

Etablissement d'un indicateur de confort global dans une salle de classe, en climat tropical humide

[Establishment of a global comfort indicator for classrooms in a humid tropical climate]

Didier Berléo M. APOVO¹, Sibiath O. G. OSSEN², Crésus GBADO¹, Edmond C. VODOUNNOU¹, and Clément AHOUANNOU¹

¹Laboratory of Applied Energetic and Mechanic (LEMA), Polytechnic School of Abomey-Calavi (EPAC), University of Abomey-Calavi - UAC), 01 POB: 2009 Cotonou, Benin

²Laboratory of Sciences, Engineering and Mathematics, National School of Energy and Process Engineering, National University of Sciences, Technologies, Engineering and Mathematics of Abomey, Benin

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study looked at global comfort in a classroom in a tropical climate. Based on surveys and in situ data collection, the hierarchical multi-criteria analysis method was used to establish a model of the global comfort indicator. The weights obtained for each of the comfort components truly reflect the needs in terms of global comfort in a classroom in a tropical climate, with a high level of hygrothermal comfort, a high level of visual comfort and acoustic comfort, and a low level of olfactory comfort. The global comfort index for classrooms in a tropical climate, I_{GSC} , has been established and will be used as a tool for predicting global comfort in classrooms.

KEYWORDS: Tropical climate, global comfort, environment, indicators, classrooms.

RESUME: La présente étude, s'est intéressée au confort global dans une salle de classe en climat tropical. A partir des enquêtes et des relevés de données in situ, la méthode d'analyse multicritère hiérarchique a permis d'établir un modèle d'indicateur de confort global. Les poids obtenus pour chacune des composantes de confort traduisent réellement les besoins en matière de confort global dans une salle de classe dans le contexte climatique tropical avec une forte importance attestée du confort hygrothermique, une importance du confort visuel et du confort acoustique et un faible effet du confort olfactif. L'indice de confort global dans les salles de classe en climat tropical, I_{GSC} a été établi et servira d'outil pour la prévision de confort global dans les salles de classe.

MOTS-CLEFS: Climat tropical, confort global, environnement, indicateur, salles de classe.

1 INTRODUCTION

L'un des sujets qui font l'actualité de nos jours est la pollution environnementale avec toutes les conséquences qu'elle engendre. D'après le rapport sur la situation mondiale des bâtiments et de la construction, en 2021, ledit secteur engendre environ 37 % des émissions de CO₂ (avec une augmentation de 5% par rapport à 2020) et plus de 34 % de la demande énergétique mondiale (avec une augmentation de 4% par rapport à 2020) [1]. Le secteur du bâtiment contribue ainsi à l'épuisement des ressources énergétiques classiques. Cependant, les besoins énergétiques des occupants des bâtiments ne cessent de croître. La consommation énergétique est généralement liée aux besoins de confort des occupants (conditionnement des locaux, éclairage, ...). La réduction de la consommation d'énergie d'un bâtiment et l'amélioration du

confort intérieur sont deux enjeux majeurs auxquels sont confrontés les professionnels de la construction dans le monde ([2], [3] [4]). Cette double exigence du bâtiment est encore plus observée dans les régions tropicales marquées par des températures élevées. Les régions tropicales regroupent actuellement environ 40% de la population mondiale et probablement plus 60% en 2050 [5]. Ce constat démontre l'importance de ces régions en termes d'accroissement de la population mondiale et la nécessité de prévoir la satisfaction des besoins de confort.

Le confort global dans un bâtiment est une sensation de bien-être lorsqu'un individu est exposé dans son ambiance intérieure. Il dépend de la qualité de l'air intérieur, des conditions hygrothermiques, de la qualité visuelle et de l'acoustique dans le local concerné. L'importance de l'environnement scolaire et le confort global, sur la santé d'un individu, son bien-être et son rendement intellectuel ne sont plus à démontrer. Dans les bâtiments scolaires en particulier, le confort occupe une place prépondérante car les salles de classes sont le deuxième espace le plus important pour les apprenants, après l'environnement familial [6]. Cependant, cet environnement confortable pour les apprenants n'est souvent pas observé dans les salles. Les apprenants se retrouvent ainsi contraints à vivre dans des conditions intolérables dans les salles de cours. Pour les quelques rares cas, où les conditions de confort sont réunies, il faut faire recours à des équipements énergivores pour se l'offrir. Ce qui entraîne une augmentation non négligeable de la consommation énergétique. Ainsi donc, il est opportun, dans la phase de conception des bâtiments, de mener des études sur la prévision de confort, en vue de leur adaptation aux futurs occupants. Notons que la performance des bâtiments peut être évaluée en termes de qualité de l'air intérieur, de confort thermique, de qualité d'éclairage et de qualité acoustique. Les études sur le confort se basent sur des indicateurs prédéfinis ou établis, relatifs à l'environnement concerné. Plusieurs indicateurs de confort sont recensés. Très peu s'intéressent à l'étude du confort global dans l'environnement des bâtiments en général, et particulièrement les bâtiments scolaires en climat tropical.

En effet, la définition du confort global et du bien-être général est particulièrement liée à plusieurs facteurs plus ou moins mesurables, basés sur des modèles élaborés par plusieurs auteurs. Il est exprimé par divers paramètres physiques, psychologiques, physiologiques, culturels, et individuels qui influencent plus ou moins ses différentes composantes définies d'après Moser [7] par : le confort existentiel, matériel, esthétique, social, de conformité et sensoriel (la lumière, le son, la vue, l'air, ...). Le confort dépend donc des capacités physiologiques et de l'appréciation psychologique de chacun [8]. Outre les conditions ambiantes standardisées et physiquement mesurables, tels que la température de l'air intérieur, l'intensité de l'éclairage, le niveau de bruit ; certains critères individuels, physiologiques dépendent de l'âge, du sexe, de la constitution physique et des conditions intermédiaires à savoir l'habillement, l'activité exercée, affectent notre bien-être. La particularité des variables climatiques en région tropicale impose des spécificités qu'il est important de bien comprendre afin de les prendre en considération.

Le concept de *confort hygrothermique* est caractérisé par l'état de satisfaction dans les conditions thermiques et hygroscopiques de l'environnement. Cette satisfaction est traduite par l'impossibilité pour un sujet de préciser s'il préfère un environnement plus "froid" ou plus "chaud" [9]. L'environnement hygrothermique d'un individu est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, la température moyenne des parois, l'humidité relative et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité exercée (métabolisme du corps humain) et la vêtue de l'individu (habillement), pour établir son état thermique ; et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement ([10], [11]). Une des problématiques du milieu tropical est qu'il est nécessaire d'utiliser les caractéristiques du climat pour atteindre les conditions de confort thermique. Les zones tropicales sont souvent caractérisées par des températures extérieures élevées au cours de la journée, impactant ainsi le confort interne des bâtiments et pouvant conduire de fait, à un usage intensif des systèmes de conditionnement d'air. Tout comme la température, l'hygrométrie influence le confort interne d'un bâtiment, particulièrement en milieu tropical humide.

Le sens le plus important de l'être humain est celui de la vision, car 80 à 90% de notre saisie de données est basée sur ce que nous pouvons voir [12] ; il s'agit du *confort visuel*. Le confort visuel fait référence aux conditions d'éclairage pour assurer une clarté optimale à l'intérieur d'un bâtiment. Pour un bon éclairage, les facteurs responsables sont l'orientation du bâtiment, la bonne distribution et la propagation de la lumière, l'absence d'éblouissement et d'ombres nettes. Un confort visuel optimal pour les zones de travail est garanti lorsque la luminance sur le lieu de travail (luminance ambiante) est adaptée à la tâche visuelle respective (luminance directe). Cela peut être réalisé, en principe avec la lumière du jour, la lumière artificielle ou une combinaison des deux. Remarquons que la lumière du jour crée des conditions plus confortables car elle inclut toutes les couleurs du spectre ; heureusement, dans les régions tropicales, la lumière du jour est disponible et une meilleure conception des bâtiments permet d'en tirer grand profit.

Il y a *confort acoustique* à l'intérieur d'un bâtiment lorsque l'environnement intérieur de ce dernier n'est pas soumis aux paramètres suivants : bruits extérieurs, bruits des logements voisins, bruits des équipements et effet d'écho ou réverbération. Un son se caractérise par une fréquence, aussi appelée *hauteur* exprimée en Hertz (Hz), qui permet de distinguer les sons

graves et les aigus ; un niveau sonore L_p ou *amplitude* aussi appelé niveau de pression acoustique exprimé en décibel (dB), et une durée (son continu, intermittent ou impulsionnel). L'acoustique interne d'une salle est caractérisée par la manière dont les ondes sonores s'y propagent et notamment par son temps de réverbération [13].

Le confort olfactif ou la qualité de l'air intérieur (QAI) est considéré comme une composante importante de l'environnement intérieur des bâtiments. Les problèmes de QAI sont difficiles à cerner parce que les occupants sont simultanément exposés à une multitude de conditions intérieures indésirables. Les sources de contamination de l'air dans les bâtiments scolaires sont multiples. Les contaminants les plus courants sont :

- Le dioxyde de carbone (CO_2) provenant principalement des occupants ;
- Les composés organiques volatils (COV) et les produits chimiques toxiques, se trouvant dans les matériaux de construction, tels que le formaldéhyde et les solvants organiques ;
- Les poussières et moisissures ;
- L'ozone, provenant des certains photocopieurs, imprimantes et filtres électrostatiques.

Le confort olfactif dépend de trois principaux facteurs : la qualité de l'air, la vitesse de l'air et le taux de renouvellement. Il existe deux types d'approches pour évaluer la qualité de l'air intérieur : l'approche «sanitaire» basée sur l'analyse de l'exposition des occupants à un polluant ou un mélange de polluants et l'approche «olfactive» basée sur l'évaluation du niveau des odeurs ressenties par les occupants [11].

