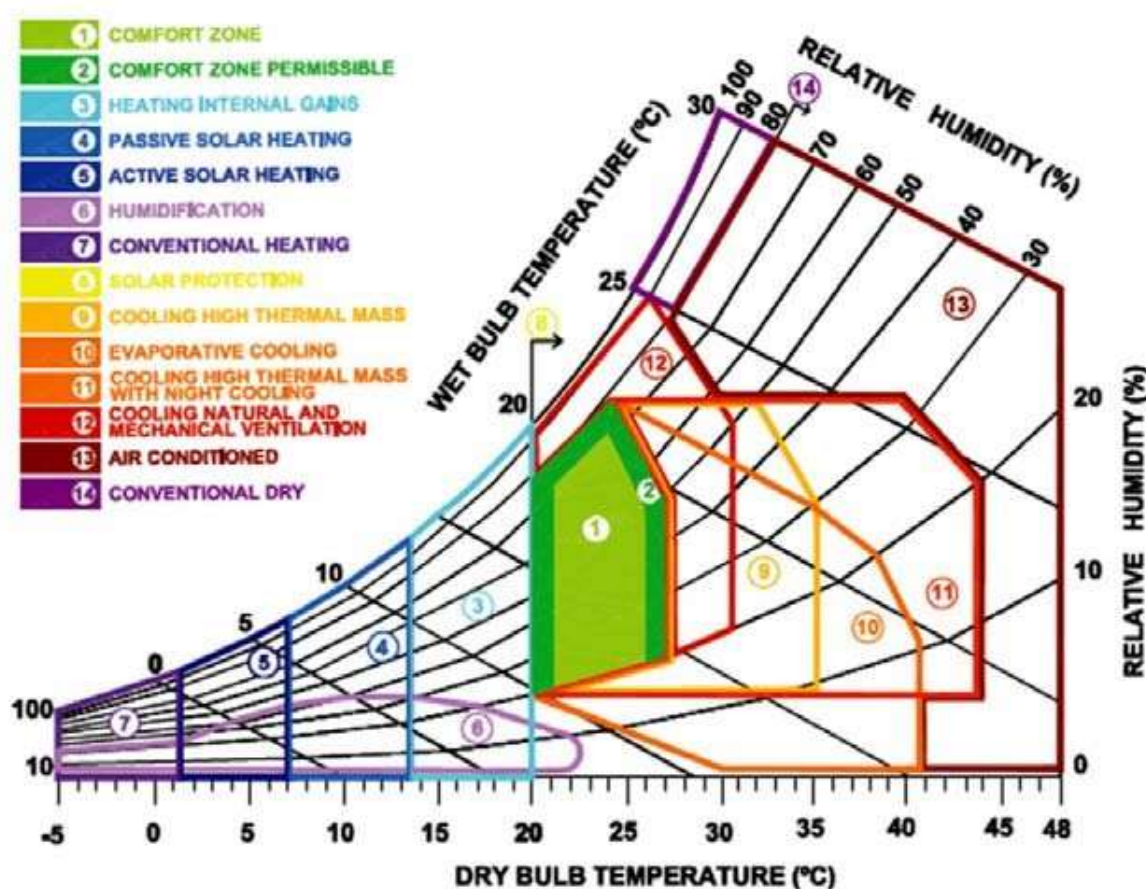


Figure 1.16 : Diagramme bioclimatique de Givoni (1992) [68].

- **Tables de Mahoney**

Les tables de Mahoney se présentent comme une démarche bioclimatique, mises au point par l'architecte Carl Mahoney en collaboration avec John Martin Evans et Otto Königsberger. Elles permettent de ressortir des recommandations bioclimatiques appropriées à la zone analysée. Les tables sont réparties en deux

parties complémentaires (voir **figure 1.18**). La première porte sur un diagnostic de la situation en entrant des données climatiques dans quatre tables incluant les facteurs suivants :

- Températures : moyennes mensuelles des températures maximales et minimales ;
- Humidité, précipitations et vent ;
- Comparaison des limites de confort et du climat ;
- Indicateurs : par combinaison des données des tables précédentes, classification de l'humidité ou de l'aridité pour chaque mois.

La deuxième partie porte sur les recommandations architecturales bioclimatiques à ressortir à partir de deux tables [69].

Indicateur						Recommandations
H1	H2	H3	H4	H5	H6	
						Plan masse 1. Orientation suivant un axe longitudinal E-O 2. Plan compact avec cour intérieure
						Espacements 3. Grands espacements entre les bâtiments 4. Idem avec protection contre le vent 5. Plan compact
						Circulation d'air 6. Circulation d'air permanente 7. Circulation d'air intermittente 8. Circulation d'air inutile
						Ouvertures 9. Grandes ouvertures des façades N et S 10. Très petites ouvertures (10-20%) 11. Ouvertures moyennes (20-40%)
						Murs 12. Murs légers 13. Murs massifs
						Toitures 14. Toitures légères et isolantes 15. Toitures lourdes
						Sommeil en plein air 16. Sommeil en plein air
						Protection contre la pluie 17. Protection contre la pluie

Figure 1.17 : Table de Mahoney pour la ville de Belém (Brésil) [70].

14. Conclusion

Ce chapitre abordant le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les bâtiments scolaires nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Les bâtiments anciens peuvent jouer un rôle important dans la démarche du développement durable à travers leur adaptation aux normes actuelles d'efficacité énergétique et de durabilité.
- Les pays européens sont généralement les plus intéressés à leur patrimoine architectural. Cela est dû non seulement à son importance culturelle (une partie de l'identité), mais aussi à son importance économique, comme le cas de l'Italie avec un chiffre d'affaires estimé à 136,1 milliards d'euros.
- Les bâtiments historiques datant du 19e au 20e siècle sont le plus souvent utilisés comme cas d'étude en raison de plusieurs facteurs, notamment l'accessibilité et la forte possibilité de mettre en œuvre les recommandations soulevées par ces études. Il y a donc concordance avec notre étude portant sur le patrimoine colonial des 19 et 20 siècles en Algérie.
- Les lieux de savoir sont moins analysés comparativement aux bâtiments résidentiels, et ceci représente une raison supplémentaire à sujet de recherche.
- Les chercheurs utilisent aujourd'hui des outils de recherche développés pour analyser en profondeur les bâtiments historiques, en l'occurrence la thermographie infrarouge pour détecter les ponts thermiques des enveloppes, et aussi la simulation numérique pour étudier les ambiances architecturales.
- De nos jours, la rénovation des écoles anciennes doit intégrer des mesures portant sur les économies d'énergie et l'amélioration de la qualité environnementale, à savoir les confort thermique, visuel, respiratoire et acoustique.
- L'Algérie doit améliorer le confort dans les bâtiments scolaires datant de l'époque coloniale, mais avant d'agir sur cette architecture particulière, une évaluation approfondie des confort notamment thermique et visuel, demeure cruciale pour suggérer les recommandations appropriées.
- Le modèle thermique adaptatif est plus approprié pour notre recherche, puisqu'il se caractérise par l'absence d'une climatisation centralisée.
- Les élèves passent une grande partie de leur temps dans les écoles. Il est donc important de garantir un bon confort thermique pour améliorer leur performance et préserver leur santé.

- Le confort thermique dépend de 6 critères : la température de l'air, la température des parois, l'humidité relative, la vitesse de l'air dans le local, le métabolisme de la personne et enfin son habillement.
- L'enquête in situ du confort thermique est principalement basée sur une évaluation quantitative à travers des campagnes de mesures, et une évaluation qualitative à travers des questionnaires.
- La moyenne de la température de l'air et la température des parois définit la température opérative, qui vise à exprimer la température ressentie de l'occupant.
- Selon ISO 7730 (2005), la plage de confort pour température opérative se situe entre 20-24 °C pendant la saison hivernale et entre 23-26 °C pendant la saison estivale.
- L'objectif des diagrammes bioclimatiques est de créer une zone de confort dans un bâtiment, en utilisant uniquement des stratégies d'architecture bioclimatique.

Première partie : Cadrage théorique

CHAPITRE 2

CONFORT VISUEL ET ÉCLAIRAGE NATUREL DANS LES BÂTIMENTS SCOLAIRES

1. Introduction

L'éclairage naturel est un facteur important dans la conception et la rénovation des bâtiments d'enseignement, car il contribue à créer un environnement intérieur confortable, favoriser des conditions saines et faire des économies d'énergie [71]. En effet, dans un tel environnement d'apprentissage, l'éclairage naturel devient primordial pour assurer le confort visuel, qui est aussi, à l'instar du confort thermique, un paramètre clé de la qualité environnementale dans les écoles.

Ce chapitre débute par mettre en évidence quelques notions théoriques sur le confort visuel, à l'instar de la définition de son concept, les différentes grandeurs photométriques et son impact en milieu scolaire, ainsi que les facteurs qui doivent être pris en compte pour assurer une bonne ambiance lumineuse dans une salle de classe. Ensuite, ce chapitre développe la méthodologie d'évaluation du confort visuel et la réglementation relative à l'éclairage dans les écoles. Finalement, ce chapitre s'achève par exposer les stratégies de l'amélioration et l'optimisation de l'éclairage naturel dans les salles de classe.

2. Définition du confort visuel

Le confort visuel est d'assurer des conditions lumineuses favorables à une vision sans fatigue [72] ni gêne lors de la présence dans un espace spécifique tel qu'un bureau, une salle de classe ou autres.

Une bonne ambiance lumineuse est une sensation de confort résultant de la vision nette des objets, caractérisée par une absence de fatigue et un rendu de couleur agréable.

Il existe d'autres définitions dans la littérature : le confort visuel signifie une impression subjective liée à la quantité, la qualité et la distribution et de la lumière [45].

3. Grandeurs photométriques

La **figure 2.1** présente les grandeurs photométriques fondamentales, qui sont le fondement de de toutes les mesures en éclairage :

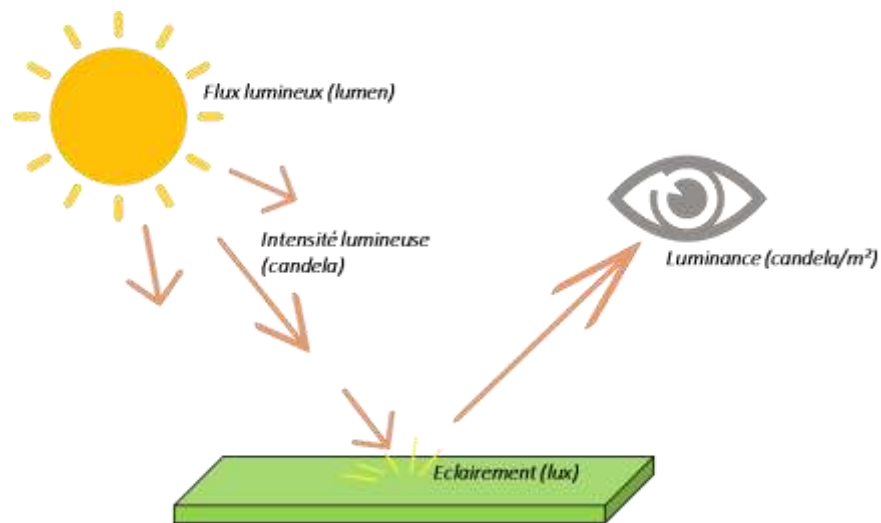


Figure 2.1 : Les grandeurs photométriques [73].

3.1. Flux lumineux (Lum)

Le flux lumineux s'exprime en lumen et s'agit du rayonnement émis par une source lumineuse dans toutes les directions. À l'inverse, l'intensité lumineuse, est émise dans une direction donnée, s'exprime en (candela, cd) et se définit comme étant le quotient du flux lumineux sur un stéradian (surface de 1 m^2 d'une sphère de 1 m de rayon).

L'efficacité lumineuse est aussi intimement liée au flux lumineux (son unité est le lumen par watt ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)). Elle se définit comme le rapport entre le flux lumineux et la puissance électrique consommée par une source lumineuse qui se mesure en watts. Le **tableau 2.1** présente les valeurs d'efficacité lumineuse des différents états du ciel.

Tableau 2.1 : Exemples de valeurs d'efficacité lumineuse [45].

<i>Sources lumineuses</i>	<i>Efficacité lumineuse (lm/W)</i>
Rayonnement solaire direct	52 à 97
Ciel couvert	110 à 140
Ciel clair (sans soleil)	125 à 155
Ciel clair avec soleil	105 à 115

3.2. Éclairement (Lux)

Cette grandeur photométrique se mesure en (Lux), l'équivalent à 1 Lm/m² — et se définit comme le flux lumineux provenant d'une source lumineuse qui tombe sur une surface. Le **tableau 2.2** montre des exemples de niveaux d'éclairement en fonction des états du ciel.

Tableau 2.2 : Exemples de valeurs d'éclairement [45] .

<i>Sources lumineuses</i>	<i>Eclairement (lx)</i>
Pleine lune	0.2
Ciel couvert	5000 à 20000
Ciel clair (sans soleil)	7000 à 24000
Plein soleil d'été	100000

3.3. Luminance (cd·m⁻²)

La luminance s'exprime en candelas par m² et correspond à la sensation visuelle d'un observateur vis-à-vis d'un flux lumineux quittant une surface. Une surface très lumineuse signifie une forte luminance, et inversement, une surface parfaitement noire aurait une luminance nulle. À l'inverse du flux lumineux et l'éclairement, la luminance est l'unique grandeur photométrique réellement perçue par l'œil humain. Des exemples de valeurs de luminances sont présentés dans le **tableau 2.3**.

Tableau 2.3 : Exemples de valeurs de luminance [45] .

<i>Environnement</i>	<i>Luminance (cd/m²)</i>
Paysage nocturne (limite de la visibilité)	10^{-3}
Paysage par pleine lune	10^{-2} à 10^{-1}
Papier noir mat éclairé par 100 lux	1,5
Parois intérieures éclairées	25 à 250
Papier blanc mat éclairé par 100 lux	30
Paysage par ciel couvert	300 à 5000
Paysage par ciel clair	500 à 25000
Lune	2500
Papier blanc au soleil	25000
Soleil	$1,5 \cdot 10^9$

4. Impact de la lumière naturelle en milieu scolaire

La prise en compte de l'éclairage naturel lors de la conception des bâtiments d'enseignement est très importante, puisque la lumière du jour a un impact positif sur la performance, le développement et la santé des élèves. L'inconfort visuel a des conséquences graves sur les occupants ; à savoir une fatigue visuelle et des maux de tête, ce qui conduit souvent à une perte d'attention de l'élève [72]. Les nombreuses recherches qui ont vu le jour ces dernières années ont mis l'accent sur la nécessité de promouvoir cet aspect dans les écoles pour non seulement assurer une bonne ambiance lumineuse, mais également pour faire des économies d'énergie.

La recherche de Michael et Heracleous et celle de Winterbottom et Wilkins [71, 74] ont démontré que le confort visuel dans les salles de classe était un facteur crucial pour l'apprentissage et l'amélioration du processus éducatif.

Plympton et al [75] ont présenté une étude sur quatre bâtiments scolaires choisis comme cas d'étude, qui ont été dotés de manière rentable d'un éclairage naturel. L'étude a révélé que les stratégies conceptuelles destinées à maximiser la lumière du jour dans les écoles n'ont pas entraîné une augmentation considérable des coûts par rapport aux écoles classiques. En plus, les élèves ont bénéficié d'une performance remarquable et jouissent d'un bon état de santé.

Heschong et al [76] ont mis en exergue la corrélation entre la présence de lumière du jour et la performance des élèves dans les bâtiments scolaires. Les chercheurs ont conclu que l'éclairage naturel améliore les performances des enfants. Par ailleurs, l'étude s'est soldée par dupliquer les résultats sur d'autres types de bâtiments, en l'occurrence, les performances des adultes dans les immeubles de bureaux.

Nicklas et Bailey [77] ont examiné la relation entre la disponibilité de la lumière du jour en classe et la performance des élèves des écoles primaires et secondaires en Caroline du Nord. Les résultats montrent que les élèves fréquentant des écoles éclairées naturellement dépassaient de 5 à 14 % ceux des écoles éclairées artificiellement. De plus, l'étude affirme que les écoles récemment construites ne disposant pas de la lumière du jour et du coup ne garantissent pas de meilleures performances scolaires.

Chung et Burnett [78] ont démontré que l'absence d'un niveau d'éclairage approprié avait causé des problèmes pour les occupants des bureaux et les empêche de remplir leurs activités quotidiennes de manière efficace et confortable.

Perez et Capeluto [79] ont présenté la consommation d'énergie qu'on pourrait réduire grâce à la prise en compte des considérations climatiques dans la conception des bâtiments scolaires dans un climat chaud et humide. L'étude affirme qu'une conception exoénergétique des écoles peut contribuer à des économies d'énergie substantielles et améliorer l'environnement d'apprentissage des élèves. En outre, l'étude met en exergue la réduction de la demande énergétique, qui résulte de la minimisation de l'utilisation de l'éclairage artificiel, et appelle à favoriser la prise de conscience énergétique et environnementale.

5. Critères du confort visuel

La **figure 2.2** présente les critères principaux du confort visuel [72], qu'il faut respecter pour assurer une ambiance lumineuse de qualité.

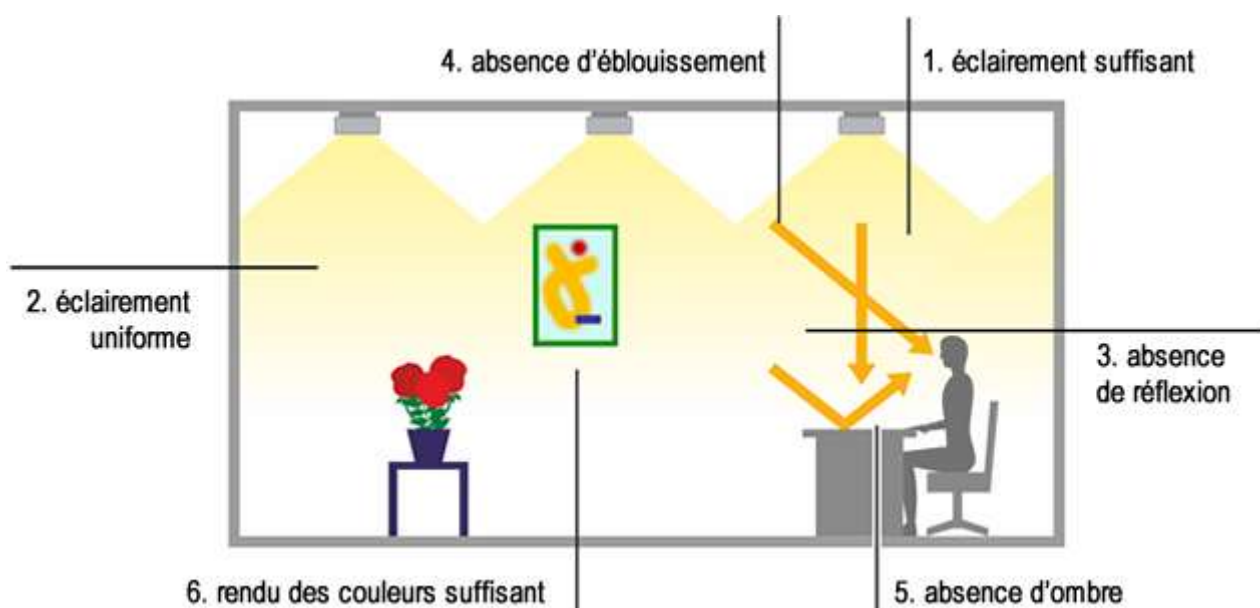


Figure 2.2 : Critères du confort visuel [62].

5.1. Éclairage suffisant et uniforme

L'éclairage est un paramètre crucial du confort visuel et son niveau doit être suffisant et conforme à l'activité exercée. Dans une salle de cours, il est primordial d'assurer un niveau de lux requis sur les bancs et le tableau. Cela permet de garantir aux élèves une bonne lecture et écriture (**figure 2.3**). De plus, une répartition harmonieuse de la lumière doit aussi être garantie pour éviter la fatigue visuelle.



Figure 2.3 : Importance d'un éclairage suffisant et uniforme pour faciliter l'écriture et la lecture sur le tableau [72].

5.2. Absence d'éblouissement

L'éblouissement se définit comme un trouble de vue provoqué en présence de lumière vive. Il est dû à une source lumineuse telle que la lumière du soleil (voir **figure 2.4**) ou un luminaire. Il cause énormément de gêne et fatigue visuelle aux élèves et provoque une situation inconfortable dans les salles de classe.



Figure 2.4 : Éblouissement provoqué par le rayonnement solaire direct [80].

5.3. Absence de réflexion

La réflexion est le retour de la lumière qui tombe sur un matériau, à savoir un mur ou une fenêtre. Elle est due principalement au soleil ou luminaire. Dans les salles de cours, ces réflexions causent de la perturbation, voire la fatigue visuelle aux élèves (voir **figure 2.5**).



Figure 2.5 : Réflexions du soleil sur le tableau blanc de la salle de classe.

5.4. Absence d'ombres gênantes

Dans les salles de classe, l'ombre gênante signifie la présence d'ombre sur les bancs des élèves ou sur le tableau, qui les empêche de faire leurs activités pédagogiques correctement telles que la lecture ou l'écriture (voir **figure 2.6**). Cela est dû principalement à la direction de la source lumineuse.



Figure 2.6 : L'écriture est perturbée par la présence d'ombres gênantes [62].

5.5. Rendu des couleurs suffisant

L'objectif de cet aspect est d'avoir un rendu des couleurs dans les salles de classes, qui se rapproche de celui de la lumière du jour (voir **figure 2.7**). Les couleurs sont importantes dans un milieu d'apprentissage, puisque elles permettent de fortifier la mémoire des apprenants, ainsi qu'augmenter leur concentration et leur stimulation.



Figure 2.7 : Importance de l'indice de rendu des couleurs (IRC) [81].

5.6. Absence de contrastes lumineux dans le champ visuel

Dans une salle de classe, le contraste signifie la différence de luminosité dans le champ visuel des élèves, ce qui crée des parties claires et sombres. Cela affecte grandement la concentration et la stimulation des élèves et leur provoque une fatigue visuelle due à la réadaptation constante de l'œil. Un exemple d'absence de contraste lumineux est illustré dans la **figure 2.8**.



Figure 2.8 : Absence de contrastes lumineux dans le champ visuel de l'élève [82].

6. Évaluation du confort visuel

6.1. Par enquête in situ

À l'instar du confort thermique, les études antérieures [83, 84] montrent que le confort visuel est évalué par des enquêtes objectives et subjectives, qui s'effectuent généralement en même temps. Ces enquêtes in situ sont menées en fonction des solstices et des équinoxes. Les classes sont souvent choisies comme espaces d'étude, vu leur occupation continue durant l'année scolaire et sont choisies par rapport à une batterie de critères, à savoir l'orientation et l'emplacement.

6.1.1. Évaluation objective (compagne de mesures)

Les études antérieures, à l'image d'Abdelatia [83], relèvent le protocole d'investigation du confort visuel dans les salles de cours. Les compagnes de mesures prennent en compte le paramètre quantitatif crucial de l'éclairage naturel, à savoir, l'éclairement. Celui-ci est mesuré au centre des tables d'élèves et du tableau.

6.1.2. Évaluation subjective (questionnaire)

Cette évaluation subjective accompagne l'évaluation quantitative et se fait par des questionnaires distribués auprès des occupants de l'espace. Les questions se penchent sur tous les paramètres du confort visuel (éclairage suffisant et uniforme, absence d'éblouissement absence de réflexion, absence d'ombres gênantes, rendu des couleurs suffisant, absence de contrastes lumineux dans le champ visuel).

6.2. Par simulation numérique

De nos jours, il existe plusieurs outils de simulation pour étudier l'éclairage naturel, à l'image d'Energyplus, Dialux. Ces outils sont utilisés en conception comme rénovation des écoles. Ils permettent de simuler la quantité de lumière naturelle dans une classe, dimensionner parfaitement les baies vitrées et vérifier l'éblouissement. Les objectifs de la simulation sont résumés ci-dessous [85]:

- Optimisation et validation de l'éclairage naturel ;
- Baisse des charges d'éclairage artificiel ;
- Optimisation du confort visuel.

Ces simulations se basant essentiellement sur deux grandeurs importantes du confort visuel, à savoir l'éclairage et le facteur de lumière du jour.

7. Éclairage naturel

L'ensoleillement et l'éclairage diffus sont considérés comme deux aspects fondamentaux de l'éclairage naturel. Ils ont une importance capitale en architecture, puisqu'ils permettent d'assurer le confort thermique et visuel pour les occupants du bâtiment [86].

7.1. L'ensoleillement

Il se définit comme la mesure du rayonnement solaire qui se projette sur une surface terrestre tout au long d'une période donnée. L'organisation météorologique mondiale recommande de l'exprimer en mégajoules par mètre carré, MJ/m² ou en watts-heures par mètre carré, Wh/m².

En architecture, il y a des considérations importantes vis-à-vis de l'ensoleillement où il est judicieux de la part des concepteurs d'étudier la course solaire, analyser comment la lumière naturelle va pénétrer dans des espaces intérieurs comme des bâtiments et aussi des espaces extérieurs comme des places publiques, étudier la durée d'exposition au rayonnement solaire de l'espace conçu, et étudier d'autres phénomènes tels que la protection solaire.

Par ailleurs, l'ensoleillement représente à la fois une source d'énergie et une source de lumière fondamentale (voir **figure 2.9**). D'où l'importance de tirer les bienfaits de ce facteur climatique à travers des techniques passives comme les ouvertures vitrées, ou par des techniques actives qui servent à produire de l'énergie. Il est judicieux également d'étudier l'ensoleillement pour protéger les bâtiments des surchauffes durant la saison d'été [62].

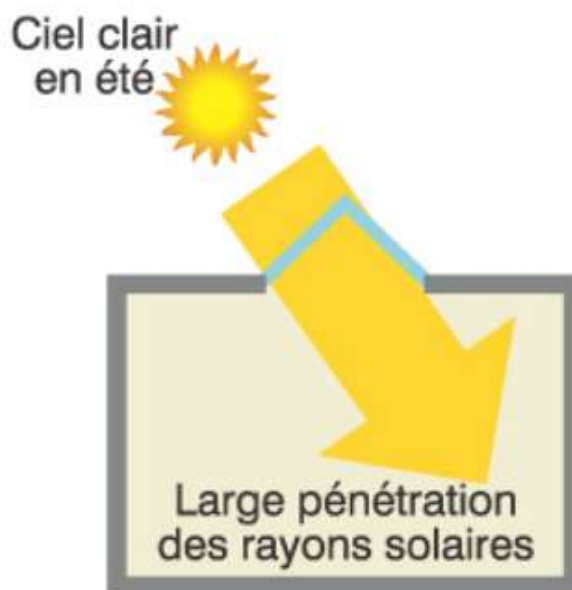


Figure 2.9 : Ouverture zénithale [62].

7.1.1. Équinoxes et solstices au cours d'une année

La course solaire est marquée par quatre positions clés au cours d'une année (voir **figure 2.10**), qui sont considérées comme références importantes pour faire le lien entre architecture et ensoleillement [87]:

- **Solstice d'hiver** correspondant au 21 décembre. C'est le moment de l'année où la durée de la nuit est maximum. Dans ce jour, les rayons solaires tombent

sur la terre avec un angle de déclinaison de $23^{\circ} 27'$. Ceci est considéré comme la valeur minimum de la déclinaison.

- **Équinoxe de printemps** correspondant au 21 mars. C'est le moment de l'année où la durée du jour est égale à celle de la nuit. Dans ce jour, le rayonnement solaire se trouve au niveau de l'équateur avec une déclinaison de 0° .
- **Solstice d'été** correspondant au 21 juin. C'est le moment de l'année où la durée du jour est maximum. Dans lequel, la position de la terre est opposée à celle du solstice d'hiver et le rayonnement solaire se projette sur l'hémisphère nord avec l'angle maximum de déclinaison de $23^{\circ} 27'$.
- **Équinoxe d'automne** correspondant au 22 septembre. Comme l'équinoxe de printemps, la durée du jour est en adéquation avec celle de la nuit.

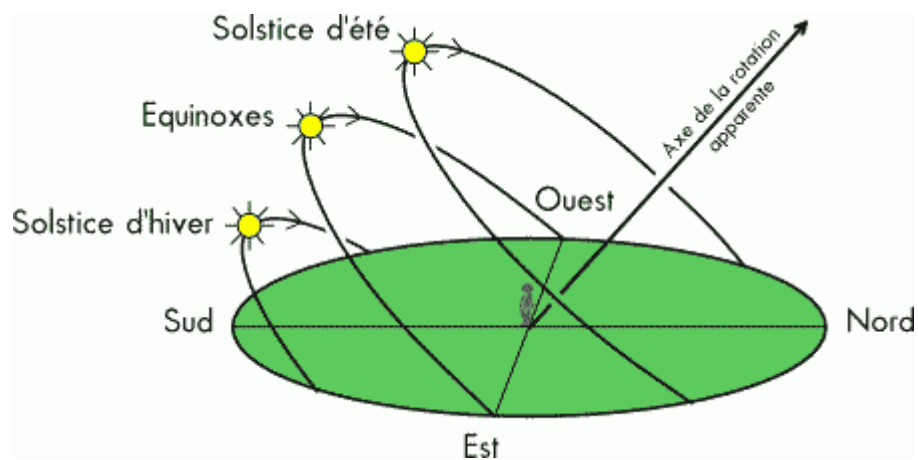


Figure 2.10 : Solstices et équinoxes au cours d'une année [88].

7.2. L'éclairage diffus

L'éclairage diffus est nuancé par la voûte céleste et sans rayonnement solaire direct (**figure 2.11**). Quelle que soit l'orientation, ce type d'éclairage permet d'avoir un éclairage extérieur plus homogène dans les espaces extérieurs. Il a aussi d'autres avantages comme éviter la présence des zones d'ombres gênantes dans les coins des locaux. Dans le cas d'éclairage diffus, la quantité de lumière naturelle dépend des éléments suivants :

- Conditions spatio-temporelles (latitude, jour, heure) ;
- Conditions météo ;
- Dimension et position des prises de jour ;
- Nature des matériaux de vitrage ;
- Orientation des ouvertures ;
- Existence de masques extérieurs ;
- Facteurs de réflexion des parois intérieures.

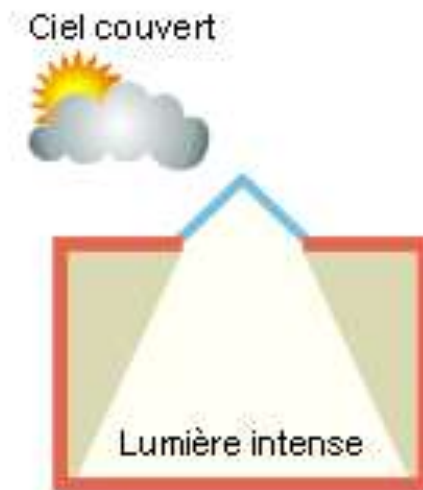


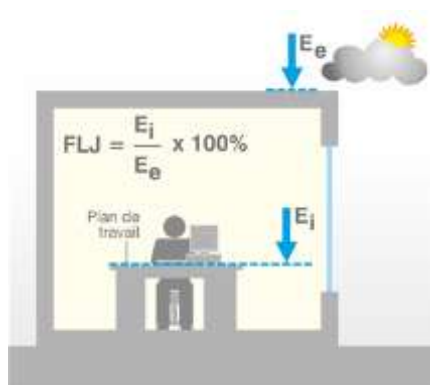
Figure 2.11 : Éclairage diffus par ciel couvert [62].

7.2.1. Facteur de lumière de jour (FLJ)

Le FLJ est le rapport entre l'éclairement intérieur tombé sur le plan de travail tel qu'une table d'élève et l'éclairement extérieur reçu sur une surface horizontale, par ciel couvert, en site parfaitement dégagé, tel que la cour de récréation (**voir figure 2.12**) [62].

Il y a différentes valeurs de FLJ minimum dites de référence, qui sont recommandées en fonction du type de bâtiment et son utilisation. Ces valeurs devraient être trouvées au fond des locaux :

- Usines : 5 %
- Bureau : 2 %
- Salles de cours : 2 %
- Salle d'hôpital : 1 %



• **Figure 2.12** : Le facteur de lumière de jour (FLJ) [62].

Le **tableau 2.4** présente les ambiances créées par les valeurs de facteur de lumière du jour » (FLJ).

Tableau 2.4 : Valeurs typiques et ambiances créées par le (FLJ) [62].

FLJ	- de 1 %	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12 %
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Élevé	Très élevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance environ 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			À proximité des fenêtres ou sous des lanterneaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone..... semble être séparée de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		
Confort de travail	non adapté pour un travail permanent		adapté à moins de 50 % des heures de travail		adapté à plus de 50 % des heures de travail, mais risques d'éblouissement	

7.2.2. Décomposition du facteur de lumière du jour

Les **figures 2.13** montrent que l'éclairement naturel est composé de la manière suivante [45]:

1 : la composante directe du ciel : il s'agit de l'éclairement provenant directement de la partie visible du ciel ;

2 : la composante réfléchie extérieure : c'est l'éclairement parvenant à l'intérieur de la classe par effet de réflexion sur les parois extérieures ;

3 : la composante réfléchie intérieure : cela désigne l'éclairement parvenant à un point considéré à la suite d'un effet de réflexion sur les surfaces intérieures.

La **figure 2.14** présente la variation du FLJ dans une salle de classe. Il apparait qu'il est mal réparti dans l'espace, maximal près de la fenêtre et minimal au fond du local. Pour le maximiser, il est judicieux de reconcevoir l'ouverture pour augmenter la composante du ciel, repenser l'état des matériaux des surfaces extérieures pour maximiser la composante réfléchie extérieure et idem pour les surfaces intérieures en vue d'augmenter la composante réfléchie intérieure.

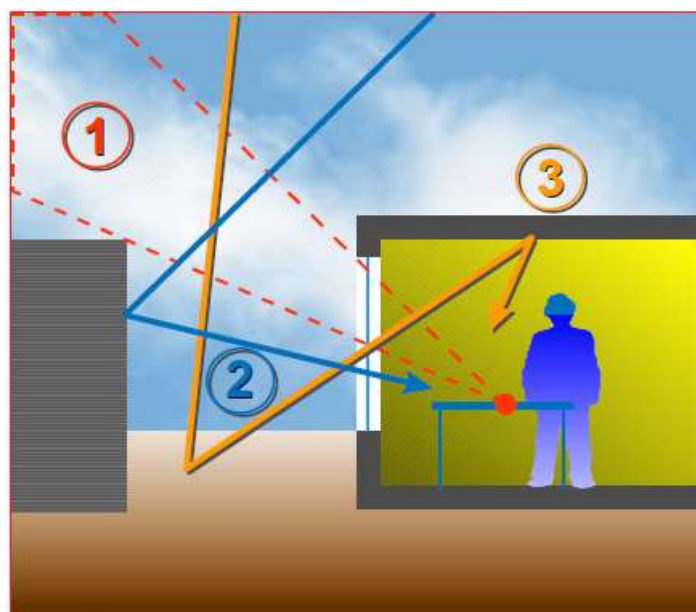


Figure 2.13 : Les trois composantes du FLJ [45].

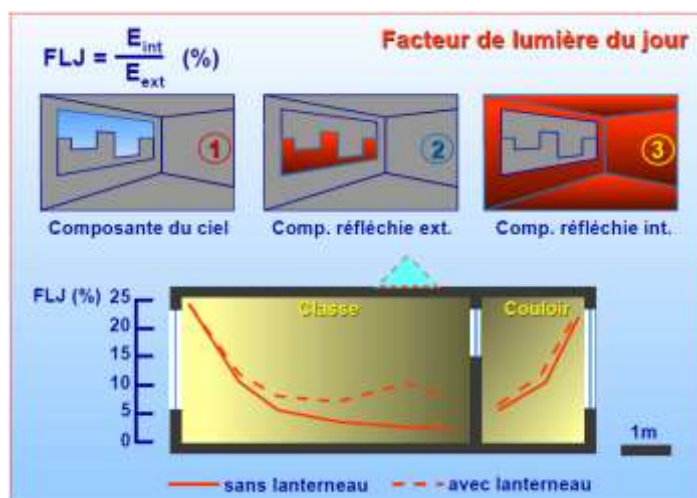


Figure 2.14 : Valeurs typiques du FLJ pour une salle de classe [45].

8. Stratégie de l'éclairage naturel

Cette stratégie permet d'optimiser la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments scolaires, réduire les dépenses d'éclairage artificiel et améliorer le confort visuel des élèves (**figure 2.15**). Son principe consiste tout d'abord à recueillir la lumière naturelle pour la faire pénétrer dans des salles de classe et la répartit ensuite parfaitement dans les espaces intérieurs. Ces dispositions doivent être accompagnées par un contrôle judicieux et une protection des inconvénients du rayonnement solaire direct [80].

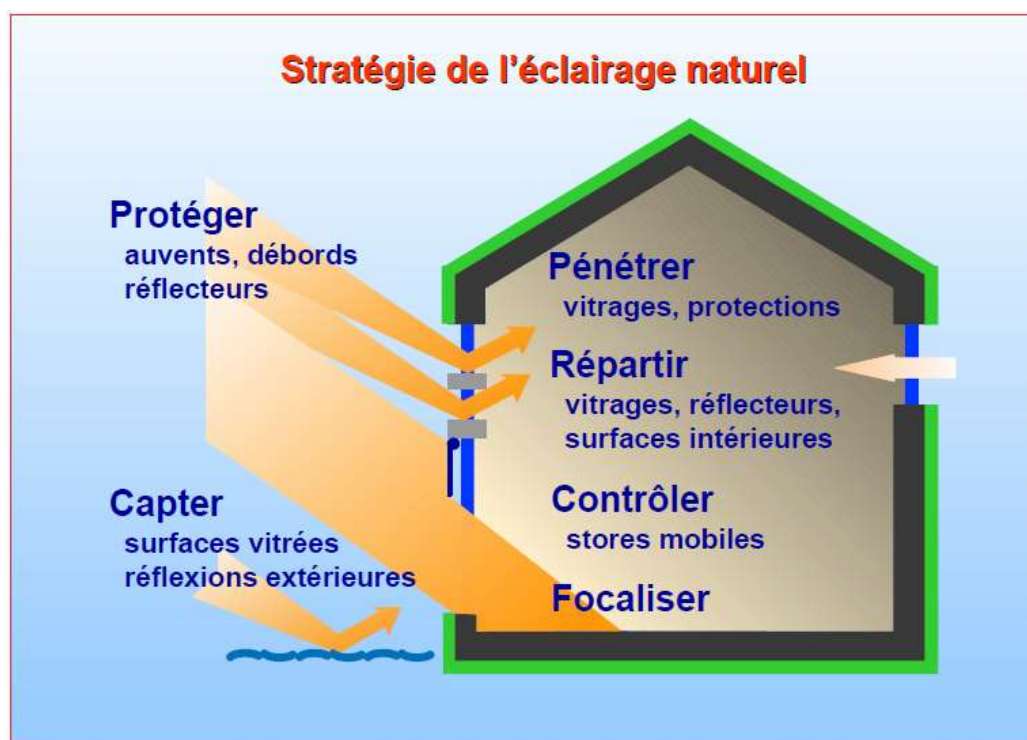


Figure 2.15 : Stratégie de l'éclairage naturel [45].

8.1. Capter

Cette stratégie cherche à recueillir la lumière naturelle pour la faire pénétrer à l'intérieur du bâtiment. Elle dépend des facteurs suivants :

8.1.1. Le type du ciel

Comme si bien expliqué précédemment, l'éclairage naturel est caractérisé par deux aspects qui donnent de la lumière solaire directe et la lumière diffuse du ciel. Pour lesquels, les stratégies doivent être en mesure de concevoir un espace

lumineux, quel que soit l'état du ciel. Le flux est plus considérable pour la lumière solaire directe et apparaît aisément captable et dirigeable. Cependant, cet ensoleillement présente quelques inconvénients sur la qualité visuelle, vu qu'il crée souvent de l'éblouissement et des zones de surchauffe. Tandis que la lumière diffuse du ciel est répartie équitablement dans tous les sens, créant peu d'éblouissement et de surchauffe. En revanche, elle procure parfois une quantité insuffisante d'éclairage.

8.1.2. Le moment de l'année

Le moment influence considérablement la lumière naturelle disponible à l'intérieur d'un local. Prenons par exemple, le cas d'une salle de cours, orientée en plein sud. Pendant l'hiver, le rayonnement solaire direct pénètre plus en profondeur dans le local, alors qu'il est beaucoup moins pénétrable pendant l'été. Cela est dû bien évidemment au rayonnement solaire, qui change sa déclinaison au cours de l'année.

8.1.3. L'heure

Quelle que soit la saison, l'intensité de l'éclairage naturel augmente depuis le début jusqu'à la mi-journée. Ensuite, elle se met à diminuer progressivement en allant vers le coucher de soleil. L'influence de l'heure est aussi remarquée par ciel clair, dans une salle de classe par exemple, l'éclairage est très variable au niveau des différents coins.

8.1.4. L'orientation de l'ouverture

La course solaire influence fortement l'organisation spatiale d'un bâtiment scolaire. Une salle de classe orientée au sud entraîne un éclairage important, cela est dû à la forte exposition au soleil. Par contre, une salle orientée au nord entraîne un éclairage moins important, vu sa faible exposition au soleil.

8.1.5. L'inclinaison de l'ouverture

Dans le cas d'un éclairage diffus, l'éclairage naturel est beaucoup plus important dans un local doté d'une ouverture zénithale que celui d'une ouverture verticale.

8.1.6. L'environnement

La conception d'un bâtiment scolaire est aussi régie par le respect de son environnement, puisque ce dernier a des influences énormes sur la disponibilité de lumière naturelle dans les espaces intérieurs. Pour capter davantage d'éclairage naturel, il est judicieux de prendre en compte les facteurs suivants :

- **Relief du terrain** : une bonne conception d'un bâtiment scolaire doit tenir compte de la forme de l'assiette foncière. Puisque ce dernier joue un rôle primordial d'empêcher ou de laisser passer le rayonnement solaire. Il est donc recommandé de tirer profil du terrain pour éclairer au maximum les espaces intérieurs du bâtiment.
- **Bâtiments avoisinants** : Durant l'hiver où le soleil est bas dans le ciel, les constructions voisines constituent parfois des masques solaires. Par conséquent, les ouvertures captent peu de lumière, et cela entraîne des dépenses énergétiques importantes dues à l'éclairage artificiel des espaces intérieurs sombres.
- **Végétation** : Le choix des arbres doit être judicieux pour bénéficier d'un confort thermique et visuel. Par exemple, les arbres à feuilles caduques ont une caractéristique intéressante. Pendant l'hiver, ils laissent passer le rayonnement solaire à l'intérieur d'une salle de cours orientée plein sud, tandis qu'ils l'empêchent pendant l'été. Cela procure plus de confort thermique pour les occupants du bâtiment.
- **Réflexion des surfaces extérieures** : Capter dépend de la qualité de réflexion des matériaux des constructions voisines. Si ces matériaux sont dotés d'une réflexion importante, ils vont contribuer à mieux capter la lumière naturelle à travers la réorientation du rayonnement solaire direct vers les prises de jour.
- **Des éléments liés au bâtiment lui-même** : L'emploi des protections solaires telles que des auvents ou light shelves doit faire l'objet de calculs précis. D'une part, elles limitent l'éblouissement, mais d'autre part, elles influencent fortement la quantité de lumière naturelle dans les espaces intérieurs. Il est

donc recommandé de bien calculer leur angle d'inclinaison avant de les mettre en place.

8.2. Transmettre

Cette stratégie consiste à faire pénétrer la lumière naturelle à l'intérieur d'un local. Elle est influencée par les caractéristiques de la fenêtre :

8.2.1. Inclinaison de l'ouverture

Il existe deux types d'ouverture, le premier est vertical, caractérise la plupart des bâtiments, sa mise en place facile et permet de donner une vue vers l'extérieur. Mais, ce type est moins performant en termes d'éclairage naturel. Le deuxième type est une ouverture en toiture, permet de faire pénétrer au maximum la lumière diffuse. En cas d'un ciel clair en hiver, elle limite les effets d'éblouissement. Mais, sa conception doit être rigoureuse pour éviter toute sorte de surchauffe pendant l'été.

8.2.2. Orientation de l'ouverture

L'orientation n'a pas d'importance sous un ciel couvert, puisque toutes les ouvertures captent la lumière naturelle diffuse de manière équitable. Mais, elle a un impact considérable sous un ciel clair, dans le sens où la fenêtre sud capte le maximum de lumière comparativement à l'orientation nord.

8.2.3. Configuration

Au centre, en haut ou en bas... la position de la fenêtre sur les parois a un impact sur la quantité d'éclairement à l'intérieur du local. Sa position par rapport la paroi compte aussi, notamment lorsqu'il y a un ébrasement permettant d'affaiblir le contraste entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

8.2.4. Dimensions de l'ouverture

Plus la surface de l'ouverture est grande, plus la quantité d'éclairement est importante au fond du local.

8.2.5. Châssis

Ce facteur influence aussi la pénétration de la lumière naturelle. En effet, une fenêtre dotée d'un châssis fixe fait entrer 80 % de la lumière, un châssis ouvrant 55 %, alors qu'un châssis ouvrant petits carreaux 45 %.

8.2.6. Forme

Qu'elle soit large, haute ou intermédiaire ou qu'elle soit basse, haute ou à mi-hauteur, ces détails relatifs à la forme influencent significativement la qualité et quantité de la lumière naturelle, notamment au fond du local.

8.2.7. Matériau de transmission

Chaque type de vitrage possède un facteur de transmission, le simple vitrage est de 0,9, le double vitrage est de 0,81 et le triple vitrage est de 0,6. On constate que, plus il est simple, plus la lumière naturelle pénètre à l'intérieur du local.

8.3. Distribuer

Cette stratégie consiste à véhiculer les rayons lumineux à l'intérieur du local en vue de créer une répartition harmonieuse. Elle est influencée par les facteurs suivants.

8.3.1. Le type de distribution lumineuse

Qu'il s'agisse d'un éclairage naturel direct, ou indirect. Il permet d'obtenir de distributions lumineuses différentes dans le local.

8.3.2. La répartition des ouvertures

L'emplacement des ouvertures sur les façades joue énormément sur la qualité de répartition de lumière naturelle à l'intérieur du local. En effet, une fenêtre verticale produit un éclairage excessif près de la baie vitrée et nettement moins au fond du local. En revanche, une ouverture en toiture est en mesure d'uniformiser l'éclairage.

8.3.3. L'agencement des parois intérieures

Pour une meilleure répartition de la lumière, il est recommandé que le rayonnement lumineux ne rencontre pas d'obstacles, causés par la répartition spatiale du local ou l'existence du mobilier.

8.3.4. Le matériau des surfaces du local

Ces surfaces doivent être revêtues par des revêtements, qui sont mats ou clairs. Ainsi, la lumière va se réfléchir sur l'ensemble des surfaces intérieures du local.

8.3.5. Les systèmes de distribution lumineuse

Il existe plusieurs systèmes pour mieux répartir la lumière naturelle à l'intérieur d'un local, comme le voilage, le conduit de lumière, vitrages à réorientation, les bandeaux lumineux (light shelves), les réflecteurs simples... etc.

8.4. Se protéger

Cette stratégie consiste à se protéger de la pénétration excessive de lumière naturelle à l'intérieur du local et les conséquences négatives qui peuvent en résulter, en l'occurrence, l'éblouissement et la fatigue visuelle (voir **figure 3.16**). Pour ce faire, il existe des protections solaires pour empêcher le rayonnement solaire excessif de provoquer un inconfort visuel chez les occupants de l'espace qu'on souhaite protéger. Deux catégories de protection solaire sont à soulever, la première catégorie est classée par rapport à la position de ces dispositifs au niveau du vitrage ; qu'ils soient intérieurs, en interface ou extérieurs. Tandis que, la deuxième est classée par rapport à la mobilité des dispositifs de protection (permanente, fixe ou mobile).



Figure 2.16 : Exemple de système de light shelves [89].

8.5. Contrôler

Sous tout type de ciel, cette stratégie consiste à mieux contrôler la qualité, la quantité, ainsi que la distribution de la lumière naturelle à l'intérieur du local (voir **figure 3.17**). Ce contrôle permet d'apporter un confort visuel et créer un environnement qui répond de manière optimale aux besoins de ses utilisateurs. Ceci est rendu possible à travers des solutions différentes :

- L'utilisation de systèmes d'éclairage naturel adaptables, comme des éléments de contrôle amovibles.
- Le zonage des lampes en fonction de la lumière naturelle disponible dans le local.
- La régulation du flux des lampes en fonction de la présence de lumière naturelle.
- La commande d'éclairage automatique comme les détecteurs de présence et de mouvement.
- La sensibilisation des occupants vis-à-vis de la question énergétique et environnementale.

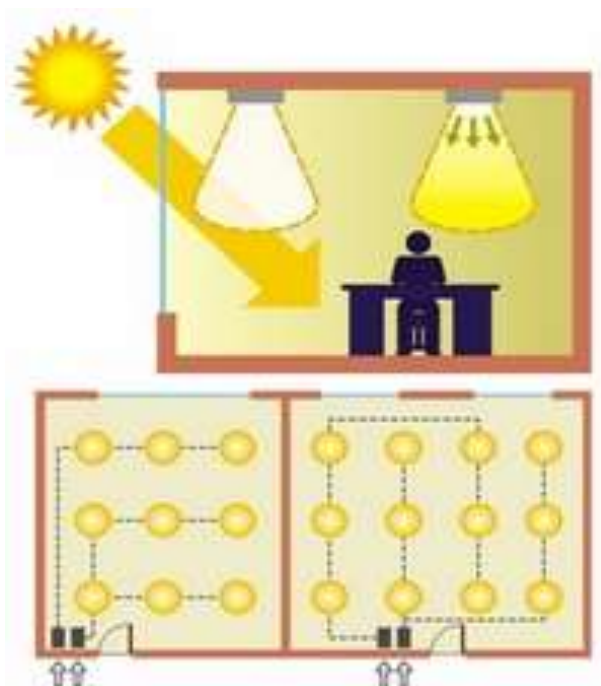


Figure 2.17 : Exemple de zonage des lampes [62].

9. Éclairage artificiel comme complément à l'éclairage naturel

9.1. Éclairage artificiel

Parfois, l'éclairage naturel est insuffisant pour assurer le confort visuel dans les salles de classe, en raison principalement des conditions climatiques défavorables comme ciel couvert. Le recours à l'éclairage artificiel devient donc nécessaire. Mais, il faut faire preuve de beaucoup de bon sens dans le choix de multiples types d'éclairage, qui existent sur le marché. C'est-à-dire, des installations d'éclairage qui associent confort visuel et économies d'énergie.

9.2. Différents types de lampes

De nos jours, il existe plusieurs types d'ampoules sur le marché. Elles sont choisies en fonction de critères multiples, à savoir le flux lumineux, la puissance, la température de couleurs, le rendu des couleurs, le flux lumineux, l'efficacité lumineuse, la durée de vie et l'étiquette énergétique. Ci-dessous sont présentées les ampoules les plus connues [90].

- **Ampoule à incandescence**

L'ampoule à incandescence a été inventée en 1878 par Thomas Edison (voir **figure 2.18**). Elle est très connue et destinée notamment à l'usage domestique. Son principe de production de lumière consiste à faire chauffer le filament du tungstène qui se trouve à l'intérieur. Cette vieille technologie est peu économique et énergivore. 95 % de l'énergie consommée par l'ampoule est transformée en chaleur. Seulement (5 %) de lumière est transformée en lumière. Son efficacité lumineuse est aussi minime par rapport aux autres lampes (8 et 15 lumens par Watt). Sa durée de vie arrive en général à 1000 heures. Cependant, son avantage réside dans l'indice de rendu des couleurs (100 %).



Figure 2.18 : Exemple d'une ampoule à incandescence [91].

- **Ampoule halogène**

À l'encontre de l'ampoule incandescence, le filament de l'ampoule halogène est placé dans un gaz halogène et se caractérise aussi par son rapprochement du verre de la lampe (voir **figure 2.19**). Son rendement est aussi meilleur (16-20 Lm/w). Quant à sa durée de vie, varie de 2000 à 5000 heures. Elle permet par ailleurs de donner un indice de rendu de couleurs excellent.



Figure 2.19 : Exemple d'une ampoule halogène [92].

- **Ampoule fluo compacte**

Les ampoules fluo compactes sont des lampes fluorescentes compactes (voir **figure 2.20**). Elles sont utilisées beaucoup plus dans le secteur résidentiel comme est une alternative aux ampoules à incandescence. Elles sont très avantageuses, avec une efficacité lumineuse de l'ordre de 30 à 70 lumens/Watt et une durée de vie entre 6000 et 15 000 heures.



Figure 2.20 : Exemple d'une ampoule fluo compacte spirale [93].

- **Lampes à LED**

Les lampes électroluminescentes, communément appelées LED (abréviation de l'anglais Light-Emitting Diode) sont des lampes électriques qui consomment très peu d'électricité (voir **figure 2.21**). À l'instar des lampes fluo compactes, les LED ont une très bonne efficacité lumineuse (20/70 lumens/Watt). Elles ne chauffent presque pas et ont une très longue durée de vie, de l'ordre de (50 000 à 100 000 heures).



Figure 2.21 : Exemple d'une lampe LED [62].

10. Réglementation de l'éclairage dans les bâtiments scolaires

Le **tableau 2.5** met en exergue les niveaux d'éclairage à respecter dans les différents espaces d'un bâtiment scolaire. Ces valeurs sont prises par rapport à la norme de construction relative à l'éclairage, en l'occurrence NBN EN 12464-1. Prenons, par exemple une salle de classe. Le niveau d'éclairage moyen à respecter au niveau de la tâche est de 300 lux. Cette dernière devrait être mesurée à 0,85 m du sol (hauteur moyenne d'une table d'élève). La valeur limite de l'UGR est de 19. L'uniformité d'éclairage à maintenir est de 0,6. L'indice du rendu des couleurs des lampes devrait être à l'ordre de 80 %. En outre, dans ces espaces d'apprentissage, il est recommandé d'assurer un contrôle judicieux pour répondre aux besoins des élèves en termes d'éclairage, dans les différentes conditions climatiques.

Tableau 2.5 : Niveau d'éclairage à respecter pour les différents espaces d'un bâtiment scolaire [62].

Type d'intérieur, tâche ou activité	Em (lux) niveau d'éclairage moyen	UGR Le taux d'éblouissement d'inconfort	Uo l'uniformité d'éclairage	Ra l'indice du rendu des couleurs	Remarques	Plan de référence
Salle de classe en primaire et secondaire	300	19	0,60	80	un contrôle de l'éclairage est recommandé	
Salle de classe pour les cours du soir et enseignement aux adultes	500	19	0,60	80	un contrôle de l'éclairage est recommandé	0.85 m du sol par défaut.
Auditorium, salle de conférence	500	19	0,60	80	un contrôle de l'éclairage est recommandé	
Tableau noir, vert et blanc	500	19	0,70	80	1. éviter les réflexes spéculaires	Le plan vertical du tableau.

					2. un éclairage vertical convenable est recommandé pour l'enseignant/présentateur	
Table de démonstration	500	19	0,70	80	Pour les salles de conférence 750 lux	
Salle d'art	500	19	0,60	80	–	
Salle d'art dans les Écoles des Beaux-Arts	750	19	0,70	80	5000 K ≤ T _{cp} ≤ 6500 K	
Salle de dessin industriel	750	16	0,70	80	–	
Salle de travaux pratiques et laboratoire	500	19	0,60	80	–	0.85 m du sol par défaut.
Salle de travail manuel	500	19	0,60	80	–	
Atelier d'enseignement	500	19	0,60	80	–	
Salle de pratique musicale	300	19	0,60	80	–	
Salle de pratique informatique	300	19	0,60	80	–	
Laboratoire de langues	300	19	0,60	80	–	
Atelier et salle de préparation	500	22	0,60	80	–	
Hall d'entrée	200	22	0,40	80	–	
Zones de circulation et couloirs	100	25	0,40	80	–	0.1 m du sol.

Escaliers	150	25	0,40	80	–	
Salle commune pour étudiants et salle de réunion	200	22	0,40	80	–	0.85 m du sol par défaut.
Salles des professeurs	300	19	0,60	80	–	
Bibliothèque : rayonnages	200	19	0,60	80	–	Plans verticaux des rayonnages.
Bibliothèque : salle de lecture	500	19	0,60	80	–	0.85 m du sol par défaut.
Réserves pour le matériel des professeurs	100	25	0,40	80	–	–
Hall de sport, gymnases et piscines	300	22	0,60	80	voir EN 12193	0.1 m du sol.
Cantine scolaire	200	22	0,40	80	–	0.85 m du sol par défaut.
Cuisine	500	22	0,60	80	–	

11. Conclusion

En guise de synthèse à ce chapitre qui a abordé le confort visuel dans les bâtiments scolaires et qui nous a donné la possibilité d'en tirer les conclusions ci-dessous :

- Des facteurs fondamentaux doivent être présents dans une salle de classe pour assurer une bonne ambiance lumineuse aux occupants. Il s'agit principalement du niveau lumineux de la tâche visuelle et son uniformité, l'absence d'éblouissement, l'absence de réflexions, l'absence d'ombres gênantes, le rendu des couleurs suffisant, et l'absence de contrastes lumineux dans le champ visuel ;
- L'optimisation de lumière naturelle dans les salles de classe permet à la fois d'améliorer le confort visuel des occupants, garantir leur bon apprentissage

et leur bonne santé. Et aussi, réduire les dépenses énergétiques en termes d'électricité ;

- Le confort visuel est évalué principalement, par le biais de trois moyens ; évaluation objective basée sur des campagnes de mesures de l'éclairage naturel ; évaluation subjective basée sur des questionnaires distribués auprès des usagers de l'espace, et une évaluation numérique à travers des simulations ;
- Pour optimiser et améliorer la lumière naturelle à l'intérieur d'une salle de classe, il est recommandé de recourir à la stratégie de l'éclairage naturelle, qui vise à mieux capter, distribuer, répartir la lumière dans tous les points de la classe. D'autant plus, cette stratégie a pour objectif de mieux s'en protéger pour limiter l'éblouissement et le contraste et aussi la contrôler à travers des dispositifs permanents, fixes ou mobiles.
- L'éclairage artificiel doit être considéré comme complément à l'éclairage naturel et les ampoules de technologie plus récente à l'image des LED se présentent comme une très bonne alternative pour réduire la consommation énergétique et améliorer le confort visuel des occupants des salles de classe.

Première partie : Cadrage théorique

CHAPITRE 3

CAS D'ÉTUDE

1. Introduction

Ce chapitre présente tout d'abord la zone d'étude de Miliana, à savoir sa situation géographique, sa morphologie urbaine, ses conditions climatiques, ainsi que les caractéristiques de la ville sur le plan urbanistique et architectural. Ensuite, le chapitre met en exergue une analyse bioclimatique de la zone d'étude. Cette analyse est basée sur les diagrammes bioclimatiques, en vue de faire ressortir des recommandations conceptuelles propres à la ville cas d'étude et qui sont en mesure de concevoir un bâtiment scolaire adapté à son micro climat. Puis, le chapitre met en évidence l'enquête de terrain sur les anciennes écoles des 19e et 20e siècles à Miliana, ayant pour objectif de constituer un corpus d'étude, ainsi que la proposition des critères appropriés pour choisir les bâtiments scolaires cas d'étude. Ces derniers seront étudiés en détail pour faire le point sur leurs caractéristiques architecturales et constructives.

2. Présentation de la zone d'étude de Miliana

2.1. Situation et morphologie urbaine

Miliana est une petite ville algérienne (40 km²) située au nord d'Algérie (voir **figure 3.1**) et fait partie de la wilaya d'Aïn Defla. Elle est distante de la capitale Alger d'environ 120 km. Cette vieille ville historique se trouve perchée sur les contreforts du mont Zaccar, qui domine la vallée du Chélif. Les communes limitrophes de Miliana sont ; la commune de Aïn Torki à l'est, la commune Ben Allal à l'ouest, et Khemis Miliana côté sud (**voir figure 3.2**).



Figure 3.1 : Géolocalisation de Miliana en Algérie [94].



Figure 3.2 : Localisation de Miliana dans la wilaya d'Ain Defla [94].

Comme le montre la **figure 3.3**, la ville de Miliana est située sur un terrain en pente donnant sur la vallée du Chélif. Le site d'implantation est rocheux et se situe à 740 mètres d'altitude.



Figure 3.3 : Situation de la ville perchée sur les contreforts du mont Zaccar [95].

2.2. Choix de la ville et Aperçu historique

2.2.1. Critères de choix de la ville

Le choix de la ville de Miliana était basé sur les raisons suivantes :

- C'est une petite ville dotée d'une densité importante en termes de lieux de savoir. A l'époque, la moitié de la ville était occupée par une caserne, alors que l'autre moitié disposait de 8 écoles, qui accueillait les élèves des villes limitrophes.
- Accessibilité facile à la ville pendant l'investigation sur terrain.

2.2.2. Aperçu historique de la ville

- **Époque antique**

Selon les historiens, Miliana est considérée comme l'une des vieilles villes en Algérie. Sa fondation remontrait à l'époque romaine où régnait l'empereur Octave, qui l'aurait édifée entre 27 et 25 av. J.-C, sous le nom de « Zuccabar ». La ville fut une garnison romaine, vu sa situation stratégique sur une plate-forme rocheuse, dominant la vallée du Chélif et aussi la protection naturelle assurée du côté nord par le mont Zaccar. Cela lui aurait confiée le statut d'être l'une des grandes cités de la province de Maurétanie Césarienne et siège d'un évêché. Vers le cinquième siècle, la ville antique aurait été détruite suite à l'évasion des Vandales [94]. Pratiquement, la plupart de ses monuments antiques auraient été détruits à l'exception de quelques témoins qui subsistent de nos jours tels que les remparts qui faisaient le tour de la ville (**voir figure 3.4**).



Figure 3.4 : Remparts de la ville de Miliana [96].

- **Époque arabo-musulmane**

Entre 972 et 980, la ville de Miliana aurait été reconstruite sur les ruines roumaines par le ziride Bologhine ibn Ziri, qui aurait édifié les villes Alger et Médéa. Par la suite, l'antique Miliana était le foyer de nombreuses époques, qui se sont succédé dans cet endroit stratégique, allant des Almoravides jusqu'aux zianides. En 1517, Arudj Barberousse occupe la ville antique, et marque le début du nouveau règne des ottomans [94].

- **Époque coloniale française**

L'Émir Abdelkader savait que la position stratégique de la ville antique aurait sûrement attiré l'attention de la nouvelle colonisation française, installée à Alger à partir de 1830. Alors, il s'est mis à élaborer ses plans pour contrer une évasion éventuelle, en préparant l'armée, la population, et en édifiant quelques ouvrages militaires, qui sont en mesure de lui alimenter en armes pour faire face aux troupes françaises, où il aurait construit par exemple la manufacture d'armes qui reste intacte jusqu'à nos jours (**voir figure 3.5**). Cependant, et après une résistance farouche, la ville antique s'est fait emparée par les Français le 08 juin 1840 [94].



Figure 3.5 : La Manufacture d'armes de l'Émir Abdelkader [97].

3. Conditions climatiques de Miliana

3.1. Température et humidité

Miliana est caractérisée par un climat méditerranéen, de type Csa (selon la classification de Köppen-Geiger), chaud en été et relativement froid en hiver. Sur

l'année, la ville antique enregistre une température moyenne de 12,4 °C, alors que les précipitations sont en moyenne de 938 mm par an [98].

Les **figures 3.6 et 3.7** présentent les données climatiques de la ville de Miliana, pour la période s'écoulant de 2007 à 2016. On constate que juillet est le mois le plus chaud de l'année. Les températures de l'air varient de 22,39 à 35,21 °C à cette période, correspondant aux taux d'humidité relative de 65,2 et 25,5 %, respectivement. Le mois le plus froid de l'année est celui de février avec des températures variant de 6 à 13,15 °C.

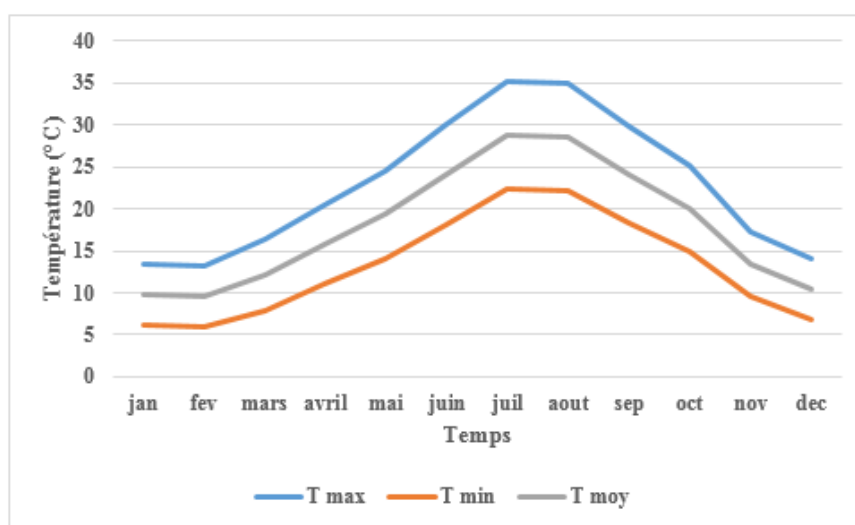


Figure 3.6 : Variation de la température à la ville de Miliana, période 2007 à 2016 [98].

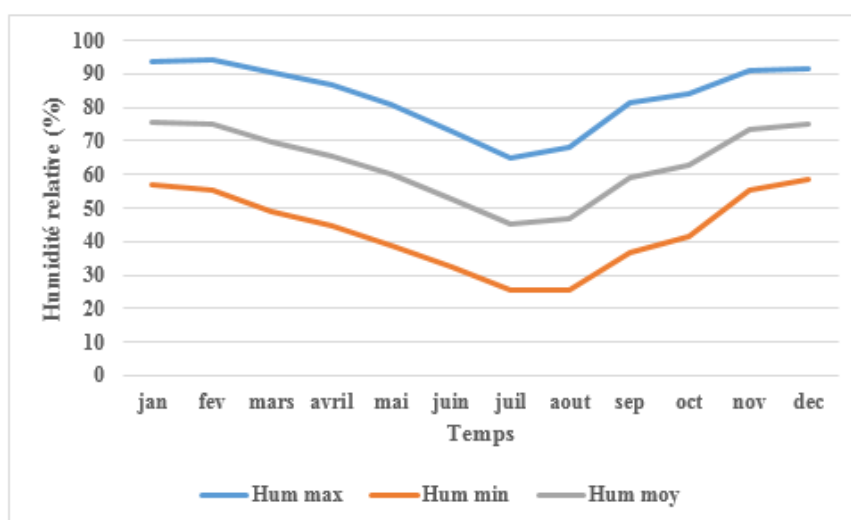


Figure 3.7 : Variation du taux d'humidité relative à la ville de Miliana, période 2007 à 2016 [98].

3.2. Vents

La **figure 3.8** présente la vitesse moyenne du vent (km/h) à la ville de Miliana, en 2018. Il convient de constater que les vents les plus faibles soufflent pendant l'hiver, notamment en décembre avec une moyenne de 4,6 km/h. Ceux de l'automne sont moins forts, de l'ordre de 8 km/h en octobre. Alors que, les vents les plus forts sont enregistrés au printemps, caractérisés par une vitesse dépassant les 12 km/h notamment en avril.

En termes de fréquence, il convient de dire que les vents dominants soufflent du côté ouest et nord-ouest. Cette direction est influencée beaucoup plus par la plaine de Chélif, qui constitue un couloir favorisant l'écoulement de ces vents. Côté sud, la ville est aussi exposée au « sirocco », un vent saharien violent, très sec et très chaud, qui souffle fortement sur Miliana en raison de la présence d'escarpement.

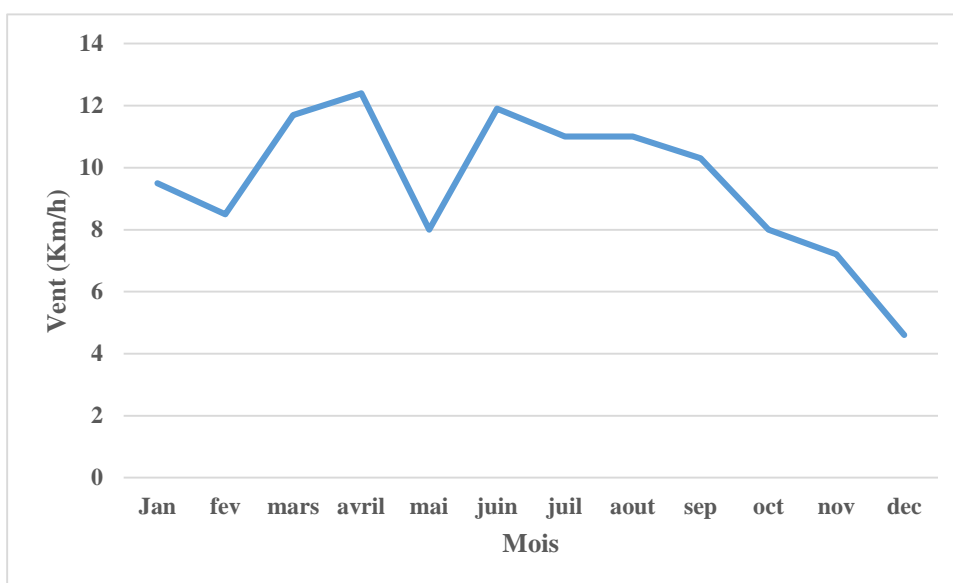


Figure 3.8 : Vitesse moyenne du vent (km/h) à la ville de Miliana, période 2018 [98].

3.3. Précipitations

La **figure 3.9** présente les précipitations totales annuelles de pluie et de neige fondue (mm). Le moins le plus humide est celui de janvier avec 115 mm, alors que le mois le plus sec est celui de juillet enregistrant un niveau de 3 mm. L'écart est significatif entre l'hiver et l'été, atteignant les 112 mm. Vu son altitude dépassant

les 700 m par rapport au niveau de mer, Miliana est caractérisée par des chutes de neige de 6 jours par an.

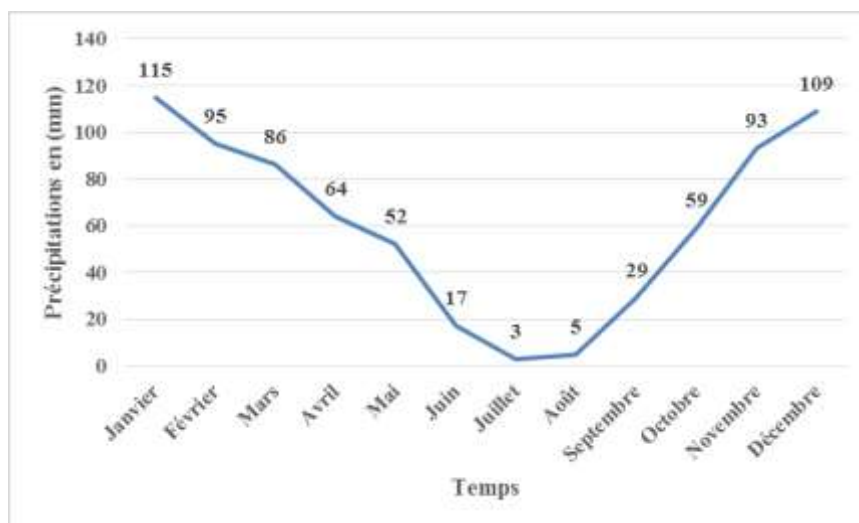


Figure 3.9 : La différence de précipitations entre les mois [99].

4. Architecture coloniale à Miliana

4.1. À l'échelle urbanistique

La croissance de Miliana durant l'époque coloniale française est passée par trois étapes s'étendant de 1840 jusqu'en 1962 (voir **figure 3.10**). La première phase s'écoule de 1840 jusqu'en 1844 et se caractérise par une superposition de la ville coloniale sur la ville construite durant la période arabo musulmane. Cela s'est traduit tout d'abord par la mise en place d'un modèle propre aux villes coloniales fondées au XIXe siècle, s'agissant du modèle « en échiquier », servant à des fins militaires. Dans le cas de Miliana, cette structure urbaine dotée de rues rectilignes, tracé orthogonal et rues plus larges, a été placée sur la structure urbaine dite « arborescente » caractérisée d'impasses et de ruelles étroites. En outre, il y a eu le percement de deux axes majeurs, à savoir la rue « Saint-Paul » et la rue « saint Jean ». Ces deux axes sont considérés comme éléments de permanence de cette structure urbaine. Par ailleurs, la transformation a touché des symboles de la religion islamique, en l'occurrence la démolition de la mosquée EL BATHA, à l'exception de son minaret pour en faire une horloge qui subsiste jusqu'à nos jours.

La deuxième phase s'écoulant de 1844 jusqu'en 1920 était marquée par une extension vers l'ouest, à travers la création d'une zone militaire et la réalisation des équipements recevant du public, à l'instar de la première école normale d'institutrices en Algérie en 1874. La troisième extension était dans le sens du nord dans la période qui s'écoule de 1920 jusqu'en 1962 et s'est marquée principalement par la création du Jardin botanique [100].



Figure 3.10 : Centre historique de Miliana.

4.2. À l'échelle architecturale

Le noyau historique de Miliana est dense par rapport aux zones périphériques et se distingue par l'existence de deux architectures différentes. Ces dernières résultent de la succession des époques sur cette ville millénaire. Il s'agit d'une part, d'une architecture d'origine arabo musulmane et d'autre part, une architecture coloniale occidentale. La **figure 3.11** met en évidence l'ancienne demeure de l'émir Abdelkader de style mauresque, construite pendant la période turque. Alors que, la **figure 3.12** représente un édifice de style néo-classique construit durant la période coloniale française. Les édifices mineurs comme les

maisons sont dotés généralement de deux niveaux. Alors que, les édifices majeurs comme les écoles varient de deux à trois niveaux.



Figure 3.11 : Ancienne demeure de l'Émir Abdelkader [101].



Figure 3.12 : Ancienne école à Miliana [102].

5. Analyse bioclimatique de la ville de Miliana

5.1. Diagramme de Givoni

La **figure 3.13** présente le diagramme de Givoni, qui est tracé sur la base des données climatiques de la ville de Miliana pour la période s'écoulant de 2007 jusqu'en 2016. Il faudrait préciser qu'on a pris en considération la durée de l'année scolaire en Algérie, qui commence en septembre et s'achève souvent en mai. Il

convient de dire également que les bâtiments scolaires sont occupés en journée (de 8 à 17 h). On voit sur le diagramme trois situations thermo hygrométriques.

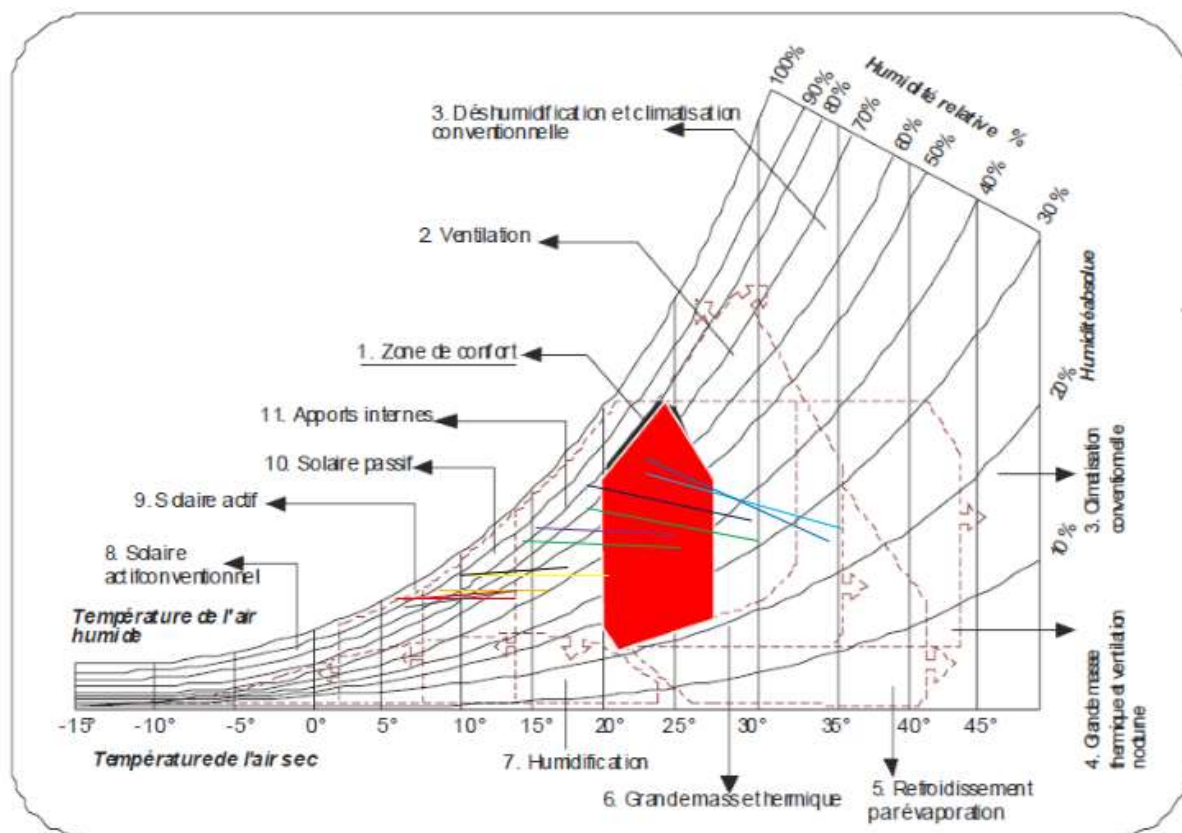


Figure 3.13 : Diagramme bioclimatique avec les profils thermo-hygrométriques pour la ville de Miliana.

5.1.1. Zone de confort

La zone de confort se trouve au centre du diagramme (voir couleur rouge). Dans laquelle, les occupants des bâtiments scolaires peuvent s'adapter à leur environnement thermique en recourant à une dépense énergétique minimale. Les valeurs de température de cette zone varient entre 20 et 27 °C et l'humidité relative entre 20-80 % [65]. Cette zone correspond aux jours de mai et octobre.

5.1.2. Zone de sous-chauffe

La zone de sous-chauffe se trouve à gauche de la zone de confort et met en exergue des stratégies à utiliser dans la période hivernale, pour augmenter les températures basses et les rapprocher de la zone de confort.

- **Gains internes**

Les apports internes suffisent pour assurer le confort thermique dans les jours de mars, avril, et novembre. Ces rapports hissent la température et la déplacent vers la zone de confort. Cette stratégie est requise pour des valeurs de température qui varient entre 13,5 °C et 20 °C [65]. Différents processus sont susceptibles de générer de la chaleur, à savoir les occupants de l'espace (comme le montre la **figure 3.14**), l'éclairage artificiel, les équipements... etc.



Figure 3.14 : Les gains internes des occupants du bâtiment scolaire [103].

- **Chauffage solaire passif**

Le chauffage solaire passif correspond aux mois de décembre, janvier et février. Ce concept passif comprend les techniques conceptuelles liées à l'enveloppe du bâtiment, et requises pour des températures comprises entre 7 °C et 13,5 °C [65]. L'idée est d'opter pour des concepts qui favorisent le captage de l'énergie solaire, tels que les grands vitrages côté sud. La **figure 3.15** propose un exemple de chauffage solaire passif, qui permet de capter le rayonnement solaire pendant la saison d'hiver et d'en protéger pendant l'été.

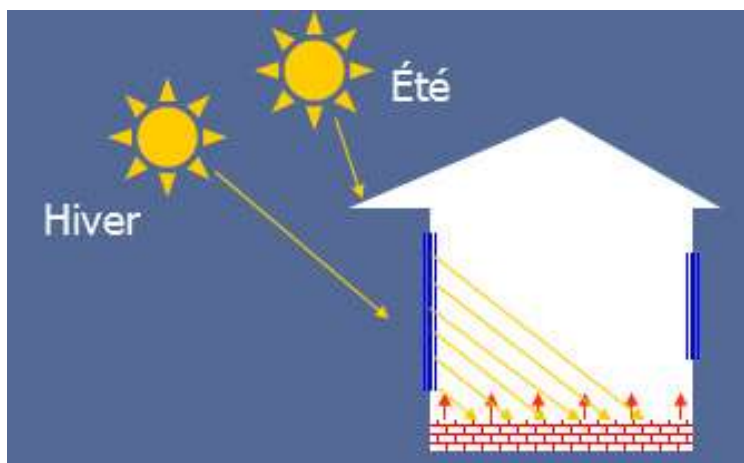


Figure 3.15 : Illustration du chauffage solaire passif [104].

5.1.3. Zone de surchauffe

Sur l'année scolaire, il convient de constater qu'il y a un souci de surchauffe en mois de septembre. Les stratégies citées ci-dessous sont destinées à atténuer les températures intérieures et les faire baisser par rapport aux températures élevées régnant à l'extérieur du bâtiment.

Dispositifs d'ombrage

Le recours à une protection solaire est recommandé pour des niveaux de température dépassant les 20 °C [65]. L'objectif fondamental de cette stratégie bioclimatique est d'éviter le rayonnement solaire excessif durant la saison estivale, pour que la température ne se déplace pas de la zone de confort (20-27 °C). Cette protection solaire est intégrée à l'enveloppe du bâtiment notamment au niveau des fenêtres comme des éléments architecturaux tels que des pergolas ...etc. Elle peut être détachée comme des arbres à feuilles caduques (voir **figure 3.16**).

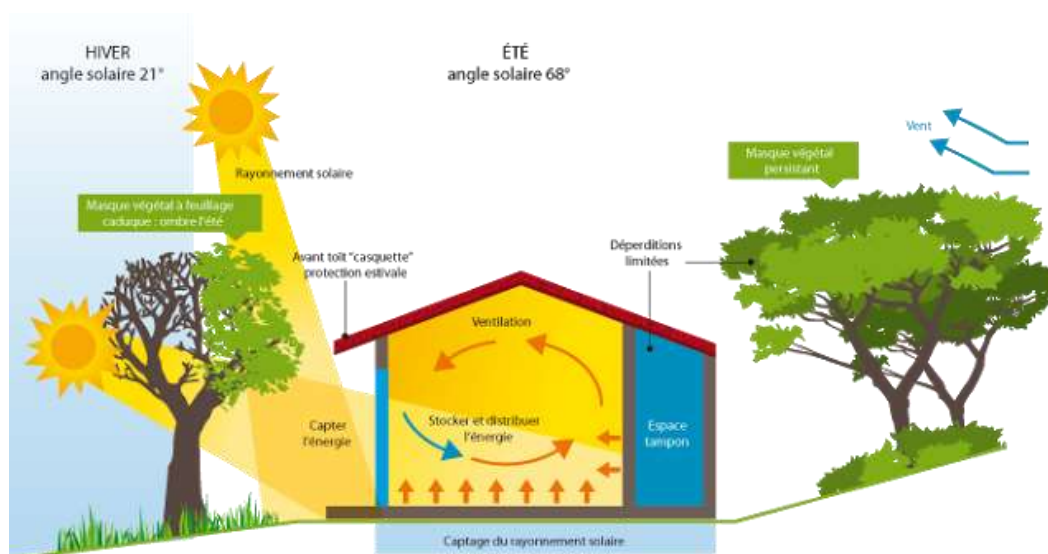


Figure 3.16 : Protection solaire bioclimatique [105].

Grande masse thermique

La grande masse thermique d'un bâtiment est la capacité de ses parois extérieures de résister lors des hausses de températures pour maintenir une température constante dans les espaces intérieurs. Plus les parois sont épaisses, plus sa résistance au changement de température est optimisée. Cette stratégie correspond à des températures variant entre 20 et 35 °C [65] et souvent utilisée pour les maisons anciennes.

Refroidissement par ventilation naturelle et mécanique

Cette stratégie correspondant à des valeurs de température comprises entre 20-31.5 °C et d'humidité relative variant entre 95-20 % [65]. Elle consiste à limiter les surchauffes, en renouvelant naturellement l'air intérieur par plusieurs moyens, à l'instar d'une ventilation transversale (**figure 3.17**), ou la création d'une ventilation naturelle par effet de cheminée (**figures 3.18**). En outre, cette amélioration de l'environnement thermique intérieur peut être obtenue mécaniquement en utilisant des ventilateurs... etc.

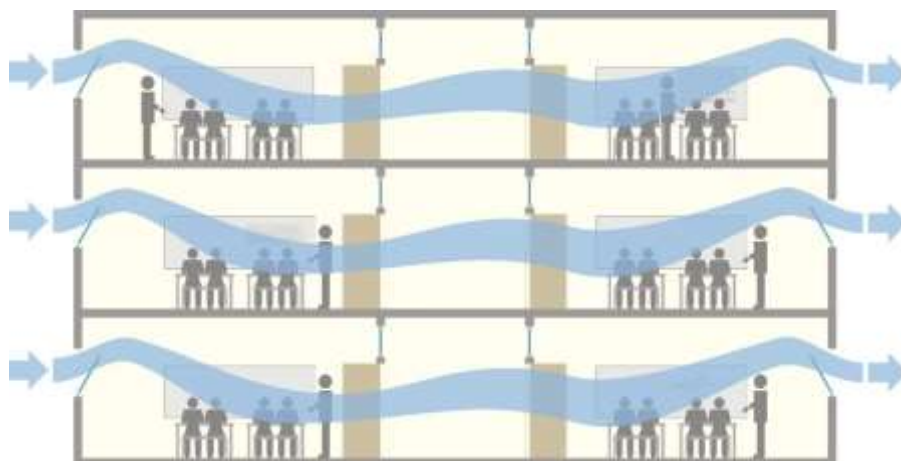


Figure 3.17 : Exemple de ventilation naturelle transversale [72].

