

Study and optimization of the windows' impact on thermal comfort and energy efficiency (Case of offices in a hot and arid climate)

Etude et optimisation de l'impact des ouvertures sur le confort thermique et l'efficacité énergétique (Cas des bureaux dans un climat chaud et aride)

Mohamed-Amine Khadraoui[✉], Leila Sriti²

Département d'architecture, Laboratoire de Conception et de Modélisation des Formes et des Ambiances Architecturales et Urbaines (LACOMOFA), Université Mohamed Khider, B.P. 145 R.P, 07000, Biskra, Algeria

Received 11 March 2018

Published online: 9 June 2018

Keywords

Windows of the facade
Thermal comfort
Energetic efficiency
Office building
Simulation
Hot and arid climate

Abstract: Controlling the thermal environment and reducing the energy consumption of buildings across the façade are a difficult challenge for architects, especially in a desert climate. The windows in particular play an important role in the tandem of the thermal operation of the building and the comfort of the users. The objective of this article is to study and optimize the impact of windows, their material and proportional characteristics on the thermal comfort and energy efficiency of office buildings in a hot and arid climate. The investigation is based on an empirical approach (measurements taken in situ on real cases) as well as on a numerical simulation study with the TRNSYS program. Several parameters have been studied such as surface temperature, ambient temperature and energy consumption. The results showed that facade windows are a determining factor in the thermal exchanges between the building and its environment and that the key parameters that condition these exchanges are the windows ratio (glazed area) and the type of glazing. The judicious choice of the windows ratio combined with an appropriate choice of the type and composition of the glazing improves the thermal comfort of the users and ensures the energy performance of the building.

© 2018 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé : La maîtrise des ambiances thermiques et la réduction de la consommation énergétique des bâtiments à travers la façade sont un défi difficile à relever pour les architectes surtout dans un climat désertique. Les ouvertures en particulier, jouent un rôle important dans le tandem du fonctionnement thermique du bâtiment et du confort des usagers. L'objectif de cet article est d'étudier et d'optimiser l'impact des ouvertures et leurs caractéristiques matérielles et proportionnelles sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux dans un climat chaud et aride. L'investigation est fondée sur une approche empirique (mesures prises in situ sur des cas réels) ainsi que sur une étude numérique par simulation avec le logiciel TRNSYS. Plusieurs paramètres ont été étudiés tels que la température surfacique, la température ambiante et la consommation énergétique. Les résultats ont démontré que les ouvertures de la façade représentent un facteur déterminant dans les échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement et que les paramètres clés qui conditionnent ces échanges sont le ratio d'ouverture (surface vitrée) et le type de vitrage. Le choix judicieux du ratio d'ouverture combiné à un choix adéquat du type et de la composition du vitrage améliorent le confort thermique des utilisateurs et assurent la performance énergétique de la construction.

Mots clés : ouvertures de la façade, confort thermique, efficacité énergétique, bureaux, simulation, climat chaud et aride.

1. Introduction

La réduction de la consommation énergétique est devenue un enjeu mondial dans tous les domaines en particulier, dans celui du bâtiment. Plusieurs chercheurs considèrent ce secteur comme l'un des grands consommateurs d'énergie dans le monde (Valderrama 2013 ; Velázquez 2015 ; Omrany et al. 2016). Cet accroissement rapide de la consommation énergétique est la conséquence d'une négligence des aspects thermiques, énergétiques et environnementaux dans le processus de la conception architecturale. Le résultat est une dépendance de plus en plus lourde des bâtiments vis-à-vis des énergies fossiles pour assurer un certain bien-être physiologique de l'utilisateur

(Heiselberg 2009 ; Arnal 2013) lequel, malheureusement, a été délégué à des installations techniques dépendant de sources épuisables, non renouvelables et polluantes (Kjell 2014 ; Alwetaishi et al. 2017).

En Algérie, le secteur tertiaire est considéré comme un secteur énergivore par excellence puisqu'il détient à lui seul un taux important de la consommation énergétique dont une grande quantité est utilisée pour répondre aux besoins du confort thermique (chauffage et climatisation). D'après un rapport de l'APRUE (2009), la consommation énergétique des bâtiments tertiaires et résidentiels en Algérie représente 41 % de la consommation finale et surpasse de loin les autres secteurs.

[✉] Corresponding author. E-mail address: makhadraoui@yahoo.com

Nomenclature

λ	Conductivité thermique, W/m.k
C	Chaleur spécifique, Kj/kg.k
D	Densité, Kg/m ³
Ta	Température ambiante, °C
Text	Température extérieure, °C
Tsi	Température surfacique interne, °C
Tse	Température surfacique externe, °C

Abréviations

Mes.	Mesurée
Sim.	Simulée
Sv	Surface vitrée
Tv	Type de vitrage
Mt	Modèle témoin
Mo	Modèle optimisé

Les immeubles de bureaux en Algérie sont caractérisés par leur manque de confort thermique (excès de chaleur en été, problème de froid en hiver) où les ouvertures jouent un grand rôle sur le comportement thermique du bâtiment et le confort des usagers. Ils sont, par ailleurs, de gros consommateurs d'énergie puisqu'ils dépendent largement des installations électriques pour assurer leur climatisation (chauffage et rafraîchissement). Cette situation est le résultat d'une pratique architecturale indifférente au contexte, où très souvent les paramètres thermiques et énergétiques sont ignorés lors de la conception et les choix des éléments de la façade (surface vitrée et type de vitrage) sont inappropriés au contexte climatique. Pour corriger ces dysfonctionnements, plusieurs recherches se sont inscrites dans une démarche visant à améliorer le fonctionnement thermique et la performance énergétique de la façade et ses composants, vu l'importance de cet élément dans le processus d'intégration climatique du bâtiment dans son environnement physique.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact des ouvertures de la façade sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux dans un climat chaud et aride en agissant sur deux paramètres : le taux d'ouverture et le type de vitrage. Par la suite, l'optimisation de ces paramètres afin d'assurer le confort thermique des usagers tout en minimisant la consommation énergétique sera tentée. Le travail d'investigation est basé sur une approche empirique ainsi qu'une simulation numérique.