En effet, la difficulté de la mesure de la qualité de l'air est double. Pour l'approche sanitaire, il y a les composants imperceptibles par l'homme, qui dégradent cette qualité de l'air. Certains composants sont inodores, mais peuvent avoir un effet très néfaste (voire mortel) comme par exemple, le radon issu de la radioactivité naturelle qui est imperceptible ; sa mesure dépend d'un capteur spécifique, capable de détecter la radioactivité. Pour l'approche olfactive, l'agréabilité d'une odeur est subjective, et dans ce cas, les nez artificiels, faisant office de capteurs, ne peuvent donner d'indications certaines quant à l'inconfort lié à l'ambiance olfactive.

La complexité d'effectuer ces mesures amène Emmerich et Persily [14] à retenir qu'un indicateur global de confort olfactif qui peut être représentatif de la qualité de l'air peut se baser sur la concentration en CO_2 .

La détermination du confort ainsi que la mesure de celui-ci est une problématique importante. La plupart des approches utilisées actuellement visent à sélectionner un nombre restreint de facteurs, les plus représentatifs. Par exemple la concentration de CO_2 dans l'air pour la qualité de l'air, la température et l'humidité relative de l'air pour le confort thermique, ... [15].

La recherche d'un confort global est donc particulièrement complexe. Il faut ajouter à cela que le ressenti des utilisateurs comporte aussi une bonne part de subjectivité en fonction du contexte existentiel : l'âge, l'habillement, l'activité pratiquée, etc. Il faudra alors trouver un bon compromis entre les différents facteurs liant les paramètres de confort pour améliorer le ressenti global dans un local.

Très peu de travaux ont permis d'avoir une méthodologie de mesure du confort global au sein d'un bâtiment. Rohles et al. [16] ont mené une étude visant à développer un indice d'évaluation de l'acceptabilité de l'environnement intérieur. Leur résultat présente l'avantage de déterminer la contribution de chaque composante au confort, afin de prioriser plus tard les besoins des occupants (éq. 1).

$$G = 30,1\% HT + 24\%V + 24\%O + 21,9\%A \quad (1)$$

Avec G : Global, HT : Hygrothermique, V : Visuel, O : Olfactif, A : Acoustique

Cependant, elle présente une limitation majeure, reconnue même par les auteurs : le mécanisme de pondération. Bruant [17] rapporte cette limitation en signifiant que cette approche suppose une additivité des inconforts. Il suggère ainsi qu'une méthode de pondération non-linéaire pourra prendre en compte des valeurs ayant un écart important avec la note finale. Chiang et Lai [18] proposent un indice (équation 2) agréant cinq catégories de l'environnement intérieur : le confort (A), hygrothermique (HT), visuel (V), la qualité de l'air intérieur (QAI) et l'environnement électromagnétique (EM).

$$I_{CL} = 0,203 \cdot S_A + 1,164 \cdot S_V + 0,208 \cdot S_{HT} + 0,29 \cdot S_{QAI} + 0,135 \cdot S_{EM} \quad (2)$$

Où : S_x est le score de la composante x

Abadie, et al. [19] ont développé l'indice TAIL dans le cadre du projet Alliance for Deep RENovation in buildings. Cet indice est utilisé avant et après les actes de rénovation. Ils proposent de noter quatre catégories de confort référencées par les quatre lettres de l'acronyme, T : « Thermal confort » ; A : « Acoustic confort » ; I : « Indoor air quality » et L : « Luminous confort ».

Une note globale sur 4 est également indiquée en signe romain et agrège les quatre catégories.

En synthèse, nous retenons que l'approche de Rohles et al. [16], qui suppose une additivité de l'inconfort, est limitée. L'approche de Chiang et Lai [18] quant à elle, est aussi limitée par l'intégration du score définissant l'environnement électromagnétique, perçu comme non pertinent dans le concept de bâtiment à haute qualité environnementale [20]. L'approche d'Abadie, et al. [19] ne s'intéresse qu'au secteur tertiaire et n'a pas été prouvée sur des bâtiments de type scolaire. Néanmoins, il est à retenir qu'il est possible d'évaluer à partir d'un indicateur global, la perception de confort des occupants intégrant leurs exigences hygrothermique, acoustique, visuel et olfactif. Il est alors opportun, dans un contexte climatique tropical, de définir pour les occupants des bâtiments et en particulier, ceux des bâtiments scolaires, un indicateur de confort global, intégrant mieux les données propres à cet environnement climatique et tenant compte des limites des travaux antérieurs [21].

Parmi les méthodes d'évaluation du confort dans le bâtiment, nous pouvons noter la mesure du confort par le relevé des paramètres physiques et la mesure de confort par des questionnaires. Habituellement dans les salles de classe en particulier, les outils les plus utilisés pour spécifier le confort, sont fondés sur des mesures des paramètres physiques liés aux composantes de confort (température, humidité relative, éclairage, ...). Les données mesurées sont ensuite comparées à des données normalisées. Cependant, la prise en compte individuelle de ces indicateurs et la non intégration de certains aspects importants, comme le contexte et la variabilité interindividuelle, font qu'ils ne sont pas complètement pertinents pour rendre compte du confort réellement perçu par les occupants d'un local. Leur précision repose sur la performance des appareils de mesure et de la méthodologie de relevé des données. Dans le souci d'impliquer l'occupant dans l'évaluation de son confort dans le bâtiment, les enquêtes sur site paraissent des outils plus objectifs. Des questions fermées sont formulées sur les paramètres caractéristiques du confort et adressées aux personnes qui réalisent les expériences. Cet outil permet d'aboutir à des indicateurs de prise de décision. Dans la présente étude, les deux approches ont été utilisées en vue de mieux cerner les perceptions des occupants (étudiants).

La démarche d'établissement d'un indicateur de confort global est de partir de plusieurs critères de décisions, plus ou moins significatifs pour obtenir un indicateur décisionnel global, sans pour autant dégrader la pertinence et l'importance des critères initiaux. De ce fait, le recours à une méthode d'aide à la décision est recommandé.

Les méthodes d'analyse multicritère ont pour but la résolution des problèmes d'aide à la décision multicritère. Elles sont confrontées à deux limites : l'une liée au manque de données fiables sur une durée suffisante, ce qui peut empêcher la construction ou la validation de la méthode ; l'autre liée à la technicité inhérente à de telles méthodes puisque ces dernières nécessitent l'usage de concepts délicats qui peuvent déboucher sur des résultats erronés ou une analyse confuse.

Il existe de nombreuses méthodes d'aide à la décision multicritère. Elles peuvent être catégorisées selon trois approches : l'approche à préférence a priori, l'approche à préférence progressive et l'approche à préférence a posteriori.

L'approche à préférence a priori est utilisée lorsque le décideur peut exprimer ses préférences de manière explicite avant de commencer à comparer les alternatives. Cette approche permet de structurer le processus de prise de décision en utilisant des informations sur les préférences du décideur pour guider l'évaluation et la sélection des alternatives. Cependant, elle peut nécessiter des efforts supplémentaires pour déterminer les poids des critères de manière précise et peut être sensible aux variations dans ces poids. Parmi les principales méthodes appartenant à cette approche nous retrouvons la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), de Chen and Hwang [22]; AHP (Analytic Hierarchy Process) de Saaty L. [23]; UTA (Utilités Additives) de Jacquet-Lagrange and Siskos [24].

Contrairement à l'approche à préférence a priori, l'approche à préférence progressive permet au décideur d'ajuster ses préférences au fur et à mesure qu'il acquiert plus d'informations sur les alternatives, ce qui peut conduire à des décisions plus éclairées et mieux informées. Cependant, cette approche peut être plus complexe à mettre en œuvre car elle nécessite des itérations et des ajustements répétés des préférences. Parmi les méthodes de cette approche, nous pouvons citer la méthode ÉLECTRE : ELimination Et Choix Traduisant la REalité de Roy, [25], ainsi que les divers développements qu'elle a connus ; la méthode MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) de Keeney and Raiffa, [26] ; et la méthode PROMÉTHÉE de Mareschal, Brans and Vincke [27].

L'approche à préférence a posteriori permet au décideur de prendre du recul et d'évaluer globalement les résultats avant de formuler ses préférences. Cette approche s'utilise quand le décideur préfère évaluer les alternatives de manière globale et formuler ses préférences sur la base des résultats agrégés, avec des préférences relativement stables et ne nécessitant pas

d'ajustements progressifs. Cependant, elle peut nécessiter des évaluations plus approfondies des alternatives dès le début du processus de prise de décision. On peut citer par exemple la méthode de somme pondérée (Weighted Sum Method), la méthode de produit pondéré (Weighted Product Method), la méthode de rang, la méthode VIKOR : ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, la méthode MAVT : Multi-Attribute Value Theory ([28], [29], [30]).

Il faut remarquer que certaines méthodes adoptent plusieurs des approches selon les conditions d'utilisation. La méthode AHP par exemple, bien qu'elle soit généralement considérée comme une méthode à préférence a priori, certaines de ses extensions permettent d'incorporer des préférences progressives, où les évaluations peuvent être ajustées au fil du temps. Il est également possible avec cette méthode d'incorporer des préférences a posteriori, où le décideur évalue les alternatives sur les critères avant d'exprimer ses préférences globales.

De ce fait, nous avons porté notre choix sur le processus d'analyse hiérarchique développé par Saaty [23]. Elle emprunte à chacune des approches différents éléments pouvant interagir les uns avec les autres, afin d'aboutir à une approche systémique. En plus d'être assez simple et souple dans son utilisation, ladite méthode est la seule permettant de vérifier la cohérence de l'ensemble des jugements de comparaison avant la décision finale. L'inconvénient de cette méthode est l'instabilité du classement des différentes alternatives dans le cas où le problème à traiter contient un grand nombre d'alternatives.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 MATÉRIEL

2.1.1 ZONE D'ÉTUDE

Notre étude est faite en République du Bénin, pays situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer (entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude Nord et les méridiens 1° et 30°40' de longitude Est). La République du Bénin a une superficie de 114 763 km² et possède deux (02) types de climat :

- Au Sud, un climat équatorial présentant une forte humidité, avec une alternance de saisons sèches (de novembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre) et de saisons des pluies (d'avril à mi-juillet et de mi-septembre à octobre): type Aw
- Au centre et au nord, un climat tropical. Une saison sèche de novembre à avril et une saison des pluies de juin à septembre : type Bsh

Dans le cadre de l'étude, le bâtiment retenu est une salle de classe faite en paillote (Amphi-Paillote A) à l'École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC). La paillote a une surface utile de 225 m² au sol, construite en 2018 et peut abriter 250 étudiants (fig.1). Sa situation géographique est de 6°24'49" N ; 2°20'22 E. Le local étudié est situé dans la commune d'Abomey-Calavi, au Sud du Bénin où règne un climat tropical humide.