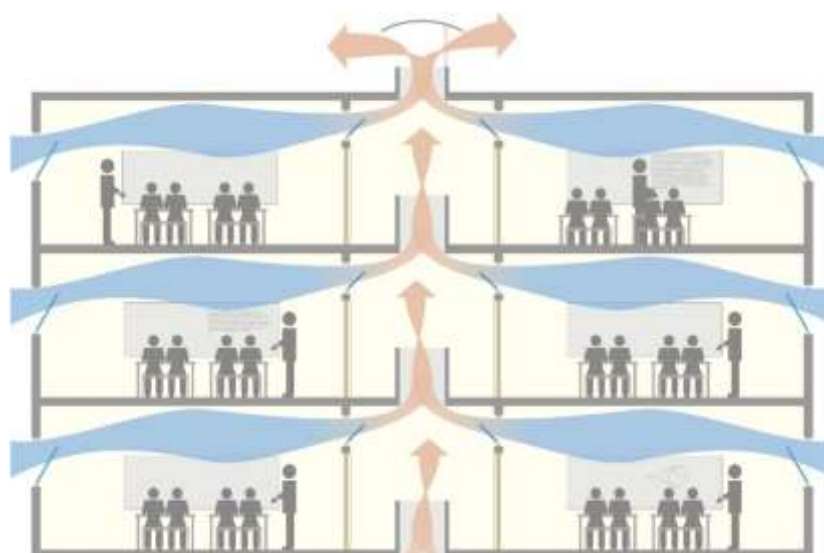


Figure 3.18 : Ventilation naturelle par effet de cheminée [72].

5.2. Les tables de Mahoney

Cet outil est divisé en deux étapes : premièrement, un diagnostic effectué par l'insertion des données climatiques de la zone d'étude « Miliana » en l'occurrence, la température, l'humidité, le vent et les précipitations. Tandis que la deuxième étape est une série de recommandations propres à Miliana, que l'on ressortit suite à la lecture des tables [106] (voir **annexe A**).

5.2.3. Synthèse de recommandations des tables de Mahoney

- Recommandations générales
- **Plan de masse**

Bâtiment orienté suivant un axe longitudinal est-ouest afin de favoriser le rayonnement solaire.

Plan compact avec cour intérieure.

- **Circulation d'air**

Conception architecturale permettant une circulation d'air transversale.

- **Recommandations de détails**
- **Dimensions des ouvertures**

Intermédiaires, 20 à 35 % de la surface des murs.

- **Position des ouvertures**

Ouvertures dans les murs nord et sud. « À hauteur d'homme du côté exposé au vent, y compris ouvertures pratiquées dans les murs intérieurs ».

- **Murs et planchers**

Construction massive, décalage horaire supérieur à 08 heures. Cela favorise l'isolation thermique du bâtiment vis-à-vis du froid et la chaleur.

- **Toiture**

Toiture lourde, déphasage au-delà de 8 h pour plus d'isolation thermique.

6. Enquête de terrain sur les anciennes écoles des 19e et 20e siècles à Miliana

6.1. Enquête et critères d'étude du corpus d'étude

Une enquête de terrain a été effectuée en se basant sur l'observation, la visite des espaces intérieurs des écoles, l'entretien avec des personnes qui y travaillent, la prise de photos et l'analyse de la documentation graphique, à savoir les plans des établissements concernés. Les objectifs de cette enquête visent à mettre le point sur les caractéristiques architecturales générales telles que, la localisation du bâtiment scolaire, l'orientation, la forme et la compacité, l'organisation intérieure, ainsi que les caractéristiques architecturales de détails en l'occurrence, les matériaux de construction, le type de vitrage, l'inertie thermique du bâtiment, et l'isolation de l'enveloppe. En ajoutant à cela, le style architectural et

l'état de conservation du bâtiment (réhabilité ou non réhabilité). Tous ces critères d'étude sont présentés dans le **tableau 3.1**.

Tableau 3.1 : Critères d'étude des anciennes écoles de Miliana.

Caractéristiques générales	Caractéristiques spécifiques
Orientation	Matériaux de construction
Forme et Compacité	Type de vitrage
Organisation intérieure	Inertie thermique du bâtiment
	Isolation thermique et étanchéité

6.2. Classement des bâtiments scolaires

À Miliana, il existe 8 anciennes écoles héritées de l'époque coloniale, dont 2 sont aujourd'hui considérées comme des annexes quant aux autres sont réparties entre 2 lycées, 1 collège et 3 écoles primaires. L'analyse des caractéristiques architecturales et constructives de ces anciens lieux de savoir a permis d'émettre les conclusions suivantes :

- Toutes les anciennes écoles se ressemblent en termes de quelques spécificités, à savoir, une organisation intérieure caractérisée par des salles de classe desservies latéralement par une coursive. Le nombre d'étages variant de 2 à 3 niveaux. l'utilisation des mêmes matériaux de construction (la pierre de tuf). Les ouvertures sont dotées de simple vitrage. Les enveloppes des bâtiments scolaires sont caractérisées par murs massifs pour augmenter l'isolation thermique. Aussi, presque toutes les écoles construites dans un style néo-classique, à l'exception d'une seule.
- La distinction demeure évidente au niveau de « forme et compacité », il y a une première typologie de forme à patio (cour centrale) avec coursive vitrée, alors que la deuxième typologie, est de forme éclatée (en L ou U) avec coursive non vitrée.

Les **figures 3.19 et 3.20** mettent en exergue le classement des anciennes écoles par rapport à la forme :

6.2.1. Typologie de forme éclatée (en L ou U) avec coursive non vitrée

Enveloppe du bâtiment scolaire	Vue intérieure depuis la cour de récréation	Vue sur la coursive
		
<p>Le lycée Mohamed ABDOU est un établissement d'enseignement secondaire, créé en 1874, et fut une école normale d'institutrices pendant l'époque coloniale. Le bâtiment scolaire s'élève sur trois niveaux et les salles de classe sont principalement orientées sud et ouest.</p>		
		
<p>L'école Nasreddine DINET est actuellement est une annexe au collège d'enseignement moyen « Belabes Nabi Leila ». Elle fut nommée « école Étienne Dinet », créée en 1898. Le bâtiment scolaire s'élève sur deux niveaux et les salles de classe sont principalement orientées nord et est.</p>		
		
<p>L'école Zahia BELHAFAF–ex:Saint Jean est un établissement d'enseignement primaire, créé en 1883, c'est le lieu de savoir le plus ancien dans la région de Miliana. Le bâtiment scolaire est implanté selon un axe nord-sud et les salles de classe sont principalement orientées ouest.</p>		



L'école Larbi TEBESSI, appelée à l'époque Edmond Maubourguet, c'est un établissement d'enseignement primaire, crée en 1909. Ce bâtiment scolaire est construit dans un style néo-mauresque et s'élève sur deux niveaux. Les salles de classe sont principalement orientées nord et ouest.

Figure 3.19 : Typologie de forme éclatée (en L ou U) avec coursive non vitrée.

6.2.2. Typologie de forme à patio (cour centrale) avec coursive vitrée



Le lycée Mustapha FERROUKHI est un établissement d'enseignement secondaire, inauguré en 1909, et fut l'école supérieure de garçons pendant l'époque coloniale. Le bâtiment scolaire s'élève sur trois niveaux et les salles de classe sont principalement orientées nord.



Le collège Belabes Nabi Leila est un établissement d'enseignement moyen, crée en 1919, et fut un ouvroir (Lieu réservé aux ouvrages de couture). Le bâtiment

scolaire s'élève sur deux niveaux et les salles de classe sont principalement orientées est.



L'école maternelle Atika MAZARI est un établissement d'enseignement primaire, créée en 1919. Ce bâtiment scolaire s'élève sur deux niveaux et les salles de classe sont principalement orientées est.



L'école Kadi MILIANI est actuellement est une annexe au lycée Mohamed ABDOU. Elle fut nommée « Charles Andrei ». Le bâtiment scolaire s'élève sur trois niveaux et les salles de classe sont principalement orientées sud et est.

Figure 3.20 : Typologie de forme à patio (cour centrale) avec coursive vitrée.

7. Choix et description des bâtiments cas d'étude

7.1. Choix des bâtiments cas d'étude

Pour le choix des cas d'étude, des critères spécifiques sont proposés :

- Des formes distinctes, permettant de mettre en exergue leurs effets sur les ambiances architecturales, ainsi que l'efficacité énergétique [107].
- Le choix des cas d'étude ne doit pas entraver le bon déroulement de la méthodologie de recherche et la faisabilité de l'enquête, et permettant d'atteindre les objectifs tracés dans ce travail [108].

7.2. Présentation des bâtiments cas d'étude

La **figure 3.21** illustre les bâtiments scolaires choisis comme cas d'étude :

- 1- Le lycée Mohammed Abdou ayant une typologie en forme de U (éclatée) et un plan à coursive non vitrée.
- 2- Le lycée Mustapha Ferroukhi ayant une typologie de forme à patio (cour centrale) et un plan à coursive vitrée.

Ces cas d'étude répondent aux critères soulignés préalablement, puisque tout d'abord, la forme est différente, et aussi ce sont des bâtiments scolaires accessibles en temps voulu, au cours de l'année scolaire. En ajoutant à cela le fait que les lycéens sont en mesure de réussir le bon déroulement de l'investigation, notamment lors de l'extinction des appareils de chauffage pour faire les mesures in situ, et possèdent par ailleurs la capacité de fournir de jugements fiables dans les questionnaires sur les relations personne-milieu [108].

En outre, des critères exogènes favorisant le choix de ces deux cas d'étude, en l'occurrence, le fait d'avoir fait l'objet d'une vaste opération de rénovation de 39 centenaires lycées hérités de l'époque coloniale [109]. Cela jettera davantage la lumière sur l'effet des travaux de réhabilitation sur les ambiances architecturales et l'efficacité énergétique.



Figure 3.21. Vue sur le centre historique de Miliana [110].

7.2.1. Lycée Mohammed Abdou

Le premier cas d'étude a été construit en 1874 (voir la **figure 3.22**). Ce fut la première école construite dans la région de Miliana, et aussi la première école normale destinée à la formation d'institutrices pour toute l'Algérie avant la création de celles de Constantine et d'Oran (voir la **figure 3.23**). En 1946, elle a été reconvertie en un lycée nommé « Alphonse Daudet », dédié à la scolarisation des jeunes filles. Après l'indépendance, le lycée a été renommé sous le nom du martyr « Mohammed ABDOU », et connaît actuellement une mixité de garçons et filles [111].

Le bâtiment scolaire comporte trois étages d'une hauteur moyenne intérieure de 4,3 m. La superficie du sous-sol est de 765 m², celle du rez-de-chaussée, premier et deuxième étages est de 1494 m², soit un volume total de 18 824, 4 m³. Le lycée est composé de trois blocs parallélépipédiques, entourant une cour centrale et reliés par une coursive. Les salles de classe sont principalement situées aux premier et deuxième étages. Le bâtiment est composé de murs extérieurs de 50 à 60 cm d'épaisseur, construits avec des matériaux locaux en pierre de tuf et recouverts de pierres bleues utilisées pour la décoration. Ces murs ne sont pas dotés d'une isolation thermique. Les niveaux sont séparés par des planchers à voutain fabriqués en briques pleines, et des solives métalliques (l'espacement est 500 mm). Le deuxième étage est séparé du toit par de simples panneaux de laine de roche. Le toit à deux versants est composé d'une charpente en bois sur laquelle sont placées des tuiles rouges. Les fenêtres sont rectangulaires de 2 m de hauteur et de 1 m de largeur, et caractérisées par une fabrication en bois à simple vitrage d'environ 4 mm d'épaisseur. Elles ont été placées sur chaque façade de la salle de classe [112].

L'ancienne école a été rénovée en 2013 en portant très peu d'attention à la qualité de l'environnement intérieur et l'efficacité énergétique. Les travaux consistent à conserver l'aspect patrimonial du bâtiment tout en menant des actions de rénovation, consolidation et confortement de la structure à l'image des mesures suivantes. L'enduit de ciment a remplacé le mortier traditionnel sur les murs intérieurs et extérieurs. Le dortoir s'est transformé en cinq salles de classe au deuxième étage, le plafond traditionnel en lattis-roseaux du deuxième étage est remplacé par des panneaux en laine de roche. Les fenêtres à simple vitrage et

cadres en bois ont remplacé l'ancienne boiserie. L'installation d'un nouveau système de chauffage au gaz naturel (puissance de chauffage de 256 kW) dans le sous-sol du bâtiment. L'installation d'électricité a également été rénovée.

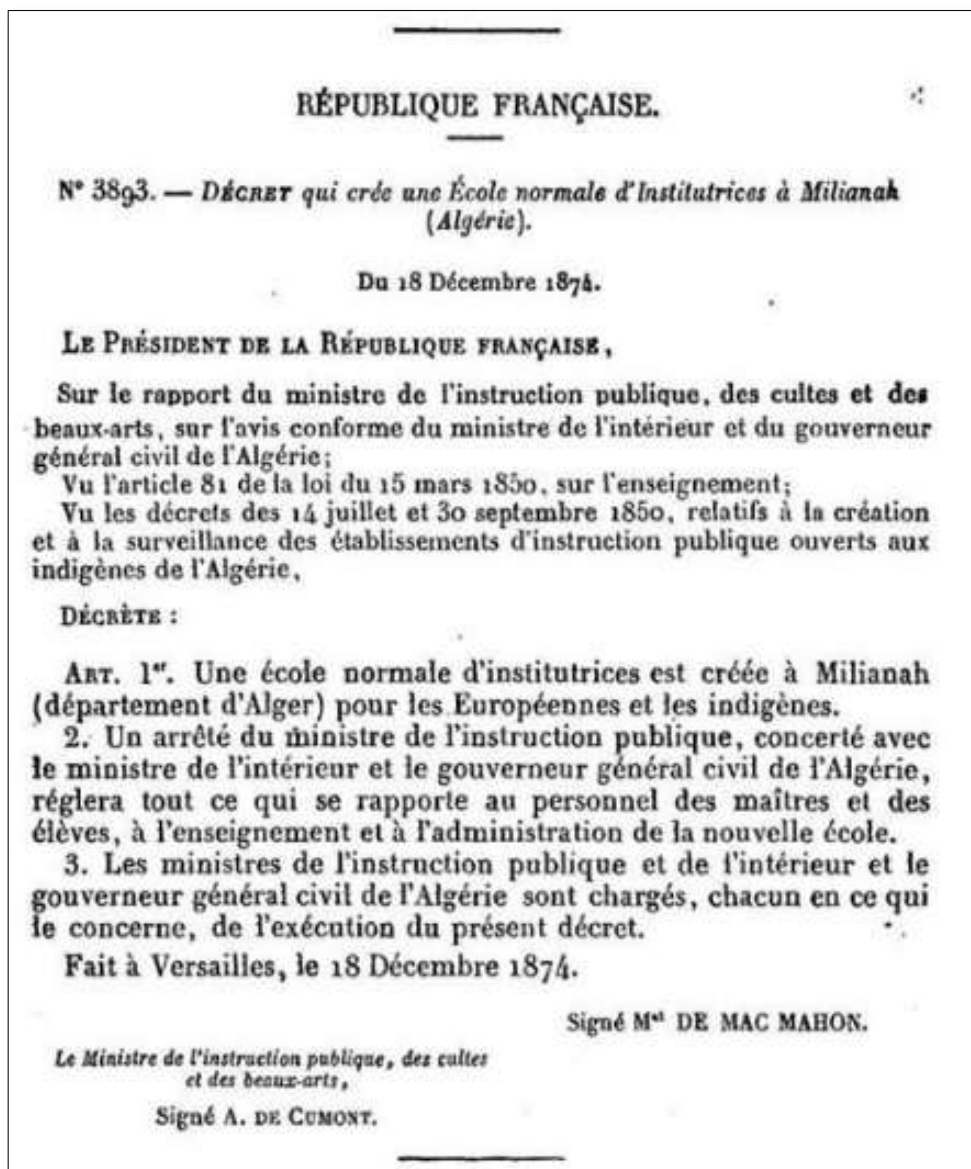


Figure 3.22 : Décret de création de l'école normale d'institutrices à Miliana [111].



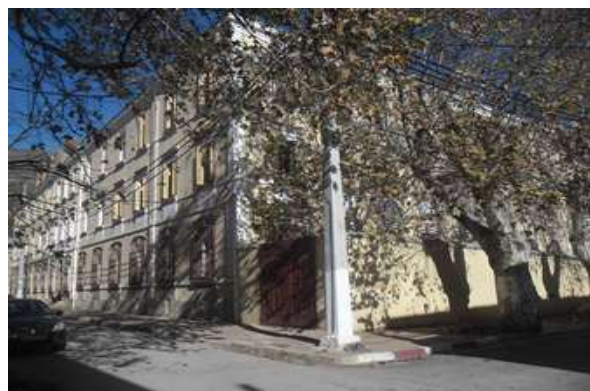
a) Localisation du lycée à Miliana.



b) Façade principale construite dans un style néo-classique 1874 [111].



c) Vue intérieure prise le 11 février 2018.



d) Arbres à feuilles caduques au sud de l'école.

Figure 3.23 : Lycée Mohammed ABDOU.

7.2.2. Lycée Mustapha Ferroukhi

Le deuxième cas d'étude est le lycée Mustapha FERROUKHI (voir la **figure 3.24**), inauguré en 1909, et fut l'ancienne école primaire supérieure de garçons pendant l'époque coloniale française en Algérie. Dans les années 30, cette école avait une grande importance à l'échelle nationale, elle comptait 400 élèves, dont 200 en internat [111]. Le lycée avait lors de sa création une forme de la lettre U orientée vers le Sud. Ce n'est qu'à la période postcoloniale qu'un bloc neuf soit bâti pour accueillir principalement des logements de fonction, lui donnant ainsi une forme compacte avec une cour de récréation centrale et des entités ayant une forme parallélépipédique reliées par une coursive vitrée et fermée. Les salles de classe

sont principalement situées aux premier et deuxième étages et donnant sur le côté nord.

L'ancienne école s'inscrit dans un site urbain à forte densité et s'étale sur un îlot de 3167 m², bordée au nord par un bâtiment annexe au lycée construit pendant l'époque postcoloniale. À l'ouest et à l'est, par une voie publique secondaire et au sud par une voie tertiaire piétonne et des logements collectifs. L'école est élevée sur un gabarit de R+2 surmonté par un toit à deux versants ; un sous-sol de 487 m² avec hauteur de 2,85 m, un rez-de-chaussée de 1400 m² avec hauteur de 4,3 m, un premier étage de 1405 m² avec hauteur de 4,35 m, et un deuxième étage de 1321 m² avec hauteur de 4,55 m. La surface totale des planchers est de 4613 m², soit un volume total de 19 530,25 m³.

Le bâtiment est composé de murs extérieurs de 45 à 58 cm d'épaisseur, construits avec des matériaux locaux en pierre de tuf. Ces murs ne sont pas dotés d'une isolation thermique. Les niveaux sont séparés par des planchers à voutain montés avec briques creuses et profilés IPN (l'espacement est de 500 mm). Le deuxième étage est séparé du toit par un plafond en lattis-roseaux. Le toit à deux versants est composé d'une charpente en bois sur laquelle sont placées des tuiles rouges. Les fenêtres sont rectangulaires de dimensions différentes, et fabriquées en bois et dotées d'un simple vitrage d'environ 4 mm d'épaisseur.

À l'instar du lycée Abdou, l'ancienne école « Mustapha FERROUKHI » a été rouvert en 2017 après des travaux de réhabilitation démarrant en 2014. Ces travaux n'ont pas fait l'objet d'une intégration de la dimension environnementale et l'efficacité énergétique. Ils ont visé principalement le confortement des murs et de la structure et toute action qui peut rendre plus solide ce vieux bâtiment scolaire tout en gardant son cachet architectural. Les travaux principaux sont : les enduits de ciment pour les murs intérieurs et extérieurs, transformation du dortoir en 3 grandes salles au deuxième étage, le plafond traditionnel en lattis-roseaux a été rénové au deuxième étage par le même type et la rénovation des fenêtres à simple vitrage et cadres en bois, et aussi la rénovation des systèmes d'électricité. En termes d'équipements de chauffage, le bâtiment scolaire est équipé d'un nouveau système de chauffage au gaz naturel (puissance de chauffage de 290,75 kW) installé dans le sous-sol du bâtiment.



a) Vue extérieure de l'enveloppe du lycée.



b) Le lycée fut réalisé dans un style néo-classique en 1901 [111].



c) Cour de récréation du lycée



d) Coursive fermée du lycée.

Figure 3.24 : Lycée Mustapha FERROUKHI.

7.3. Comparaison entre les recommandations bioclimatiques et les caractéristiques des cas d'étude

- **Orientation pleine Sud pour les salles de cours**

L'approche bioclimatique préconise une exposition sud pour la grande façade du bâtiment. Cette orientation est respectée au lycée Abdou qui est conçu de telle manière qu'il profite de la trajectoire du soleil. Les espaces techniques sont placés au nord, tels que la chaufferie en sous-sol, les archives, les garages, les douches, le réfectoire. A contrario, les salles de cours et la bibliothèque sont placées au sud pour profiter au maximum des rayons solaires et de la lumière naturelle. Cela permet de réduire les besoins énergétiques du lycée.

- **Protection contre les vents dominants**

La géométrie des deux lycées fait face aux vents dominants soufflants nord-ouest. Elle protège ainsi les cours de récréation et met les élèves à l'abri durant la période froide de l'année scolaire.

- **Volume compact avec cour intérieure**

Cette stratégie bioclimatique est respectée dans le lycée Ferroukhi, qui se caractérise par une forme compacte, offrant moins de déperditions de chaleur, plus d'efficacité énergétique et confort thermique intérieur.

- **Grande masse thermique pour l'enveloppe**

Pour s'adapter aux conditions climatiques d'une telle région froide en hiver comme Miliana, la bioclimatique recommande d'assurer une bonne paroi épaisse de l'enveloppe du bâtiment. Cette bonne isolation thermique a été rendue possible dans les deux lycées grâce à l'épaisseur des murs, en moyenne 50 cm pour les parois intérieures et 60 cm pour les parois extérieures. D'autant plus, le rez-de-chaussée du lycée repose sur le sous-sol, et cela constitue un espace tampon pour se protéger de l'humidité de la remontée capillaire.

- **Protection solaire assurée par le platane**

La démarche bioclimatique favorise l'exposition sud pour la façade, à condition de bien se protéger de ses méfaits à l'image de l'ensoleillement direct et l'éblouissement. En effet, les platanes sont présents beaucoup plus coté sud du lycée Abdou. Pendant les journées chaudes, les rayons du soleil sont arrêtés par le feuillage des platanes et du coup, cela procure un microclimat agréable dans les espaces intérieurs. En hiver, en revanche, les platanes qui possèdent de feuilles caduques, laissent pénétrer les rayons du soleil à l'intérieur des classes. Par conséquent, l'ambiance thermique intérieure est améliorée et le recours à l'énergie fossile est réduit.

- **Ventilation naturelle assurée par des fenêtres hautes**

La règle bioclimatique préconise la mise en place des dispositifs permettant de renouveler l'air, en vue d'assurer une bonne qualité du confort thermique. A cet

effet, les salles de cours sont dotées de grandes baies vitrées, percées verticalement dans les murs intérieurs et extérieurs de manière qu'elles garantissent une ventilation naturelle transversale.

- **Gains thermiques internes générés par les occupants des salles de cours**

L'étude bioclimatique recommande les gains internes pour assurer le confort thermique dans quelques mois caractérisés par un léger froid, à l'image de mars et avril. A cet effet, les usagers eux-mêmes peuvent être source de ces apports internes. L'énergie générée par le métabolisme de chaque occupant contribue à l'augmentation de la température et l'amélioration des conditions thermiques intérieures.

- **Matériaux de construction**

À Miliana d'abord, la plupart des matériaux utilisés pour la construction des anciennes écoles sont des matériaux sains, entraînant très peu de pollution, à l'instar des pierres calcaires (tuf), des moellons, et la terre argileuse. Ces pierres ont été extraites d'une carrière toute proche sur Miliana, exactement du mont de Zakar. C'est donc un matériau peu onéreux et très intéressant en termes d'énergie grise (il ne nécessite pas beaucoup d'énergie pour l'extraction, la fabrication et le transport). Ce qui lui confère le statut d'écologique et durable. En outre, la durabilité de ces constructions en pierre naturelle a démontré ses avantages au fil du temps, vu que la pierre de tuf ne rouille pas et ne pourrait pas l'être. D'autant plus, elle est disponible en abondance dans la région.

8. Conclusion

Ce chapitre a abordé principalement le choix des cas d'étude, ainsi qu'une comparaison bioclimatique faite entre d'une part, les caractéristiques architecturales et constructives des bâtiments étudiés et d'autre part, les recommandations bioclimatiques spécifiques à la même région de Miliana. Il a abouti aux conclusions suivantes :

- Le choix s'est arrêté sur deux cas d'étude représentatifs de l'ensemble des écoles anciennes de Miliana : le premier nommé « lycée Mohammed ABDOU » ayant une typologie en forme de U (éclatée) et un plan à coursive non vitrée. Le deuxième appelé « lycée Mustapha FERROUKHI » ayant une typologie de forme à patio (cour centrale) et un plan à coursive vitrée ;
- Les dispositifs conceptuels passifs utilisés font preuve d'une adaptation de bon sens aux conditions climatiques de la région de Miliana ;
- Le lycée Mohammed ABDOU se distingue par de bons concepts passifs tels que sa géométrie en forme de U orientée vers l'est pour à la fois tirer parti de la topographie du terrain, qui est caractérisée par une déclivité importante vers le levant, et aussi faire face aux vents dominants qui soufflent du nord-ouest en hiver. Orientation pleine Sud pour les salles de cours. Ventilation transversale à travers des ouvertures verticales. Protection solaire par le platane qui joue le rôle d'une casquette : en période chaude, il empêche la chaleur de s'engouffrer dans les salles de cours, tandis qu'en hiver, une fois les feuilles tombées, les rayons du soleil pénètrent à l'intérieur des classes ;
- Quant au lycée FERROUKHI, il répond à la bonne stratégie du confort thermique à travers sa conception compacte avec cour intérieure. Cette conception est bien meilleure sur le plan de l'efficacité énergétique et la réduction des déperditions thermiques ;
- Les deux lycées partagent des points communs, tels que l'isolation de l'enveloppe par des murs porteurs massifs qui font de 50 à 70 cm, ainsi qu'une toiture lourde, matériaux de construction d'origine locale peu onéreux et très intéressants en termes d'énergie grise ;
- L'étude des bâtiments scolaires anciens a mis en exergue une concordance entre d'une part les recommandations bioclimatiques et d'autre part les dispositifs et les concepts pris en compte pour concevoir les anciens lieux de savoir. Ceci dit que les facteurs spécifiques du climat et l'environnement de la région de Miliana ont été pris en compte dans le but de procurer le confort thermique dans les salles de cours ;
- Sur l'architecture scolaire des 19 et 20 siècles en Algérie, nous pourrions dire que la volumétrie, le système constructif, l'orientation de la construction,

l'isolation face au froid et à la chaleur, la lumière pour le confort de ses usagers... tous ces éléments ont été respectés, et ont été le point de départ de la conception bien avant que la notion du développement durable et l'architecture bioclimatique n'apparaissent. Cependant à présent, on essaie justement de les optimiser.

Deuxième partie : Expérimentation

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE ET INVESTIGATION SUR TERRAIN

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie de recherche sur terrain. Tout d'abord, une caractérisation thermo-physique des matériaux de construction est effectuée pour déterminer la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique des pierres calcaires extraites des cas d'étude. Ensuite, une analyse thermographique des enveloppes des lycées est réalisée pour mettre le point sur l'existence de ponts thermiques. En outre, le chapitre développe l'évaluation qualitative effectuée par des questionnaires distribués auprès des occupants des espaces d'étude, et aussi l'évaluation quantitative réalisée par des campagnes de mesures pendant la période chaude et froide de l'année scolaire. Ce chapitre se termine par mettre en exergue les performances du logiciel EnergyPlus, ainsi que les paramètres nécessaires pour effectuer des simulations des variables du confort visuel et thermique, en l'occurrence l'éclairage naturel et la température de l'air.

2. Caractérisation thermo-physique des matériaux de construction

L'objectif de cette caractérisation des matériaux est de déterminer les propriétés thermiques des matériaux de construction des cas d'étude, qui seront insérées ultérieurement dans la phase de simulation numérique. Il s'agit de la conductivité thermique (λ : lambda, exprimé en $W / [m^{\circ}C]$), la chaleur spécifique [$J kg^{-1} K^{-1}$], ainsi que la masse volumique kg/m^3 . Pour y parvenir, les étapes suivantes sont réalisées :

2.1. Extraction des blocs de pierre

La **figure 4.1** illustre des blocs de tuf extraits des bâtiments scolaires étudiés. Pratiquement, toutes les anciennes constructions sont construites à la base de ce

matériau. Il existe dans trois variantes distinctives en fonction des couleurs ; gris, blanc et jaune [113]. Ces derniers sont maçonnés à partir de la terre argileuse pour bâtir des murs massifs.



a) Tuffeau gris

b) Tuffeau jaune

c) Tuffeau blanc

Figure 4.1 : Trois blocs de tuf extraits des cas d'étude.

2.2. Préparation des échantillons (découpage) :

Pour répondre aux conditions particulières de l'essai, les échantillons de tuf sont découpés pour avoir une dimension équivalente à 8 x 8 cm (voir **figure 4.2**).



Figure 4.2 : Trois échantillons de tuf extraits des cas d'étude.

2.3. Essai de conductivité thermique et chaleur spécifique

La détermination de la conductivité thermique et la chaleur spécifique a été réalisée à l'aide d'un CT Mètre, sur la base d'un protocole interne du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB). Pour y parvenir, une sonde contenant un fil résistif a été placée entre deux plaques d'échantillon du tuf

(voir **figure 4.3**). Ces dernières ont été exposées à un flux thermique, livré comme un effet Joule par le fil résistif. Le thermocouple qui se trouve dans la sonde permet d'estimer à la fois la conductivité thermique et la chaleur spécifique de l'échantillon de matériau (**CNERIB 2015**). L'essai a été effectué sur les trois échantillons pour s'assurer de la fiabilité des mesures. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le **tableau 4.1**.



Figure 4.3 : Détermination de la conductivité thermique et chaleur spécifique à l'aide du CT Metre au niveau du CNERIB.

Tableau 4.1 : Valeurs de conductivité thermique et chaleur spécifique de trois échantillons.

Type d'échantillon	Conductivité thermique	Chaleur spécifique
Essai 1 : Tuffeau gris	1,284 W· m ⁻¹ ·K ⁻¹	2690, 6 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Essai 2 : Tuffeau jaune	0,923 W· m ⁻¹ ·K ⁻¹	2248, 5 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Essai 3 : Tuffeau blanc	1,253 W· m ⁻¹ ·K ⁻¹	3052, 4 J kg ⁻¹ K ⁻¹

2.4. Essai de la masse volumique absolue

Pour déterminer la masse volumique absolue, l'expérimentation s'est faite sur échantillons étuvés, dont le temps d'étuvage est de 24 h, pour retirer toute l'humidité restante. Puis, un échantillon de tuf est placé dans une éprouvette graduée de 1000 ml (voir **figure 4.4**). La valeur de la masse volumique est ensuite obtenue en calculant le rapport entre la masse initiale de l'échantillon et le volume déplacé. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le **tableau 4.2**.



Figure 4.4 : Détermination de la masse volumique absolue par la méthode de déplacement d'eau.

Tableau 4.2 : Valeurs de masse volumique des échantillons.

Désignation	Essai 1	Essai 2
Masse initiale du tuf	208 g	250 g
Volume initial	500 ml	500 ml
Niveau du volume déplacé	590 ml	605 ml
Masse volumique absolue	2.311 (g/ml), 2 311 (kg/m ³)	2.38 (g/ml), 2380 (kg/m ³).

3. Analyse thermographique des bâtiments cas d'étude

La thermographie infrarouge a été effectuée pour détecter éventuels ponts thermiques sur l'enveloppe des lycées étudiés, ainsi que prodiguer des recommandations sur l'amélioration de la performance énergétique. Elle a été effectuée pendant l'hiver 2019, à l'extérieur comme à l'intérieur des cas d'études. Puis, les thermogrammes ont été interprétés selon la recherche bibliographique [114, 115, 11, 116]

3.1. Équipements utilisés

3.1.1. Caméra thermique [117]

- Fabricant : FLIR
- Catégorie du produit : Caméras d'imagerie thermique
- Plage de températures : – 20 C à + 250 °C
- Résolution : 140 x 140
- Sensibilité : 0,1 °C
- Précision : 2 %
- Type d'écran : LCD, 2.8 in
- Marque : FLIR Systems
- Poids de l'unité : 340 g



Figure 4.5 : Caméra infrarouge FLIR i7.

3.1.2. Appareil photo du téléphone portable

- Condor Plume P6 Pro LTE -13 megapixels (voir **figure 4.6**).



Figure 4.6 : Appareil téléphonique Condor Plume P6 pro [118].

3.1.3. Logiciel de traitement des images thermiques

- FLIR Quickreport 1.2 SP2, 2009, version anglaise (voir **figure 4.7**).

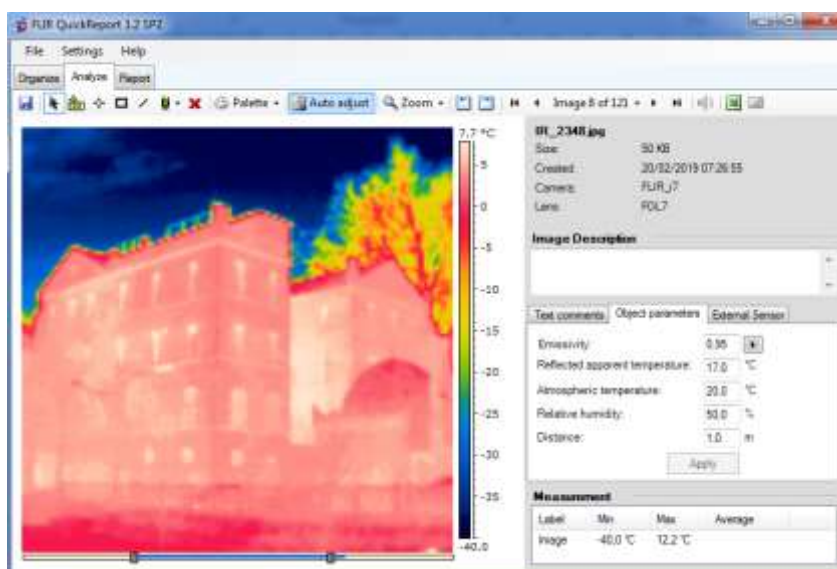


Figure 4.7 : Interface du logiciel FLIR Quickreport 1.2 SP2.

3.2. Lycée Mohamed ABDOU

3.2.1. Thermographie extérieure

L'inspection thermographique révèle que l'enveloppe du lycée Abdou est mal isolée et cause des pertes de chaleur importantes (**figure 4.8**). En effet, la ligne de

profil met en évidence que les températures ne sont pas uniformes sur la façade est (voir **figure 4.9**). La température minimale est (4 °C) sur le mur, et la température maximale est (20,6 °C) sur les fenêtres, soit une différence supérieure à 16,6 °C .

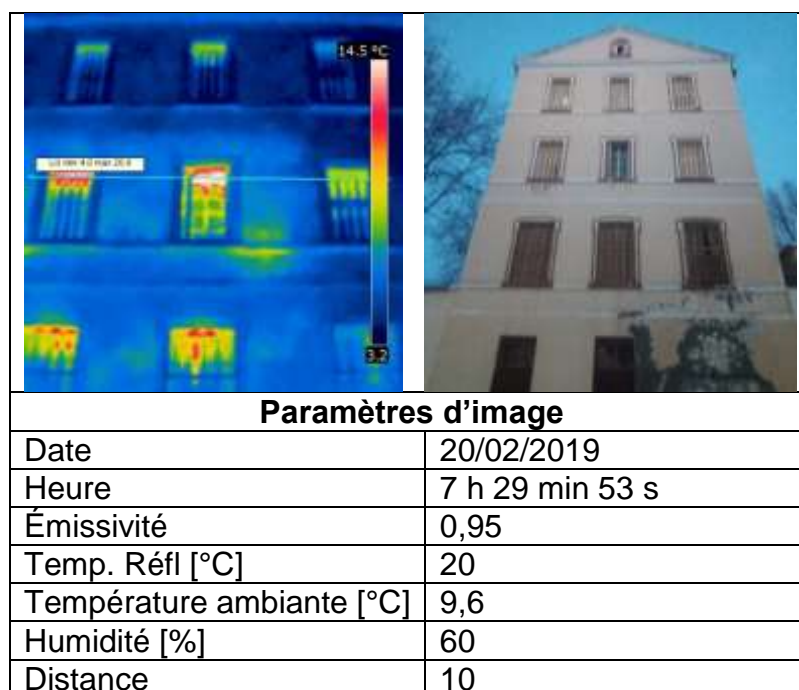


Figure 4.8 : Ponts thermiques au niveau des fenêtres de la façade est du lycée ABDOU.



Figure 4.9 : Ligne de profil de la thermographie extérieure (ABDOU).

3.2.2. Thermographie intérieure 1

Dans la salle de classe du deuxième étage (**figure 4.10**), le thermogramme nous affiche des infiltrations d'air entre l'ouvrant et le dormant au niveau de la menuiserie (porte et fenêtre), l'air est à environ de 14 °C (voir **figure 4.11**).

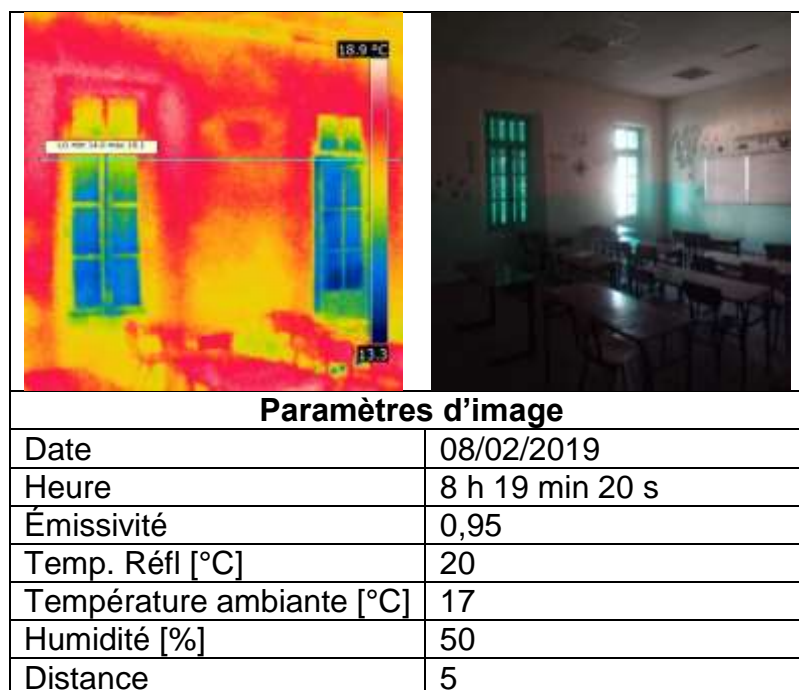


Figure 4.10 : Pont thermique au niveau la porte et fenêtre.

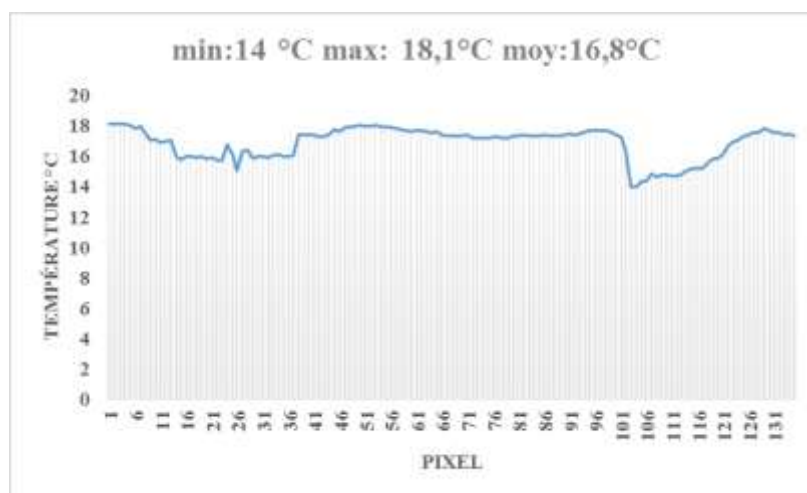


Figure 4.11 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 1 (ABDOU).

3.2.3. Thermographie intérieure 2

La **figure 4.12** nous affiche de grosses infiltrations d'air froid à travers les panneaux du plafond et démontre que le grenier n'est pas correctement isolé. Le profil thermique (**figure 4.13**) illustre que les fuites d'air dans les salles de classe du deuxième étage, sont à environ de 6,7 °C, créant un écart supérieur à 11 °C avec le reste du plafond. Cela peut créer un environnement thermique inconfortable pour les utilisateurs du bâtiment scolaire.

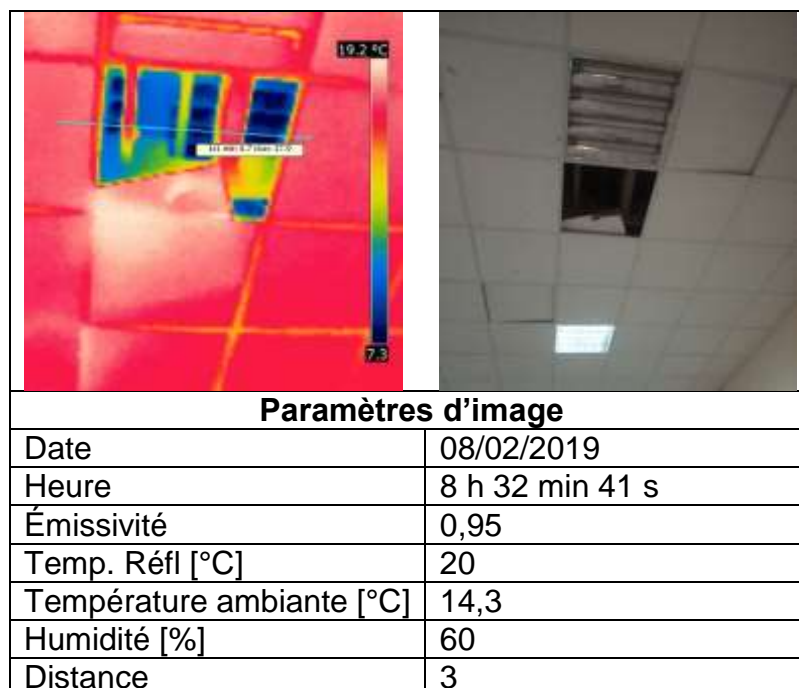


Figure 4.12 : Infiltration d'air froid au niveau du faux plafond en laine de roche.

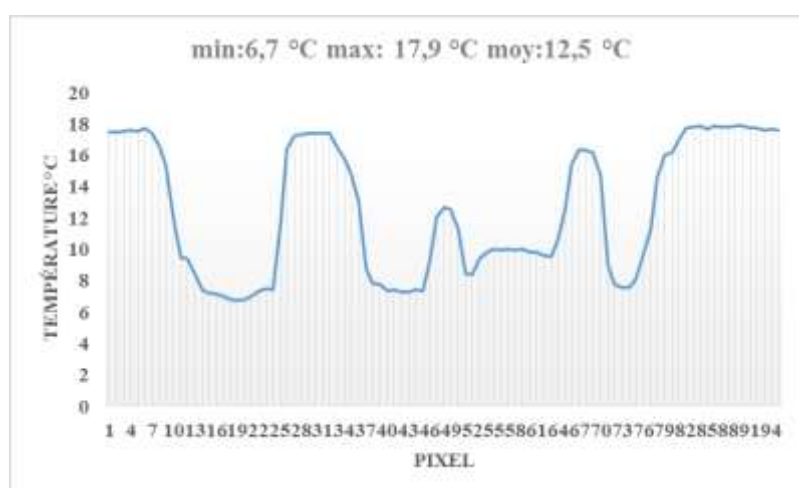


Figure 4.13 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 2 (ABDOU).

3.3. Lycée Mustapha FERROUKHI

3.3.1. Thermographie extérieure

L'inspection thermographique de la façade ouest du lycée Ferroukhi présente des déperditions thermiques excessives (**figure 4.14**). En effet, la ligne de profil (**figure 4.15**) met en évidence que les températures ne sont pas uniformes. La minimale (5,2 °C) sur le mur et la maximale (20 °C) sur les fenêtres, soit une différence supérieure à 14,8 °C.

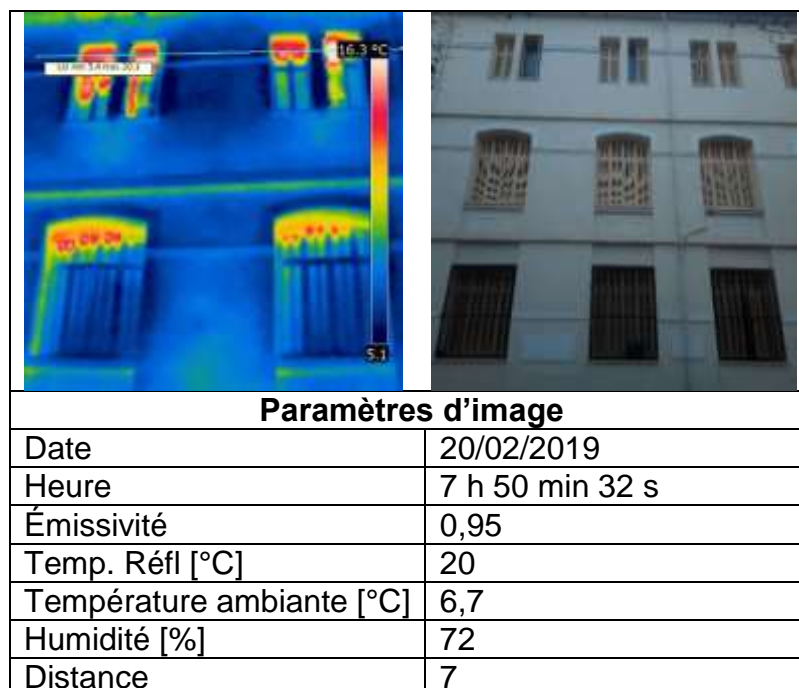


Figure 4.14 : Ponts thermiques horizontaux en haut des fenêtres (façade ouest du lycée Ferroukhi).

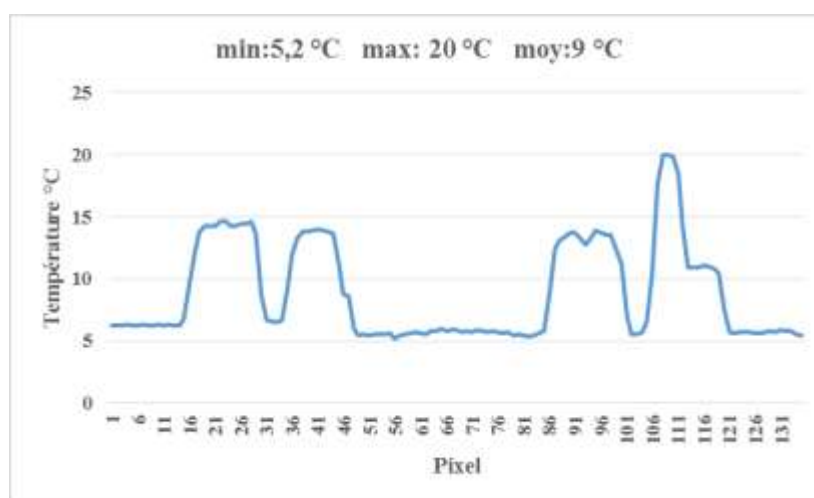


Figure 4.15 : Ligne de profil de la thermographie extérieure (FERROUKHI).

3.3.2. Thermographie intérieure 1

Les fenêtres donnant sur l'extérieur (côté nord) sont responsables des infiltrations d'air entre l'ouvrant et le dormant (**figure 4.16**). L'air pourrait arriver à 12,5 °C (voir **figure 4.17**), et cela influencerait la qualité de température ressentie à l'intérieur des salles de classe.

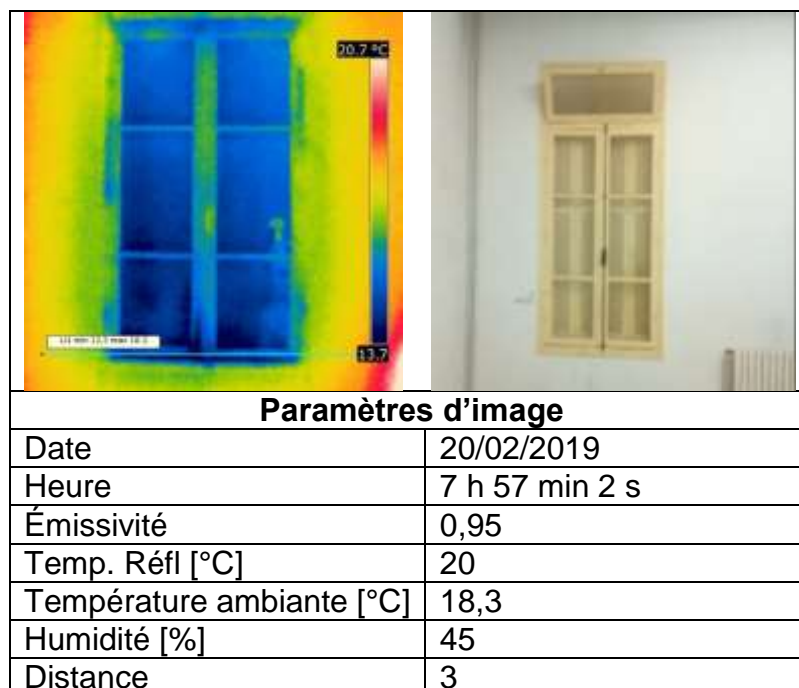


Figure 4.16 : Ponts thermiques des fenêtres (façade nord du lycée Ferroukhi).

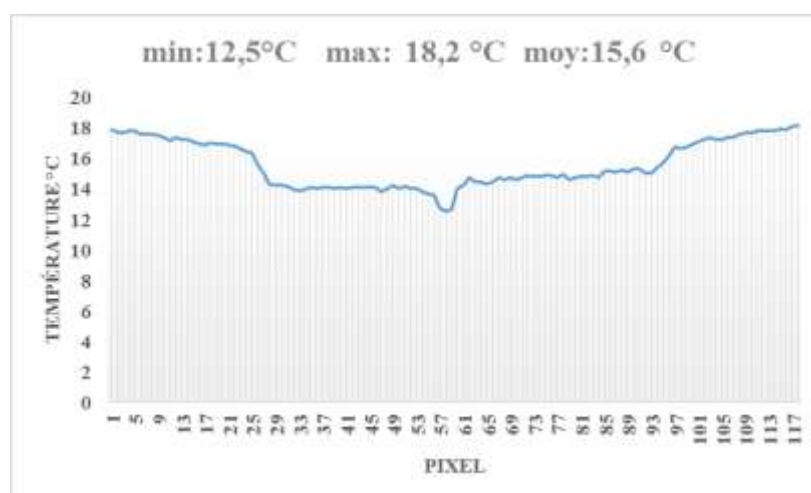


Figure 4.17 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 1 (FERROUKHI).

3.3.3. Thermographie intérieure 2

Le plafond de la salle de classe présente des infiltrations d'air (**figure 4.18**). On peut remarquer qu'il n'y a une différence de température entre les murs et le plafond. Selon le profil (**figure 4.19**), l'écart de température peut arriver jusqu'à 3 °C. Cela démontre que le toit n'est pas bien isolé.

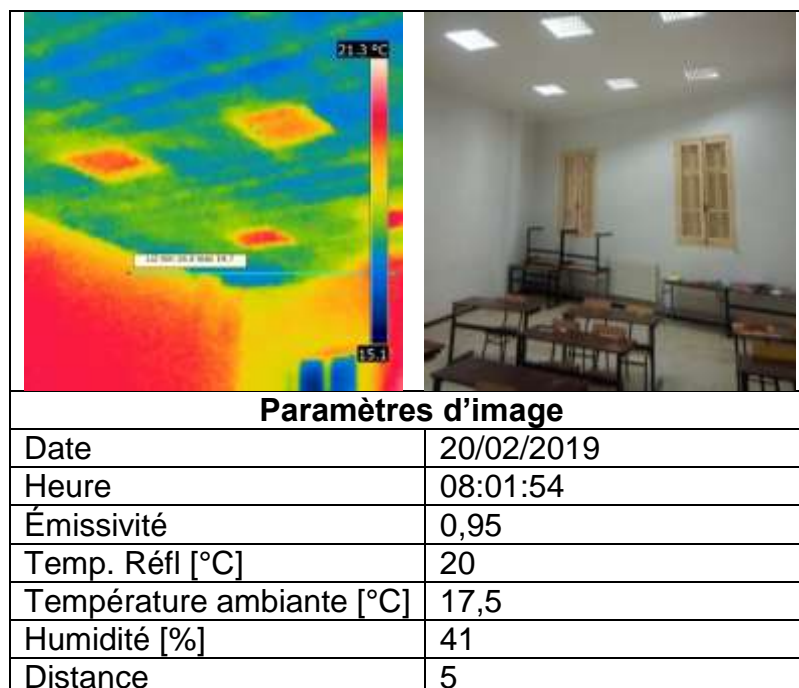


Figure 4.18 : Le faux plafond en lattis roseaux n'est pas bien isolé.

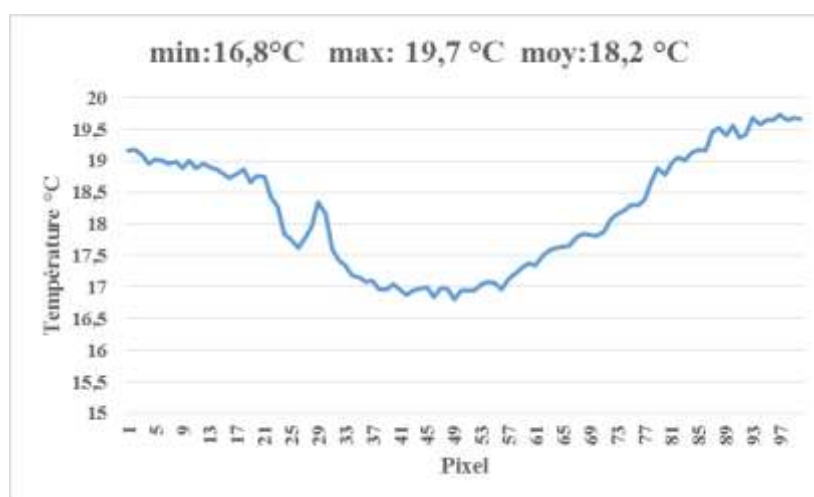


Figure 4.19 : Ligne de profil de la thermographie intérieure 2 (FERROUKHI).

4. Choix et description des espaces d'étude

4.1. Critères de choix

En vue de faire une recherche approfondie sur les conditions de confort thermique et visuel, le choix s'est porté sur dix (10) espaces d'étude représentatifs de l'ensemble des salles de classe. Plusieurs raisons expliquent cela :

4.1.1. Occupation

Les espaces d'étude doivent être occupés continuellement par le même groupe d'élèves, puisqu'ils sont habitués à leur salle de cours et possèdent des informations fiables sur la relation personne-milieu. Et cela, validera notre méthodologie, qui repose principalement sur la simultanéité de l'enquête in situ et les questionnaires.

4.1.2. Orientation

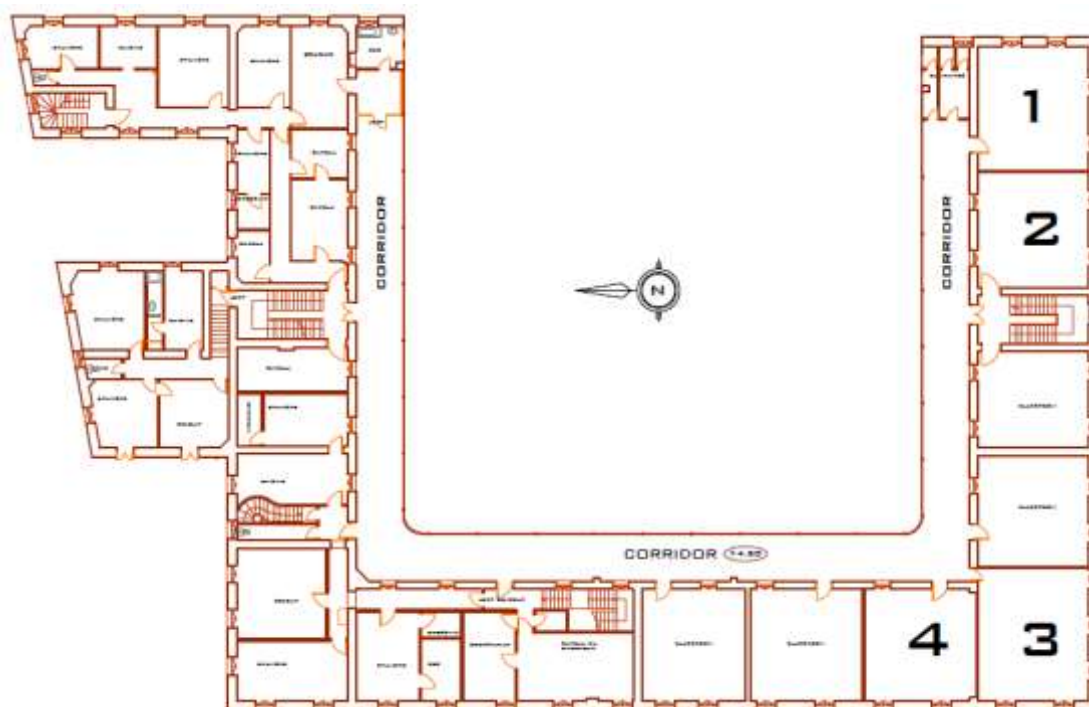
Les espaces d'étude sont orientés différemment, et cela donnera plus de résultats sur les effets de l'orientation sur les ambiances architecturales, en l'occurrence les aspects thermique et visuel.

4.1.3. Emplacement dans le bâtiment scolaire

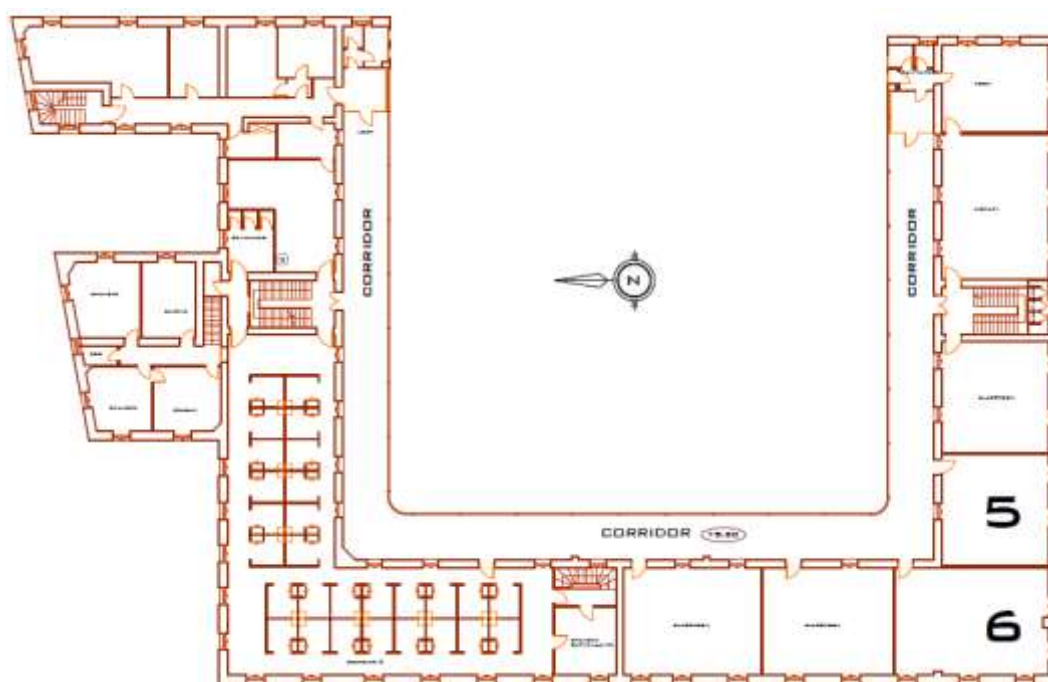
La situation des espaces d'études diffère en fonction de l'emplacement dans le bâtiment scolaire. Cela s'avère judicieux, vu l'impact de la compacité sur l'ambiance thermique.

4.2. Présentation des espaces d'étude

4.2.1. Lycée Mohamed ABDOU



a) Plan du premier étage



b) Plan du deuxième étage

Figure 4.20 : Emplacement des espaces d'étude (lycée Mohamed ABDOU).



Salle N° 1



Salle N° 2



Salle N° 3



Salle N° 4



Salle N° 5



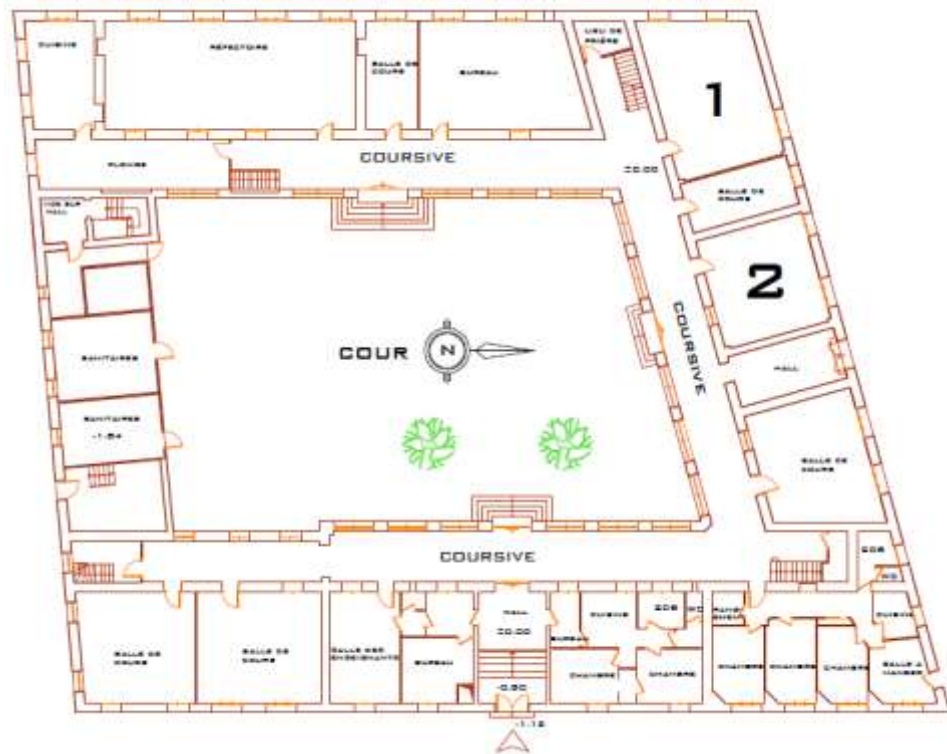
Salle N° 6

Figure 4.21 : Vue intérieure des espaces d'étude (lycée Mohamed ABDOU).

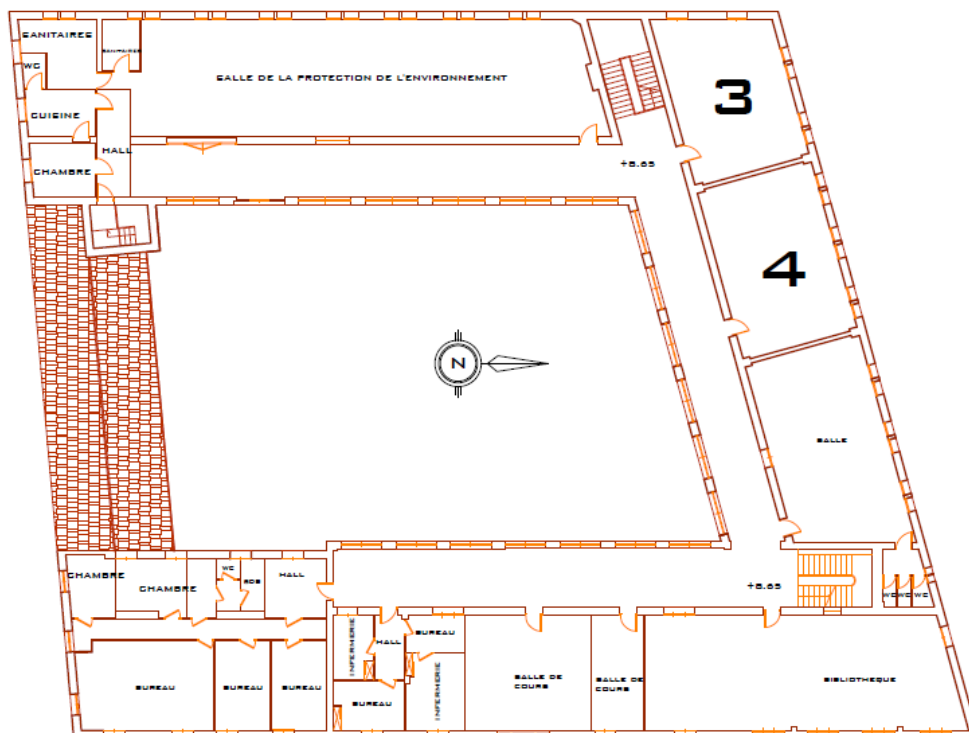
Tableau 4.3 : La description des espaces d'étude (lycée Mohamed ABDOU).

N° classe	Nombre d'élèves	Orientation	Dimensions Longueur/Largeur/hauteur	S (m ²)	V (m ³)	Ratio Fenêtre/Mur (%)	N° Radiateurs	Luminaire (4x18W)
1	35	E/S	7,68/6,87/4,3	52,8	226,9	12,8	3	6
2	15	S	7.1/6,87/4,3	48,8	209,7	13,1	2	6
3	30	S/W	8.2/6,86/4,3	56,2	241,9	15,4	3	6
4	30	W	6.94/6,9/4,3	47,9	205,9	13,4	2	6
5	31	S	7,2/6,87/4,3	49,5	212,7	19,4	2	6
6	21	S/W	9.9/6,9/4,3	68,3	293,7	13,8	3	6

4.2.2. Lycée Mustapha FERROUKHI



a) Plan du rez-de-chaussée



b) Plan du deuxième étage

Figure 4.22 : Emplacement des espaces d'étude (lycée Mustapha FERROUKHI).



Salle N° 1



Salle N° 2



Salle N° 3



Salle N° 4

Figure 4.23 : Vue intérieure des espaces d'étude (Lycée Mustapha FERROUKHI).

Tableau 4.4 : La description des espaces d'étude (Lycée Mustapha FERROUKHI).

N° classe	Nombre d'élèves	Orientation	Dimensions Longueur/Largeur/hauteur	S (m ²)	V (m ³)	Ratio Fenêtre/Mur (%)	N° Radiateurs	Luminaire (4x18W)
1	17	N/O	9/6,47/4,3	58,11	249,9	16	3	8
2	14	N	6,63/6,47/4,3	42,8	184,04	26,5	2	6
3	20	N/O	9/6,47/4,55	59,7	271,635	18	3	9
4	23	N	10/6,73/4,55	67,3	306,215	21,66	3	12

5. Évaluation qualitative

5.1. Élaboration du questionnaire et déroulement de l'enquête

Le questionnaire du confort thermique et visuel a été conçu sur la base de la revue de littérature et des études précédentes [10, 119, 120, 121] L'enquête par ces questionnaires a été effectuée pendant la présence des usagers (voir **figure 4.24**). Pour le lycée ABDOU, 162 sujets ont été interrogés pendant la période froide (février) et 153 pendant la période chaude (septembre), soit 325 voix. Pour le lycée FERROUKHI, 74 sujets ont été interviewés pendant la période froide (février 2018), alors que, 79 sujets pendant la période chaude de l'année scolaire (septembre 2018), soit 153 voix. Le total des deux cas d'étude est de 478 voix.

Les élèves (âgés de 16 à 20 ans), ainsi que les enseignants, ont rempli les questionnaires portant sur l'évaluation du confort thermique et visuel dans les 10 salles de cours étudiées. Afin de donner aux répondants suffisamment de temps permettant d'atteindre un état thermique stable, les questionnaires sur papier ont été distribués aux sujets durant l'après-midi, au cours des 15 dernières minutes de l'activité en classe, en donnant un questionnaire à chaque sujet. Il est à signaler que le questionnaire a été rédigé en français, ensuite traduit en terminologie arabe simple pour le rendre compréhensible à tous les participants et par conséquent, obtenir des réponses plus ou moins fiables.

Le questionnaire est conçu de sorte à avoir des informations sur tous les six paramètres du confort thermique : la température de l'air, la température des parois, l'humidité relative, la vitesse de l'air dans le local, le métabolisme de la personne, son habillement. De plus, il comprend les paramètres du confort visuel qui doivent être présents dans une salle de classe pour assurer une bonne ambiance lumineuse aux occupants ; le niveau lumineux de la tâche visuelle et son uniformité, l'absence d'éblouissement, l'absence de réflexions, l'absence d'ombres gênantes, le rendu des couleurs suffisant, et l'absence de contrastes lumineux dans le champ visuel.

Le questionnaire de notre enquête est composé de trois parties : la première est relative à la récolte des informations sur l'espace de travail, à savoir le numéro de la salle de classe et le nombre d'élèves. Et aussi, des informations personnelles comme le sexe, le lieu de résidence, l'âge, le poids, la taille, l'état de santé, la nature

du répondant (enseignant ou élève), le type de vêtement et l'indication de la position assise sur le plan de la salle.

La deuxième partie est dédiée à l'évaluation du confort thermique. Dans laquelle, les répondants indiquent leurs sensations thermiques durant le matin et l'après-midi sur une échelle à 7 points, de très froid (-3) à neutre (0), jusque très chaud (+3). Il est demandé d'identifier les sources d'inconfort thermique, ainsi que la réaction des occupants pour améliorer l'ambiance thermique dans la salle de cours. Et finalement, la fréquentation d'ouvrir les fenêtres et la porte et le moment de la journée où le chauffage est nécessaire.

En ce qui concerne la troisième partie, elle est consacrée à l'évaluation du confort visuel. L'objectif principal des questions est de mettre le point sur la quantité lumière du jour disponible et son homogénéité dans la salle de cours pendant la matinée et l'après-midi. Il est aussi demandé de mettre en exergue les différentes sources d'éblouissement telles que le rayonnement solaire direct, et aussi la réaction des occupants pour améliorer leur environnement visuel.

La plupart des questions nécessitent une seule réponse en sélectionnant la sensation appropriée. Le formulaire du questionnaire est donné dans **l'annexe B**.



Figure 4.24 : Les lycéens en train de répondre aux questionnaires (salle de classe N° 4, lycée Mustapha FERROUKHI).

6. Évaluation quantitative

6.1. Instruments et expérimentation

Les instruments de mesure utilisés lors de notre investigation sont les suivants :



a) Thermo-hygromètre électronique HD 100

b) Thermomètre infrarouge

c) Luxmètre model LX-105

Figure 4.25 : Appareils de mesures utilisés lors des campagnes de mesures.

6.1.1. Thermo-Hygromètre électronique HD 100 [122]

Tableau 4.5 : Spécifications du thermo-hygromètre électronique HD 100.

Paramètre	Unités de mesure	Plages de mesure	Exactitudes	Résolutions
Humidité relative	%HR	5 à 95 %HR	± 2 % de la lecture $\pm 1,8$ % HR	0,1%HR
Point de rosée	° C, °F, K	-20 à + 80 °C	± 2 % de la lecture $\pm 0,3$ °C	0,1 °C
Temperature ambiante	° C, °F, K	-20 à + 80 °C	± 2 % de la lecture $\pm 0,3$ °C	0,1 °C

6.1.2. Thermomètre infrarouge CASON CA380

Le thermomètre infrarouge numérique CASON CA380 laser -32 degrés à + 380 degrés (sans contact) a été utilisé pour obtenir des températures de surfaces [123].

Caractéristiques

- Pointeur Laser pour une visée précise.
- Rétroéclairage pour la lecture dans l'obscurité.
- Mesure de température de surface de l'objet chaud, dangereux ou difficile à atteindre sans contact.
- Plage de température de mesure : -32 °C — 380 ° C.
- Fonction de sélection C °/F °.
- De mesure maximale fonction de mémoire.
- Fonction d'arrêt automatique.
- Automatique fonction de maintien des données.
- Indication de batterie faible.

Spécifications

- Précision : ± 2 °C/ou ± 2 %.
- Résolution : 0,1 °C ou 0,1 °F.
- Émissivité : 0,95 (pré-Set).
- Distance Radio Spot : 12:1.
- Source d'alimentation : batterie 9 V (non incluse).
- Dimensions : 155*105* 38mm.
- Poids : 144 g.

6.1.3. Luxmètre modèle LX-105

Le luxmètre LX105 mesure l'éclairement lumineux jusqu'à 50 000 lux. C'est un modèle semblable au LX-107, mais avec une gamme de mesure plus restreinte. LX-105 dispose d'une sortie RS232 pour connexion à un système informatique. Sa réponse spectrale est conforme aux standards CIE. Ses caractéristiques techniques sont citées ci-dessous [124] :

Tableau 4.6 : Caractéristiques techniques du luxmètre LX105.

Plage de mesure	Précision	Résolution
2000lux	$\pm(4\%+2\text{digits})$	1
20000lux	$\pm(5\%+2\text{digits})$	10
50 000 lux	$\pm(5\%+2\text{digits})$	100

Fonctions

- Mesure de l'éclairement lumineux de 0 - 50 000 lux (3 plages).
- Calcul de l'éclairement relatif en %.
- Rappel des valeurs mini, maxi et moyenne (réinitialisable).
- Fonction « Data Hold » pour figer un relevé à l'affichage.
- Interface RS-232.

Tableau 4.7 : Fonctions du luxmètre LX105.

Affichage	large LCD, digit 13 mm. Réglage manuel du contraste LCD Cycle de mesure : 0,4 sec.
Unités de mesure	lux ou FC (FC =foot-candle, 1 lux=0.0929 FC)
Conditions d'utilisation	0 à + 50 °C (avec HR<80 %)
Détecteur	photodiode au silicium
Alimentation	1 pile 0006P DC 9V Consommation : environ DC 5,3 mA Mise hors tension automatique en cas de non-utilisation prolongée.
Dimensions	180x72x32 mm ; détecteur : 85x52x12 mm
Poids	335 g

6.2. Mesure de l'environnement thermique

Les facteurs physiques du confort thermique ont été évalués dans les espaces d'études sur la base de recherches antérieures [9]. Ensuite, les résultats ont été comparés aux normes de confort thermique, à savoir ISO7730 [125]. Il est à signaler que la chaudière a été mise hors tension nuit et jour tout au long de l'investigation, et ceci en vue d'évaluer uniquement la performance thermique passive des bâtiments scolaires. Les paramètres mesurés sont la température de l'air et le taux d'humidité relative. Ces derniers ont été relevés à l'aide d'un thermo-hygromètre manuel Kimo HD 100. Les températures de surface ont été mesurées au centre des parois (murs intérieurs, sol et plafond), à l'aide d'un thermomètre infrarouge numérique CASON CA380 laser [126]. Les données relatives à la

température extérieure, à l'humidité et à la vitesse du vent, ont été fournies par la station météorologique de Miliana, ayant les coordonnées suivantes : 604 300 Latitude : 36.3 | Longitude : 2,23 | Altitude : 721. Cette station est située à proximité des bâtiments scolaires choisis comme cas d'étude. Tout de même, une sorte d'étalonnage a été effectuée dans cette station météo pour s'assurer de la fiabilité des mesures fournies par les appareils d'investigation avant de débiter les campagnes de mesures.

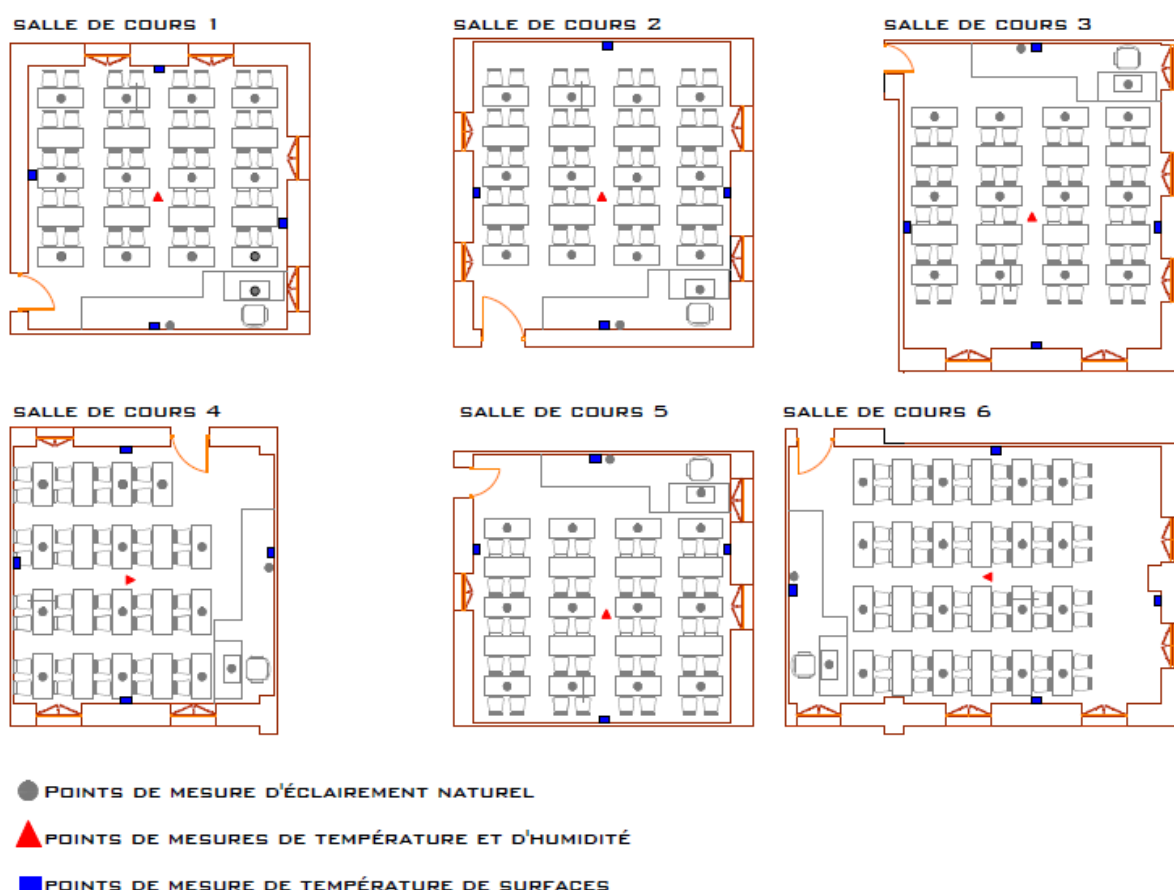
Les mesures ont été effectuées en l'absence et en présence d'occupants, sans système de chauffage ou de refroidissement, pendant 3 jours de suite, pour la période froide et la période chaude de l'année scolaire, en l'occurrence, les 2,3 et 4 février au lycée FERROUKHI, les 10, 11 et 12 février au lycée ABDOU, ainsi que les 22, 23 et 24 septembre 2018 pour les deux lycées (voir **tableaux 4.8 et 4.9**). Les mesures ont été prises au centre des salles de classe à une hauteur de 1,1 m avec un intervalle d'une heure, de 8 h à 18 h. Les **figures 4.26 et 4.27** indiquent les points de mesures relatifs à la température et à l'éclairage naturel. On a estimé que la vitesse intérieure était proche de 0 m/s dans toutes les salles de classe, car les fenêtres des salles de classe ont été maintenues fermées pendant les campagnes de mesures, afin de ralentir le transfert de chaleur et garder que l'environnement thermique fourni par l'enveloppe du bâtiment. Un exemplaire de fiche de mesures est présenté en **annexe C**.

Tableau 4.8 : Détails sur les campagnes de mesures de février 2018.

Typologies	Cas d'étude	Paramètres mesurés	Dates de prises de mesures	Conditions	
Typologie de forme compacte à coursive vitrée	Le lycée Mustapha Ferroukhi (7 salles de cours)	T air T surfaces HR	2 février 2018, de 7 h à 18 h	Sans présence d'utilisateurs	Chaudière mise hors tension
			3 février 2018, de 7 h à 18 h	Sans présence d'utilisateurs	
			4 février 2018, de 7 h à 18 h	Avec présence d'utilisateurs	
Typologie de forme éclatée à coursive non vitrée	Le lycée Mohammed Abdou (7 salles de cours)	T air T surfaces HR	10 février 2018, de 7 h à 18 h	Sans présence d'utilisateurs	Chaudière mise hors tension
			11 février 2018, de 7 h à 18 h	Sans présence d'utilisateurs	
			12 février 2018, de 7 h à 18 h	Avec présence d'utilisateurs	

Tableau 4.9 : Détails sur les campagnes de mesures de septembre 2018.

Typologies	Cas d'étude	Paramètres Mesurés	Dates de prises de mesures	Conditions	
Typologie de forme compacte à coursive vitrée	Le lycée Mustapha Ferroukhi (7 salles de cours)	T air T surfaces HR	22 Septembre 2018, de 7 h à 18 h	Sans présence d'utilisateurs	Sans système de refroidissement
			23 Septembre 2018, de 7 h à 18 h	Avec présence d'utilisateurs	
			24 Septembre 2018, de 7 h à 18 h	Avec présence d'utilisateurs	
Typologie de forme éclatée à coursive non vitrée	Le lycée Mohammed Abdou (7 salles de cours)	T air T surfaces HR	22 Septembre 2018, de 7 h à 18 h	Sans présence d'utilisateurs	Sans système de refroidissement
			23 Septembre 2018, de 7 h à 18 h	Avec présence d'utilisateurs	
			24 Septembre 2018, de 7 h à 18 h	Avec présence d'utilisateurs	

**Figure 4.26** : Points de mesures dans les espaces d'étude (Lycée Mohammed Abdou).

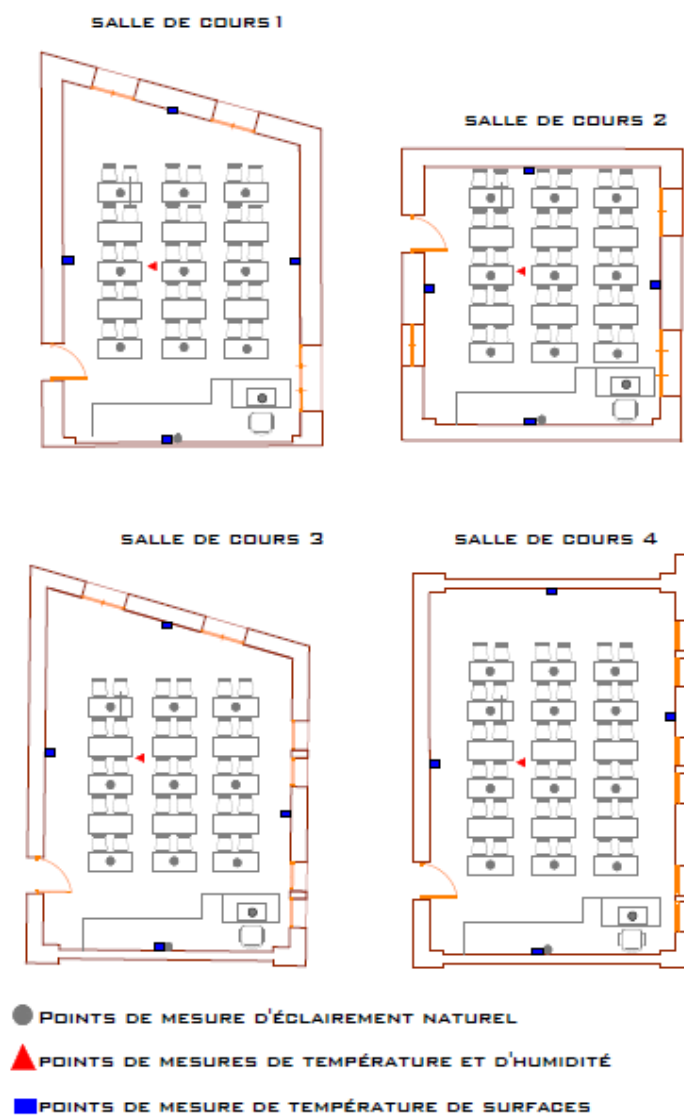


Figure 4.27 : Points de mesures dans les espaces d'étude (Lycée Mustapha Ferroukhi).



Figure 4.28 : Prise de mesures en compagnie de mon camarade Naceur SAHEL.

6.3. Mesure de l'environnement lumineux

La campagne de mesures d'éclairage naturel est basée sur des études antérieures [83, 84] et réalisée à l'aide d'un luxmètre Lurton lx-105 (**figure 4.29**). Ces mesures ont été effectuées dans les salles de classe étudiées, choisies en fonction des critères expliqués précédemment. L'intervalle était 3 fois par jour (9 h-12 h-15h). L'éclairage intérieur a été mesuré au niveau de 14 points de mesure (en moyenne) pour chaque salle ; 3 points pour chaque rang, un point pour le bureau de l'enseignant et un point au milieu du tableau blanc. Après les relevés, l'éclairage moyen E (lux) est estimé dans chacune des salles de classe. En outre, l'éclairage extérieur a été mesuré au centre de la cour de récréation (voir **tableau 4.10**).

L'éclairage naturel a été évalué pendant les vacances scolaires en l'absence des occupants. Les mêmes conditions des jours de travail ont été restituées ; avec persiennes ouvertes et vitrage fermé. La présente étude a également inclus la mesure de l'éclairage artificiel, en la réalisant une fois avec le cas des persiennes fermées.



Figure 4.29 : Relevé de l'éclairage naturel intérieur (à gauche), extérieur (à droite).

Tableau 4.10 : Détails sur les campagnes de mesures de l'éclairage naturel.

Typologies	Cas d'étude	Paramètres mesurés	Dates de prises de mesures	Conditions
Typologie de forme éclatée à coursive non vitrée	Le lycée Mohammed Abdou (7 salles de cours)	E int E ex	Du 22 au 26 Decembre 2016, à 9 h, à 12 h et à 15 h	-Sans présence d'usagers
			Du 21 au 25 mars 2017, à 9 h, à 12 h et à 15 h.	-Persiennes ouvertes et vitrage fermé
			Du 20 au 24 juin 2017, à 9 h, à 12 h et à 15 h.	
Typologie de forme compacte à coursive vitrée	Le lycée Mustapha Ferroukhi (7 salles de cours)	E int E ex	03 et 09 février 2018, à 9 h, à 12 h et à 15 h	-Sans présence d'usagers
			Du 21 au 24 mars 2018, à 9 h, à 12 h et à 15 h.	-Persiennes ouvertes et vitrage fermé
			Du 26 au 30 juin 2018 à 9 h, à 12 h et à 15 h.	