La nouveauté de cette recherche consiste à étudier expérimentalement l'impact d'un double vitrage (sans gaz) sur le comportement thermique d'un bâtiment situé dans un climat chaud et aride. En effet, le double vitrage a été bien expérimenté et évalué dans des recherches ce qui a démontré son efficacité sur le plan thermique et énergétique. Ces recherches ont été circonscrites pour des climats relativement froids. Par contre, très peu de recherches ont été entreprises dans le contexte climatique chaud et aride (le cas d'étude). La présente recherche tente de compléter le manque dans ce domaine. A son tour, elle pourra orienter les décisions des concepteurs relatives au ratio et le type de vitrage afin d'améliorer la performance thermique et énergétique des constructions. L'optimisation d'un modèle assurant à la fois la surface vitrée la plus optimale et le type de vitrage le plus performant (basse émissivité avec gaz argon) aidera les architectes à opter pour les choix conceptuelles les plus adaptés aux conditions de confort thermique dans les régions chaudes et arides.

2. Revue de la littérature

Un bâtiment est sensé avant tout fournir aux usagers des ambiances intérieures confortables, ceci si l'on admet que l'objectif primordial de l'acte de construire est d'assurer la protection des occupants quelles que soient les conditions extérieures (Frédéry et al. 2015). Une conception bien réfléchie peut limiter les impacts thermiques et évidemment la consommation énergétique (Giovanni et al. 2014) car l'objectif d'un bâtiment conçu n'est pas la consommation de l'énergie (Arnal 2013).

L'architecture moderne a contribué à la production d'une architecture parfaitement indifférente au climat en surestimant les possibilités technologiques et en les considérant aptes à remplacer l'enseignement des "anciens". Avec le mouvement moderne, la notion même d'architecture s'était profondément modifiée ; elle n'était plus l'art de bâtir comme définie primitivement, elle était devenue un exercice plastique où les paramètres environnementaux et contextuels n'avaient plus leur place (production rapide de bâtiments, architecture de verre et d'acier,...). Jusqu'à la première crise pétrolière de 1973, la confiance aveugle que les architectes ont vouée à la société technologique a eu pour résultat la production d'une architecture "énergivore" à outrance (Gallo et al. 1998). Souvent, l'utilisation excessive de l'énergie et le recours systématique aux équipements et installations techniques ont servi à cacher d'innombrables défauts conceptuels en rapport avec le confort des occupants (Frédéry et al. 2015). Plus grave encore, dans certain cas, l'emploi de systèmes sophistiqués et très chers s'est avéré peu efficace pour résoudre les problèmes liés au confort thermique et à la qualité des ambiances (Gratia et al. 2006).

Depuis l'avènement de la façade libre en architecture, le verre est devenu un matériau très prisé par les architectes qui l'utiliseront dans tous les types de bâtiments, indifféremment, des conditions climatiques. Ainsi, il n'est pas rare que les bâtiments tertiaires, qu'ils soient dans des régions différentes, possédant de grandes surfaces vitrées (Franck et al. 2011). Et souvent, l'utilisation des murs rideaux à la place de façade en maçonnerie, est considérée comme un signe de prouesse technique et un atout esthétique par les concepteurs (Boudhen 2007). Malheureusement, cette architecture de verre est responsable de grandes déperditions thermiques et souvent elle engendre des ambiances thermiques défavorables (Katarzyna et al. 2014 ; Olissan 2017). Faure (2007) considère l'enveloppe comme un vrai échangeur thermique. Ce point de vue a été confirmé par Moreno-Sierra (2012), qui signale

que les déperditions surfaciques des éléments de l'enveloppe représentent 75 % des pertes énergétiques. Pour sa part, Westphal et al. (2016) affirme que les grands échanges thermiques se font à travers l'enveloppe et en particulier les vitrages qui, de fait, déterminent la performance énergétique des constructions.

La façade est l'élément le plus important et le plus complexe dans le bâtiment. Elle est considérée comme une membrane séparative entre le dedans et le dehors et joue un rôle crucial sur le fonctionnement thermique des constructions (Salem 2007). Pour ces raisons, sa performance doit être identique à celle du bâtiment (Velázquez, 2015 ; Khadraoui et al. 2017a). En tant qu'élément pouvant limiter les pertes et contrôler les gains qui influencent le confort thermique, la façade entièrement vitrée est responsable d'environ 30 à 50 % des déperditions de chaleur (Richieri 2008 ; Zelenay et al. 2011). D'après plusieurs auteurs, les besoins énergétiques d'un bâtiment sont tributaires de certains paramètres propres à la façade comme le ratio d'ouverture (la surface vitrée) et le type de vitrage (Shan 2013 ; Konstantinou 2014 ; Liang et al. 2015 ; Omrany 2016). Ce point est confirmé par Westphal et al. (2016) dont les résultats ont montré qu'une façade entièrement vitrée dans une zone climatique chaude est responsable de 45 % des charges de refroidissement de la construction. Cependant, l'impact de la surface vitrée varie selon d'autres paramètres tel que le type de verre dont les caractéristiques sont prépondérantes dans le fonctionnement thermique du bâtiment (Moreno-Sierra 2012 ; Buratti et al. 2013 ; Westphal et al. 2016).

Sur la base de toutes ces recherches, il s'avère que le choix d'une enveloppe appropriée est une décision déterminante dans la conception architecturale vu sa complexité et ses aspects hyper-interférés (Khadraoui et al. 2017b).

3. Méthodologie

3.1 L'étude empirique

En Algérie, l'utilisation aléatoire des surfaces vitrées (mur rideau) dans les immeubles de bureaux prend de l'ampleur et suscite d'innombrables questions quant aux graves conséquences d'une telle pratique. Il faut dire que l'emploi du verre ne prend pas en compte les spécificités climatiques des régions et il n'est pas rare de trouver les mêmes types de bâtiments aussi bien au nord (climat méditerranéen) qu'au sud du pays (climat chaud et aride). Bien entendu, le même type de verre et les mêmes dimensions d'ouvertures sont utilisés indifféremment et quelle que soit la zone climatique. La ville de Biskra servira comme cas d'étude pour analyser les problèmes rencontrés dans les bâtiments tertiaires relativement au confort thermique des usagers.

3.1.1 Présentation du contexte de l'étude

La ville de Biskra se situe dans le Sud de l'Algérie à une latitude de 34°48' Nord, une longitude de 5°44' Est et à une altitude de 86 mètres. Elle est classée parmi les zones chaudes et arides avec de grandes amplitudes thermiques journalières. Selon les données météorologiques de la station de Biskra, la température moyenne

annuelle est de 22.5 °C. La lecture des données de la température moyenne mensuelle de cette ville pendant quinze ans (entre 2000 et 2015) ont permis de choisir le mois le plus froid et le mois le plus chaud (cas défavorable) pour effectuer les mesures (Fig.1).