Fig. 1. Bâtiment retenu pour l'étude

Il est construit en maçonnerie semi-lourde (brique de ciment, crépis avec un enduit au ciment à l'intérieur et à l'extérieur) et comprend un niveau sur terre-plein. Une peinture de couleur beige badigeonne les parois intérieures et extérieures. Le bâtiment est isolé des autres. Il existe des ventilateurs pour assurer la ventilation quand la convection naturelle n'arrive pas à assurer les besoins olfactifs. L'air neuf transite alors dans le local à travers les portes et les fenêtres en lamelle de simple vitrage de type Naco. L'entrée principale est orientée vers le Sud. La toiture est en tuile ondulée avec 4 versants. Les côtés Ouest et Est de la salle sont identiques et ont chacun quatre rangées de fenêtres de longueur = 3,50 m et de largeur = 0,95 m. Au sol, cette salle a une surface carrée.

2.1.2 QUESTIONNAIRE D'ENQUÊTE

En dehors des relevés des paramètres physiques, une étude du ressenti réel des occupants a été effectuée dans le souci d'impliquer l'occupant dans l'évaluation de son confort à l'intérieur du bâtiment. A cet effet, nous avons effectué une enquête sur site. Des questions fermées sont formulées sur les paramètres caractéristiques du confort et adressées aux étudiants présents dans la salle. La fiche d'enquête est constituée par une série de 36 questions réparties en sept parties. Une première partie introductive pour présenter l'objectif de l'étude et une brève explication de la notion de confort global. La seconde partie fait part des informations générales sur l'enquêté. A ce niveau, le nom est optionnel cependant, chaque enquêté a été repéré par un numéro. De la troisième à la sixième partie, il a été respectivement abordé des questions relatives au confort visuel, acoustique, hygrothermique et olfactif. La septième partie présente une synthèse et se rapporte au confort global.

2.1.3 CHOIX DES PARAMÈTRES À MESURER

D'après l'étude de Olissan et al. [31], il est retenu que contrairement aux pays tempérés où la température a un effet plus important par rapport à l'humidité sur le confort thermique, dans la bande côtière du Bénin, l'humidité relative paraît plus prépondérante par rapport à la température. L'humidité relative devient alors le facteur discriminant dont dépend le confort thermique dans la bande côtière du Bénin. De même en considérant les limites de vitesse d'air ambiant admises en climat chaud, ces auteurs ont constaté que les limites du taux d'humidité admises pour garantir le confort décroissent avec la température pour une même vitesse de l'air ambiant. Plus la température est élevée, plus basses seront les limites admises du taux d'humidité relative pour permettre à l'air ambiant de faire évaporer les pertes d'eau libérées par les glandes sudoripares. Par contre, pour une même température, les limites d'humidité relative croissent avec la vitesse de l'air ambiant, c'est-à-dire que des valeurs plus élevées d'humidité relative garantiraient le confort thermique par la capacité de l'air à faire évaporer la sueur. Ainsi donc, l'indice HT se définit en fonction de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air.

La norme EN 12464-1 prescrit les exigences d'éclairage vis-à-vis des personnes présentes sur des lieux de travail intérieurs. Pour les salles de classe, le niveau d'éclairage moyen est de 500 lux avec un UGR (indice d'éblouissement unifié) inférieur à 19, une uniformité de lumière supérieure ou égale à 0,6 et un indice de rendu des couleurs supérieur ou égal à 80 sont recommandés par cette norme. Les équipements de mesure disponibles ont permis d'évaluer le niveau d'éclairage des locaux. En effet, le niveau d'éclairage est un élément essentiel pour assurer le confort lumineux dans n'importe quel espace, que ce soit à la maison, au bureau, dans les écoles ou dans les lieux publics. Cela facilite la lecture, le travail sur écran, les activités manuelles et toutes les tâches visuelles en général. Une bonne lisibilité réduit la fatigue oculaire et améliore la productivité. Des études ont montré que le niveau d'éclairage peut avoir un impact sur la performance cognitive et l'apprentissage. Un bon éclairage dans les salles de classe et les environnements d'apprentissage favorise une meilleure concentration et une rétention d'informations accrue [32]. C'est pourquoi, le niveau d'éclairage est utilisé ici comme indice de confort visuel.

Dans une salle de classe, l'indicateur de confort acoustique est une mesure importante pour assurer un environnement d'apprentissage propice à la concentration, à la compréhension et à la communication. Un bon confort acoustique dans une salle de classe permet aux apprenants d'entendre clairement le professeur, les discussions en groupe et les présentations, tout en minimisant les distractions sonores qui pourraient nuire à l'apprentissage. Le Niveau sonore équivalent (Leq) est une mesure importante pour évaluer le niveau sonore moyen dans un environnement donné sur une période de temps spécifique. Cette mesure est utilisée dans divers contextes pour évaluer le bruit ambiant et son impact sur les personnes et l'environnement. Le Leq est utilisé pour évaluer le confort acoustique dans différents espaces tels que les lieux de travail, les établissements d'enseignement, les usines, les espaces publics, les zones résidentielles, etc. Dans une salle de classe, il est souhaitable de maintenir un Leq à un niveau approprié, pour favoriser une ambiance calme et propice à l'apprentissage.

En ce qui concerne le confort olfactif, la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) est un indicateur essentiel du confort olfactif dans un environnement intérieur. Bien que le CO₂ soit principalement utilisé comme indicateur de la qualité de l'air, il joue également un rôle important dans le confort olfactif.

2.1.4 APPAREILS DE MESURE ET OUTILS INFORMATIQUES

Les appareils de mesure des différents paramètres retenus ainsi que leurs spécifications techniques sont présentés sur la figure 2.

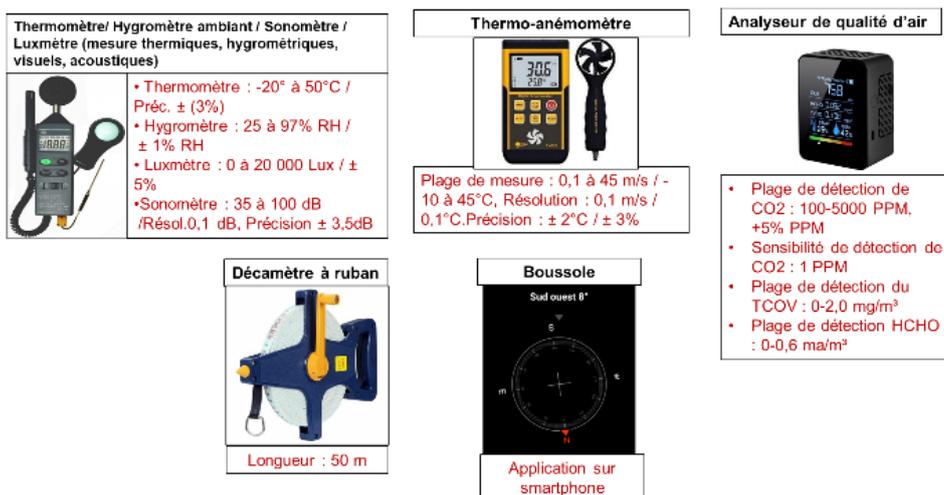


Fig. 2. Appareils de mesure

Le traitement de texte a été effectué avec le logiciel Word 2021, le traitement des données d'enquête recueillies a été fait avec les logiciels Excel 2021 et Origin Pro 2021 ainsi que les courbes qui en résultent.

2.2 MÉTHODE

2.2.1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

La démarche méthodologique adoptée dans cette étude s'est intéressée au prime abord à la revue bibliographique sur le confort afin de mieux appréhender le contexte. Cela a permis de dégager les paramètres qui ont servi de base pour l'évaluation de la performance en matière de confort dans le bâtiment identifié. Il a été ensuite retenu les indicateurs de confort liés à chaque composante.

Après cette étape, il a été ciblé un local type (salle de classe), avec des étudiants. Les étudiants ont été soumis à une enquête de satisfaction du point de vue du confort global dans leur classe, sur la base d'un questionnaire élaboré, suivi d'une note explicative sur la démarche.

Plusieurs campagnes d'essais ont été effectuées en période chaude, puis en période fraîche.

Les fiches d'enquête ont été analysées et les résultats moyennés obtenus ont été interprétés. Il a été utilisé des relations de calcul de la moyenne statistique et de l'écart-type pour l'analyse des différentes données obtenues.

Dans la mise en œuvre de l'approche du processus de l'analyse hiérarchique dans le cadre de notre étude, nous avons constitué la hiérarchie. Il s'agit bien des indices/paramètres et sous-indices caractéristiques de chacune des composantes du confort global (composante hygrothermique, visuelle, acoustique, olfactive). Une fois cette hiérarchie établie, nous avons déterminé leurs poids, puis celui des sous-composants pour la constitution des matrices de comparaison binaire pour chaque niveau, à partir des résultats de l'enquête. Cela a permis d'aboutir à un modèle d'indicateurs de confort global qui tient compte de quatre indicateurs préalablement retenus.

2.2.2 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE

L'échantillonnage permet en effet de rationaliser les efforts et ressources liés à une étude. On distingue deux familles d'échantillonnage (fig.3) : l'échantillonnage probabiliste ou aléatoire et l'échantillonnage non probabiliste ou non aléatoire (empirique).