7. Simulation numérique par « Energyplus »

EnergyPlus est un programme de simulation thermique et énergétique des bâtiments. Il est développé par le DOE (Department of Energy, États-Unis), permettant de réaliser des études sur le confort et la consommation énergétique [127]. Ce logiciel a prouvé sa fiabilité dans plusieurs recherches précédentes [128, 129]. L'avantage de ce logiciel est le fait qu'il soit open source, c'est-à-dire, il est téléchargeable de manière gratuite par tout utilisateur potentiel.

La version 1.2.2 d'EnergyPlus a été utilisée dans le présent travail, puisqu'elle est rapide, stable et efficace (voir **figure 4.30**). Au fait, EnergyPlus est basé sur la description d'un bâtiment, permettant de calculer les températures intérieures, l'humidité, les besoins de chauffage, ventilation, climatisation, ombrage, éclairage naturel et besoins d'occupants pour améliorer le confort et réduire la consommation d'énergie. Il permet de créer une base de données sous forme de fichier IDF (input data file) et laisse apparaître des fichiers de sortie (output files) [130].

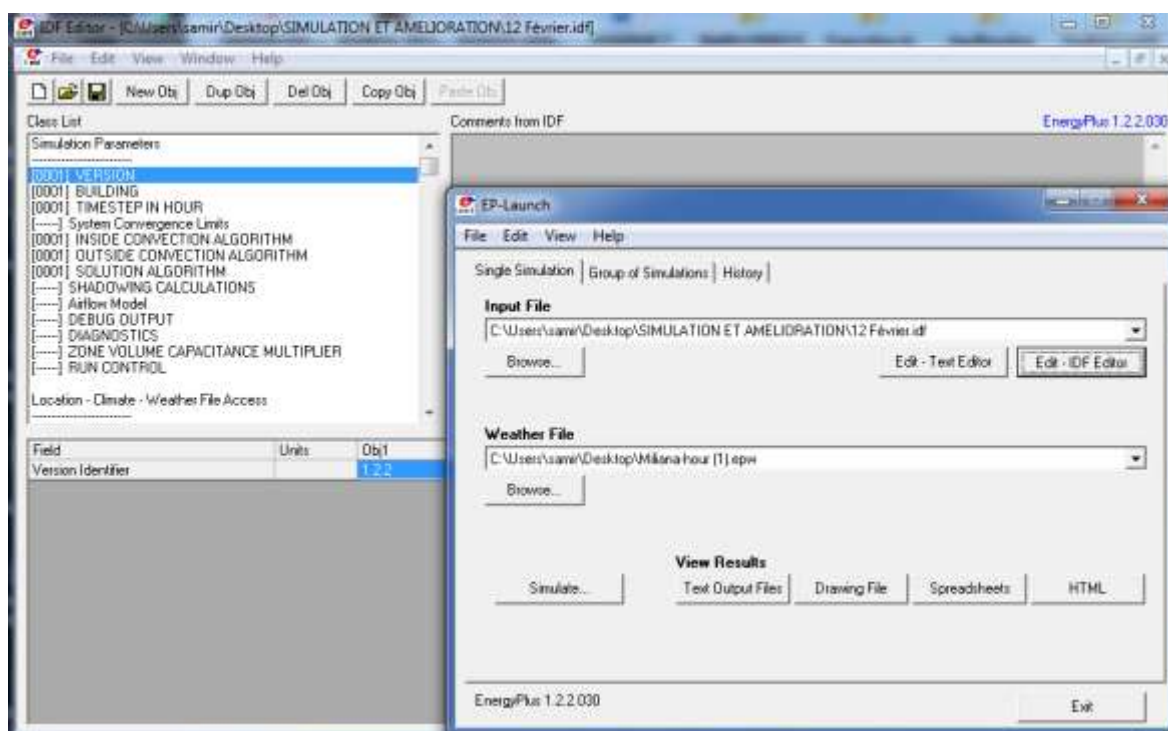


Figure 4.30 : Interface d'EnergyPlus (version 1.2.2).

7. Conclusion

Ce chapitre a porté essentiellement sur la démarche méthodologique adoptée pour atteindre les objectifs de ce travail de recherche. Les principales conclusions qui peuvent être tirées des résultats de la caractérisation thermo-physique des blocs de tuf et la thermographie infrarouge sont les suivantes :

- Par rapport à une technique ancienne de l'époque, les pierres de tuf utilisées pour la construction des murs des cas d'étude donnent de bons résultats en termes de conductivité thermique. Au fait, grâce à ces propriétés thermiques, l'épaisseur de l'enveloppe contribuerait à assurer une bonne isolation thermique et un écart significatif entre les températures intérieures et extérieures.
- L'inspection thermographique révèle que les fenêtres des deux lycées causent des pertes de chaleur excessives et des infiltrations d'air significatives entre l'ouvrant et le dormant. Cela pourrait donc influencer grandement le confort thermique des usagers.

- Des défauts d'isolation de toiture ont été constatés, notamment au niveau du second étage du lycée ABDYOU, avec une température de surface de 6,7 °C, et un écart supérieur à 11 °C avec le reste de l'environnement thermique diagnostiqué, alors que, l'écart est à 3 °C au second étage du lycée FERROUKHI. Il faut donc prévoir de reprendre l'isolation thermique du toit, avant la mise en place des panneaux en laine de roche.
- Selon la littérature, Energyplus est un programme capable de simuler de manière fiable les paramètres quantitatifs du confort thermique et visuel.

Deuxième partie : Expérimentation

CHAPITRE 5

INVESTIGATION IN SITU DU CONFORT THERMIQUE

1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats de l'investigation in situ du confort thermique en l'occurrence, les résultats des campagnes de mesures et les réponses des sujets aux questionnaires. En outre, il sera question d'interpréter les résultats obtenus et de mettre en évidence la corrélation qui existe entre l'évaluation qualitative et l'évaluation quantitative. Subséquemment, ce chapitre développe une comparaison entre les deux typologies en termes de confort thermique, et met en exergue les effets des travaux de réhabilitation sur le confort thermique et l'efficacité énergétique dans les deux cas d'étude.

2. Évaluation quantitative

2.1. Lycée Mohamed ABDOU

La **figure 5.1** présente l'évolution de la température de l'air intérieur et de l'humidité relative dans six salles par rapport aux valeurs extérieures, mesurées durant les 10, 11 et 12 février 2018. La chaudière a été mise hors tension, vers 6 h du 10 février 2018, c'est-à-dire, deux heures avant le début de la campagne de mesures, par conséquent, la température de l'air intérieur restera constante plus longtemps dans les salles de classe. A cet effet, les mesures du premier jour d'enquête représentent « la performance thermique active, plutôt que passive du bâtiment scolaire », comme décrite par [33]. Ce jour était caractérisé comme suit. La température de l'air intérieur dans les salles de classe 1.2.3 et 4, a atteint ses valeurs maximales à 14 h, allant de 12,4 °C à 14 °C. Dans les salles de classe 5 et 6, les températures maximales intérieures, 10,3 °C et 12,1 °C, ont été enregistrées respectivement à 8 h, lorsque les conditions météorologiques extérieures étaient à

peu près stables. En fait, la température de l'air extérieur variait entre 1,2 et 3,8 °C, avec une moyenne de 1,9 °C, une humidité relative comprise entre 92 % et 100 %, avec une moyenne de 96 % et une vitesse moyenne du vent de l'ordre de 2 m/s. La température minimale de l'air intérieur de 7,2 °C a été enregistrée à 16 heures dans la classe 6, alors que la température extérieure était de 3,1 °C.

La deuxième journée d'enquête était le 11 février 2018, se caractérisait par un temps très froid et des chutes de neige. La température de l'air extérieur était dans l'intervalle de -1,6 à 7,1 °C, avec une moyenne de 3,3 °C, l'humidité était dans la plage de 79 % et 100 %, avec moyenne de 88 %. La vitesse moyenne du vent était de l'ordre de 2 m/s. En ce qui concerne le microclimat à l'intérieur des salles de classe. Dans les salles du premier étage (1, 2,3 et 4), les températures minimales ont été relevées de 8 h à 9 h, allant de 8 à 10 °C, correspondant à des niveaux d'humidité relative de 55,4 % à 48,9 %. De 10 h à 18 h, les températures se sont élevées en dessus de 10 °C et atteignant presque les 12 °C. Dans les salles du deuxième étage (5 et 6), les températures étaient très basses par rapport au premier étage. Elles étaient presque stables pendant toute la journée d'investigation, avec une minimale de 5,9 °C, correspondant à 66,2 % et une maximale de 9,3 °C, correspondant à 55,3 %.

La troisième journée d'enquête était le 12 février 2018. Elle était caractérisée par une température de l'air extérieur comprise entre 5,7 et 10,4 °C, avec une moyenne de 8,8 °C, une humidité relative comprise entre 71 % et 96 %, avec moyenne de 77 % et vitesse moyenne de l'air de l'ordre de 4 m/s. La température de l'air intérieur plus basse a été enregistrée à 8 h avant le début des cours, allant de 7,7 à 10,9 °C, avec une humidité relative de 52,2 % à 66,5 %. De 9 h à 18 h, la température de l'air intérieur était comprise entre 10 °C et 16 °C et était marquée par une série de fluctuations (baisse et augmentation). L'humidité relative variait entre 50 % et 80 %. Cette augmentation de la température de l'air intérieur était due au rayonnement solaire du ciel dégagé.

Il est à signaler qu'il y avait un microclimat différent entre le premier et le deuxième étage. Les températures les plus élevées de l'air intérieur ont été enregistrées dans les salles de classe du premier étage 1, 2, 3 et 4 avec un minimum de : 9,3 °C et un maximum de 16,1 °C, tandis que les températures les

plus basses ont été enregistrées au deuxième étage. Classes 5 et 6 avec un minimum de 7,7 °C et un maximum de 14,2 °C. Les résultats de l'évaluation objective ont confirmé l'évaluation subjective. Les classes 5 et 6 avaient le microclimat le plus inacceptable. Cela était dû à la faible isolation thermique du bâtiment examiné ; de grosses infiltrations d'air froid s'engouffrant par les fenêtres et les panneaux de plafond sous le toit, ce qui a évidemment entraîné une mauvaise performance thermique active dans les salles de classe et une perte de chaleur importante. Selon les normes de confort thermique en classe ISO 7730 [125], la température opérative en hiver devrait être comprise entre 20 °C et 24 °C. L'environnement thermique dans les salles de classe se situe en dehors de la zone de confort.

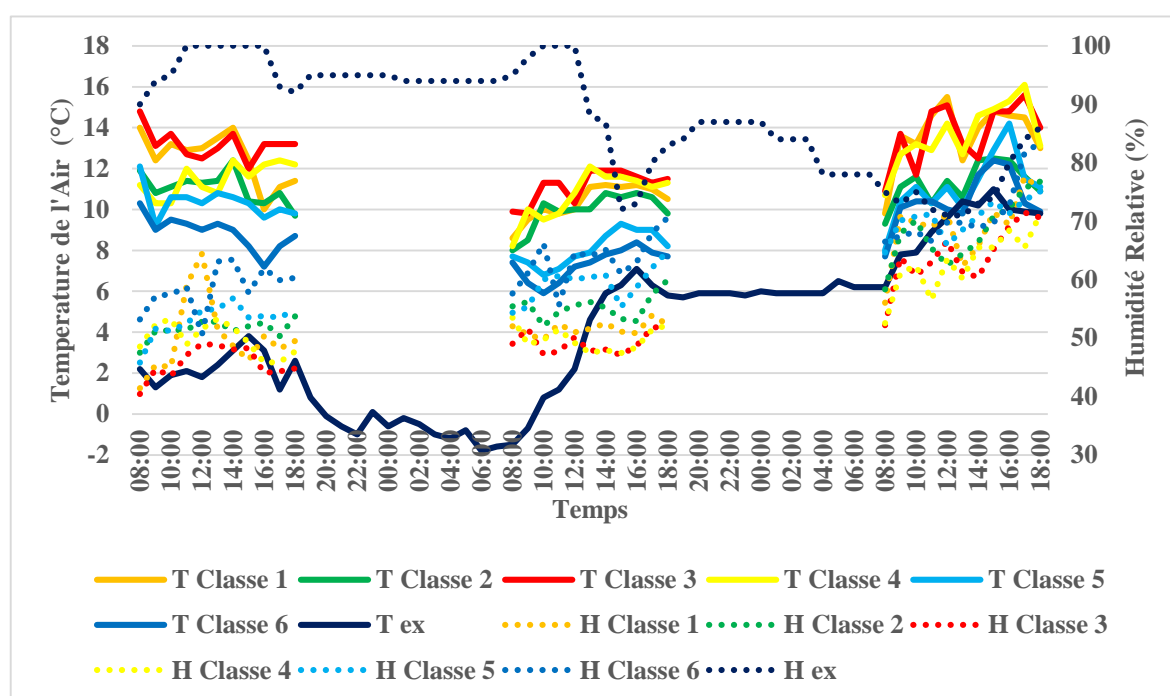


Figure 5.1 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 10, 11 et 12 février 2018 (ABDOU).

La **figure 5.2** met en évidence la variation des températures de surfaces internes par rapport aux températures de l'air extérieur, pendant les 10, 11 et 12 février 2018. Nous pouvons constater qu'il y avait une différence significative, entre les six espaces d'étude. La température de surfaces intérieures des salles de classe 1, 3 et 4, était comprise entre 8 °C et 14 °C, et était supérieure à la température de l'air extérieur au cours des trois journées d'enquête de l'hiver. De

l'autre côté, la température des surfaces intérieures dans les salles de classe 2,5 et 6, variait entre 2 °C et 10 °C, et était uniquement supérieure à la température de l'air extérieur, au premier jour de l'enquête (en raison de la performance thermique active du bâtiment). Elle se mettait à être inférieure, à partir de 12 h du deuxième jour d'enquête et le troisième jour d'enquête. Cela était dû à l'influence des conditions extérieures froides pendant la nuit sur l'enveloppe du bâtiment. En conséquence, les surfaces internes (murs, fenêtres, sols et toit) sont restées froides pendant longtemps et leur température de surfaces était inférieure à la température de l'air extérieur (le troisième jour d'enquête était marqué par un temps relativement ensoleillé après deux jours de neige). Au fait, l'écart de température des surfaces intérieures et celle de l'extérieur a atteint un maximum de 4,45 °C à 13 h, dans la salle de classe 6. Cela correspond tout à fait à l'inspection thermographique, qui a révélé des fuites d'air importantes dans les salles de classe au deuxième étage, et aussi en concordance avec l'évaluation subjective (évaluation du niveau vestimentaire des occupants et le vote de sensation thermique). De plus, ces valeurs de température de surfaces confortent l'idée que les mesures de rénovation ont considérablement réduit, par temps froid, la performance thermique passive de l'enveloppe du bâtiment.

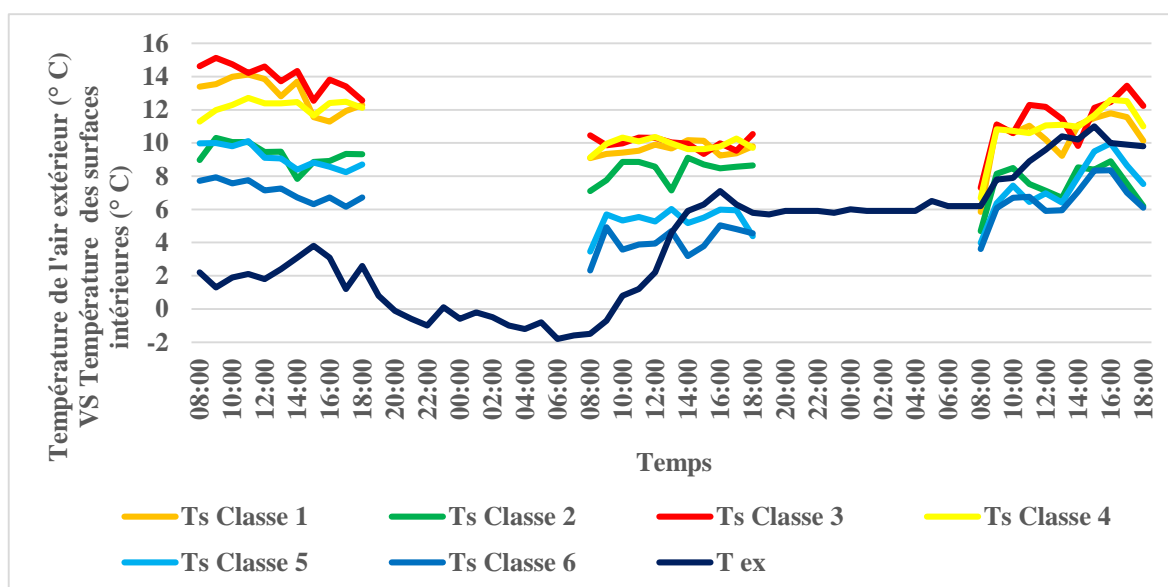


Figure 5.2 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurées les 10, 11 et 12 février 2018 (ABDOU).

La **figure 5.3** met en exergue l'évolution de la température de l'air intérieur et de l'humidité relative dans six salles de classe, par rapport aux valeurs extérieures des 22, 23 et 24 septembre 2018. Pendant cette campagne de mesures, la température de l'air extérieur variait entre 20 à 33 °C, avec une moyenne de 27 °C. L'humidité relative (HR) était dans la plage de 30 % à 60 %, avec une moyenne de 45 %. La température moyenne de l'air intérieur était comprise entre 23 et 28 °C et l'humidité relative entre 40 et 57 %, à l'intérieur des salles de classe.

Les températures intérieures les plus élevées ont été enregistrées dans les salles de classe 5 et 6 au deuxième étage, avec 28,2 et 28,1 °C, respectivement. Selon les normes de confort thermique en salle de classe, ISO 7730 [125], la température opérative en été devrait être comprise entre 23 °C et 26 °C. Par conséquent, les conditions thermiques de ces salles étaient en dehors de la zone de confort. Cela a confirmé les résultats de l'évaluation subjective. Les salles de classe 5 et 6 avaient le climat intérieur le plus inacceptable. Cela était dû à l'impact du climat extérieur chaud sur les conditions intérieures, qui a augmenté la température de surfaces des panneaux de laine de roche, installés sous le toit. Ceci a mené à une augmentation de la température opérative dans ces salles de classe.

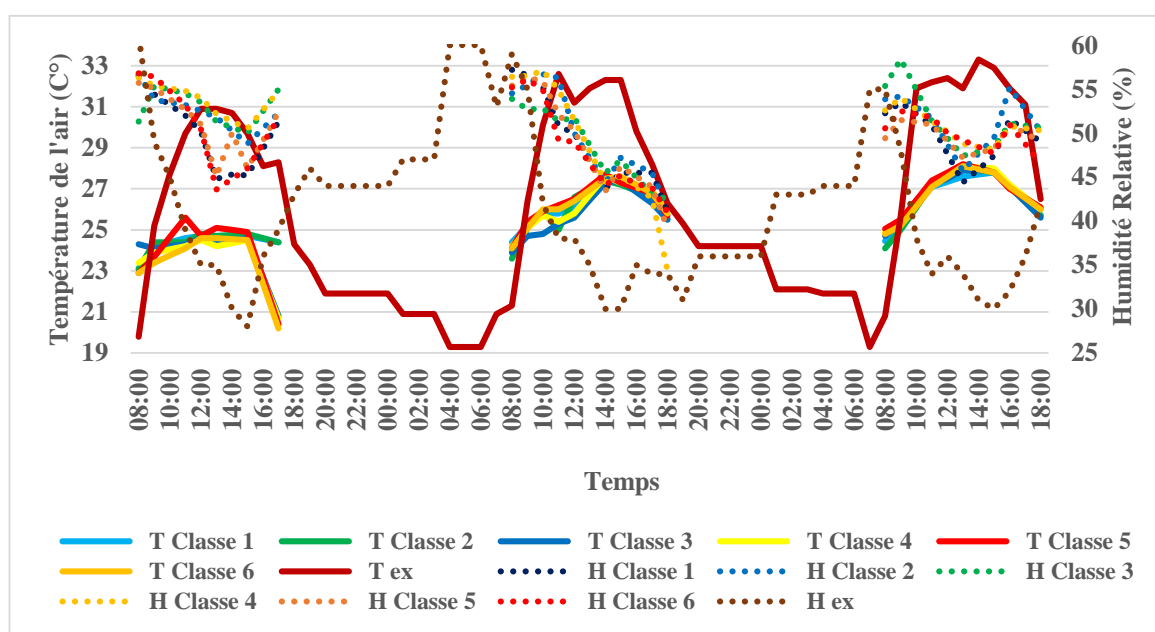


Figure 5.3 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 22, 23 et 24 septembre 2018 (ABDOU).

La **figure 5.4** affiche les températures de surfaces internes, par rapport à la température de l'air extérieur des 22, 23 et 24 septembre 2018. On peut constater qu'il y avait bonne concordance entre la croissante ou la décroissante de température de l'air extérieur et celle des surfaces intérieures. Néanmoins, il y avait une différence entre les salles de classe du premier et du deuxième étage. La température des surfaces internes a atteint une différence d'environ 3 °C à 11 h entre la salle de classe la plus fraîche (N° 3) et la classe la plus tiède (N° 5), avec une température moyenne de surface, de l'ordre de 24,35 °C à 27,23 °C, respectivement. Cela était dû principalement à la température de la surface du toit, atteignant une valeur de 31,9 °C à 14 h, dans la salle de classe 5 (deuxième étage), contre 23,8 °C mesurés dans la salle de classe 3 (premier étage). Une fois encore, ces valeurs de température de surfaces étaient tout à fait conformes au vote de sensation thermique des lycéens et confortent l'idée que les mesures de rénovation ont engendré, par temps chaud, un impact négatif sur la performance thermique passive de l'enveloppe du bâtiment.

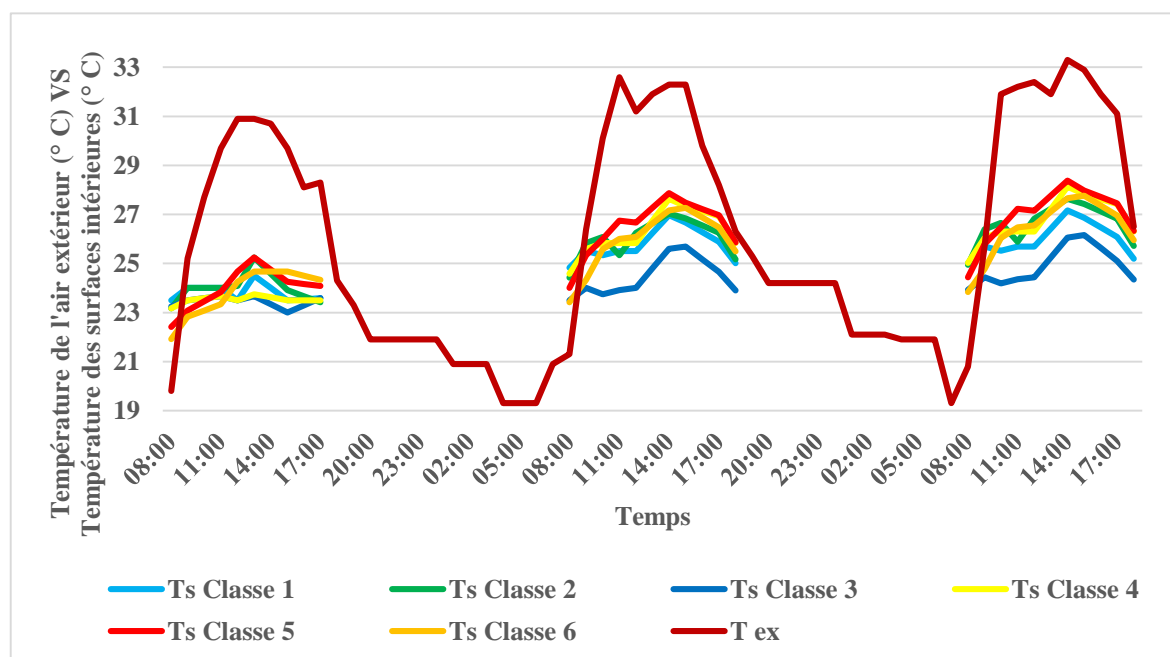


Figure 5.4 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurée les 22, 23 et 24 septembre 2018 (ABDOU).

2.2. Lycée Mustapha FERROUKHI

La **figure 5.5** illustre la variation de la température de l'air intérieur et de l'humidité relative dans quatre salles de classe, par rapport aux valeurs extérieures, mesurées durant les 2, 3 et 4 février 2018. À l'instar du lycée Abdou, la chaudière a été mise hors tension avant le début de la campagne de mesures, et ceci a eu lieu vers 18 h du 1er février 2018, c'est-à-dire (14 heures avant le début de l'enquête). À cet effet, la température de l'air intérieur sera maintenue élevée plus longtemps dans les salles de classe, en raison notamment de la chaude tuyauterie. Et du coup, les mesures du premier jour d'enquête mettent en évidence « la performance thermique active, plutôt que passive du bâtiment scolaire ». Ce premier jour était caractérisé comme suit. Les températures maximales sont relevées vers 8 h à l'intérieur des salles de classe 1.2.3 et 4, avec des valeurs, allant de 15 °C à 17,2 °C. Par ailleurs, le climat extérieur se mettait à refroidir, la température de l'air extérieur a chuté de 8,3 à 1,8 °C, avec une moyenne de 4,5 °C, une humidité relative variait entre 79 % et 94 %, avec une moyenne de 90 % et une vitesse moyenne de vent de 3,6 m/s. La température minimale de l'air intérieur était de l'ordre de 12,7 °C, enregistrée à 13 h dans la classe 4, alors que la température extérieure était de l'ordre de 4 °C.

La deuxième journée d'enquête était le 3 février 2018, se caractérisait par un temps relativement plus froid que la première journée (2 février 2018). La température de l'air extérieur était dans la plage de 7,7 à 0,4 °C, avec une moyenne de 3,8 °C, l'humidité était dans la plage de 78 % et 94 %, avec moyenne de 80 %. La vitesse moyenne du vent était de l'ordre de 3,19 m/s. À propos du microclimat intérieur. Les températures intérieures étaient quasiment stables, caractérisées par séries de baisses et augmentations. Cependant, il y a une différence affichée entre les conditions thermiques du rez-de-chaussée et le second étage. En effet, les températures relevées dans les salles de classe (1 et 2), étaient dans la plage de 13,2 °C à 15,8 °C, correspondant à des niveaux d'humidité relative de 46,8 % à 45,1 %. Tandis que les températures relevées dans les salles de classe 3 et 4 variaient de 10,2 °C à 11,7 °C, correspondant à des niveaux d'humidité de 54 % et 46 %.

La troisième journée d'enquête, était le 4 février 2018, et se caractérisait par une température de l'air extérieur comprise entre 10,5 et 1,9 °C, avec une moyenne de 7,1 °C, une humidité relative comprise entre 84 % et 40 %, avec moyenne de 60 % et une vitesse moyenne de l'air de l'ordre de 1,7 m/s. Les températures de l'air intérieur les plus basses ont été relevées à 8 h avant le début des cours, allant de 10,3 à 14,2 °C, avec une humidité relative de 51,3 % à 46,1 %. De 9 h à 18 h, les températures de l'air intérieur étaient comprises entre 12 °C et 16 °C et étaient caractérisées par une série de fluctuations (baisse et augmentation). L'humidité relative variait entre 40 % et 60 %. Cette augmentation de température de l'air intérieur était due au rayonnement solaire du ciel dégagé et aussi les gains internes des usagers.

En fait, il convient de noter que le microclimat du rez-de-chaussée est différent du deuxième étage. Les températures les plus élevées de l'air intérieur ont été relevées dans les salles de classe du rez-de-chaussée 1 et 2 avec un minimum de : 12,9 °C et un maximum de 16,1 °C, alors que les températures les plus basses ont été enregistrées au deuxième étage, en l'occurrence, les salles de classe 3 et 4 avec un minimum de 10,3 °C et un maximum de 16,1 °C. Les résultats de l'évaluation objective sont en concordance avec l'évaluation subjective. Les classes 3 et 4 avaient le microclimat le plus inacceptable. Cela était dû à la faible isolation thermique du bâtiment examiné ; de grosses infiltrations d'air froid s'engouffrant par les fenêtres et notamment le toit, ce qui a évidemment entraîné une mauvaise performance thermique active dans les salles de classe et une perte de chaleur importante. Selon les normes de confort thermique dans les salles de classe ISO 7730 [125], la température opérative en hiver devrait être comprise entre 20 °C et 24 °C. L'environnement thermique dans les espaces d'étude était en dehors de la zone de confort.

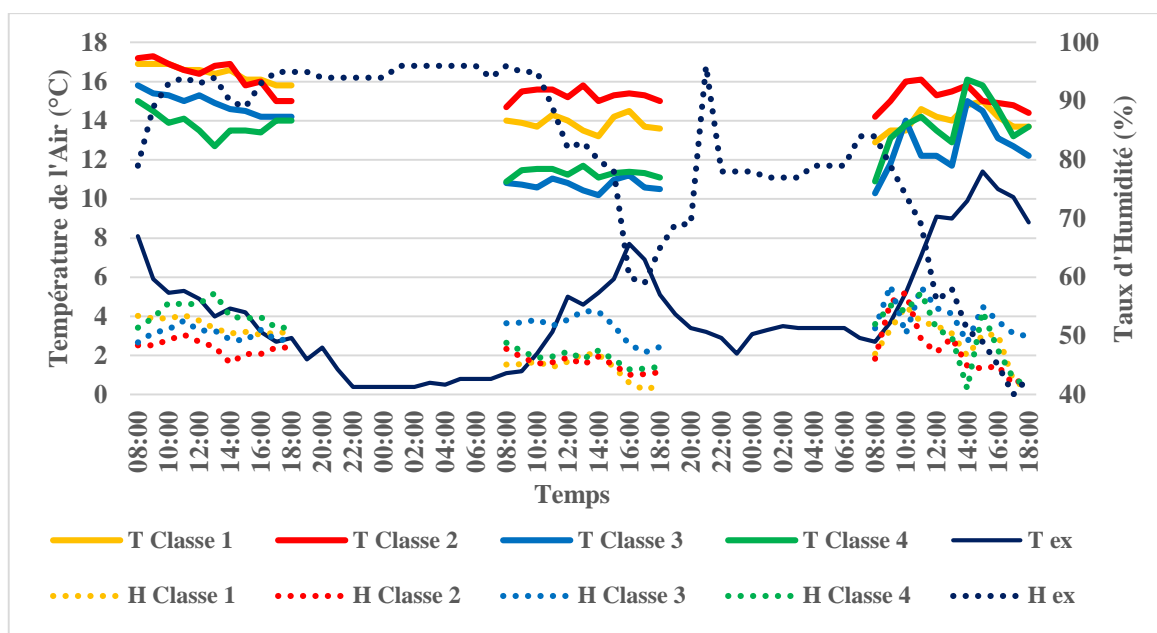


Figure 5.5 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 2, 3 et 4 février 2018 (FERROUKHI).

La **figure 5.6** affiche les températures de surfaces internes par rapport aux températures de l'air extérieur, pendant les 2, 3 et 4 février 2018. Il est à souligner que le thermomètre infrarouge était indisponible lors du premier jour d'investigation, par conséquent, nous avons manqué les températures de surfaces. Ces dernières sont en mesure d'exprimer la performance thermique active de l'enveloppe du bâtiment scolaire. Par ailleurs, il convient de noter qu'il y avait une différence significative, entre les quatre espaces d'étude. La température de surfaces intérieures des salles de classe 1 et 2 était comprise entre 11,5 °C et 15,5 °C, et était supérieure à la température de l'air extérieur au cours des trois journées d'enquête de l'hiver. De l'autre côté, la température des surfaces intérieures dans les salles de classe 3 et 4 variait entre 8 °C et 12 °C, et était supérieure à la température de l'air extérieur, durant les trois jours de l'enquête (en raison de la performance thermique active du bâtiment), mais, il y a un rapprochement entre les températures de surfaces de la classe 3 et les températures extérieures durant le troisième jour d'enquête. Cela était dû à l'impact des conditions extérieures froides pendant la nuit sur l'enveloppe du bâtiment. En conséquence, les surfaces internes (murs, fenêtres, sols et toit) sont restées froides pendant longtemps et leur température était inférieure à celle de l'air extérieur (le troisième jour d'enquête était marqué par un temps relativement ensoleillé après deux jours de temps plus froid).

Au fait, l'écart de température des surfaces entre les salles a atteint un maximum de 8,35 °C, entre les salles 2 et 3. Cela correspond tout à fait à l'inspection thermographique, qui a révélé des fuites d'air importantes dans les salles de classe au deuxième étage, et aussi en concordance avec l'évaluation subjective (évaluation du niveau vestimentaire des occupants et le vote de sensation thermique). De plus, ces valeurs de température de surfaces confortent l'idée que les mesures de rénovation ont considérablement réduit, par temps froid, la performance thermique passive de l'enveloppe du bâtiment.

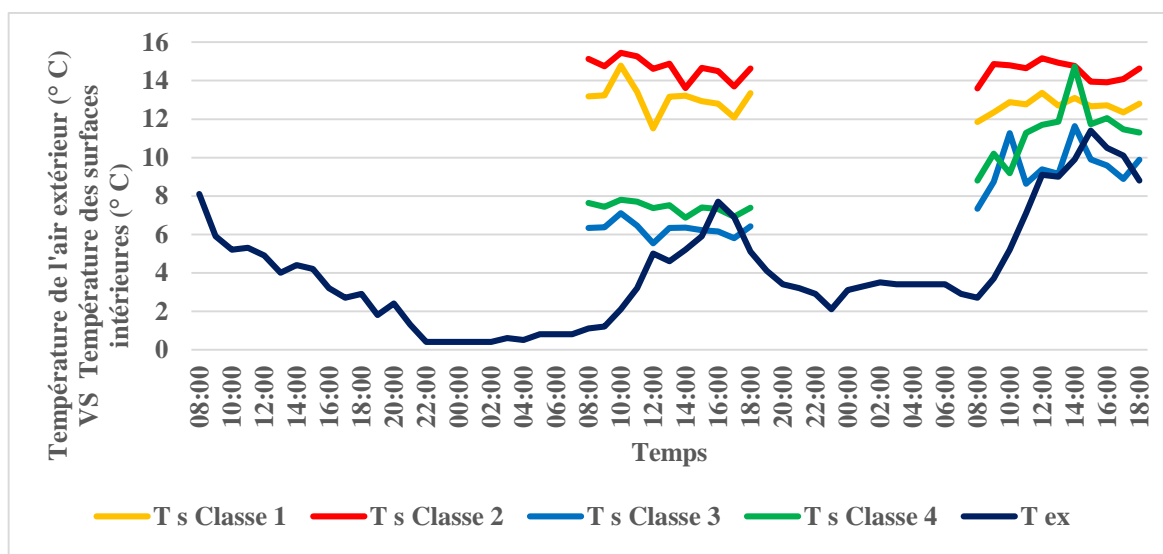


Figure 5.6 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurées les 2, 3 et 4 février 2018 (FERROUKHI).

La **figure 5.7** indique l'évolution de la température de l'air intérieur et de l'humidité relative dans quatre salles de classe, par rapport aux valeurs extérieures des 22, 23 et 24 septembre 2018. En ce qui concerne le climat extérieur, la température de l'air extérieur était dans la plage de 20 à 33 °C, avec une moyenne de 27 °C. L'humidité relative (HR) était dans la plage de 30 % à 60 %, avec une moyenne de 45 %. La température moyenne de l'air intérieur était comprise entre 20 et 27 °C et l'humidité relative entre 44 et 65 %, à l'intérieur des salles de classe.

La température moyenne maximale a été relevée, durant la troisième journée d'enquête, vers 15 h, avec 27 °C correspondant à 49,7 %. Selon les normes de confort thermique dans les salles de classe, ISO 7730 [125], la température opérative en été devrait être comprise entre 23 °C et 26 °C. Par conséquent, les

conditions thermiques de ces salles étaient légèrement en dehors de la zone de confort. Cela a confirmé les résultats de l'évaluation subjective.

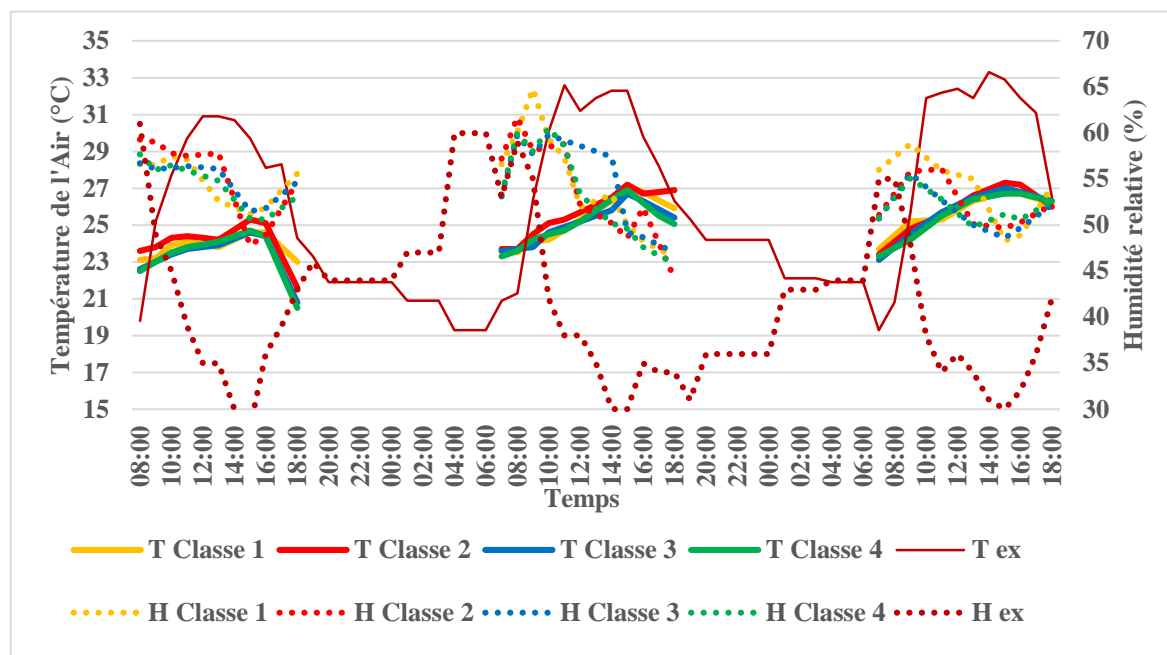


Figure 5.7 : Température de l'air et humidité relative, mesurées les 22, 23 et 24 septembre 2018 (FERROUKHI).

La **figure 5.8** met en évidence les températures de surfaces internes, par rapport à la température de l'air extérieur des 22, 23 et 24 septembre 2018. Il convient d'observer qu'il y avait bonne concordance entre la croissante ou la décroissante de température extérieure et celle des surfaces intérieures. Cependant, il y avait une distinction entre les salles de classe du rez-de-chaussée (1 et 2) et du deuxième étage (3 et 4). De 8 h à 10 h, les températures de la salle 1 et 2 sont supérieures à celles des salles 3 et 4. Cela est dû à l'effet du climat frais durant la nuit, notamment sur les salles du deuxième étage que celles du rez-de-chaussée, et par conséquent les surfaces internes maintiennent davantage cette fraîcheur. De 10 h à 18 h, il convient de constater que les températures de surfaces augmentent dans les salles du deuxième étage. Cela est justifié notamment par la température élevée du toit, atteignant une valeur de 33,6 °C à 15 h, dans la classe 3 (deuxième étage), contre 27 °C mesurée dans la classe 2 (premier étage).

Une fois encore, ces valeurs de température de surfaces étaient tout à fait conformes au vote de sensation thermique des lycéens et confortent l'idée que les

mesures de rénovation ont engendré, par temps chaud, un impact négatif sur la performance thermique passive de l'enveloppe du bâtiment.

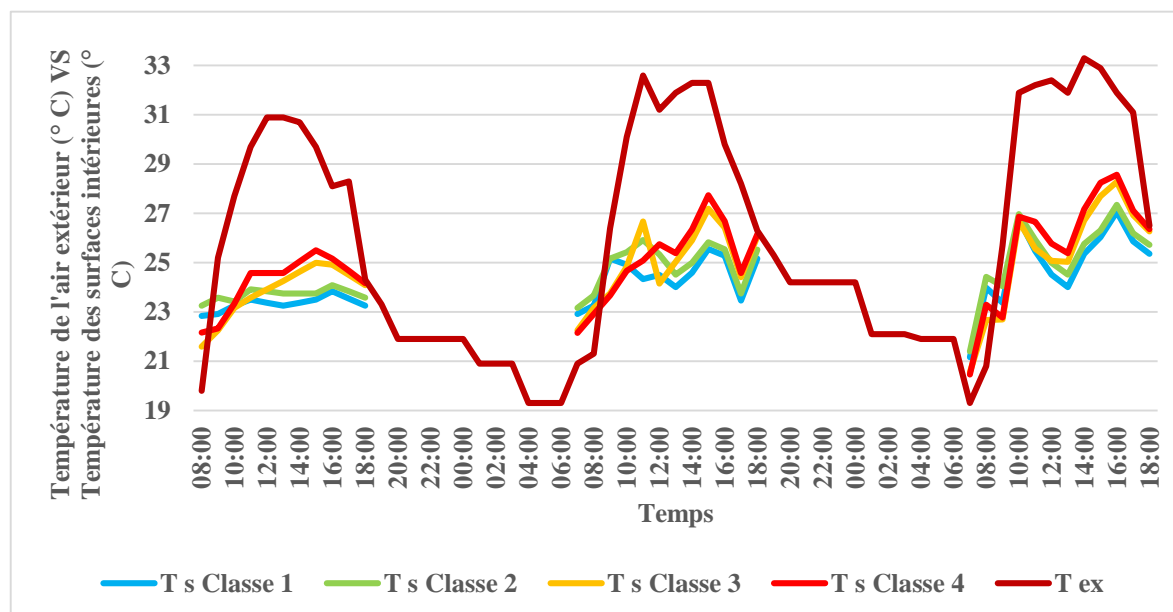


Figure 5.8 : Température de l'air extérieur par rapport à la température des surfaces intérieures, mesurées les 22, 23 et 24 février 2018 (FERROUKHI).

3. Évaluation qualitative

Comme expliqué précédemment, le questionnaire a pour objectif d'obtenir des informations sur la relation personne-milieu, et que nous ne saurions pas les avoir par les compagnes de mesures. À cet effet, ces questions seront développées davantage, en les mettant en relation avec les résultats de l'évaluation quantitative.

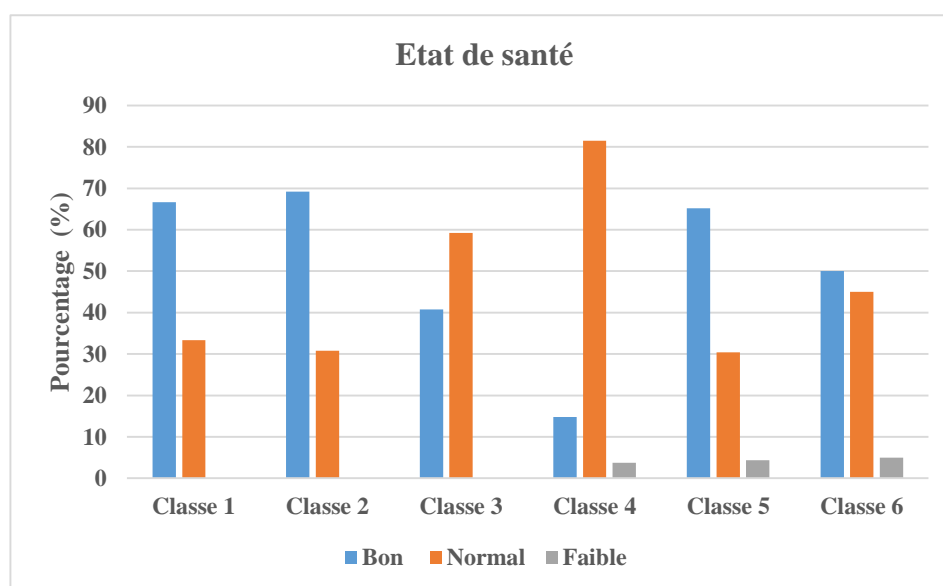
3.1. Lycée Mohamed ABDOU

3.1.1. Réponses au questionnaire du confort thermique de la période froide (février)

En termes d'informations personnelles (**tableau 5.1**), il convient de noter que 54,32 %, des répondants sont de sexe féminin, contre presque 45,68 % de sexe masculin. Cela prouve que ce bâtiment scolaire est majoritairement fréquenté par les filles, exactement à l'image de sa première vocation, ayant été « école normale d'institutrices ». Au sujet de la santé, la **figure 5.9 (a)** montre que l'état de santé varie de normal à bon.

Tableau 5.1 : Statistiques des sujets de la période froide (ABDOU).

Sexe des répondants	Masculin		Féminin	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
➤ Classe 1	17	48,57 %	18	51,43 %
➤ Classe 2	9	60,00 %	6	40,00 %
➤ Classe 3	12	40,00 %	18	60,00 %
➤ Classe 4	9	30,00 %	21	70,00 %
➤ Classe 5	17	54,84 %	14	45,16 %
➤ Classe 6	10	47,62 %	11	52,38 %
➤ Total (162)	74	45,68 %	88	54,32 %

**Figure 5.9, a)**

Au sujet d'étudier au sein d'un bâtiment scolaire historique comme le lycée Abdou, qui est considéré comme l'un des 39 lycées centenaires à travers le territoire national. La plupart des sujets « 54,08 % » n'y accordent pas d'importance (**figure 5.9, b**). Le plus important pour eux, c'est les études et non plus la valeur patrimoniale de l'édifice public. Tandis que 36,66 % des sujets se disent conscients de l'importance de ce bâtiment scolaire historique. Leurs arguments portent sur à la bonne conception architecturale du lycée, construit dans un style néo-classique « vainqueur », donnant ainsi une grandeur à cette ancienne école d'institutrices. De plus, ces répondants se disent fiers d'étudier (élèves) ou dispenser des cours

(enseignants), à l'intérieur de cet ancien lieu de savoir, qui a vu défiler des générations et a formé des cadres de l'état algérien. Quant à 9,25 %, des sujets ont répondu négativement à cette question. Ce qui est dû à une sensation de ségrégation scolaire au sein de l'établissement. Cette réponse est récurrente chez les élèves qui sont déjà passés en conseil de discipline, ou ils ont eu des problèmes pédagogiques avec l'administration.

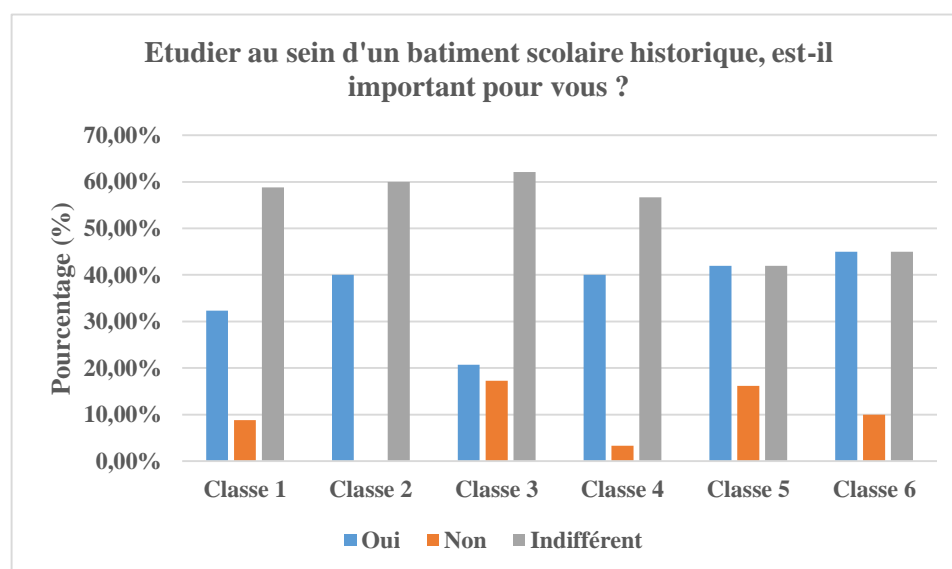


Figure 5.9, b)

En matière d'estimation du niveau d'habillement, la **figure 5.9 (c)** illustre le niveau d'habillement des occupants du bâtiment scolaire, en fonction des températures mesurées lors de la troisième journée d'enquête (le 12 février 2018). Ce niveau d'habillement des occupants exprimé en (Clo), a été estimé sur la base des études antérieures [119]. Les niveaux moyens de Clo montrent une distinction entre les salles de classe. La plupart des étudiants du deuxième étage « plus de 70 % », ont opté pour la plus haute valeur possible de Clo (1,5 Clo). En effet, il était courant de porter un pantalon normal et une chemise épaisse à manches longues + un manteau. Ceci est en accord avec les basses valeurs de températures mesurées dans les classes 5 et 6, comprises entre 8 et 14,2 °C et entre 7,7 et 12,4 °C, respectivement. On peut également constater que la classe 6 avait la plus haute moyenne de Clo (1,38 Clo), dans laquelle plus de 76 % des élèves avaient une isolation vestimentaire élevée (1,5 Clo). Cela a été attribué au fait que cette salle de classe possède une façade plus large orientée vers l'ouest (9,9 m) par

rapport à sa façade sud (6,9 m), ce qui réduit l'intensité des rayons du soleil, qui réchauffent les surfaces internes et les corps des occupants, pendant les heures d'occupation, notamment la période s'écoulant de 8 heures du matin à midi.

Par ailleurs, le même constat a été établi pour les salles de classe du premier étage : environ 43 % des élèves portaient un niveau d'habillement moyen (1 Clo), avec un pantalon normal et une chemise épaisse à manches longues. Cela correspond au niveau de températures mesurées dans les salles de classe 1, 3 et 4, comprises entre 9,8 et 16,1 °C. Cependant, il convient de noter que la classe 2 avait le niveau de Clo, le plus élevé (1,27 Clo) parmi ces salles du premier étage, où plus de 53 % des occupants avaient une isolation vestimentaire élevée (1,5 Clo). Cela était dû, d'une part, aux températures mesurées dans cette classe entre 9,3 et 12,5 °C, d'autre part, à l'infiltration d'air froid par des fenêtres cassées, ainsi qu'au faible gain interne des occupants (faible occupation de la classe 2 avec seulement 15 élèves).

La différence entre le premier et le deuxième étage confirme l'idée que la tenue vestimentaire des occupants était influencée par l'isolation thermique médiocre des classes 5 et 6 par rapport aux classes 1.2.3 et 4. Par conséquent, le premier étage avait un environnement thermique meilleur que celui du deuxième étage.

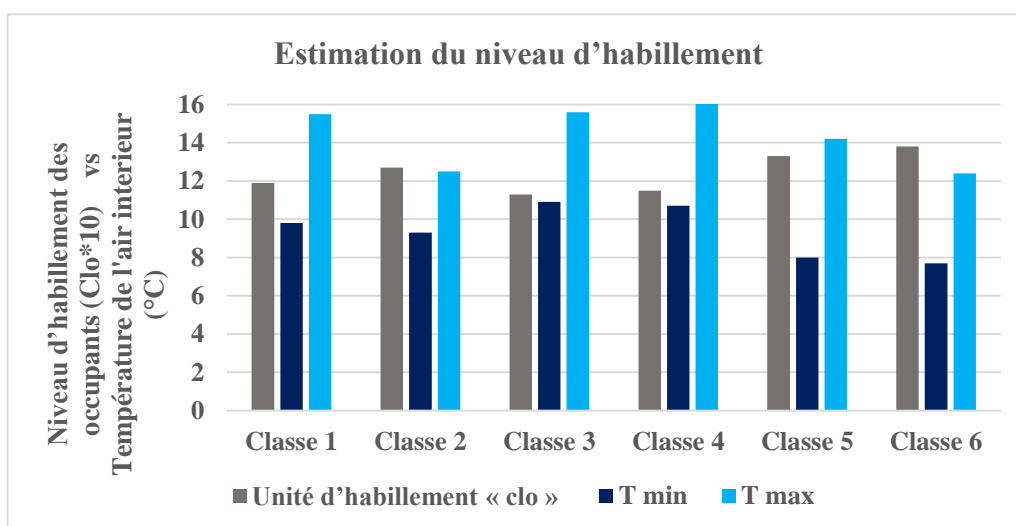


Figure 5.9, c)

Au sujet du vote de sensation de confort thermique, la **figure 5.9 (d)** montre les résultats de vote de sensation thermique, qui vont principalement de -1 (légèrement frais) à -3 (froid). La salle de classe 1 avait le microclimat intérieur le plus acceptable, dans laquelle 60 % des élèves estimant que leur environnement thermique était « froid ». Cette sensation thermique était attribuée d'une part à l'orientation « est/sud », dans la mesure où le rayonnement solaire du matin provoque une augmentation de la température, et d'autre part, les gains internes dégagés par les occupants pendant les heures de travail « forte occupation de cette classe, 36 élèves ».

Environ 35 % des occupants des classes 2, 3 et 4, ont trouvé leur environnement entre « frais » et « froid », tandis que les élèves des salles de deuxième étage avaient majoritairement une sensation de « froid », en particulier dans la salle « 6 », qui est dotée d'un grand volume. 293, 73 m³ et moins d'élèves « 20 », dans laquelle 85,71 % ont eu froid. La sensation thermique au premier étage est meilleure à celle du deuxième étage, est due à l'emplacement sous abri des salles 1,2, 3 et 4, évitant ainsi les infiltrations d'air froid, contrairement aux salles du premier étage, situées sous un toit mal isolé comme si bien constaté par la thermographie.

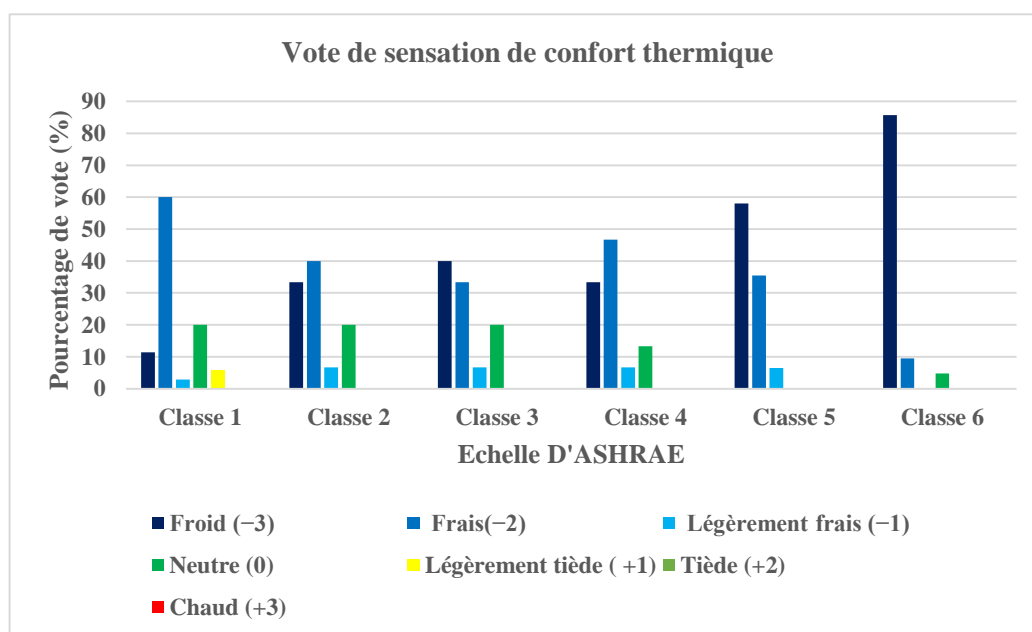


Figure 5.9, d)

Concernant les moments d'inconfort thermique, la **figure 5.9 (e)** met en évidence les moments d'inconfort thermique chez les occupants des 6 salles de classe. Il est à constater que plus de 50 % des sujets des salles du premier étage 1.2.3 et 4 sont inconfortables, uniquement pendant les jours caractérisés par des vagues de froid. En revanche, il y a un pourcentage significatif des sujets des salles du deuxième étage 5 et 6, qui sont inconfortables tout le temps. Principalement la salle 6, qui compte plus de 60 % des occupants, ayant froid tout le temps. Cela est dû à la faible performance thermique active de ces salles du deuxième étage, et leur efficacité énergétique médiocre. En effet, lors de la mise en tension des radiateurs, de nombreux ponts thermiques empêchent d'atteindre la température de confort en hiver qui se situe dans la plage de 20 à 24 °C.

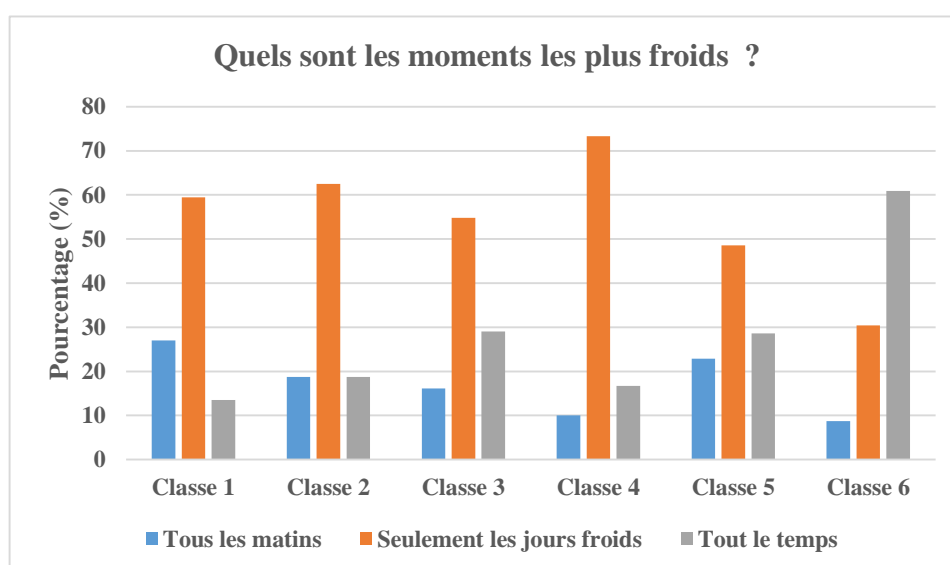


Figure 5.9, e)

Relativement aux sources d'inconfort thermique, la **figure 5.9 (f)** identifie les sources d'inconfort thermique chez les sujets des six salles de cours. Il convient de constater qu'il y a une distinction entre les salles du premier et deuxième étage. Plus de 50 % des sujets des salles 1.2.3 et 4, trouvent que la baisse de température demeure la première source d'inconfort thermique pendant d'hiver. Principalement, la salle 1 avec approximativement 70 %. En revanche, les sujets des salles 5 et 6 mentionnent d'autres sources d'inconfort thermique, à savoir le phénomène de parois froides et les courants d'air. Cette différence est justifiée par la faible isolation

thermique du deuxième étage. Et cela est en concordance avec les basses températures de surfaces relevées au niveau du toit du deuxième étage.

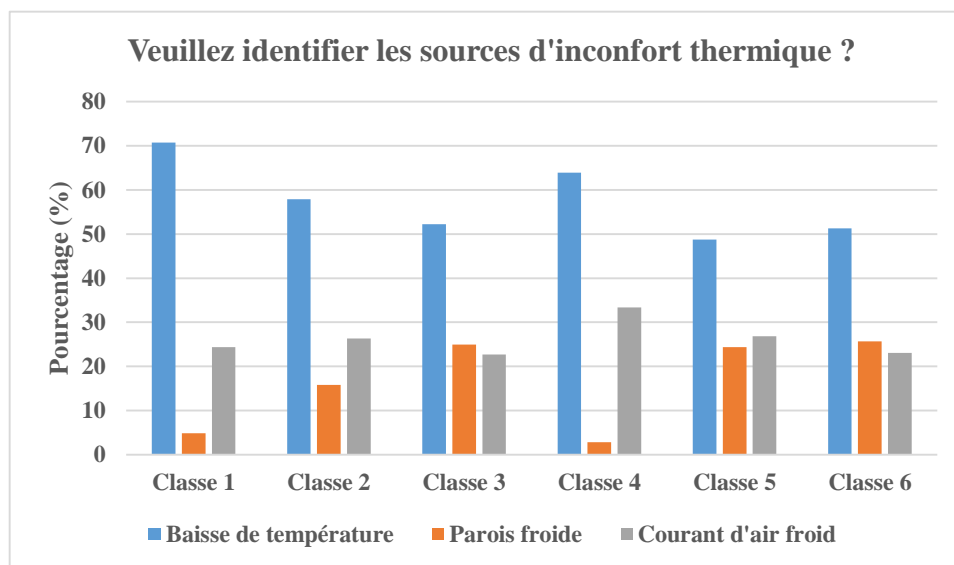


Figure 5.9, f)

Pour les facteurs influents sur le confort thermique, la **figure 5.9 (g)** identifie que la température et les courants d'air sont des principaux facteurs d'inconfort thermique chez les sujets. Tandis que, l'humidité vient en troisième position après la température et les courants d'air.

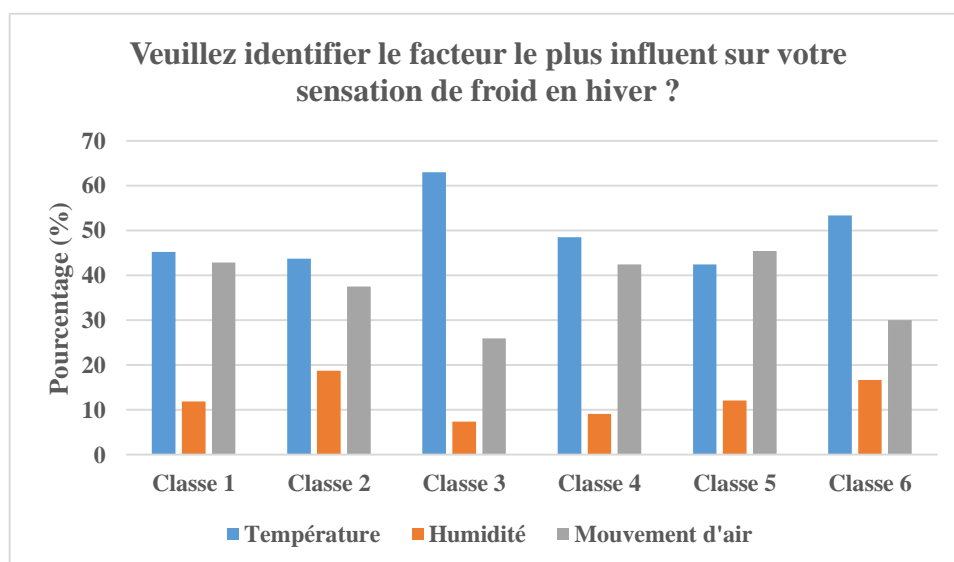


Figure 5.9, g)

À propos de l'utilisation des radiateurs (**figures 5.9, h et 5.9, i**), il convient de dire que le constat est différent entre les salles de classe. Pour les salles (1,2, 4 et 5), plus de 30 % vont pour la réponse de « en occupation ». Pour la salle 3, environ 45 % les utilisent « À certains moments de la journée ». Pour la salle 6, presque 90 % des occupants choisissent la réponse « jamais ». Cela est justifié par l'état des radiateurs qui ne fonctionnent pas en entier, et ne chauffent pas correctement. Par ailleurs, il est important de relever que la chaudière marche de manière continue dans le lycée, même durant les Weekends. Cela est dû à la présence des locataires. Elle est mise hors tension, uniquement selon des périodes déterminées, afin d'assurer son bon fonctionnement. Cependant, l'installation de chauffage au lycée est caractérisée par un schéma de circuit continu, il ne comprend pas de sections qui sont en mesure de chauffer des espaces par rapport à d'autres. Autrement dit, le fonctionnement du lycée ne prône pas l'efficacité énergétique, et il n'a pas une véritable gestion pour minimiser la consommation d'énergie.

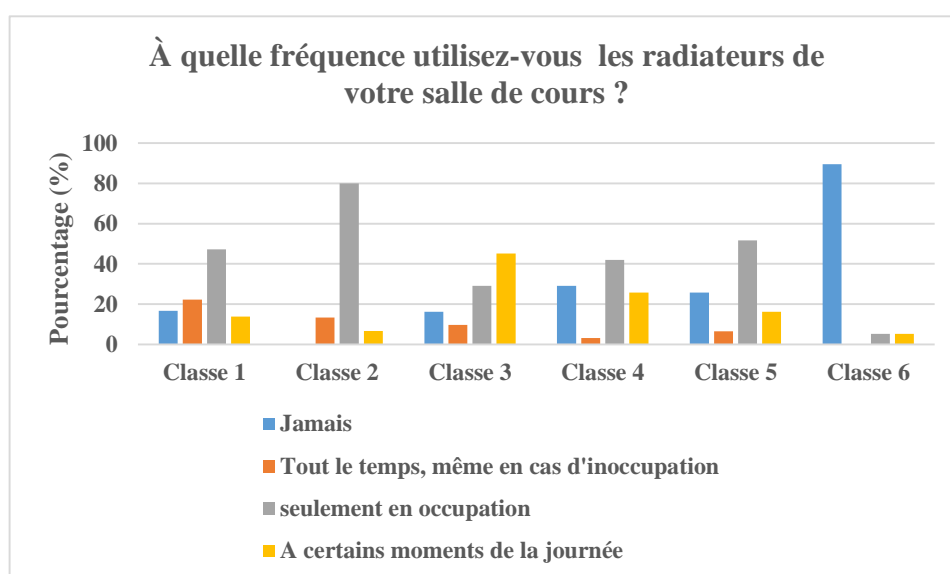


Figure 5.9, h)

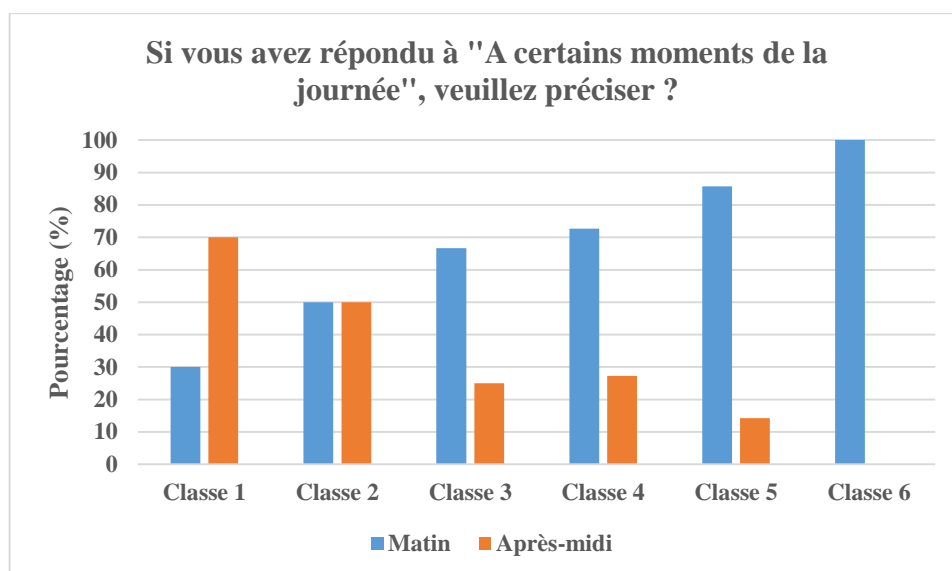


Figure 5.9, i)

Concernant les comportements adoptés par les étudiants en cas d'inconfort thermique, la **figure 5.9 (j)** met en évidence qu'il existe trois gestes principaux, en l'occurrence, la fermeture de fenêtres, la fermeture de porte et l'apport d'un changement à l'habillement en rajoutant par exemple un manteau.

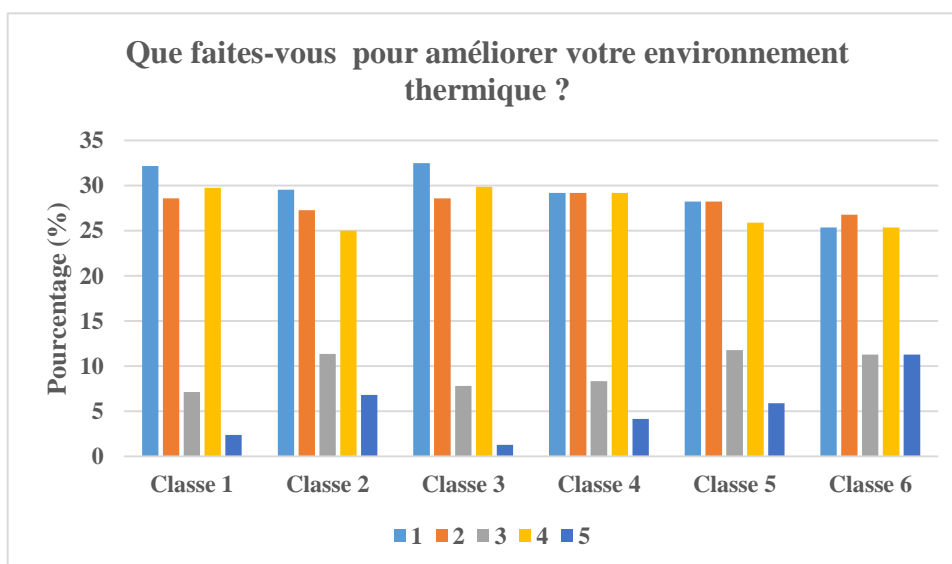


Figure 5.9, j)

Au sujet de l'ouverture des fenêtres, les **figures 5.9 (k) et 5.9 (l)** mettent en exergue que la majorité des occupants (plus de 60 %) procèdent à cela « à certains moments de la journée, si le besoin s'en fait sentir ». Cela est justifié par, l'absence

d'un système de ventilation mécanique, du coup, ouvrir les fenêtres demeure la seule manière pour faire rentrer l'air neuf tout en évacuant l'air vicié.

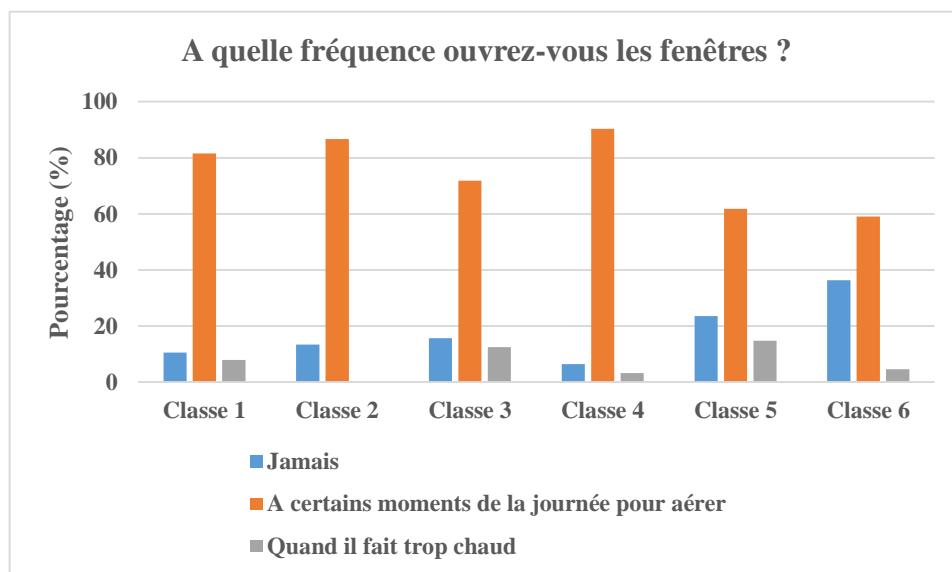


Figure 5.9, k)

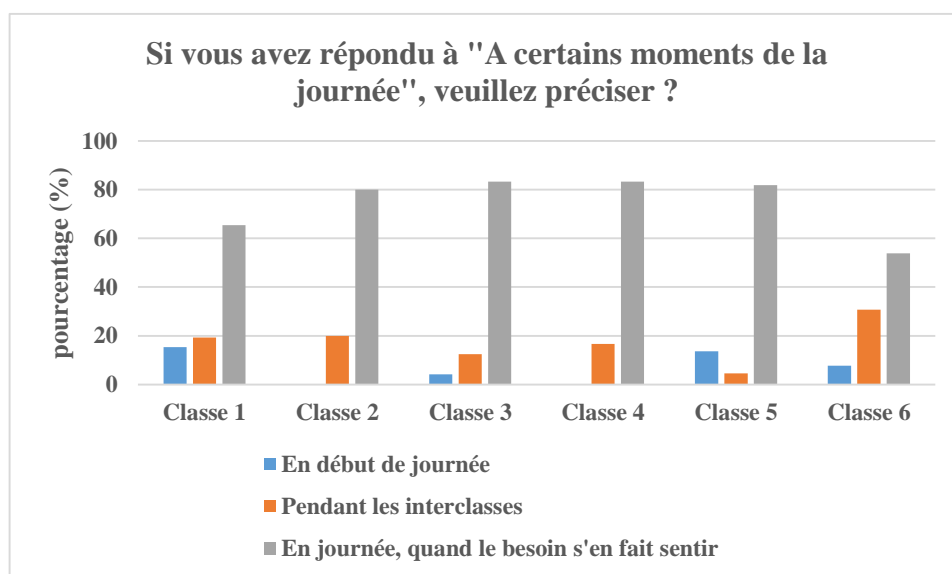


Figure 5.9, l)

3.1.3. Réponses au questionnaire du confort thermique de la période chaude (septembre)

Pour le questionnaire de la période chaude (septembre), le **tableau 5.2** indique que 64 %, des répondants sont de sexe féminin, contre presque 36 % de sexe masculin. Cela prouve encore une fois que ce bâtiment scolaire est majoritairement fréquenté par les filles, exactement à l'image de sa première

vocation, ayant été « école normale d'institutrices ». La **figure 5.10 (a)** montre que l'état de santé des sujets varie de « normal » à « bon ».

Tableau 5.2 : Statistiques des sujets de la période chaude (ABDOU).

Sexe des répondants	Masculin		Féminin	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
➤ Classe 1	8	30,77 %	18	69,23 %
➤ Classe 2	17	56,67 %	13	43,33 %
➤ Classe 3	10	34,48 %	19	65,52 %
➤ Classe 4	6	22,22 %	21	77,78 %
➤ Classe 5	10	50 %	10	50 %
➤ Classe 6	4	19,05 %	17	80,95 %
➤ Total (153)	55	36 %	98	64 %

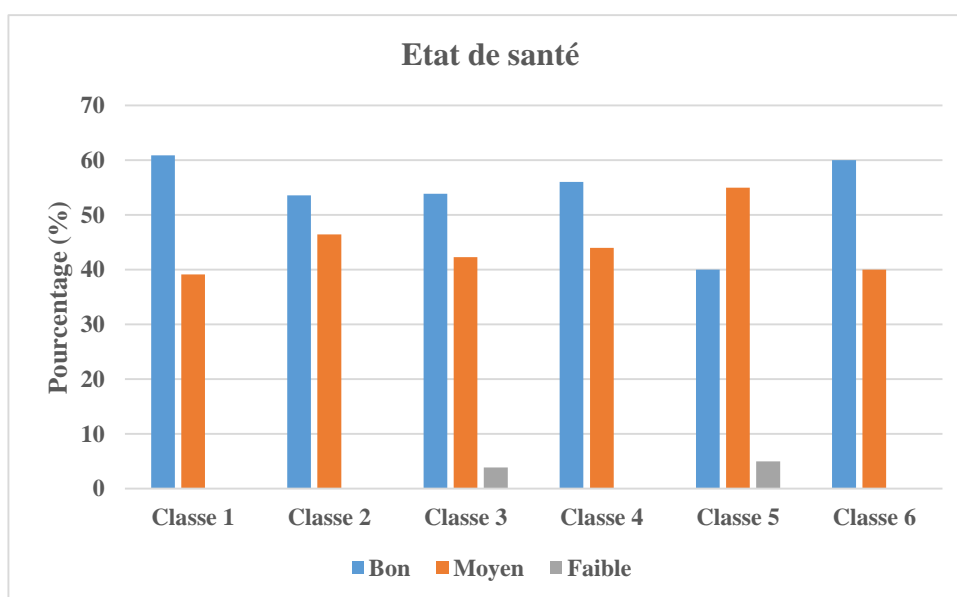


Figure 5.10, a)

En termes du niveau d'habillement, la **figure 5.10 (b)** illustre le niveau d'habillement des occupants du bâtiment en fonction des températures mesurées lors de la troisième journée d'enquête (le 24 septembre 2018). Un comportement similaire des occupants avait été observé dans les six salles de classe. Les élèves portaient souvent des vêtements légers lors des journées chaudes, et du coup, ont choisi la plus faible valeur Clo. Ce dernier variait de 0,46 à 0,58 Clo. Par exemple,

les garçons portaient « un pantalon léger + chemise demi-manche » et les filles un « hijab léger ». De plus, des mesures d'adaptation ont été observées, telles que l'ouverture constante des fenêtres pendant les heures d'occupation, afin de permettre à l'air frais d'entrer dans les salles de classe. Cela était en concordance avec les valeurs de températures mesurées dans les six salles de classe étudiées, comprises entre 23 °C et 28 °C. Ce comportement peut également s'expliquer par l'absence de climatisation dans le bâtiment étudié et la faible performance thermique de l'enveloppe suite aux travaux de rénovation.

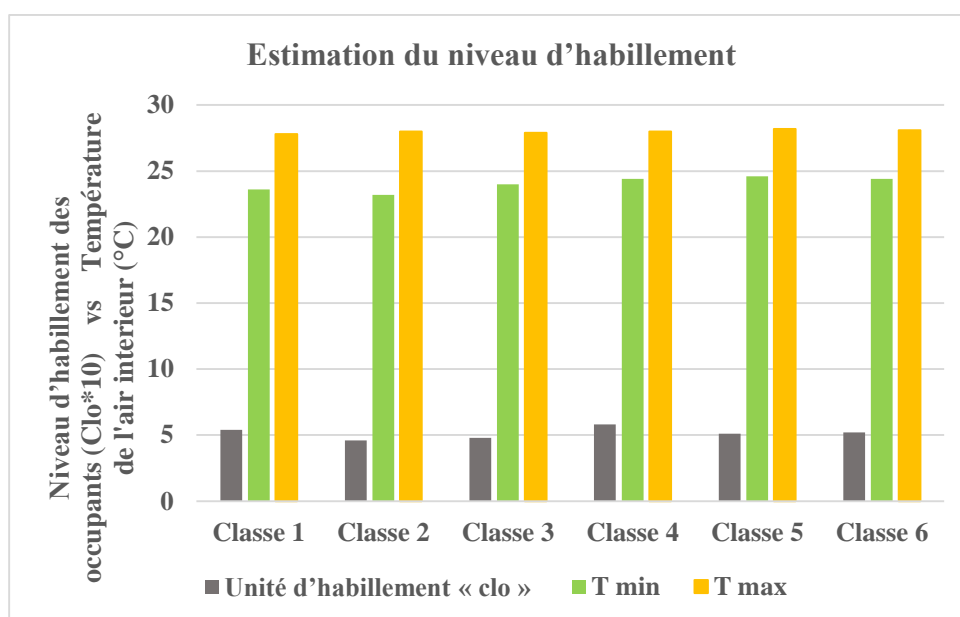


Figure 5.10, b)

À propos de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, la **figure 5.10 (c)**, il convient de constater que plus de 50 % des occupants estiment que l'écart est moyen. Notamment en salle 3 avec environ 93 %. Cela est parfaitement en concordance avec les mesures in situ qui relèvent un écart d'environ 5 degrés.

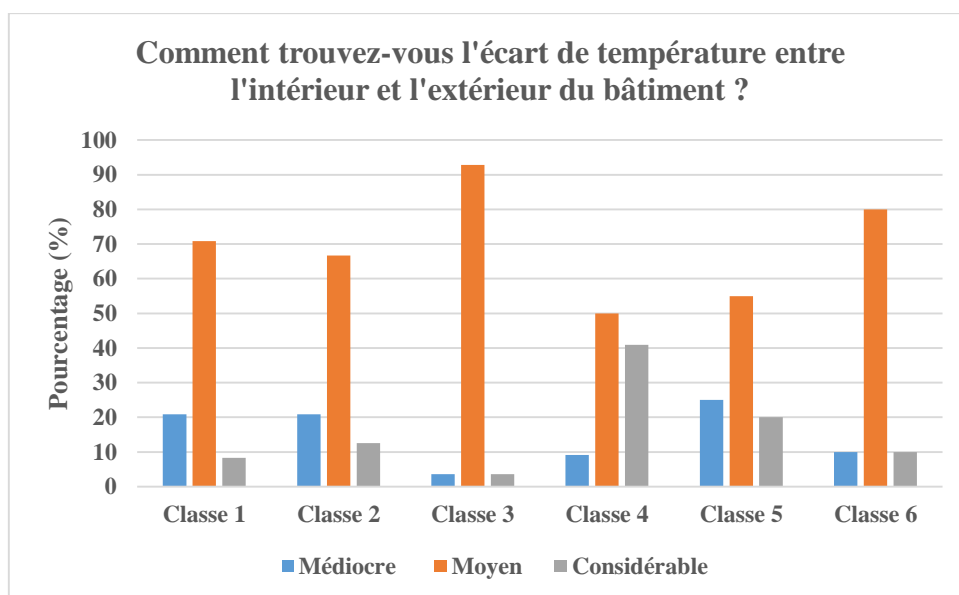


Figure 5.10, c)

Les **figures 5.10 (d) et 5.10 (e)** montrent le vote de sensation de confort thermique. Pendant la matinée, il convient de constater que plus de 56 % des occupants des salles trouvent leurs espaces d'étude, neutre (0). Pendant l'après-midi, la majorité des réponses des sujets en salle 1, 2,3 et 4 varient de neutre (0) à tiède (+1). Tandis que, ceux des salles 5 et 6 trouvent en majorité leur environnement thermique de légèrement tiède (+1) à tiède (+2). Cette constatation est en accord avec la campagne de mesures de septembre, qui révèle des températures dépassant les 33 °C au toit, et par conséquent les salles du deuxième étage étaient plus chaudes que celles du rez-de-chaussée.

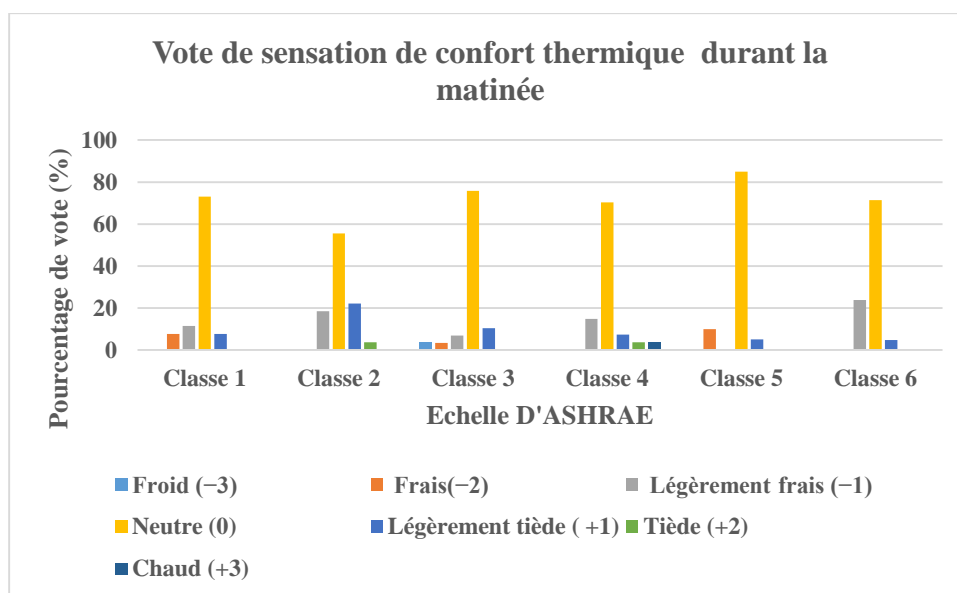


Figure 5.10, d)

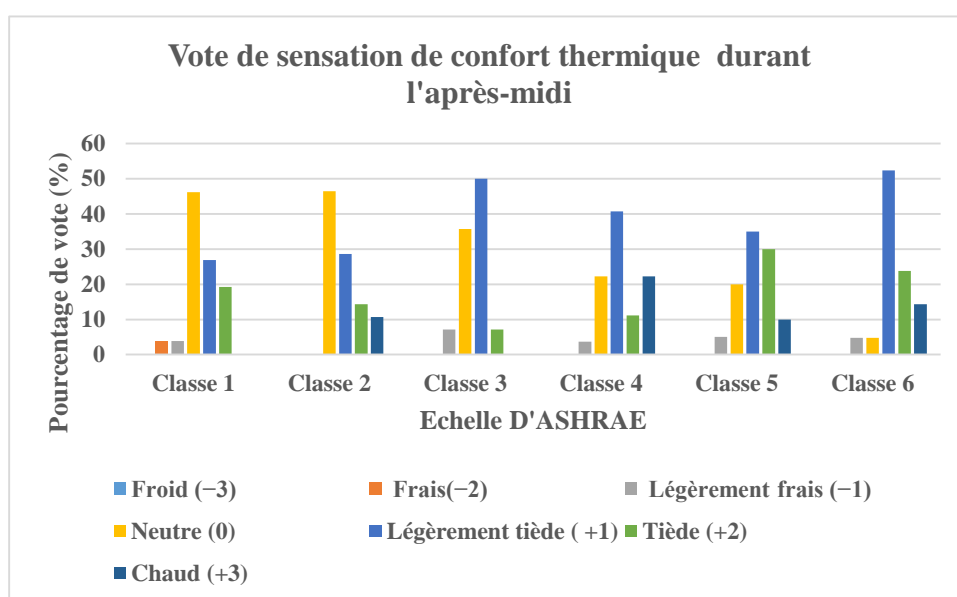


Figure 5.10, e)

À propos des sources d'inconfort thermique, la **figure 5.10 (f)** identifie les sources d'inconfort thermique chez les sujets des six salles de classe. Il convient de constater que plus de 50 % des sujets des salles trouvent que la hausse de température demeure la première source d'inconfort thermique durant la période chaude de l'année scolaire. Principalement, les salles 3 et 5, avec 76 % et 90 %, respectivement. Cela est dû, d'une part, à leur volume moins important que les autres, et d'autre part, au nombre élevé des élèves dedans. Et cela est en

concordance avec les températures élevées, relevées au niveau de ces deux salles de classe. Par ailleurs, les sujets mettent en évidence d'autres sources d'inconfort, à savoir les courants d'air chaud, et l'absence protection solaire.