3.1.2 Présentation du cas d'étude

Le bâtiment pris comme cas d'étude se trouve dans une zone urbaine à l'extension Ouest de la ville de Biskra. Ce bâtiment qui est le siège de l'Agence Foncière de Biskra a été choisi parce qu'il représente la tendance à l'emploi des façades vitrées (un mur rideau avec un double vitrage simple sans gaz). La Figure 2 illustre la façade Sud-Ouest du bâtiment ainsi que le plan du premier étage où se situent les deux bureaux sujet de l'étude. C'est une bâtisse à trois niveaux (RDC+2), présentant un mur rideau et en même temps très exposée aux rayonnements solaires puisqu'elle ne bénéficie pas d'une protection solaire. Les murs extérieurs sont simples en briques creuses avec une composition de (15-5-10 cm).

L'édifice est caractérisé par deux typologies d'ouvertures. La première (B1) est une grande surface vitrée (mur rideau en double vitrage simple sans gaz avec un cadre en aluminium) orientée vers le Sud et le Sud-Ouest sans protection solaire extérieure. La seconde (B2) présente des petites fenêtres (de 130x50cm) avec un simple vitrage (Fig.3).

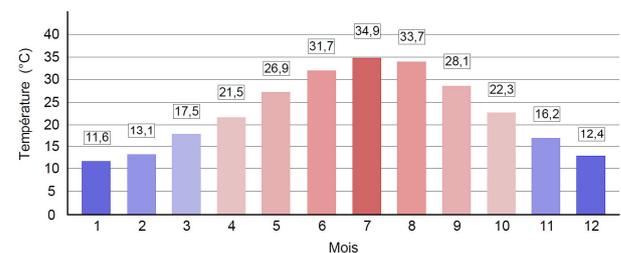


Fig. 1. La température moyenne mensuelle sous abri de la ville de Biskra entre 2000 et 2015 (Station météorologique de Biskra, 2017).



Fig. 2. Le cas d'étude.



Fig. 3. Les deux espaces de bureaux étudiés.

Le choix des points de mesures dans les deux espaces étudiés a été effectué en prenant en considération plusieurs paramètres notamment l'orientation, la surface vitrée, le type de vitrage, les gains internes (nombre des occupants et des ordinateurs) ainsi que la faisabilité et la possibilité d'effectuer les mesures dans des conditions naturelles. A signaler que les protections solaires intérieures existantes (stores) ont été ouvertes durant les journées de la prise de mesures afin d'éviter leurs impacts sur le comportement thermique des bureaux.

3.1.3 Protocole de la prise de mesures

Sur la base des données météorologique de la ville en question, il a été possible de déterminer la semaine type "design week" et par la suite la journée type "design day" durant laquelle se feront les prises de mesures pour la saison chaude et froide afin de justifier la période de l'étude. Cette journée est déterminée à partir du calcul de la température moyenne journalière pendant la période considérée (Hong et al. 1999). Le calcul a été effectué pendant une période de 15 ans (entre 2000 et 2015). Les journées sélectionnées pour la prise de mesures sont respectivement le 10 Janvier 2017 pour la saison froide et le Samedi 08 Juillet 2017 pour la saison chaude. La détermination de ces deux journées types a été effectuée durant la semaine type "design week" de chaque période en prenant en compte plusieurs critères tels que les conditions naturelles (mesures sans chauffage et sans climatisation) et la possibilité de mesure dans l'établissement.

L'étude a été effectuée au niveau du 1er étage afin d'éviter l'influence des gains de chaleur provenant de la toiture. Des mesures bi-horaires ont été faites de 8h à 16h (pendant la période du fonctionnement de l'administration) dans des conditions naturelles (sans chauffage ou climatisation). Les paramètres mesurés sont : la température intérieure ambiante (T_a), la température à l'extérieur (T_{ext}) et la température surfacique interne (T_{si}) du cadre du vitrage dans (B1) et du mur dans (B2).

Les mesures ont été faites à l'ombre à une hauteur de 1,2 m. Les instruments utilisés sont un thermomètre "Testo 480" pour mesurer la température ambiante et un thermomètre infrarouge "CASON-CA 380" pour mesurer la température surfacique.

3.2 Simulation numérique

3.2.1 Présentation de l'outil de simulation

Le logiciel "TRNSYS" Version 17 a été choisi pour réaliser l'étude numérique en utilisant le "type56". Ce programme de simulation

thermique dynamique est destiné aux acteurs du bâtiment, et à des fins de recherche vu ses avantages (Gossard 2011 ; Spitz 2012). Le programme "Sketch Up" a été utilisé pour la création de la géométrie du modèle en exploitant le plugin "Trnsys-3D". Le fichier climatique de la ville de Biskra a été généré par le logiciel "Meteonorm V.7" sous format "Tm2". Plusieurs recherches ont été faites avec ce logiciel en utilisant une seule zone thermique tels que les travaux de (Rossi 2009 ; Rapone 2012 ; Buratti et al. 2013 ; Derradji et al. 2017 ; Mansouri et al. 2018) où les conditions (Boundary) sont choisis selon les objectifs de l'étude.

3.2.2 Présentation du modèle numérique et du protocole de simulation

Dix modèles numériques ont été élaborés. Le modèle de base a été défini à partir d'un cube de (4x4x4m) dans une seule zone thermique avec une fenêtre orientée vers le Sud et sans protections solaires internes ou externes. Le mur Sud est considéré comme mur extérieur où s'effectuent les grands échanges thermiques avec l'extérieur. Les autres murs sont considérés comme limites "Boundary" ou des murs avec des conditions aux limites connues (TRNSYS 17). La façade étudiée est celle orientée vers le Sud (la façade la plus exposée aux rayonnements solaires avec des conditions les plus défavorables).

Cinq modèles (Msv) ont été élaborés pour étudier l'impact de la surface vitrée (Msv=20%, 40%, 60%, 80% et 100%) avec un simple vitrage. Quatre modèles (Mtv) pour évaluer l'influence du type de vitrage (Mtv : simple, double, triple et double basse émissivité avec un gaz argon) avec une surface vitrée de 50 %. Ce ratio a été choisi afin d'augmenter les échanges thermiques effectués à travers le vitrage ce qui ont permis de mettre en évidence et de bien démontrer l'impact du changement du type de vitrage sur le comportement thermique de la façade. Par la suite, après l'analyse des résultats obtenus, un dernier modèle optimisé (Mo-sv-tv) a été généré en croisant les variantes les plus favorables soient, le meilleur pourcentage de la surface vitrée et le type de vitrage le plus efficace. La figure 4 illustre deux variantes réalisées sous "Sketch Up", la première concerne la variable "surface vitrée" (Msv=20%) et la deuxième relève l'impact de la variable "type de vitrage" (Mtv).