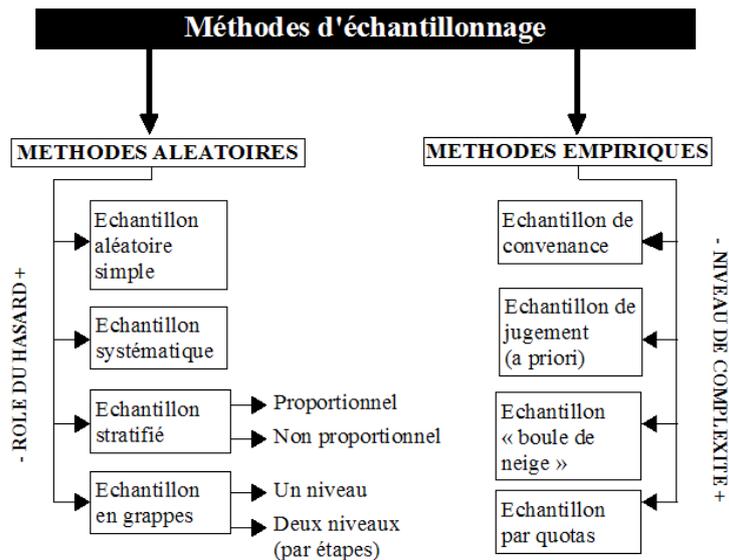


Fig. 3. Différentes méthodes d'échantillonnage

Globalement, en théorie, seul un échantillonnage aléatoire permet d'obtenir des résultats représentatifs, car il repose sur la théorie des probabilités ; ceci sous réserve de l'absence d'autres biais. En pratique, on se tourne le plus souvent vers une méthode de sondage empirique comme par exemple la méthode des quotas [33], car le recours aux méthodes de sondage aléatoire est difficile à mettre en œuvre et requiert en général l'intervention d'un spécialiste.

Dans la présente étude, le choix de la zone d'étude se justifie par la difficulté des apprenants des écoles primaires et secondaire à décrire leur perception réelle de confort en vue d'une étude plus rigoureuse. S'agissant de la salle retenue, son choix a été fait car elle évite toute influence d'une salle voisine sur l'étude des performances de confort en son sein. Une fois la salle retenue, les occupants ont été choisis au hasard. Il s'agit des étudiants en situation d'apprentissage à l'intérieur de ladite salle.

2.2.3 MÉTHODE DE CONSTRUCTION D'INDICATEURS DE CONFORT GLOBAL

La méthode d'analyse multicritère hiérarchique est la méthode dont Thomas L. Saaty est l'inventeur, l'architecte et le premier théoricien. Cette méthode repose sur trois concepts :

- La structuration hiérarchique : décomposition du problème en sous problèmes.
- La structuration des priorités : classement des éléments selon leur importance relative.
- La cohérence logique : les éléments sont regroupés et classés de façon logique.

Pour trouver la ou les solutions idéale(s), il faut appliquer au problème à résoudre l'algorithme ci-après :

ETAPE 1 :

1. Construire la hiérarchie.
2. Établir le poids des composantes ou critères et sous-critères.
3. Écrire les matrices de comparaison binaire (matrices de décision) pour chaque niveau, en se référant à l'échelle de comparaison binaire de la méthode AHP (voir tableau 1).

Tableau 1. Echelle de comparaison binaire de la méthode AHP [23]

Appréciation	Explication	Degré d'importance
Importance égale de deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété	1
Faible importance d'un élément par rapport à un autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre	3
Importance forte d'un élément par rapport à un autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre	5
Importance attestée d'un élément par rapport à un autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique	7
Importance absolue d'un élément par rapport à un autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre, sont aussi convaincantes que possible	9
Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations	2, 4, 6, 8
Si l'élément <i>i</i> se voit attribuer l'un des chiffres précédents (<i>Cij</i>) lorsqu'il est comparé à l'élément <i>j</i> , <i>Cij</i> admet une valeur réciproque qui est $Cji = 1/Cij$ (il s'agit d'une comparaison entre <i>i</i> et <i>j</i>).		Valeurs réciproques : 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9

ETAPE 2 :

- 1. Déterminer les poids des critères**
- 2. Évaluer la cohérence des jugements.**

Si le ratio de cohérence est inférieur ou égal à 10 %, l'appréciation est jugée cohérente. L'indice de cohérence est donné par la formule 3.

$$IC = \frac{CM - N}{N - 1} \tag{3}$$

Avec *IC*: Indice de cohérence ; *CM*: Cohérence moyenne et *N*: nombre d'éléments.

Pour obtenir la cohérence moyenne, on multiplie chaque colonne de la matrice de comparaison binaire non normalisée par le poids du critère associé. On calcule alors pour chaque ligne la somme des éléments. La cohérence de chaque critère est donnée par la somme précédente divisée par le poids du critère de la ligne. En sommant la cohérence de chaque critère (composante) et en divisant par le nombre de critères, on obtient la cohérence moyenne. Le ratio de cohérence (RC) est alors donné par la formule 4.

$$RC = \frac{\text{Indice de cohérence}}{\text{Cohérence aléatoire}} \tag{4}$$

La cohérence aléatoire est fonction du nombre de critère et est donnée par le tableau 2.

Tableau 2. Table des cohérences aléatoires

Nombre de Critères	2	3	4	5	6	7
Cohérence aléatoire	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

Si les ratios de cohérence sont bons (inférieurs à 10%) alors on peut passer à l'étape suivante, sinon il est préférable de recommencer la comparaison binaire.

ETAPE 3 :

1. **Évaluer les poids de chaque critère par rapport au critère supérieur**
2. **Sélectionner uniquement les sous-critères de poids pondérés préférentiels.**
3. **Évaluer les actions/projets.**
4. **Décider de l'action à choisir.**

Dans la présente étude, les poids (obtenus au point 6) ont été retenus pour établir le modèle de confort global.

Méthode de normalisation adoptée

Pour qu'une équation comportant plusieurs termes soit correcte, il est important de ne additionner que des paramètres de même unités. Ainsi donc, il est nécessaire de rendre adimensionnelle la relation obtenue. Les possibilités offertes pour rendre adimensionnelle les paramètres sont par exemple la méthode de normalisation Min-Max ou la méthode de normalisation Z-score.

La normalisation min-max est utile lorsqu'il est souhaité de mettre toutes les variables dans un intervalle spécifique, tel que [0, 1]. Dans ce cas, la variable normalisée se calcule par la relation (5) comme suit :

$$V_{\text{NORMALISEE}} = \frac{V - V_{\text{MIN}}}{V_{\text{MAX}} - V_{\text{MIN}}} \quad (5)$$

V est la valeur originale (Valeur mesurée dans le cas de cette étude), V_{min} est la valeur minimale de la variable, V_{max} est la valeur maximale de la variable.

La Normalisation Z-Score (Standardisation) est utilisée lorsque des variables sont à mettre à l'échelle standard, avec une moyenne de 0 et un écart type de 1. Cela permet de centrer les données autour de zéro. Dans ce cas, la variable normalisée se calcule par la relation (6) :

$$V_{\text{NORMALISEE}} = \frac{V - \bar{M}}{\sigma} \quad (6)$$

où V , est la valeur originale (Valeur mesurée dans le cas de cette étude), \bar{m} est la moyenne de la variable, σ est l'écart type de la variable. Pour cette étude, toutes les valeurs à normaliser se sont basées sur la normalisation min-max.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 DONNÉES D'ENQUÊTES

3.1.1 ANALYSE DE LA CONVENANCE DE L'ÉCHANTILLON ENQUÊTÉ

Au total, 114 étudiants (36 femmes et 78 hommes) ont été soumis aux enquêtes. Cette population est en majorité jeune avec 85 étudiants ayant au plus 20 ans (74,56%) et 29 étudiants entre 20 ans et 30 ans.

En effet, du point de vue du confort hygrothermique, la résistance cutanée varie tout au long de la vie en raison des changements naturels qui se produisent dans la structure et la fonction de la peau [34]. Ces variations peuvent influencer la sensibilité au froid et la capacité de thermorégulation, en particulier chez les nouveau-nés, les personnes âgées et toute autre personne dont la peau est sujette à des changements liés à l'âge. Chez les adolescents et les jeunes adultes (13-25 ans), la peau atteint généralement un niveau de résistance optimale. Les glandes sébacées et sudoripares fonctionnent efficacement pour maintenir la peau hydratée et protégée. La capacité à réguler la température corporelle est à son meilleur niveau.

En ce concerne le confort visuel, l'acuité visuelle, qui représente la netteté avec laquelle nous pouvons distinguer les détails, peut varier en fonction de l'âge en raison de changements naturels qui surviennent dans les structures de l'œil. Chez les adolescents et jeunes adultes, l'acuité visuelle atteint généralement son pic. Les jeunes adultes ont généralement une excellente acuité visuelle, avec la capacité de voir les détails fins à différentes distances.

S'agissant du confort acoustique, la perception sonore peut varier en fonction de l'âge en raison des changements physiologiques qui se produisent dans l'oreille et dans le système auditif. Cependant, les adolescents et les jeunes adultes ont perception auditive généralement optimale. Les jeunes adultes entendent une large gamme de fréquences, des graves aux aigus.

La perception olfactive également varie également en fonction de l'âge en raison de changements qui se produisent dans les cellules olfactives et les structures associées du système olfactif. Chez les adolescents et les jeunes adultes, la perception olfactive est généralement à son niveau optimal. Les jeunes adultes peuvent identifier une grande variété d'odeurs avec précision. En somme, l'échantillon enquêté est apte à traduire valablement les ressentis pour chacune des composantes de confort global présentées.

3.1.2 ANALYSE DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES RELEVÉS AU COURS DES ENQUÊTES

Les paramètres climatiques mesurés à l'intérieur d'une salle de classe entre juin et juillet 2022 sont présentés dans le tableau 3. Ces données de paramètres climatiques retenues sont moyennées sur une journée typique entre 08h00 et 18h00.

Tableau 3. Valeurs moyennes des paramètres climatiques relevées

Heure	T moy. (°C)	HR (%)	Vit. (m/s)	Niveau sonore éq. (dB)	E (Lux)	CO ₂ (ppm)
08:00	27,7±3%	81,9±1%	1,0±3%	51,7±5%	254,0±5%	539±5%
12:00	28,6±3%	61,8±1%	0,2±3%	57,4±5%	400,3±5%	610±5%
14:00	29,9±3%	50,5±1%	0,1±3%	57,5±5%	322,5±5%	637±5%
18:00	29,3±3%	55,6±1%	0,6±3%	48,1±5%	178,3±5%	687±5%
Moy	28,9±3%	62,5±1%	0,5±3%	53,9±5%	288,8±5%	618,7±5%
σ	0,8	11,9	0,4	4,0	82,1	53,5

Olissan et al. [31], dans leurs travaux, ont établi des situations de confort pour les locaux non climatisés en région tropicale. Le triplet de paramètres : température de l'air ; vitesse et plage d'humidité relative, présenté sur le tableau 4 ont été prises en compte pour leur étude. En rapprochant aux données climatiques mesurées et moyennées du tableau 3 à celles du tableau 4, les points correspondant aux heures de mesure (8h et 12h) appartiennent à la zone de confort hygrothermique définies par Olissan et al.