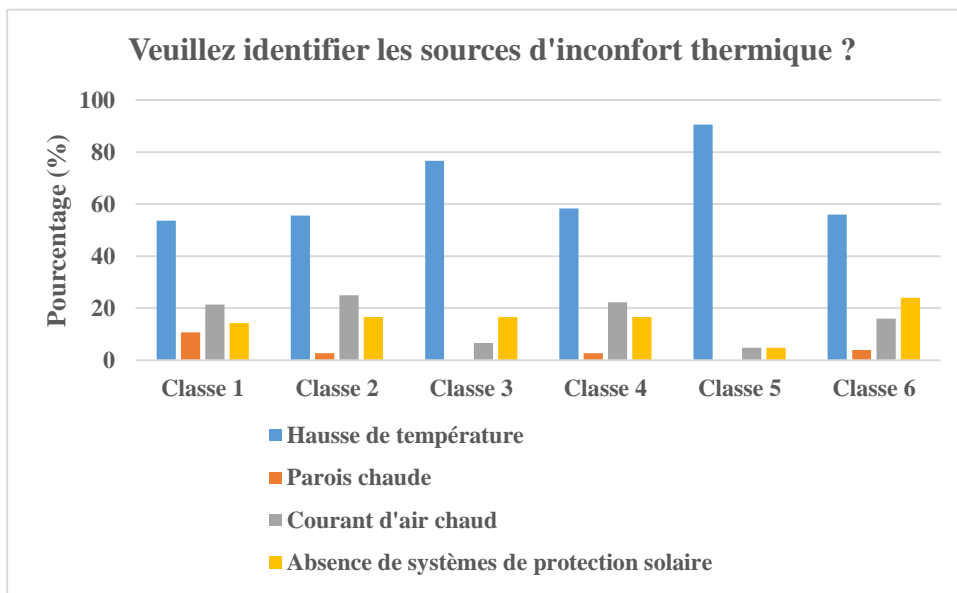


Figure 5.10, f)

Pour la période chaude de l'année scolaire, la **figure 5.10 (g)** identifie que la température et les courants d'air sont des principaux facteurs d'inconfort thermique chez les sujets. Tandis que, l'humidité vient en troisième position après la température et les courants d'air. Par ailleurs, et avec la température qui grimpe à l'intérieur dans les salles de classe, le premier réflexe à adopter par les occupants, c'est d'ouvrir les fenêtres et la porte (**figure 5.10, h**), pour y apporter un peu d'air. Cependant, cela est considéré comme étant une erreur à éviter lorsque l'on veut se rafraîchir. En effet, les températures extérieures sont toujours plus élevées que celles des classes. Et cela pourrait conduire à plus d'inconfort thermique.

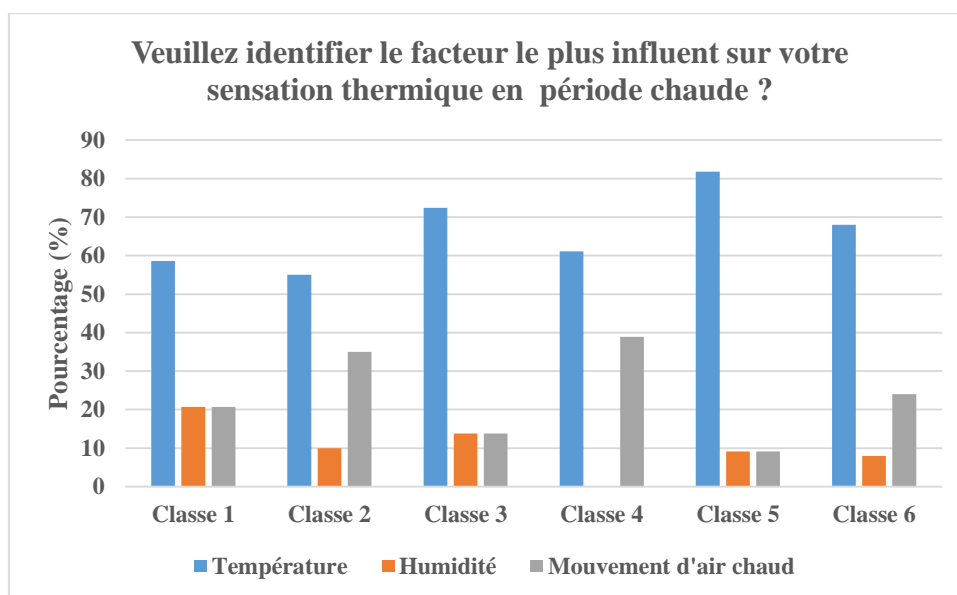


Figure 5.10, g)

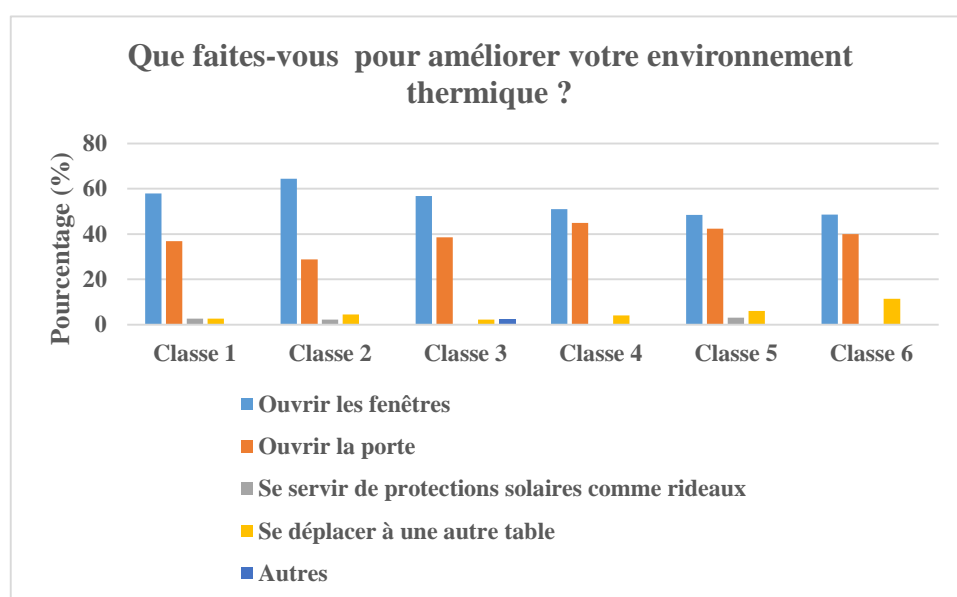


Figure 5.10, h)

Pour ce qui est de la fréquence d'ouvrir les fenêtres en période chaude, il convient de constater que plus de 50 % des élèves recourent à ouvrir les ouvertures de façon permanente (**figure 5.10, i**), cela est dû à l'absence de climatiseurs dans les salles de classe. Quant à la qualité de l'air (**figure 5.10, j**), les sujets en majorité qualifient la qualité de l'air entre acceptable à bonne. Cela est dû à la disposition bilatérale des fenêtres, permettant à l'air de se renouveler aisément.

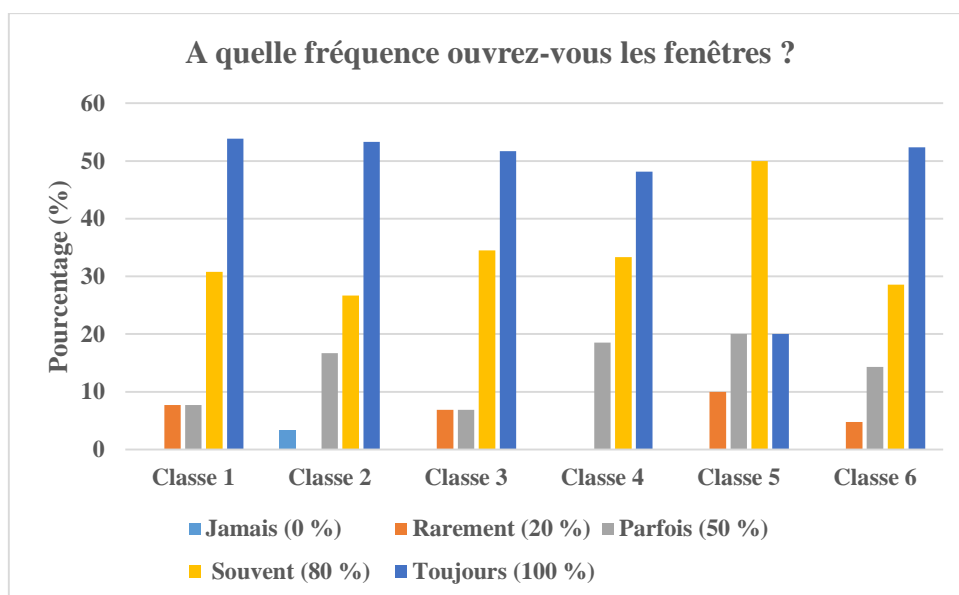


Figure 5.10, i)

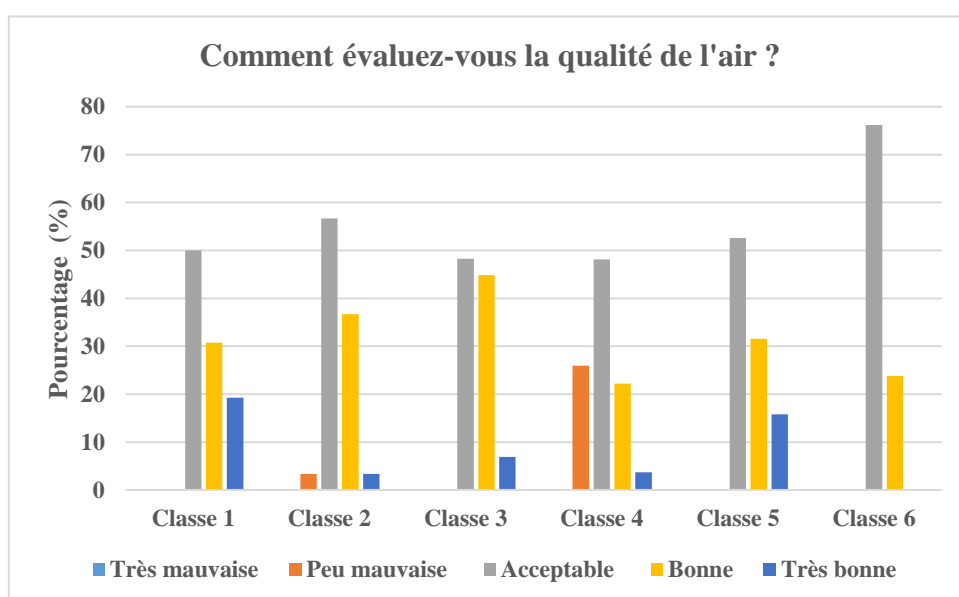


Figure 5.10, j)

La **figure 5.10 (k)** montre le vote de sensation thermique sur l'échelle ASHRAE, le 24 septembre 2018. Il convient de constater que le vote de sensation thermique varie de -2 (frais) à 1 (légèrement tiède) dans les salles de classe 1, 2, 3 et 6, et varie de -1 (légèrement frais) à +3 (chaud) dans les salles de classe 4 et 5. Cette constatation est en concordance avec les températures de surface mesurées lors de la campagne de mesures de septembre, qui révèle des températures de surfaces

élevées sur les panneaux de plafond des salles 5 et 6, à cause de cela, le premier étage était plus frais, que le deuxième étage.

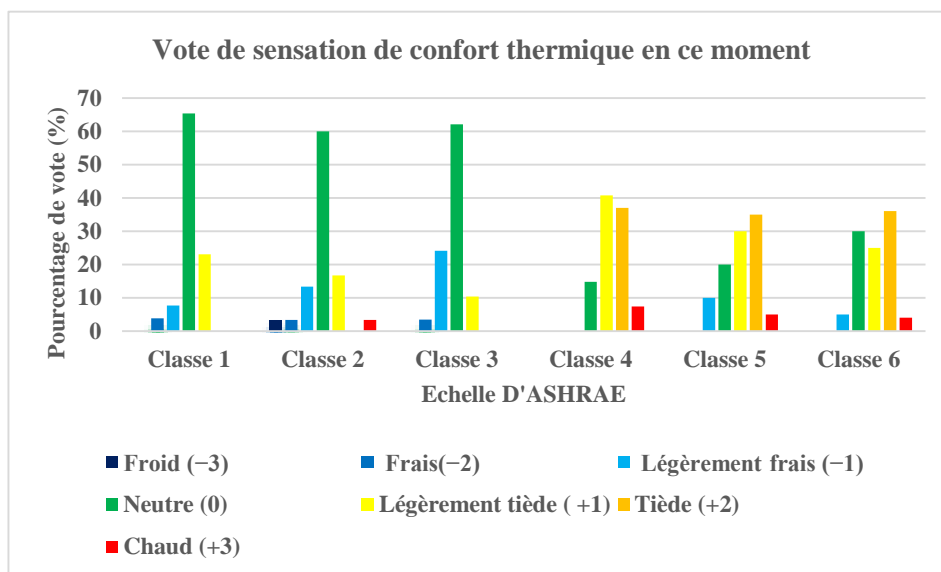


Figure 5.10, k)

Pour la **figure 5.10 (l)**, il convient de dire que les occupants des salles 1, 2, 3,4 et 6 ont donné en majorité des réponses dans la plage positive de confortable, à l'exception de la salle 5, dans laquelle des occupants majoritairement « 47 % » ont répondu avec « légèrement inconfortable ». Cela est dû aux raisons suivantes ; son emplacement au deuxième étage, la salle est moins spacieuse, et le nombre d'élèves important, ce qui fait des températures plus élevées. À propos de la **figure 5.10 (m)**, il est à dire que la majorité des occupants veulent être plus frais, c'est-à-dire une baisse de température. Et cela est en concordance avec les valeurs de températures, qui ont dépassé la limite de la plage recommandée de 26 ° C. Au sujet de la **figure 5.10 (n)**, plus de 95 % des sujets des salles 1, 2,3 et 6 trouvent que la température est acceptable. Également pour les salles 4 et 5, mais avec un pourcentage supérieur à 62 %, alors que, plus de 30 % la trouvent inacceptable. Cela est en accord avec les valeurs de températures, qui n'ont pas trop franchi la limite de confort autorisée en période chaude variant de 23-26 °C. Concernant la **figure 5.10 (o)**, la majorité des sujets estiment que le mouvement d'air est adéquat (0). Cela est en concordance avec la fermeture des fenêtres, faisant que, la vitesse de l'air se rapproche toujours de 0 m/s. Pour ce qui est de l'humidité, la **figure 5.10**

(p) met en évidence que la majorité des sujets la trouvent adéquate (0). Cela est en accord avec les mesures in situ qui relèvent un taux d'humidité de 50 % en moyenne.

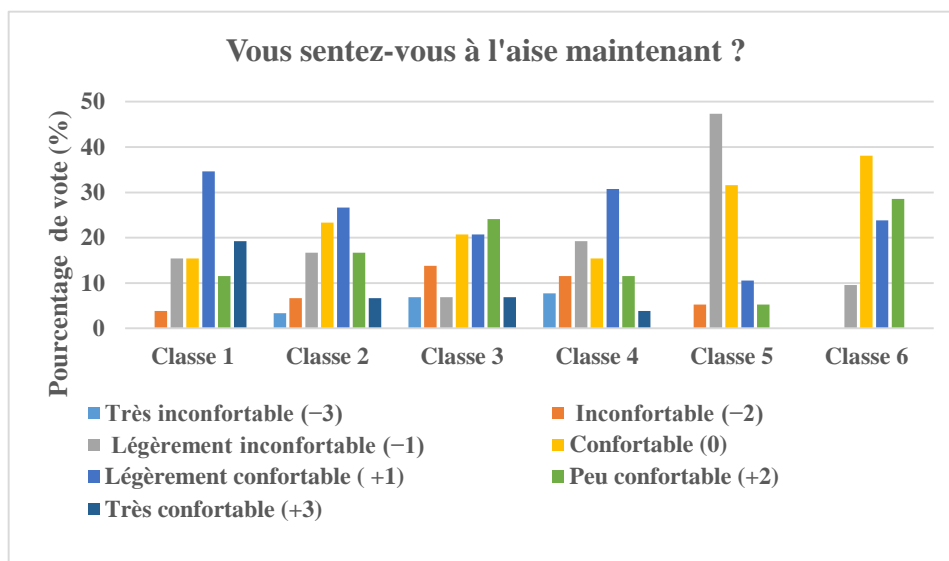


Figure 5.10 (l)

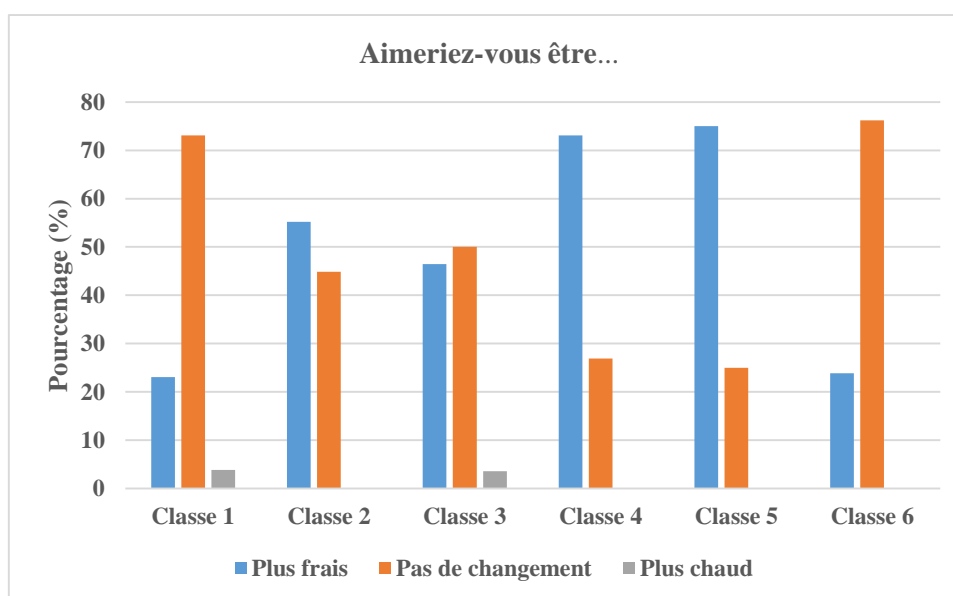


Figure 5.10, m)

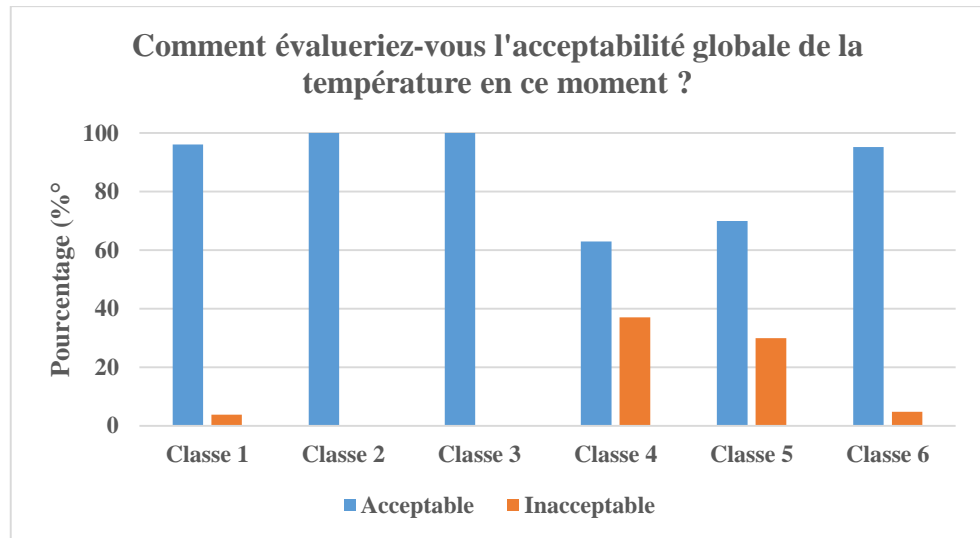


Figure 5.10, n)

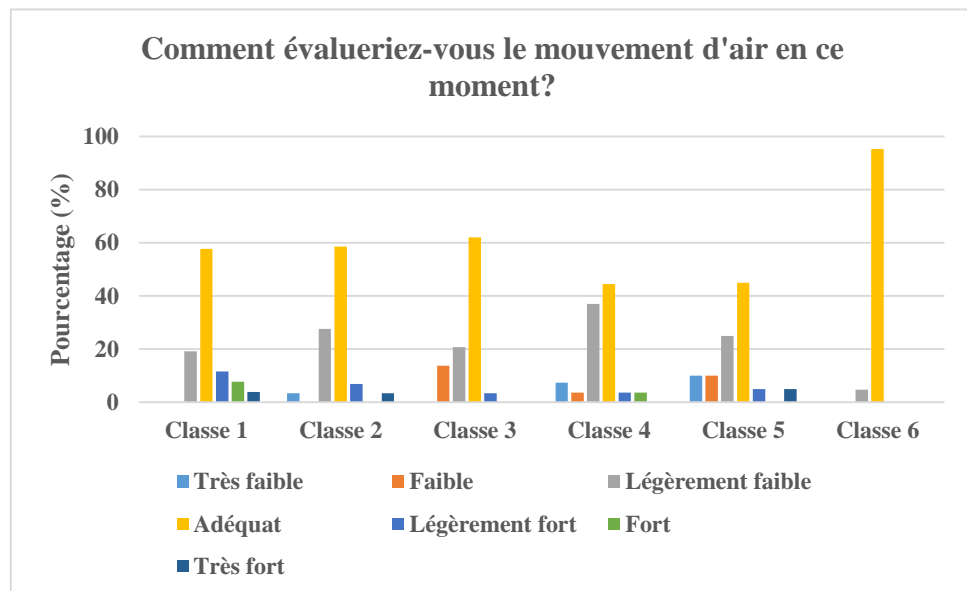


Figure 5.10, o)

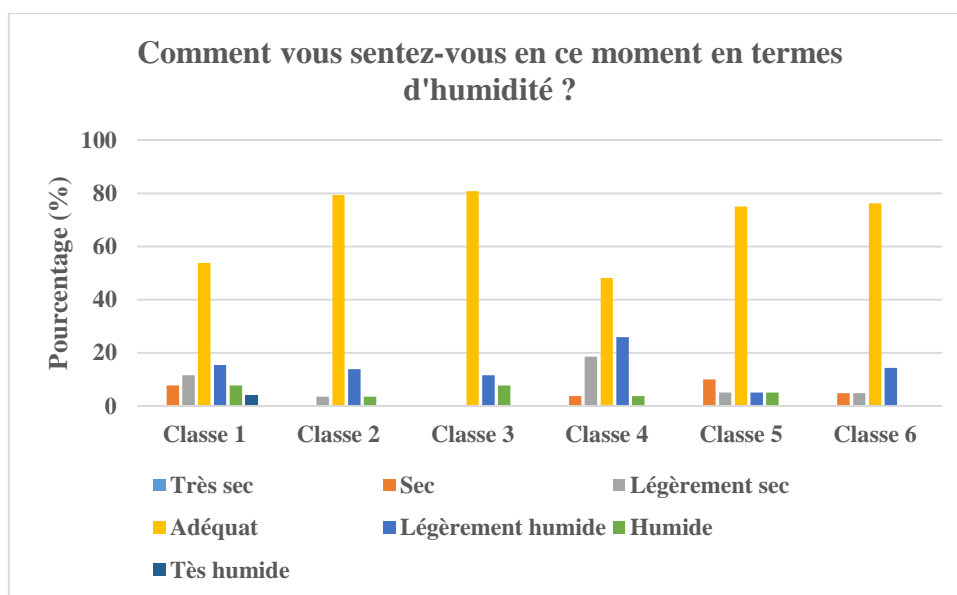


Figure 5.10, p)

3.2. Lycée Mustapha FERROUKHI

3.2.1. Réponses au questionnaire du confort thermique de la période froide (février)

À l'encontre du lycée Abdou, il convient de noter que le pourcentage des filles au lycée Ferroukhi, est équilibré avec celui des garçons, 49 % des répondants sont de sexe féminin, alors que 51 % de sexe masculin (voir le **tableau 5.3**). La **figure 5.11 (a)** monte que l'état de santé varie de « normal » à « bon ».

Tableau 5.3 : Statistiques des sujets de la période froide (FERROUKHI)

Sexe des répondants	Masculin		Féminin	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
➤ Classe 1	14	82,35 %	3	17,65 %
➤ Classe 2	6	46,15 %	7	53,85 %
➤ Classe 3	7	33,33 %	14	66,67 %
➤ Classe 4	11	47,83 %	12	52,17 %
➤ Total (74)	38	51 %	36	49 %

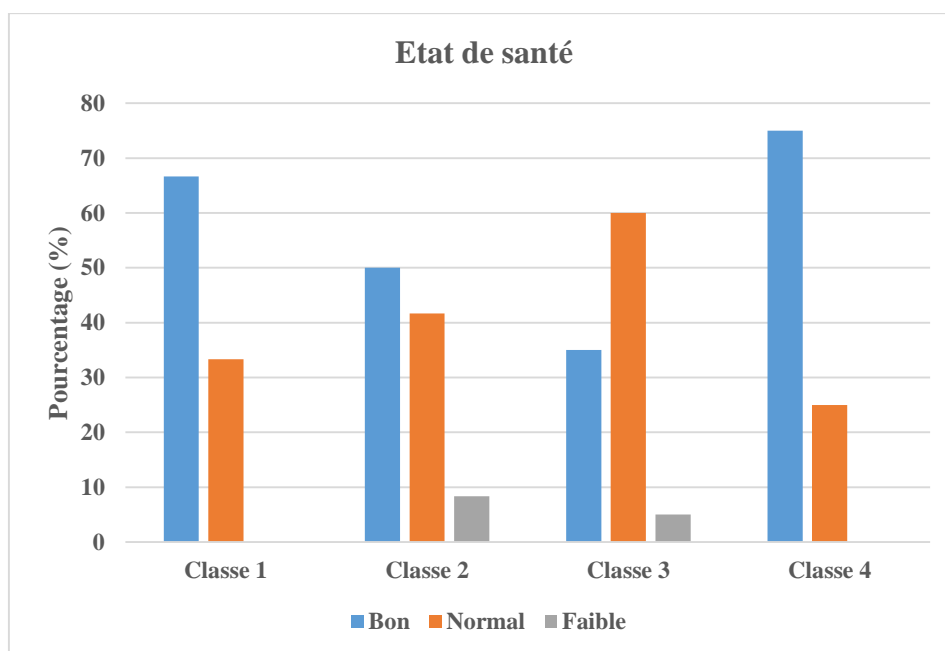


Figure 5.11, a)

Au sujet d'étudier au sein d'un bâtiment scolaire historique comme le lycée Ferroukhi, qui est considéré comme l'un des 39 lycées centenaires à travers le territoire national. La plupart des sujets « plus de 46 % » y accordent de l'importance (voir **figure 5.11, b**). Leurs arguments portent sur à la bonne conception architecturale du lycée, construit dans un style néo-classique « vainqueur », donnant ainsi une grandeur à cette ancienne école de garçons. De plus, cet édifice a vu défiler des générations et des cadres de l'état algérien.

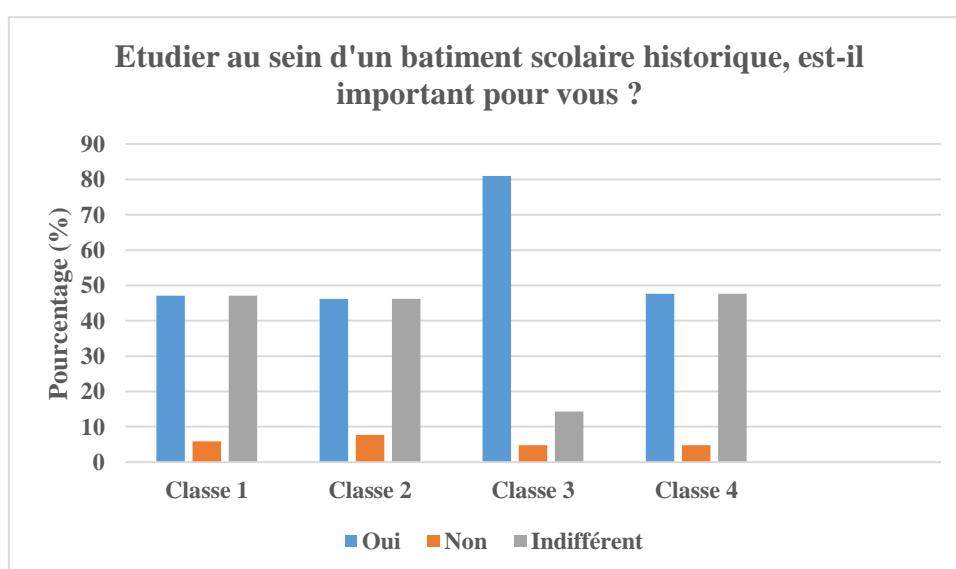


Figure 5.11, b)

En matière d'estimation du niveau d'habillement, la **figure 5.11 (c)** illustre le niveau d'habillement des occupants du bâtiment scolaire, en fonction des températures mesurées lors de la troisième journée d'enquête (le 4 février 2018). Il est à constater que la salle 4 détient le niveau d'habillement le plus élevé « 1,26 Clo ». Dans laquelle, la plupart des élèves, ont opté pour la plus haute valeur possible de Clo (1,5 Clo). Cela est en accord avec les basses valeurs de températures mesurées, comprises entre 10,9 et 16,1 °C. Par ailleurs, on constate que la salle 2 possède le niveau d'habillement le plus bas « 1,12 clo ». Dans laquelle, la plupart des élèves, ont opté pour la valeur moyenne de Clo (1,5 Clo). Cela est aussi en concordance avec les températures mesurées, variant entre 14,2 et 16,1 ° C. La différence entre les salles 2 et 4, confirme l'idée que la tenue vestimentaire des occupants, était influencée par l'isolation thermique médiocre, du deuxième étage par rapport au rez-de-chaussée. Et du coup, les deux environnements thermiques étaient différents.

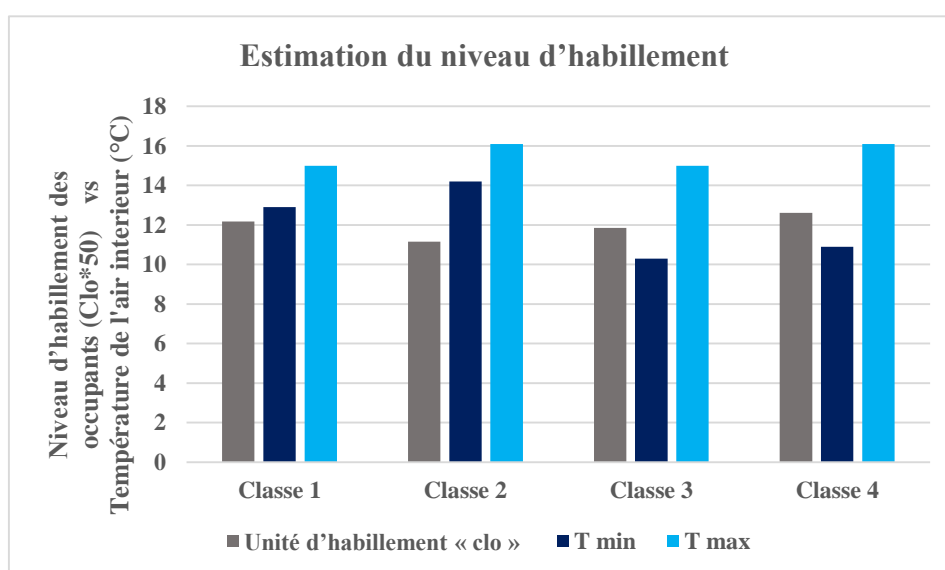


Figure 5.11, c)

Au sujet du vote de sensation de confort thermique, la **figure 5.11 (d)** montre les résultats de vote de sensation thermique, qui vont principalement de 0 (neutre) à -2 (frais). Les salles de classe 1 et 2 se caractérisent par le microclimat intérieur le plus acceptable, dans lesquelles plus de 23 % des élèves estimant que leur environnement thermique était « neutre ». Par ailleurs, la plupart des occupants des classes 3 et 4, trouvent leur environnement entre « légèrement frais » et « frais ». La

sensation thermique au rez-de-chaussée est meilleure à celle du deuxième étage, cela est due à l'emplacement sous abri des salles 1 et 2, évitant ainsi les infiltrations d'air froid, contrairement aux salles du premier étage 3 et 4, situées sous un toit mal isolé comme si bien constaté par la thermographie.

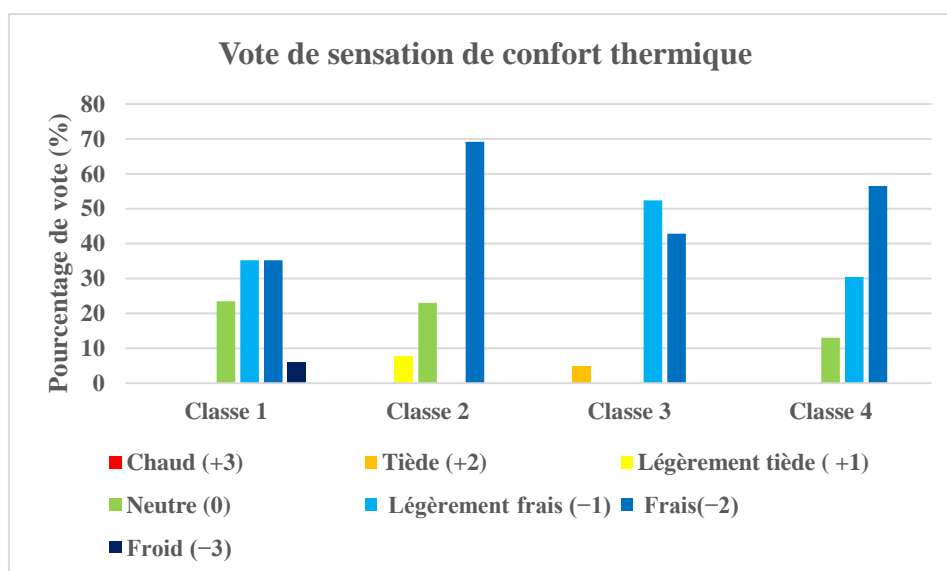


Figure 5.11, d)

Concernant les moments d'inconfort thermique, la **figure 5.11 (e)** met en évidence les moments d'inconfort thermique chez les occupants des 6 salles de classe. Il est à constater que les réponses des sujets varient de « tous les matins » à « seulement les jours froids ». Cela est dû aux différents ponts thermiques déjà soulignés par la thermographie, qui réduisent la performance thermique de l'enveloppe du lycée Ferroukhi. Et par conséquent, la température est au-dessous de la plage de confort (20 à 24 °C).

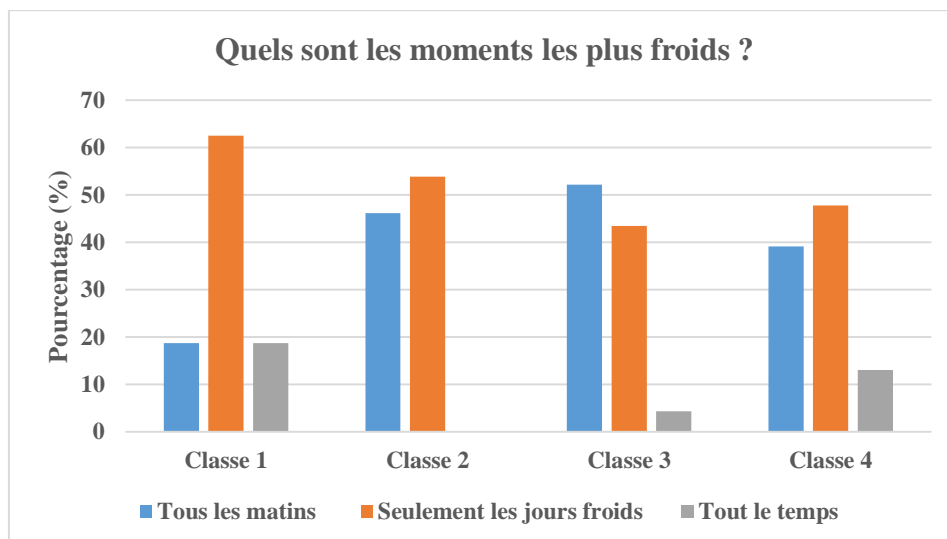


Figure 5.11, e)

Relativement aux sources d'inconfort thermique, la **figure 5.11 (f)** identifie les sources d'inconfort thermique chez les sujets des 4 salles de classe. Plus de 60 % des sujets des salles 1.2 et 3, trouvent que la baisse de température demeure la première source d'inconfort thermique pendant d'hiver. Pour la salle 4, ce facteur reste principal avec plus 43 %, suivi par les courants d'air froid avec plus de 26 %. Pour les facteurs influents sur le confort thermique, la **figure 5.11 (g)** identifie que la température et les courants d'air, sont des principaux facteurs d'inconfort thermique chez les sujets. Tandis que, l'humidité vient en troisième position après la température et les courants d'air.

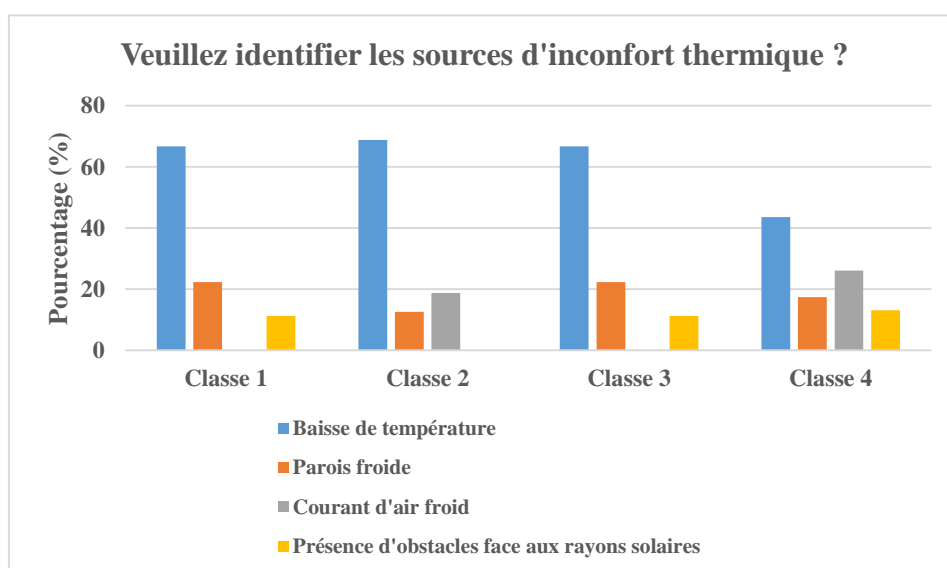


Figure 5.11, f)

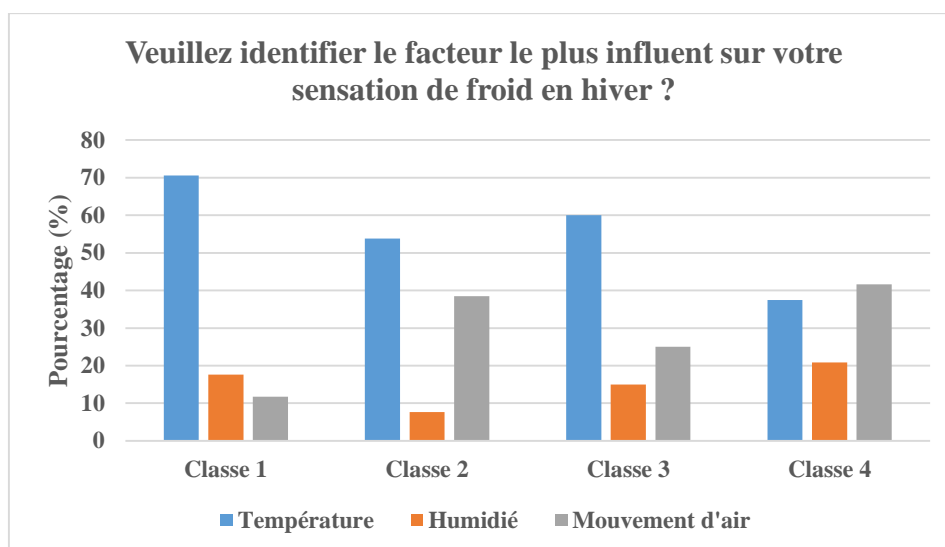


Figure 5.11, g)

En ce qui concerne l'utilisation des radiateurs (**figures 5.11, h et 5.1, i**), il est à constater que plus de 50 % vont pour la réponse de « en occupation ». En effet, l'enquête effectuée a révélé que la chaudière fonctionne de manière permanente dans le bâtiment scolaire, même durant les Weekends, ou cas où les locataires sont y présents. Elle est mise hors tension, uniquement selon des périodes déterminées, afin d'assurer son bon fonctionnement. Cependant, à l'instar du lycée Abdou, le circuit de chauffage est continu, il ne comprend pas de sections qui sont en mesure de chauffer des espaces par rapport à d'autres. Et cela entraîne un gaspillage d'énergie, principalement en cas d'absence des élèves.

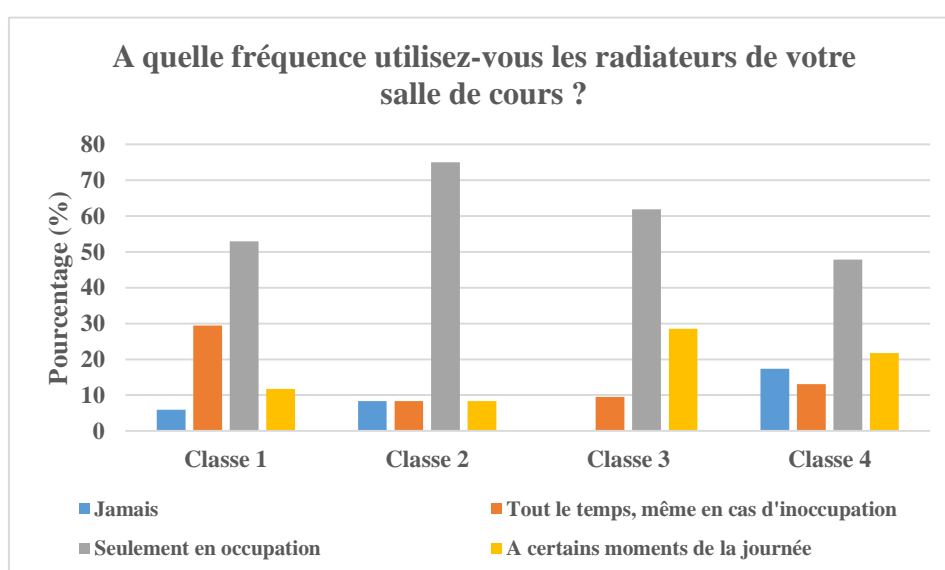


Figure 5.11, h)

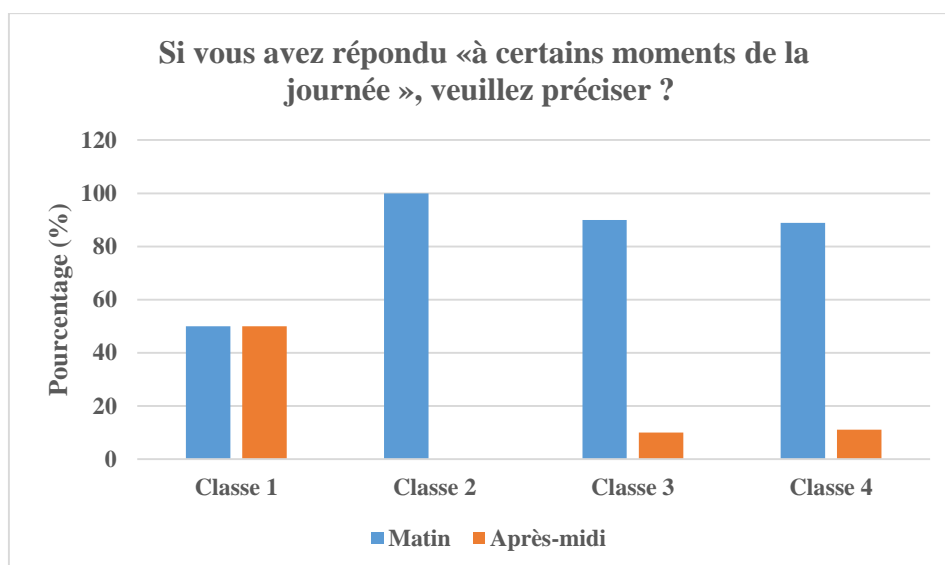


Figure 5.11, i)

Concernant, les comportements adoptés par les élèves en cas d'inconfort thermique, la **figure 5.11 (j)** présente qu'il existe trois gestes principaux, à l'instar de, la fermeture de fenêtres, la fermeture de porte et l'apport d'un changement à l'habillement en rajoutant par exemple un manteau.

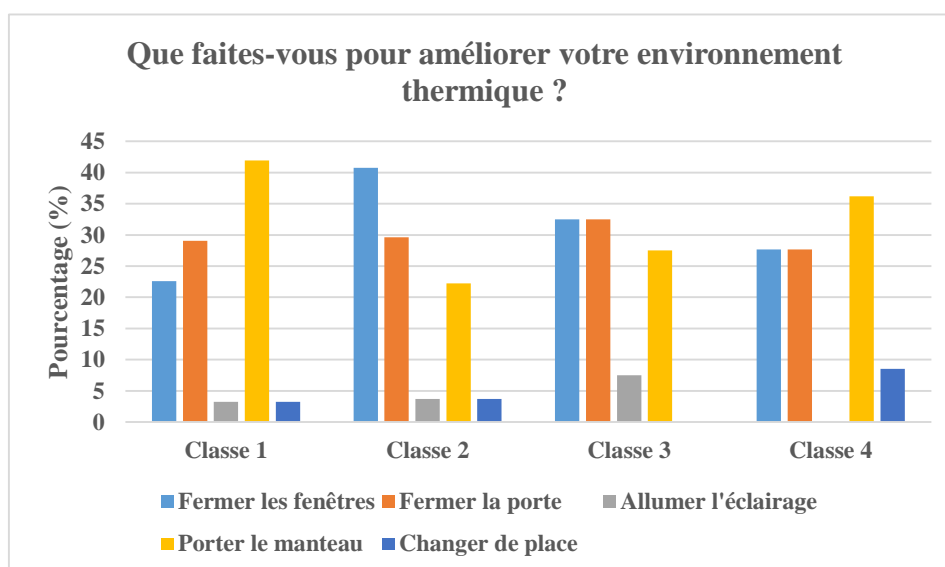


Figure 5.11, j)

Relativement à l'ouverture des fenêtres, les **figures 5.11 (k) et 5.11 (l)** montrent que la majorité des occupants procèdent à cela « à certains moments de la journée ». En effet, l'absence d'un système de ventilation mécanique justifie cette

habitude indispensable chez les élèves, pour créer des courants d'air pour renouveler l'air.

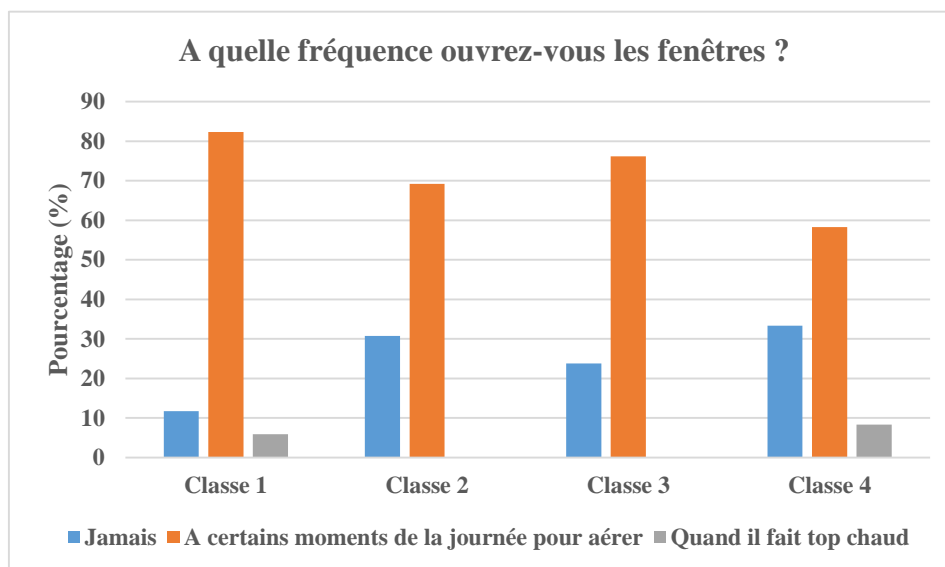


Figure 5.11, k)

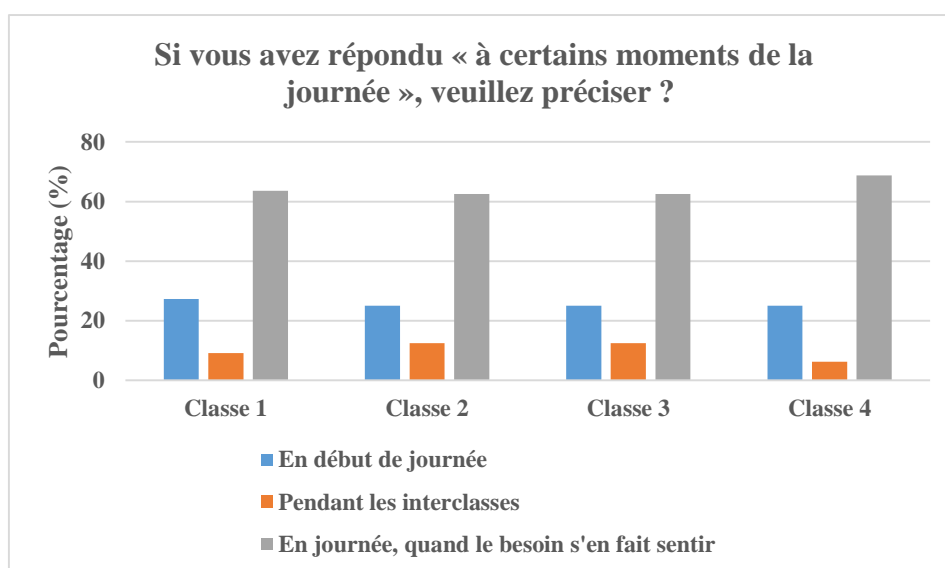


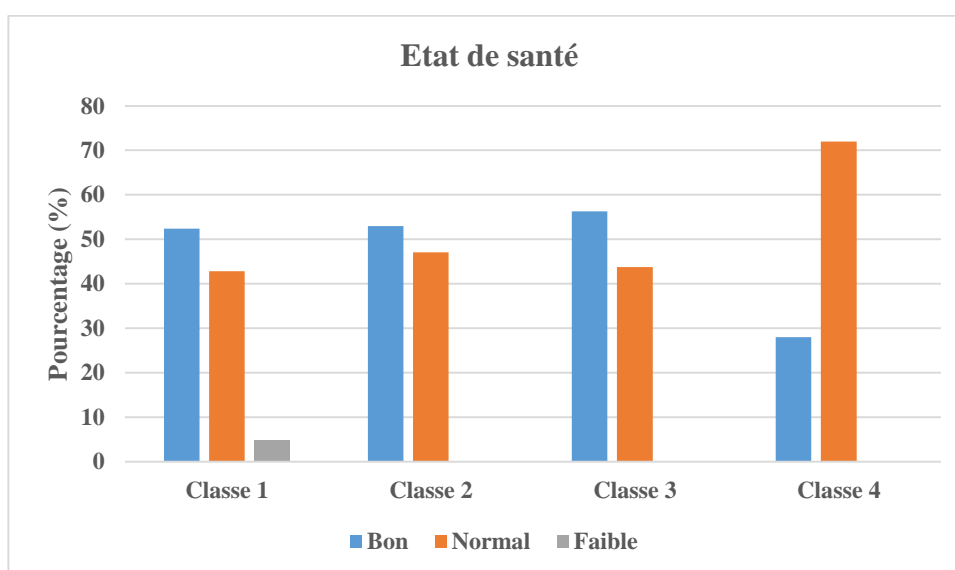
Figure 5.11, l)

3.2.3. Questionnaire du confort thermique de la période chaude (septembre)

Pour le questionnaire de la période de septembre 2018, il convient de noter que le pourcentage des filles au lycée Ferroukhi, est supérieur à celui des garçons, 63 % des répondants sont de sexe féminin, alors que 37 % de sexe masculin (voir le **tableau 5.4**). **L'image (a)** montre que l'état de santé varie de « normal » à « bon ».

Tableau 5.4 : Statistiques des sujets de la période chaude (FERROUKHI)

Sexe des répondants	Masculin		Féminin	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
➤ Classe 1	4	19,05 %	17	80,95 %
➤ Classe 2	9	52,94 %	8	47,06 %
➤ Classe 3	9	56,25 %	7	43,75 %
➤ Classe 4	7	28,00 %	18	72,00 %
➤ Total (79)	29	37 %	50	63 %

**Figure 5.12, a)**

À l'égard du niveau d'habillement, la **figure 5.12 (b)** illustre le niveau d'habillement des occupants du bâtiment scolaire, en fonction des températures mesurées lors d'une journée d'enquête (le 16 septembre 2018). Il est à constater que les élèves du deuxième étage portaient des vêtements plus légers que ceux du rez-de-chaussée. Autrement dit, le Clo des salles 3 et 4 (0,49 et 0,55 Clo, successivement), est inférieur à celui des salles 1 et 2 (0,58 et 0,6 Clo, successivement). Cela est dû aux valeurs élevées de températures de surfaces du toit, qui font que les salles du deuxième étage soient plus chaudes que celles du rez-de-chaussée.

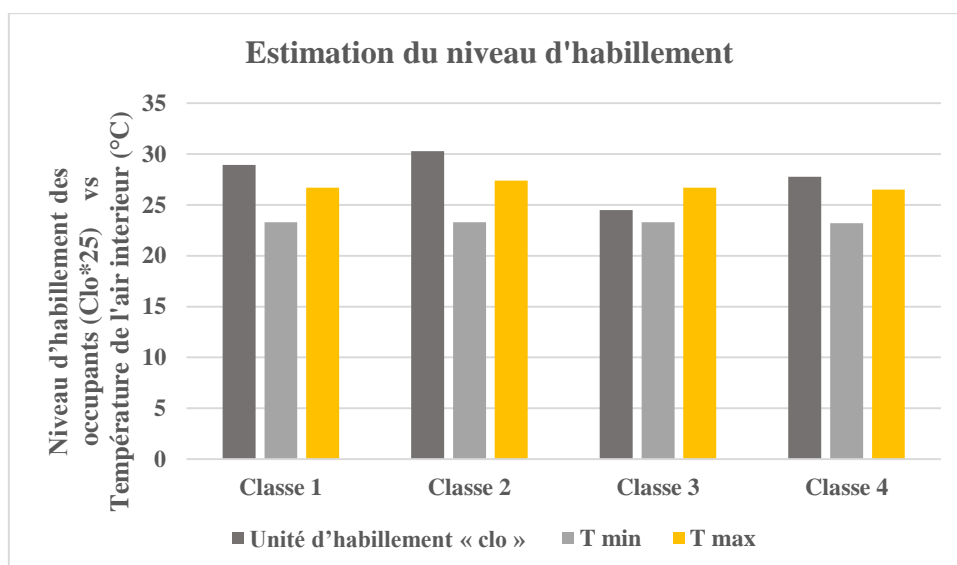


Figure 5.12, b)

À propos de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (figure 5.12, c), il convient de dire que plus de 60 % des occupants estiment que l'écart est moyen. Cependant, le pourcentage de ceux qui l'évaluent considérable est supérieur en rez-de-chaussée qu'en deuxième étage, notamment en salle 1 avec environ 30 %. Cela est parfaitement en concordance avec les mesures in situ qui confirment que les salles 1 et 2 sont plus fraîches que les salles 3 et 4.

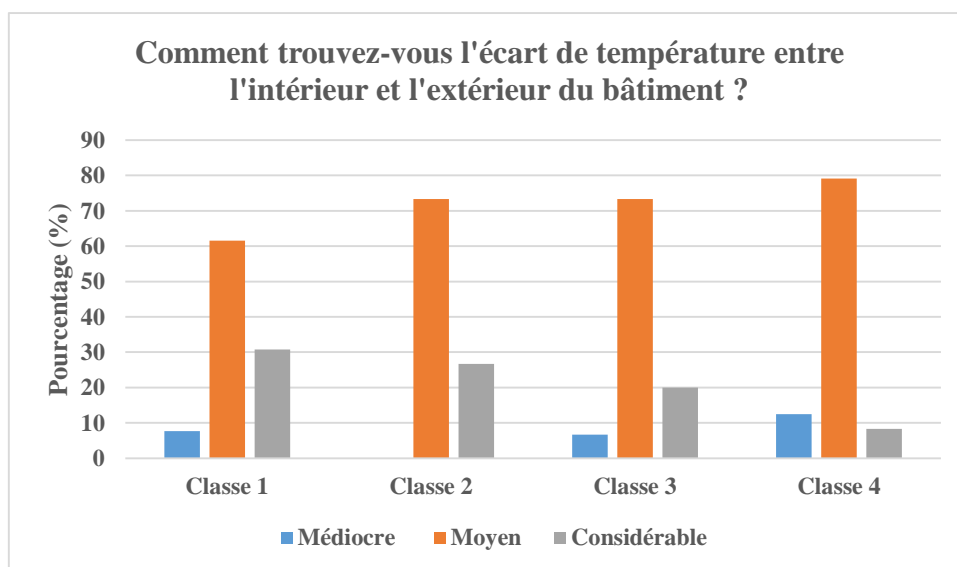


Figure 5.12, c)

Les figures 5.12 (d) et 5.12 (e) montrent le vote de sensation de confort thermique. Pendant la matinée, il convient de constater que plus de 50 % des

occupants des salles 2,3 et 4 trouvent leurs espaces d'étude, neutre (0). Alors que, la majorité des occupants en salle 1 le trouvent de neutre (0) à tiède (2). Pendant l'après-midi, la majorité des réponses des sujets en salle 2,3 et 4 varient de légèrement tiède (+1) à tiède (+2). Tandis que, ceux de la salle 1 trouvent en majorité leur environnement thermique de légèrement tiède (+1) à chaud (+3). Cette constatation est en concordance avec la campagne de mesures de septembre, qui révèle des températures dépassant la plage de confort variant de 23 °C à 26°C.

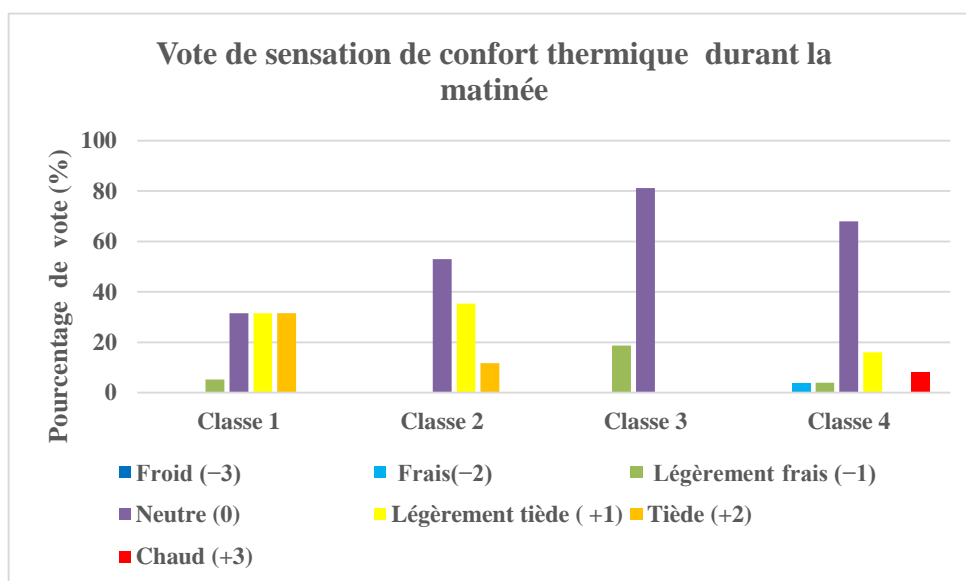


Figure 5.12, d)

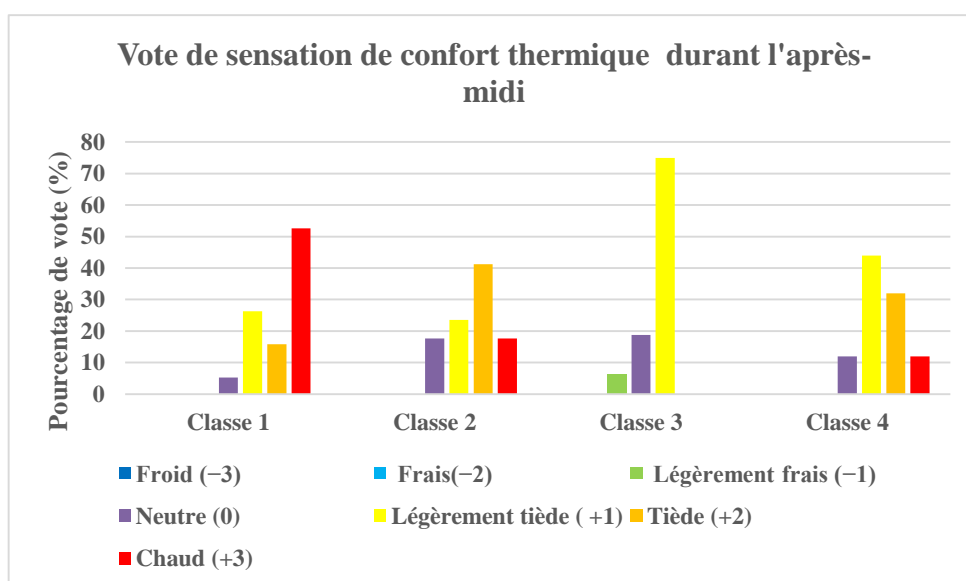


Figure 5.12, e)

Au sujet de sources d'inconfort thermique, la **figure 5.12 (f)** identifie les sources d'inconfort thermique chez les sujets des 4 salles de classe. Environ 60 % des sujets des salles trouvent que la hausse de température demeure la première source d'inconfort thermique pendant la période chaude de l'année scolaire. Concernant les facteurs influents sur le confort thermique, la **figure 5.12 (g)** identifie que la température et les courants d'air sont des principaux facteurs d'inconfort thermique chez les sujets. Tandis que, l'humidité vient en troisième position après la température et les courants d'air.

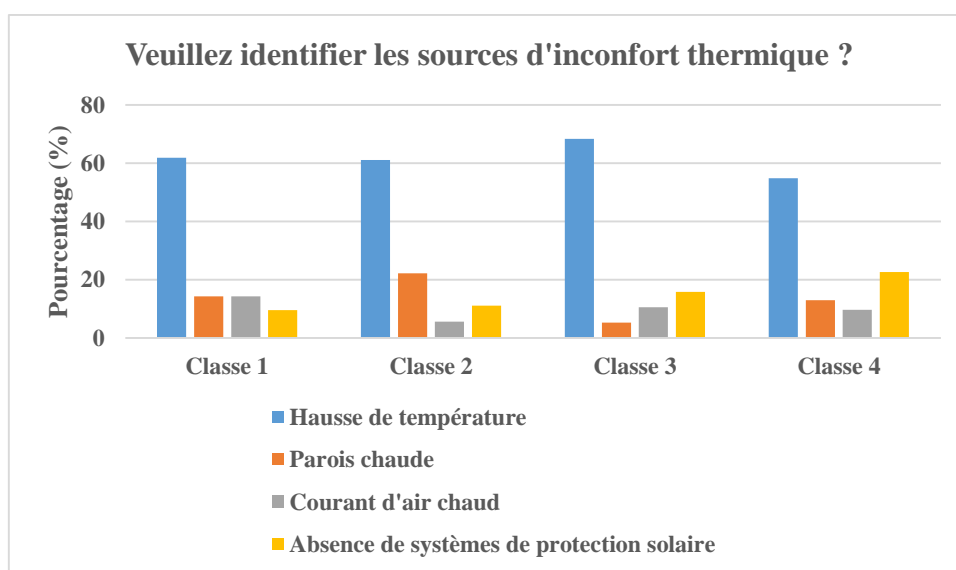


Figure 5.12, f)

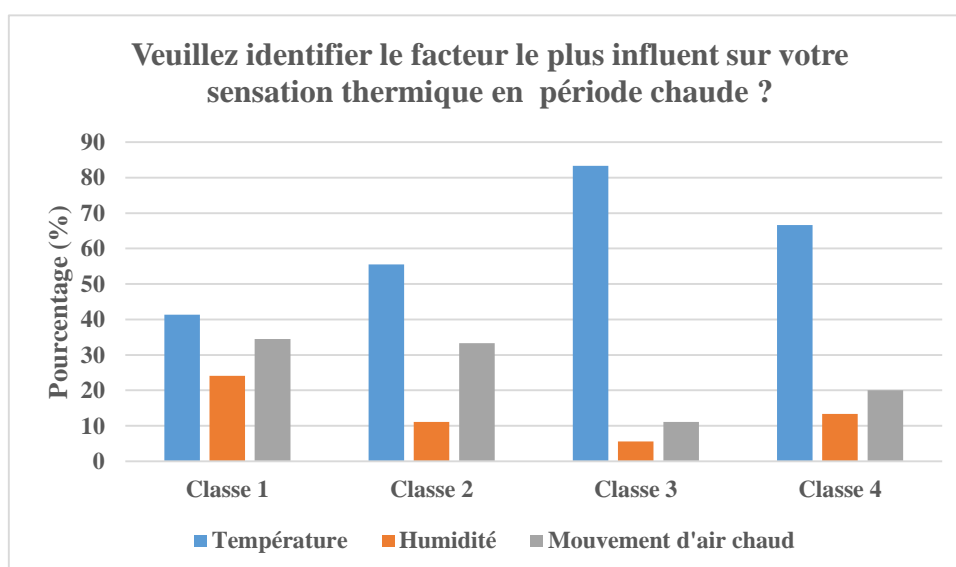


Figure 5.12, g)

Pour les comportements adoptés par les élèves en cas d'inconfort thermique en période chaude, la **figure 5.12 (h)** présente qu'il existe deux gestes principaux, à l'instar de, l'ouverture de fenêtres de façon récurrente comme le témoigne la **figure 5.12 (i)**, et aussi l'ouverture de porte. Cela est justifié par l'absence d'un système de ventilation mécanique, qui est en mesure de créer des courants d'air afin de renouveler l'air. Quant à la qualité de l'air (**figure 5.12, j**), il convient de constater une distinction entre les 4 salles de classe. Les sujets en majorité des salles 1 et 2 trouvent la qualité de l'air entre peu mauvaise à acceptable, alors que ceux des salles 3 et 4 l'estiment d'acceptable à bonne. Cette distinction est naturellement liée à l'emplacement des salles 1 et 2 en rez-de-chaussée, tandis que les salles 3 et 4 se situent en deuxième étage. Ces dernières sont plus spacieuses et aérées, et du coup l'air se renouvelle aisément.

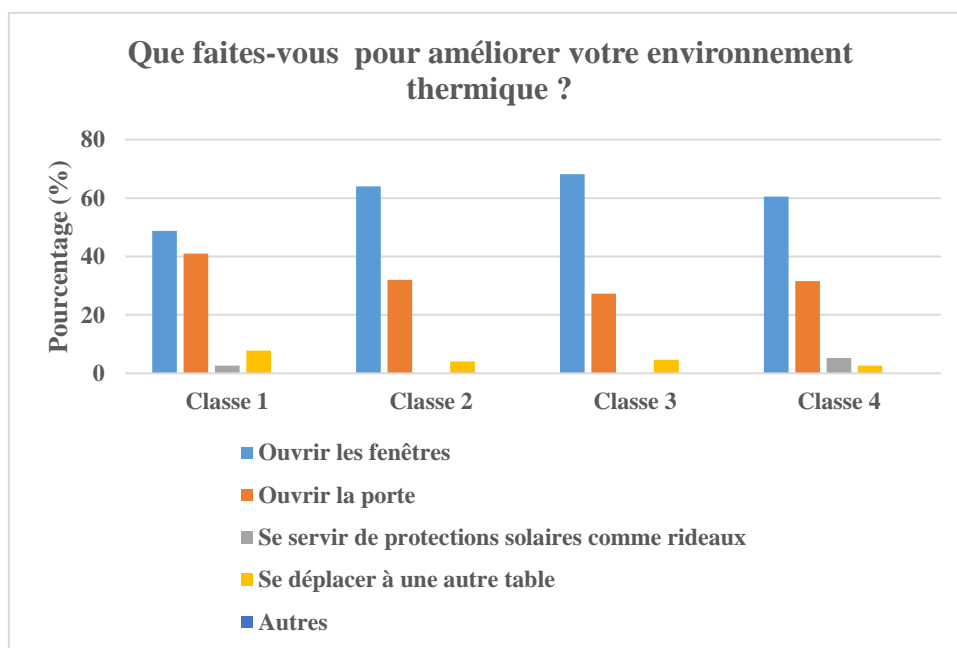


Figure 5.12, h)

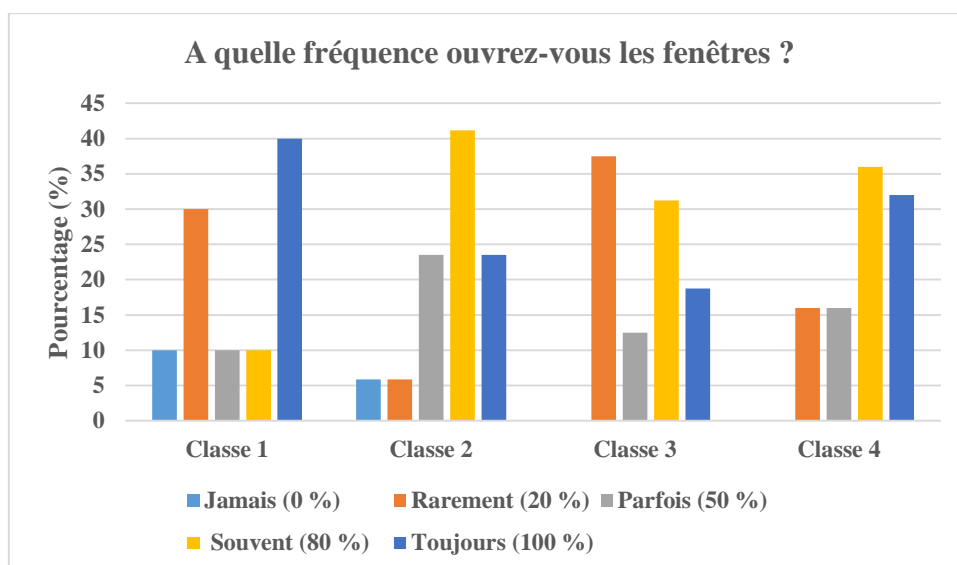


Figure 5.12, i)

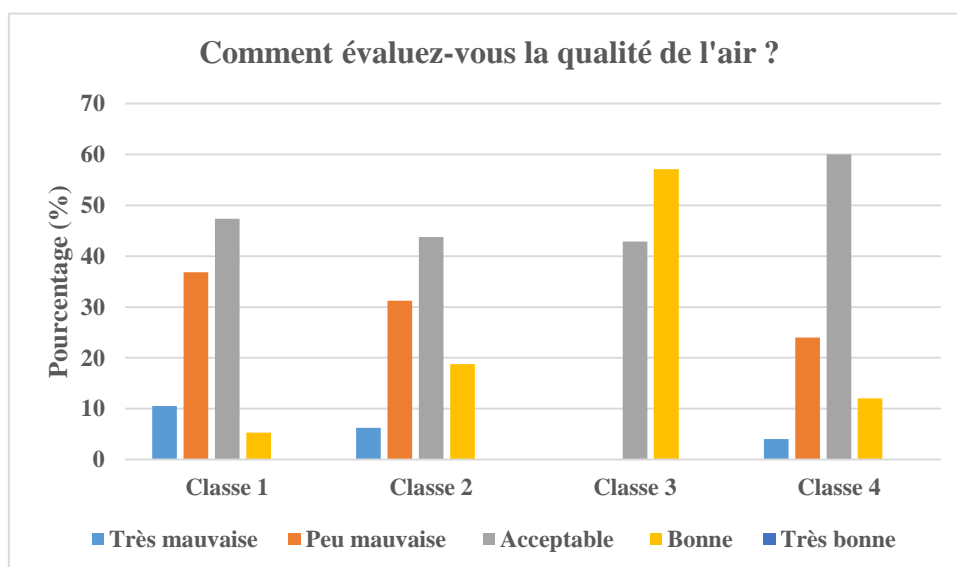


Figure 5.12, j)

Relativement au vote de sensation thermique en ce moment (**figure 5.12, k**), il convient de dire qu'il y a deux environnements thermiques différents. Les réponses des sujets de classe 1 et 2 varient de neutre (0) à tiède (+2). Alors que, 60 % et 56 % des sujets des salles de classe 3 et 4 successivement, estiment avec leurs espaces d'étude soient tièdes. Cela est dû aux températures élevées de toit, qui font que le deuxième étage soit plus chaud que le rez-de-chaussée.

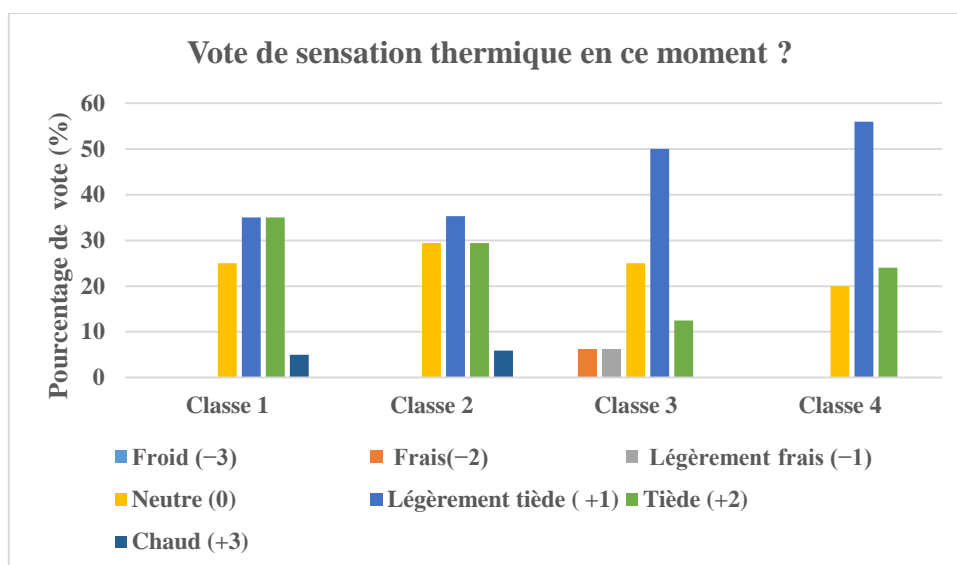


Figure 5.12, k)

À l'égard de la **figure 5.12 (l)**, il convient de dire que les occupants des salles de classe 1 et 2 se sentent en majorité, de légèrement inconfortable à légèrement confortable. Alors que ceux des salles 3 et 4 se sentent majoritairement légèrement inconfortables. À propos de la **figure 5.12 (m)**, il est à dire que la majorité des occupants des 4 salles veulent être plus frais, c'est-à-dire une baisse de température. Et cela est en concordance avec les valeurs de températures qui ont dépassé la limite de la plage recommandée de 26°C. Au sujet de l'acceptabilité de l'environnement thermique (**figure 5.12, n**), plus de 50 % des sujets des salles 2,3 et 4 trouvent que la température est acceptable, alors que 60 % occupants de la salle 1 la trouvent acceptable. Concernant la **figure 5.12 (o)**, la majorité des sujets estiment que le mouvement d'air varie de légèrement faible (-2) à adéquat (0). Cela est en concordance avec la fermeture des espaces d'étude, faisant que, la vitesse de l'air se rapproche toujours de 0 m/s. Pour ce qui est de l'humidité, la **figure 5.12, (p)** met en évidence que la majorité des sujets la trouvent adéquate (0). Cela est en accord avec les mesures in situ qui relève un taux d'humidité de 46%.

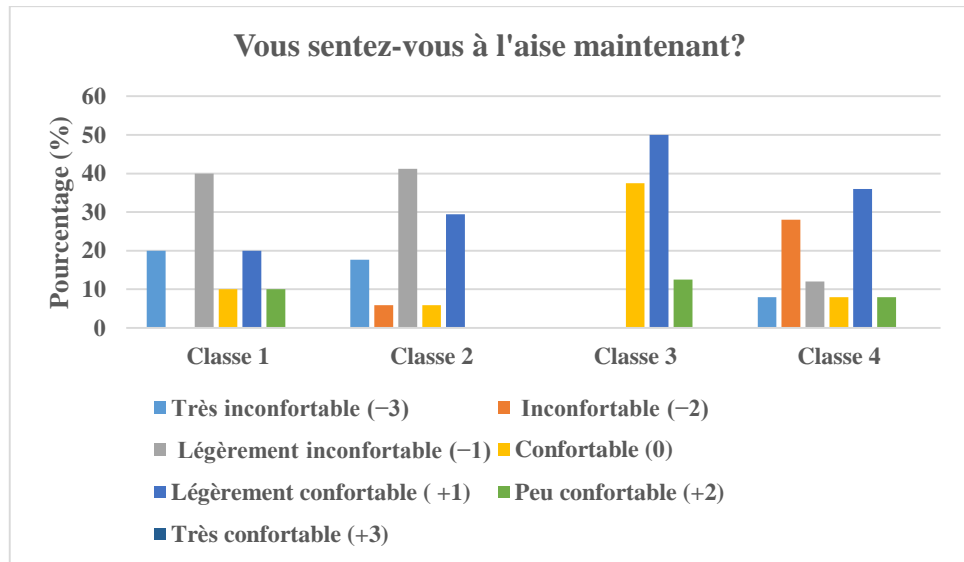


Figure 5.12, l)

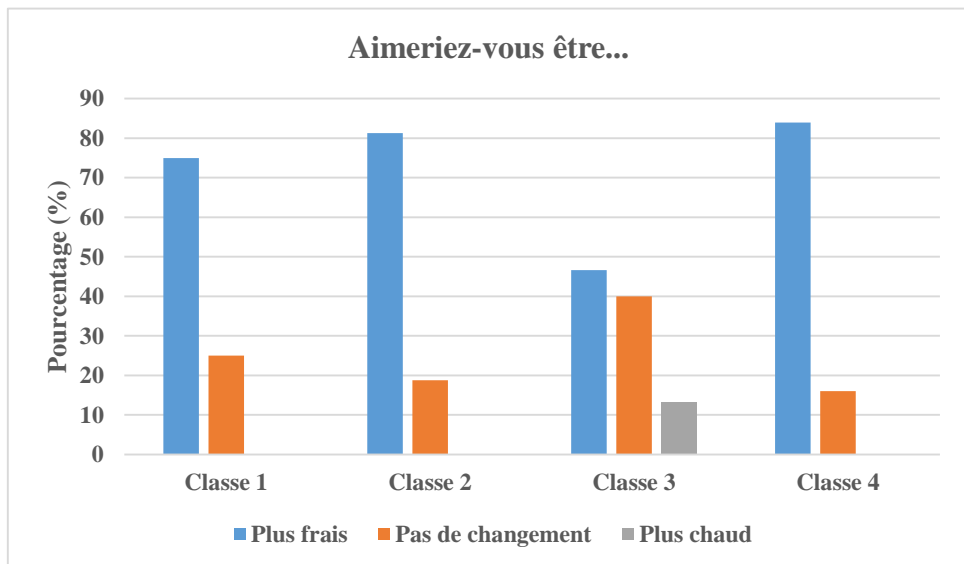


Figure 5.12, m)

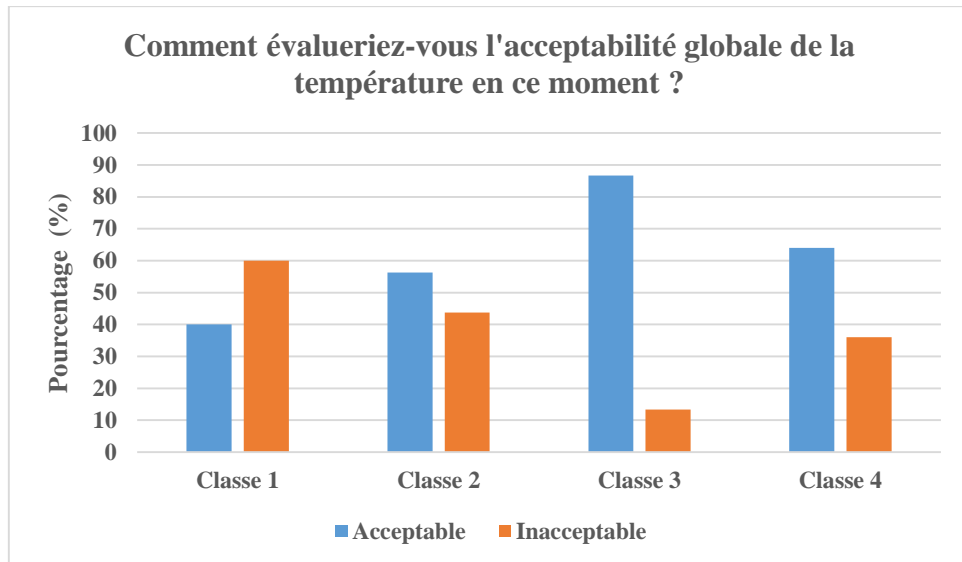


Figure 5.12, n)

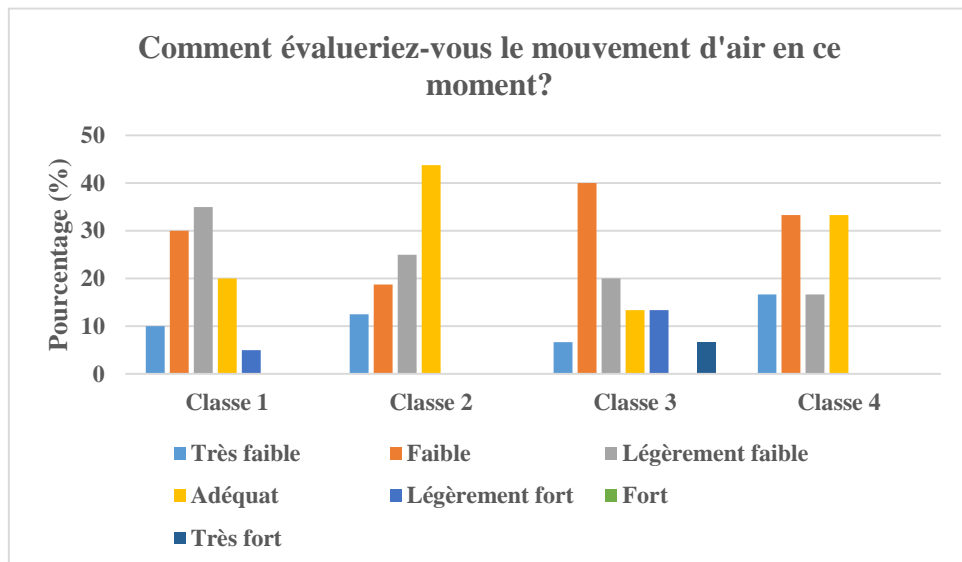


Figure 5.12, o)

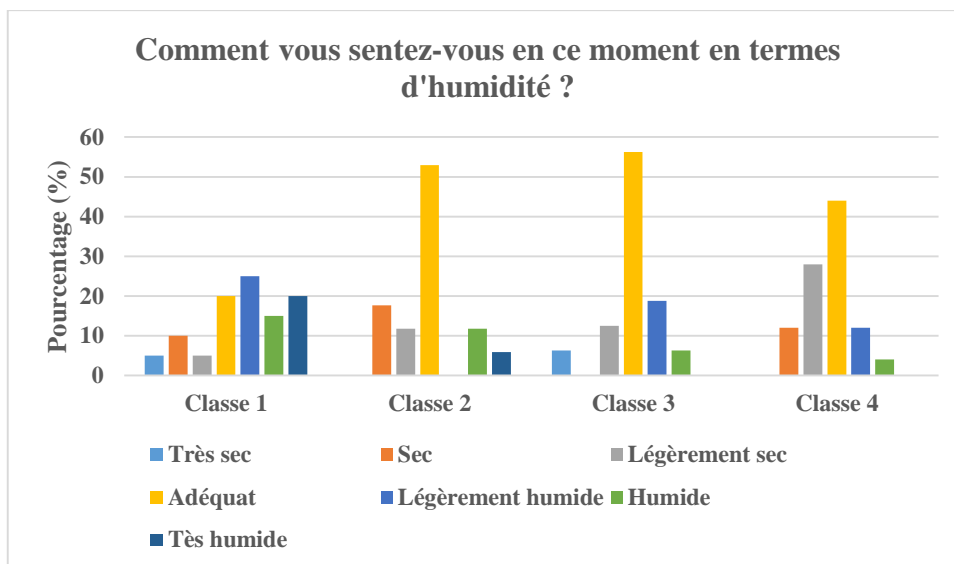


Figure 5.12, p)

4. Discussion des résultats

Les campagnes de mesures révèlent que la forme a un impact considérable sur la performance thermique et l'efficacité énergétique de l'enveloppe. Pendant l'hiver, il convient de constater que la performance thermique active de la typologie de forme compacte est nettement meilleure que celle dotée d'une typologie éclatée. En effet, les températures mesurées au lycée Ferroukhi étaient supérieures aux températures de l'air extérieur au cours des trois journées d'enquête de l'hiver. Pendant le premier jour du 2 février, l'écart maximal a atteint une valeur supérieure à 13 °C. Tandis que, les températures mesurées au lycée Abdou étaient supérieures aux températures extérieures, au premier jour du 10 février, avec un écart maximal de 12,6°C et se mettaient à se rapprocher significativement, de telle sorte à avoir des températures presque similaires entre l'extérieur et l'intérieur des salles de cours du deuxième étage. Pendant la période chaude de l'année scolaire, il convient de souligner que la typologie de forme compacte (Lycée Ferroukhi : la température moyenne de l'air intérieur était comprise entre 20 et 27 °C) est relativement fraîche que la typologie de forme éclatée (Lycée Abdou : la température moyenne de l'air intérieur était comprise entre 23 et 28 °C). Ces résultats sont en concordance avec l'étude de [131] qui démontre l'impact considérable de la forme sur l'efficacité énergétique des bâtiments.