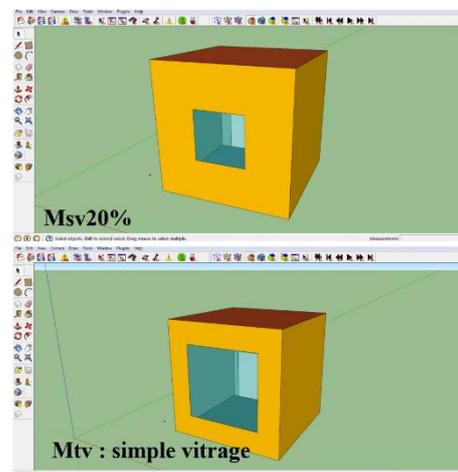


Fig. 4. Exemples des géométries des modèles simulés.

La composition matérielle des parois est similaire à ce qui est couramment utilisé dans la région de Biskra. Le tableau 1 illustre les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés.

Dans le modèle qui correspond à l'impact du type de vitrage (Mtv), plusieurs compositions de verre ont été utilisées (simple, double et un triple vitrage). Cependant, pour obtenir une isolation thermique, il faut introduire un gaz peu conducteur dans la cavité du vitrage (Quenard 2009). A cette fin, le quatrième modèle a été réalisé avec un double vitrage-basse émissivité contenant le gaz argon dans sa cavité (Mdv_bg). Le tableau 2 donne les valeurs de la transmission thermique (U) pour chaque type.

Après la création de la bibliothèque des matériaux sur TRNSYS, un scénario détaillé qui englobe tous les paramètres (infiltration, gains internes, nombre de personnes et leurs activités et les équipements éventuels) a été intégré ; l'objectif est de faire une comparaison avec un bâtiment existant pour pouvoir ensuite valider le modèle numérique. Pour estimer les besoins énergétiques, un seuil de température a été déterminé pour le fonctionnement des équipements, soit 20 °C pour le chauffage et 25 °C pour la climatisation. Cet intervalle est situé dans la zone de confort thermique tel que défini dans des recherches de (Roulet 2004 ; Kjell 2014 ; Frédéry et al. 2015).

La simulation a été lancée pendant une année afin d'éviter les erreurs de l'initialisation de la simulation (avec un pas de temps d'une heure) et les résultats ont été exportés sous format (xls). Par la suite les graphes ont été élaborés par le programme "Origin" durant les périodes la plus chaude et la plus froide selon le fichier climatique utilisé. Les trois jours sélectionnés durant chaque période correspondant aux heures de l'année sont le 11, 12 et 13 Janvier (240-312 heure) pour la période froide et le 20, 21 et 22 Juillet (4805-4877 heure) pour la période chaude.

4. Résultats et discussion

4.1 Résultats de l'étude empirique

La figure 5 illustre les températures mesurées pendant la journée type de la période hivernale (le 10 Janvier 2017) dans les deux

Tableau 1. Les caractéristiques thermiques des matériaux choisis pour la simulation (D.T.R. C3-2 1997 ; Derradji et al. 2015)

	Conductivité thermique λ (W/m.k)	Chaleur spécifique C (KJ/kg.k)	Densité D (Kg/m ³)	Epaisseur (cm)
Brique creuse	0,48	1080	900	10-15
Enduit de plâtre	0,35	936	1150	02
Enduit de ciment	1,4	1080	2200	02
Lame d'air (5cm)	0,047	1000	1	05
Corps creux	1,2	1000	1300	16
Dalle de compression	1,75	1080	2500	04

Tableau 2. Transmission thermique "U" des vitrages utilisés (TRNSYS17)

Modèle	Type de vitrage	Transmission thermique U (W/m ² .k)
Msv	Simple vitrage	5,74
Mdv	Double vitrage	2,95
Mtv	Triple vitrage	2
Mdv_bg	Double vitrage basse émissivité avec gaz	1,43

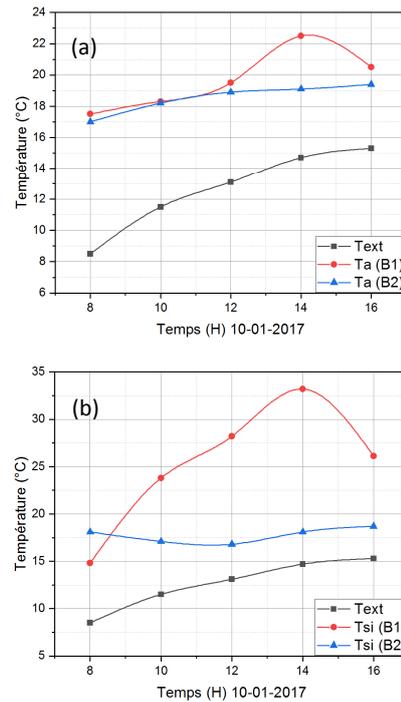


Fig. 5. Graphes de températures mesurées durant la journée type de la période hivernale (le 10-01-2017).

bureaux. Le graphe (5-a) représente la température ambiante (Ta) et le graphe (5-b) la température surfacique interne (Tsi).

On constate que la température extérieure (Text) change entre un minimum de 8,5 °C et un maximum de 15,3 °C. De 8h à 12h, les températures ambiantes sont presque similaires dans les deux bureaux et varient entre 17 °C à 18,3 °C. La température ambiante dans le bureau B2 (Ta_B2) est assez stable vu la composition de la façade (matériaux et surface vitrée) qui s'oppose aux fluctuations des températures, mais dans (B1) on remarque une augmentation considérable de (Ta_B1) après 12h avec une valeur de 22,5 °C à 14h. Cette hausse brusque est causée par la grande surface vitrée (double vitrage simple sans gaz) qui influe négativement sur la sensation thermique des usagers (d'après un constat personnel et l'avis des usagers).

Pour ce qui est de la température surfacique interne (Tsi), le graphe (5-b) montre clairement un comportement thermique stable du mur en brique dans (Tsi_B2) avec des valeurs entre 16,8 °C et 18,7°C. Des températures très élevées ont été enregistrées au niveau du cadre intérieur (en aluminium) du mur rideau dans (Tsi_B1) avec une grande amplitude thermique de 18,4 °C qui varie entre 14,8 °C et 33,2 °C. Celle-ci à son tour influe directement sur la température opérative ressentie par les utilisateurs. Les caractéristiques thermiques (l'inertie thermique, l'effusivité et la diffusivité) des deux types de façade influent directement sur leurs fonctionnements thermiques où la grande surface vitrée mal maîtrisée engendre des conditions inconfortables même dans une période froide.