Tableau 4. Zone de confort hygrothermique pour des locaux non climatisés, Olissan et al. [31]

v (m/s)	RH (%)	T°C								
		25	26	27	28	29	30	31	32	33
0,02	min	66	64	60	58	54	52	48	46	44
	max	84	80	78	74	70	68	64	62	60
0,2	min	68	68	64	62	56	54	50	48	44
	max	90	86	82	78	72	70	68	64	60
0,4	min	78	74	70	66	60	56	52	48	44
	max	94	90	86	82	78	74	68	64	60
1,2	min	88	82	78	72	66	62	56	50	46
	max	100	100	94	88	82	78	72	66	62
1,5	min	90	84	78	74	68	62	56	52	46
	max	100	100	94	90	84	78	72	68	62

Les valeurs des paramètres moyennées sur une journée correspondent à une situation de confort relative, avec un besoin d'humidification, ou un léger chauffage, ou une réduction de la vitesse de l'air pour obtenir pleinement le confort. Cette analyse n'est que théorique.

Pour la validation de ces hypothèses, une confrontation faite avec les données des enquêtes a permis de retenir qu'en dehors de 21% des enquêtés qui estiment que la température du local est neutre, 53% souhaitent un rafraîchissement et seulement 26% ont une sensation de légère fraîcheur. Ce résultat justifie l'importance de la prise en compte des paramètres d'ordre personnel tels que le métabolisme et l'habillement, dans la prédiction du confort, car pendant que l'hypothèse d'un

chauffage a été émise tantôt, c'est plutôt un rafraîchissement du local qui a été souhaité par la majorité des occupants quelques heures plus tard.

En ce qui concerne le confort visuel, la norme EN 12464-1 relative à lumière et l'éclairage des lieux de travail prévoit pour les salles de cours du soir et salle de cours pour adulte un éclairage moyen de 500 lux, un URG de 19 et un indice de rendu de couleur de 80. Dans la salle étudiée, l'éclairage moyen sur plan de travail est de $288,8 \pm 82,1$ lux. Une situation d'inconfort est alors perçue. Ce constat a été également fait lors des enquêtes.

S'agissant du confort olfactif, La concentration en CO₂ est l'indicateur utilisé. La valeurs moyenne de $618,7 \pm 61,7$ ppm. Quand un environnement est bien ventilé, la concentration en CO₂ est entre 300 et 1000 ppm. Dans cette étude, les vitesses de l'air obtenues sont des éléments révélateurs d'un bon renouvellement de l'air. C'est pourquoi seulement 7% des enquêtés qualifient d'inacceptable la qualité de l'air dans le local étudié.

Pour le confort acoustique, sur la base de l'échelle de niveau sonore, 80% des enquêtés situent leur perception sonore entre 40 dB (bruit dans une rue résidentielle) et 70 dB (bruit à l'intérieur d'une salle de classe). La valeur acoustique mesurée, est en moyenne de $53,9 \pm 4,0\%$, elle correspond bien à la situation décrite par les enquêtés.

3.2 PRÉFÉRENCES DE CONFORT PAR LES OCCUPANTS

Un résultat obtenu après les enquêtes est le classement par ordre de préférence des famille de composantes du confort global (figure 4). Il s'agit des composantes hygrothermique, visuelle, acoustique et olfactive. Ces composantes peuvent occuper les rangs 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} selon l'ordre de préférence des occupants.

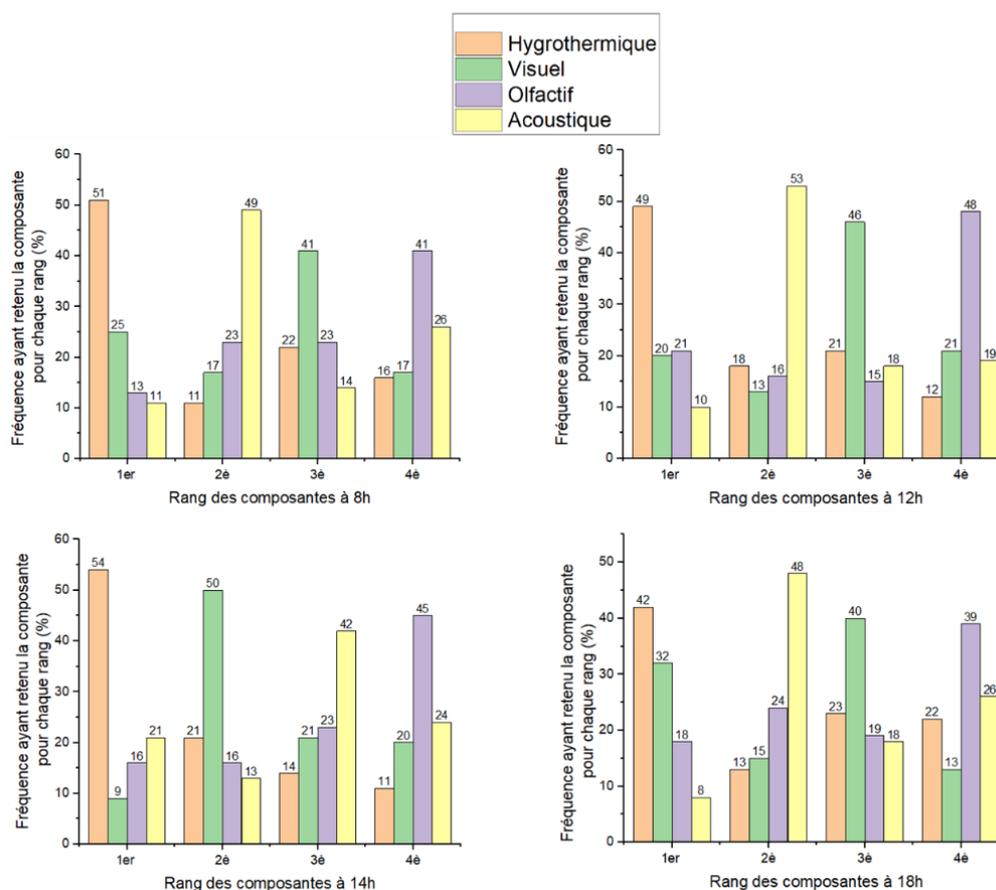


Fig. 4. Fréquence des composantes de confort dans la salle de classe, en fonction de l'heure de prise de mesure

Une synthèse des données permet de ressortir sur une journée typique le classement moyen donné par la figure 5.

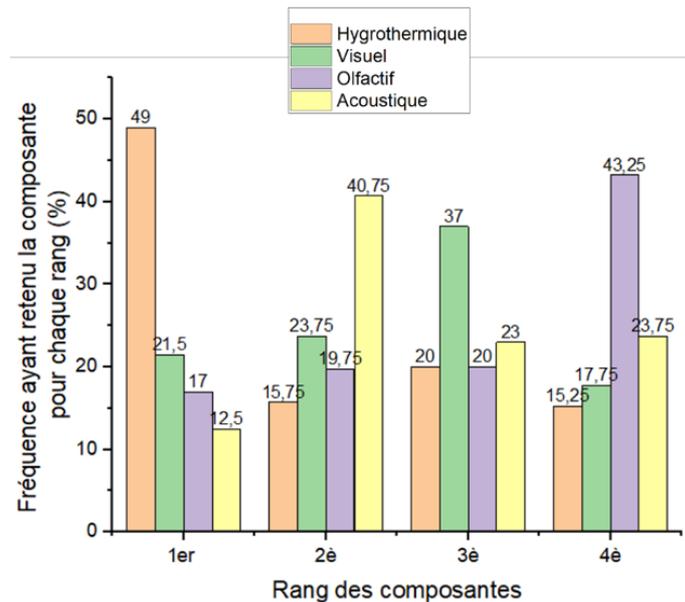


Fig. 5. Fréquence des composantes de confort global selon le choix des enquêtés, sur une journée typique

Le premier jugement effectué a permis de retenir le confort hygrothermique comme la première (principale) composante du confort global parce qu'étant la plus citée en première place. La composante suivante, plus citée en deuxième place est le confort acoustique. Les composantes confort visuel et confort olfactif occupent respectivement les troisième et quatrième places.

Cependant, en analysant de cette façon, on serait tenté de négliger l'importance de la préférence des occupants. De ce fait, le processus de comparaison adopté tient compte d'une pondération des rangs des composantes.

3.3 FORMULATION DU MODÈLE DE CONFORT GLOBAL

3.3.1 APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP [30]

La formulation du modèle de confort global s'est basée sur la méthode AHP de Saaty. La structuration hiérarchique proposée dans cette étude est d'un niveau du fait de la complexité de comparaison entre les paramètres physiques caractéristiques de chacune des composantes. Ainsi, pour les quatre composantes, la table d'appréciation selon Saaty est présentée dans le tableau 5.