L'évaluation de la qualité environnementale des espaces intérieurs a révélé les effets négatifs des travaux de réhabilitation sur le comportement des bâtiments scolaires. En effet, ces mesures de rénovation ont affecté la performance et l'environnement thermique intérieur, ainsi que l'efficacité énergétique des cas d'étude. Les conditions thermiques soulevées par l'enquête n'étaient pas conformes aux normes en matière de confort thermique dans les salles de classe ni proches des résultats examinés dans la littérature, tels que la rénovation rapportée dans le projet « School of the future » [34]. En fait, la qualité de l'environnement intérieur des écoles historiques étudiées était bien pire que le climat intérieur du bâtiment présenté par l'étude [15]. Ce dernier a confirmé la nécessité de procéder à une rénovation énergétique de l'école italienne, après avoir estimé que l'humidité relative n'atteignait pas 50% et que la température de l'air ne dépassait pas 18 °C (sans la présence d'élèves).

Au lieu d'améliorer davantage la qualité de l'environnement intérieur, comme cela était attendu pour un projet de réhabilitation [25, 26, 27, 28]. Ces rénovations ont entraîné un impact négatif principalement, sur le confort thermique. Les principales causes sont évidemment dues au remplacement des fenêtres et à l'isolation du toit. L'ajout d'une mauvaise isolation thermique au toit (au lieu du plafond traditionnel offrant une bonne étanchéité) et le remplacement des fenêtres par un simple vitrage ont provoqué une augmentation de la température dans les salles de classe pendant les journées chaudes et une baisse de température pendant la saison hivernale. De plus, cela a entraîné de nombreux ponts thermiques (bâtiments semblables aux passoires thermiques), ce qui est synonyme d'une perte d'énergie.

Les résultats de cette étude montrent que les mesures de rénovation mises en œuvre à travers l'Algérie sous-estiment le confort thermique et la performance énergétique des bâtiments anciens. La rénovation inappropriée de ces héritages du XIXe et XXe siècle pourrait avoir des conséquences négatives sur la qualité de l'environnement intérieur, des dommages invasifs à la structure du bâtiment et une perte d'énergie importante à travers l'enveloppe du bâtiment [132].

5. Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats de l'évaluation qualitative et quantitative du confort thermique dans les salles de classe de deux cas d'étude, caractérisés de typologie différente. Il s'est soldé par formuler les conclusions suivantes :

Sur le plan de performance thermique et efficacité énergétique, les compagnes de mesures relèvent que :

- La forme compacte du lycée FERROUKHI assure plus de confort thermique aux usagers que la forme éclatée du lycée ABDYOU.
- La coursive fermée permet de maintenir un écart de température significatif entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment scolaire, alors que dans le cas d'une coursive découverte, l'écart est beaucoup moins significatif.
- Pour les deux typologies, l'enquête révèle que les conditions thermiques étaient extrêmement mauvaises dans les salles de classe du deuxième étage où les élèves se sont sentis généralement froids et inconfortables. Autrement dit, les conditions thermiques n'étaient pas dans les normes recommandées (au-dessous de 20 °C).

En hiver les salles du 2 étage au lycée ABDYOU étaient plus froides et cela en raison de :

- Les panneaux de laine de roche du faux plafond ne sont pas très bien scellés contre les grilles métalliques, facilement amovibles, et causantes une infiltration d'air importante dans les salles de classe du deuxième étage. Cela provoque une chute de température, comme indiqué précédemment dans les mesures in situ de février.
- Par contre, les salles du deuxième étage pour le lycée FERROUKHI sont dotées d'un faux plafond en latté-roseaux, qui est plus étanche. Par conséquent, les températures mesurées (notamment les températures de surfaces) étaient nettement meilleures que celles du lycée ABDYOU.

Pendant la période chaude de l'année scolaire, la typologie de forme compacte est relativement plus fraîche que la typologie éclatée. En effet, pour le lycée FERROUKHI, la température moyenne de l'air intérieur était comprise entre 20 et 27 °C, alors que pour le lycée ABDYOU, la température moyenne de l'air intérieur était comprise entre 23 et 28 °C.

Les mesures de rénovation mises en œuvre ont eu un impact négatif sur la qualité du confort thermique et l'efficacité énergétique des deux cas d'étude, en particulier le lycée Mohamed ABDOU. Les futurs travaux de rénovation devraient, par conséquent, envisager l'isolation adéquate de l'enveloppe des bâtiments scolaires notamment l'étage supérieur.

Deuxième partie : Expérimentation

CHAPITRE 6

INVESTIGATION IN SITU DU CONFORT VISUEL

1. Introduction

À l'instar du chapitre précédent (5), celui-ci est consacré à la présentation des résultats de l'investigation in situ du confort visuel, en l'occurrence, les résultats des campagnes de mesures et les réponses des sujets aux questionnaires. En outre, il sera question d'interpréter les résultats obtenus et de mettre en évidence la corrélation qui existe entre l'évaluation qualitative et l'évaluation quantitative. Subséquemment, ce chapitre développe une comparaison entre les deux typologies en termes de confort visuel.

2. Évaluation quantitative

2.1. Lycée Mohamed ABDOU

Les **tableaux 6.1 et 6.2** présentent les niveaux d'éclairement pour des conditions sous ciel clair. En termes de niveaux d'éclairement moyen, il convient d'établir le même constat pour les deux saisons. La salle de classe N° 1 est la seule à avoir plus 300 lux vers 9 h, à savoir 427 lux (26 décembre 2016), et 386 lux (25 mars 2017). Cela est dû à sa double orientation (est/sud), dans laquelle, les premiers rayons du soleil font augmenter l'éclairement, alors que les autres salles sont encore à l'abri. De 12 h à 15 h, dans les salles de classe 1.2.3 et 5, les niveaux d'éclairement moyens sont supérieurs à la valeur recommandée de 300 Lux [133]. Ils se situent dans la plage de 381 - 787 Lux en journée d'hiver et 330 - 650 Lux en journée de printemps. Cela étant, en raison de leur orientation sud. Le soleil se trouve bas dans le ciel notamment en journée d'hiver, ce qui est avantageux pour accentuer l'éclairage naturel.

En revanche, à 12 h, dans la salle de classe 6, les niveaux d'éclairage sont au-dessous de la norme, 181 lux (26 décembre 2016) et 257 lux (25 mars 2017). Cependant, il convient de constater une augmentation vers 15 h, de l'ordre de 350 lux (26 décembre 2016) et 508 lux (25 mars 2017). Cela est dû à la grande surface vitrée côté ouest, qui permet d'améliorer les conditions d'éclairage naturel dans la salle de classe. Même constat est établi pour la salle de classe 4, mais avec une légère augmentation des niveaux d'éclairage, de 133 à 283 (26 décembre 2016) et de 171 à 368 lux (26 décembre 2016). Cela est dû à la petite surface vitrée côté ouest, qui laisse passer moins de rayons solaires vers l'après-midi.

En termes d'uniformité d'éclairage, les niveaux de lux mesurés n'étaient pas uniformes et excessifs près des fenêtres des salles de classe 1.2.3 et 5, avec des valeurs supérieures à 500 lux toute la journée (voir éclairagements rang 1). Cela est dû à leur orientation sud et l'absence de dispositifs de protection solaire au niveau des ouvertures. Pour les salles dotées d'une orientation ouest, l'éclairage est supérieur à 500 lux vers 15 h (voir éclairagements rang 1), avec des valeurs comprises entre 619 et 556 Lux (26 décembre 2016), 855 et 870 (25 mars 2017) respectivement, pour les salles de classe 4 et 5.

Il convient de souligner que l'éclairage excessif près des fenêtres cause des réflexions gênantes sur le tableau blanc. Les principales réactions adoptées par les usagers pour réduire ces effets, ont été observées dans les salles de classe 1 et 3, les fenêtres étant recouvertes de planches de bois, voire persiennes carrément scellées.

Tableau 6.1 : Mesures d'éclairage naturel, sous ciel clair (26 décembre 2016).

N°	heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ moy	U
1	9 h	24 967	547	363	378	421	427	360	1,71	0,99
	12 h	56 962	1037	586	382	336	585	428	1,03	0,57
	15 h	44 090	642	472	313	260	422	315	0,96	0,62
2	9 h	24 967	329	193	144	118	196	175	0,79	0,60
	12 h	56 962	1165	777	494	388	706	675	1,24	0,55
	15 h	44 090	680	424	311	289	426	353	0,97	0,68
3	9 h	24 967	319	201	142	138	200	190	0,8	0,69
	12 h	56 962	738	468	290	261	439	343	0,77	0,59
	15 h	44 090	600	429	268	225	381	234	0,86	0,59
4	9 h	24 967	160	87	63	44	89	44	0,36	0,49
	12 h	56 962	226	130	100	75	133	120	0,23	0,56

	15 h	44 090	619	250	157	104	283	250	0,64	0,37
5	9 h	24 967	361	253	187	113	229	204	0,92	0,49
	12 h	56 962	1299	837	592	419	787	752	1,38	0,53
	15 h	44 090	685	439	350	273	437	362	0,99	0,62
6	9 h	24 967	186	161	141	143	158	123	0,63	0,89
	12 h	56 962	246	177	154	147	181	155	0,32	0,81
	15 h	44 090	556	330	272	240	350	233	0,79	0,69

Tableau 6.2 : Mesures d'éclairage naturel, sous ciel clair (25 mars 2017).

N°	heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ Moy (%)	U
1	9 h	54 692	308	281	389	565	386	302	0,71	0,73
	12 h	89 970	518	339	299	253	352	285	0,39	0,72
	15 h	78 052	597	304	234	184	330	261	0,42	0,56
2	9 h	54 692	336	166	139	206	212	153	0,39	0,66
	12 h	89 970	1210	490	322	310	583	340	0,65	0,53
	15 h	78 052	885	399	269	281	459	352	0,59	0,59
3	9 h	54 692	355	276	179	191	250	226	0,46	0,72
	12 h	89 970	750	446	319	292	452	334	0,5	0,65
	15 h	78 052	799	452	369	304	481	301	0,62	0,63
4	9 h	54 692	197	117	96	106	129	84	0,24	0,74
	12 h	89 970	286	170	119	109	171	143	0,19	0,64
	15 h	78 052	855	302	177	137	368	286	0,47	0,37
5	9 h	54 692	369	218	181	197	241	237	0,44	0,75
	12 h	89 970	1349	528	386	335	650	404	0,72	0,52
	15 h	78 052	892	413	303	265	468	300	0,6	0,57
6	9 h	54 692	233	247	229	236	236	191	0,43	0,97
	12 h	89 970	306	265	237	218	257	232	0,29	0,85
	15 h	78 052	870	475	372	315	508	354	0,65	0,62

Le **tableau 6.3** présente les mesures d'éclairage naturel, relevées sous ciel couvert pour la journée d'hiver (21 décembre 2016). L'éclairage extérieur varie de 219 lux (9 h) à 1800 lux (15 h). Alors que l'éclairage moyen intérieur varie de 6 lux à 75 lux. Ces valeurs sont au-dessous de la norme recommandée de 300 lux. Par conséquent, le recours à l'éclairage artificiel est nécessaire pour augmenter le niveau d'éclairage à 300lux (au minimum). En ce qui concerne la valeur moyenne du facteur de lumière du jour (FLJ), elle est de l'ordre de 4,07 %. C'est-à-dire, supérieur à 2 %, préconisée par la démarche haute qualité environnementale (HQE). Cela veut dire également que la lumière naturelle a été optimisée lors de la conception pour que le bâtiment scolaire efficacité lumineuse optimale.

Tableau 6.3 : Mesures d'éclairage naturel, sous ciel couvert (21/12/2016).

N°	heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ moy	U
1	9 h	219	29	14	16	15	18,5	14	8,45	0,76
	12 h	1650	37	24	29	39	32,25	23	1,95	0,74
	15 h	1800	75	48	54	41	54,5	31	3,03	0,75
2	9 h	219	29	14	16	15	18,5	14	8,45	0,76
	12 h	1650	80	27	17	29	38,25	23	2,32	0,44
	15 h	1800	71	42	40	148	75,25	30	4,18	0,53
3	9 h	219	13	6	4	3	6,5	9	2,97	0,46
	12 h	1650	109	49	31	28	54,25	16	3,29	0,52
	15 h	1800	98	45	27	20	47,5	22	2,64	0,42
4	9 h	219	20	10	8	7	11,25	7	5,14	0,62
	12 h	1650	61	37	33	21	38	7	2,3	0,55
	15 h	1800	97	41	32	24	48,5	30	2,7	0,49
5	9 h	219	15	16	14	23	17	14	7,76	0,82
	12 h	1650	117	53	24	44	59,5	23	3,6	0,40
	15 h	1800	84	31	21	25	52,7	21	1,17	0,40
6	9 h	219	35	18	14	10	19,25	9	8,79	0,52
	12 h	1650	80	34	30	27	42,75	15	2,59	0,63
	15 h	1800	55	35	25	20	33,75	24	1,88	0,59

Le **tableau 6.4** expose les niveaux d'éclairage naturel, relevés sous ciel couvert pour la journée d'automne (25 mars 2017). L'éclairage extérieur varie de 415 (9 h) lux à 4950 lux (15 h). Alors que l'éclairage intérieur varie de 18 lux à 260 lux. Ces niveaux d'éclairage ne répondent pas aux normes d'éclairage dans les salles de classe (moins de 300 lux). L'éclairage artificiel est donc indispensable pour assurer le confort visuel des élèves. Le FLJ est estimé à 4,84 %, soit une valeur supérieure à la recommandation (2 %) de la démarche HQE. Cela confirme le caractère bioclimatique avant l'heure de cette ancienne école datant de 1874.

Tableau 6.4 : Mesures d'éclairage naturel, sous ciel couvert (24 mars 2017).

N	heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ Moy (%)	U
1	9 h	415	41	28	42	38	37,25	19	8,98	0,75
	12 h	1400	40	22	22	21	26,25	17	1,88	0,8
	15 h	4950	165	134	167	188	163,5	90	3,3	0,82
2	9 h	415	102	37	25	47	52,75	14	12,71	0,47
	12 h	1400	167	46	29	61	75,75	24	5,41	0,38
	15 h	4950	472	164	125	281	260,5	100	5,26	0,48

3	9 h	415	39	15	11	7	18	6	4,34	0,39
	12 h	1400	101	37	30	20	47	19	3,36	0,43
	15 h	4950	376	208	167	115	216,5	94	4,37	0,53
4	9 h	415	58	13	5	5	20,25	8	4,88	0,25
	12 h	1400	51	46	25	22	36	21	2,57	0,61
	15 h	4950	585	192	96	97	242,5	80	4,9	0,4
5	9 h	415	50	18	14	15	24,25	10	5,84	0,58
	12 h	1400	100	36	25	28	47,25	23	3,38	0,53
	15 h	4950	243	96	80	90	127,25	53	2,57	0,63
6	9 h	415	41	22	14	12	22,25	13	5,36	0,54
	12 h	1400	120	70	51	38	69,75	34	4,98	0,54
	15 h	4950	271	150	113	88	155,5	102	3,14	0,57

2.2. Lycée Mustapha FERROUKHI

Le **tableau 6.5** met en exergue les niveaux d'éclairage naturel mesurés sous ciel clair (28 mars 2018). Cette journée est caractérisée par un niveau d'éclairage extérieur variant de 5600 lux (9 h) à 91 200 lux (12 h). À l'égard de l'éclairage intérieur, il convient de constater qu'il y a une différence entre les salles du rez-de-chaussée et celles situées au deuxième étage. Dans les salles 1 et 2, il varie de 86 lux à 402 lux avec une moyenne de 251 lux (au-dessous de 300 lux). Alors qu'il varie dans les salles de classe 3 et 4, de 518 lux à 1169 lux, avec une moyenne de 696 (au-dessus de 300 lux). Cette différence d'éclairage, est due à l'emplacement des espaces d'étude, dans le sens où, les salles du deuxième étage captent davantage de lumière naturelle que celles du rez-de-chaussée. Cependant, il est à souligner que ces niveaux d'éclairage sont excessifs, principalement dans la salle 3, où ils frôlent les 1000 lux durant l'après-midi (éclairage moyen est de 1169 lux à 15 h). Cela est dû surtout à sa double orientation (nord-ouest). Par ailleurs, il convient de dire que cet éclairage excessif cause des réflexions gênantes sur le tableau blanc. Les principales réactions adoptées par les usagers consistent à réduire ses effets, par fermeture des persiennes.

En termes d'uniformité d'éclairage naturel, les niveaux de lux sont bien répartis dans les salles de classe du deuxième étage. La valeur moyenne est de 0,92, alors qu'elle est de l'ordre de 0,65 pour les salles du rez-de-chaussée. Cette différence est due aux caractéristiques des fenêtres. En effet, les baies vitrées se trouvent au centre de la paroi des salles 1 et 2. Alors qu'elles se situent en haut des

parois pour les salles 3 et 4 et cela permet de capter plus de lumière naturelle, et la distribuer au fond des espaces d'étude (voir la stratégie de l'éclairage naturel, chapitre 2).

Tableau 6.5 : Mesures d'éclairage naturel, sous ciel clair (28 mars 2018).

N°	heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ Moy (%)	U
1	9 h	5600	319	155	84		186	102	3,32	0,45
	12 h	91 200	618	303	268		397	290	0,43	0,68
	15 h	78 400	319	165	144		209	159	0,27	0,69
2	9 h	6030	130	75	53		86	56	1,42	0,62
	12 h	93 000	341	192	150		228	163	0,24	0,66
	15 h	78 400	491	388	327		402	403	0,51	0,81
3	9 h	6440	502	589	503	478	518	581	8,04	0,92
	12 h	92 500	979	1033	942	875	957	927	1,03	0,91
	15 h	76 300	1249	1264	1126	1038	1169	934	1,53	0,89
4	9 h	6440	531	618	593		581	632	9,02	0,91
	12 h	92 500	665	701	665		677	544	0,73	0,98
	15 h	76 300	316	269	239		275	187	0,36	0,87

Le **tableau 6.6** présente les niveaux d'éclairage naturel mesurés sous ciel couvert (9 février décembre 2018). L'éclairage extérieur varie de 1783 lux (12 h) à 8300 lux (15 h). En ce qui concerne l'éclairage moyen intérieur, il convient d'établir le même constat de la journée ciel clair. Les salles du rez-de-chaussée sont moins éclairées naturellement que celles du deuxième étage. Les niveaux d'éclairage dans les salles 1 et 2 varient de 32 à 149 lux, avec une moyenne de 77 lux (au-dessous de la valeur recommandée de 300 lux). Les niveaux d'éclairage dans les salles 3 et 4 varient de 199 à 460 lux, avec une moyenne de 332, soit une valeur au-dessus de la norme (300lux). Ceci dit que le recours à l'éclairage artificiel est indispensable pour les salles du rez-de-chaussée, alors qu'il est facultatif pour les salles du deuxième étage.

En ce qui concerne la valeur moyenne du facteur de lumière du jour (FLJ), elle est de l'ordre de 5,76 %. C'est-à-dire, supérieure à 2 %, préconisée par la démarche haute qualité environnementale (HQE). À l'instar du lycée Abdou, nous déduisons que la lumière du jour a été optimisée lors de la conception du bâtiment

scolaire, pour que l'efficacité lumineuse soit optimale sans recourir à l'éclairage artificiel.

Tableau 6.6 : Mesures d'éclairage naturel, sous ciel couvert (9 février 2018).

N°	heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ Moy (%)	U
1	9 h	5620	67	14	16		32	14	0,58	0,43
	12 h	1783	168	85	59		104	85	5,83	0,57
	15 h	8300	146	83	72		100	69	1,21	0,72
2	9 h	5620	79	14	8		34	15	0,6	0,24
	12 h	1783	105	15	5		42	34	2,34	0,12
	15 h	8300	261	98	87		149	73	1,79	0,59
3	9 h	5620	241	177	206	170	199	285	3,53	0,86
	12 h	1783	528	390	308	247	368	197	20,65	0,67
	15 h	8300	660	496	364	318	460	367	5,54	0,69
4	9 h	5620	280	527	470		426	430	7,57	0,66
	12 h	1783	472	252	160		295	179	16,53	0,54
	15 h	8300	349	230	153		244	163	2,94	0,63

Le **tableau 6.7** présente les niveaux d'éclairage naturel, relevés en journée d'automne (21 mars 2018), caractérisée par un ciel couvert, l'éclairage extérieur varie de 1640 (9 h) lux à 15 000 lux (15 h). Vers 9 h, un faible niveau d'éclairage a été évalué dans toutes les salles de classe, il varie entre 52 et 91 lux. Vers 12 h, une amélioration a été constatée, allant de 104 à 127 lux pour les salles du rez-de-chaussée, et varie de 304 à 447 lux pour les salles du deuxième étage. Vers 15 h, les salles 1 et 2 ont dépassé la norme recommandée de 300 lux, de l'ordre de 373 et 358 lux, successivement. Relativement, même quantité de lumière dans la salle 3, de l'ordre de 441 lux, mais une baisse au-dessous de 300 lux pour la salle 4, de l'ordre de 235 lux.

Le FLJ moyen de toutes les salles est estimé à 3,34 %, soit une valeur supérieure à la recommandation de la démarche HQE. Cela confirme encore une fois le caractère bioclimatique avant l'heure de cette ancienne école datant de 1909. En termes d'uniformité, il convient de dire que la répartition de la lumière du jour est beaucoup plus uniforme dans les salles 3 et 4, un pourcentage moyen de l'ordre de 71 %. Alors qu'elle est moins uniforme dans les salles de classe 1 et 2, avec un

pourcentage moyen de 56 %. Cela est dû comme expliqué précédemment à la position des baies sur les parois.

Tableau 6.7 : Mesures d'éclairage naturel, sous ciel couvert (21 mars 2018).

N°	heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ Moy (%)	U
1	9 h	1640	88	43	31		54	29	3,28	0,58
	12 h	15 000	173	113	95		127	290	0,85	0,75
	15 h	8240	638	245	235		373	322	4,52	0,63
2	9 h	1640	213	32	29		91	34	5,57	0,32
	12 h	15 000	181	71	60		104	64	0,69	0,58
	15 h	8240	652	235	188		358	187	4,35	0,52
3	9 h	1640	114	80	54	43	72	30	4,42	0,59
	12 h	15 000	404	472	448	463	447	290	2,98	0,90
	15 h	8240	644	564	320	234	441	182	5,35	0,53
4	9 h	1640	67	53	34		52	30	3,14	0,67
	12 h	15 000	296	340	275		304	250	2,02	0,91
	15 h	8240	270	280	156		235	138	2,85	0,66

3. Évaluation qualitative

Comme ç'a été démontré dans les chapitres précédents, le questionnaire a pour objectif d'obtenir des informations sur la relation personne-milieu, et qu'on ne saurait pas les avoir par les compagnes de mesures. À cet effet, ces questions seront développées davantage, en les mettant en relation avec les résultats de l'évaluation quantitative.

3.1. Lycée Mohamed ABDOU

3.1.1. Réponses au questionnaire du confort visuel de la période froide (février)

Par rapport aux fenêtres et tableau, les **figures 6.1 (a) et 6.1 (b)** mettent en exergue la position préférée des élèves. Il convient de dire que le pourcentage est différent entre « près des fenêtres » et « loin des fenêtres ». Mise à part la salle 2 qui est caractérisée par un pourcentage important des élèves voulant s'asseoir « près des fenêtres » avec 67 %, nous remarquons que les sujets préfèrent des positions « loin des fenêtres », notamment en salles 1, 3 et 6 avec 67 %, 69 %, et 71 %,

respectivement. Cela est probablement dû aux déperditions thermiques énormes et aux infiltrations d'air froid, comme bien expliqué précédemment par la thermographie. Par ailleurs, il s'avère que la majorité des élèves « plus de 60 % » préfèrent s'asseoir près du tableau blanc. Cela est dû naturellement à la meilleure visibilité de l'écriture.

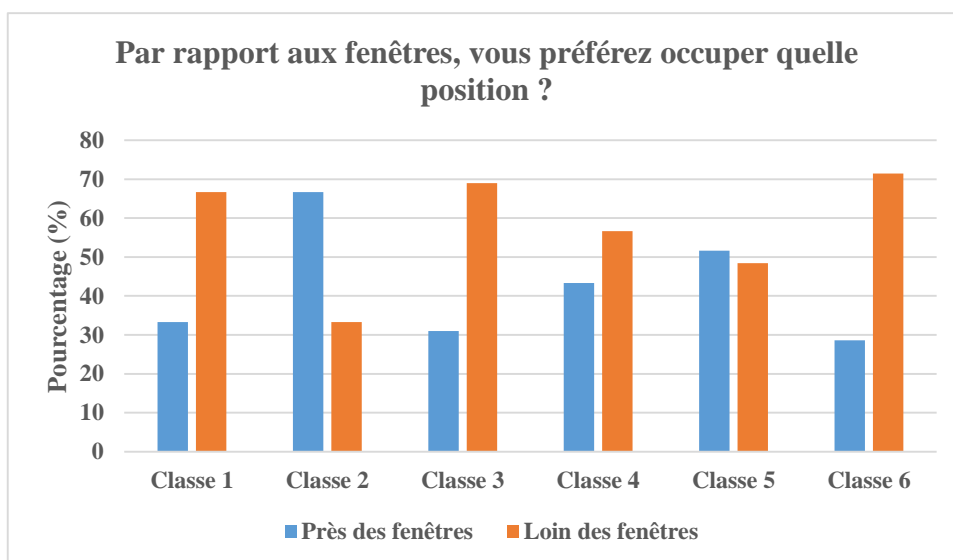


Figure 6.1, a)

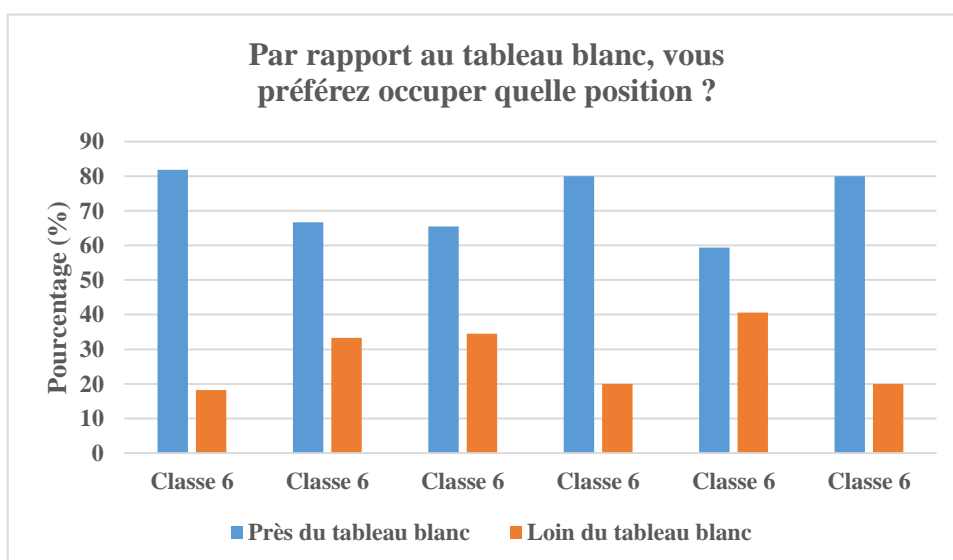


Figure 6.1, b)

Au sujet du type d'éclairage, la **figure 6.1 (c)** montre que les occupants des salles en majorité (plus de 60 %) dépendent d'une combinaison d'éclairage naturel + artificiel. Cela est dû à l'éclairement extérieur minime en période hivernale,

notamment dans le cas d'un ciel couvert, procurant un niveau d'éclairement de 5000 lux. Telles conditions minimales d'éclairement ne sont pas en mesure d'assurer les 300 lux requis par la réglementation de l'éclairage dans les salles de classe. Du coup, le recours à l'artificiel s'avère nécessaire.

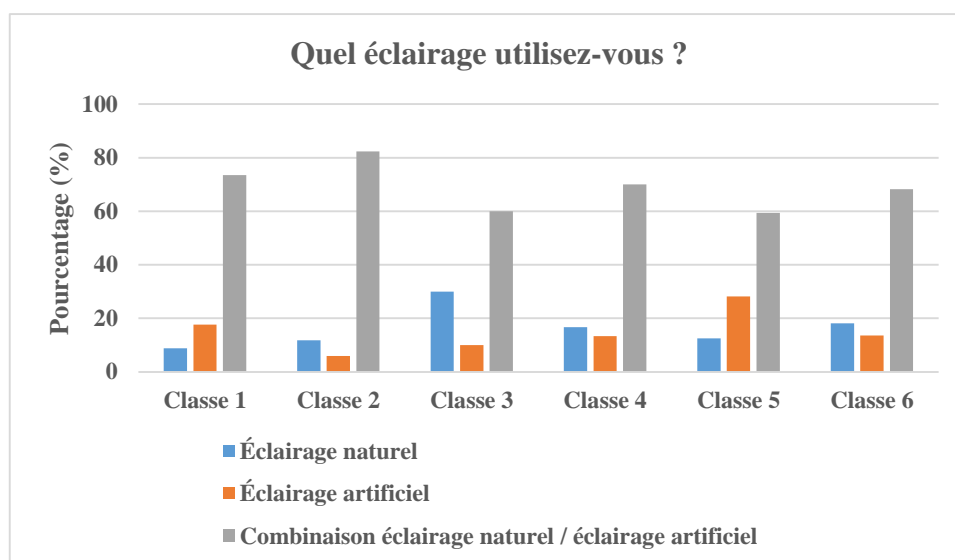


Figure 6.1, c)

Au sujet d'estimation du niveau d'éclairement naturel, les **figures 6.1 (d) et 6.1 (e)** montrent l'évaluation subjective du niveau d'éclairement pendant l'enquête de février. En termes de disponibilité de lumière du jour, la majorité des répondants (plus de 50 %) ont estimé que la lumière du jour était suffisante durant les heures d'occupation dans les six salles de classe. Les réponses des élèves varient de « lumière suffisante » à « lumière très suffisante ». Cependant, il convient de souligner qu'environ 30 % des élèves ont constaté que la salle de classe 4 était mal éclairée pendant la matinée de février (hiver) et leur pourcentage a augmenté à 45 % durant l'après-midi. Cela a été attribué à leur comportement dans l'après-midi, à travers la fermeture des fenêtres, afin d'éviter les reflets du soleil sur le tableau blanc. Par conséquent, la quantité de lumière du jour a été réduite.

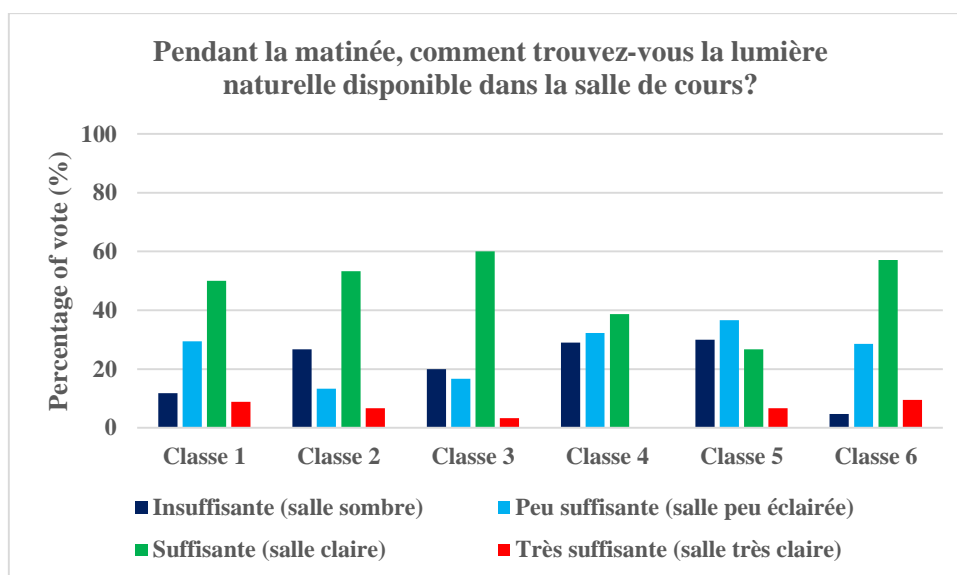


Figure 6.1, d)

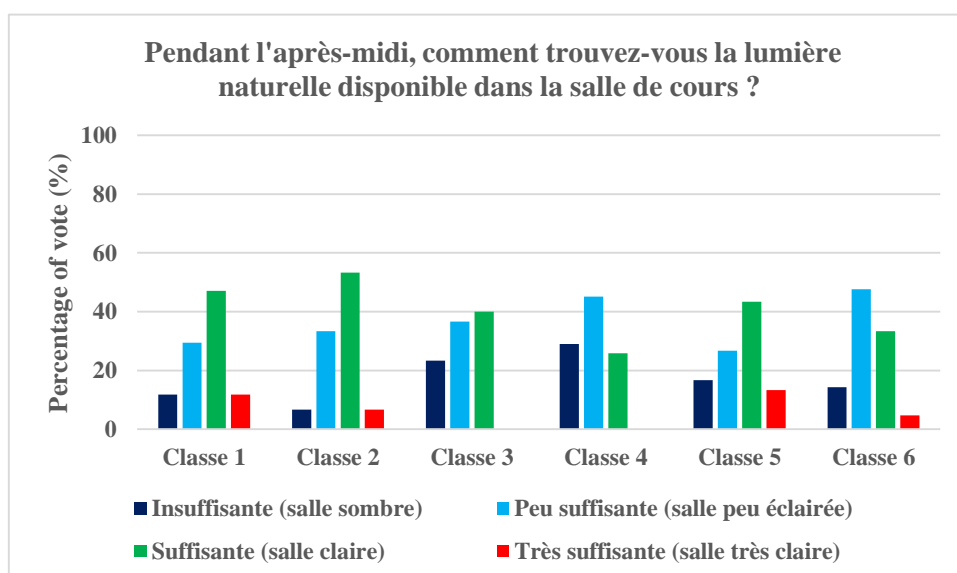


Figure 6.1, e)

En termes de visibilité du tableau blanc (**figures 6.1, f et 6.1, g**). Il convient de noter qu'il y a une différence entre les espaces d'études. En effet, la salle dotée d'une façade « est », en l'occurrence la salle 1, avait 61,76 % des répondants, n'arrivant pas à apercevoir clairement le tableau, principalement durant la matinée, en raison du rayonnement du lever de soleil. De plus, les salles de classe donnant sur le côté « ouest », à l'instar des salles 3 et 4, avaient un pourcentage de sujets estimés de 55,17 % et 67,86 % (respectivement), souffrant des problèmes de visibilité, notamment durant l'après-midi. Par contre, celles qui sont dotées d'une

bonne visibilité selon les sujets, ce sont les salles 5, 2 et 6 avec un pourcentage de 82,76 %, 78,57 % et 78,57 %, respectivement.

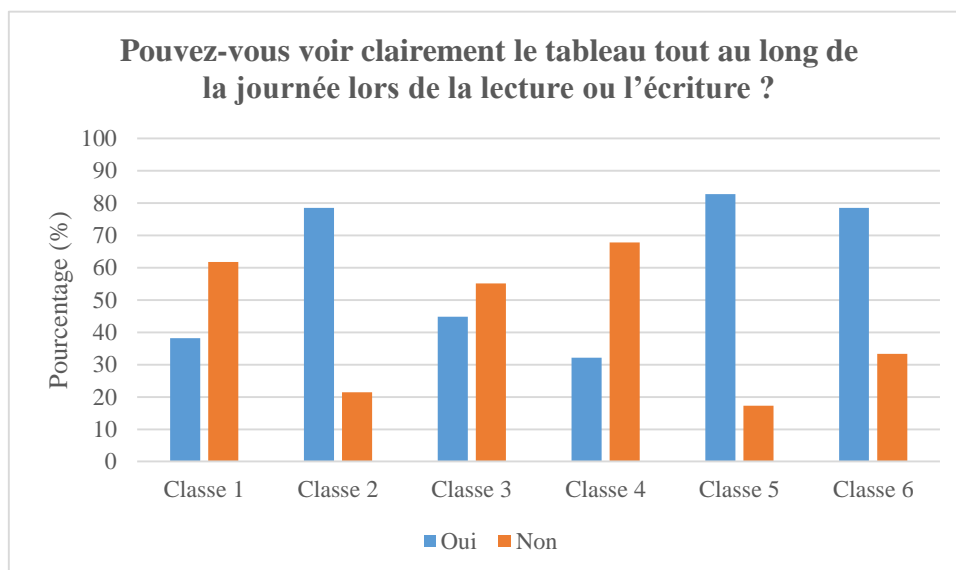


Figure 6.1, f)

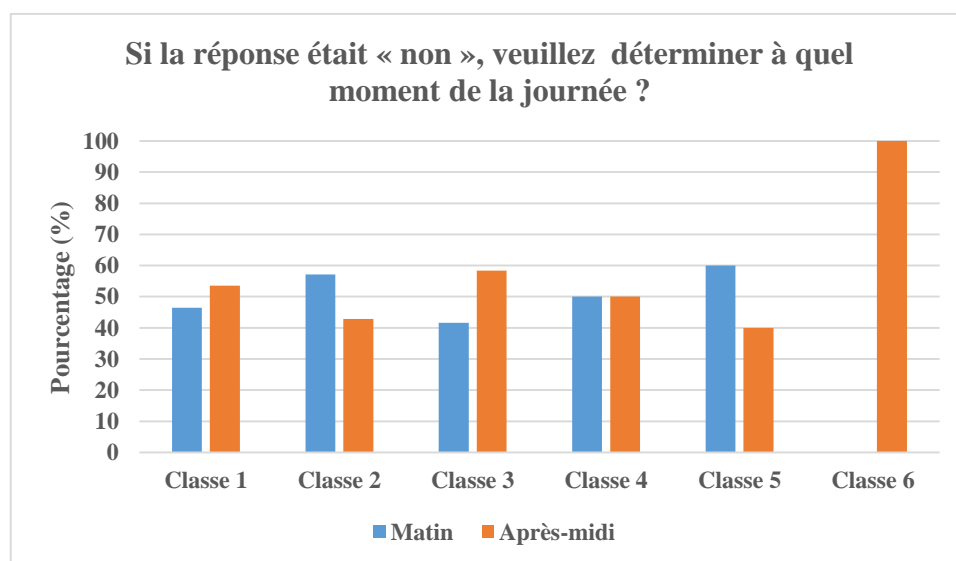


Figure 6.1, g)

Les **figures 6.1 (h) et 6.1 (i)** portent sur la visibilité de l'écriture. Pour toutes les salles de classe, il convient de constater que les rayons solaires perturbent la vision des sujets (plus de 60 %). Cela est dû à l'orientation sud des salles, favorisant ainsi le passage des rayons du soleil en hiver, notamment après la chute des feuilles caduques des platanes. Par ailleurs, les élèves trouvent des problèmes de vision dans le côté gauche et droit. Cela est dû à la disposition bilatérale des fenêtres.

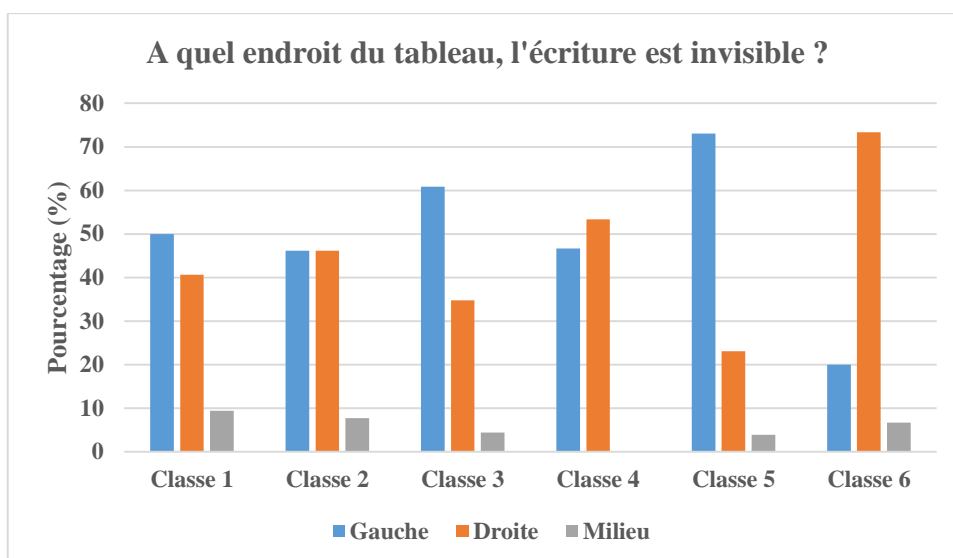


Figure 6.1, h)

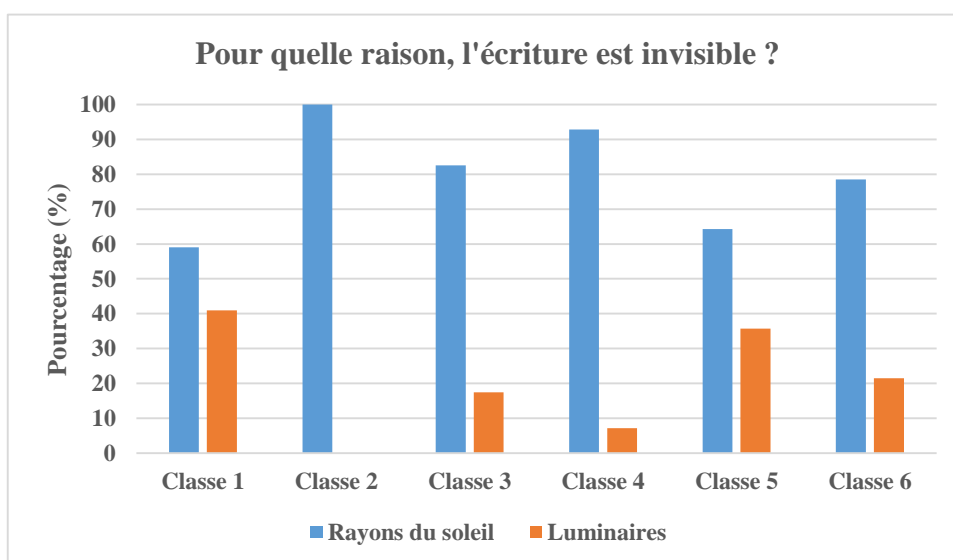


Figure 6.1, i)

En termes de reflets sur le tableau blanc (voir **figures 6.1, j et 6.1, k**), la même qualité visuelle est observée dans les six salles de classe. Plus de 70 % des sujets ont répondu « oui » aux réflexions gênantes sur le tableau blanc. Cela peut être attribué à l'absence de systèmes de contrôle de la lumière du jour, tels que des rideaux et des light-shelves. Pour éviter ces problèmes d'éblouissement, les occupants ferment souvent les fenêtres et recourent à l'éclairage artificiel pour effectuer leurs tâches visuelles. Et cela conduit naturellement à plus de consommation énergétique.

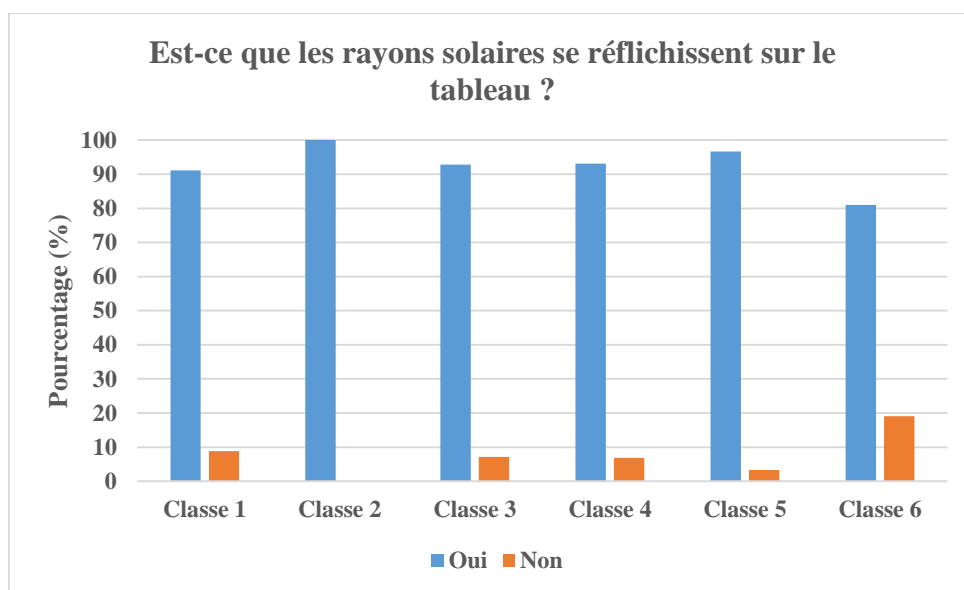


Figure 6.1, j)

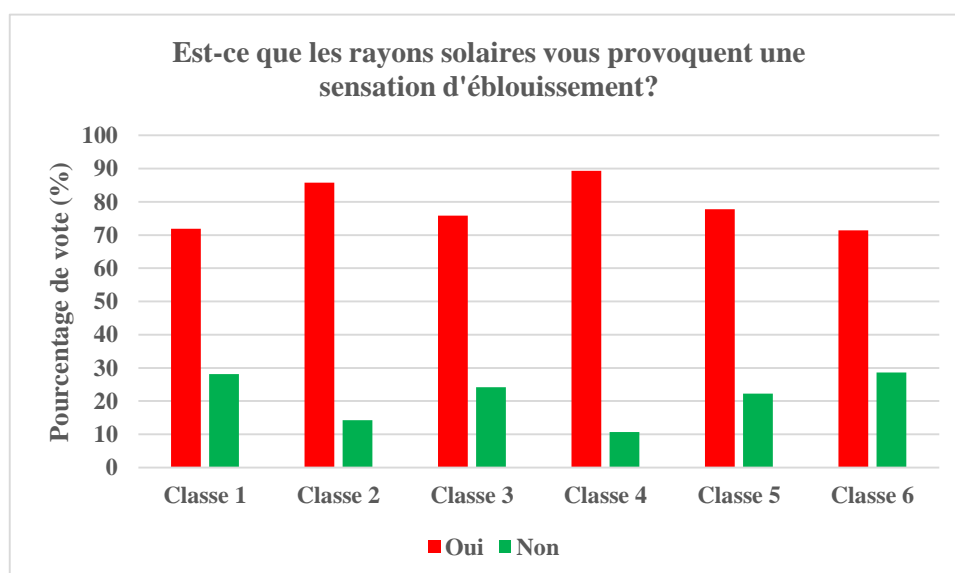


Figure 6.1, k)

La figure 6.1 (l) met en exergue le pourcentage de sujets, ayant reçu des taches solaires au niveau de leurs plans de travail. Pratiquement, la majorité des sujets « plus de 50 % » des 6 salles de classe, reçoivent des taches solaires sur leurs tables. Cela est dû à la position basse du soleil dans le ciel pendant l'hiver, et par conséquent, ses rayons pénètrent facilement à travers les fenêtres hautes « 2 m » des salles orientées côté sud. De plus, il convient de constater que ce pourcentage est élevé dans les salles de classe 5 et 6, avec 72,41 % et 65 %,

respectivement. Cela est dû à l'emplacement au deuxième étage, qui favorise la pénétration très importante des rayons solaires.

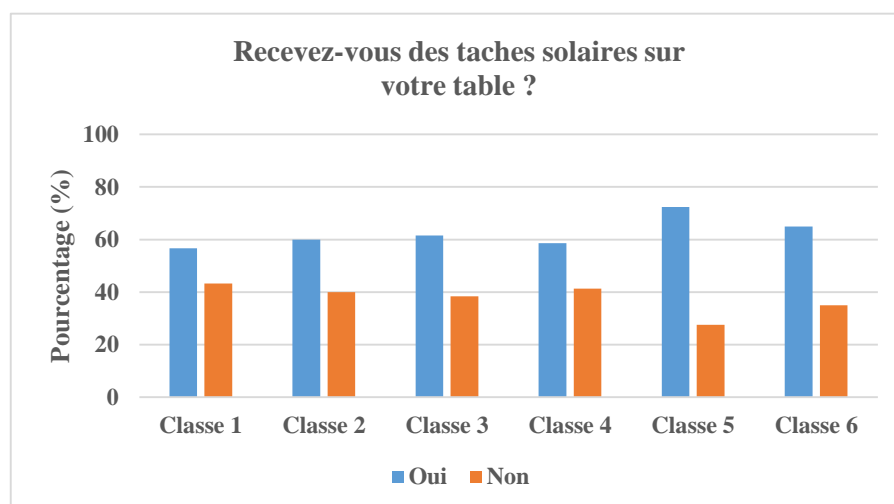


Figure 6.1, l)

La **figure 6.1 (m)** affiche les différents moyens utilisés par les occupants des six salles de classe pour éviter les taches solaires reçues sur les plans de travail. Il y a lieu de remarquer que la majorité des occupants « plus de 40 % » recourent à fermer les persiennes. Il est à constater aussi que les occupants de la salle 4, procèdent beaucoup à cette stratégie pour éviter aussi bien les taches solaires, que les reflets gênants sur le tableau. Néanmoins, cela entraîne une réduction en termes d'éclairage naturel à l'intérieur de la salle de classe, cela a été bien clarifié dans l'évaluation quantitative. De plus, il entraîne le recours excessif à l'éclairage artificiel.

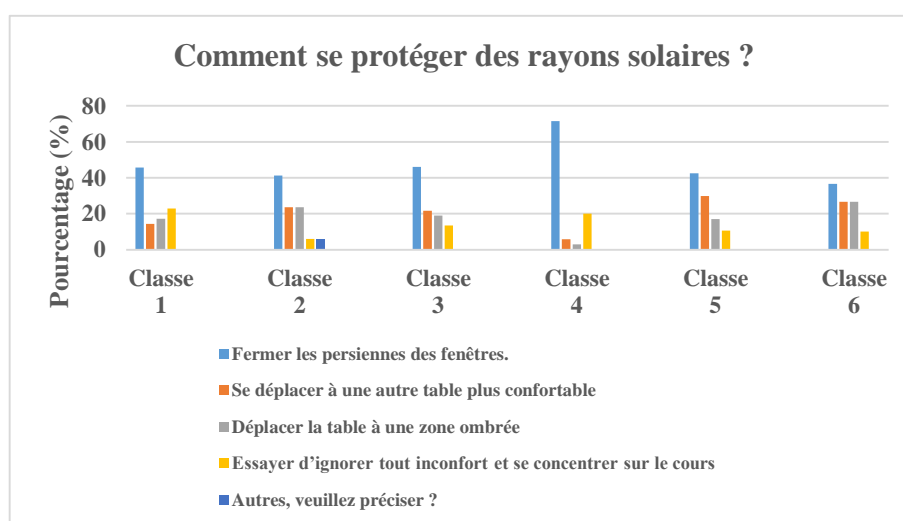


Figure 6.1, m)

La **figure 6.1 (n)** présente l'avis des sujets vis-à-vis de la mise en place des dispositifs de protection solaire au niveau des ouvertures. Il convient de constater que (76 %) des occupants de la salle 4 souhaiteraient mettre ces dispositifs, plus que les autres salles de cours. Ceci est dû à son orientation ouest, qui favorise la pénétration du rayonnement solaire surtout pendant l'après-midi. Ceci perturbe significativement le déroulement des cours et affecte le confort visuel des occupants, à savoir la mauvaise visibilité du tableau lors de l'écriture ou la lecture.

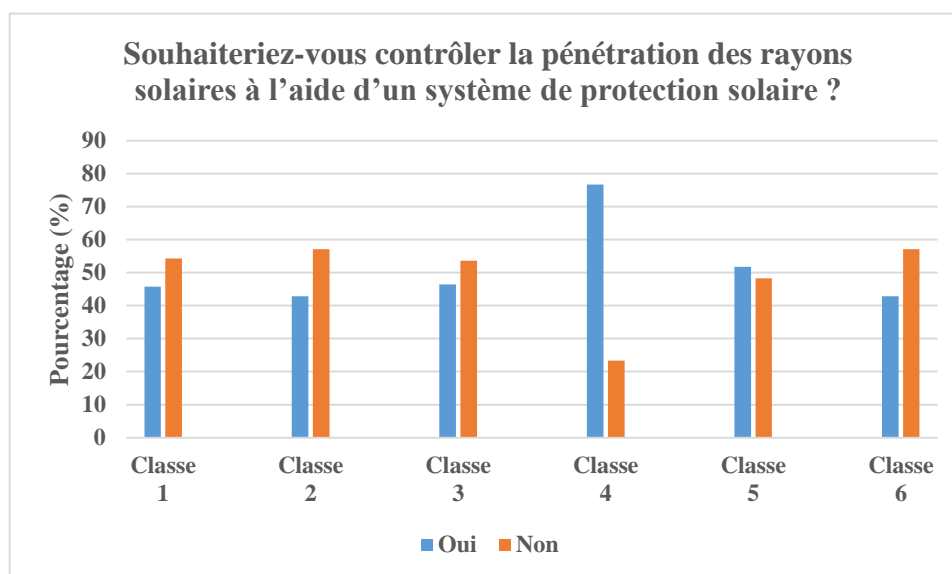


Figure 6.1, n)

La dernière section de ce questionnaire de la période d'hiver (février), met en évidence la satisfaction des sujets à l'égard de certains éléments. Au sujet des dimensions architecturales des salles de classe (**figure 6.1, o**), la plupart des réponses varient de « peu satisfait » à « très satisfait ». Concernant, l'environnement général (Couleur, sol...) (**figure 6.1, p**), la majorité des sujets se disent indifférents vis-à-vis de cela. En ce qui concerne les dimensions des fenêtres (largeur et hauteur), les réponses des sujets portent en majorité sur « peu satisfait » à « très satisfait » (**figure 6.1, q**). Pour la qualité du plafond suspendu (**figure 6.1, r**), les sujets des salles du premier étage (1, 2,3 et 4) s'expriment en majorité « très satisfaits » vis-à-vis de cela. Par contre, la majorité des sujets en salles du deuxième étage (5 et 6) se disent d'insatisfait à très insatisfait, principalement la salle 6 avec un pourcentage de « très insatisfait » arrivant à 71 %. Cela est dû aux problèmes d'infiltrations d'air froid pendant l'hiver, causant une chute significative de

température comme bien expliquée en évaluation quantitative. Au sujet du chauffage (**figure 6.1, s**), il convient de constater que les réponses des sujets en salles 1,3 et 4, portent en majorité (40 %) sur « insatisfait ». Tandis que, ceux des salles 2,5 et 6, se disent « très insatisfaits », notamment la salle 6 avec environ 90 %. Cela est dû à la faible performance thermique active des salles du deuxième étage, comparativement aux salles du rez-de-chaussée. Et en accord avec les basses températures relevées dans ces salles. À l'égard de l'éclairage artificiel, la majorité des réponses portent sur « peu satisfait » (**figure 6.1, t**). Cela est en concordance avec les résultats des mesures in situ qui relèvent de faibles niveaux d'éclairage artificiel, avec une moyenne de 59 Lux. C'est-à-dire loin de la norme de 300 lux. Relativement à l'aération (**figure 6.1, u**), les occupants des salles sont en majorité « peu satisfaits ». Cela est probablement dû à l'absence d'un système mécanique de ventilation qui est en mesure de remplacer l'air vicié ou pollué par de l'air neuf.

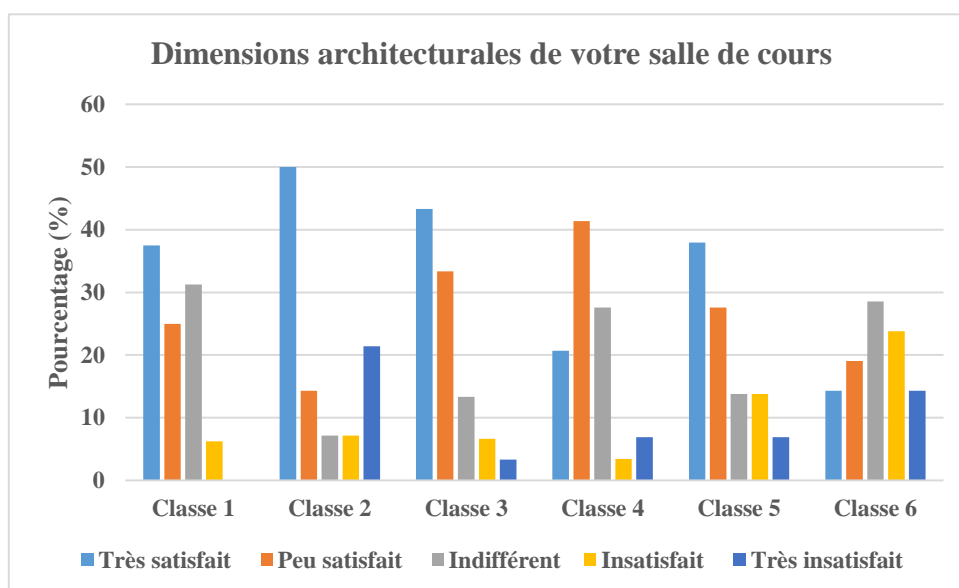


Figure 6.1, o)

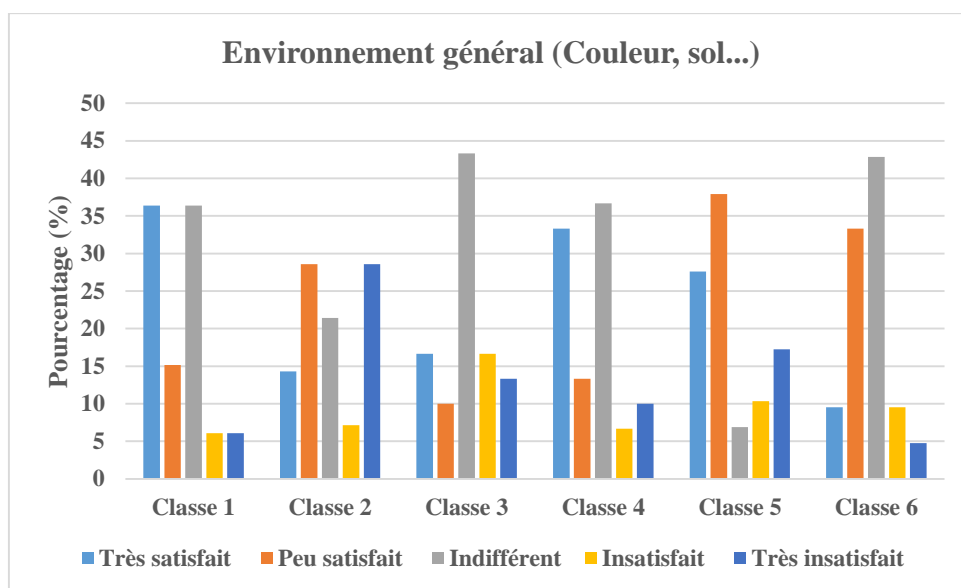


Figure 6.1, p)

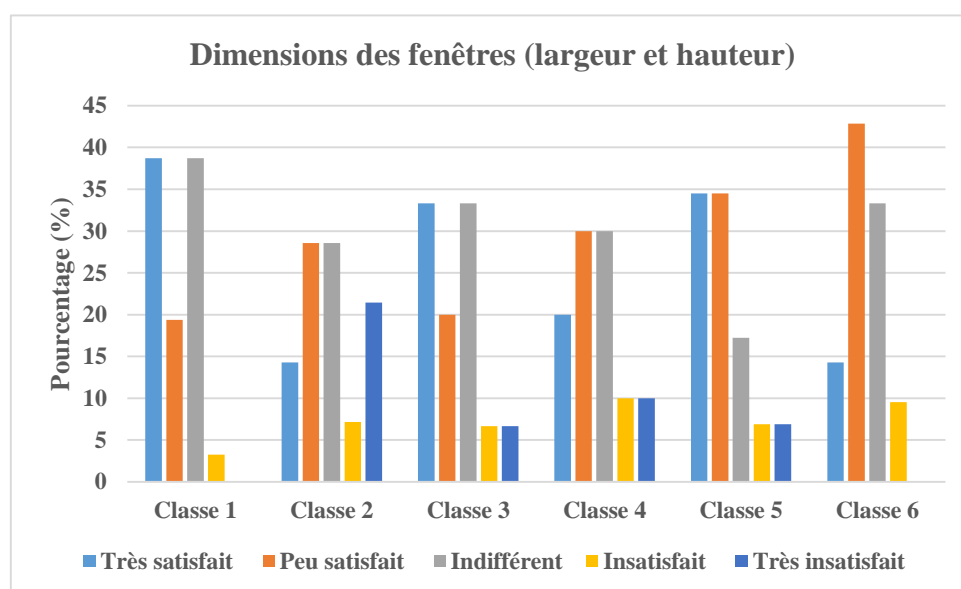


Figure 6.1, q)

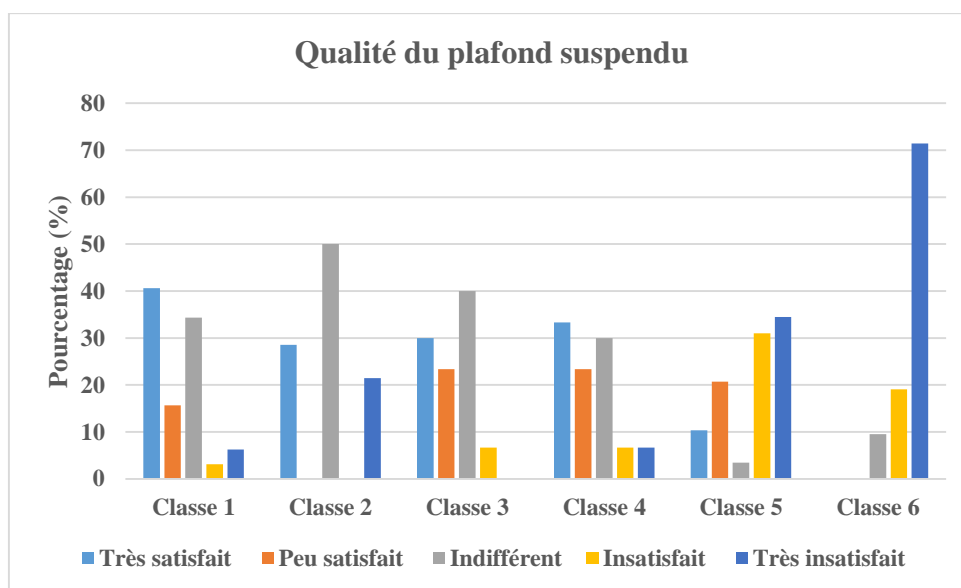


Figure 6.1, r)

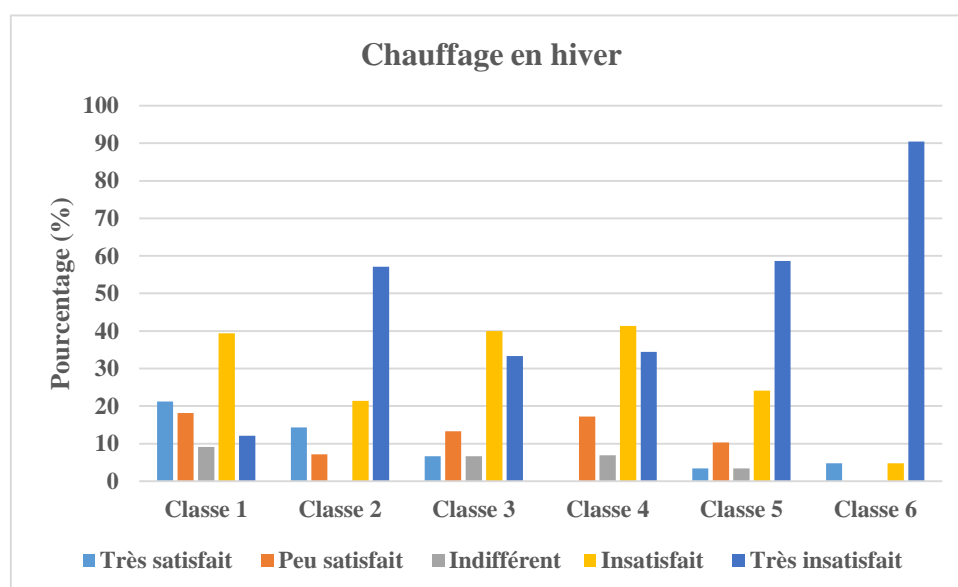


Figure 6.1, s)

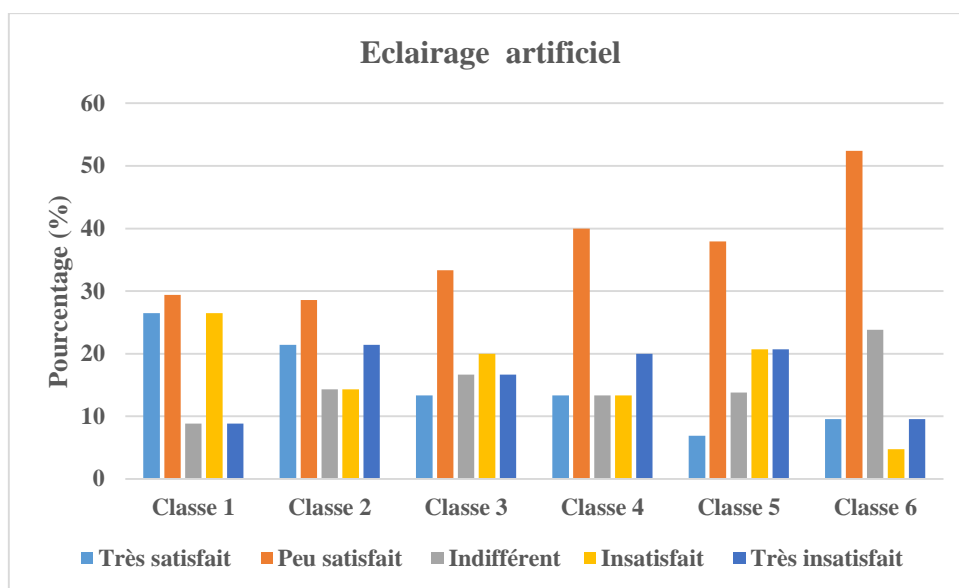


Figure 6.1, t)

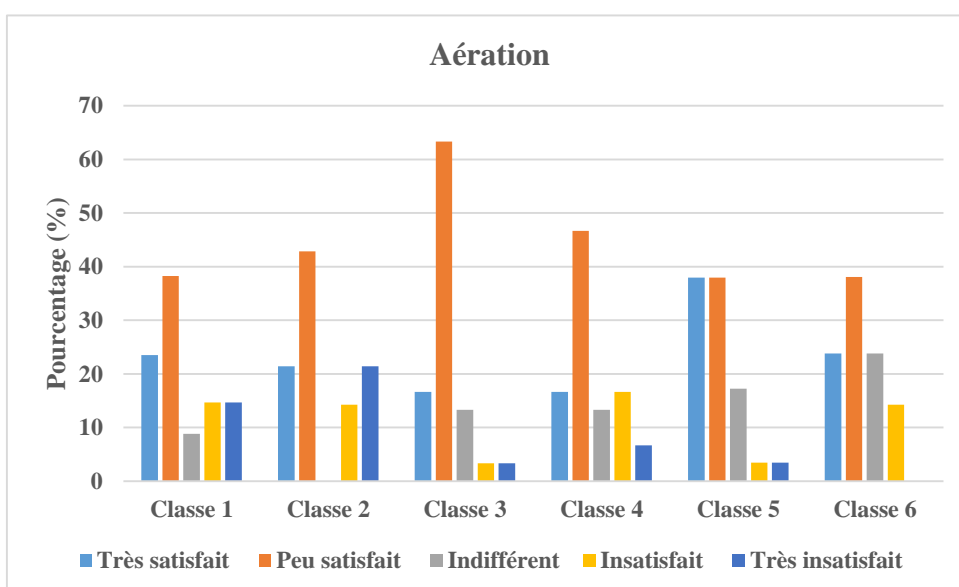


Figure 6.1, u)

3.1.2. Réponses au questionnaire du confort visuel de la période chaude (Lycée ABDOU)

À l'égard du type d'éclairage, la **figure 6.2 (a)** montre que les usagers des salles étudiées recourent à une combinaison (naturelle + artificielle), avec beaucoup plus de l'éclairage naturel. Cela est justifié par l'état clair du ciel en cette période, où l'éclairement extérieur est important, par exemple, à midi, on estime un niveau

avoisinant les 90 000 lux. Et du coup, le niveau d'éclairage est aussi important dans les salles de classe.

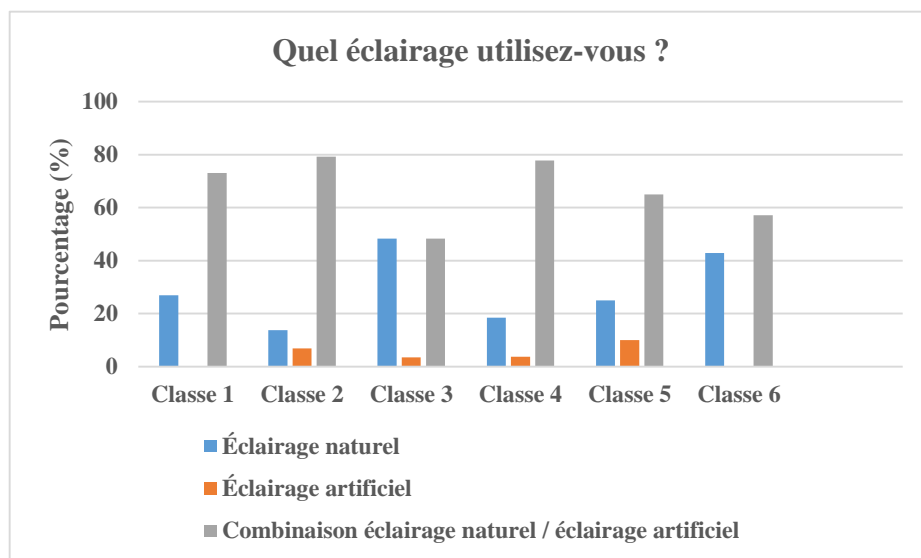


Figure 6.2, a)

Au sujet d'estimation du niveau d'éclairage naturel, les **(figures 6.2 (b) et 6.2 (c))** montrent l'évaluation subjective du niveau d'éclairage pendant l'enquête de septembre. À l'image des réponses de février, en matière de disponibilité de lumière du jour, la majorité des répondants (plus de 50 %) ont estimé que la lumière du jour était suffisante durant les heures d'occupation dans les six salles de classe. Les réponses des élèves varient de « lumière suffisante » à « lumière très suffisante ». Cependant, il convient de souligner qu'environ 30 % des élèves ont constaté que la salle de classe 4 était mal éclairée pendant la matinée de 24 septembre et leur pourcentage a augmenté à 45 % durant l'après-midi. Cela a été attribué à leur comportement dans l'après-midi, à travers la fermeture des fenêtres, afin d'éviter les reflets du soleil sur le tableau blanc. Par conséquent, la quantité de lumière du jour a été réduite.

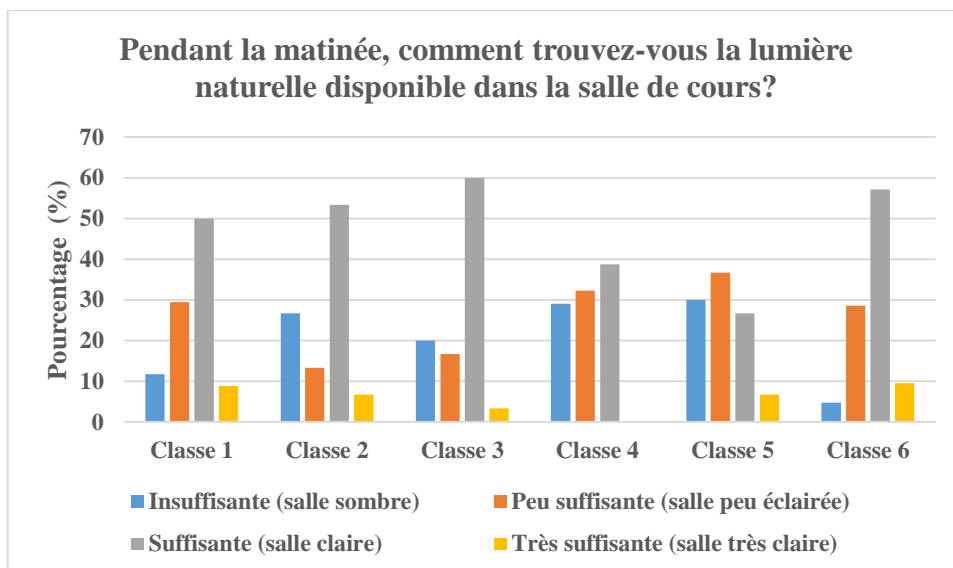


Figure 6.2, b)

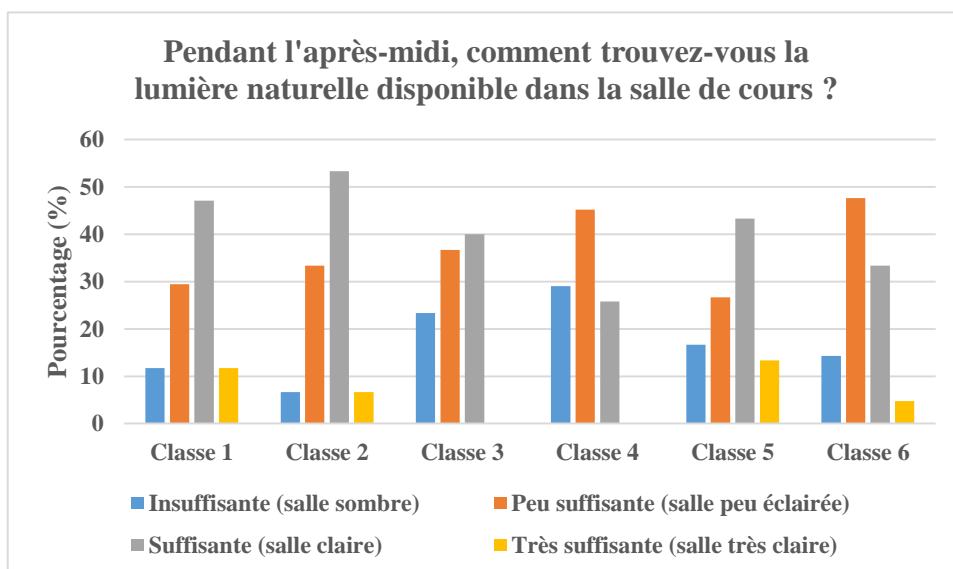


Figure 6.2, c)

La **figure 6.2 (d)** affiche l'évaluation subjective de la lumière artificielle. Il convient de dire que les sujets des salles 3, 4 et 5 estiment que l'éclairage artificiel est « suffisant », avec des pourcentages successifs de 48 %, 50 % et 60 %. Alors que, les occupants des salles 1,2 et 3 l'évaluent comme « peu suffisant » avec 46 %, 42 % et 64 %, successivement. Cela est en accord avec les mesures in situ, qui ont révélé une moyenne de 59 Lux, soit une valeur inférieure à la norme recommandée de 300 lux.

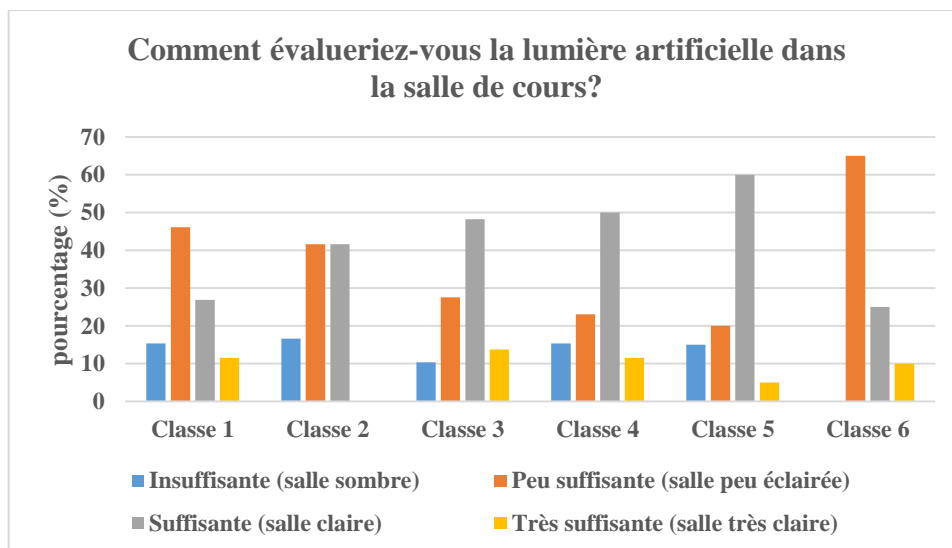


Figure 6.2, d)

En termes de visibilité du tableau blanc (**figures 6.2, e et 6.2, f**). Il convient de noter qu'il y a une différence entre les espaces d'étude. En effet, la salle dotée d'une façade « est », en l'occurrence la salle 1, avait 61,76 % des répondants, n'arrivant pas à apercevoir clairement le tableau, principalement durant la matinée, en raison du rayonnement du lever de soleil. De plus, les salles de classe donnant sur le côté « ouest », à l'instar des salles 3 et 4, avaient un pourcentage de sujets estimés de 55,17 % et 67,86 % (respectivement), souffrant des problèmes de visibilité, notamment durant l'après-midi. Par contre, celles qui sont dotées d'une bonne visibilité selon les sujets, ce sont les salles 5, 2 et 6 avec un pourcentage de 82,76 %, 78,57 % et 78,57 %, respectivement.

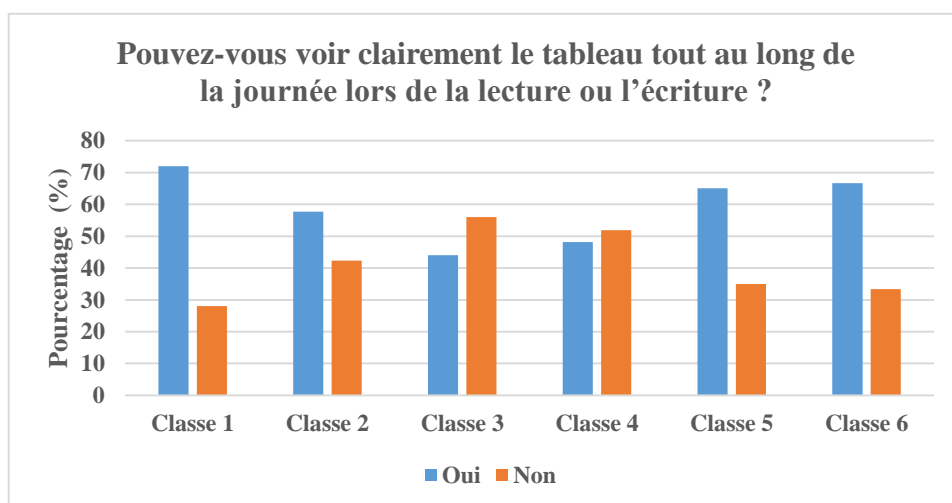


Figure 6.2, e)

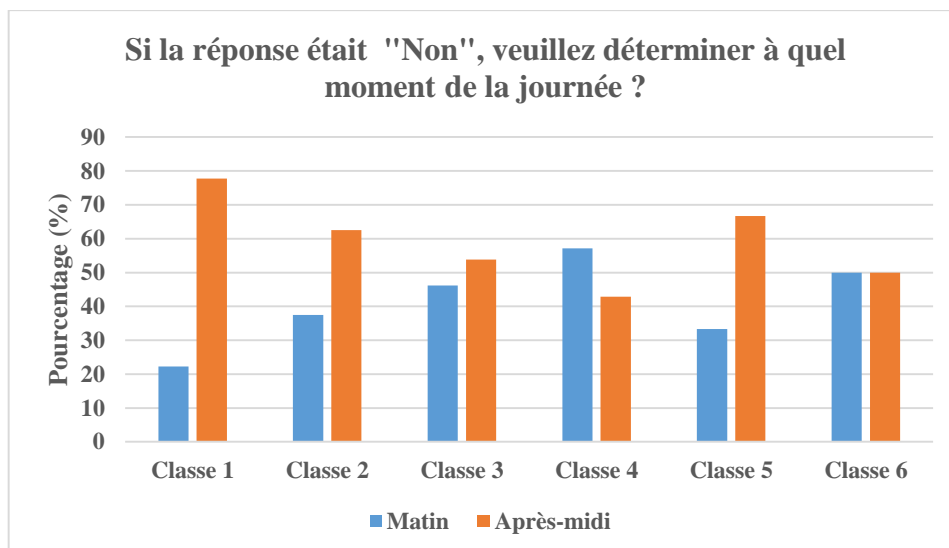


Figure 6.2, f)

Les **figures 6.2 (g) et (h)** portent sur la visibilité de l'écriture. À l'image de la période d'hiver, il convient de constater que, les rayons solaires perturbent la vision des sujets avec plus de 70 %. Cela est justifié par l'orientation sud des salles de classe, favorisant ainsi le passage des rayons du soleil de septembre. Par ailleurs, les élèves trouvent des problèmes de vision dans le côté gauche et droit. Cela est dû à la disposition bilatérale des fenêtres.

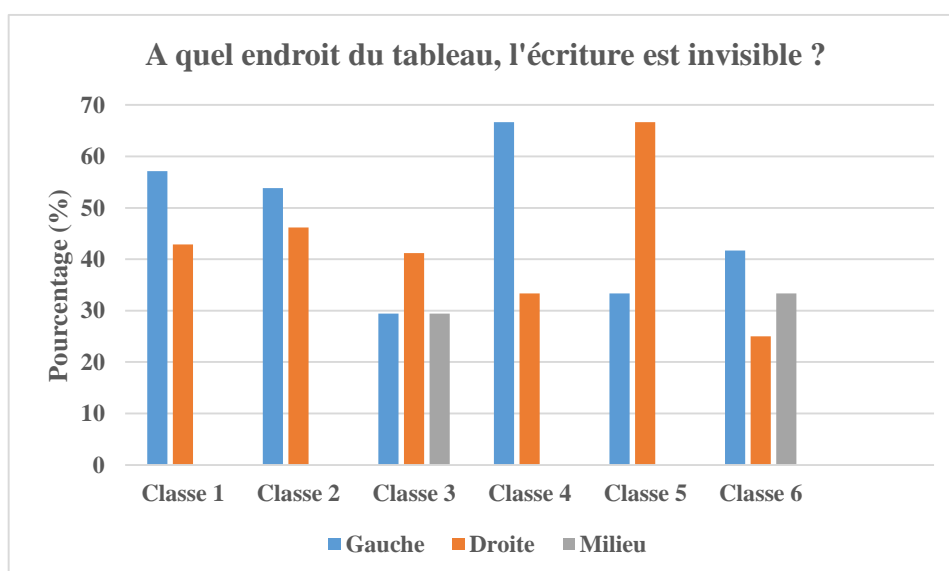


Figure 6.2, g)

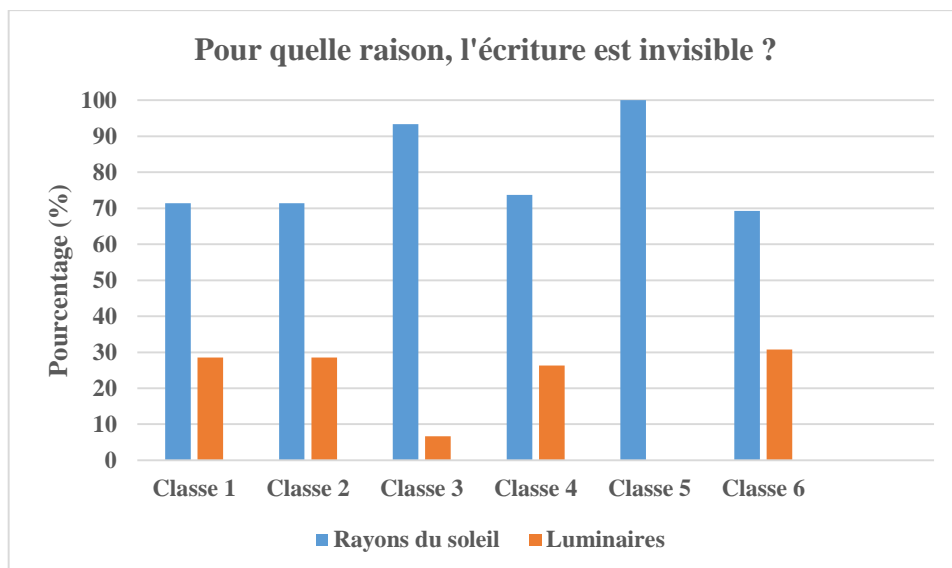


Figure 6.2, h)

Concernant les reflets sur le tableau blanc (voir **figures 6.2, i et 6.2, j**), la même qualité visuelle est observée dans les six salles de classe. Plus de 70 % des lycéens ont répondu « oui » aux réflexions gênantes sur le tableau blanc. Cela peut être attribué à l'absence de systèmes de contrôle de la lumière du jour, tels que des rideaux et des light-shelves. Pour éviter ces problèmes d'éblouissement, les occupants ferment souvent les fenêtres et ont recours à l'éclairage artificiel pour effectuer leurs tâches visuelles. Et cela conduit naturellement à plus de consommation énergétique.