Les mesures de la température pendant la journée type de la période estivale (le 08 Juillet 2017) sont présentées dans la (Fig.6). La température ambiante (Ta) est illustrée dans le graphe

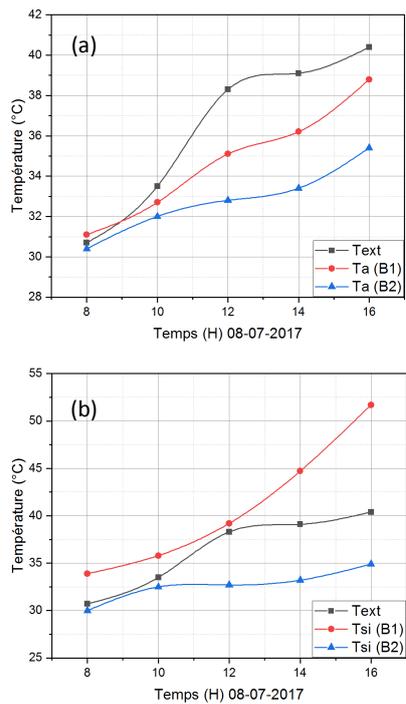


Fig. 6. Graphes de températures mesurées durant la journée type de la période estivale (le 08-07-2017).

(6-a) et la température surfacique interne (Tsi) dans le graphe (6-b). Le graphe de la température extérieure (Text) révèle clairement des valeurs élevées variant entre un minimum de 30,7 °C et un maximum de 40,4 °C. Des températures ambiantes ont été relevées de 8h à 10h avec de faibles différences entre les deux bureaux. Après 10h, on remarque l'augmentation de la (Ta_B2) d'une manière faible vue l'inertie thermique des matériaux (brique) avec une valeur maximale de 35,4 °C. Parallèlement, une hausse considérable de la (Ta_B1) est constatée sous l'influence des rayonnements solaires. Cette hausse s'effectue rapidement et atteint une valeur maximale de 38,8 °C à 16h et se rapproche de plus de la température extérieure. Ce comportement est dû à la faible effusivité et la grande diffusivité des matériaux de la façade vitrée de (B1).

Concernant la température surfacique interne (Tsi), les mesures dans (B2) montrent un comportement homogène avec des accroissements lents des températures vu la grande effusivité de sa façade. Par contre, une augmentation considérable et rapide de (Tsi_B1) est constatée. Ceci est le fait des caractéristiques thermiques du cadre foncé en aluminium de l'ouverture dont la température maximale atteint 51,7 °C à 16h et dépasse de loin la (Text) qui avoisine les 40,4 °C. Par conséquent, cet élément se transforme en source de chaleur par excellence, rendant la climatisation inefficace et la situation thermique inconfortable.

Globalement, en hiver, le comportement thermique de (B2) est acceptable vu le faible taux d'ouverture de sa façade et le bon fonctionnement des matériaux utilisés (la brique creuse). Par contre, le comportement de (B1) est caractérisé par des fluctuations de (Ta) en fonction de l'exposition de la grande surface vitrée aux rayonnements solaires. En été, le comportement thermique de (B2) est meilleur que celui de (B1).

Ces résultats confirment l'importance du ratio, de l'effusivité et de la diffusivité des matériaux de la façade et leurs impacts sur l'ambiance thermique. La compréhension et la maîtrise des phénomènes thermiques des éléments de la façade avec la prise en compte du climat et la spécificité de la région améliorent les ambiances intérieures et l'efficacité énergétique de la construction. Ces points ont été confirmés par cette étude et d'autres recherches (Malek et al. 2016 ; Westphal et al. 2016).

4.2 Résultats du modèle numérique

4.2.1 Validation du modèle numérique

Principalement le logiciel TRNSYS est destiné aux acteurs du bâtiment, il a montré sa performance et fait l'objet de validations approfondies (Spitz 2012 ; Soudani 2016). On peut valider un modèle numérique s'il y a une correspondance et cohérence entre les valeurs mesurées et simulées (Arnal 2013 ; Soudani 2016) mais l'écart maximal doit être inférieur à 10 % (Miranville 2002 ; Faure 2007 ; Daverat 2012 ; Guichard 2013).

Dans notre cas, nous avons effectué une simulation d'un modèle similaire au bâtiment existant avec les mêmes caractéristiques et durant la même période. Les résultats de la simulation obtenus ont été comparés avec les prises de mesures effectuées (le 08 Juillet 2017 de 8h à 16h selon les instruments disponibles "Testo 480" et la possibilité de mesure dans le bâtiment) (Fig.7). La première vérification porte sur les valeurs du fichier météorologique car les résultats de la simulation sont influencés par le fichier climatique. Ensuite, la lecture des deux graphes de la température extérieure (Text_mes et Text_sim) est effectuée. L'analyse des (Text) montre qu'il y a une cohérence entre les deux courbes avec un écart de 1,6 °C à 2,9 °C soit un pourcentage de 4,01 % à 6,69 % ; ces valeurs sont inférieures à 10 % donc le fichier climatique est correcte.

Concernant les deux températures ambiantes (Ta_mes et Ta_sim), visiblement il existe une nette correspondance entre les deux graphes ; l'écart varie de 0,2 °C à 2,65 °C donc un pourcentage de 0,58 % à 8,11 % ; ces pourcentages sont inférieurs à 10 % ce qui permet de valider le modèle numérique.

4.2.2 Résultats de l'impact de la surface vitrée

La Figure 8 illustre les températures surfaciques internes simulées durant trois jours extrêmement froids (le graphe 8-a le 11, 12 et 13 Janvier) et trois jours extrêmement chauds (le graphe 8-b le 20, 21 et 22 Juillet).

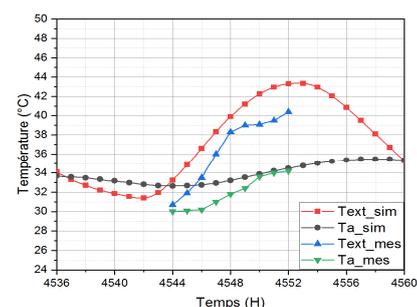


Fig. 7. Graphe des températures mesurées et simulées pour la journée du 08 Juillet 2017.