Tableau 5. Table de comparaison binaire pour les quatre composantes suivant leur rang

Rang de la composante	Composante (critère)	HT	V	A	O
Premier	HT	1,00	4,00	6,00	5,00
	V	0,25	1,00	3,00	2,00
	A	0,17	0,33	1,00	2,00
	O	0,20	0,50	0,50	1,00
Deuxième	HT	1,00	0,33	0,17	0,50
	V	3,00	1,00	0,25	2,00
	A	6,00	4,00	1,00	5,00
	O	2,00	0,50	0,20	1,00
Troisième	HT	1,00	0,20	0,50	1,00
	V	5,00	1,00	4,00	5,00
	A	2,00	0,25	1,00	2,00
	O	1,00	0,20	0,50	1,00
Quatrième	HT	1,00	0,50	0,25	0,17
	V	2,00	1,00	0,50	0,20
	A	4,00	2,00	1,00	0,25
	O	6,00	5,00	4,00	1,00

L'application de la méthode, AHP permet de ressortir pour chaque rang de composantes, les poids, l'IC et le RC suivants :

Tableau 6. Calcul des poids relatifs, indice et ration de cohérence des critères pour tous les rangs de composante

Rang de composante	Poids				IC (%)	RC (%)
	HT	V	A	O		
1 ^{er}	0,60	0,20	0,11	0,09	7,742	8,966
2 ^e	0,08	0,20	0,60	0,12	3,690	0,923
3 ^e	0,11	0,59	0,19	0,11	1,591	0,316
4 ^e	0,07	0,12	0,22	0,59	5,229	1,307

Toutes les appréciations sont jugées cohérentes parce que les ratios de cohérence sont tous inférieurs à 10 %. Les indicateurs par rang de composante peuvent s'écrire sous la forme :

Les indicateurs par rang de composante peuvent s'écrire respectivement sous la forme :

- Composante de rang 1^{er} : $I_{G1} = 0,60 \cdot HT + 0,20 \cdot V + 0,11 \cdot A + 0,09 \cdot O$
- Composante de rang 2^e : $I_{G2} = 0,08 \cdot HT + 0,20 \cdot V + 0,60 \cdot A + 0,12 \cdot O$
- Composante de rang 3^e : $I_{G3} = 0,11 \cdot HT + 0,59 \cdot V + 0,19 \cdot A + 0,11 \cdot O$
- Composante de rang 4^e : $I_{G4} = 0,07 \cdot HT + 0,12 \cdot V + 0,22 \cdot A + 0,59 \cdot O$

Il est important de rappeler que, pour l'indicateur global de confort dans le local considéré, le rang des composantes importe beaucoup sur la satisfaction globale des occupants. De ce fait, un processus de pondération par rang de composante est mis en oeuvre. La table de comparaison binaire et les poids issus de l'application de l'AHP sont donnés respectivement aux tableaux 7 et 8.

Tableau 7. Table de comparaison binaire pour les rangs de composantes

Rang de Composantes	1 ^{er}	2 ^e me	3 ^e me	4 ^e me
1 ^{er}	1,00	2,00	3,00	4,00
2 ^e me	0,50	1,00	2,00	3,00
3 ^e me	0,33	0,50	1,00	2,00
4 ^e me	0,25	0,33	0,50	1,00

Tableau 8. Calcul des poids relatifs, indice et ratio de cohérence des critères par composante

Poids par rang de composante				IC (%)	RC (%)
1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	4 ^e		
0,47	0,28	0,16	0,09	1,157	0,289

Cette appréciation est jugée cohérente parce que le ratio de cohérence est inférieur à 10 %. Nous écrivons alors l'indicateur du confort global sous la forme :

$$I_G = 0,47 \cdot I_{G1} + 0,28 \cdot I_{G2} + 0,16 \cdot I_{G3} + 0,09 \cdot I_{G4} \quad (7)$$

$$I_G = \begin{cases} 0,47(0,60 \cdot HT + 0,20 \cdot V + 0,11 \cdot A + 0,09 \cdot O) \\ + \\ 0,28(0,08 \cdot HT + 0,20 \cdot V + 0,60 \cdot A + 0,12 \cdot O) \\ + \\ 0,16(0,11 \cdot HT + 0,59 \cdot V + 0,19 \cdot A + 0,11 \cdot O) \\ + \\ 0,09(0,07 \cdot HT + 0,12 \cdot V + 0,22 \cdot A + 0,59 \cdot O) \end{cases}$$

Soit :

$$I_G = 0.3283 \cdot HT + 0.2552 \cdot V + 0.2699 \cdot A + 0,1466 \cdot O \quad (8)$$

A ce stade, il est important de faire une analyse du résultat obtenu. L'ordre de priorité des composantes du confort environnemental dans les salles de classe peut varier en fonction des préférences individuelles des besoins spécifiques des apprenants, des caractéristiques de l'environnement et des objectifs pédagogiques.

Cependant, dans le contexte climatique tropical, le confort hygrothermique est généralement considéré comme une priorité élevée dans les salles de classe. Maintenir une température et une humidité relative confortables est essentiel pour le bien-être des apprenants, leur concentration et leur capacité d'apprentissage. Des températures extrêmes ou un taux d'humidité inconfortable peuvent perturber l'attention et nuire à l'apprentissage. En deuxième position, en termes de priorité, vient le confort acoustique. Un environnement acoustique adapté favorise une communication claire entre l'enseignant et les apprenants, ainsi que des interactions efficaces entre les apprenants pendant les activités d'apprentissage. Réduire le bruit excessif et les nuisances sonores permet aux apprenants de se concentrer davantage sur les tâches académiques. Le confort visuel est également d'une grande importance. Une bonne qualité d'éclairage, naturel et artificiel, est essentielle pour une lecture aisée, une prise de notes et une interaction visuelle avec le matériel pédagogique. Un éclairage adapté peut également influencer l'humeur des apprenants et leur niveau d'attention. Le confort olfactif vient relativement (selon le milieu) en dernière position dans les salles de classe. Bien qu'il soit important d'assurer une bonne qualité de l'air intérieur et d'éviter les odeurs désagréables, cela est généralement considéré comme moins critique que le confort hygrothermique, acoustique et visuel pour l'environnement d'apprentissage.

3.3.2 ETABLISSEMENT DE L'INDICE DE CONFORT GLOBAL

Dans la session précédente, il a été établi l'expression de l'indicateur de confort global sous la forme :

$$I_G = 0.3283 \cdot HT + 0.2552 \cdot V + 0.2699 \cdot A + 0,1466 \cdot O.$$

Ainsi, il est question d'établir les corrélations permettant l'annotation des indices HT, V, A et O du modèle de confort global. A cet effet, les expressions décrivant les modèles retenus pour chaque composante ont été utilisées. L'annotation globale est déduite de la représentation individuelle des indices de chaque composante, en tenant compte des pondérations de chacune d'elles. Ainsi, l'indicateur global de confort va se présenter sous la forme de l'équation 8 par :

$$I_G = f \left\{ \begin{array}{l} \text{HT} \left\{ \begin{array}{l} \text{Température (T)} \\ \text{Humidité relative (HR)} \\ \text{Vitesse de l'air (v)} \end{array} \right. \\ \text{V} \{ \text{Niveau d'éclairage (E)} \\ \text{A} \{ \text{Niveau sonore équivalent (Léq)} \\ \text{O} \{ \text{Concentration en CO}_2 \quad (C_{CO_2}) \end{array} \right. \quad (8)$$

Avec

T : Température mesurée en °C ; HR : Humidité relative mesurée en % ; v : vitesse de l'air en m/s ; E : Niveau d'éclairage en lux ; $Léq$: Niveau sonore équivalent en dB ; C_{CO_2} : Concentration en CO_2 en ppm.

En retenant une même contribution de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air pour le confort hygrothermique, soit 1/3 de contribution pour chacun des paramètres, nous pouvons écrire l'équation (9) comme suit :

$$I_G = 0,3283 \cdot \frac{T+HR+v}{3} + 0,2552 \cdot E + 0,2699 \cdot Léq + 0,1466 \cdot C_{CO_2} \quad (9)$$

$$I_G = 0,1094 \cdot (T + HR + v) + 0,2552 \cdot E + 0,2699 \cdot Léq + 0,1466 \cdot C_{CO_2}$$

Ici, T en °C, HR en %, v en m/s, E en lux, $Léq$ en dB et C_{CO_2} en ppm.

Pour qu'une équation du genre soit correcte, il est important de n'ajouter que des paramètres de même unité. Pour cela, il a été procédé à une normalisation des données par la méthode dite normalisation min-max. Les plages définies ci-dessous ont été alors définies sur la base des conclusions des travaux antérieurs issus de la littérature [35], qui portent sur le confort et les recommandations en matière de confort :

- **Température de l'air** : Dans la région Sud du Bénin, les températures ont une faible amplitude. Les maximales varient de 28 à 32°C et les minimales de 23 à 26°C. Ces températures varient ainsi entre 23 et 32°C. Pour admettre des valeurs pour les conditions extrêmes de température, il a été proposé de retenir la plage de :

$$20^\circ C \leq T \leq 35^\circ C.$$

Ici, il est difficile de proposer une température de confort car, pour une température donnée, un couple de valeurs d'humidité relative et de vitesse de l'air permettront d'avoir le confort ou non.

- **Humidité relative de l'air** : Les valeurs d'humidité relative en dessous de 30 % exposent à une sensation de sécheresse de la peau, des démangeaisons, des irritations des yeux, du nez et de la gorge, ainsi qu'une sensation de gorge sèche. Il est ainsi recommandé une humidité relative d'environ 65%. Cependant, l'environnement climatique de la zone d'étude présente des spécificités qui induisent des valeurs d'humidité relative avoisinant 99%. La plage de mesure retenue pour l'humidité relative est alors de :

$$30\% \leq HR \leq 99\%$$

- **Vitesse de l'air** : Le choix de la plage de données de mesure de la vitesse de l'air est basé sur les travaux de Olissan et al., qui portent sur l'intervalle :

$$0,02m/s \leq v \leq 1,5m/s$$

- **Niveau d'éclairage** : La luminosité moyenne recommandée est de 500 lux, mais un niveau d'éclairage minimal courant est d'environ 300 à 500 lux pour une salle de classe standard. Pour les zones de travail spécifiques, telles que les zones de lecture, des niveaux d'éclairage plus élevés (500 à 750 lux) peuvent être recommandés pour assurer des conditions de travail confortables. Une zone spéciale, telle que le tableau blanc ou l'écran, peut nécessiter un éclairage plus élevé (750 à 1 000 lux) pour assurer une visibilité adéquate pour les présentations. Pour cela il est retenu la plage ci-après :

$$300 \text{ lux} \leq E \leq 1000 \text{ lux}$$

- **Niveau sonore équivalent** : Le seuil du calme se situe autour du niveau sonore équivalent de 20dB. Ce seuil correspond au bruit généré par un vent léger, un jardin calme ou le désert. Le seuil de danger en cas d'exposition prolongée est de 90 dB, correspondant au bruit d'un atelier mécanique. De ce fait, la plage a été