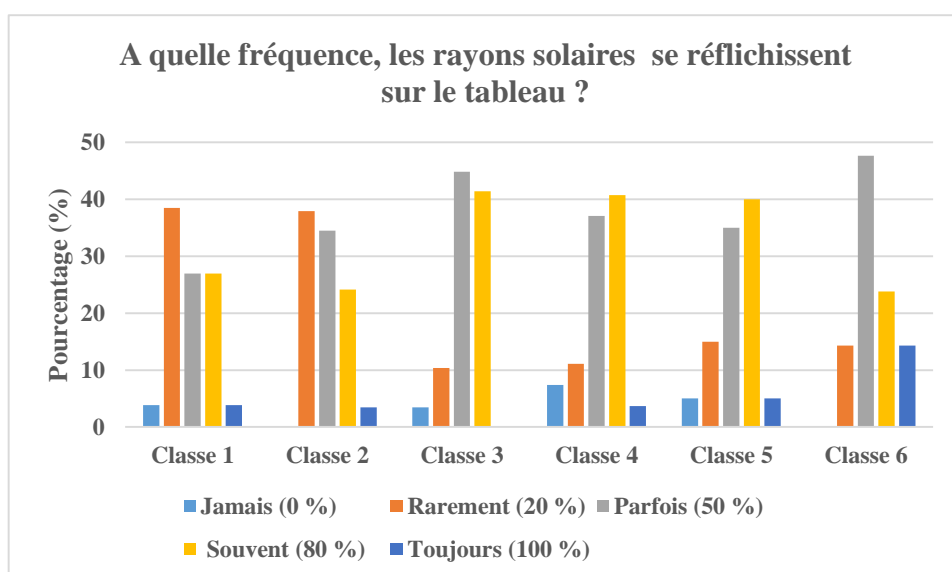


Figure 6.2, i)

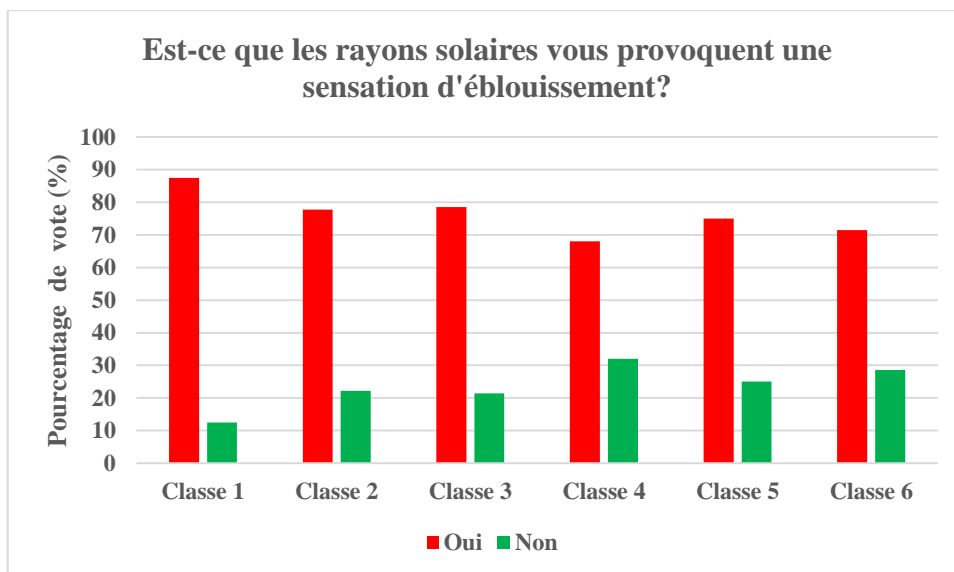


Figure 6.2, j)

La **figure 6.2 (k)** met en lumière le pourcentage de sujets, ayant reçu des taches solaires au niveau de leurs plans de travail. Il est clair que les taches solaires sont moins importantes en septembre qu'en février. Cela est dû à la position plus haute du soleil. Cependant, les sujets des 2 salles du deuxième étage en y reçoivent plus. Cela est dû à l'emplacement et l'orientation sud, qui favorisent la pénétration des rayons solaires à travers les fenêtres hautes « 2 m ». Alors que les salles du premier étage sont beaucoup plus protégées par le feuillage des platanes.

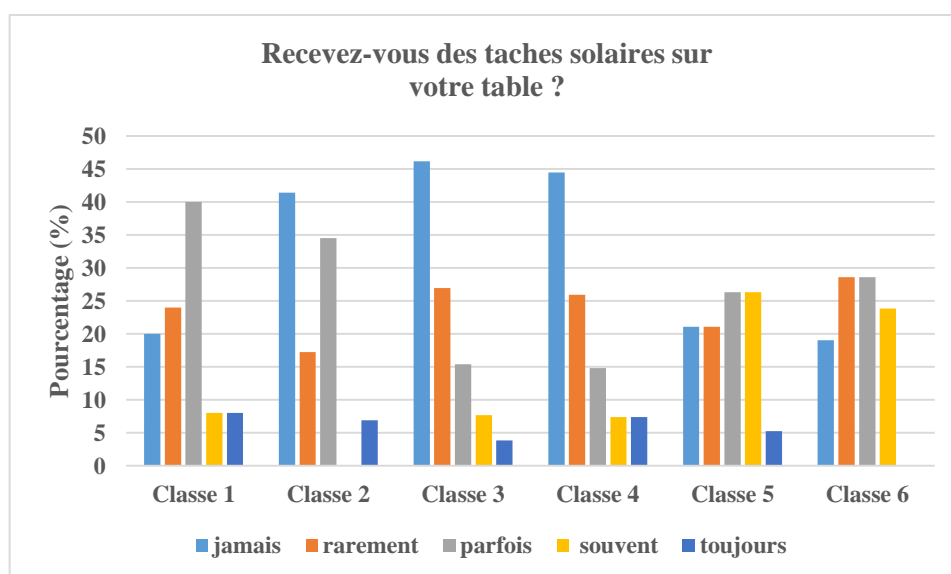


Figure 6.2, k)

La **figure 6.2 (l)** affiche les différents moyens utilisés par les occupants des six salles de classe pour éviter les taches solaires reçues sur les plans de travail. Il y a lieu de remarquer que la majorité des occupants « plus de 40 % » recourent à fermer les persiennes. Notamment, les occupants des salles 1 et 5, qui procèdent davantage à cette stratégie, avec plus de 60 %.

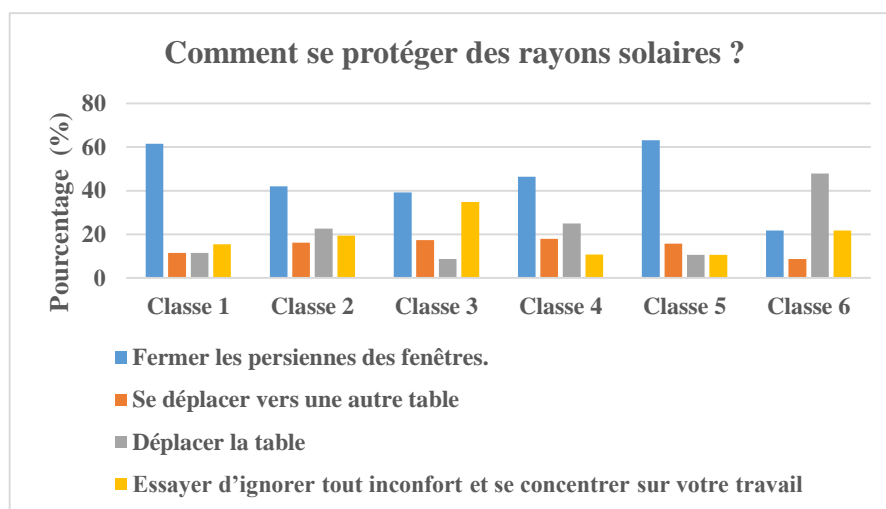


Figure 6.2, l)

La **figure 6.2 (m)** présente l'avis des sujets vis-à-vis de la mise en place des dispositifs de protection solaire au niveau des ouvertures. Il convient de constater que plus de (50 %) des occupants des 6 salles, ne souhaiteraient pas mettre ces dispositifs. Ceci est dû à la faible pénétration du rayonnement solaire en septembre comparativement à la période de février.

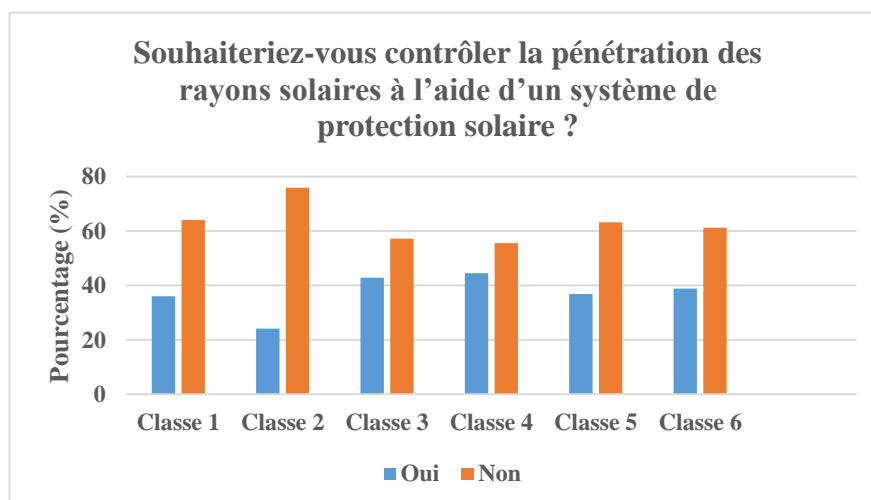


Figure 6.2, m)

Au sujet de la disponibilité de la lumière du jour sur la table (**figure 6.2, n**), nous remarquons que les réponses des sujets en salles 2,3 et 4 varient de « moyen » à « suffisant ». Cela est en accord avec les mesures in situ. En effet, le feuillage des platanes minimise la pénétration de la lumière naturelle. Par contre, les occupants des salles 1, 5 et 6 ont, en majorité, répondu « suffisant ». Cela est dû à leurs emplacements plus dégagés que les autres salles, notamment la salle 1 avec 72 %. À propos de la distribution de la lumière naturelle (**figure 6.2, o**), les réponses en majorité varient de « harmonieuse » à « bien distribuée ». Quant à la projection des rayons solaires sur les corps ou yeux des sujets (**figure 6.2, p**), nous remarquons une distinction entre les salles de classe, plus de 70 % des occupants des salles 1, 2,3 et 5 ont répondu « non ». Cela est dû à l'existence des platanes côté sud du bâtiment scolaire. Alors que, un pourcentage important en salles 4 et 6 souffre du rayonnement, avec 42 % et 47% successivement. Cela est naturellement dû à l'orientation ouest de ses salles de cours. Concernant les rayons solaires (**figure 6.2, q**), les sujets en majorité (plus de 58%) ont répondu « ni gênant ni agréable ». Pour ce qui est du degré d'éblouissement, pendant la réalisation des tâches visuelles sur la table ou le tableau blanc (**figure 6.2, r**), il convient de constater que la majorité (plus de 40%) des salles 1,2, 3,5 et 6 le considère comme « moyen ». Cependant, on remarque qu'environ 44 % des occupants de la salle de classe 4 l'estiment comme « éblouissement inconfortable ». À l'égard de l'évaluation globale du confort visuel dans les salles de classe (**figure 6.2, s**), nous constatons aussi que les sujets de toutes les salles ont en majorité répondu « moyen » à « confortable ». Relativement au comportement des sujets en cas d'enseulement excessif (**figure 6.2, t**), plus de 48% des sujets en salles 1,2 et 3 ont répondu « ne rien faire ». Les occupants des salles 4 et 5 ont répondu « changer de place », « ne rien faire » et « fermer les persiennes ». Pour la salle 6, environ 80% votent pour changer de place.

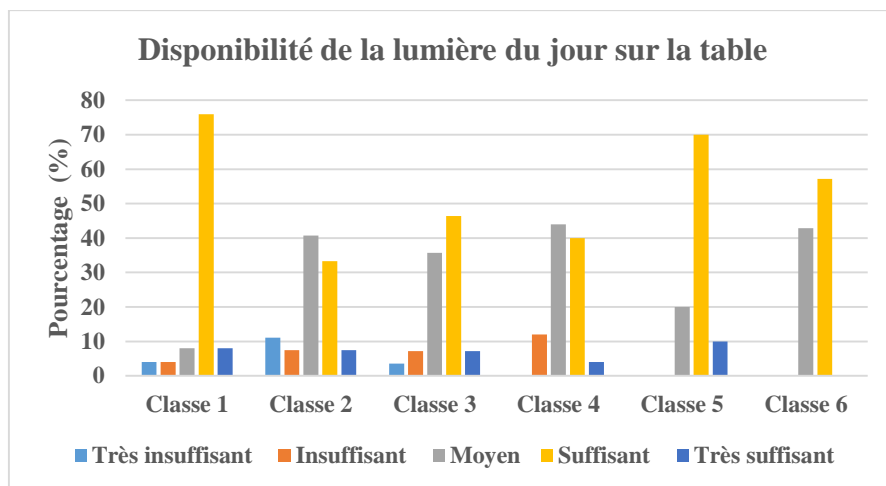


Figure 6.2, n)

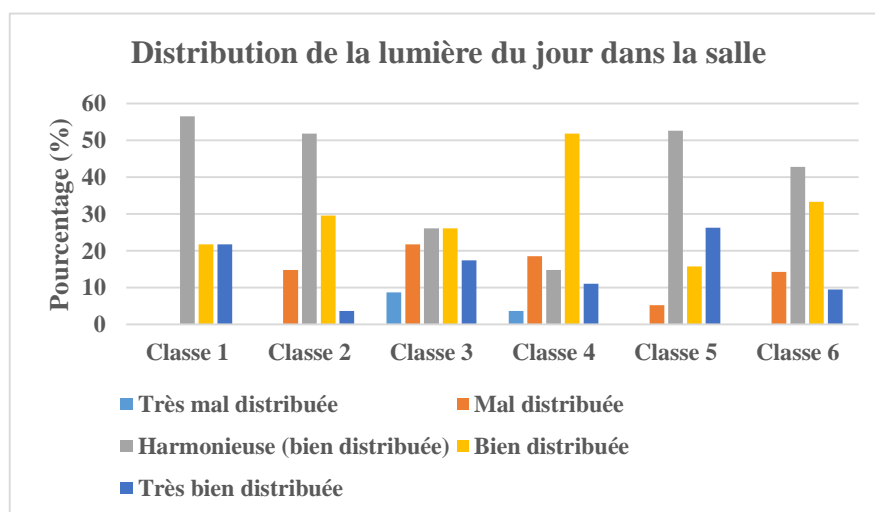


Figure 6.2, o)

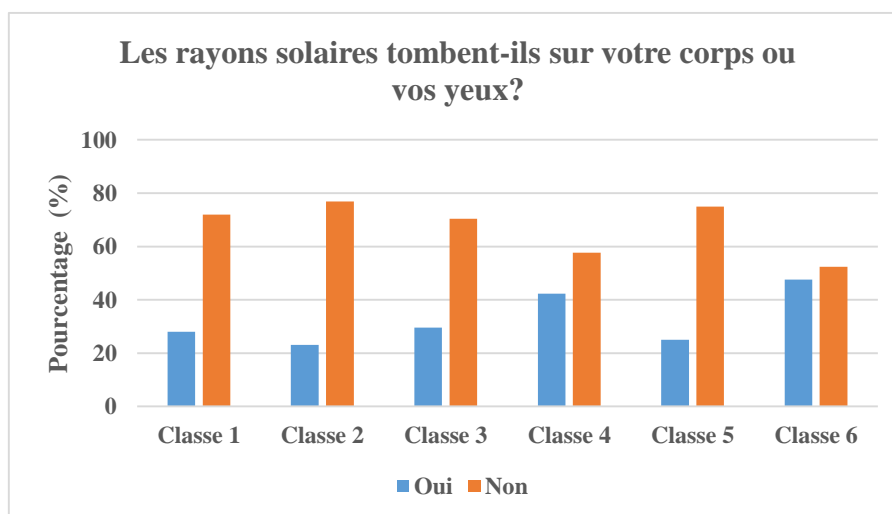


Figure 6.2, p)

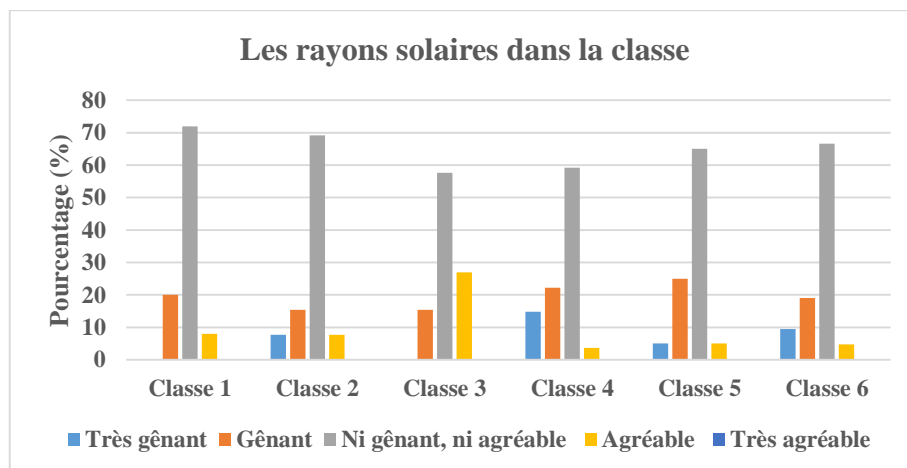


Figure 6.2, q)

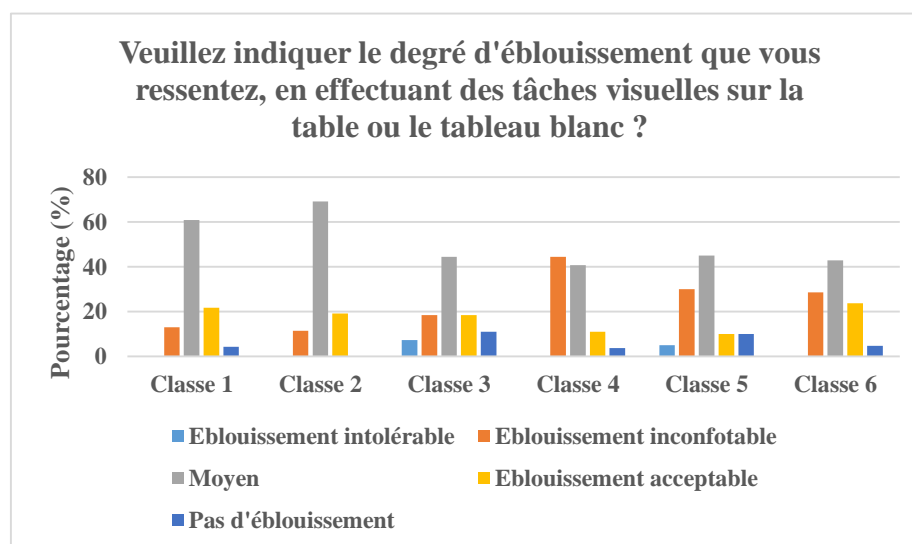


Figure 6.2, r)

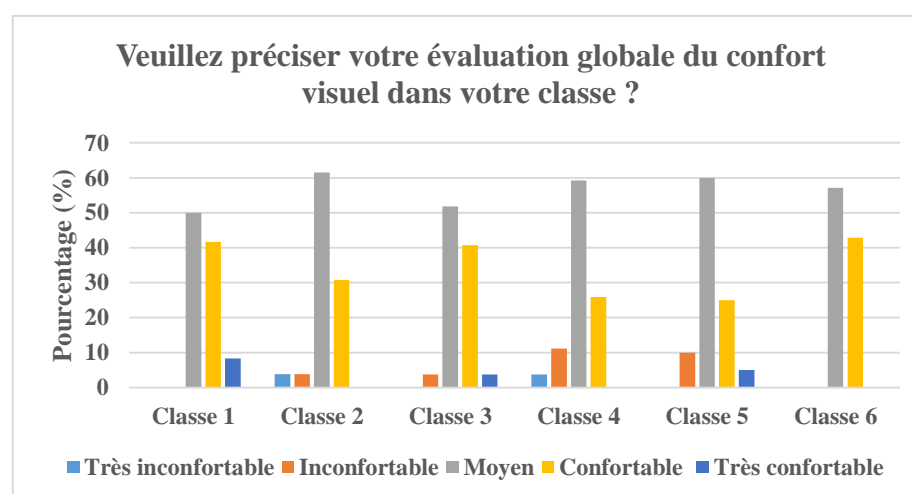


Figure 6.2, s)

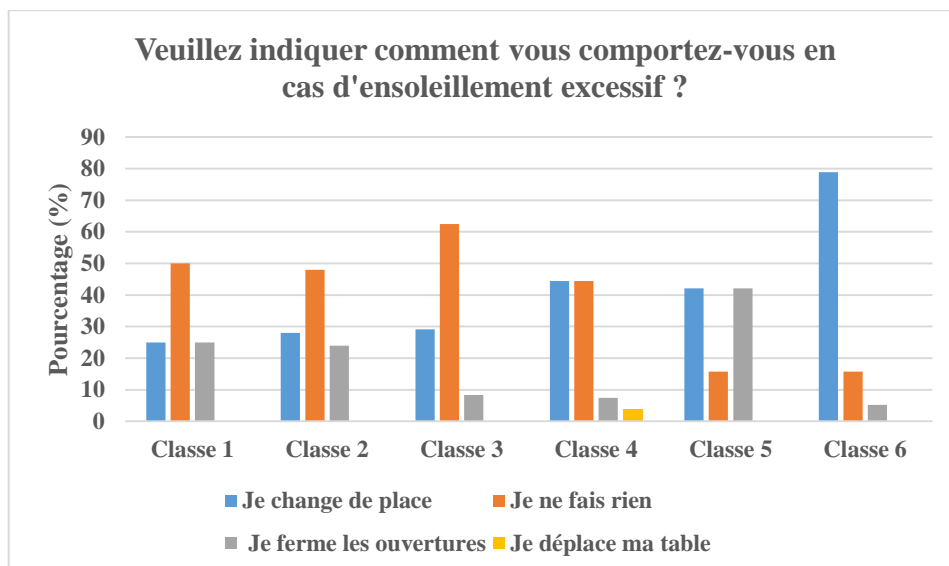


Figure 6.2, t)

3.2. Lycée Mustapha FERROUKHI

3.2.1. Réponses au questionnaire du confort visuel de la période froide (Lycée Ferroukhi)

Les figures 6.3 (a) et 6.3 (b) mettent en évidence la position préférée des élèves, par rapport aux fenêtres et tableau. Il est à souligner que le pourcentage est presque équilibré entre « près des fenêtres » et « loin des fenêtres ». Mais, il s'avère que la majorité des élèves « plus de 60 % » préfèrent s'asseoir près du tableau blanc. Cela est dû naturellement à la meilleure visibilité de l'écriture.

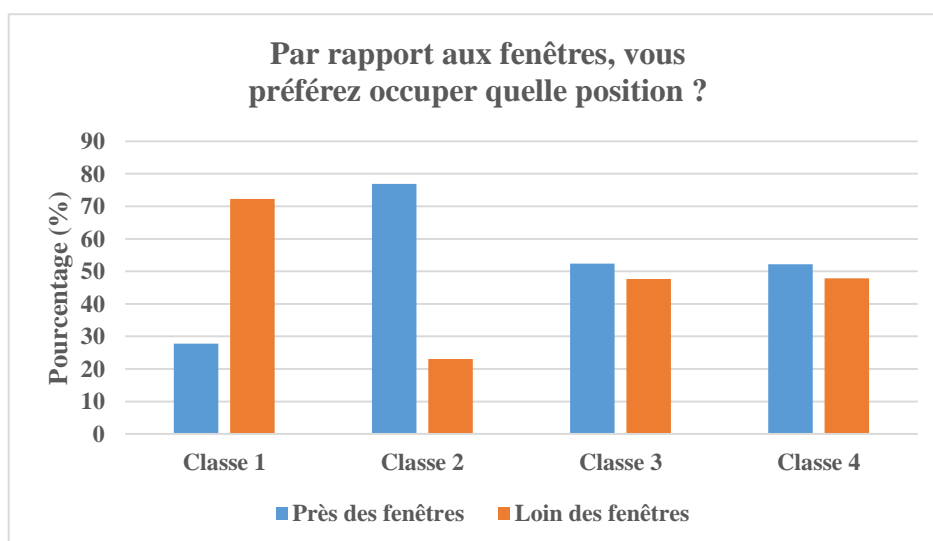


Figure 6.3, a)

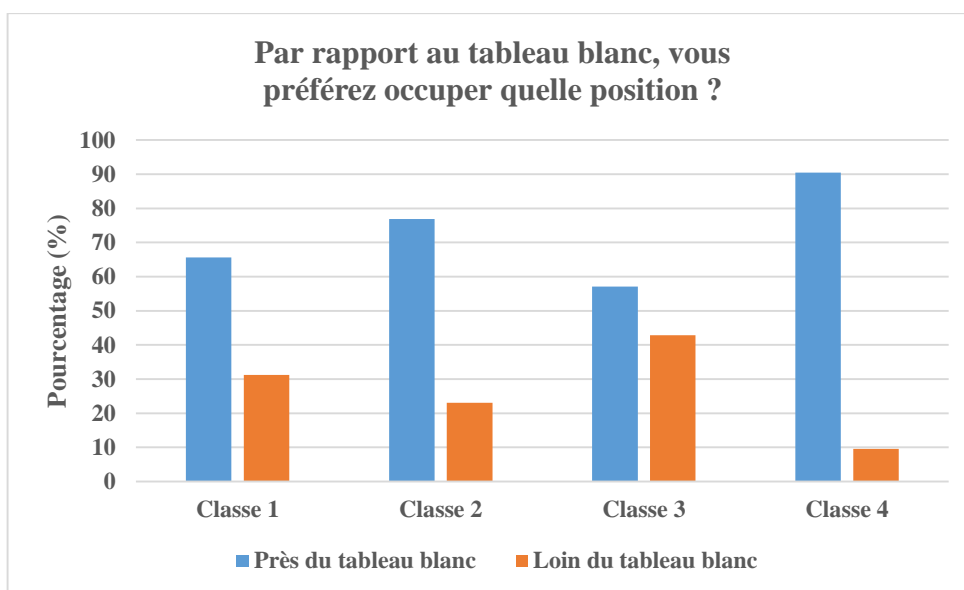


Figure 6.3, b)

Pour le type d'éclairage, la **figure 6.3 (c)** montre que les sujets des salles de classe recourent à une combinaison de lumière naturelle + artificielle, avec beaucoup plus l'éclairage artificiel, comme c'est le cas de la salle 1, avec approximativement « 60% ». Cela est justifié par l'orientation nord des salles étudiées.

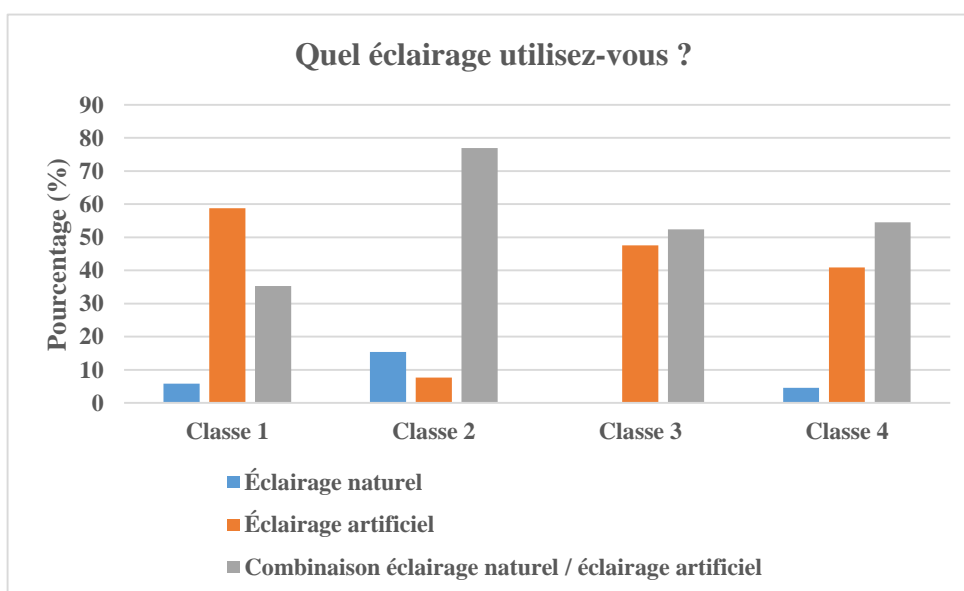


Figure 6.3, c)

Au sujet d'estimation du niveau d'éclairage naturel, les **figures 6.3 (d) et 6.3 (e)** montrent l'évaluation subjective du niveau d'éclairage pendant l'enquête

de février. En termes de disponibilité de lumière du jour, la majorité des répondants (plus de 50% dans les salles 2, 3 et 4) ont estimé que la lumière du jour était suffisante durant les heures d'occupation. Leurs réponses portent sur « lumière suffisante », c'est-à-dire salle claire. Pour la salle 1, il convient de souligner que le pourcentage des élèves a augmenté à presque 60 % vers l'après-midi après qu'il ait été estimé à 35% durant la matinée. Cela a été attribué aux larges baies vitrées qui permettent de faire passer un maximum de lumière naturelle à l'intérieur des espaces d'étude.

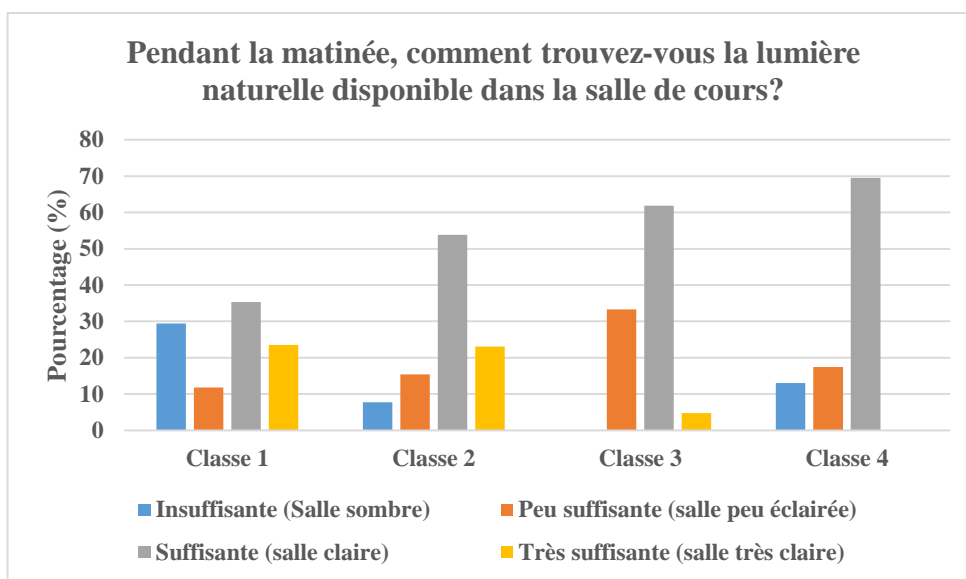


Figure 6.3, d)

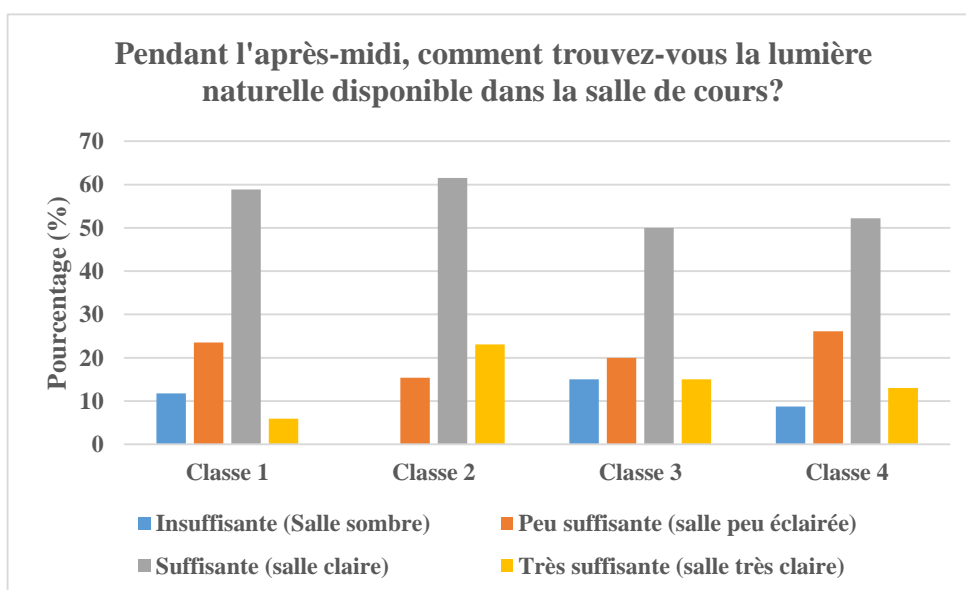


Figure 6.3, e)

En termes de visibilité du tableau blanc (**figures 6.3, f et 6.3, g**). Il convient de noter que la majorité des occupants des espaces d'études voit clairement le tableau lors de l'écriture et la lecture, notamment en salle de classe 1 avec 100 %. Cela est dû à l'orientation nord des salles, réduisant ainsi la pénétration du rayonnement solaire. Par ailleurs, il y a un pourcentage d'élèves qui prouvent des difficultés de visibilité, en particulier durant l'après-midi avec plus de 30 %. Cela est dû à l'emplacement au deuxième étage et aussi à la grande façade nord qui maximise la lumière naturelle dans la salle, et du coup, les reflets sur le tableau blanc.

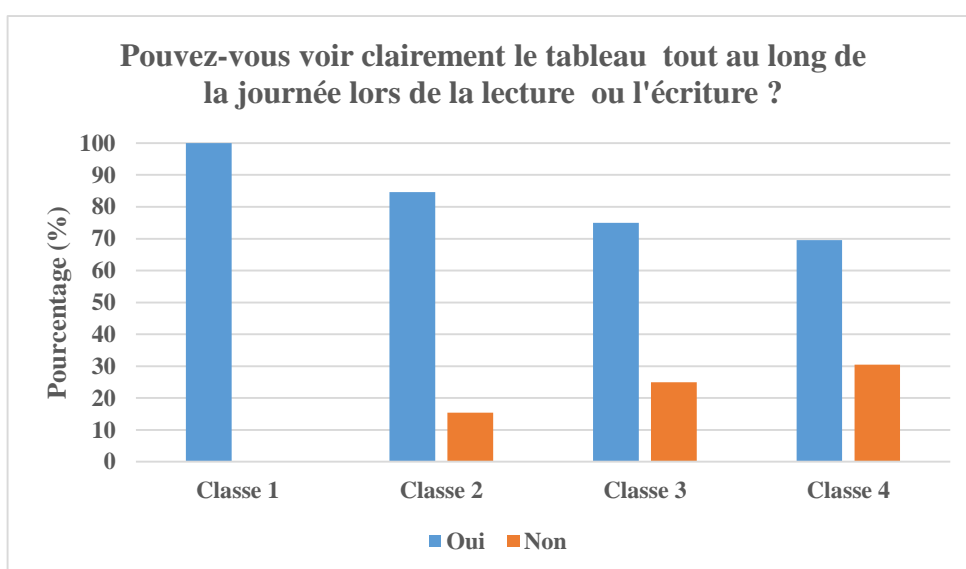


Figure 6.3, f)

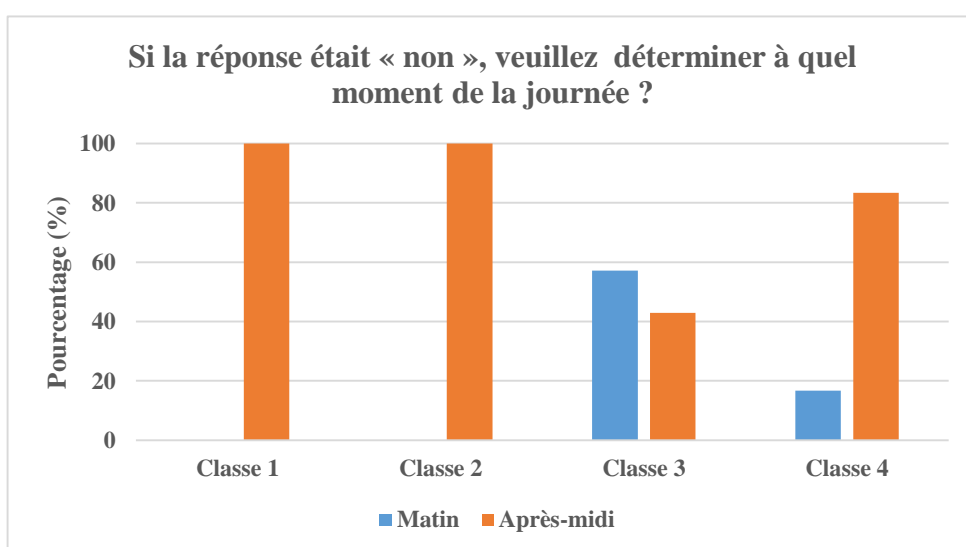


Figure 6.3, g)

Les **figures 6.3 (h) et 6.3 (i)** montrent l'endroit et la raison d'invisibilité de l'écriture. Il convient de constater que les rayons solaires demeurent facteur principal de vision dans les salles 1, 3 et 4 avec des pourcentages respectifs de 70 %, 59 % et 87 %. Alors que, les luminaires sont premier responsable en salle 2 avec plus de 57 %. Par ailleurs, les élèves de la salle 1, 3 et 4 trouvent des problèmes de vision dans le côté gauche, avec 62,5 %, 67% et 67% respectivement. Cela est dû à la forte disponibilité des fenêtres de ce sens, faisant pénétrer souvent un éclairage naturel excessif, et du coup des reflets dans le côté gauche du tableau. Par ailleurs, les élèves de la salle 2 trouvent des problèmes de vision principalement dans le côté droit, avec 62 %. Cela est dû à l'unique fenêtre donnant sur le sud.

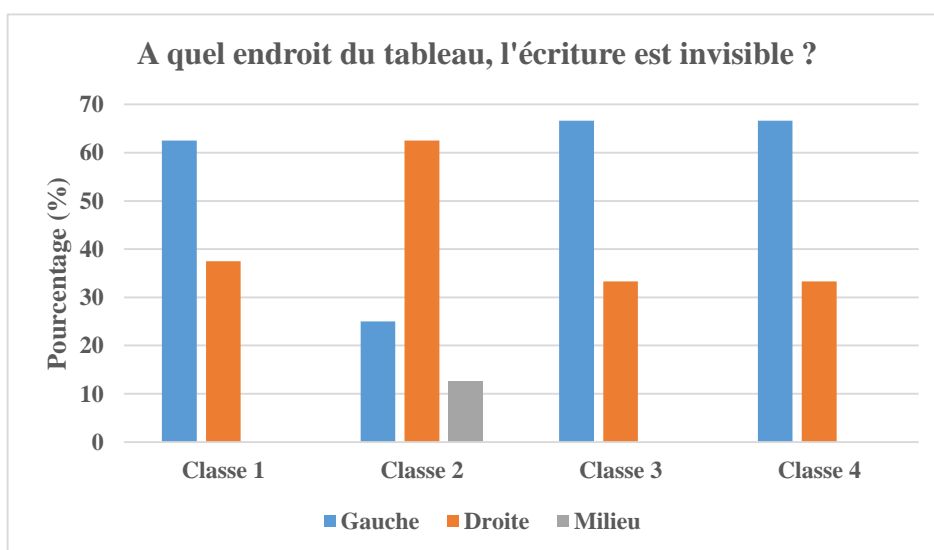


Figure 6.3, h)

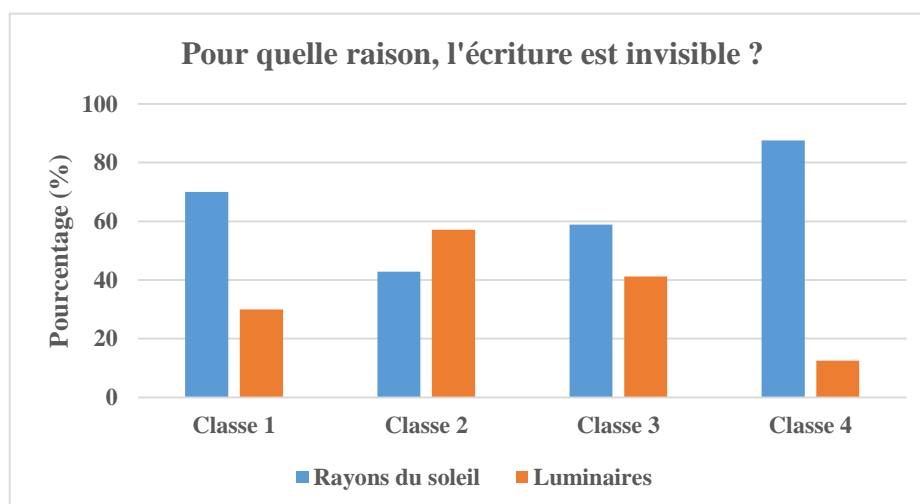


Figure 6.3, i)

Les **figures 6.3 (j) et 6.3 (k)** portent sur la réflexion des rayons solaires sur le tableau. Plus de 70% des élèves trouvent que les rayons solaires se réfléchissent sur le tableau, principalement la salle 3 avec 100%. Cela est dû à sa double orientation nord-ouest. Par ailleurs, en termes de reflets sur le tableau blanc, plus de 70% des sujets ont répondu « oui » aux réflexions gênantes sur le tableau blanc. Cela peut être attribué à l'absence de systèmes de contrôle de la lumière du jour, tels que des rideaux et des light-shelves. Pour éviter ces problèmes d'éblouissement, les occupants ferment souvent les fenêtres et recourent à l'éclairage artificiel pour effectuer leurs tâches visuelles. Et cela conduit naturellement à plus de consommation énergétique.

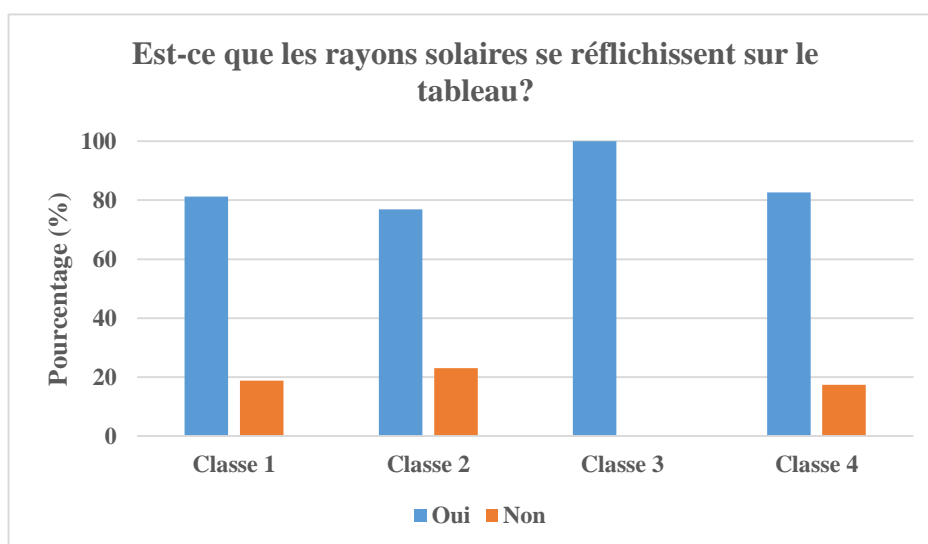


Figure 6.3, j)

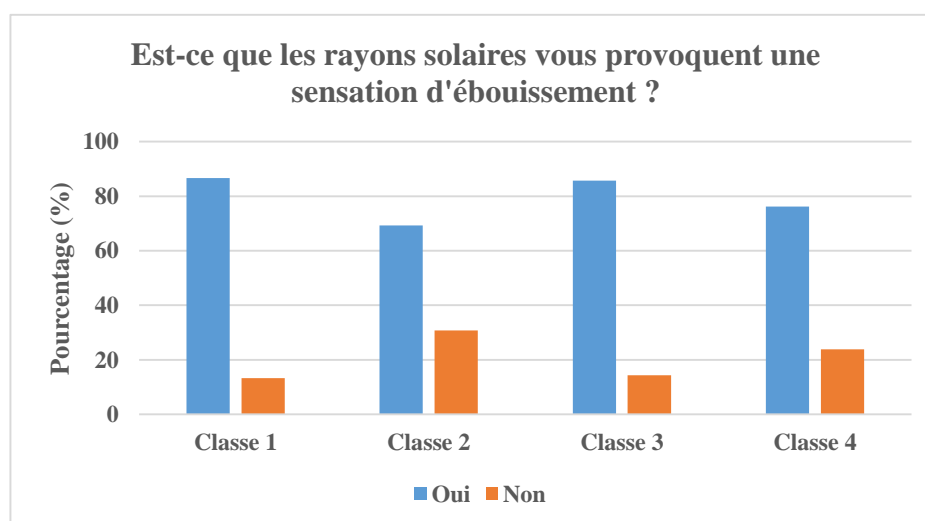


Figure 6.3, k)

La **figure 6.3 (l)** met en exergue le pourcentage de sujets, ayant reçu des taches solaires au niveau de leurs plans de travail. Pratiquement, la majorité des sujets « plus de 70 % » des 4 salles de classe, ne reçoivent pas de taches solaires sur leurs tables. Cela est dû à la position basse du soleil dans le ciel pendant l'hiver, et par conséquent, ses rayons ne pénètrent pas à travers les fenêtres de ces salles de classe orientées côté nord.

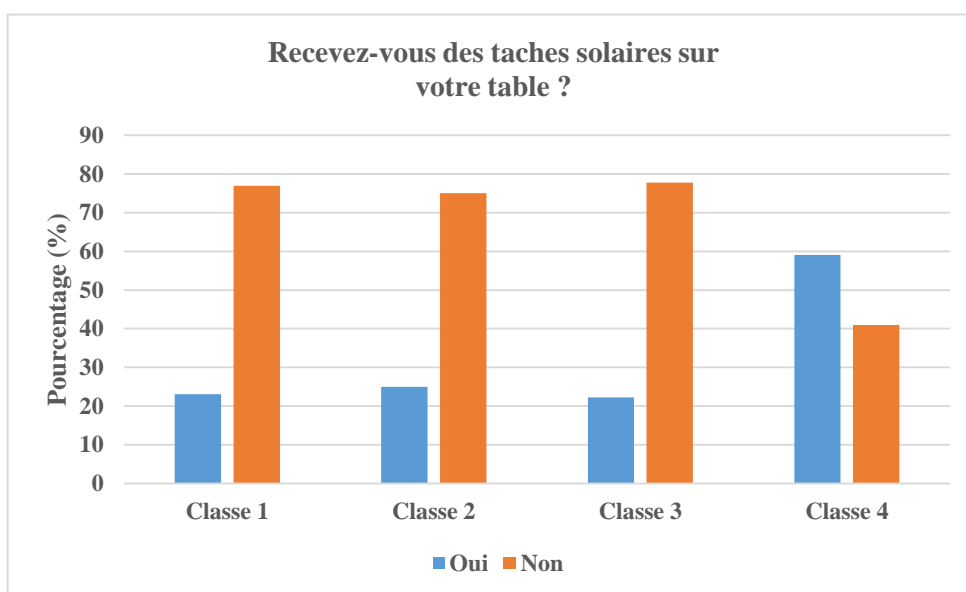


Figure 6.3, l)

La **figure 6.3 (m)** affiche les différents moyens utilisés par les occupants des 4 salles de classe pour éviter les taches solaires reçues sur les plans de travail. Il y a lieu de remarquer que la majorité des occupants recourent à fermer les persiennes, notamment la salle 3 avec plus de 50%. Sauf que, cela entraîne une réduction en termes d'éclairage naturel à l'intérieur des salles, comme c'était bien clarifié précédemment dans l'évaluation quantitative, avec des niveaux d'éclairement nettement inférieur à la norme recommandée de « 300 lux ». Le changement de place demeure aussi une autre solution pour éviter les taches solaires, avec plus de 30 % dans toutes les salles. D'autres techniques sont utilisées comme déplacer la table à un endroit plus confortable, ou ignorer ces taches tout en se concentrant sur le cours.

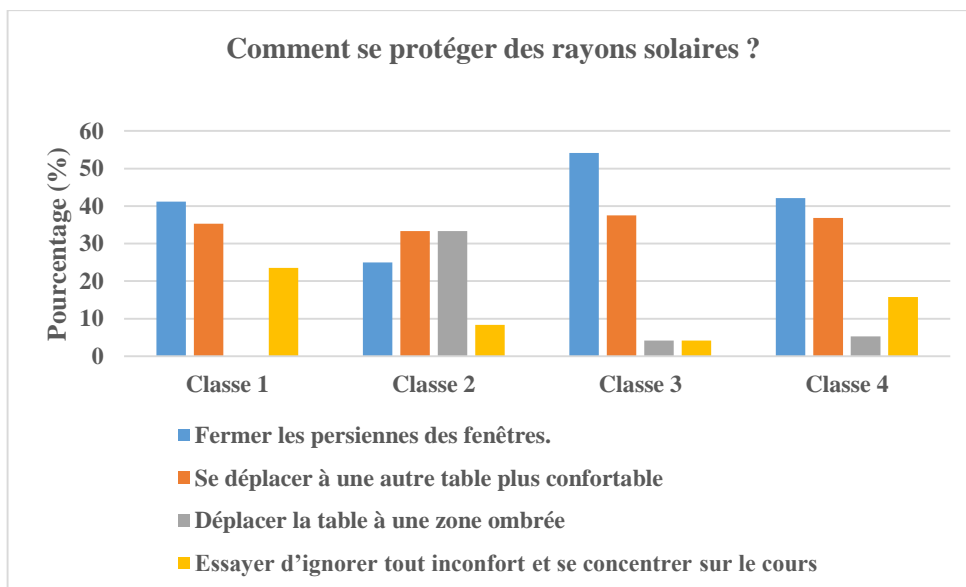


Figure 6.3, m)

La **figure 6.3 (n)** présente l'avis des sujets vis-à-vis de la mise en place des dispositifs de protection solaire au niveau des ouvertures. Il convient de constater que (plus 60 %) des occupants des 4 salles, ne souhaiteraient pas mettre ces dispositifs.

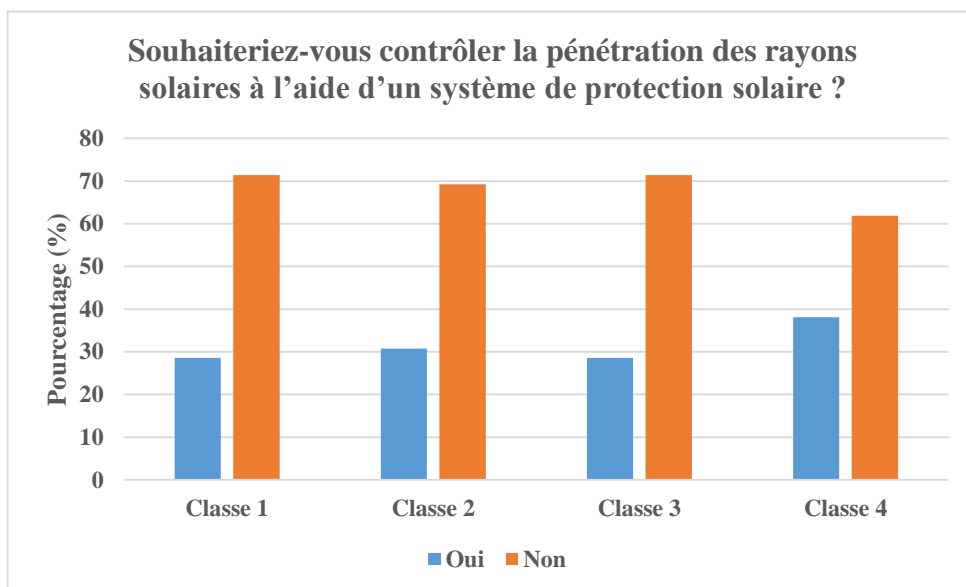


Figure 6.3, n)

La dernière partie de ce questionnaire de la période d'hiver (février), porte sur la satisfaction des sujets vis-à-vis de quelques éléments. Pour ce qui concerne les dimensions architecturales des salles de cours (**figure 6.3, o**), la plupart des

réponses varient de « peu satisfait » à « très satisfait ». Au sujet de l'environnement général (Couleur, sol...) (**figure 6.3, p**), la majorité des sujets se disent indifférents vis-à-vis de cela. À propos des dimensions des fenêtres (largeur et hauteur), les réponses des sujets sont réparties sur les 5 qualificatifs (**figure 6.3, q**), mais ils se disent généralement peu satisfaits vis-à-vis de cet élément. Quant à la qualité du plafond suspendu (**figure 6.3, r**), les sujets en majorité s'expriment indifférents vis-à-vis de cela. Concernant le chauffage (**figure 6.3, s**), il convient de constater une distinction entre les 4 salles de classe, les réponses des sujets en majorité en salles 1 et 2, varient de « peu satisfait » à « très satisfait », par contre, on trouve un bon nombre d'élèves qui se disent « insatisfaits » et « très insatisfaits » en salles 3 et 4. Cela est dû à la faible performance thermique des salles du deuxième étage comparativement aux salles du rez-de-chaussée. À l'égard de l'éclairage artificiel, la majorité des réponses varient de « peu satisfait » à « très satisfait » (**figure 6.3, t**). Cela est en concordance avec les résultats des mesures in situ qui relèvent des niveaux d'éclairage artificiel supérieurs à la norme recommandée de 300 lux. Relativement à l'aération (**figure 6.3, u**), plus de 30 % des occupants des salles 1 et 2 sont « très satisfaits ». Contre, plus de 40 % en salles 3 et 4, qui sont « peu satisfaits » de l'aération.

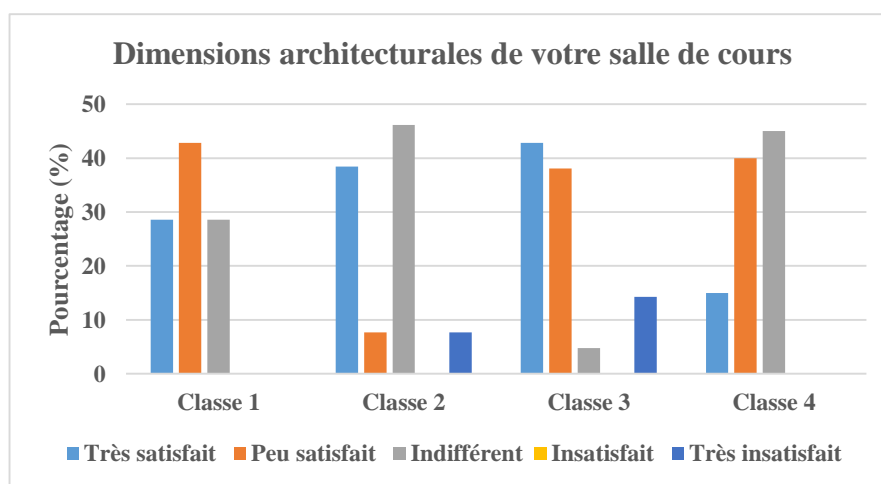


Figure 6.3, o)

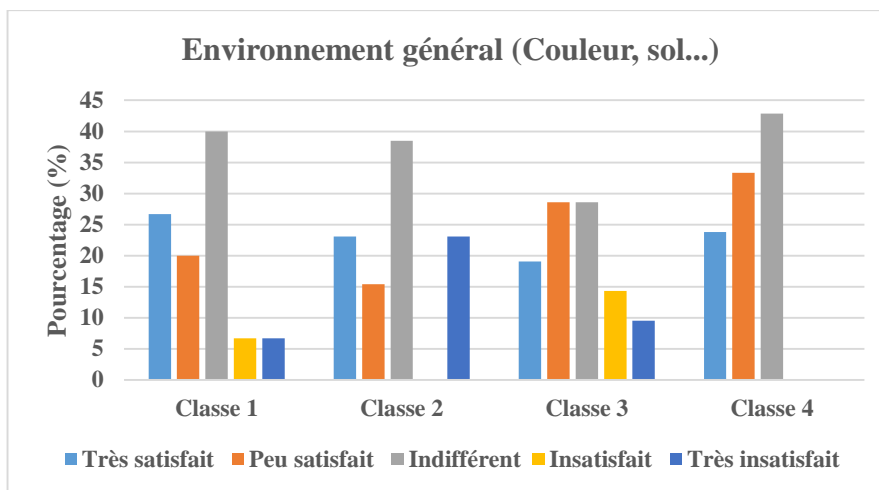


Figure 6.3, p)

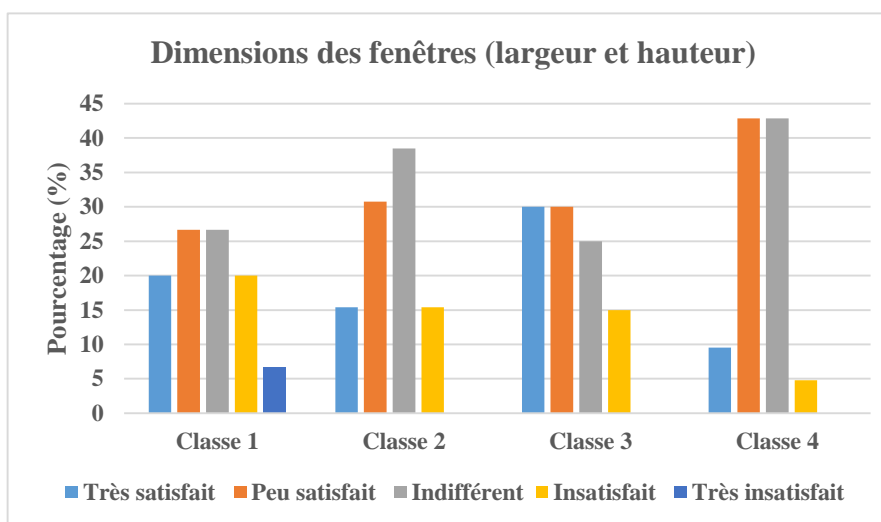


Figure 6.3, q)

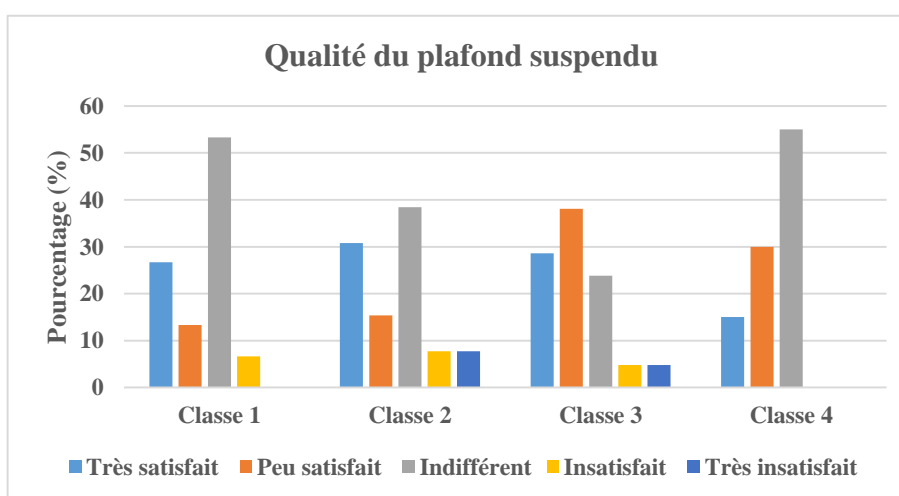


Figure 6.3, r)

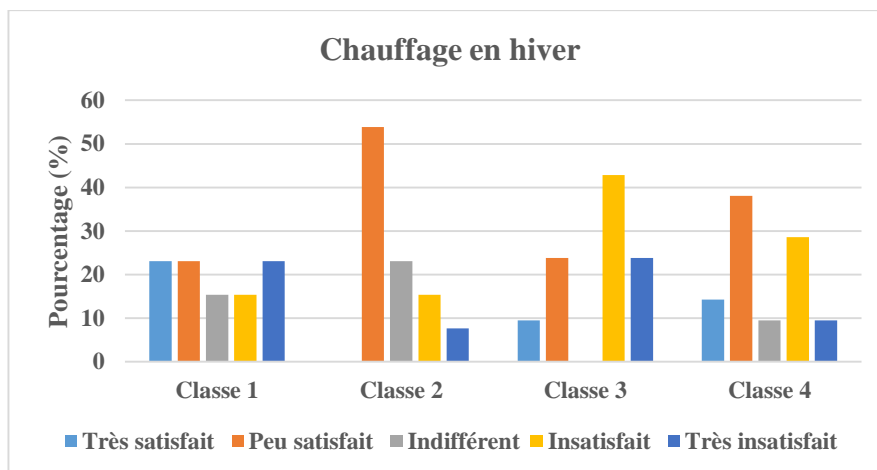


Figure 6.3, s)

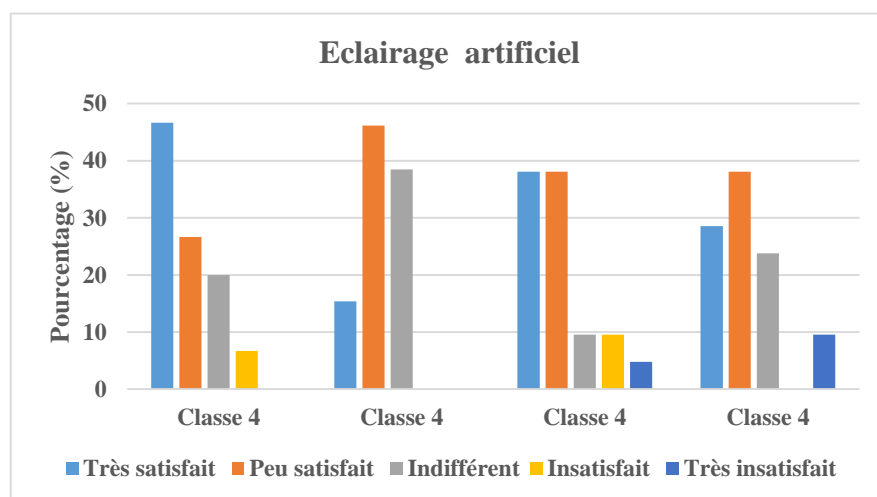


Figure 6.3, t)

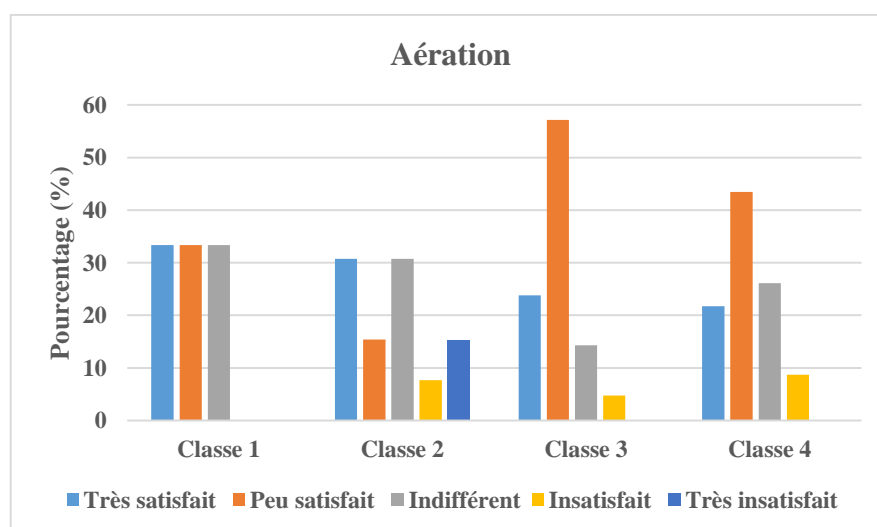


Figure 6.3, u)

3.2.2. Réponses au questionnaire du confort visuel de la période chaude (septembre)

À l'égard du type d'éclairage, la **figure 6.4 (a)** montre que les usagers des salles utilisent une combinaison de lumière naturelle + artificielle, avec beaucoup plus de l'éclairage naturel. Cela est justifié par la disponibilité de l'éclairage naturel dans les salles de classe (comme a été bien présenté par les mesures in situ), à l'encontre de la période d'hiver, qui connaît une dépendance forte sur l'éclairage artificiel.

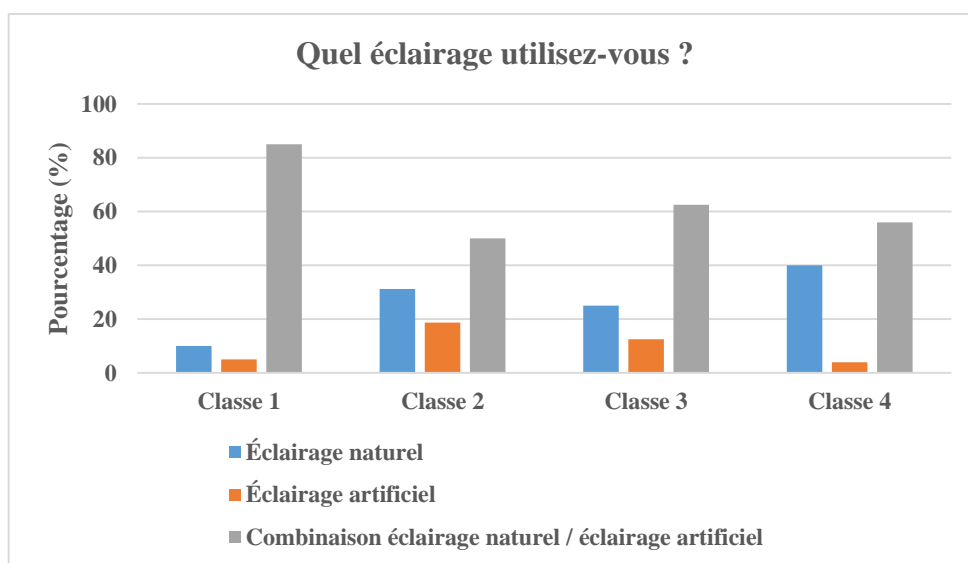


Figure 6.4, a)

Les **figures 6.4 (b) et 6.4 (c)** montrent l'évaluation subjective du niveau d'éclairage pendant l'enquête de septembre. En termes de disponibilité de lumière du jour, la majorité des répondants (plus de 50%) estime que la lumière du jour est suffisante durant les heures d'occupation dans toutes les salles. Leurs réponses portent sur « lumière suffisante ». Cela est en concordance avec les niveaux d'éclairage relevés lors des mesures in situ, dépassant les 300 lux.

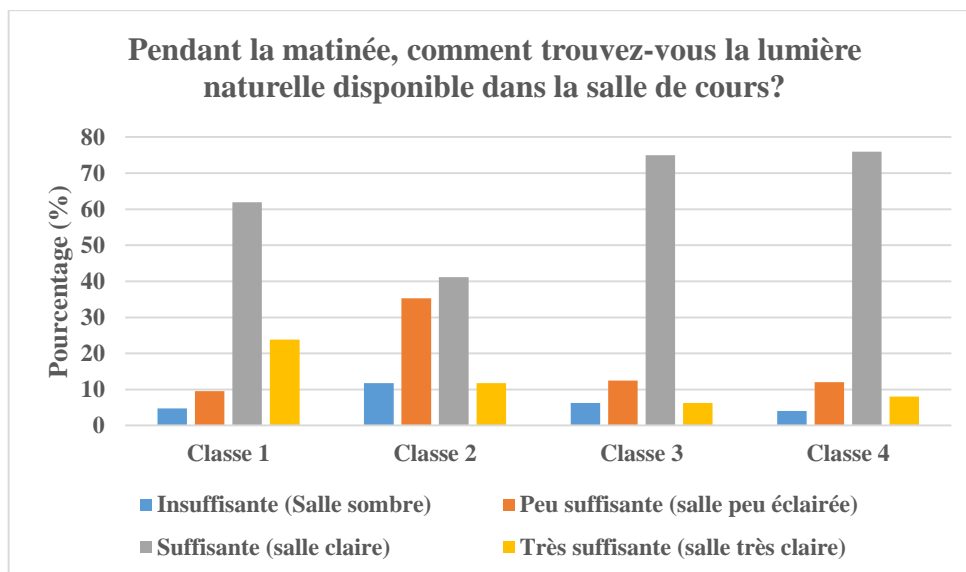


Figure 6.4, b)

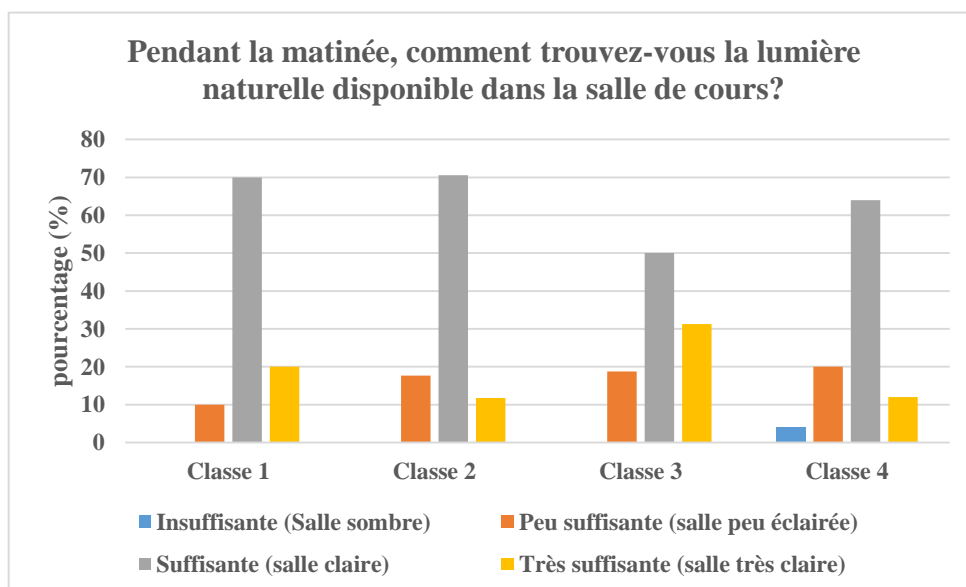


Figure 6.4, c)

La **figure 6.4 (d)** affiche l'évaluation subjective de la lumière artificielle. Il convient de dire que plus de 46 % des sujets estiment l'éclairage artificiel est « suffisant ». Cela est en accord avec les mesures in situ, qui ont révélé une moyenne de 354 Lux, soit une valeur supérieure à la norme recommandée de 300 lux.

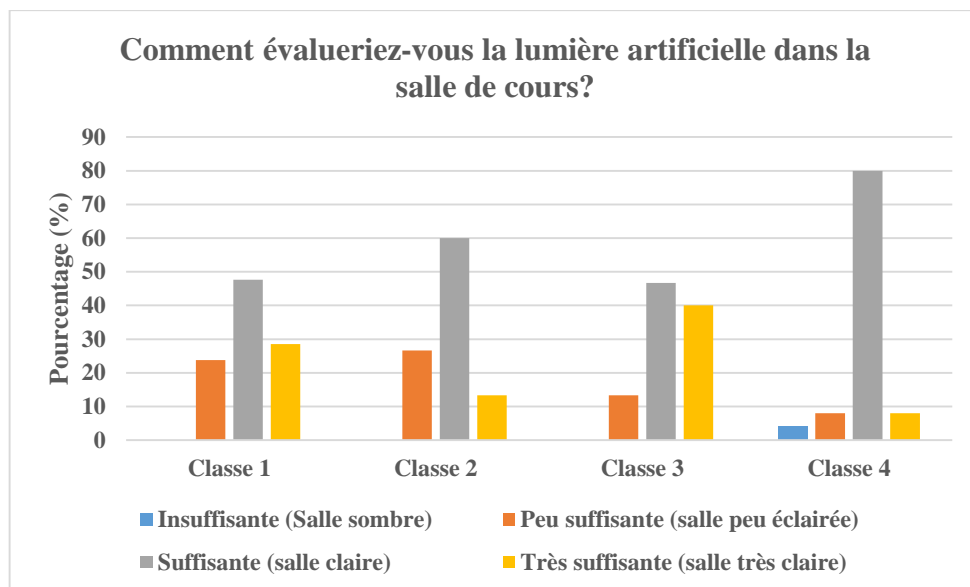


Figure 6.4, d)

En termes de visibilité du tableau blanc (**figures 6.4, e et 6.4, f**). Il convient de noter que la majorité des occupants des espaces d'études 1, 3 et 4 voit clairement le tableau lors de l'écriture et la lecture, notamment en salle de cours 1 avec 81 %. Cependant, il est à constater que plus de 52 % de sujets de la salle 2 trouvent des problèmes de visibilité du tableau. Cela est dû à la fenêtre sud de cette classe, qui maximise la pénétration du rayonnement solaire. Pour le pourcentage d'élèves qui prouvent des difficultés de visibilité, il est à relever que cette difficulté est généralement éprouvée durant l'après-midi, notamment en salle 3 et 4, avec 75 %. Cela est dû à leur emplacement au deuxième étage, favorisant la pénétration du rayonnement solaire dans ces espaces d'étude et la création des reflets sur le tableau blanc.

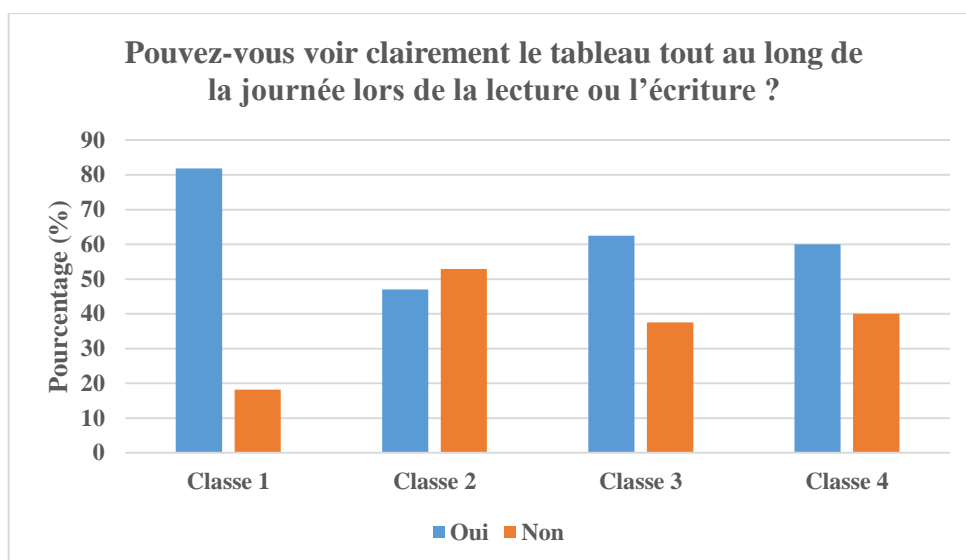


Figure 6.4, e)

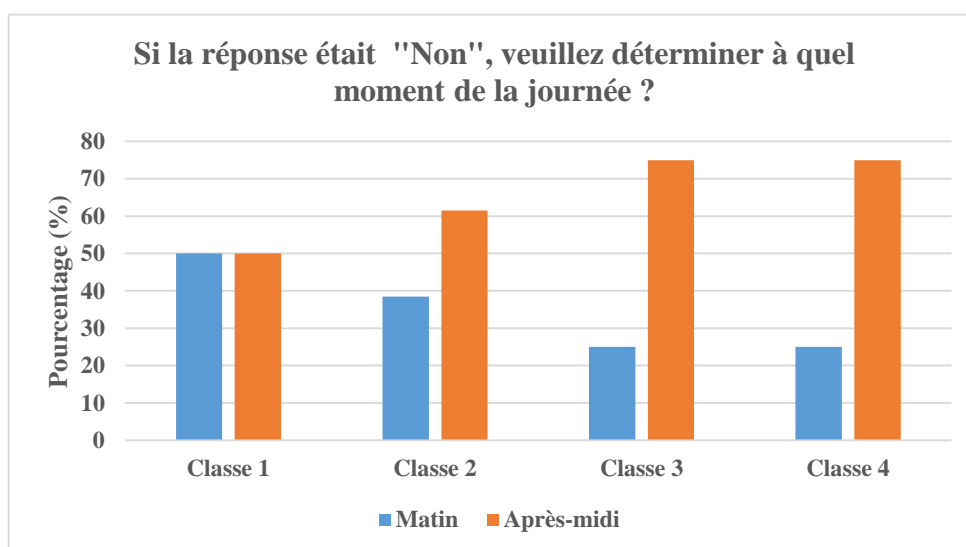


Figure 6.4, f)

Les **figures 6.4 (g) et (h)** montrent l'endroit et la raison d'invisibilité de l'écriture. Il convient de constater que plus de 57 % des sujets trouvent des problèmes de vision, à cause des rayons solaires, notamment en salle 1, avec 100%. Alors que, les luminaires sont considérés deuxième responsable avec plus de 25 %. Par ailleurs, et comme le soleil est plus haut dans le ciel par rapport à sa position en février, ses rayons sont plus répartis sur les différents coins du bâtiment scolaire, par conséquent, les élèves trouvent des problèmes de vision dans le côté gauche et droit du tableau blanc, avec un pourcentage presque équitable.

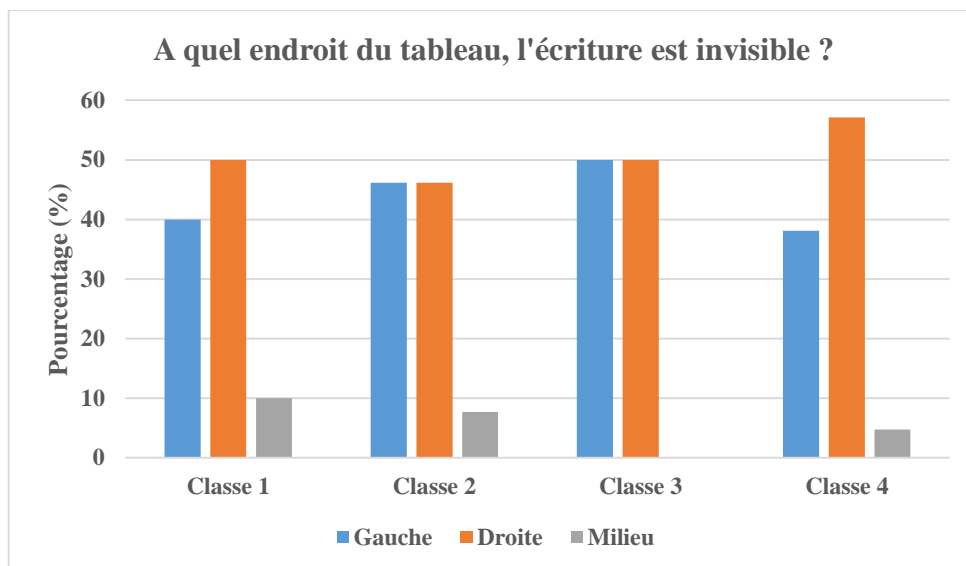


Figure 6.4, g)

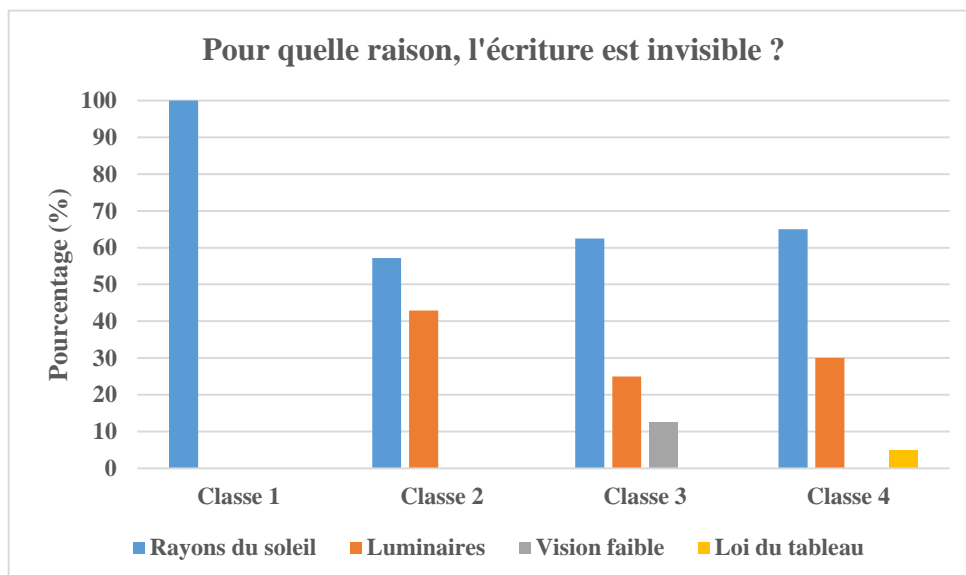


Figure 6.4, h)

Les figures 6.4 (i) et 6.4 (j) portent sur la réflexion des rayons solaires sur le tableau. Plus de 53% des sujets ont répondu « oui » aux réflexions gênantes sur le tableau blanc, principalement la salle 4 avec 100 %. Cela peut être attribué à l'absence de systèmes de contrôle de la lumière du jour, tels que des rideaux et des light-shelves. Pour éviter ces problèmes d'éblouissement, les occupants ferment souvent les fenêtres et recourent à l'éclairage artificiel pour effectuer les différentes tâches pédagogiques. Et cela conduit naturellement à plus de consommation énergétique.

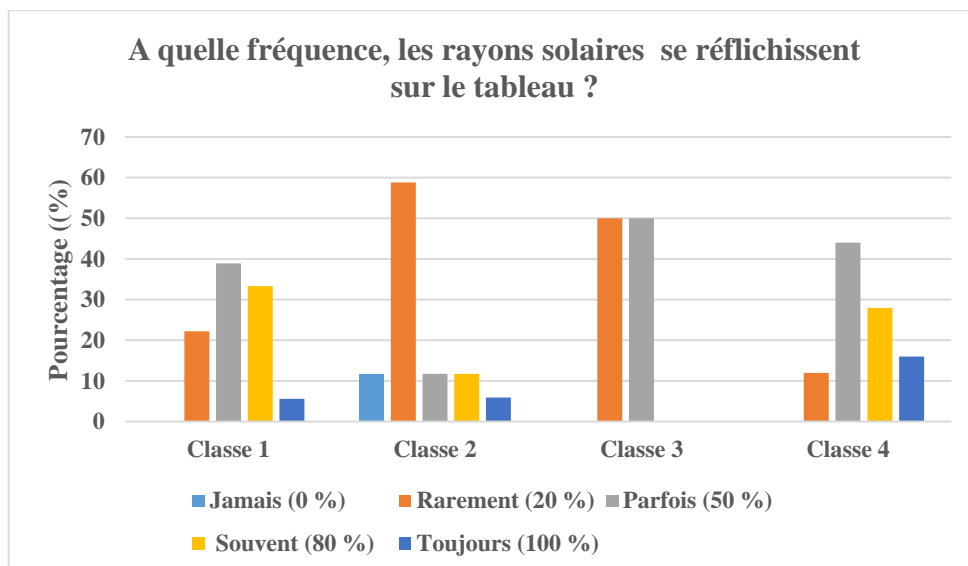


Figure 6.4, i)

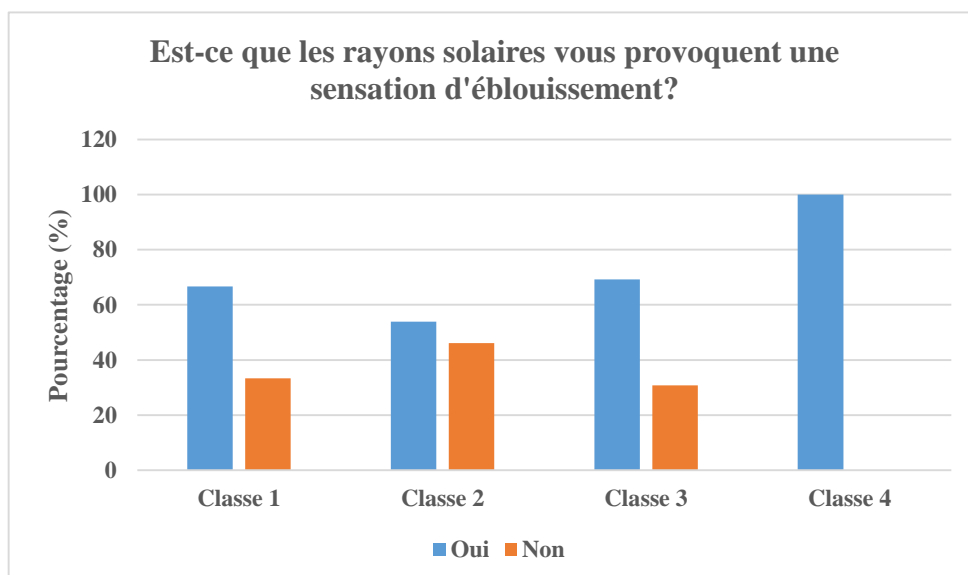


Figure 6.4, j)

La **figure 6.4 (k)** met en évidence le pourcentage de sujets, ayant reçu des taches solaires au niveau de leurs plans de travail. Pratiquement, la majorité des sujets donnent des réponses variant de jamais (0 %) à rarement (20%). Cela est dû à l'orientation nord des salles de nord, faisant que les rayons du soleil en septembre ne pénètrent pas facilement à travers les baies vitrées.

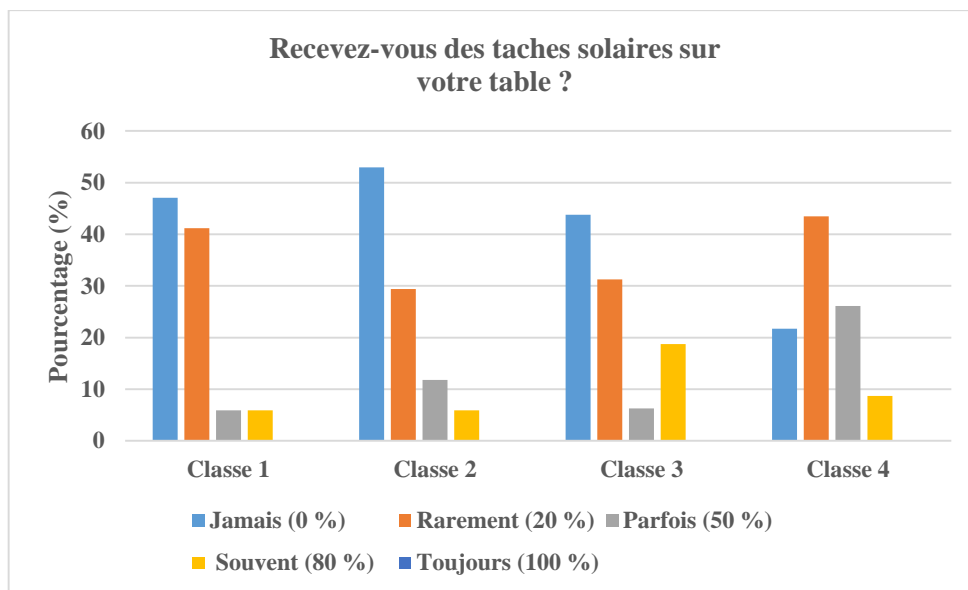


Figure 6.4, k)

La **figure 6.4 (l)** affiche les différents moyens utilisés par les occupants des 4 salles de classe pour éviter les taches solaires reçues sur les plans de travail. Il y a lieu de remarquer que les quatre moyens suivants sont utilisés, à savoir ; déplacer la table à une zone ombrée (32%), se déplacer à une autre table plus confortable (29%), fermer les persiennes des fenêtres (21%), et essayer d'ignorer tout inconfort et se concentrer sur le cours (19%).