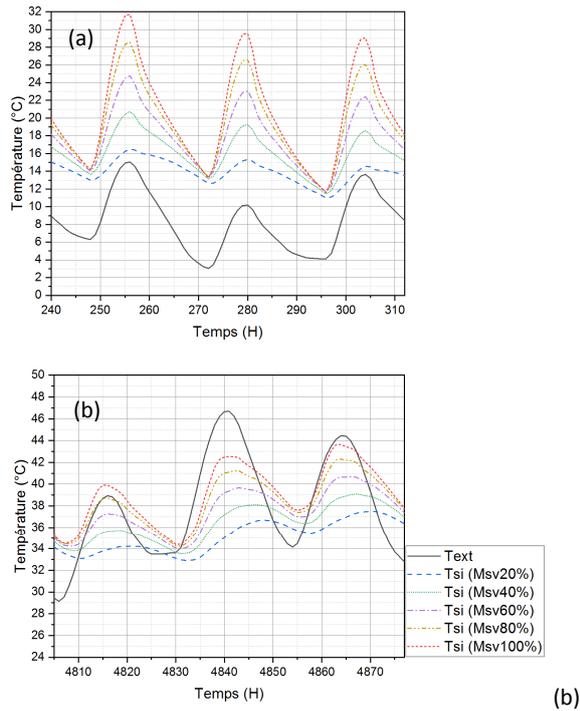


Fig. 8. Graphes de températures surfaciques internes simulées du (Msv).

Dans les deux graphes, on constate que chaque augmentation de la surface vitrée avec un simple vitrage engendre un accroissement conséquent de la température surfacique interne de la paroi. L'accroissement de la surface vitrée de 20 % à 100 % a des conséquences très négatives sur l'augmentation de (Tsi) ; en hiver de 16,5 °C à 31,7 °C avec un grand pourcentage de 47,94% et en été de 35,6 °C à 42,5°C environ 16,23 %. Ce comportement thermique influe directement sur la température ambiante (Ta) dans le bureau. Les températures ambiantes simulées dans la même période sont représentées dans la (Fig. 9).

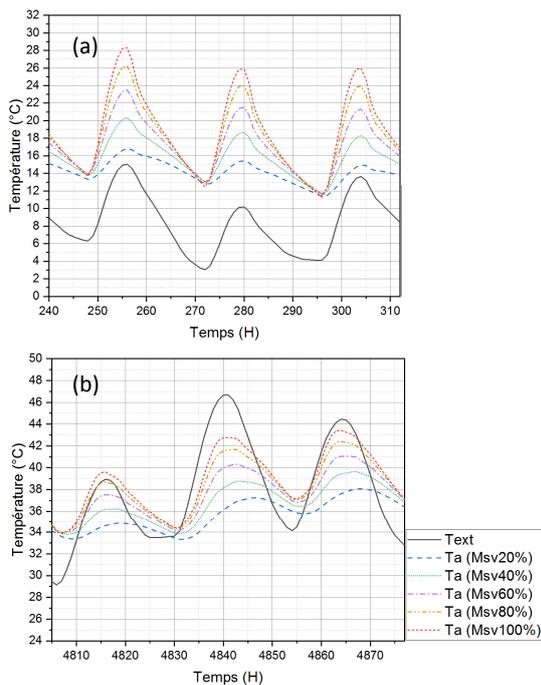


Fig. 9. Graphes des températures ambiantes simulées du (Msv).

Le graphe (9-a) – saison froide – indique que l'augmentation de la surface vitrée améliore (Ta) ; cela s'explique par la pénétration des rayonnements solaires par le vitrage qui assurent un chauffage passif. Cependant, les gains de chaleurs deviennent une source d'inconfort si la surface vitrée est grande, précisément, si le taux d'ouverture dépasse les 60 % ; dans ce cas, une hausse de température au-dessus de la plage de confort est signalée vu la grande quantité de chaleur qui traverse le vitrage.

La différence de (Ta) entre le modèle (Msv20 % et Msv100 %) peut atteindre une valeur de 11,5 °C ce qui confirme l'importance de cet élément et son impact direct sur le confort thermique.

Le graphe (9-b) – saison chaude – révèle les valeurs de (Ta) pendant l'été. Ainsi, si le ratio augmente, la (Ta) augmente aussi et parfois dépasse la température extérieure dans le cas d'un (Msv100 %) alors qu'une différence jusqu'à 6,3 °C est enregistrée avec (Msv20 %) Soit 14,75 %. Durant cette période, les valeurs de (Ta) dépassent de loin la plage de confort.

4.2.3 Résultats de l'impact du type de vitrage

Les températures surfaciques des ouvertures ont un caractère de changement irrégulier par rapport aux autres surfaces (Bouchahm et al. 2010). Pour cette raison nous avons simulé l'impact du type de vitrage sur sa température surfacique (Tsi_v) et la température ambiante (Ta). La figure 10 illustre les températures surfaciques internes des vitrages (Tsi_v) simulées pour chaque type de vitrage durant les trois jours les plus froids (graphe 10-a) et les plus chauds (graphe 10-b).

Le graphe (10-a) – période froide – indique que l'amélioration du type de vitrage (transmission thermique U de 5,74 à 1,43 w/m²k) a un impact sur la température surfacique interne du vitrage.

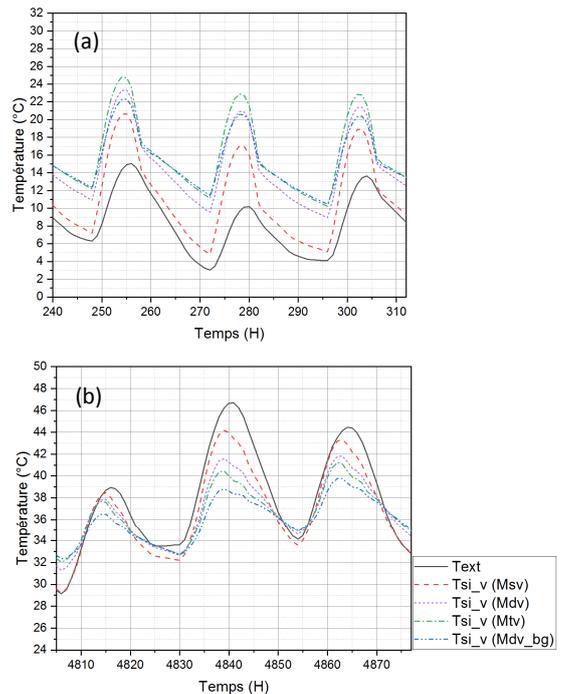


Fig. 10. Graphes des températures surfaciques internes des vitrages obtenues par simulation du (Mtv).