$$20 \text{ dB} \leq L_{\text{éq}} \leq 90 \text{ dB}$$

- **Concentration en CO₂** : Il est recommandé une limite maximale de 1000 ppm comme seuil de concentration en CO₂ dans une salle de classe. Au-delà de cette valeur, une très bonne ventilation est souhaitée pour dissiper le CO₂ contenu dans l'air. De même, des valeurs de concentration en CO₂ inférieures à 300 ppm seraient non réalistes car, du fait de la présence d'homme, il est impossible de constater une absence de CO₂. Ainsi, nous retenons la plage de mesure

$$300 \text{ ppm} \leq C_{\text{CO}_2} \leq 1000 \text{ ppm}$$

Il a été adopté ici la notation \bar{V} pour la valeur normalisée du paramètre V . Les calculs des valeurs normalisées des paramètres sont donnés respectivement par les expressions (10) à (15) :

$$\bar{T} = \frac{T - 20}{35 - 20} \quad (10)$$

$$\overline{\text{HR}} = \frac{\text{HR} - 30}{99 - 30} \quad (11)$$

$$\bar{v} = \frac{v - 0,02}{1,5 - 0,02} \quad (12)$$

$$\bar{E} = \frac{E - 300}{100 - 300} \quad (13)$$

$$\overline{\text{LEQ}} = \frac{\text{LEQ} - 20}{90 - 20} \quad (14)$$

$$\overline{C_{\text{CO}_2}} = \frac{C_{\text{CO}_2} - 300}{1000 - 300} \quad (15)$$

En tenant compte des valeurs normalisées, l'indice de confort global adimensionnel peut s'écrire :

$$I_G = 0,1094 \cdot (\bar{T} + \overline{\text{HR}} + \bar{v}) + 0,2552 \cdot \bar{E} + 0,2699 \cdot \overline{\text{LEQ}} + 0,1466 \cdot \overline{C_{\text{CO}_2}}$$

$$I_G = \frac{547 \cdot T}{75000} + \frac{547 \cdot \text{HR}}{345000} + \frac{547 \cdot v}{7400} + \frac{319 \cdot E}{875000} + \frac{2699 \cdot \text{LEq}}{700000} + \frac{733 \cdot C_{\text{CO}_2}}{3500000} - \frac{79387369}{178710000}$$

$$I_G = 0,00729 \cdot T + 0,00159 \cdot \text{HR} + 0,07392 \cdot v + 0,00036 \cdot E + 0,00386 \cdot \text{LEq} + 0,00021 \cdot C_{\text{CO}_2} - 0,44422 \quad (16)$$

L'indice I_G obtenu est propre aux salles de classe. Nous le renomons I_{GSC} (Indice Global pour salle de classe). Cet indice I_{GSC} établi permettra à tout évaluateur du confort dans le bâtiment de calculer l'indice du bâtiment audité du point de vue de son confort global. A cet indicateur a été joint une grille de situation des conditions de confort.

Du fait du processus de normalisation effectué, le confort global optimal se situe à 0,5 sur une échelle d'identification de 0 à 1. Nous définissons ainsi sur la figure 6, la grille de notation et d'évaluation du confort global.

L'indice 0,5 est l'indice de correspondance d'un confort global optimal. Du fait des spécificités de chaque occupant, il est admis que la zone $0,35 \leq I_{GSC} \leq 0,65$ représente la zone de confort global optimal. Dans cette zone, la température est agréable, la ventilation est adéquate, l'humidité relative est commode, les bruits sont réduits, la luminosité est correcte et très peu d'odeurs désagréables sont senties. Elle correspond à une zone où très peu d'insatisfaits sont observés. Cette zone favorise les meilleures conditions d'apprentissage. Un environnement confortable peut être lié à de meilleures performances académiques des apprenants. Des études ont montré que les apprenants ont tendance à mieux performer dans des salles de

classe où ils se sentent à l'aise. Les étudiants et les enseignants arrivent à mieux se concentrer et à participer aux séances d'apprentissage lorsqu'ils se sentent à l'aise dans leur salle de classe. Cette zone contribue à la santé et au bien-être des occupants de la salle de classe et contribue à réduire l'absentéisme des étudiants et des enseignants.

Les zones $0,15 \leq I_{GSC} < 0,35$ et $0,65 < I_{GSC} \leq 0,85$ représentent des zones de confort global acceptable. Dans ces zones, les paramètres tendent vers les valeurs de la zone de confort sans pour autant prendre des valeurs optimales. Elle correspond à une zone où peu d'insatisfaits peuvent être observés.

Les zones $0 \leq I_{GSC} < 0,15$ et $0,85 < I_{GSC} \leq 1$ représentent des zones de confort global limites. Dans ces zones, les paramètres tendent vers des valeurs extrêmes tout en restant dans la plage tolérable. Elle correspond à une zone où quelques insatisfaits peuvent être observés avec des plaintes liés à leurs sensations hygrothermique, visuel, acoustique et olfactif.

Les zones $I_{GSC} < 0$ et $I_{GSC} > 1$ correspondent à des zones d'inconfort global. Ces zones peuvent se caractériser par le risque de présenter 100% d'insatisfaits. Les paramètres dans cette zone sortent des limites tolérables. Il peut s'agir pour certains cas, de valeurs irréalistes comme une concentration en CO2 très faibles (inférieur à 300 ppm), des températures très basses, des niveaux sonores presque nul donnant l'aspect d'un « cimetière ». Cette zone s'observe également dans les cas d'une obscurité ou d'un éblouissement, pour des humidités relatives trop élevées ou très basses semblables à une sécheresse extrême, Des étudiants dans ces zones ne pourront pas suivre les cours, auront du mal à se tenir concentré et par conséquent, auront un mauvais rendement. Ils passent plus de temps à gérer leur inconfort qu'à se concentrer sur le contenu académique.

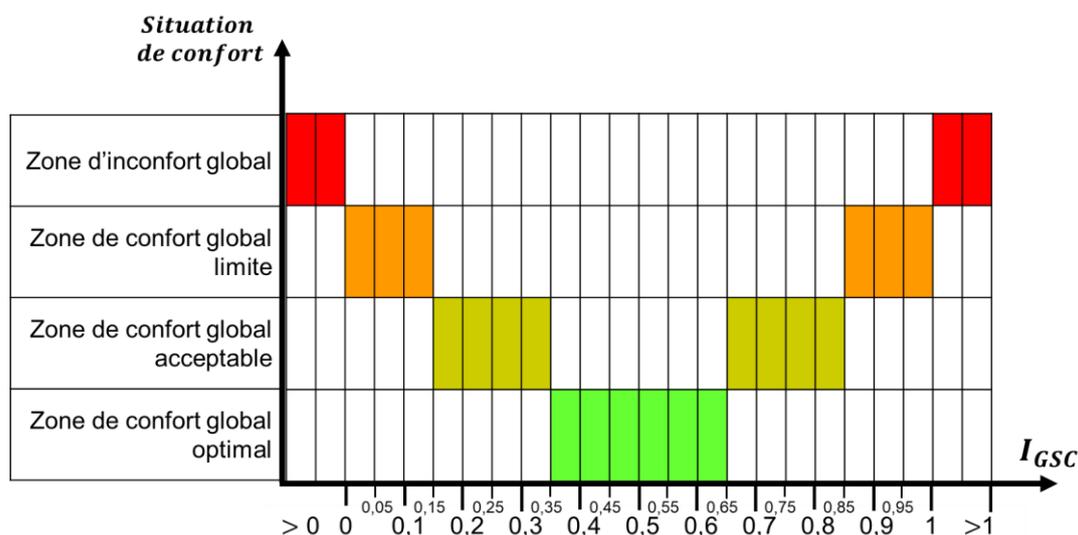


Fig. 6. Grille d'évaluation du confort global

L'inconfort prolongé peut augmenter le stress et l'anxiété des apprenants, ce qui peut avoir un impact négatif sur leur bien-être émotionnel et mental. Des niveaux élevés de stress peuvent également nuire à la santé physique des étudiants. Certains étudiants, en particulier ceux qui sont plus vulnérables ou ayant des besoins particuliers, peuvent être plus affectés par l'inconfort. Cela peut créer des inégalités en matière d'apprentissage, car certains étudiants auront du mal à s'adapter aux conditions inconfortables.

Cette situation peut faire perdre aux étudiants leur motivation à apprendre. Ils peuvent percevoir l'école comme un lieu désagréable et peu propice à l'apprentissage.

3.4 EVALUATION DE L'INDICE DE CONFORT GLOBAL DE LA SALLE D'ÉTUDE

3.4.1 EVALUATION PAR NOTATION CONVENTIONNELLE

Le dépouillement des données d'enquête permet de retenir une évaluation du confort dans la salle de classe par les occupants. La figure 7 présente les notes attribuées par les étudiants.

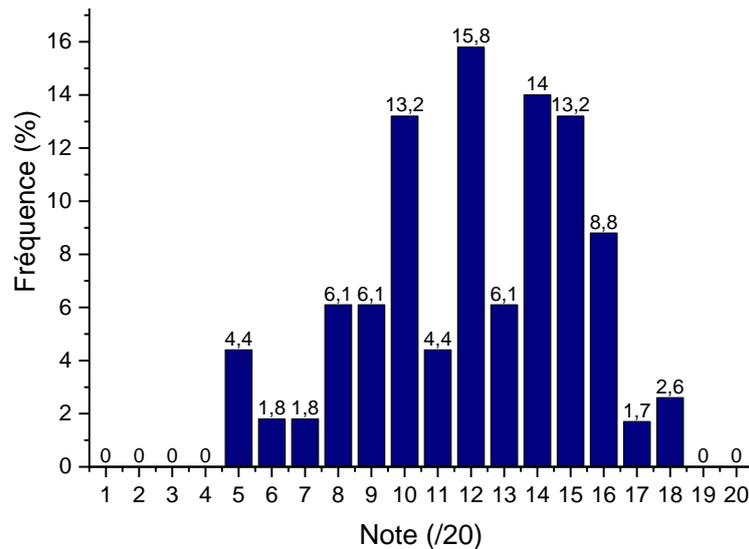


Fig. 7. Evaluation globale de la salle en étude

En exploitant les données ayant servi à la construction de la courbe de la figure 7, il a été calculé la note moyenne sur 20 qui est de **12,06**, avec un écart-type de **3,17**.