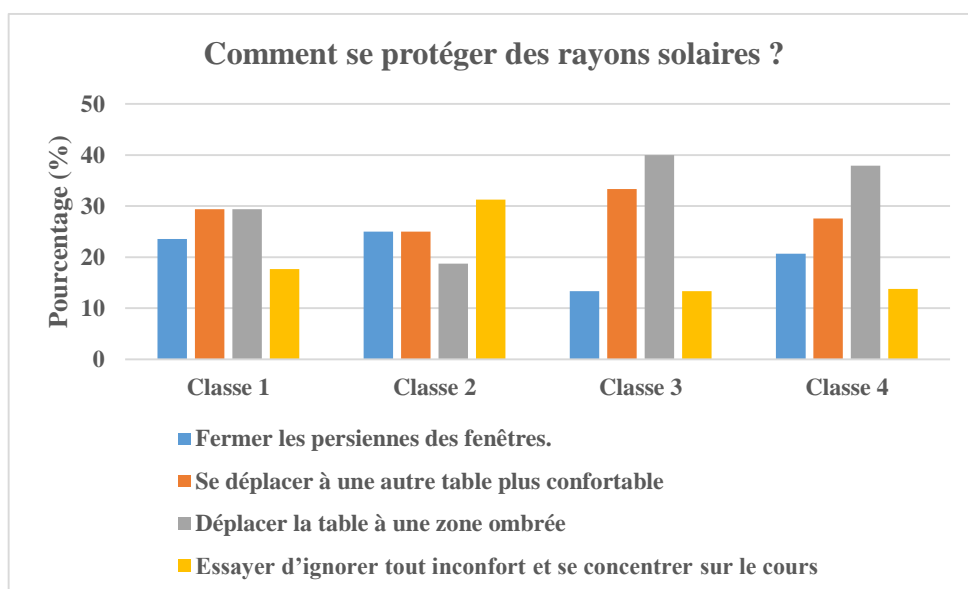


Figure 6.4, m)

La **figure 6.4 (m)** présente l'avis des sujets vis-à-vis de la mise en place des dispositifs de protection solaire au niveau des ouvertures. Il convient de constater que les avis des sujets sont différents de salle à autre. 73 % de la salle 1 ont répondu « oui ». La majorité des sujets en salles 2 et 3 ont répondu « non » à cela, avec des pourcentages successifs de 59% et 69 %. Alors que, les avis des occupants en salle 4 se sont divisés en deux parties équitables (50%).

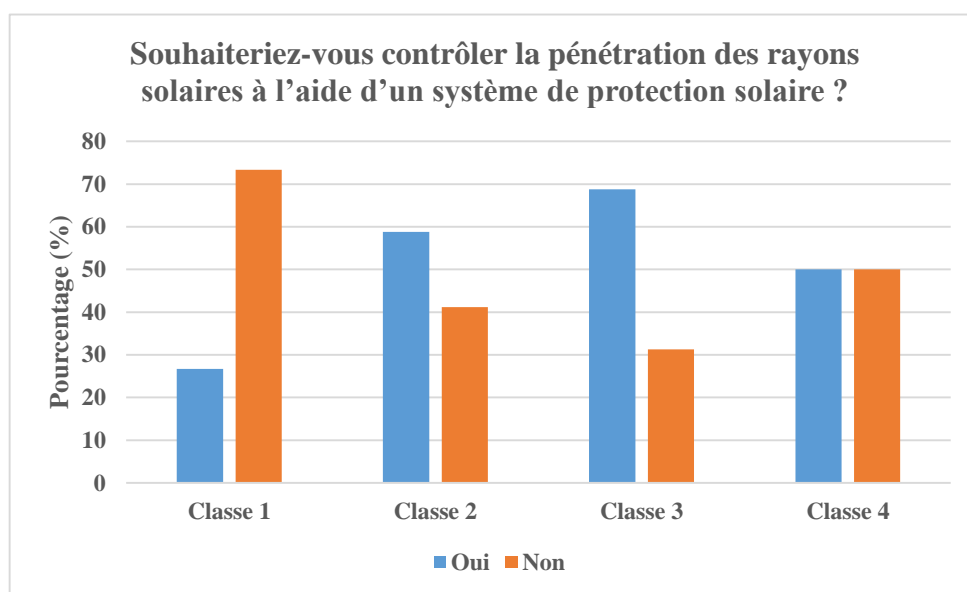


Figure 6.4, m)

Au sujet de la disponibilité de la lumière du jour sur la table (**figure 6.4, n**), nous relevons ici que les réponses de plus de 35 % des sujets varient de « moyen » à « suffisant ». Cela est accord les niveaux d'éclairément susceptibles d'y exister en cas de ciel partiellement nuageux. À propos de la distribution de la lumière naturelle (**figure 6.4, o**), les réponses en majorité varient de « harmonieuse » à « bien distribuée ». Quant à la projection des rayons solaires sur les corps ou yeux des sujets (**figure 6.4, p**), nous remarquons que plus de 75% ont répondu « non ». Cela est naturellement dû à l'orientation nord des salles de classe. Concernant les rayons solaires dans les salles de classe (**figure 6.4, q**), les sujets en majorité ont répondu « ni gênant ni agréable ». Pour ce qui est du degré d'éblouissement, pendant la réalisation des tâches visuelles sur la table ou le tableau blanc (**figure 6.4, r**), il convient de constater que la majorité (plus de 37%) le considère comme moyen, principalement la salle 2 avec environ 75 %.

À l'égard de l'évaluation globale du confort visuel dans les classes (**figure 6.4, s**), nous constatons que les sujets en majorité des salles 1, 2 et 4 ont répondu « moyen » avec les pourcentages successifs suivants, 57 %, 81 % et 52 %. Alors que, plus de 46 % considèrent la salle 3 comme « confortable ». Relativement au comportement des sujets en cas d'ensoleillement excessif (**figure 6.4, t**), la plupart des sujets envisagent de changer de place ou de ne rien faire.

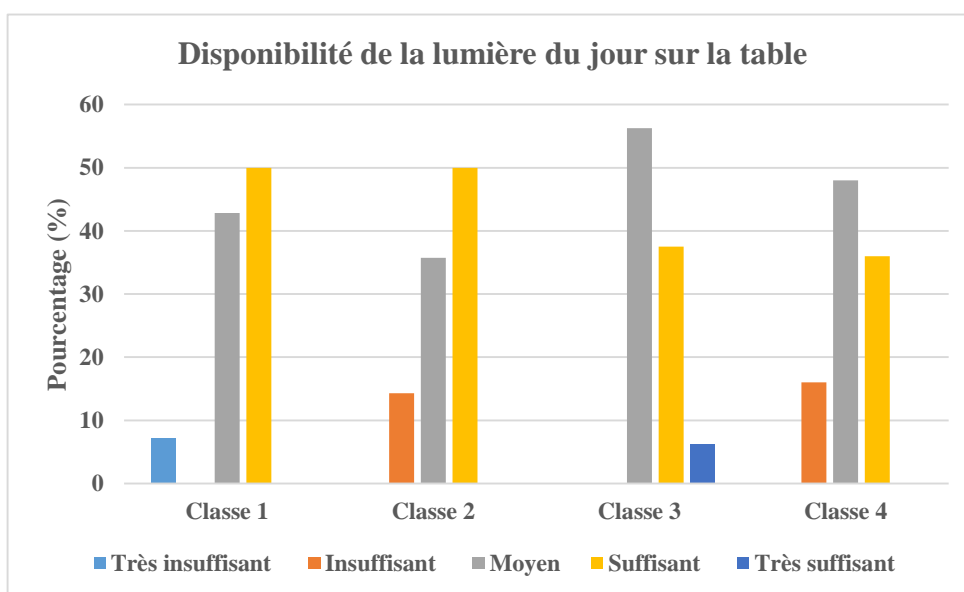


Figure 6.4, n)

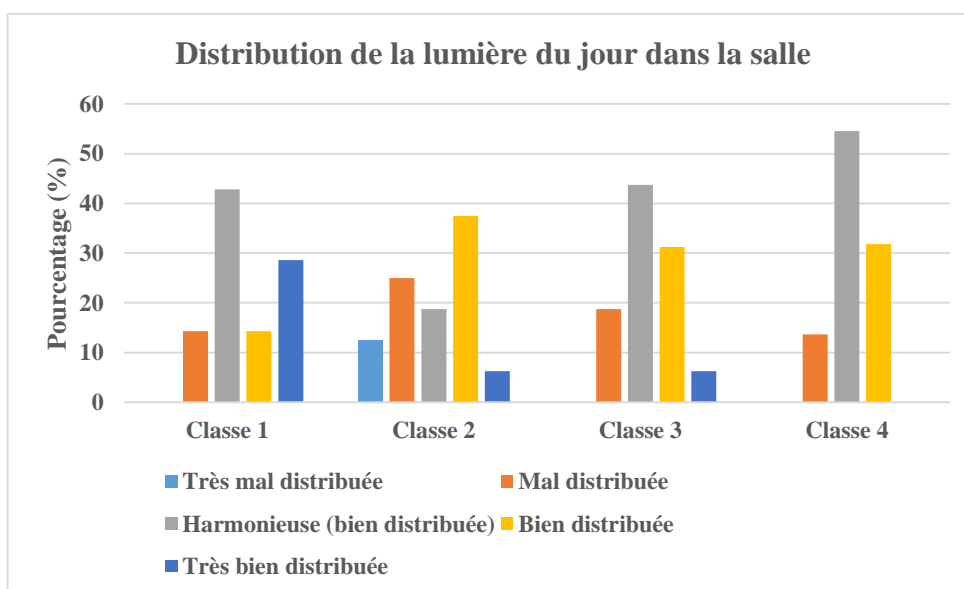


Figure 6.4, o)

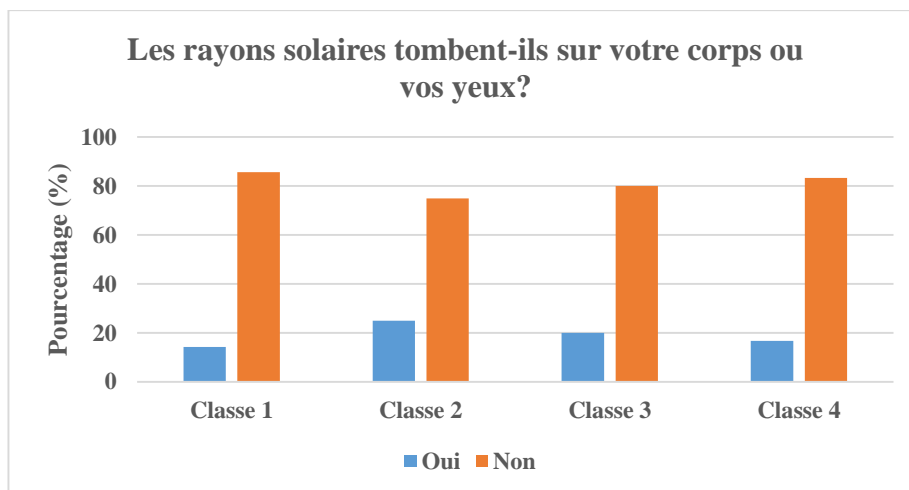


Figure 6.4, p)

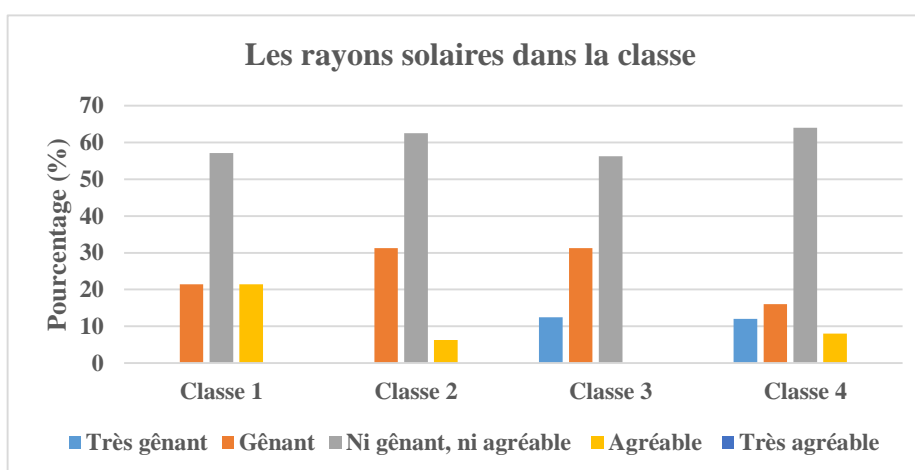


Figure 6.4, q)

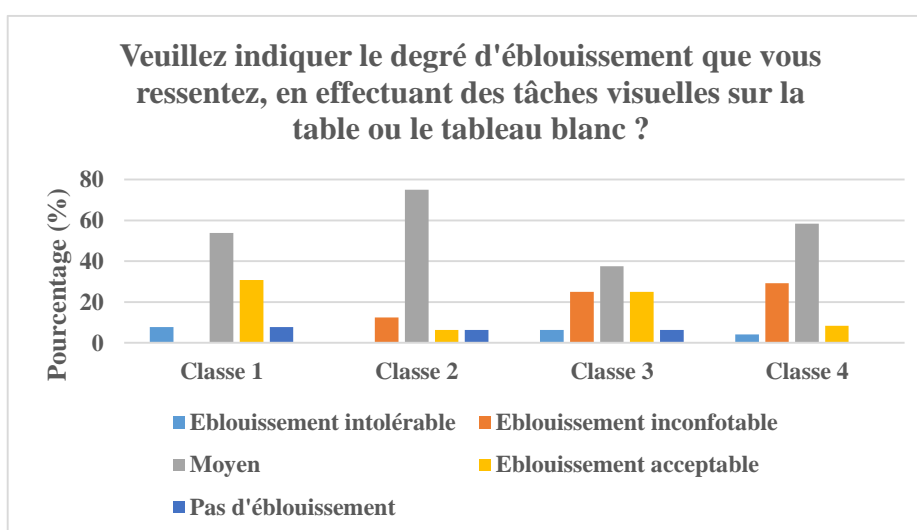


Figure 6.4, r)

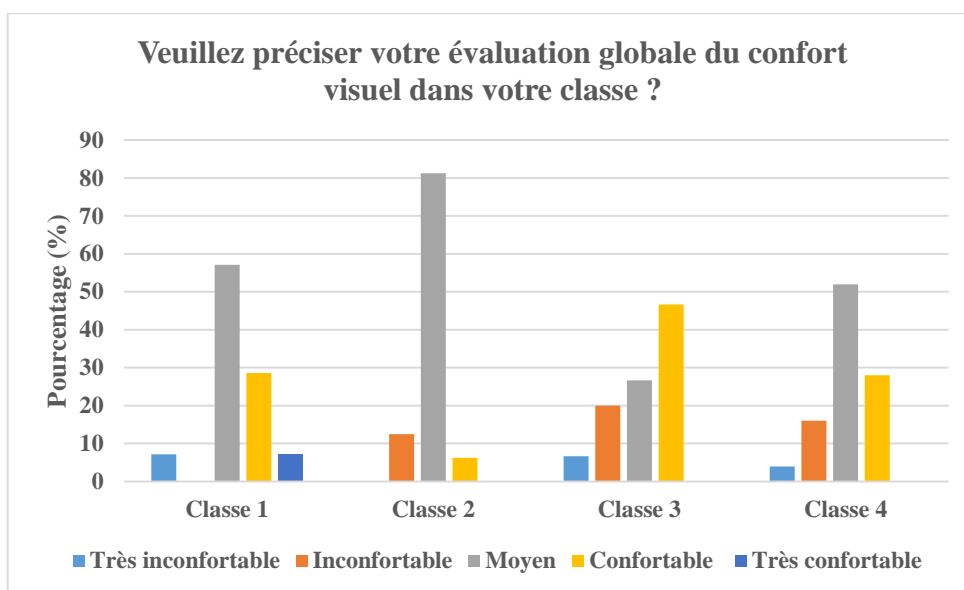


Figure 6.4, s)

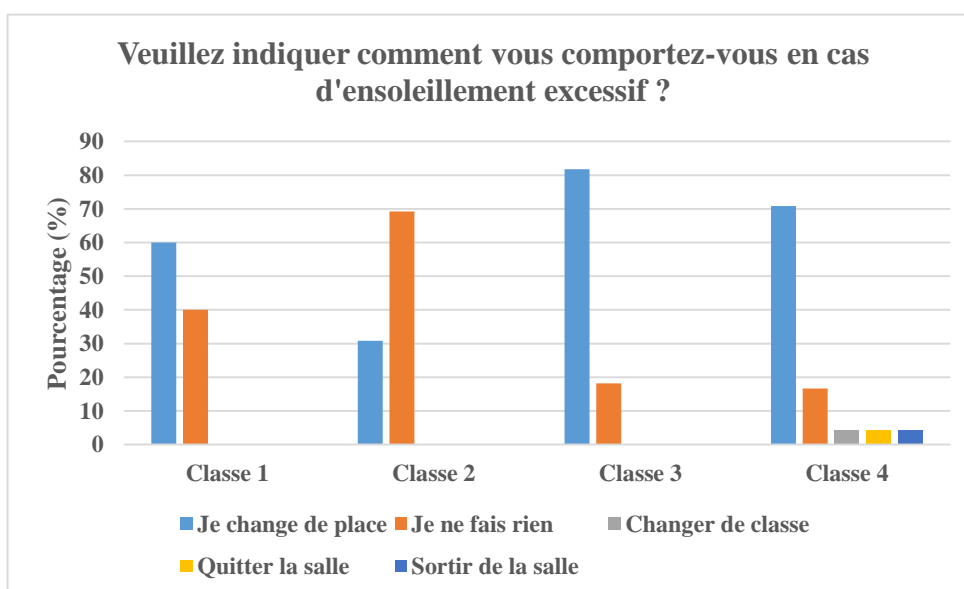


Figure 6.4, t)

4. Discussion des résultats

Au centre historique de Miliana, tous les bâtiments scolaires ont été réalisés pendant la période coloniale française, à une époque où l'éclairage artificiel n'était pas à l'ordre du jour. L'adaptation du bâtiment à son environnement, ainsi que le choix adéquat des dispositifs bioclimatiques ont été nécessaires pour offrir aux usagers des conditions de confort optimales. L'analyse du confort visuel dans les deux cas d'étude nous a permis de ressortir les points suivants.

- **Niveau d'éclairage**

Au lycée ABDYOU, l'analyse du niveau d'éclairage nous permet de dire que la plupart des salles de classe assurent un niveau d'éclairage suffisant (au-dessus de 300 lux), et cela est constaté au courant de l'année scolaire (automne, hiver et printemps). Cela est dû principalement à l'orientation sud des salles de classe, leur permettant d'être exposés de façon prolongée aux rayons solaires. De plus, les fenêtres hautes permettent de parvenir la lumière du jour aux espaces reculés par rapport aux prises de jour.

Au lycée FERROUKHI, la performance de l'éclairage naturel est différente et dépend de l'emplacement des salles de classe. Celles situées au rez-de-chaussée se caractérisent par un manque de lumière naturelle, que ce soit sous un ciel clair ou couvert, cela est dû principalement à l'orientation nord et aussi la coursive fermée, qui entrave l'accès de la lumière naturelle côté sud. Tandis que, les salles situées au deuxième étage garantissent un éclairage suffisant pendant toute l'année scolaire, même sous les conditions d'un ciel couvert.

Ce succès des concepteurs de l'époque n'est pas en concordance avec les résultats de la recherche révélée [134] ayant généralisé que les bâtiments scolaires hérités de l'époque coloniale ne fournissent pas trop de confort visuel en raison du manque de lumière du jour dans les salles de classe. Les résultats sont en effet relatifs au cas d'étude choisi, qui serait caractérisé par un éclairage unilatéral et le bâtiment scolaire se trouverait dans un état déplorable avec des affiches ou des peintures au niveau des fenêtres entravant la pénétration de la lumière naturelle.

- **Facteur de lumière du jour (FLJ)**

Le facteur de lumière du jour (FLJ) est un élément qui indique l'efficacité de la conception à apporter la lumière du jour dans les espaces intérieurs. Sous un ciel couvert, les niveaux moyens du FLJ sont supérieurs à 4 %. Toutes les salles de classe prises pour cette recherche ont une valeur FLJ au-dessus du niveau (2 %) préconisé par la démarche de la haute qualité environnementale (HQE). Cependant, les salles de classe du deuxième étage au lycée Ferroukhi, se caractérisent par le niveau moyen de FLJ, le plus élevé. Cela est dû à la hauteur importante du sous-plafond (4,55 mètres) par rapport au lycée Abdou (4 mètres). Un plafond plus élevé donne la possibilité d'un niveau de fenêtre plus élevé, ce qui

entraîne plus de pénétration de la lumière du jour sans aucune obstruction [135]. De plus, il convient de rappeler que la surface vitrée moyenne des salles de classe est plus de 20,54% au lycée Ferroukhi, alors qu'elle est de l'ordre de 14,65% au lycée Abdou.

- **Rapport d'uniformité**

L'uniformité d'éclairage (U_0) minimale pour maintenir l'éclairage recommandé est de l'ordre de 0,6 [62]. Les résultats indiquent que les deux cas d'étude ont un rapport d'uniformité acceptable (supérieur à 60%). Les raisons qui expliquent cela sont relatives aux caractéristiques architecturales des constructions coloniales à Miliana. Plafond haut, fenêtre haute et placement approprié des ouvertures sont de bonnes stratégies pour créer une meilleure distribution de la lumière du jour. À l'encontre des résultats de l'étude [135] ayant trouvé un faible rapport d'uniformité, ces stratégies ont réussi à créer une bonne distribution de la lumière du jour, notamment au lycée Ferroukhi, le rapport d'uniformité a dépassé la valeur de (0,9), ce qui est dû principalement à la position haute des fenêtres sur la paroi du mur nord. Une autre caractéristique de ces anciennes écoles est l'éclairage bilatéral, qui permet d'obtenir une uniformité adéquate de la lumière du jour $> 0,5$ et distribution optimale [136]. L'analyse de ces éléments cités précédemment nous procure de bonnes leçons conceptuelles sur l'architecture scolaire héritée de l'époque coloniale française, et nous permettrait de corriger les problèmes existants dans les bâtiments scolaires construits durant la période postcoloniale (après l'indépendance 1962). Cette dernière pose de sérieux problèmes en termes de qualité, quantité et distribution de lumière du jour dans les salles de classe et ne parviennent pas à assurer le confort visuel des élèves et des enseignants [136].

- **Scénario de rénovation**

Plusieurs recherches témoignent que les problèmes d'éclairage naturel sont faciles à gérer lors de la conception des nouveaux bâtiments [137], mais lorsque l'on envisage une intervention de rénovation sur les bâtiments existants, en particulier, ceux dotés d'une valeur patrimoniale, plusieurs contraintes sont posées, qui exigent le respect de leur aspect historique et leurs caractéristiques architecturales [137].

En Algérie, les évaluations minutieuses des ambiances architecturales (avant de procéder aux de travaux de rénovation) sont fâcheusement absentes, comme fut le cas des deux anciens lieux de savoir examinés dans la présente thèse. Par conséquent, il n'y a pas d'amélioration du confort visuel et les élèves se plaignent souvent. Cet inconfort visuel peut grandement influencer la capacité d'apprentissage des élèves, ainsi que des effets négatifs que leur santé [84].

Il faudrait donc opter pour des bonnes interventions, qui sont en mesure de traiter le problème d'éblouissement, causé principalement par le reflet des rayons solaires sur le tableau blanc, et ceci est récurant notamment sur les façades des salles orientées est et ouest. Cela est en concordance avec les résultats des recherches antérieures, qui ont abordé la performance d'éclairage naturel dans des bâtiments scolaires des pays méditerranéens, en l'occurrence [71]. Ces interventions devraient être non destructives et soigneusement étudiées pour améliorer les conditions lumineuses dans les salles de classe et réduire le recours à l'éclairage artificiel.

5. Conclusion

Ce chapitre a abordé l'évaluation du confort visuel dans les salles de classe de deux bâtiments scolaires anciens situés à Miliana. L'évaluation a été effectuée par des mesures in situ, ainsi qu'une enquête par questionnaires. Cette étude a conduit à dégager des conclusions importantes, en particulier, en termes de quantité et d'uniformité d'éclairage, et aussi des problèmes d'éblouissement :

En termes de niveaux d'éclairage :

- Au lycée ABDYOU, sous un ciel clair, les salles de classe assurent des niveaux d'éclairage naturel suffisants (au-dessus de 300 lux), tout au long de l'année scolaire (automne, hiver et printemps).
- Au lycée FERROUKHI, sous un ciel clair ou couvert, les salles de classe du rez-de-chaussée n'assurent pas de niveaux d'éclairage naturel suffisants, alors que celles situées au deuxième étage le garantissent pendant toute l'année scolaire.

En termes d'uniformité :

- Au lycée ABDOU, l'uniformité de la lumière du jour des salles de classe peut être décrite comme acceptable (supérieur à 0,6). Cela est dû à l'éclairage bilatéral de toutes les salles de classe.
- Au lycée FERROUKHI, sous un ciel couvert, une répartition harmonieuse de la lumière du jour a été observée, notamment dans la salle du deuxième étage N° 4 (uniformité supérieure à 90%). Cela est dû à la disposition haute des fenêtres sur la paroi du mur orienté nord.

Les conclusions suivantes sont semblables pour les deux typologies :

- Par ciel couvert, le FLJ moy est supérieur à 4%, soit une valeur supérieure à la recommandation (2%) de la démarche HQE.
- Les rayons directs du soleil provoquent des reflets sur le tableau blanc, et cela perturbe les élèves lors de la lecture et l'écriture.
- Un éblouissement intense est constaté dans les salles de classe orientées ouest. Ceci est le résultat de l'absence de dispositifs d'ombrage sur les fenêtres.
- Pour éviter l'éblouissement sur le tableau blanc, les fenêtres des salles orientées ouest sont maintenues fermées, de plus, l'éclairage artificiel est utilisé pour compenser le manque d'éclairage naturel.

En guise de conclusion, cette évaluation nous a offert l'occasion de dire que les mesures d'amélioration du confort visuel des élèves devraient traiter plus précisément les problèmes d'éblouissement et réduire le recours à l'éclairage artificiel [71].

Deuxième partie : Expérimentation

CHAPITRE 7

AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES CAS D'ÉTUDE

1. Introduction

Après avoir évalué les confort thermique et visuel, la performance énergétique, et identifié les faiblesses résultant d'une mauvaise restauration responsable de la consommation excessive d'énergie dans les bâtiments cas d'étude, le but de ce chapitre est de proposer de bonnes interventions susceptibles d'améliorer les conditions de confort et l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâti. Les rénovations proposées seront vérifiées à l'aide du logiciel de simulation énergétique « EnergyPlus », et sont basées sur les résultats expérimentaux. Par la suite, elles seront discutées et comparées à la littérature et les études antérieures.

En outre, afin de restaurer le comportement hygrothermique des bâtiments cas d'étude, les interventions proposées seront compatibles avec leur fonctionnement naturel, et qui vont aussi dans le sens des avantages recherchés (confort et efficacité énergétique). Ces rénovations tiendront compte des caractéristiques propres des anciennes écoles à Miliana pour ne pas dénaturer l'aspect architectural ni créer de désordres techniques.

Le choix de simulation numérique est porté sur le lycée Abdou, puisqu'il est le premier bâtiment scolaire ayant fait l'objet des travaux de réhabilitation en 2013, par rapport au lycée Ferroukhi, ayant rouvert en 2017, par conséquent, l'impact de la réhabilitation est plus remarquable sur le confort thermique et l'efficacité énergétique.

2. Interventions à réaliser

Une bonne intervention sur le bâti ancien a pour objectif de préserver la valeur patrimoniale, tout en améliorant les performances énergétiques et la qualité de l'environnement intérieur, à savoir les confort thermique et visuel. En ce qui concerne le choix de ces interventions, elles peuvent faire l'objet d'un retour en

arrière (par élimination des erreurs commises par les malheureuses interventions sur les deux cas d'étude) ou l'apport de nouvelles solutions qui n'étaient pas à l'ordre du jour pendant les années de construction des anciens lieux de savoir à Miliana [138].

L'amélioration des cas d'étude sera conçue de manière globale, et regroupera notamment les interventions qui seront en mesure d'améliorer la performance thermique passive du bâtiment. Elle contiendra aussi des interventions sur les systèmes dits « HVAC », chauffage, ventilation et climatisation, puisque sous des conditions climatiques très défavorables, le bâtiment ne pourra pas assurer le confort optimal.

2.1. Isolation du grenier

Le grenier du cas d'étude n'est pas aménagé, et sert beaucoup plus à fermer thermiquement le volume de l'école ancienne, au passage du câblage électrique, ainsi que le placement des panneaux en laine de roche en cas de nécessité (voir **figure 7.1**). Néanmoins, le plancher de ce grenier cause de sérieux problèmes ; inconfort thermique des usagers, en été comme en hiver, et de grosses infiltrations d'air froid (plus de 30 % des pertes thermiques).



Figure 7.1 : Grenier du cas amélioré (Lycée ABDYOU).

À cet effet, il existe deux techniques pour isoler les combles. Sous les rampants de la toiture ou sur le plancher des combles. Notre choix s'est porté sur

la dernière option, c'est-à-dire, l'isolation des salles de classe en partie haute, c'est la solution la plus facile et la moins onéreuse [138].

L'isolation du plancher des greniers devrait par ailleurs assurer la pérennité de la charpente, ainsi que celle de la couverture. Autrement dit, il faut éviter le confinement de la charpente par produits étanches à l'air et la vapeur d'eau. Sinon, elle ferait l'objet de dégradation et d'insalubrité (moisissures, pourritures...) [138]. À cet effet, il faudrait plutôt opter pour des matériaux dits respirants. C'est-à-dire, en mesure de respecter le comportement hygrothermique du bâti ancien, à travers la gestion des échanges de vapeur d'eau. De plus, le complexe isolant devra améliorer l'inertie de la toiture, et cela va booster notamment le confort d'été. En cherchant ces avantages, le choix s'est porté sur « la laine de bois avec une certaine densité », matériau écologique qui répond fortement aux exigences requises (voir **figure 7.2**). Il est recommandé de choisir des variétés ne nécessitant pas de traitement chimique telles que le châtaigner et le chêne [138].

En termes de mise en œuvre, la pose de panneaux en laine de bois doit se faire en deux couches (avec une épaisseur minimum de 35 cm, pour respecter la réglementation thermique [61]), la première entre solives de bois, tandis que la deuxième est placée sous la première, de manière croisée pour minimiser les ponts thermiques. Un pare-vapeur est placé sous l'isolant pour assurer l'étanchéité à l'air et éviter tout risque de condensation dans l'isolant. Pour l'habillage, il est recommandé de mettre en place des plaques de plâtre.

Sur le plan financier, le prix moyen au m² de la laine de bois en panneaux 200 mm est entre 35 à 50 € [139]. L'isolation d'une seule salle de classe de 50 m², située au deuxième étage est de (35 € × 50 m²) = 1750 €. Comme il y aura deux panneaux superposés pour constituer une épaisseur de 40 cm, le coût est estimé à 3500 €. Ce qui équivaut à 474 598 dinars algériens. Le deuxième étage comprend 5 salles de classe, leur superficie est de 289 m². Le coût d'isolation est de l'ordre de (35 € × 289 m²) = 10 115 €. Environ 1 370 708 dinars algériens.



Figure 7.2 : Isolation par laine de bois en rouleaux du plancher d'un grenier [140].

2.2. Réhabilitation des murs anciens

Les murs anciens du cas d'étude sont construits en pierre de tufs et maçonnés à la terre. En hiver, le bâtiment capte de la vapeur d'eau, et la stocke dans les murs. En été, l'eau contenue dans ces murs va s'évaporer, en créant une climatisation naturelle. Malheureusement, suite aux travaux de réhabilitation, ils ont été enduits par un produit à caractère hydrofuge, en l'occurrence, le ciment (**figure 7.3**), qui a altéré leur qualité respirante et a significativement dégradé leur confort naturel [141, 142, 143, 144]



Figure 7.3 : Application d'enduit ciment sur murs extérieurs du lycée ABDOU [111].

Il est donc recommandé de procéder à une « correction thermique » (voir **figure 7.4**). C'est-à-dire, une réhabilitation de la maçonnerie pour retrouver les qualités d'origine des murs anciens [138]. Ci-dessous présente les étapes à suivre pour la réhabilitation des murs anciens :

1/Assurer un bon drainage intérieur voire extérieur.

2/Supprimer l'enduit ciment (imperméable à la vapeur d'eau).

3/Joiner les fissures par un enduit à la chaux.

4/Revêtir les murs intérieurs ou extérieurs par des enduits respirants, à l'instar de l'enduit à la chaux naturelle ou plâtre.

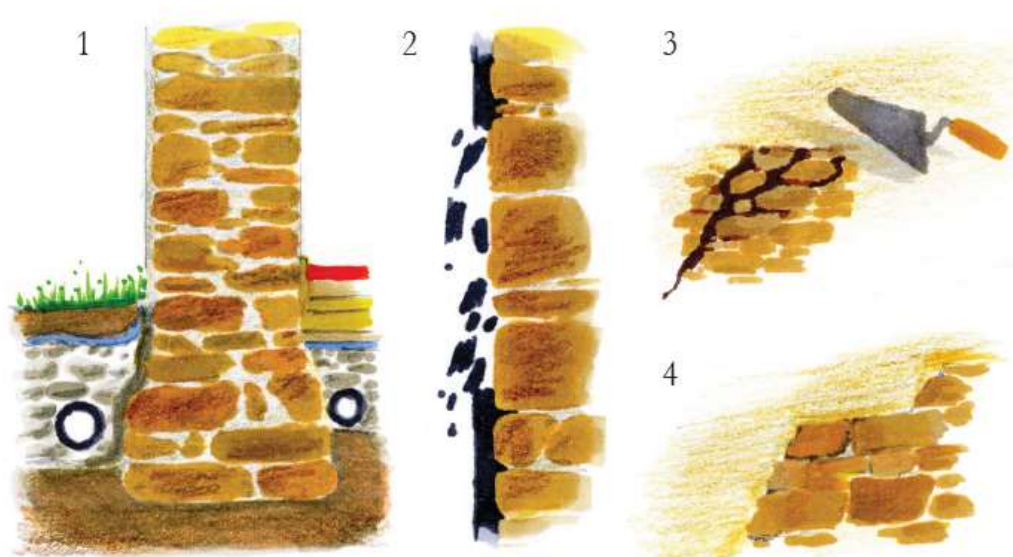


Figure 7.4 : Réhabilitation des murs anciens pour retrouver les qualités d'origine [138].

2.3. Réhabilitation des planchers

Il faudrait respecter le comportement hygrothermique des cas d'étude lors de la réhabilitation des planchers. À l'instar des murs, il faut utiliser des matériaux qui favorisent leur capacité de perméance et valorisent leur inertie. Fâcheusement, les travaux de réhabilitation dans les deux cas d'étude ont banni cette qualité de « perméabilité à la vapeur d'eau ». Dû au fait qu'ils ont utilisé des matériaux hydrofuges, en l'occurrence, une dalle en béton, formant ainsi une barrière qui repousse l'humidité vers les murs [138].

2.3.1. Plancher bas sur « terre-plein »

La **figure 7.5** présente les matériaux convenables pour procéder à une bonne intervention sur le plancher bas. L'humidité de ce dernier doit être bien maîtrisée, vu qu'il est en contact direct avec le sol. En outre, cette intervention va maximiser son inertie thermique en mettant notamment la dalle au-dessus de l'isolant.

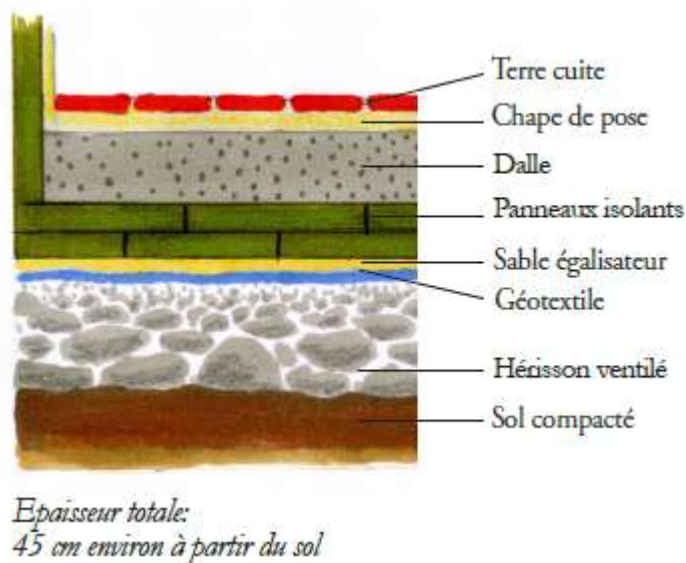


Figure 7.5 : Réhabilitation des planchers bas « sur terre-plein » [138].

Tableau 7.1 : Les matériaux de réhabilitation des planchers sur terre-plein [138].

Dalle/Chape chaux hydraulique naturelle et sable, argile expansée, pouzzolane, terre crue compactée, etc. Attention de bien respecter les temps de séchage.
Panneaux isolants, rigides, incompressibles en liège, laine de bois spéciale sols, etc.
Hérisson ventilé en cailloux de plus en plus fins : tout-venant, galets, graviers, etc. prises d'air extérieures limitées à l'indispensable
Isolant en vrac — chènevotte, liège, vermiculite

2.3.2. Planchers bas sur espaces non chauffés ou planchers intermédiaires

En ce qui concerne le plancher supérieur du sous-sol ou le plancher intermédiaire. Il est constitué de voutes posées sur poutrelles métalliques, avec remplissage de produits hydrofuges (introduits après travaux de réhabilitation).

L'intervention sur cet ensemble, doit assurer une structure perméante à l'eau [138]. La **figure 7.6** montre les différentes couches à utiliser pour assurer une bonne correction thermique des planchers des cas d'étude.

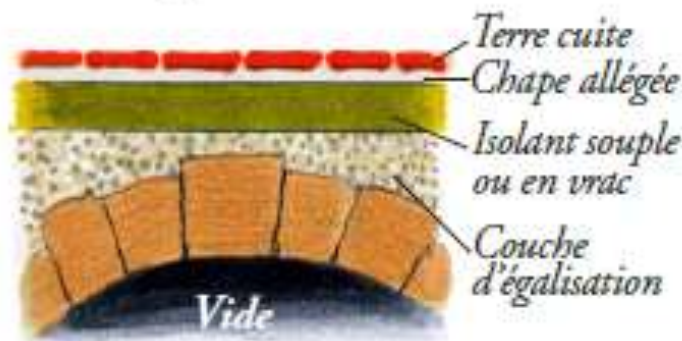


Figure 7.6 : Réhabilitation des planchers bas « espaces non chauffés » et planchers intermédiaires [138].

Tableau 7.2 : Les matériaux de réhabilitation des planchers intermédiaires [138].

Chape allégée isolante-mortier de chaux, et billes d'argile expansée.
Couche d'égalisation en tout-venant
Plaques de plâtre ou de bois fixées aux solives résistantes à la compression

2.4. Remplacement des fenêtres

Les fenêtres actuelles sont les points les plus faibles des cas d'étude. En hiver, par effet de paroi froide, elles constituent souvent une source d'inconfort thermique, ainsi que de déperditions thermiques importantes. Cela est dû au fait qu'elles soient à simple vitrage. Il convient donc de mettre en place des fenêtres plus performantes, assurant à la fois, plus de confort thermo-acoustique et plus d'efficacité énergétique, tout en conservant par ailleurs l'aspect patrimonial des cas d'étude, c'est à dire des fenêtres avec volets.

Comme solution alternative, Il nous paraît judicieux de procéder au remplacement de la menuiserie par « fenêtres de maison passives » (voir **figure 7.7**). Ces dernières ont démontré leur performance dans le projet de rénovation « School of the future », en diminuant considérablement les déperditions thermiques et améliorant le confort thermique intérieur. Elles se caractérisent par un facteur

solaire de 27 %, longue espérance de vie et coefficient de transmission thermique $U \leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Ces ouvertures peuvent être placées en priorité, sur les façades sud et ouest. Ainsi, elles vont contribuer non seulement à améliorer le confort thermique, mais également le confort visuel. Puisque, les occupants des salles de classe souffrent notamment du problème d'éblouissement lorsqu'ils réalisent des différentes activités telles que la lecture et l'écriture (voir **chapitre 6**). Ces fenêtres passives vont donc minimiser l'effet d'éblouissement, et vont changer le comportement des occupants pour améliorer les conditions de confort visuel, comme la fermeture des ouvertures ou la mise en place des obstacles à la lumière du jour, à l'instar des affiches sur le vitrage. Par conséquent, l'installation de ce type de fenêtre va favoriser la pénétration de la lumière du jour tout en évitant ses inconvénients.

Du point de vue financier, les fenêtres proposées sont de très grandes performances, sont triple vitrage et leurs prix moyens sont estimés dans la fourchette de 350 et 700 euros par fenêtre. Si on prend les 350 €, le prix total d'une salle de 4 fenêtres serait de l'ordre de 14000 euros. Ce qui équivaut 1 897 174 DA.



Figure 7.7 : Exemple de nouvelles fenêtres « maison passive » [37].

2.5. Nouvelle installation de chaudière gaz à condensation

Le chauffage du cas d'étude est assuré par une chaudière standard (**figure 7.8**). Elle est de marque FERROLI et caractérisée par une puissance de 200 000 kca/h. Cette installation est énergivore et n'est pas en mesure d'économiser l'énergie.



Figure 7.8 : Chaudières installées en 2013 suite aux travaux de réhabilitation.

Il convient donc de proposer une chaudière moins énergivore, à l'instar de la chaudière à condensation, qui est considérée de nos jours comme la plus performante du marché. Ceci est dû à sa réutilisation des fumées et de la vapeur d'eau, issues de la combustion de gaz naturel, dans le circuit de chauffage au lieu de les émettre dans l'atmosphère. Son rendement est environ 15 % supérieur à la chaudière à gaz sans condensation. Il est aussi recommandé de privilégier une chaudière modulante. C'est-à-dire, qu'elle ne se met pas en marche directement à pleine puissance, mais plutôt capable de moduler son fonctionnement à travers des paliers. De cette manière, le bâtiment scolaire est chauffé en fonction du besoin. Cela permet de réaliser des économies d'énergies et aussi réduire les émissions de polluants.

Le tableau 7.3 présente les avantages d'une chaudière à condensation sur le plan énergétique. En 2018, le bâtiment scolaire cas d'étude, avec son actuelle chaudière (sans condensation) de 232,6 kW, a consommé environ 41 819 m³ de gaz, soit 226 062,63 Da. Si nous prenons, son rendement initial de 86 %, le remplacement par une chaudière gaz à condensation avec un rendement de 101 %

permettrait d'économiser $226\,062,63 \times 0,15 = 33\,909,39$ Da/an. Le temps de retour sur l'investissement est donc estimé à 24 ans (prix d'une chaudière à condensation est estimé à environ 800 000,00 Da).

Tableau 7.3 : Consommation du gaz naturel avant et après remplacement de chaudière (consommation enregistrée en 2018) [72].

Type d'installation	η saisonnier de production sur PCI	Consommation	Montant
Chaudière gaz sans condensation	92... 94 %	41 819 m ³	226 062,63 Da
Chaudière gaz à condensation	101... 103 %	35 546,15 m ³	192 153,24 Da

2.6. Nouvelle installation d'éclairage avec zonage des commandes

L'éclairage artificiel demeure indispensable sous un ciel couvert, mais l'installation existante (voir **figure 7.9**) n'assure pas le niveau d'éclairement recommandé par la réglementation de l'éclairage dans les salles de classe. Les mesures relèvent que les niveaux d'éclairement artificiel moyen dans les espaces d'étude étaient compris entre 15 et 102 Lux, avec une moyenne de 59 Lux. Cela était dû à un éclairage peu efficace, au manque de nettoyage et d'entretien des équipements d'éclairage. Ces niveaux d'éclairement ne correspondent pas aux normes recommandées pour les salles de classe (moins de 300 lux) et ne suffisent pas à assurer le confort visuel des lycéens.



Figure 7.9 : Pave Lumineux Encastré 4x18W du cas amélioré.

Nous proposons donc d'intégrer une nouvelle installation, étant en mesure d'assurer à la fois, le confort visuel des occupants et aussi des économies d'énergie. Pour ce faire, il est recommandé de remplacer les luminaires existants par des luminaires à LED (voir **figure 7.10**), qui ont une longue durée de vie (15 fois plus longtemps que les ampoules traditionnelles) et énergétiquement efficaces (90 % d'énergie en moins que les lampes à incandescence), ce qui réduit considérablement la consommation d'électricité des cas d'étude. Cette nouvelle technologie serait accompagnée, d'un système de gestion en fonction de l'occupation des salles de classe et de la variation de lumière naturelle. Ajoutant à cela, le zonage des commandes (voir **figure 7.10**), qui donne la possibilité de contrôle de la lumière selon l'emplacement dans la salle de classe (près ou loin des fenêtres) [36].

Il est important aussi de veiller à installer des luminaires faisant référence à la norme NBN 12 464. C'est-à-dire, des luminaires qui sont en mesure de maintenir un niveau d'éclairage moyen supérieur à 300 lux, l'uniformité des éclairagements (supérieure à 60 %), ainsi que l'indice d'éblouissement maximum de 19.

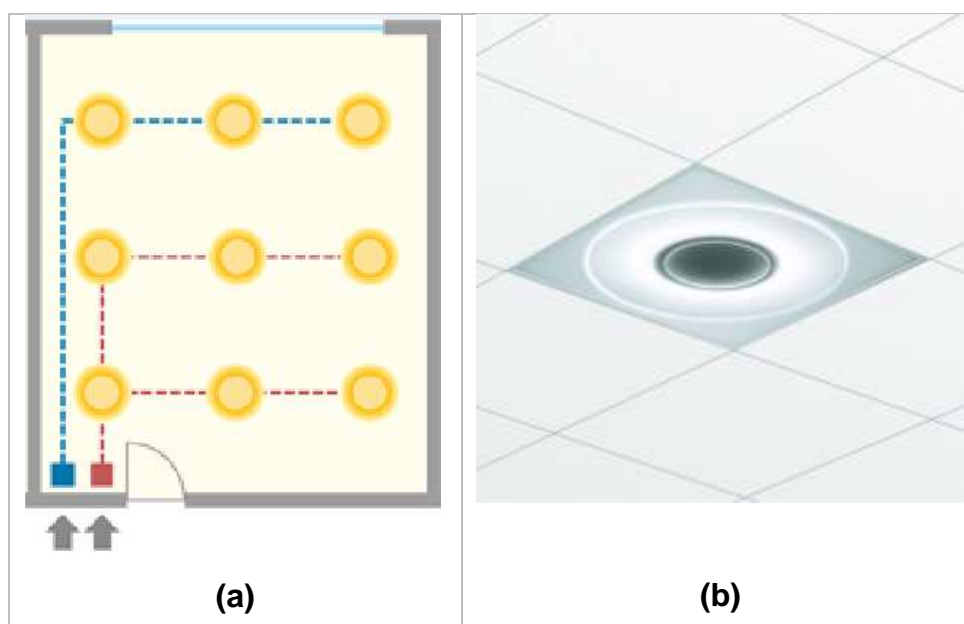


Figure 7.10 : (a) Zonage des commandes pour les salles de classe [46].
(b) Luminaire LED encastré pour l'éclairage des salles de classe [145].

Les LED peuvent assurer le meilleur confort visuel pour les usagers tout en consommant 6 à 10 fois moins d'électricité. En 2018, la consommation électrique du cas d'étude est estimée à 44 866 kWh, soit 342 599,43 Da (voir **Tableau 7.4**). Si nous divisons la consommation d'électricité par 6, l'installation d'éclairage permettrait d'économiser $342\,599,43/6 = 57\,099,91$ Da/an. Soit des économies de 285 499,52 Da/par an.

Supposons, par ailleurs, que le prix d'un luminaire LED est environ 10 €/1 361 Da. Les 201 luminaires anciens (censés être remplacés) équivalent 2010 €/273 561 Da. En 1 an, l'investissement de cette nouvelle installation d'éclairage est amorti.

Tableau 7.4 : Différence de consommation en électricité entre les deux installations.

Type d'installation	Consommation	Montant
Pave Lumineux Encastré 4x18W	44 866 kWh	342 599,43 Da
Luminaire LED encastré	7478 kWh	57 099,91 Da

2.7. Travaux de peinture

Avant de mettre le point sur les bonnes interventions à réaliser en termes de peinture, un état des lieux est dressé pour les espaces importants du lycée cas d'étude, à savoir, salles de classe, espaces de circulations et bibliothèque. Les propositions de coloris de peinture varient en fonction du type de local.

2.7.1. Salles de classe

La **figure 7.11** présente la qualité de l'ambiance lumineuse dans les classes du lycée cas d'étude. Il convient de constater que les lycéens sont sujets à un fort contraste entre le tableau blanc et le mur qui le supporte. Cela crée un manque de concentration et une fatigue visuelle chez les occupants de la salle. Par conséquent, il y aura un effet négatif sur la compréhension et le rendement scolaire.



Figure 7.11 : Ambiance lumineuse dans la salle de classe N° 6 (lycée ABDOU).

- **Les bonnes interventions**

Il est recommandé d'appliquer des peintures qui favorisent la concentration des élèves et capables de créer un environnement de travail doux. Ceci peut être atteint par, l'usage de teintes froides, à l'instar de : beige, vert pâle, bleu-vert (exemples de coloris en **figure 7.12**).

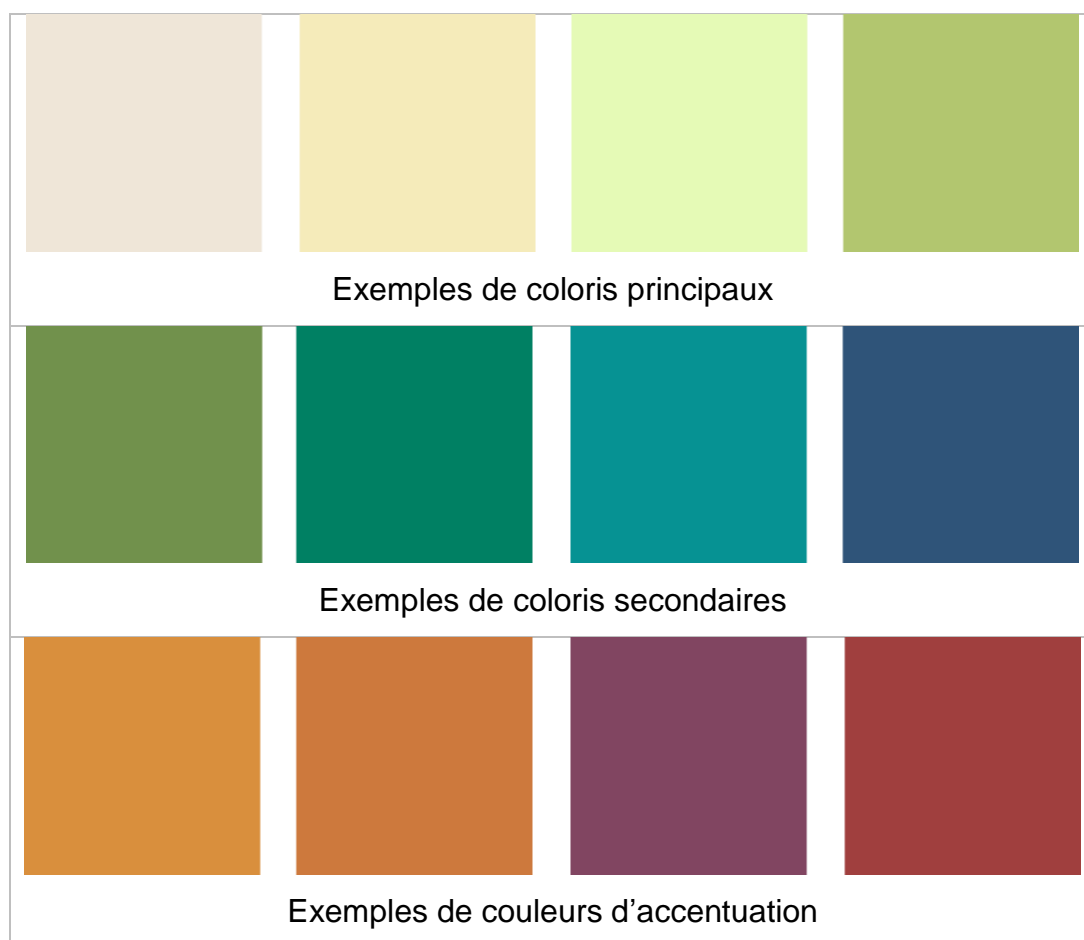


Figure 7.12 : Gamme de peinture à utiliser pour créer un environnement doux dans les salles de classe [72].

➤ **Mur du tableau**

La **figure 7.13** affiche un choix approprié de teintes pour atténuer le contraste et augmenter le confort visuel chez les usagers de l'espace d'étude. Le tableau en vert et le mur en violet favorisent la concentration et rendraient la salle moins ennuyeuse.



Figure 7.13 : Choix approprié des coloris pour le mur supportant le tableau [72].

➤ **Soubassement des murs**

Par ailleurs, le choix de la peinture participe à protéger les murs des salissures et évite de la repeindre fréquemment. C'est le cas des parties basses des murs, qui sont soumises au passage des élèves, notamment, à des traces de pieds. Ce mauvais choix (couleur claire) est mis en exergue dans les classes du cas d'étude (la **figure 7.11**). Ces parties-là doivent donc être peintes en utilisant des tons foncés et plus résistants (**figure 7.14**).



Figure 7.14 : Couleurs foncées sur la partie basse des murs pour éviter les salissures [72].

2.7.2. Espaces de circulation

Les figures 7.15 et 7.16 présentent le choix de couleurs claires pour la cage d'escalier, ainsi que la coursive du cas d'étude. Ces espaces de circulation sont en effet soumis aux passages des lycéens, par conséquent, ils sont susceptibles facilement à l'accumulation de salissures.



Figure 7.15 : Choix des couleurs claires pour la cage d'escalier du cas amélioré.



Figure 7.16 : Teinte claire sur la partie basse des murs favorise les salissures (coursive du cas amélioré).

- **Les bonnes interventions**

Dans le but de créer un environnement dynamique et plein de vie, chaque niveau du cas d'étude pourrait être peint différemment. La **figure 7.17** présente une gamme de couleurs qui pourrait être appliquée. Par exemple, l'orange clair pour les murs ferait un bon contraste avec le bleu pour les portes.



Figure 7.17 : Exemples de coloris à utiliser pour les espaces de circulation [72].

La **figure 7.18** présente une teinte foncée pour, les parties basses des murs. De cette manière les salissures sont camouflées.



Figure 7.18 : Revêtement spécifique de teinte foncée pour la cage d'escalier minimise les salissures [72].

La **figure 7.19** donne aussi une bonne idée sur le choix judicieux de couleurs. De plus, elle met en exergue que cette ambiance change notre perception spatiale de la coursive. Par exemple, la couleur foncée du plafond rabaisse l'espace et donne l'impression que le plafond est moins haut.



Figure 7.19 : Couleurs plus attrayantes pour créer un environnement énergétique [72].

2.7.3. Bibliothèque

En ce qui concerne les bonnes interventions dans la bibliothèque du cas d'étude, il est recommandé de créer un environnement calme qui favorise la concentration. À cet effet, nous pourrions utiliser le vert pâle ou clair (**figure 7.20**).



Figure 7.20 : Exemples de coloris pour la bibliothèque [72].

2.8. Sensibilisation pour profiter de la lumière du jour

Suite à notre investigation dans les écoles anciennes à Miliana, nous avons constaté qu'il y avait, à bon ou à mauvais escient, des ajustements dans les salles de classe, qui empêchent d'assurer une bonne qualité lumineuse. En l'occurrence, la **figure 7.21** qui met en évidence de réels obstacles à la lumière du jour. Ces planches en bois sont placées pour faire face aux infiltrations d'air froid, qui pénètre

à travers les vitres brisées. Cependant, avec l'installation des fenêtres maison passive, ces obstacles peuvent être retirés sans se soucier ni de déperditions thermiques ni d'éblouissement. Ce dernier serait réduit considérablement par le nouveau vitrage.

En outre, il est judicieux de faire une campagne de sensibilisation auprès des professeurs de la nécessité de la lumière du jour, et qu'ils devraient inculquer cela aux élèves, afin de réduire les consommations en éclairage électrique. En effet, cela pourrait être concrétisé via quelques gestes simples, comme éviter les affiches ou les posters sur le vitrage, éteindre les luminaires lorsque l'éclairage naturel est suffisant, éviter de placer des obstacles devant les ouvertures pour ne pas entraver la pénétration de lumière naturelle. Aussi, apprendre à utiliser le système de zonages des commandes pour éclairer sagement les salles de cours.



Figure 7.21 : Planches de bois entravant la pénétration de lumière du jour.

3. Simulation numérique

3.1. Critères de choix de la zone de simulation

La salle de classe N ° 5 a été choisie (voir **figure 7.22**), d'une part, en raison de l'effet important de la rénovation du plafond traditionnel sur le confort thermique intérieur au niveau du deuxième étage, et d'autre part, par rapport aux conditions optimales garanties pendant l'investigation, à savoir la présence d'utilisateurs, les

ouvertures ne comportent pas de vitres cassées et aussi elles étaient maintenues fermées lors des deux campagnes expérimentales. Cela était bien meilleur pour évaluer uniquement la performance thermique passive de l'enveloppe. Le **tableau 7.5** résume les mesures et les propriétés des matériaux composant la salle de classe 5 ; ces valeurs sont ensuite utilisées comme paramètres d'entrée de simulation dans Energyplus.

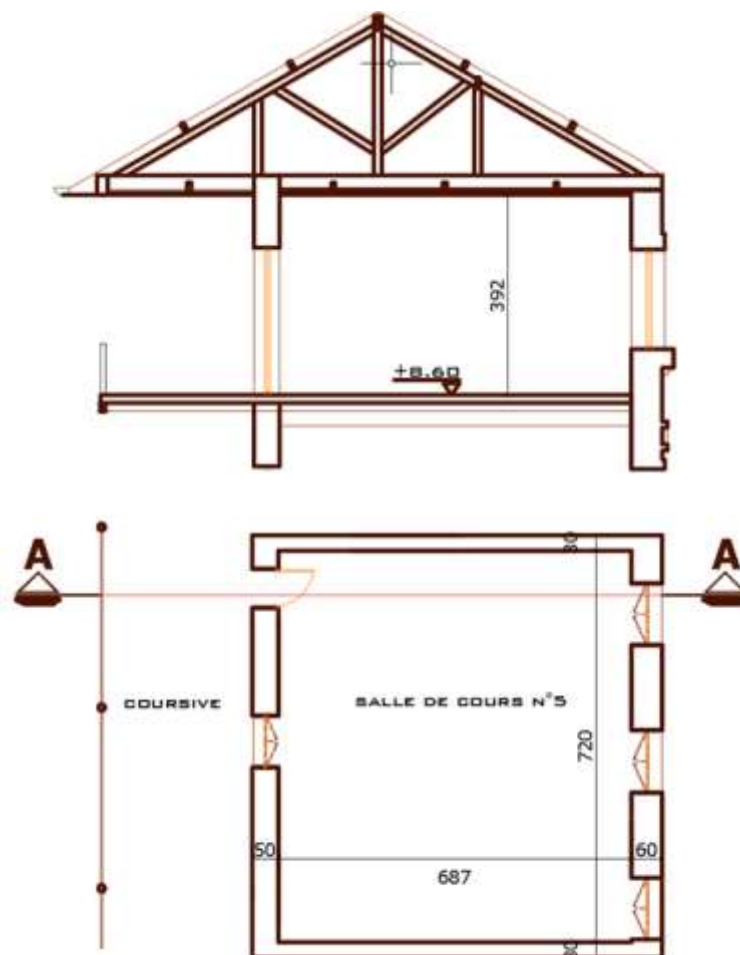


Figure 7.22. Zone de simulation thermique.

Tableau 7.5 : Dimensions et propriétés des matériaux de la salle de classe N° 5.

Paramètre	Description
Nombre d'occupants	32
Superficie	49,5 m ²
Dimensions	7,2 m 6.87 m ; hauteur sous plafond 4 m
Orientation	Sud

Mur (Pierre de tuf)	<p>Mur porteur extérieur 60 cm, mur porteur intérieur 50 cm maçonnés avec des matériaux locaux en pierre de tuf. Cloisons de séparation : double paroi de 30 cm avec brique creuse. Les propriétés thermiques présentées ci-dessous ont été déterminées par caractérisation, en extrayant un échantillon d'un mur extérieur du bâtiment scolaire étudié.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conductivité = $1,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ • Chaleur spécifique = $2653,27 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ • Densité = 2311 kg m^{-3}
Fenêtres à simple vitrage	<ul style="list-style-type: none"> • 4 fenêtres de 1 m/2 m • Ratio fenêtre-mur = 19,4 % ; avec $\lambda = 0,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

3.2. Simulation numérique de la thermie

En ce qui concerne la simulation de l'environnement thermique, elle a été réalisée pour valider les journées de l'investigation sur terrain, correspondant à la période chaude, ainsi que la période froide, en l'occurrence, les 12 février et 24 septembre. La performance des caractéristiques traditionnelles a été vérifiée par rapport aux nouvelles mesures de rénovation, afin de montrer les variations de la température intérieure dans les salles de classe avant et après la rénovation. Pour ce faire, la simulation de l'ensemble du bâtiment scolaire a été effectuée (**figure 7.23**) et la salle de classe étudiée a été modélisée comme une seule zone thermique.

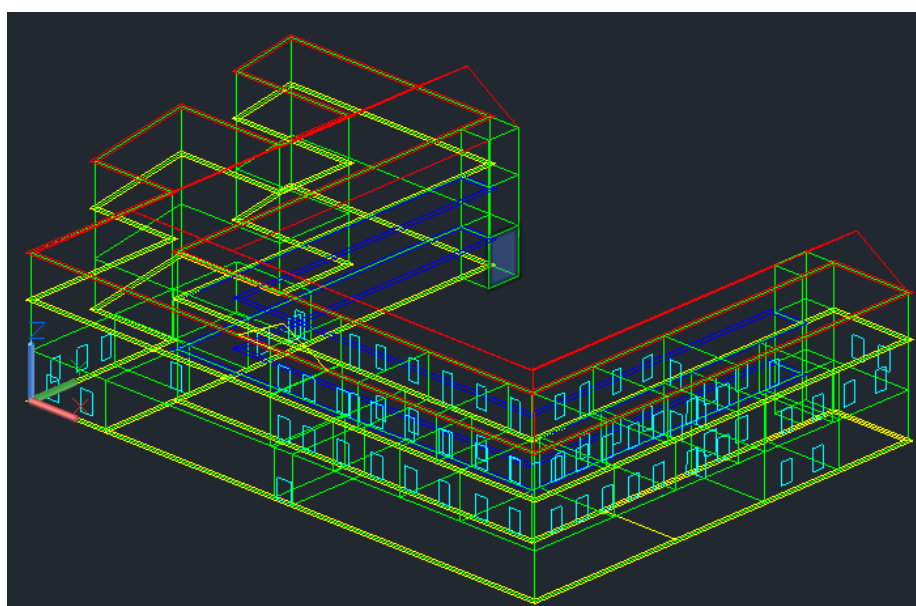


Figure 7.23 : Simulation numérique du Lycée Mohammed Abdou.

3.3. Simulation numérique de l'éclairage naturel

La salle de classe N° 5 a été aussi sélectionnée pour étudier l'ambiance lumineuse à des périodes correspondant aux mesures in situ, en l'occurrence, le solstice d'hiver (21 décembre), et l'équinoxe de printemps (21 mars). Nous avons choisi en fait, 12 points de mesure pour la zone de simulation, une sorte de grille a été tracée selon 3 points pour chaque rang, les distances usuelles entre les points de mesure varient entre 1,80 m et 2 m (**figure 7.24**). Le plan de travail a été défini comme une surface horizontale située à 0,85 m du sol (correspondant à la hauteur des bureaux d'élèves) où se déroule la principale tâche visuelle comme la lecture et l'écriture [137]. La rangée intermédiaire surlignée en rouge va être sélectionnée pour présenter le profil transversal des niveaux d'éclairage avant et après l'intervention proposée.

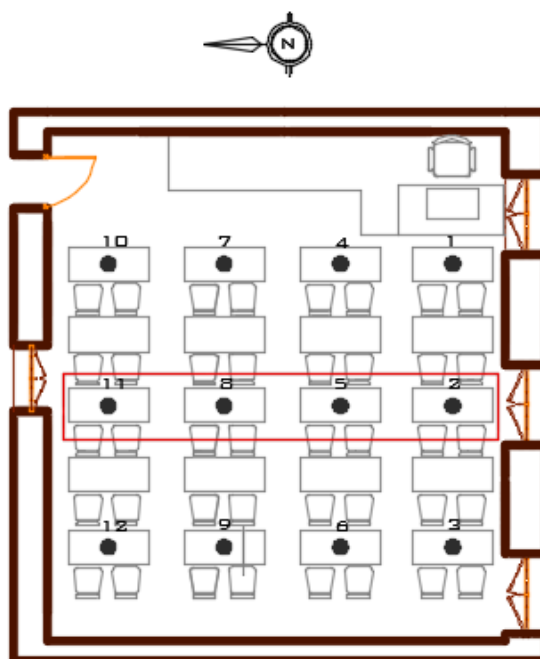


Figure 7.24 : Grille de simulation d'éclairage naturel.

3.4. Paramètres d'entrée de simulation pour les interventions proposées

Après la validation du modèle, place maintenant à l'insertion des nouveaux paramètres de simulation pour améliorer les conditions des confort thermique et visuel. Cette insertion se fait dans la section en lien avec les matériaux de construction « Surface Construction Elements ». Plus précisément, dans la fenêtre « MATERIAL : REGULAR » (voir **figure 7.25**). Dans cette dernière, les isolants

proposés tels que « la laine de roche » seront décrits avec un ensemble complet de propriétés thermiques.

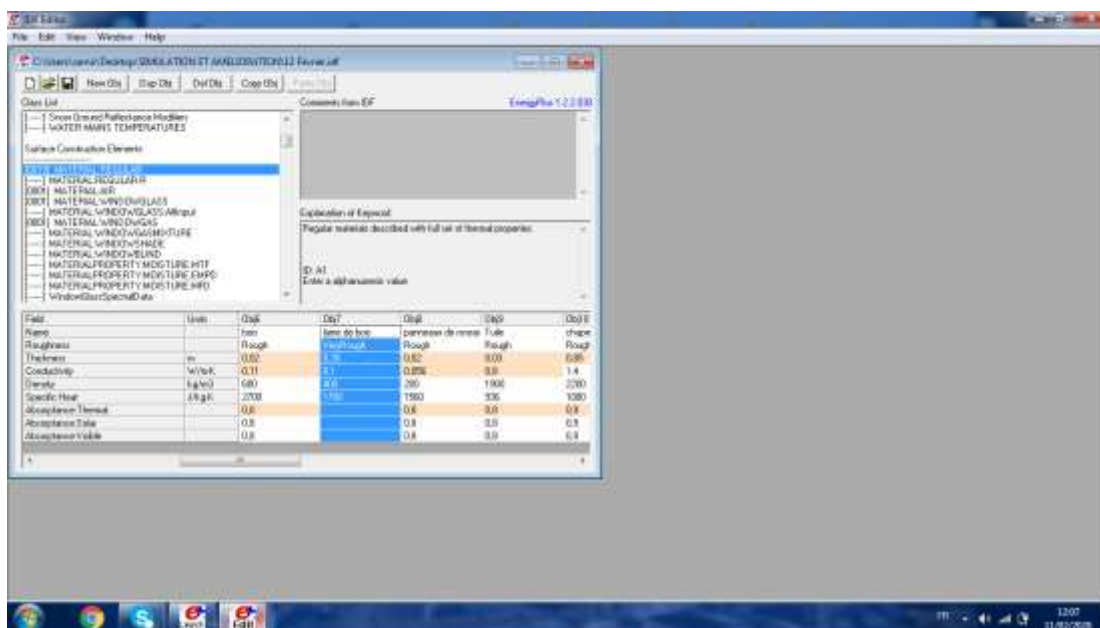


Figure 7.25 : Insertion des paramètres de simulation relatifs aux matériaux de construction.

Les propriétés thermiques de la laine de bois sont présentées dans le **tableau 7.5**, à savoir, la conductivité thermique, la masse volumique, la chaleur spécifique et la diffusivité. Pour ce qui est de l'épaisseur, l'isolation des combles perdus, en l'occurrence, notre cas d'étude, préconise qu'il faille viser au moins 35 cm de laine de bois, et ceci a pour objectif d'atteindre la résistance thermique minimale de ($R = 7 \text{ m}^2$) [61]. Dans notre cas, l'épaisseur de 40 cm sera prise pour pouvoir superposer deux panneaux de 200 mm.

Tableau 7.6 : Propriétés thermiques de la laine de bois [146].

Matériau	Laine de bois
Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0,1
Masse volumique (kg/m^3)	400
Chaleur spécifique ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1700
Diffusivité * 10^8 (m^2/s)	15

L'intervention sur les fenêtres fera l'objet d'un vitrage de maison passive « passive house windows ». L'insertion des paramètres de ce vitrage se fait dans la section MATERIAL : WINDOWGAS (voir **figure 7.26**). Il convient de rappeler que les fenêtres des maisons passives sont triples vitrages et leurs cadres sont très bien isolés afin de répondre aux exigences élevées en matière d'isolation thermique. Ce vitrage est constitué de trois verres d'une épaisseur de (4 mm), séparés par deux lames d'argon de (12 mm) [147]. Les propriétés de cet élément chimique (argon) sont présentées dans le **tableau 7.6**.

Tableau 7.7 : Propriétés de l'argon des fenêtres de maison passive [148].

Élément	Argon
Conductivité thermique	0,01772 W· m ⁻¹ ·K ⁻¹
Chaleur massique	520 J· kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Vitesse du son	319 m· s ⁻¹ à 20 ° C

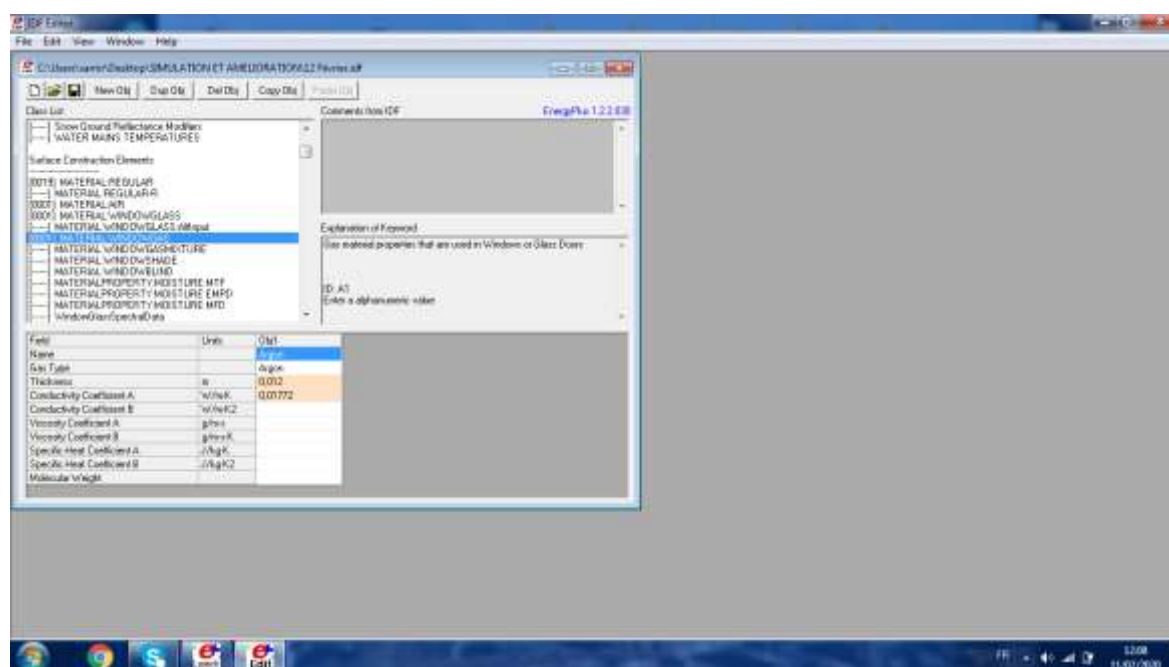


Figure 7.26 : Insertion des paramètres de simulation relatifs au type de vitrage.

4. Résultats de simulation

4.1. Environnement thermique

4.1.1. Vérification et validation du modèle de simulation

Le modèle conçu a été validé sur la base des données empiriques des journées d'investigation, 12 février et 24 septembre 2018. Les résultats sont présentés aux **figures 5.27** et **5.28**. Il convient de constater qu'il existe une bonne concordance entre les mesures in situ et les valeurs de simulation. Néanmoins, une erreur de simulation moyenne est observée allant de 1 à 2 °C. Cette différence est due aux gains internes des occupants dans la salle de classe N ° 5, plus l'infiltration non contrôlée de l'air pendant les journées d'enquête de la saison hivernale et aussi aux ajustements qu'ils ont adoptés en ouvrant les fenêtres pour rafraîchir la salle de classe pendant la période chaude.

Dans le même sillage, une comparaison des performances thermiques du bâtiment a été effectuée avant et après la rénovation. Selon les **figures 5.27** et **5.28**, il y a un écart faible entre la simulation avant et après les travaux de réhabilitation. En fait, les valeurs simulées confirment que les mesures de rénovation mises en œuvre ne contribuent à améliorer le climat intérieur que par temps froid, où une légère augmentation de 1 °C est observée. Cependant, il convient de noter que les mesures de rénovation ont réduit les performances thermiques du bâtiment par temps chaud. Les valeurs de la simulation prédisent une légère différence de 1 °C. Cela signifie que la température de l'air intérieur était meilleure avant le projet de rénovation. Par conséquent, les travaux de réhabilitation effectués n'ont pas entraîné une amélioration significative des conditions thermiques du bâtiment.

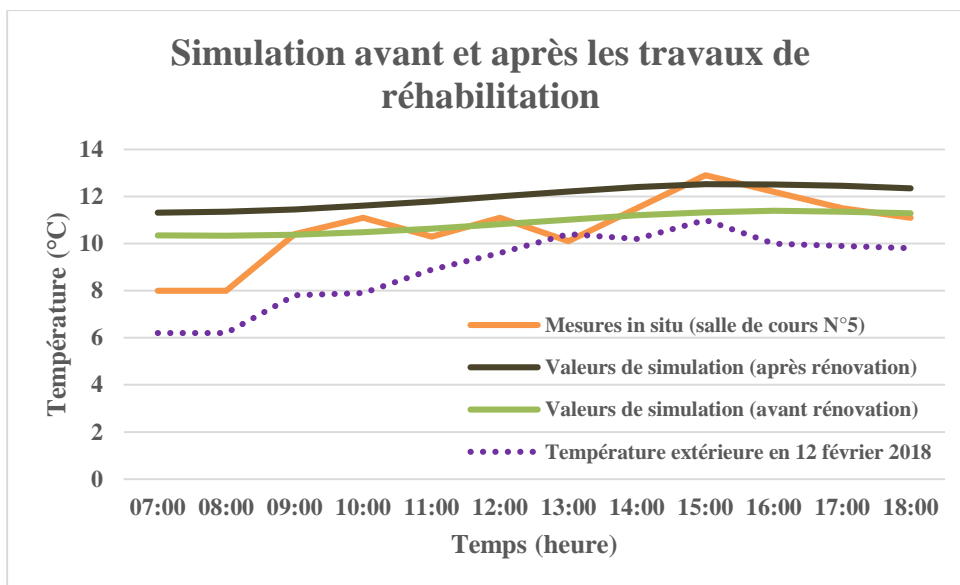


Figure 7.27 : Simulation numérique de la période hivernale (12 février 2018).

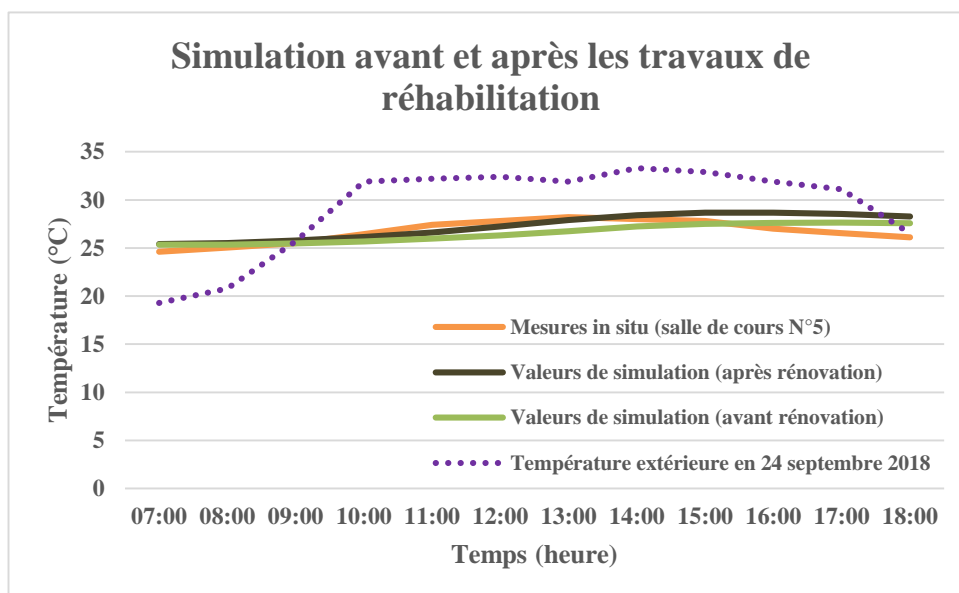


Figure 7.28 : Simulation numérique de la période chaude (24 septembre 2018).

4.1.2. Amélioration de l'environnement thermique d'hiver

La figure 7.29 met en exergue les résultats de simulation numérique après amélioration du cas d'étude (correspondant au 12 février 2018). En effet, une comparaison est effectuée entre d'une part, la performance thermique actuelle du bâtiment et d'autre part, la performance thermique après travaux d'amélioration. La différence est manifestement claire entre les deux performances. Par temps froid, les valeurs de simulation confirment que les interventions proposées pourraient

contribuer à améliorer considérablement le microclimat à l'intérieur des salles de classe. Un écart significatif d'environ 8 °C est observé vers 8 heures. Cela est dû à l'absence des occupants dans la salle au moment de prise de mesures. Il convient de constater que la courbe des températures de simulation est quasiment constante dans la valeur moyenne de 16 °C. Ce qui prouve la bonne isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment scolaire. En outre, il existe un écart de température approximative à 10 °C entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Cela est relevé vers 8 h, quand la température extérieure était de 6,2 °C.

Selon le diagramme bioclimatique (voir **chapitre 4**), nous constatons que nous sommes dans la zone de sous chauffe. Plus précisément, dans la zone définie par les valeurs de température variant entre 13,5 °C et 20 °C [65]. Dans cette dernière, les gains internes sont suffisants pour hisser la température et la déplacer vers la zone de confort (la zone de confort se situe entre 20 et 27 °C et l'humidité relative entre 20-80 % [65]). Les gains internes sont générés non seulement par les occupants de l'espace, mais aussi par les équipements de l'éclairage artificiel, les équipements de présentation tels que le data show... etc. Donc, par temps froid, les interventions proposées vont améliorer l'isolation thermique du bâtiment et par conséquent entraînent une amélioration significative des conditions thermiques dans les salles de classe.

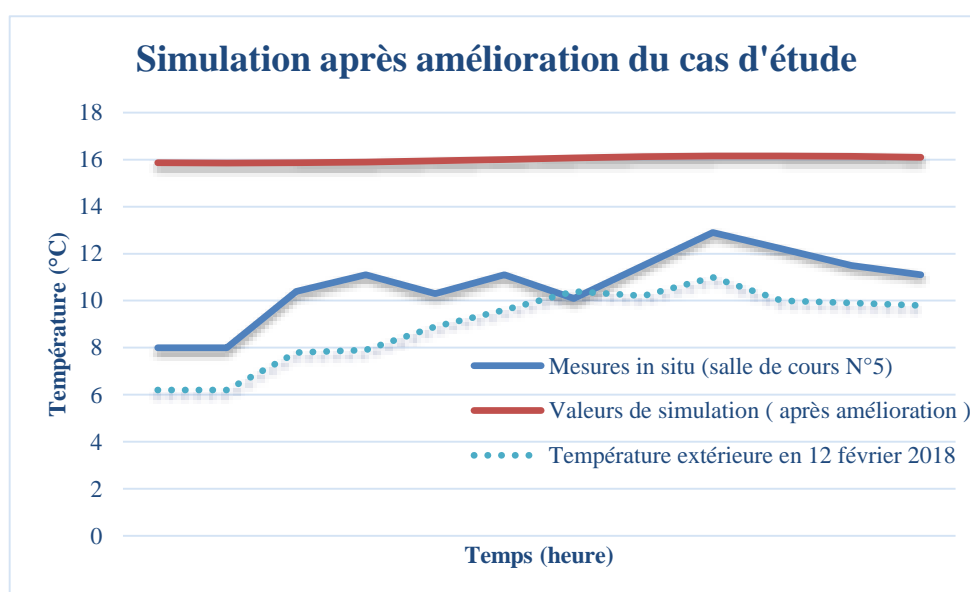


Figure 7.29 : Simulation numérique après amélioration du cas d'étude (12 février 2018).

4.1.3. Amélioration de l'environnement thermique de la période chaude

La **figure 7.30** présente les résultats de simulation numérique après amélioration du cas d'étude (correspondant au 24 septembre 2018). À l'instar de la période froide, Il convient de constater qu'il y a une amélioration de la performance thermique après incorporation des mesures d'amélioration. Par temps chaud, un écart d'environ 2 °C est observé vers 13 heures. La courbe des températures de simulation est constante et correspond à une valeur moyenne de 26 ° C. En outre, il existe un écart de température avoisinant les 7 °C entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Cela est enregistré vers 14 h quand la température extérieure était de 33,3 ° C.

Par rapport au diagramme bioclimatique, nous sommes dans la première zone dite « zone de confort ». Dans laquelle, les valeurs de température se situent entre 20 et 27 °C, correspondant à des valeurs d'humidité relative de 20 % et 80 % [65]. Le confort thermique est donc atteint, sans recourir à des stratégies, ni à des dépenses énergétiques et les élèves peuvent s'adapter à leur environnement thermique intérieur en portant une tenue vestimentaire légère. Par conséquent, les valeurs de simulation prouvent que les interventions proposées pourraient contribuer à rafraichir le microclimat à l'intérieur des salles de classe.

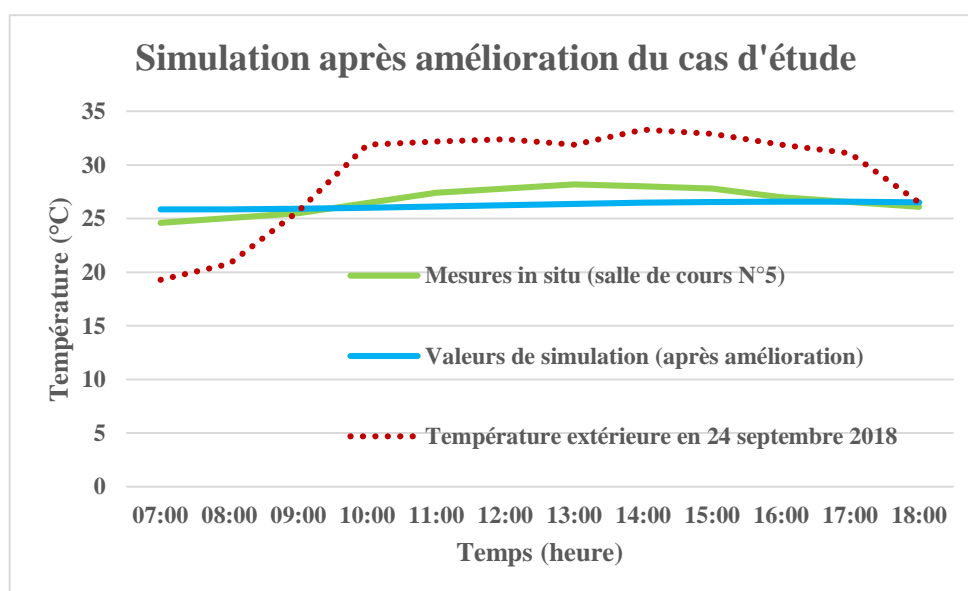


Figure 7.30 : Simulation numérique après amélioration du cas d'étude (24 septembre 2018).

4.2. Environnement lumineux

4.2.1. Modèle de validation (éclairage naturel)

Les valeurs d'éclairage à l'intérieur de la salle de classe ont été simulées au 26 mars à 12 h, dans des conditions de ciel clair. La **figure 7.31** présente le profil transversal d'éclairage mesuré et simulé le long de la rangée des points N° 2, 5, 8 et 11 (surlignés en rouge en **figure 7.24**). Sur le profil, Il convient de constater qu'il existe une légère concordance entre les mesures in situ et les valeurs de simulation. L'écart est dû, premièrement à la présence d'arbres à feuilles caduques, qui se trouvent côté sud du bâtiment scolaire et deuxièmement, à la présence de quelques éléments entravant la pénétration de la lumière du jour, à l'image des bâtiments environnants, les croisillons des fenêtres (pièces de bois, qui maintiennent les carreaux d'une fenêtre) et la peinture sur quelques parties du vitrage. Mais, Il est important de noter que nous avons relativement validé l'éclairage extérieur de la journée du 26 mars, à 12 h avec une valeur mesurée de 89600lux contre une valeur simulée de 89 969 lux (voir **tableau 7.8**). Cela prouve la bonne performance du logiciel et que nous pourrions donc nous en servir dans la phase amélioration du confort visuel.