Le meilleur comportement est celui du modèle à double vitrage-basse émissivité avec gaz argon (Mdv_bg). Par contre on trouve un comportement très différent dans le simple vitrage vu sa transmission thermique très élevée. Dans le graphe (10-b) de la période chaude, on voit clairement l'influence de l'amélioration du type de vitrage sur la réduction de la (T_{si_v}) avec un écart maximal de 6,9 °C (un pourcentage de 15,09 %) entre le simple vitrage et le double vitrage-basse émissivité avec gaz qui révèle un bon comportement thermique durant toute la période chaude vu ses caractéristiques thermiques optimisées.

La transmission thermique "U" a des impacts considérables sur l'amélioration du comportement thermique du vitrage. En hiver, elle atténue les grandes fluctuations de la température surfacique du vitrage ; et en été, elle joue un rôle important sur la réduction des valeurs maximales des températures surfaciques. L'amélioration du type de vitrage à travers la réduction de la transmission thermique, influe également d'une manière positive sur la température ambiante (Fig. 11). Le meilleur comportement thermique remarqué est celui du modèle en double vitrage-basse émissivité avec gaz (Mdv_bg). Dans ce modèle, pendant la saison froide (graphe 11-a), on remarque que la différence avec le simple vitrage est de 1,9 °C. Durant la période chaude (graphe 11-b), on constate que ce type de vitrage permet une nette réduction de la température de l'ordre de 4,82 % par rapport au vitrage simple.

Finalement, le choix adéquat du type de vitrage a des impacts sur le comportement thermique. L'optimisation d'un seul paramètre est insuffisante et afin d'optimiser le fonctionnement thermique des bâtiments à travers les surfaces vitrées, il faut combiner plusieurs paramètres, notamment le taux d'ouverture et le type de vitrage.

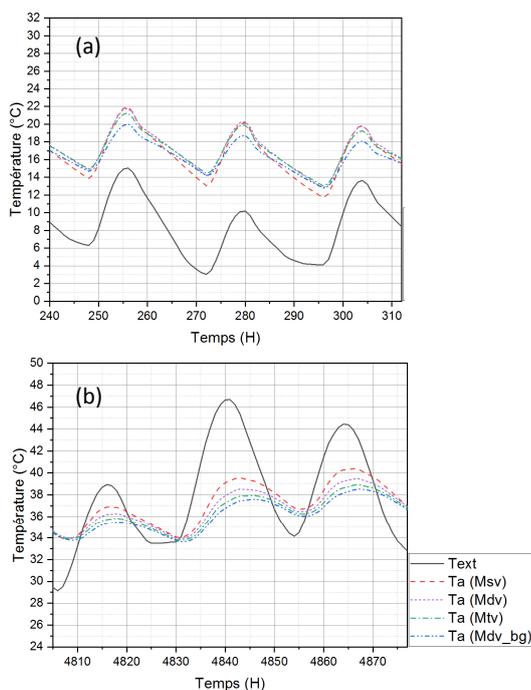


Fig. 11. Graphes de températures ambiantes simulées avec différents types de vitrages (Mtv).

4.2.4 Résultats du modèle optimisé

Le modèle optimisé (Mo-sv-tv) obtenu en croisant les variantes les plus favorables soient : le meilleur pourcentage de la surface vitrée (variante Msv20%) et le type de vitrage le plus efficace (double vitrage basse émissivité avec gaz Mdv_bg), a été comparé avec un modèle témoin (Mt) qui a une surface vitrée de 50 % en vitrage simple. L'objectif est de déterminer l'impact de l'optimisation du ratio et du type de vitrage sur le confort thermique et la performance énergétique des bâtiments. Les températures surfaciques internes simulées durant les trois jours les plus froids (le graphe 12-a) et les plus chauds (le graphe 12-b) dans les deux modèles sont présentées dans la Figure 12.

Pendant la période froide (12-a), on constate que la courbe des températures surfaciques [T_{si_v} (Mo_svs_tv)] du modèle optimisé présente moins de fluctuations (faible amplitude thermique) en comparaison avec celle du modèle témoin [T_{si_v} (Mt)] qui enregistre de grandes variations et des pics de température (une grande amplitude thermique journalière). De même, pendant la période chaude, on voit clairement que le modèle optimisé contribue à la réduction de la température surfacique interne du vitrage de 7,2 °C (soit 16,28 %) par rapport au modèle témoin.

Ces résultats sont le fait des caractéristiques thermiques du vitrage (basse émissivité et gaz argon). La diminution des grands écarts de la température surfacique interne du vitrage influe directement et de manière favorable sur la température intérieure et implicitement, sur le confort thermique des usagers. Ceci est confirmé par la température ambiante simulée durant une période froide (le graphe 13-a) -trois jours les plus froids- et une période chaude (le graphe 13-b) -trois jours les plus chauds- respectivement pour les deux modèles (Fig.13).

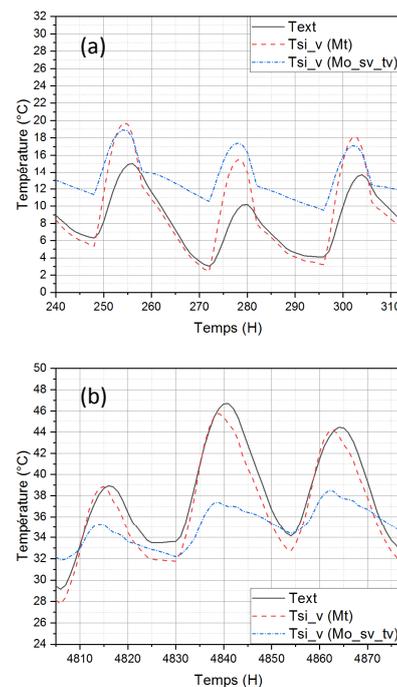


Fig. 12. Températures surfaciques internes des vitrages simulées dans les deux modèles (Mt et Mo_svs_tv).

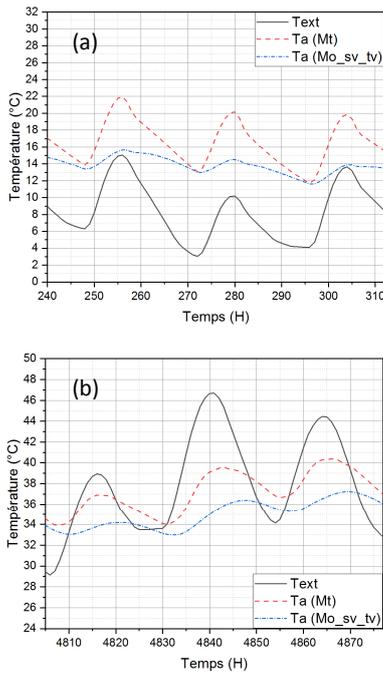


Fig. 13. Graphes de températures ambiantes simulées du (Mt et Mo_sv_tv).