Sur une échelle de 0 à 20, la note moyenne 12,06 obtenue est un indicateur de confort global assez bien dans le local étudié. Cette évaluation par une notation classique permet déjà de se faire une idée de l'appréciation globale du confort dans ce bâtiment. Néanmoins, il sera chaque fois nécessaire d'avoir une notation à partir de l'évaluation par indice.

Evaluation par l'indice I_{GSC}

L'évaluation du confort du bâtiment par l'indice I_{GSC} établi permet de comparer l'appréciation par note des occupants au calcul de l'indice I_{GSC} . Rappelons que l'indice I_{GSC} est donné par l'expression :

$$I_{GSC} = 0,00729 \cdot T + 0,00159 \cdot HR + 0,07392 \cdot v + 0,00036 \cdot E + 0,00386 \cdot L_{\text{éq}} + 0,00021 \cdot C_{\text{CO}_2} - 0,44422$$

Les valeurs moyennes des paramètres T, HR, v, E, $L_{\text{éq}}$ et C_{CO_2} mesurées, tels que présentés dans le tableau 3, sont donnés par :

$$T = 28,9^\circ\text{C} ; HR = 62,5 ; v = 0,5 ; L_{\text{éq}} = 53,9 ; E = 288,8 ; C_{\text{CO}_2} = 618,7$$

Ainsi,

$$I_{GSC} = 0,00729 \cdot 28,9 + 0,00159 \cdot 62,5 + 0,07392 \cdot 0,5 + 0,00036 \cdot 288,8 + 0,00386 \cdot 53,9 + 0,00021 \cdot 618,7 - 0,44422$$

$$I_{GSC} = 0,34$$

L'indice I_{GSC} obtenu pour cette salle est 0,34. Cette valeur correspond à une zone de confort global acceptable. En effet, la salle étudiée se caractérise par un ROM (Ratio d'ouverture-mur) d'environ 40% comme présentés sur la figure 1. Ces ouvertures favorisent d'une part une bonne ventilation afin d'améliorer la sensation de confort thermique ainsi que la dissipation des éventuelles odeurs. De même, l'éclairage est amélioré par une grande infiltration de la lumière naturelle du jour. Par rapprochement, l'appréciation obtenue par l'évaluation avec l'indice I_{GSC} selon le modèle proposé donne une valeur égale à celle déduite avec la notation conventionnelle. Pour cela, la méthode d'évaluation par l'indice I_{GSC} est bien convenable pour estimer le confort global dans les salles de classe.

4 CONCLUSION

Le confort global dans un bâtiment est une sensation de bien-être lorsqu'on est exposé dans son ambiance intérieure. Il dépend aussi bien de la qualité de l'air intérieure, qu'extérieure, des conditions hygrothermiques, de la qualité visuelle et acoustique dans le local concerné. Dans la présente étude, il a été mis au point un modèle d'indicateur de confort global dans une salle de classe, à l'aide de mesures et des résultats d'enquêtes faites in situ. Le modèle ainsi proposé a été validé et l'indice de confort global I_{GSC} établi pour une salle de classe en climat tropical va servir d'outil pour la prévision de confort global dans les salles de classe, car il est prépondérant pour une définition optimale de l'orientation, de l'architecture du local et du choix des matériaux de construction pour les futurs locaux destinés à accueillir des apprenants. En perspective, il est envisagé d'étudier les interactions entre les différentes composantes sur le confort global. Par exemple, un environnement avec une température élevée et une humidité excessive peut entraîner une sensation de malaise (confort hygrothermique) et une transpiration accrue, ce qui peut affecter l'odeur de l'environnement (confort olfactif). De même, un environnement très bruyant (confort acoustique) peut perturber la concentration et affecter la perception visuelle (confort visuel).

REFERENCES

- [1] PNUE, «2022 Global Status Report for Buildings and Construction,» 2022.
- [2] P. Valdiserri, C. Biserni, G. Tosi et M. Garai, «Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by Trnsys energy simulation tool,» *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 765-770, 2015.
- [3] J. Kim, T. Hong, J. Jeong, M. Lee, M. Lee, K. Jeong, C. Koo et J. Jeong, «Establishment of an optimal occupant behavior considering the energy consumption and indoor environmental quality by region,» *Applied Energy*, vol. 204, pp. 1431-1443, 2017.
- [4] Y. Yilmaz et B. Ç. Yilmaz, « weighted multi-objective optimisation approach to improve based facade aperture sizes in terms of energy, thermal comfort and daylight usage,» *Journal of Building Physics*, vol. 44, n° 15, pp. 435-460, 2020.
- [5] S. Brittany, «Populations en expansion, économies émergentes, biodiversité menacée : Les tropiques ne seront plus jamais ce qu'ils étaient,» 2014. [En ligne]. Available: <https://fr.mongabay.com/2014/09/populations-en-expansion-economies-emergentes-biodiversite-menacee-les-tropiques-ne-seront-plus-jamais-ce-quils-etaient/#:~:text=Explosion%20d%C3%A9mographique,que%20celle%20des%20r%C3%A9gions%20temp%C3%A9r%C3%A9es..> [Accès le 25 novembre 2020].
- [6] Z. Bakó-Biró, D. Clements-Croome, N. Kochhar, H. Awbi et M. Williams, «Ventilation rates in schools and pupils' performance,» *Building and Environment*, vol. 48, n° 11, pp. 1-9, 2011.
- [7] G. Moser, Psychologie environnementale, les relations homme-environnement, 1ère éd., Bruxelles: de Boeck, 2009.
- [8] V. Grosdemouge, «Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers,» Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'Environnement et le Bâtiment, La Réunion, 2020.
- [9] P. O. Fanger, Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering, Copenhagen, Denmark, Danish Kr. 76, 50: DANISH TECHNICAL PRESS, 1970.
- [10] Y. Jannot et T. Djiako, «Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 17, n° 13, pp. 166-173, 1994.
- [11] A. Dhalluin, «Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire,» Université de La Rochelle, La Rochelle, 2012.
- [12] M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark et M. Zeumer, Energy manual: sustainable architecture, 1e éd., Munich: Detail, 2008.
- [13] A. Alfano, B. L et B. A, Indoor environment and energy efficiency in schools., Part I Principles. Guidebook n°13 REHVA; éd., 2010, pp. 4-39.
- [14] S. J. Emmerich et A. K. Persily, «State-of-the-Art Review of CO2 Demand Controlled Ventilation Technology and Application,» NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2001.
- [15] M. Gallissot, «Modéliser le concept de confort dans l'habitat intelligent : du multisensoriel au comportement,» Laboratoire d'informatique de Grenoble, École Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique; Université de Grenoble, Grenoble, 2012.
- [16] F. H. J. Rohles, J. E. J. Woods et P. R. Morey, Indoor environment acceptability: the development of a rating scale, 95 éd., American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers: ASHRAE transactions, 1989.
- [17] M. Bruant, «Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance,» INSA, Lyon, 1998.
- [18] C. Chiang et C. Lai, «A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan,» *Build. Environ.*, vol. 37, n° 14, p. 387-392, 2002.

- [19] M. Abadie, P. Wargocki, C. Rode et J. Zhang, Proposed Metrics for IAQ in Low-Energy Residential Buildings, ASHRAE Journal éd., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.
- [20] C.-F. Picard, M. Abadie et A. Dhalluin, «Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Énergétique. Troisième volet: Valoriser le confort,» France, 2020.
- [21] C. Ahouannou, D. B. Apovo, S. O. Osseni et P. C. Gbado, «Review of overall building comfort in a tropical climate,» *International Journal of Current Research*, vol. 14, n° %16, pp. 21754-21765, 2022.
- [22] S.-J. Chen et C.-L. Hwang, «Fuzzy Multiple Attribute Decision Making : Methods and Applications,» chez *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1992, pp. 289-486.
- [23] E. Jacquet-Lagrange et J. Siskos, «Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method,» *European Journal of Operational Research*, vol. 10, n° %12, pp. 151-164, 1980.
- [24] B. Roy, «Classement et choix en présence de points de vue multiples,» *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, vol. 2, n° %18, pp. 57-75, 1958.
- [25] R. L. Keeney et H. Raiffa, «Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 72, n° %1359, p. 683, 1977.
- [26] B. Mareschal, J. P. Brans et P. Vincke, «Prométhée: a new family of outranking methods in multicriteria analysis,» *Operational Research '84*, vol. 1, n° %11, pp. 408-421, 1984.
- [27] S. Opricovic, «Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems,» Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1998.
- [28] B. Bulgurcu, «Investment Destination Decision by Using the VIKOR Method in the European Union Countries,» *American International Journal of Contemporary Research*, vol. 6, n° %12, pp. 16-24, 2016.
- [29] T. Arslan, «A Psychometric Approach to the VIKOR Method for Eliciting Subjective Public Assessments,» *IEEE*, vol. 8, n° %11, pp. 54100-54109, 2020.
- [30] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*, McGraw-Hill, New York: McGraw-Hill International Book Company, 1980.
- [31] A. Olissan, C. Kouchadé, A. K. N. André Philippe et J.-M. Hauglustaine, «Influence de la fenestration en vitre sur le confort thermique des bâtiments en climat tropical et humide : cas de la bande côtière du Bénin,» *International Journal of Innovation Sciences and Research*, vol. 5, n° %16, p. 766–777, 2016.
- [32] A. Souchet, «Impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage via serious game en réalité virtuelle,» Université Paris 8 Vincennes - Saint-Denis, Paris, 2020.
- [33] A. Burns, A. Veeck et B. Ronald, *Etudes et analyses marketing*, 8e éd., France: PEARSON, 2018.
- [34] M. Thomas, «Peau sèche et vieillissement cutané : clinique, facteurs aggravants et réponses cosmétiques,» Sciences pharmaceutiques., Lorraine, 2021.
- [35] J.-P. Ndoutoum, *Guide du bâtiment durable en régions tropicales Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales*, Québec: Institut de la Francophonie pour le Développement Durable, 2015.