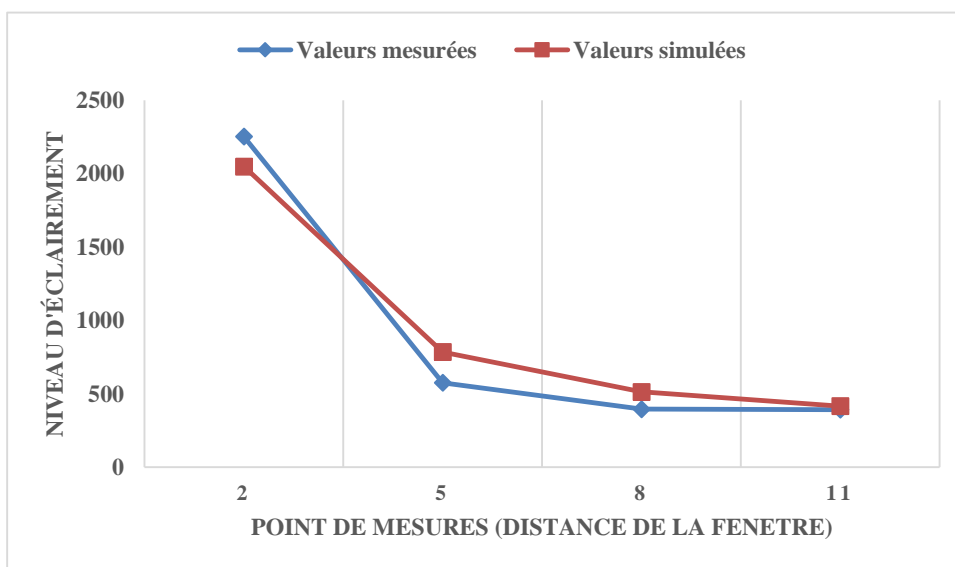


Figure 7.31 : Profil transversal d'éclairage mesuré et simulé le 25 mars à 12 h, sous un ciel clair.

Tableau 7.8 : Comparaison entre les niveaux d'éclairage mesuré et simulé dans la salle de classe N° 5 (à 12h, le 25 mars sous des conditions de ciel clair).

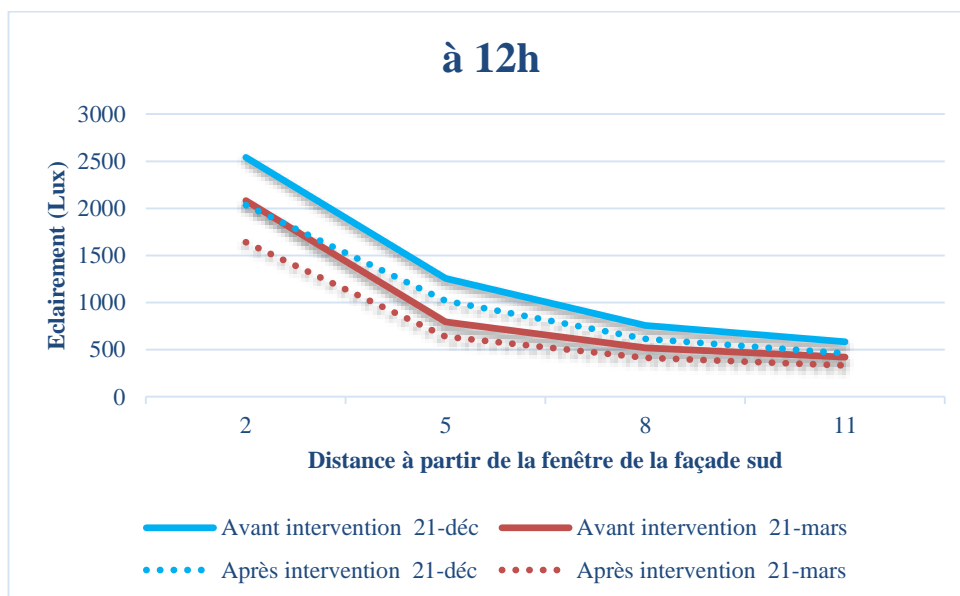
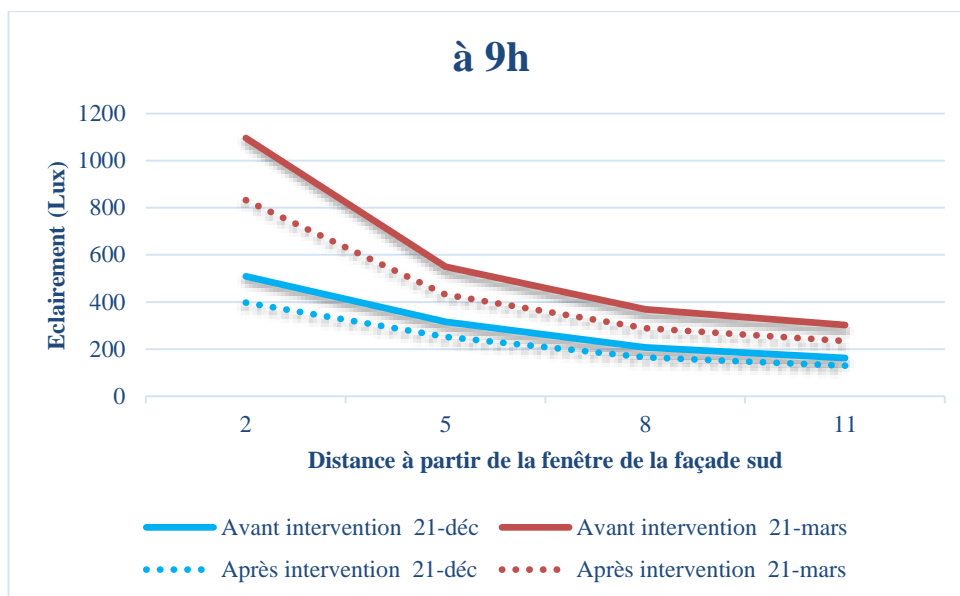
Point	Valeurs mesurées	Valeurs simulées
1	770	1553
2	2253	2050
3	1025	1748
4	529	737
5	576	785
6	480	722
7	398	492
8	396	514
9	363	491
10	318	405
11	393	417
12	293	408
E. ex	89 600	89 969

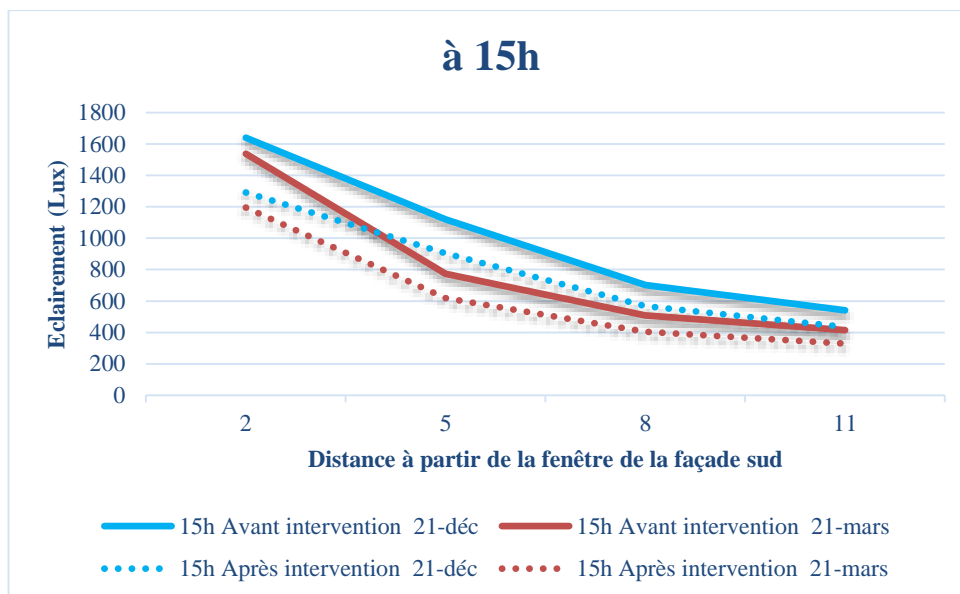
4.2.2. Amélioration de l'environnement lumineux

La **figure 7.32** présente les niveaux d'éclairage naturel à trois horaires (9 h, 12 h, 15 h) avant et après l'intervention proposée. Il convient de constater une réduction remarquable des niveaux d'éclairage excessif à la zone proche du vitrage. Au point N° 2, à 12 h (voir **figure 7.32/b**), une baisse significative est enregistrée, allant de 2542 lx à 2035 lx (-507) et de 2082 lx à 1642 lx (-440 lx), successivement pour les journées de 21 décembre et 21 mars. Autrement dit, dans la plupart du temps, les zones proches des fenêtres affichent des valeurs inférieures à 2000 lx et cela réduit les problèmes d'éblouissement pour les occupants assis à proximité des fenêtres.

En outre, l'éclairage est resté constamment supérieur au minimum seuil de 300 lux fixé par la réglementation de l'éclairage dans les salles de classe [133]. Au fait, l'éclairage moyen au 21 décembre est d'environ 689 lx, alors qu'il est avant l'intervention de l'ordre de 861 lx, soit une baisse de 172 lx. Pour le 21 mars, l'éclairage moyen est de 614 lx, alors qu'il est 781 avant l'intervention, soit

une baisse de l'ordre de 167 lx. Tandis que le rapport d'uniformité est supérieur à 0,5 avant ou après l'intervention. Il n'y a pas donc un changement et la lumière du jour est restée relativement bien répartie dans la salle de classe N°5.





(c)

Figure 7.32 : Profil transversal des niveaux d'éclairage mesuré et simulé le long de la rangée des points N° 2, 5,8 et 11 (surlignés en rouge, voir figure 7.26) le 26 mars à 12 h, sous un ciel clair.

4.2.3. Évaluation de la consommation d'énergie

La **figure 7.33** montre une comparaison de la charge thermique avant et après l'intervention proposée, tout au long de la journée du 12 février 2018. Pour la salle de classe d'origine, la demande moyenne de chauffage est de 813 W, alors qu'elle est de l'ordre de 267 W pour la salle de classe améliorée. La différence est donc significative et les mesures de rénovation aideraient à réduire le besoin de chauffage de l'espace d'étude amélioré de 67 %. Cela est dû à la bonne performance thermique passive du bâtiment scolaire, qui serait déjà en mesure d'assurer des conditions internes (conditions de la salle de classe) proches des conditions confortables. Par ailleurs, la **figure 7.34** expose la charge de refroidissement requise pour rafraîchir la salle de classe pendant la journée de mesure in situ du 24 septembre 2018. Sur le graphique, nous pouvons voir que les interventions proposées ont réduit aussi le besoin de refroidissement de 72 %. La demande moyenne de refroidissement est de 410 W pour la salle d'origine, alors qu'elle est de l'ordre de 117 W pour la salle améliorée.

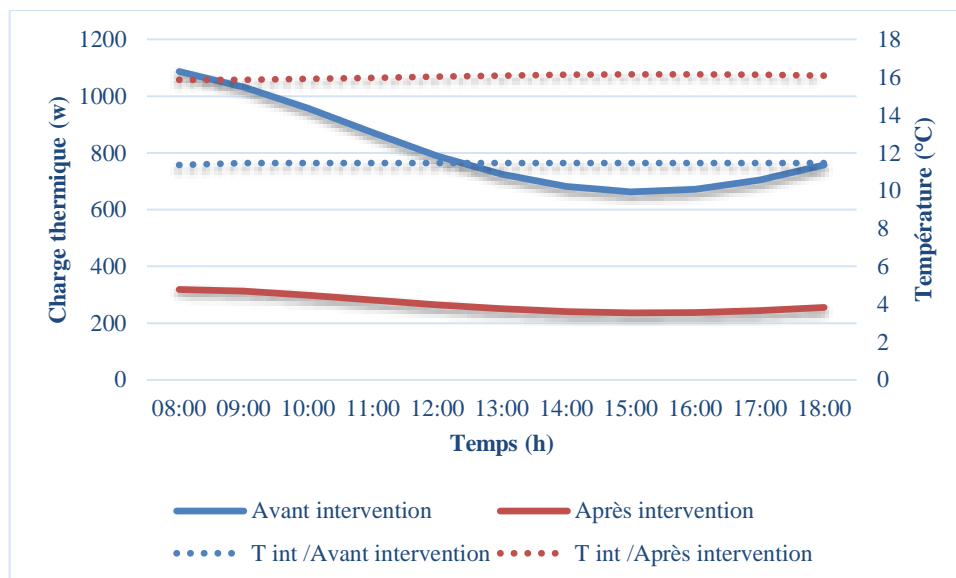


Figure 7.33 : Charge thermique dans la salle de classe N°5 pendant les heures d'occupation du 12 février 2018.

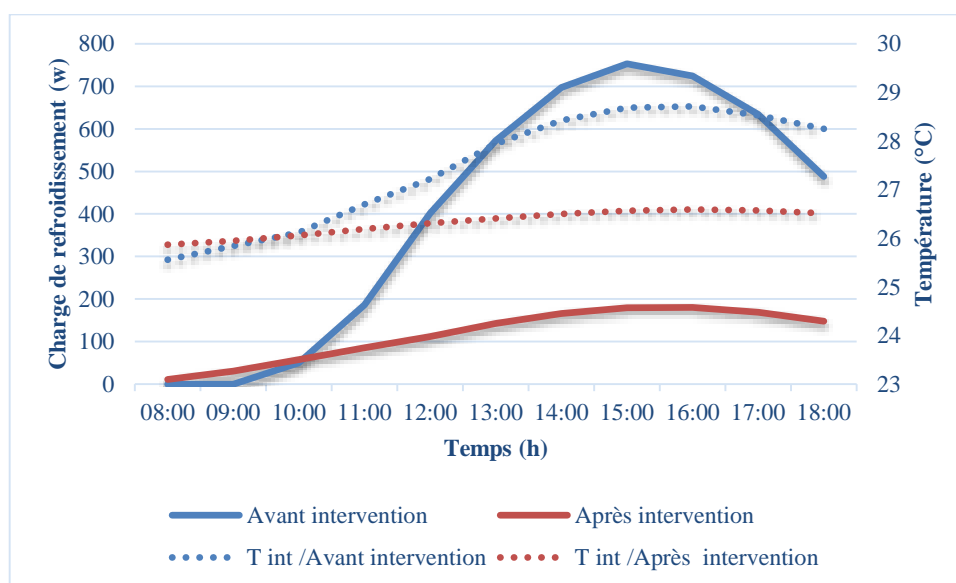


Figure 7.34 : Charge de refroidissement dans la salle de classe N°5 pendant les heures d'occupation du 24 septembre 2018.

5. Discussion des résultats

La simulation numérique par EnergyPlus confirme l'impact positif des interventions proposées sur la qualité de l'environnement intérieur des salles de classe. Cela est en concordance avec les résultats des recherches antérieures [24, 26, 27, 28]. Les actions les plus performantes sont l'installation de nouvelles fenêtres maison passive et l'isolation du plancher de grenier avec la laine de bois.

Ces dernières contribuent considérablement à améliorer la performance thermique du cas d'étude, notamment en hiver. Dans une journée froide comme celle du 12 février 2018 (min : 5,7 °C, max : 10,4 °C). Les températures dépassent déjà les 16 °C. Par conséquent, le recours au chauffage actif devient minime, surtout avec les gains internes des occupants des salles de classe. Pour la période chaude de l'année scolaire, à savoir le 24 septembre 2018, la performance thermique du bâtiment permet d'assurer des niveaux de température qui se situent dans la plage de confort. L'installation de nouvelles fenêtres, en particulier sur la façade des salles orientées est et ouest, contribuera aussi à un niveau de confort visuel plus élevé, puisqu'elles réduisent l'effet d'éblouissement (valeur g « Glare index » = 27 %) [37]. Cela va pousser les occupants de l'espace à recourir davantage à la lumière du jour, sans se soucier d'éblouissement, la consommation d'électricité serait donc minimale. Cela est en concordance avec la recherche [37] qui a exploré l'optimisation de la lumière naturelle dans un bâtiment historique réutilisé comme bâtiment d'enseignement universitaire situé à Syracuse (Italie).

Par ailleurs, il est clair que ce projet de réhabilitation intègre des solutions coûteuses, représentant un investissement très lourd. Cependant, cela est justifié par des bénéfices sur plusieurs plans :

Des projets de telle envergure sont toujours appuyés par le retour sur l'investissement grâce aux économies d'énergie primaire. Ces dernières permettent de récupérer progressivement le capital investi au courant des années, et rentrer ensuite dans les économies d'énergie réelles. Cette intervention rigoureuse s'inscrit aussi dans la démarche de lutte contre le changement climatique, puisque, le bâtiment va réduire ses émissions de gaz à effet de serre, principalement le dioxyde de carbone CO₂ [149].

Ces actions de réhabilitation vont non seulement optimiser le bâtiment d'un point de vue énergétique (réaliser des économies d'énergie), mais aussi créer un environnement propice à l'apprentissage dans les salles de classe. Par conséquent, il y aura un impact positif sur la santé, ainsi que les performances des élèves et des enseignants [84].

Les interventions proposées permettent de restaurer le comportement hygrothermique d'origine des cas d'étude. Ce comportement a été perturbé par le recours systématique aux produits à caractère hydrofuge tels que les enduits de ciment, qui créent des parois étanches, cassent l'équilibre hygrothermique des murs anciens et provoquent des pathologies importantes. Par conséquent, ils bannissent la fameuse qualité perspirante du bâti ancien, en l'occurrence, l'évaporation de l'eau contenue dans le mur vers l'extérieur. Cependant, cette perspiration sera restaurée grâce à la correction thermique décrite au sein de ce chapitre. Et cela va aussi permettre de conserver les cas d'étude de manière durable et confortable [150].

En outre, cet investissement n'est pas destiné à un bâtiment ordinaire, mais plutôt, à un lycée historique, d'une valeur patrimoniale non seulement pour la ville de Miliana, mais aussi, pour toute l'Algérie, vu qu'il a été la première école normale d'institutrices en Algérie 1874. Ajoutant à cela, il demeure la destination de nombreux visiteurs (identité et attractivité pour Miliana). Il est donc primordial de préserver cette prouesse architecturale et la léguer aux générations futures.

De plus, cet investissement est requis pour réussir la transition énergétique, que l'Algérie prône à l'Horizon 2030 (Le programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique pour la période 2011-2030). D'où l'importance de travailler, non seulement sur le neuf, mais aussi sur la rénovation des anciennes écoles, qui représentent une part importante du secteur de bâtiment. Finalement, le fait d'intervenir efficacement sur une école va sensibiliser davantage la relève de la nécessité de faire des économies d'énergie et être acteurs dans la démarche de développement durable et la lutte contre le réchauffement climatique [151].

6. Conclusion

Ce chapitre, à l'aide d'une simulation numérique, propose une multitude d'interventions utiles pour l'amélioration des confort thermique et visuel, ainsi que l'efficacité énergétique du cas d'étude. Au premier lieu, les stratégies suggérées visent l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment scolaire et la limitation de ponts thermiques. Au deuxième lieu, il développe l'amélioration des installations de chauffage et d'électricité, de telle sorte que nous puissions réaliser des économies

d'énergie et créer un environnement propice à l'apprentissage pour les occupants dans les salles de cours. Un récapitulatif des actions de rénovation est présenté dans le tableau ci-dessous :

Poste	Descriptif des actions
Grenier	Isolation laine de bois + plaque de plâtre.
Murs	Réhabilitation des murs anciens notamment avec enduit chaux.
Planchers	Correction thermique notamment avec chape allégée en mortier chaux.
Menuiseries	Remplacement par des fenêtres maison passive de triples vitrages ($U \leq 0,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).
Chauffage	Remplacement par une chaudière à condensation.
Ventilation	Naturelle (ouverture par utilisateur).
Éclairage	Installation de luminaires LED avec zonage des commandes.
Peinture	Les coloris de peinture varient en fonction du type de local.
Sensibilisation	Une campagne de sensibilisation auprès des occupants du bâtiment scolaire pour l'adoption de quelques gestes simples capables d'améliorer le confort intérieur et réaliser des économies d'énergie.

Les principales conclusions qui peuvent en être tirées suite à l'amélioration sont les suivantes :

- Les mesures proposées ont révélé une réduction significative de la consommation d'énergie (chauffage 67 %, refroidissement 72 %) et une amélioration de la qualité de l'environnement intérieur.
- Les mesures de rénovation les plus performantes sont l'isolation du grenier et le remplacement des fenêtres.

- Amélioration significative de la performance thermique passive du bâtiment cas d'étude (de l'ordre de 5 °C).
- Dans les salles de classe, il y aurait une bonne disponibilité de la lumière naturelle (> 300 lx), et une bonne uniformité dépassant (0.5).
- Réduction des problèmes d'éblouissement puisque les valeurs d'éclairement naturel près des surfaces vitrées ne seraient pas supérieures à 2000 lx.
- Finalement, on pourrait dire que toutes ces mesures proposées peuvent éclairer la rénovation des anciens lieux de savoir en Algérie, qui se caractérisent généralement par une valeur patrimoniale et, par plusieurs contraintes architecturales.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'évaluation du confort thermique et visuel dans le patrimoine colonial (lieu de savoir) a fait l'objet de notre recherche. L'étude a eu lieu sous les conditions climatiques de la ville de Miliana, située dans le nord d'Algérie (latitude +36,29 °, longitude +2,21 ° et altitude 740m), à 120 km de la capitale Alger, et caractérisée par un climat méditerranéen (classification de Köppen : Csa) ; un hiver froid avec une température moyenne de 10,5 °C et un été légèrement chaud avec une température moyenne de 28,1 °C. L'évaluation s'est faite dans deux lycées anciens et représentatifs de l'ensemble des anciens lieux de savoir situés au centre historique de Miliana. La sélection des cas d'étude s'est appuyée sur des critères relatifs à la typologie, le style architectural (néo-classique), les matériaux de construction (construit avec des matériaux locaux), l'âge (hérités de l'époque coloniale française et parmi les plus anciens dans la région), la forme géométrique (compacte et éclatée), et aussi étant accessibles pendant l'enquête. Les deux cas d'étude sont nommés ainsi :

- 3- Le lycée Mohammed ABDOU ayant une typologie en forme de U (éclatée) et un plan à coursive non vitrée. Ce fut la première école normale d'institutrices en Algérie (1874) avant la création de celles de Constantine et d'Oran.
- 4- Le lycée Mustapha FERROUKHI ayant une typologie de forme à patio (cour centrale) et un plan à coursive vitrée, créée en 1904, et fut l'ancienne école primaire supérieure de garçons pendant l'époque coloniale française en Algérie.

L'analyse bioclimatique des cas d'étude démontre que le patrimoine colonial français fait preuve d'une architecture soucieuse du climat. Les bâtiments scolaires en particulier, incarnent certains des principes bioclimatiques pour répondre aux conditions climatiques de la ville de Miliana. L'implantation du bâtiment protège la cour de récréation du vent froid provenant du côté nord-ouest. L'orientation des salles de classe vers le sud permet au soleil de pénétrer pendant l'hiver. Les arbres

de platane à feuilles caduques agissent comme des systèmes de contrôle solaire sur les façades sud ; en été, le rayonnement solaire peut être contrôlé, évitant ainsi de générer une surchauffe et en hiver, les arbres perdent leur feuillage et laissent passer le rayonnement solaire jouant le rôle de chauffage solaire passif. Les salles de classe sont généralement riches en lumière du jour en raison de la taille des ouvertures sur les murs de façades. Les fenêtres sur les murs opposés créent une bonne ventilation croisée par temps chaud. Les murs massifs assurent une bonne isolation thermique et protègent les espaces intérieurs des vacillations des températures extérieures. Ces murs sont construits à base de matériaux locaux à faible impact environnemental, faible énergie grise et disponible en abondance dans la région de Miliana [152].

Après l'étude de ces bâtiments scolaires, on peut les considérer comme étant une architecture bioclimatique durable avant l'heure et l'inspiration de leurs stratégies passives, pourrait être très bénéfique pour concevoir un modèle conceptuel adapté à la région de Miliana, auquel il faudrait se conformer pour résoudre les problèmes des bâtiments scolaires actuels, qui souffrent d'une qualité environnementale faible et d'une consommation excessive d'énergie.

Les deux cas d'étude font partie du patrimoine colonial français en Algérie et montrent de bons exemples d'architecture durable, vu que les usagers ne recouraient (à l'époque de leur construction) ni à des systèmes actifs de chauffage ou de refroidissement ni à l'éclairage artificiel. En outre, ces deux bâtiments scolaires sont spécifiques, car ils ont fait l'objet d'une vaste opération de rénovation de 39 centaines lycées à travers le pays (Algérie), étant hérités de l'époque coloniale française. Le lycée ABDOU a été rénové en 2013 et le lycée FERROUKHI en 2017.

Rappelons que notre problématique de départ était formulée comme suit :

1. Dans quelle mesure le confort thermique et visuel est-il atteint dans les établissements d'enseignement hérités de la période coloniale française ?

Sous cette question centrale de recherche, nous avons aussi ajouté une autre question secondaire, mais qui nous a semblé nécessaire à notre travail de recherche :

2. Quels sont les méthodes et les moyens à utiliser lors de la restauration et de la réhabilitation de ces établissements d'enseignement afin que le confort thermique et visuel soit atteint sans l'utilisation d'énergies fossiles non renouvelables ?

Ces deux questions pertinentes ont été résolues et développées de manière approfondie tout en se basant sur une méthodologie composée principalement d'une évaluation quantitative (campagnes de mesures) et d'une évaluation qualitative (des questionnaires) plus une simulation numérique (logiciel EnergyPlus).

L'évaluation du confort thermique est basée sur l'étude des paramètres suivants : la température de l'air, la température des parois, l'humidité relative, la vitesse de l'air dans le local, le métabolisme des utilisateurs et leur habillement. L'évaluation du confort visuel, il s'agit principalement de déterminer le niveau lumineux de la tâche visuelle et son uniformité, l'absence d'éblouissement, l'absence de réflexions, l'absence d'ombres gênantes, l'absence des taches solaires, le rendu des couleurs suffisant, et l'absence de contrastes lumineux sur le plan de travail et dans le champ visuel.

Le niveau du confort thermique atteint dans les établissements d'enseignement hérités de la période coloniale française ;

- Les mesures in situ de divers paramètres thermiques à l'intérieur des salles de classe étaient en concordance avec la perception des occupants, examinée par questionnaire. Pour les deux cas d'étude, le confort thermique optimal n'est pas atteint pendant les températures hivernales ou estivales extrêmes.
- Selon les variations de températures mesurées et l'écart entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, nous déduisons que la typologie de forme compacte (lycée FERROUKHI) offre plus de confort thermique et d'efficacité énergétique que la typologie de forme éclatée (lycée ABDOU).
- Selon l'enquête, en particulier au lycée ABDOU, les conditions thermiques étaient extrêmement mauvaises dans les salles de classe du deuxième étage et les élèves les ont trouvées généralement froides

et inconfortables. Elles n'étaient pas dans les normes recommandées et cela en raison de ;

- Les mesures de rénovation mises en œuvre ont eu des effets négatifs sur la qualité de l'environnement intérieur et l'efficacité énergétique, à cause de cela ; des performances thermiques médiocres et plusieurs ponts thermiques ont caractérisé l'enveloppe du bâtiment.
- Les salles de classe aux caractéristiques traditionnelles offraient un meilleur environnement thermique intérieur et étaient énergétiquement plus efficaces avant la rénovation. De plus, le fait d'enduire les murs de construction traditionnelle avec du mortier de ciment a réduit la performance thermique de l'enveloppe.

Le niveau du confort visuel atteint dans les établissements d'enseignement. Il convient de dire que les modèles conceptuels des écoles héritées de la période coloniale révèlent un certain succès en termes d'éclairage naturel. En effet, les concepteurs de ces bâtiments scolaires maîtrisaient le volume et optimisaient de mieux la pénétration de la lumière du jour à l'intérieur des salles de classe. Ceci a été rendu possible grâce à la mise en place d'une hauteur importante du sous-plafond, et un plafond plus élevé donne la possibilité d'un niveau de fenêtre plus élevé, ce qui entraîne plus de pénétration de la lumière du jour sans aucune obstruction [135]. En outre, le placement bilatéral des ouvertures assure une bonne uniformité ($> 0,5$) et le pourcentage de la surface vitrée qui dépassent parfois 20 % du mur de façade (cas des salles de classe au lycée FERROUKHI) donnant ainsi un facteur de lumière du jour (>4 %) sous les conditions de ciel couvert. Ces caractéristiques contribuent à procurer des niveaux d'éclairement moyen dépassant ou proches de la norme européenne de 300 lx, pendant toute l'année scolaire (automne, hiver et printemps). Cependant, l'évaluation qualitative et quantitative prouve que de ce type de construction de larges baies vitrées font face au problème d'éblouissement ; les occupants se sont plaints des problèmes d'éblouissement et même les mesures révèlent des niveaux d'éclairement excessif (> 2000 lx) près des surfaces vitrées. Par ailleurs, cette étude prouve que les projets de réhabilitation ont ignoré l'amélioration du confort visuel en termes de sensation d'éblouissement, qui est principalement causée par les réflexions du soleil sur les tableaux blancs.

À partir de l'investigation in situ des confort thermique et visuel, nous en déduisons que les projets de réhabilitation en Algérie se concentrent uniquement sur la consolidation des bâtiments anciens et sous-estiment l'efficacité énergétique et la qualité de l'environnement intérieur (confort thermique, visuel, acoustique et qualité de l'air intérieur).

En réponse à la question secondaire de notre problématique, la présente étude révèle que nous pourrions améliorer la performance énergétique des écoles anciennes sans mettre en péril leurs valeurs patrimoniales et leur authenticité. Certes, l'intervention sur un bâtiment ancien n'est pas comme celle sur un bâtiment moderne, mais, il existe toujours des solutions compatibles avec les caractéristiques spécifiques de cet héritage du 19 et 20 siècles. Les interventions proposées pour le cas amélioré (lycée Mohammed ABDOU) sont les suivantes : l'isolation du grenier (laine de bois + plaque de plâtre), enduit à la chaux pour murs, dalle chaux hydraulique naturelle pour planchers, installation de nouvelles fenêtres « maison passive », nouvelle installation de chaudière gaz à condensation, nouvelle installation d'éclairage « LED » avec zonage des commandes, travaux de peinture et coloris choisis en fonction du type de local, sensibilisation pour profiter de la lumière du jour et faire des économies d'énergie via des gestes simples, adoptés par les occupants du bâtiment scolaire.

Finalement, nous espérons que nous avons réussi à répondre à la problématique plus haut énoncée et nous estimons par la même occasion que cette recherche contribue dans l'ouverture de la voie d'une véritable réflexion sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des bâtiments anciens hérités de l'époque coloniale française. Ces bâtiments devraient figurer parmi les priorités du programme algérien d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique (2011-2030), afin de réduire leurs dépenses de chauffage et leur impact environnemental. Nous suggérons également que cette étude puisse aider à élaborer des cahiers de charges à mettre en œuvre à l'avenir pour la rénovation des bâtiments historiques en Algérie de la bonne manière, sans nuire à leur performance thermique et la qualité de l'environnement intérieur.

Perspectives

Un travail de recherche doit être conduit au sujet des autres aspects de la qualité environnementale, en l'occurrence le confort acoustique et la qualité de l'air dans les salles de classe. L'absence de ces deux paramètres pourrait grandement influencer la capacité d'apprentissage et la santé des élèves [84]. Nous pourrions donc imaginer une méthodologie expérimentale comme celle que nous avons menée dans la présente étude, basée sur une évaluation qualitative et quantitative, et suivie d'une simulation numérique pour la validation et l'amélioration des cas d'étude. Cette piste de recherche pourrait aussi mettre en exergue les effets des travaux de réhabilitation des écoles anciennes sur le confort acoustique et la qualité de l'air.

Un autre projet de recherche pourrait être développé, s'agissant d'une rénovation à zéro énergie des bâtiments d'enseignement hérités de l'époque coloniale française en Algérie. Et ceci à travers l'intégration des énergies renouvelables, tout en ayant comme objectif la réduction au maximum de la performance énergétique, l'amélioration de la qualité environnementale et la préservation de la valeur patrimoniale de ces anciens lieux de savoir.

Une autre piste de réflexion concernant la comparaison entre la qualité du confort intérieur (confort thermique, visuel, acoustique et qualité de l'air intérieur) dans les bâtiments hérités de l'époque coloniale et les bâtiments modernes. Nous pourrions ressortir avec des recommandations utiles qui serviront à concevoir des écoles confortables en Algérie.

Références

- [1] H. Fromme, D. Twardella, S. Dietrich, D. Heitmann, R. Schierl, B. Liebl et H. Rüden, «Particulate matter in the indoor air of classrooms—exploratory results from Munich and surrounding area,» *Atmospheric Environment*, vol. 41, n° 4, pp. 854-866, 2007.
- [2] L. Pérez-Lombard, O. José et P. Christine , «A review on buildings energy consumption information,» *Energy and buildings* , vol. 40, n° 3, pp. 394-398, 2008.
- [3] L. T. Wong, K. W. Mui et P. S. Hui, « multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices,» *Building and Environment*, vol. 43, n° 1, pp. 1-6, 2008.
- [4] O. A. Seppänen et F. William , «Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health,» *Hvac&R Research*, vol. 12, n° 4, pp. 957-973, 2006.
- [5] U. Haverinen-Shaughnessy, R. J. Shaughnessy, E. C. Cole, O. Toyinbo et D. J. Moschandreas, «An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance,» *Building and Environment*, vol. 93, pp. 35-40, 2015.
- [6] M. Turunen, O. Toyinbo, T. Putus, A. Nevalainen, R. Shaughnessy et U. Haverinen-Shaughnessy, «Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students,» *International journal of hygiene and environmental health*, vol. 217, n° 7, pp. 733-739, 2014.
- [7] M. Frontczak et P. Wargocki, «Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments,» *Building and environment*, vol. 46, n° 4, pp. 922-937, 2011.
- [8] A. Michael et C. Heracleous, «Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus,» *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 443-457, 2017.
- [9] Z. S. Zomorodian, T. Mohammad et H. Mohammadreza , «Thermal comfort in educational buildings: A review article,» *Renewable and sustainable energy reviews* , vol. 59, pp. 895-906, 2016.
- [10] S. S. Korsavi, S. Z. Zahra et T. Mohammad , «Visual comfort assessment of daylight and sunlit areas: A longitudinal field survey in classrooms in Kashan, Iran,» *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 305-318, 2016.
- [11] M. Tahsildoost et Z. S. Zomorodian, «Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran,» *Energy and Buildings* , vol. 104, pp. 65-72, 2015.

- [12] G. Dall'O, B. Elisa et P. Angela , «Improvement of the sustainability of existing school buildings according to the Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)® Protocol: A case study in Italy,» *Energies*, vol. 6, n° 12, pp. 6487-6507, 2013.
- [13] A. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho et J. L. Vivancos, «Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 70-85, 2016.
- [14] P. Lassandro, T. Cosola et A. Tundo, «School building heritage: energy efficiency, thermal and lighting comfort evaluation via virtual tour,» *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3168-3173, 2015.
- [15] M. Zinzi, S. Agnoli, G. Battistini et G. Bernabini, «Retrofit of an existing school in Italy with high energy standards,» *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1529-1538, 2014.
- [16] T. Mihai et V. Iordache, «Determining the indoor environment quality for an educational building,» *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 566-574, 2016.
- [17] «Le Contexte Énergétique dans le monde, en Europe et en France : comprendre pour mieux agir,» Conférence de l'Artisanat pyrénéen, 2010. [En ligne]. Available: http://artisanatpyrenees.eu/formation/cours3/co/_module3_web.html. [Accès le 21 11 2020].
- [18] I. E. A. Statistics, «Key world energy statistics,» International Energy Agency, Paris, France, 2014.
- [19] «Energie positive,» [En ligne]. Available: <http://www.energiepositive.info/fr/pourquoi/>. [Accès le 21 11 2020].
- [20] C. européenne, «Les effets du changement climatique,» [En ligne]. Available: https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_fr. [Accès le 21 11 2020].
- [21] «Changement climatique : les conséquences,» [En ligne]. Available: https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/changement-climatique-consequences.php. [Accès le 11 21 2020].
- [22] «Situation actuelle - L'énergie des vagues,» [En ligne]. Available: <http://wavepower.ek.la/situation-actuelle-p538683>. [Accès le 21 11 2020].
- [23] L. La Fleur, P. Rohdin et B. Moshfegh, «Energy use and perceived indoor environment in a Swedish multifamily building before and after major renovation,» *Sustainability*, vol. 7, n° 3, p. 766, 2018.
- [24] L. Liu, B. Moshfegh, J. Akander et M. Cehlin, «Comprehensive investigation on energy retrofits in eleven multi-family buildings in Sweden,» *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 704-715, 2014.
- [25] L. Liu, P. Rohdin et B. Moshfegh, «Evaluating indoor environment of a retrofitted multi-family building with improved energy performance in Sweden,» *Energy and Buildings*, vol. 102, pp. 32-44, 2015.

- [26] L. La Fleur, B. Moshfegh et P. Rohdin, «Measured and predicted energy use and indoor climate before and after a major renovation of an apartment building in Sweden,» *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 98-110, 2017.
- [27] M. Morelli, L. Rønby, S. E. Mikkelsen, M. G. Minzari, T. Kildemoes et H. M. Tommerup, «Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a “nearly-zero” energy building based on experiences from a test apartment,» *Energy and buildings*, vol. 54, pp. 395-406, 2012.
- [28] K. E. Thomsen, J. Rose, O. Mørck, S. Ø. Jensen, . I. Østergaard, H. N. Knudsen et N. C. Bergsøe, «Energy consumption and indoor climate in a residential building before and after comprehensive energy retrofitting,» *Energy and Buildings*, vol. 123, pp. 8-16, 2016.
- [29] F. Butera, A. D'Orso, S. Farruggia, G. Rizzo et G. Silvestrini, «Energy conservation in 29 historic school buildings in Palermo,» *International journal of ambient energy*, vol. 6, n° 2, pp. 71-78, 1985.
- [30] M. Sauchelli, G. Masera, G. D'Antona et G. Manzolini, «ISIS Facchinetti: A nearly zero energy retrofit in Italy,» *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1326-1335, 2014.
- [31] S. Lagüela, J. Martínez, J. Armesto et P. Arias, «Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies,» *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 6, pp. 1216-1221, 2011.
- [32] L. de Santoli, F. Fraticelli, F. Fornari et C. Calice, «Energy performance assessment and a retrofit strategies in public school buildings in Rome,» *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 196-202, 2014.
- [33] R. Hanna, «Environmental appraisal of historic buildings in Scotland: the case study of the Glasgow School of Art,» *Building and Environment*, vol. 37, n° 1, pp. 1-10., 2002.
- [34] H. Erhorn-Kluttig et H. Erhorn, «School of the Future—Towards zero emission with high performance indoor environment,» *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1468-1473., 2014.
- [35] M. Zinzi, S. Agnoli, G. Battistini et G. Bernabini, «Retrofit of an existing school in Italy with high energy standards,» *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1529-1538, 2014.
- [36] O. C. Mørck et A. J. Paulsen, «Energy saving technology screening within the EU-project “School of the Future”,» *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1482-1492, 2014.
- [37] K. Buvik, G. Andersen et S. Tangen, «Ambitious renovation of a historical school building in cold climate,» *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1442-1448, 2014.
- [38] An international project within the 7th Framework Programme of the European Union, «School of the Future Towards Zero Emission with High Performance

- Indoor Environment,» 2014. [En ligne]. Available: <https://www.school-of-the-future.eu/index.php>. [Accès le 21 11 2020].
- [39] Algérie presse service , «Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en Algérie,» Algérie presse service , 13 Février 2019 . [En ligne]. Available: [http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie#:~:text=ALGER%2D%20Le%20secteur%20du%20b%C3%A2timent,%C3%A9nergie%20\(Aprue\)..](http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie#:~:text=ALGER%2D%20Le%20secteur%20du%20b%C3%A2timent,%C3%A9nergie%20(Aprue)..) [Accès le 21 11 2020].
- [40] Perspective Monde , «Émissions de CO2 (kt), Algérie,» Perspective Monde , 1945. [En ligne]. Available: <https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/DZA/fr/EN.ATM.CO2E.KT.html>. [Accès le 21 11 2020].
- [41] L. A. d. L. L. d'Oran, «Le Lycée Lamoricière,» [En ligne]. Available: <http://www.les-anciens-du-lycee-lamoriciere-d-oran.com/pages/rejoindre-l-association.html>. [Accès le 21 11 2020].
- [42] «HISTOIRE DU LYCEE MOHAMED ABDOU,» 17 AOÛT 2009. [En ligne]. Available: <https://zaccarsite.blogspot.com/2009/08/lhistoire-du-lycee-mohamed-abdou.html>. [Accès le 21 11 2020].
- [43] B. Benyoucef, «L'école primaire (larbi tebessi) MILIANA,» 21 Janvier 2018. [En ligne]. Available: <http://bengoufa.eklablog.fr/l-ecole-primaire-larbi-tebessi-miliana-a135719198>. [Accès le 21 11 2020].
- [44] S. Trachte et A. De Herde, «Sustainable refurbishment of school buildings—A Guide for designers and planners,» 2014.
- [45] A. De Herde et A. Liébard , *Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Paris: Éditions du Moniteur, 2005.
- [46] energieplus-lesite.be, *Architecture et Climat*, 2019. [En ligne]. Available: <https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/composants-de-l-enveloppe/vitrages/vitrage-isolant-thermique-et-vitrage-isolant-acoustique/>. [Accès le 21 11 2020].
- [47] M. K. Nematchoua, P. Ricciardi et C. Buratti, «Adaptive approach of thermal comfort and correlation between experimental data and mathematical model in some schools and traditional buildings of Madagascar under natural ventilation,» *Sustainable cities and society*, vol. 14, pp. 666-678, 2018.
- [48] M. Trebilcock, J. Soto-Munoz, M. Yanez et R. Figueroa-San Martin, «The right to comfort: A field study on adaptive thermal comfort in free-running primary schools in Chile,» *Building and Environment*, vol. 114, pp. 455-469., 2017.
- [49] D. Teli, L. Bourikas, P. A. James et A. S. Bahaj, «Thermal performance evaluation of school buildings using a children-based adaptive comfort model,» *Procedia environmental sciences*, vol. 38, pp. 844-851, 2017.

- [50] R. de Dear, J. Kim, C. Candido et M. Deuble, «Adaptive thermal comfort in Australian school classrooms,» *Building Research & Information*, vol. 43 , n° 3, pp. 383-398, 2015.
- [51] J. F. Nicol et M. Humphreys, «Understanding the adaptive approach to thermal comfort,» *ASHRAE transactions*, vol. 104, pp. 991-1004, 1998.
- [52] R. J. De Dear et G. S. Brager, «Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55,» *Energy and buildings*, vol. 34, n° 6, pp. 549-561, 2002.
- [53] R. De Dear et G. S. Brager, «The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment,» *International journal of biometeorology*, vol. 5, n° 2, pp. 100-108, 2001.
- [54] M. Santamouris et P. Wouters, *Building ventilation: the state of the art*, Routledge, 2006.
- [55] Wikipedia l'encyclopédie libre, «Confort thermique adaptatif,» Wikipedia, 2020. [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Confort_thermique_adaptatif. [Accès le 21 11 2020].
- [56] M. K. Singh, R. Ooka, H. B. Rijal, S. Kumar, , A. Kumar et S. Mahapatra, «Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward,» *Energy and Buildings*, vol. 188, pp. 149-174, 2019.
- [57] M. J. Mendell et G. A. Heath, «Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature,» *Indoor air*, vol. 15, n° 1, pp. 27-52, 2005.
- [58] P. Wargocki et D. P. Wyon, «Research report on effects of HVAC on student performance,» *ASHRAE journal*, vol. 48, n° 10, p. 22, 2006.
- [59] P. Wargocki et D. P. Wyon, «Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective,» *Building and Environment*, vol. 59, pp. 581-589, 2013.
- [60] J. Jiang, D. Wang, Y. Liu, Y. Xu et J. Liu, «A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China,» *Building and Environment*, vol. 134, pp. 102-113, 2018.
- [61] Conseils Thermiques, «Le confort thermique,» [En ligne]. Available: <https://conseils-thermiques.org/contenu/confort-thermique.php>. [Accès le 21 11 2020].
- [62] Energie Plus, 2019. [En ligne]. Available: <https://energieplus-lesite.be/>. [Accès le 21 11 2020].
- [63] MA MUNICIPALITE EFFICACE , «La simulation énergétique,» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.mamunicipaliteefficace.ca/151-efficacite-energetique-ges-la-simulation-energetique.html>. [Accès le 21 11 2020].

- [64] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann et C. O. Pedersen, «EnergyPlus: New capabilities in a whole-building energy simulation program,» *In Proceedings of building simulation*, pp. 51-58, 2001.
- [65] F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, A. Sabio-Ortega et A. García-Cruz, «Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 736-755, 2015.
- [66] K. Madi, «Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne (Doctoral dissertation, Grenoble Alpes).,» 2015.
- [67] H. Matsumoto, K. Tsuzuki et L. Susanti, «Bioclimatic Analysis in Pre-Design Stage of Passive House in Indonesia.,» *Buildings* , vol. 7, n° 1, p. 24, 2017.
- [68] B. Givoni, «Comfort, climate analysis and building design guidelines,» *Energy and buildings*, vol. 18, n° 1, pp. 11-23, 1992.
- [69] D. Heerwagen, *Passive and active environmental controls: informing the schematic designing of buildings*, McGraw Hill Professional, 2004.
- [70] Organisation internationale de la francophonie, «L'architecture bioclimatique,» Québec (Canada), 2008.
- [71] A. Michael et C. Heracleous, «Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus,» *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 443-457, 2017.
- [72] Rénovation des Écoles: Rénover votre école d'aujourd'hui, [En ligne]. Available: <https://www.renovermonecole.be/fr>. [Accès le 21 11 2020].
- [73] Nature et Confort, «DÉFINITIONS DES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES,» [En ligne]. Available: <https://www.natureetconfort.fr/foire-aux-questions/quelle-est-la-puissance-lumineuse-dun-conduit-de-lumiere-solatube-par-rapport-a-une-ampoule/>. [Accès le 21 11 2020].
- [74] M. Winterbottom et A. Wilkins, «Lighting and discomfort in the classroom,» *Journal of environmental psychology*, vol. 29, n° 1 , pp. 63-75, 2009.
- [75] P. Plympton, S. Conway et K. Epstein, «Daylighting in Schools: Improving Student Performance and Health at a Price Schools Can Afford,» *ERIC*, 2000.
- [76] L. Heschong, R. L. Wright, et S. Okura, «Daylighting impacts on human performance in school,» *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 31, n° 2, pp. 101-114., 2002.
- [77] M. H. Nicklas et G. B. Bailey, «Analysis of the Performance of Students in Daylit Schools,» *ERIC*, 1996.
- [78] . T. M. Chung et J. Burnett, «Lighting quality surveys in office premises,» *Indoor and Built Environment*, vol. 9, n° 6, pp. 335-341, 2000.

- [79] Y. V. Perez et I. G. Capeluto, «Climatic considerations in school building design in the hot–humid climate for reducing energy consumption,» *Applied Energy*, vol. 86, n° 3, pp. 340-348, 2009.
- [80] L'éclairage naturel des bâtiments, «uclouvain,» GUIDE > le confort visuel, [En ligne]. Available: https://sites.uclouvain.be/eclairage-naturel/guide_confort.htm. [Accès le 22 11 2020].
- [81] lampes direct éclairage professionnel , «Qu'est-ce que l'indice de rendu des couleurs ?,» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.lampesdirect.fr/blog/cri-indice-de-rendu-des-couleurs>. [Accès le 22 11 2020].
- [82] Eco Energie Tech, «Mon établissement scolaire consomme t'il beaucoup ?,» [En ligne]. Available: <https://www.ecoenergies.tech.fr/spip.php?article73>. [Accès le 22 11 2020].
- [83] B. Abdelatia, «Contribution à l'étude du confort visuel en lumière naturelle dans les établissements scolaires en Libye : évaluation qualitative et préconisations,» thèse de doctorat, Bordeaux 1, 2013.
- [84] P. Ricciardi et B. Cinzia , «Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic and lighting comfort conditions,» *Building and Environment*, vol. 127, pp. 23-36, 2018.
- [85] Biosphère Ingénierie , «Simulation d'éclairage naturel,» [En ligne]. Available: <https://sites.google.com/site/biosphereingenierie/simulation-d-eclairage-naturel>. [Accès le 22 11 2020].
- [86] Académie Nancy-Metz, «Cours d'éclairage de l'école d'architecture de Grenoble,» [En ligne]. Available: <http://www4.ac-nancy-metz.fr/echanges-pedagogiques-btp/?q=node/161>. [Accès le 22 11 2020].
- [87] Build-green, «Construction passive, habitat bioclimatique : capter les apports solaires,» 23 2 2017. [En ligne]. Available: <https://www.build-green.fr/construction-passive-habitat-bioclimatique-capter-les-apports-solaires/>. [Accès le 22 11 2020].
- [88] Comité de Liaison Enseignants et Astronomes CLEA, «La révolution de la terre,» 20 10 2010. [En ligne]. Available: <http://clea-astro.eu/lunap/Revolution>. [Accès le 22 11 2020].
- [89] Designing Buildings Wiki, «Light shelf,» [En ligne]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Light_shelf. [Accès le 22 11 2020].
- [90] Controverses-Sciences-Po, «Les différents types de lampes,» [En ligne]. Available: <https://controverses.sciences-po.fr/archive/ampoules/index.php/pour-debuter/les-differents-types-de-lampes/>. [Accès le 22 11 2020].
- [91] manomano, «Ampoule à incandescence,» [En ligne]. Available: <https://www.manomano.fr/ampoule-a-incandescence-195>. [Accès le 22 11 2020].

- [92] Zodiosphere : Blog Zodio, «Leçon n°2 : Lexique autour des ampoules,» 2019. [En ligne]. Available: <https://blog.zodio.fr/lecon-n2-lexique-autour-des-ampoules/>. [Accès le 22 11 2020].
- [93] rue des ampoules, «Ampoule fluocompacte,» [En ligne]. Available: <https://www.ruedesampoules.com/ampoules-fluocompacte/1656-ampoule-fluocompacte-miniw-12w-e27-fr.html>. [Accès le 22 11 2020].
- [94] Wikipedia, «Miliana,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Miliana>. [Accès le 22 11 2020].
- [95] Le Courrier d'Algérie, «MILIANA : La valorisation d'un riche patrimoine garant du développement,» [En ligne]. Available: <https://lecourrier-dalgerie.com/miliana-la-valorisation-dun-riche-patrimoine-garant-du-developpement/>. [Accès le 22 11 2020].
- [96] flickriver, «Remparts de la ville de Miliana,» 19 1 2018. [En ligne]. Available: <https://www.flickriver.com/photos/144330620@N04/42711905050/>. [Accès le 22 11 2020].
- [97] skyscrapercity, «Musée de la manufacture d'armes de l'Emir Abdelkader | 1839 | MILIANA,» [En ligne]. Available: <https://www.skyscrapercity.com/threads/mus%C3%A9e-de-la-manufacture-darmes-de-lemir-abdelkader-1839-miliana.2144190/>. [Accès le 22 11 2020].
- [98] tutiempo, «Climat MILIANA - Données climatiques (604300),» [En ligne]. Available: <https://fr.tutiempo.net/>. [Accès le 22 11 2020].
- [99] Climate-Data, «ALGÉRIE CLIMAT,» [En ligne]. Available: <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie-164/>. [Accès le 22 11 2020].
- [100] «Analyse urbaine de la ville de Miliana,» 2012. [En ligne]. Available: <https://www.facebook.com/media/set/?set=a.1368781076473537.1073741841.403185553033099&type=3>. [Accès le 22 11 2020].
- [101] miliana712.skyrock, «la maison de l'émir abdelkader,» [En ligne]. Available: <https://miliana712.skyrock.com/984990230-la-maison-de-l-emir-abdelkader.html>. [Accès le 22 11 2020].
- [102] vitaminedz, «Ancienne école à Miliana,» 23 1 2009. [En ligne]. Available: https://www.vitaminedz.com/ancienne-ecole-a-miliana/Photos_15480_10111_44_1.html. [Accès le 22 11 2020].
- [103] slideshare, «Internal Heat gains and small dwellings,» 11 3 2015. [En ligne]. Available: <https://fr.slideshare.net/ecominimalnick/internal-heat-gains-and-small-dwellings>. [Accès le 22 11 2020].
- [104] LeChauffage, «Le chauffage solaire passif,» 2009. [En ligne]. Available: <http://www.lechauffage.com/solaire/chauffage-solaire-passif.htm>. [Accès le 22 11 2020].

- [105] e RT 2012, «Les principes de base d'une conception bioclimatique.» [En ligne]. Available: <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/>. [Accès le 22 11 2020].
- [106] H. Khassina, «Travaux Dirigés : Confort thermique, les tables de Mahoney,» [En ligne]. Available: <http://univbiskra.dz/enseignant/hamel/2014/TD%205%20Confort%20Thermique%2002.pdf>. [Accès le 22 11 2020].
- [107] A. Saddok, «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 magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2015.
- [108] A. Ziani et A. Belakehal, «Les ambiances dans les salles de classe. Cas de deux lycées (La ville de Bechar),» 2011.
- [109] Algerie 360, «une vaste opération pour rénover une quarantaine de vieux lycées à travers le pays,» 10 4 2014. [En ligne]. Available: <https://www.algerie360.com/une-vaste-operation-pour-renover-une-quarantaine-de-vieux-lycees-a-travers-le-pays/>. [Accès le 22 11 2020].
- [110] Algérie Presse Service, «La valorisation du patrimoine de Miliana, "une condition sine qua non de son développement",» 20 5 2020. [En ligne]. Available: <http://www.aps.dz/culture/105266-la-valorisation-du-patrimoine-de-miliana-une-condition-sine-qua-non-de-son-developpement>. [Accès le 22 11 2020].
- [111] Alger Miliana, [En ligne]. Available: <http://www.algermiliana.com/>. [Accès le 22 11 2020].
- [112] F. Scurpi, C. Carletti et L. Pierangioli, «Energy retrofitting of school buildings : Energy audit of a case study,» chez *Paper presented at Conference VI Convegno Internazionale ReUSO*, Messina, 2018.
- [113] construction maison-ooreka, «Tuffeau,» [En ligne]. Available: <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/587915/tuffeau>. [Accès le 22 11 2020].
- [114] F. Bianchi et al, «Infrared thermography assessment of thermal bridges in building envelope : Experimental validation in a test room setup,» *Sustainability*, vol. 6, n° 110, pp. 7107-7120, 2014.
- [115] A. Kylili et al, «Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics : A review,» *Applied Energy*, vol. 134, pp. 531-549, 2014.
- [116] S. Martín Ocaña, I. Cañas Guerrero et I. González Requena, «Thermographic survey of two rural buildings in Spain,» *Energy and Buildings*, vol. 36, n° 6, pp. 515-523, 2004.
- [117] mouser, «FLIR i7,» [En ligne]. [Accès le 22 11 2020].

- [118] exodya, «Prix Condor Plume P6 Pro LTE Algérie,» [En ligne]. Available: <http://exodya.com/telephone/prix-condor-plume-p6-pro-lte-algerie-552.html>. [Accès le 22 11 2020].
- [119] M. Asit Kumar et M. Ramgopal, «A thermal comfort field study of naturally ventilated classrooms in Kharagpur, India,» *Building and Environment*, vol. 92, pp. 396-406, 2015.
- [120] N. H. Wong et S. Shan Khoo, «Thermal comfort in classrooms in the tropics,» *Energy and buildings*, vol. 35, n° 4, pp. 337-351, 2003.
- [121] G. Zhanga, C. Zhenga, W. Yanga, Q. Zhanga et D. J. Moschandrea, «Thermal comfort investigation of naturally ventilated classrooms in a subtropical region,» *Indoor and Built Environment*, vol. 16, n° 2, pp. 148-158, 2007.
- [122] kimocanada, «Thermo-hygromètre électronique hd 100,» [En ligne]. Available: [http://www.kimocanada.com/Francais/pdf/Manuels-francais/Portables%20\(2002\)/6_Classe%20100/FT%20HD100.pdf](http://www.kimocanada.com/Francais/pdf/Manuels-francais/Portables%20(2002)/6_Classe%20100/FT%20HD100.pdf). [Accès le 22 11 2020].
- [123] SCA Pacific, «cason ca380 infrared digital laser thermometer,» [En ligne]. Available: <http://scapacific.com.sg/files/Brochure/CASON%20CA380%20IR%20DIGITAL%20LASER%20THERMOMETER.pdf>. [Accès le 22 11 2020].
- [124] sunwe, «LX-105,» [En ligne]. Available: <http://www.sunwe.com.tw/lutron/LX-105.PDF>. [Accès le 22 11 2020].
- [125] ISO, ISO7730, «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*, vol. 3, n° 1605, p. 615, 2005.
- [126] Z. Wang et al, «Thermal adaptation and thermal environment in university classrooms and offices in Harbin,» *Energy and Buildings*, vol. 77, pp. 192-196, 2014.
- [127] the U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO), and managed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), «EnergyPlus,» [En ligne]. Available: <https://energyplus.net/>. [Accès le 22 11 2020].
- [128] c. M. Mateus, A. Pinto et G. Carrilho da Graça, «Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell,» *Energy and Buildings*, vol. 75, pp. 511-522, 2014.
- [129] E. Z. E. Conceição et L. Ma MJR , «Thermal study of school buildings in winter conditions,» *Building and Environment*, vol. 43, n° 5, pp. 782-792, 2008.
- [130] L. Orta, «Réalisation d'un logiciel pour l'optimisation énergétique du bâtiment,» 2016.

- [131] T. Catalina, J. Virgone et V. Iordache, «Study on the impact of the building form on the energy consumption,» *In Proceedings of building simulation*, pp. 1726-1729, 2011.
- [132] The Society for the Protection of Ancient Buildings (SPAB), «Energy efficiency in old buildings,» [En ligne]. Available: <https://www.spab.org.uk/advice/energy-efficiency-old-buildings>. [Accès le 22 11 2020].
- [133] British Standards Institution, «Light and Lighting-Lighting of Work Places: Indoor Work Places,» BSI, 2011.
- [134] A. Mesloub , D. Y. Aminu et M. Z. Kandar, «Investigating use of daylight in a typical algerian public classroom typology,» *Jurnal Teknologi*, vol. 77, n° 15, pp. 21-30, 2015.
- [135] Y. S. Maria et R. Prihatmanti, «Daylight Characterisation of Classrooms in Heritage School Buildings,» *Planning Malaysia*, vol. 15, n° 1, 2017.
- [136] M. Abdelhakim, Y. W. Lim et M. Z. Kandar, «Optimum Glazing Configurations for Visual Performance in Algerian Classrooms under Mediterranean Climate,» *Journal of Daylighting*, vol. 6, n° 1, pp. 11-22, 2019.
- [137] F. Nocera, A. Lo Faro, V. Costanzo et C. Raciti, «Daylight performance of classrooms in a mediterranean school heritage building,» *Sustainability*, vol. 10, n° 10, p. 3705, 2018.
- [138] Maisons Paysanes de France , «ATHEBA (Amélioration Thermique du Bâti Ancien),» décembre 2010.
- [139] Habitat presto, «Laine de bois : quel prix au m2 pour quelle épaisseur ?,» 16 12 2019. [En ligne]. Available: <https://www.habitatpresto.com/mag/isolation/laine-bois>. [Accès le 22 11 2020].
- [140] LOCATELLI DIFFUSION, «Isolation naturelle en laine de bois,» [En ligne]. Available: <https://locatellidiffusion.fr/laine-de-bois/>. [Accès le 22 11 2020].
- [141] F. Pacheco-Torgal, J. Faria et S. Jalali, «Some considerations about the use of lime–cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil ?,» *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 488-494, 2012.
- [142] M. do Rosário Veiga, F. Ana, L. V. Ana , C. M. Ana et M. Goreti, «Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings,» *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 4, n° 2, pp. 177-195, 2010.
- [143] K. Elert, C. R.-N. Rodriguez-Navarro, E. S. Pardo, E. Hansen et O. Cazalla, «Lime mortars for the conservation of historic buildings,» *Studies in conservation*, vol. 47, n° 1, pp. 62-75, 2002.
- [144] M. J. Mosquera, B. Silva, B. Prieto et E. Ruiz-Herrera, «Addition of cement to lime-based mortars : Effect on pore structure and vapor transport,» *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 9, pp. 1635-1642, 2006.

- [145] Batiproduits, «Luminaire encastré LED,» 01 03 2010. [En ligne]. Available: <https://www.batiproduits.com/fiche/produits/luminaire-led-encastre-pour-l-eclairage-des-bure-p68923868.html>. [Accès le 22 11 2020].
- [146] Le blog des maisons passives, «Qualités thermiques comparées des matériaux de construction,» [En ligne]. Available: <https://passivact.fr/Concepts/files/QualiteThermique-ComparaisonsMateriaux.html>. [Accès le 22 11 2020].
- [147] HABITAT DURABLE, «L'isolation thermique double et triple vitrage isolant,» 03 11 2015. [En ligne]. Available: <https://www.picbleu.fr/page/l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant>. [Accès le 22 11 2020].
- [148] Quelle énergie, «Le double vitrage 4/16/4 avec argon est-il un bon matériau pour un confort thermique optimal dans une véranda ?,» [En ligne]. Available: <https://www.quelleenergie.fr/questions/fenetre-veranda#:~:text=Quant%20%C3%A0%20'Argon%2C%20il,1%20pour%20'air> .. [Accès le 22 11 2020].
- [149] T. Hong, H. Kim et T. Kwak, «Energy-saving techniques for reducing CO2 emissions in elementary schools,» *Journal of Management in Engineering*, vol. 28, n° 1, pp. 39-50, 2012.
- [150] ADEME NORMANDIE, «Construction et rénovation de bâtiments en Normandie : sujets techniques,» mars 2017. [En ligne]. Available: <https://www.ademe.fr/construction-renovation-batiments-normandie-sujets-techniques>. [Accès le 22 11 2020].
- [151] N. Gaitani, L. Cases, E. Mastrapostoli et E. Eliopoulou, «Paving the way to nearly zero energy schools in Mediterranean region-ZEMedS project,» *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3348-3353, 2015.
- [152] J. S. Carlos, «Sustainability assessment of government school buildings in Portugal,» *Architectural Science Review*, vol. 59, n° 5, pp. 413-422, 2016.
- [153] A. Michael et C. Heracleous, «Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus,» *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 443-457, 2017.

ANNEXE A
TABLES DE MAHONEY

1. Diagnostic

Table 1 : Températures

	J	F	M	A	M	J	JUI	A	S	O	N	D
Temp. Moy. Max	13,3	13,15	16,31	20,49	24,55	30,09	35,21	34,84	29,72	25,17	17,15	14,11
Temp. Moy. Min	6,26	6	7,79	10,96	13,99	18,18	22,39	22,24	18,28	14,86	9,54	6,87
E.D.T.	7,04	7,15	8,52	9,53	10,56	11,91	12,82	12,6	11,44	10,31	7,61	7,24

La plus haute	TAM
35,21	20,605
6	29,21
La plus basse	EAT

Table 2 : Humidité, Pluie, Vent

	J	F	M	A	M	J	JUI	A	S	O	N	D
H Max	93,8	94,4	90,6	86,6	81	72,8	65,2	68	81,2	84	91,1	91,7
H Min	57,1	55,5	49,2	44,5	39,1	32,3	25,5	25,7	36,8	41,3	55,6	58,8
H Moy.	75,45	74,95	69,9	65,55	60,05	52,55	45,35	46,85	59	62,65	73,35	75,25
Groupe (G.H.)	4	4	3	3	3	3	2	2	3	3	4	4
Pluie (mm)	115	95	86	64	52	17	3	5	29	59	93	109

Table 03 : Confort

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec
Groupe Hygro (G.H.)	4	4	3	3	3	3	2	2	3	3	4	4

Températures

Moy. Mens. Max.		13,3	13,15	16,31	20,49	24,55	30,09	35,21	34,84	29,72	25,17	17,15	14,11
Confort diurne	Maxi	27	27	29	29	29	29	31	31	29	29	27	27
	Mini	22	22	23	23	23	23	25	25	23	23	22	22
Moy. Meus. Mini		6,2 6	6	7,7 9	10, 96	13, 99	18, 18	22, 39	22, 24	18, 28	14, 86	9,5 4	6,8 7
Confort nocturne	Maxi	21	21	23	23	23	23	24	24	23	23	21	21
	Mini	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

Stress Thermique

Jour	F	F	F	F	/	C	C	C	C	/	F	F
Nuit	F	F	F	F	F	/	/	/	/	F	F	F

Table 4 : Indicateurs

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
H1 ventilation essentielle													00
H2 Ventilation désirable													00
H3 Protection pluie													00
A1 Inertie thermique					+	+	+	+	+	+			06
A2 Dormir dehors													00
A3 Prob. Saison froide	+	+	+	+							+	+	06

2. Recommandations

- **Plan de masse**

H1	H2	H3	AI	A2	A3		
			0-10			x	Bâtiments orientés suivant un axe longitudinal est-ouest afin de diminuer l'exposition au soleil.
			11 ou 12		5-12	x	Plans compacts avec cours intérieures
					0-4		

- **Espacements entre bâtiments**

11 ou 12							Grands espacements pour favoriser la pénétration du vent
2-10							Comme ci-dessus, mais avec protection contre vent chaud /froid
0 ou 1							Plans compacts

- **Circulation d'air**

3-12							Bâtiments à simple orientation. Dispositions permettant une circulation d'air permanente.
1 ou 2	2-12		0-5				
			6-12			x	Bâtiments à double orientation permettant une circulation d'air intermittente.
0	0 ou 1						Circulation d'air inutile

- **Dimensions des ouvertures**

			0 ou 1		0		Grandes. 40 à 80% des façades nord et sud.
						1-12	
			2-5				
			6-10			x	Intermédiaires, 20 à 35 % de la surface des murs.
			- ou 12		0-3		Petites, 15 à 25% de la surface des murs.
					4-12	x	Moyennes, 25 à 40 % de la surface des murs.

- **Position des ouvertures**

3-12							Ouvertures dans les murs nord et sud. «À hauteur d'homme du côté exposé au vent.
1 ou 2	2-12		0-5				x Comme ci-dessus, mais y compris ouvertures pratiquées dans les murs intérieurs.
			6-12				
0	0 ou 1						

- **Protection des ouvertures**

					0-2		Se protéger de l'ensoleillement direct
		2-12					Prévoir une protection contre la pluie

- **Murs et planchers**

			0-2				Constructions légères, faible inertie thermique
			3-12			x	Construction massive, décalage horaire supérieur à 08 heures

- **Toiture**

10-12			0-2				Construction légère, couvertures à revêtements réfléchissants et vide d'air.
			3-12				Légère et bien isolée
0-9			0-5				x Construction massive, décalage horaire supérieur à 08 heures
			6-12				

- **Espaces extérieurs**

				1-12			Emplacement pour le sommeil eu plein air
		1-12					Drainage approprié des eaux de pluie
		3-12					

ANNEXE B

QUESTIONNAIRE DE L'ENQUÊTE

QUESTIONNAIRE DU CONFORT THERMIQUE ET VISUEL DE LA PERIODE FROIDE

جامعة سعد دحلب بالبليدة، معهد الهندسة المعمارية وال عمران
استبيان حول الراحة الحرارية والضوئية الموجودة في المدارس القديمة، التي يعود تشييدها للعهد
الاستعماري في منطقة مليانة ولاية عين الدفلى.
إعداد الطالب: خلج سمير اشراف: البروفيسور بن شيخ حميدة

معلومات حول مكان الدراسة:

رقم القسم: عدد التلاميذ:

معلومات شخصية:

الجنس: ذكر انثى

مكان الإقامة:

السن: الوزن: كغ القامة: سم

بيانات الحالة الصحية:

تقديرات الحالة الصحية:	جيدة	عادية	ضعيفة
------------------------	------	-------	-------

تلميذ استاذ

الملابس: صف نوع الملابس التي ترتديها حاليا:

ملابس خفيفة ملابس متوسطة ملابس خشنة

مكان الجلوس في القسم:

هل الدراسة في مبنى تاريخي امر مهم بالنسبة لك (تعتبر ثانويتا محمد عبدو وفروخي مصطفى من أقدم 39 ثانوية على مستوى التراب الوطني الجزائري)؟	لا	نعم	غير مبال
لماذا.....			

دراسة الراحة الحرارية في فصل الشتاء:

الراحة الحرارية: هي عدم الشعور لا بالبرد ولا بالحرارة اي التعادل الحراري.

كيف تشعر حيال درجة الحرارة داخل القسم في هذه اللحظة بالذات؟

بارد جدا	بارد	بارد قليلا	معتدل (لا بارد ولا حار)	حار قليلا	حار	حار جدا

في أي فترة من اليوم تشعر بالبرودة؟	في الصباح فقط
	في الايام الباردة فقط
	كل الاوقات

في حالة الشعور بالبرد، يرجع ذلك الى:	انخفاض درجة الحرارة
	برودة الجدار
	الإحساس بتيارات هوائية
	وجود حاجبات الأشعة الشمسية

هل تلجؤون إلى استخدام وسائل التدفئة داخل القسم في فصل الشتاء؟	أبدا
	في كل وقت، حتى في حالة غيابنا
	في حالة تواجدنا داخل أقسام الدراسة
	في أوقات معينة من اليوم

ما هو العامل الأكثر تأثيرا على شعورك بالبرودة في فصل الشتاء؟	درجة الحرارة
	الرطوبة
	حركة الهواء
	عوامل أخرى (حدد):

إذا كانت الإجابة «في أوقات معينة من اليوم» يُرجى تحديد الفترة.	الصباح
	بعد الظهر
	أوقات أخرى (حدد)

ضع علامة (x) في المكان المناسب

	التصرف	ما هو تصرفك عندما تشعر بالبرودة؟
	غلق النافذة	
	غلق الباب	
	انارة نور القسم	
	ارتداء المعطف	
	تغيير مكان الجلوس او القسم	
	أساليب أخرى (حدد).....	

حركة الهواء:

	ابدا	هل تفتح نوافذ القسم في فصل الشتاء؟
	في أوقات معينة من اجل التهوية	
	في أوقات معينة لان الجو حار	

	في الصباحة	إذا كانت الإجابة «في» أوقات معينة من اليوم"، يرجى التحديد:
	في كل نهاية ساعة	
	فقط عند الحاجة خلال النهار	
	فترات أخرى (حدد).....	

دراسة الراحة البصرية في فصل الشتاء:

رتب العوامل التالية حسب اهميتها لك (ضع الأرقام من 1 الى 4):

العامل	الترتيب حسب الأهمية
رؤية السبورة بشكل واضح عند القراءة او الكتابة	
انخفاض مستوى الضجيج اثناء التواجد داخل القسم	
عدم الشعور لا بالبرد ولا بالحرارة	
نوعية هواء "جيدة" داخل القسم	

دراسة الراحة البصرية في فصل الشتاء:

ضع علامة (x) في المكان المناسب

	بعيدا عن النافذة	بالقرب من النافذة	ما هو المكان المفضل لك للجلوس داخل القسم؟
لماذا.....			
...			

بعيدا عن السبورة	بالقرب من السبورة	ما هو المكان المفضل لك للجلوس داخل القسم؟
		لماذا.....
		...

	ضوء النهار	ما هو نوع الانارة الذي تعتمدون عليه اثناء الدراسة؟
	إضاءة اصطناعية	
	استعمال ضوء النهار وإضاءة اصطناعية معا	

اختر إجابة واحدة من خلال وضع علامة (x) في المكان المناسب

	غير كاف (قسم مظلم)	اثناء الفترة الصباحية ما هو تقييمك لكمية ضوء النهار المتواجد داخل القسم في فصل الشتاء؟
	قليل (قسم قليل الانارة)	
	كاف (قسم مضاء نوعا ما)	
	كاف جدا (قسم شديد الإضاءة)	

	غير كاف (قسم مظلم)	اثناء الفترة المسائية ما هو تقييمك لكمية ضوء النهار المتواجد داخل القسم في فصل الشتاء؟
	قليل (قسم قليل الانارة)	
	كاف (قسم مضاء نوعا ما)	
	كاف جدا (قسم شديد الإضاءة)	

	نعم	هل تستطيع رؤية السبورة بشكل واضح طوال النهار عند القراءة او الكتابة؟
	لا	
	الصباح	إذا كانت الإجابة "لا" حدد الفترة؟
	المساء	
	أوقات أخرى	
	اليسار	وحدد في أي موقع من السبورة لا تظهر لك الكتابة او القراءة بشكل واضح؟
	اليمين	
	أماكن أخرى حدد: ...	
	ضوء الشمس	حدد السبب أيضا؟
	المصباح	
	مصادر أخرى حدد...	

	نعم	هل تنعكس أحيانا اشعة الشمس على السبورة؟
	لا	
	إذا كانت الإجابة نعم حدد الفترة...	

	نعم	هل يسبب انعكاس اشعة الشمس على السبورة مشاكل على مستوى الرؤية (التوهج)؟
	لا	
	نعم	هل تصل اشعة الشمس الى الطاولة الخاصة بمكان جلوسك؟
	لا	
إذا كانت الإجابة نعم حدد الفترة...		
	إغلاق مصاريع النوافذ (les persiennes)	في حالة وصول اشعة الشمس الى طاولتك كيف تحمي نفسك؟
	الانتقال إلى طاولة لا تصلها اشعة الشمس	
	تحويل الطاولة الى مكان محمي من اشعة الشمس	
	التركيز على الدراسة مع تجاهل اشعة الشمس	
ردود فعل أخرى (حدد) ...		
	نعم	هل ترى انه من الضروري حجب أشعة الشمس المباشرة عن الدخول الى القسم؟
	لا	
إذا كانت الإجابة بنعم، فكيف ذلك...		

هل انت راض عن العوامل التالية على مستوى قسمك؟ اختر إجابة واحدة من خلال وضع علامة (x) في المكان المناسب

غير راض تماما	ليس راض	غير مبال	راض نوعا ما	راض جدا	
					حجم وابعاد الفضاء المعماري (القسم)
					البيئة العامة كألوان الجدران
					ابعاد النوافذ (عرض وارتفاع)
					نوعية السقف
					التدفئة في فصل الشتاء
					الاضاءة الاصطناعية
					التهوية

QUESTIONNAIRE DU CONFORT THERMIQUE ET VISUEL DE LA PÉRIODE CHAUDE

جامعة سعد دحلب بالبليدة، معهد الهندسة المعمارية وال عمران
استبيان حول الراحة الحرارية والضوئية الموجودة في المدارس القديمة، التي يعود تشييدها للعهد
الاستعماري في منطقة مليانة ولاية عين الدفلى.
إعداد الطالب: خلج سمير اشراف: البروفيسور بن شيخ حميدة

معلومات حول مكان الدراسة

(0.5)	قميص قصير الكمين (chemise)	سروال خفيف ... +
(0.56)	قميص طويل الكمين (chemise)	
(0.31)	قميص قصير الكمين (T-shirt)	
(0.59)	قميص قصير الكمين (chemise)	سروال خشن (جينز) ...+
(0.65)	قميص طويل الكمين (chemise)	
(0.39)	قميص قصير الكمين (T-shirt)	
(0.5)	حجاب خفيف	حجاب
(0.56)	حجاب خشن	
	قميص طويل الكمين	تنورة ... +
	قميص قصير الكمين	
ملابس أخرى حدد:		

رقم القسم: عدد التلاميذ:

معلومات شخصية

الجنس: ذكر انثى

مكان الإقامة:

(ا) السن: (ب) الوزن: (ج) القامة: سم

الحالة الصحية: جيدة عادية ضعيفة

تلميذ استاذ

صف نوع الملابس التي ترتديها حاليا على الجدول المقابل

حدد مكان الجلوس في القسم على المخطط.

دراسة الراحة الحرارية في فصل الصيف

كيف تقيم فرق درجة الحرارة بين داخل المبنى وخارجه

فارق كبير	فارق متوسط	فارق ضئيل
بارد جدا (3-)	بارد (-2)	بارد قليلا (1-)
معتدل (0)	حار قليلا (1+)	حار (2+)
حار جدا (3+)		

كيف تجد الجو داخل القسم في الفترة الصباحية



كيف تجد الجو داخل القسم في الفترة المسائية

بارد جدا (3-)	بارد (-2)	بارد قليلا (1-)	معتدل (0)	حار قليلا (1+)	حار (2+)	حار جدا (3+)

ارتفاع درجة الحرارة	في حالة الشعور بالحرارة، يرجع ذلك الى:
حرارة الجدار	
الإحساس بتيارات هوائية ساخنة	
غياب حاجبات الاشعة الشمسية	
عوامل أخرى (حدد):	

درجة الحرارة	ما هو العامل الأكثر تأثيرا على شعورك بالحرارة داخل القسم في فصل الصيف؟
الرطوبة	
الهواء الساخن	
عوامل أخرى (حدد):	

التصرف	ما هو تصرفك عندما تشعر بالحرارة؟
فتح النافذة	
فتح الباب	
استخدام واقيات شمسية كالستائر	
تغيير مكان الجلوس داخل القسم	
تصرفات أخرى (حدد)	

كم مرة تفتح النوافذ في اليوم؟	ولا مرة 0%	نادرا 20%	بعض الأحيان (50%)	غالبا 80%	كل الوقت 100%

كيف تقيم نوعية الهواء داخل القسم؟	جيدة جدا	جيدة	مقبولة	سيئة قليلا	سيئة

الراحة الحرارية في هذه اللحظة:

كيف تشعر حيال درجة الحرارة داخل القسم في هذه اللحظة بالذات؟

بارد جدا	بارد	بارد قليلا	معتدل (لا بارد ولا حار)	حار قليلا	حار	حار جدا

هل انت الآن...؟

مرتاح جدا	مرتاح قليلا	مرتاح نوعا ما	مرتاح	غير مرتاح نوعا ما	غير مرتاح	غير مرتاح تماما

هل تريد أن تكون ...

أكثر برودة	لا تغيير	أكثر حرارة

كيف تقيم درجة الحرارة في هذه اللحظة؟

مقبولة	غير مقبولة

كيف تشعر حيال تدفق الهواء في هذه اللحظة؟

ضعيف جدا	ضعيف	ضعيف قليلا	ملائم	قوي نوعا ما	قوي	قوي جدا

كيف تجد القسم في هذه اللحظة من حيث الرطوبة؟

رطب جدا	رطب	رطب قليلا	مناسب	جاف قليلا	جاف	جاف جدا

دراسة الراحة البصرية في فصل الصيف:

ضوء النهار	ما هو نوع الانارة الذي تعتمدون عليه اثناء الدراسة في فصل الصيف؟
إضاءة اصطناعية	
استعمال ضوء النهار وإضاءة اصطناعية معا	

اختر إجابة واحدة من خلال وضع علامة (x) في المكان المناسب

غير كاف (قسم مظلم)	ما هو تقييمك لكمية ضوء النهار المتواجد داخل القسم في فصل الصيف اثناء الفترة الصباحية
قليل (قسم قليل الانارة)	
كاف (قسم مضاء نوعا ما)	
كاف جدا (قسم شديد الإضاءة)	
غير كاف (قسم مظلم)	ما هو تقييمك لكمية ضوء النهار المتواجد داخل القسم في فصل الصيف اثناء الفترة المسائية
قليل (قسم قليل الانارة)	
كاف (قسم مضاء نوعا ما)	
كاف جدا (قسم شديد الإضاءة)	

	غير كاف (قسم مظلم)	ما هو تقييمك لكمية للإضاءة الصناعية
	قليل (قسم قليل الانارة)	
	كاف (قسم مضاء نوعا ما)	
	كاف جدا (قسم شديد الإضاءة)	
	نعم	هل تستطيع رؤية السبورة بشكل واضح طوال النهار عند القراءة او الكتابة؟
	لا	
	الصباح	إذا كانت الإجابة "لا" حدد الفترة؟
	المساء	
	أوقات أخرى	
	اليسار	وحدد في أي موقع من السبورة لا تظهر لك الكتابة او القراءة بشكل واضح؟
	اليمين	
	أماكن أخرى من السبورة	
	حدد:.....	
	ضوء الشمس	حدد السبب أيضا؟
	المصباح	
	مصادر أخرى حدد:.....	

	أبدا 0 %	نادرا 20 %	بعض الأحيان (50%)	غالبا 80 %	كل الوقت 100 %	هل تنعكس اشعة الشمس على السبورة؟
	حدد الفترة:.....					هل يسبب انعكاس اشعة الشمس على السبورة مشاكل على مستوى الرؤية (التوهج)؟
	نعم					
	لا					هل تصل اشعة الشمس الى الطاولة الخاصة بمكان جلوسك؟
	أبدا 0 %					
	نادرا 20 %					في حالة وصول اشعة الشمس الى طاولتك كيف تحمي نفسك؟
	بعض الأحيان (50%)					
	غالبا 80 %					هل ترى انه من الضروري حجب
	كل الوقت 100 %					
	إغلاق مصاريع النوافذ (les persiennes) الانتقال إلى طاولة لا تصلها اشعة الشمس تحويل الطاولة الى مكان محمي من اشعة الشمس التركيز على الدراسة مع تجاهل اشعة الشمس ردود فعل أخرى (حدد).....					
	نعم					
	لا					

أشعة الشمس المباشرة عن الدخول الى القسم؟	إذا كانت الإجابة بنعم، فكيف ذلك.....
--	--------------------------------------

الراحة الضوئية في هذه اللحظة: ضع علامة \surd أو \times على الجواب المناسب لك

• نسبة الإضاءة الطبيعية داخل القسم وتوزيعها

ضوء النهار على مستوى الطاولة				
قليل جدا	قليل	متوسط	كافي	كافي جدا
توزيع ضوء النهار في فضاء القسم				
غير منسجم تماما	غير منسجم	منسجم (متوزع بشكل جيد)	منسجم قليلا	منسجم تماما

• أشعة الشمس

هل تسقط أشعة الشمس على جسمك أو عينيك؟				
لا		نعم		
كيف ترى اشعة الشمس داخل القسم				
مزعجة جدا	مزعجة	لا مزعجة ولا مريحة	مريحة	مريحة جدا
يرجى وضع علامة على درجة الوهج التي قد تتعرض لها سواء على مستوى الطاولة أو السبورة				
وهج لا يطاق	وهج غير مريح	متوسط	وهج مقبول	لا يتعرض للوهج على الإطلاق

• الراحة الضوئية بصورة شاملة

كيف تقيم قسمك من ناحية الراحة الضوئية بصفة عامة				
غير مريح تماما	غير مريح	متوسط	مريح	مريحة جدا

• التصرف

ما هي ردة فعلك في حالة تضايقك من وجود ضوء الشمس الزائد؟		
لا أتخذ أي إجراء	إجراء آخر.....	أغير مكان جلوسي

• المتغيرات البيئية في هذه اللحظة (معطيات)

T [°C]	RH [%]	Tr [°C]	V air [m/s]	I [clo]	E [lux]

ANNEXE C
FICHES UTILISÉES LORS DES COMPAGNES DE MESURES

Fiche de mesures de l'éclairage naturel

Établissement d'enseignement :

Salle de cours N° :

État du ciel :

Date :

Points de mesures	9 h	12 h	15 h	Indication des numéros des points de mesures sur plan
1				<div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>TABLEAU</p> </div>
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13 Bureau de Prof				
14 Tableau blanc				
15 Cour de récréation				
Éclairage moyen				
FLJ				
Uniformité				

Fiche de mesures de l'environnement thermique

Heure	T in	H in	T r	V air	Températures des parois intérieures						Températures des parois extérieures				T coursive	H coursive	T ex	H ex
					T P inf	T P sup	T m 1	T m 2	T m 3	T m 4	T m ex	T f	T m ex	T f				
07 h																		
08 h																		
09 h																		
10 h																		
11 h																		
12 h																		
13 h																		
14 h																		
15 h																		
16 h																		
17 h																		
18 h																		

Établissement d'enseignement :

Salle de cours N° :

État du ciel :

Date :

ANNEXE D
NIVEAUX D'ÉCLAIREMENT NATUREL (21 JUIN)

Tableau 1 : Niveaux d'éclairément naturel relevés le 21/06/2018, sous ciel clair
(Lycée Mohamed ABDOU)

N°	Heure	Ex	E Rang 1	E Rang 2	E Rang 3	E Rang 4	E moy	Tableau	FLJ Moy (%)	U
1	9 h	58000	182	240	9694	538	2664	229	4,59	0,07
	12 h	91100	138	116	207	188	162	86	0,18	0,72
	15 h	82700	182	138	207	192	180	104	0,22	0,77
2	9 h	58000	187	116	129	161	148	101	0,26	0,78
	12 h	91100	366	187	148	129	207	140	0,23	0,62
	15 h	82700	506	210	147	158	256	131	0,31	0,58
3	9 h	59800	236	228	179	261	226	277	0,38	0,79
	12 h	90400	229	200	215	201	211	168	0,23	0,95
	15 h	82700	373	356	392	425	387	178	0,47	0,92
4	9 h	62000	233	222	252	309	254	131	0,41	0,87
	12 h	90200	322	196	144	143	202	115	0,22	0,71
	15 h	84900	1363	406	249	182	550	142	0,65	0,33
5	9 h	62600	161	121	133	214	157	91	0,25	0,77
	12 h	92100	312	199	159	178	212	148	0,23	0,75
	15 h	81300	249	123	94	112	145	80	0,18	0,65
6	9 h	61800	468	333	311	285	349	224	0,57	0,82
	12 h	92100	345	222	175	151	223	129	0,24	0,68
	15 h	81300	21414	479	326	262	5620	277	6,91	0,05

Tableau 2 : Niveaux d'éclairément naturel relevés le 21/06/2018, sous ciel clair
(Lycée Mustapha FERROUKHI)

N°	Heure	Ex	E Rang	E Rang	E Rang	E moy	Tableau	FLJ	U
			1	2	3			Moy (%)	
1	9 h	62800	194	128	82	135	134	0,21	0,61
	12 h	82100	359	234	163	252	235	0,31	0,65
	15 h	75500	383	359	246	329	233	0,44	0,75
2	9 h	62800	662	270	191	374	236	0,6	0,51
	12 h	82100	648	295	237	393	265	0,48	0,6
	15 h	75500	438	238	193	290	174	0,38	0,67
3	9 h	62900	685	683	571	646	583	1,03	0,88
	12 h	86600	966	896	723	862	722	1	0,84
	15 h	69300	1293	1292	1089	1225	812	1,77	0,89
4	9 h	62900	685	698	632	672	545	1,07	0,94
	12 h	86600	688	610	464	587	420	0,68	0,79
	15 h	69300	473	331	225	343	220	0,49	0,66

N.B. Il est à signaler que les niveaux d'éclairément du (21 juin) n'ont pas été insérés dans la thèse, vu que cette période correspond aux grandes vacances scolaires en Algérie. Cependant, ces données peuvent être utiles pour étudier d'autres types de construction de style colonial (néo-classique), en l'occurrence les bureaux.