Les résultats obtenus relèvent un meilleur comportement thermique dans le modèle optimisé (Mo_sv_tv) comparativement au modèle témoin. Pendant la période froide, le modèle optimisé ignore les grandes fluctuations de températures et assure un régime assez stable avec une diminution jusqu'à 6,3 °C (soit 28,76 %) et élimine la grande hausse de température. Durant la période chaude, le modèle optimisé assure la réduction de la température ambiante (Ta) jusqu'à 3,7 °C avec un pourcentage de 9,36 % qui influe favorablement sur la sensation des usagers.

Le figure 14 illustre les températures ambiantes simulées pendant une année afin d'observer le régime pendant chaque saison. Les résultats montrent que les valeurs de la température ambiante du modèle optimisé [Ta (Mo_sv_tv)] sont inférieures à celles du modèle témoin [Ta (Mt)] durant toute l'année. Cette diminution de la température est le fait des caractéristiques dimensionnelles et matérielles du vitrage (un ratio faible de 20 %

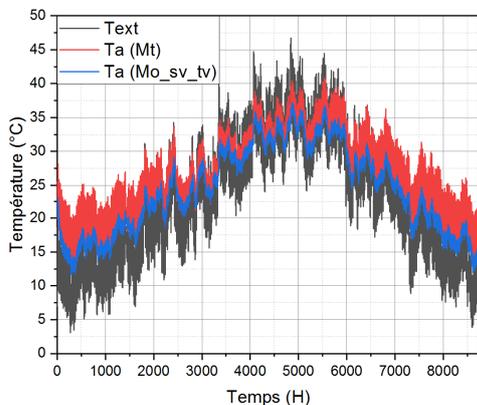


Fig. 14. Graphe des valeurs de la température ambiante simulées pendant une année pour les deux modèles [Ta (Mo_sv_tv)] et Ta (Mt).

et un vitrage performant). Le modèle témoin, révèle de grandes fluctuations qui ont été enregistrées au niveau de la température simulée avec des valeurs très élevées, même pendant la période froide. Par contre, le modèle optimisé présente dans l'ensemble un bon comportement thermique.

Les isothermes simulées pendant une année pour les deux modèles permettent de visionner les changements journaliers des températures pendant chaque mois (Fig. 15). Après une lecture globale du comportement thermique des deux modèles, on constate que (Mo_sv_tv) a un régime de température plus stable que (Mt) durant chaque période (froide, neutre ou intermédiaire et chaude) et aussi durant le mois et la journée. De faibles amplitudes thermiques journalières sont enregistrées et les changements de températures se font d'une manière progressive dans (Mo_sv_tv). Au contraire, dans le cas de (Mt) de grandes amplitudes thermiques journalières et des fluctuations brutales des températures sont constatées. Concernant les valeurs des températures, il est clair que les températures du modèle optimisé sont plus favorables que le modèle témoin en particulier pendant la période estivale où les valeurs de températures sont diminuées. Les changements de la température ambiante hors de la plage de confort augmentent systématiquement la consommation énergétique.

La figure16 présente les graphes relatifs aux besoins énergétiques nécessaires pour assurer une température ambiante dans la plage du confort thermique (supérieure à 20 °C en hiver et inférieure à 25 °C en été). Le graphe confirme la performance du modèle optimisé (Mo_sv_tv) par rapport au modèle témoin (Mt). Ce modèle optimisé a des besoins énergétiques plus bas que ceux du modèle témoin particulièrement pendant la période chaude.

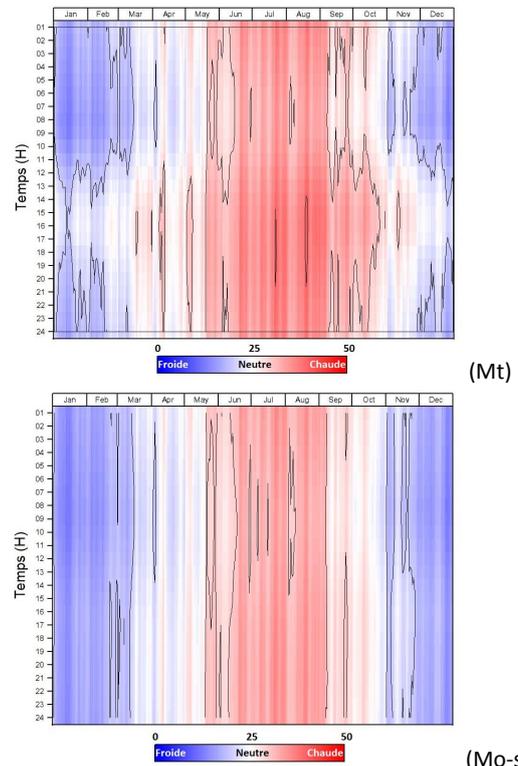


Fig. 15. Isothermes simulées du (Mt) et (Mo_sv_tv) pendant une année.

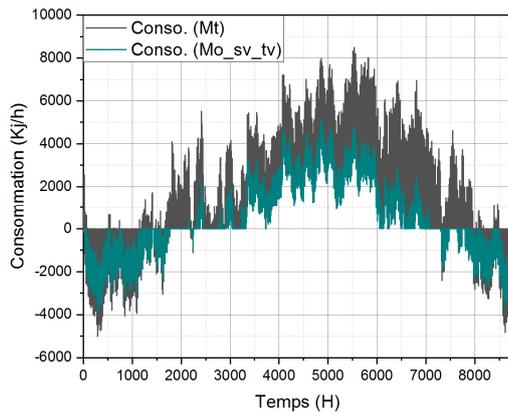


Fig. 16. Graphe des besoins énergétiques simulés du (Mt) et (Mo_sv_tv)

Durant les périodes extrêmes (les pics de froid et de chaleur), le modèle optimisé minimise, respectivement, les besoins en chauffage jusqu'à 23,28 % et les besoins de la climatisation jusqu'à 39,94 %.

L'optimisation du ratio et du type de vitrage a des impacts positifs sur la réduction des besoins énergétiques en particulier pendant la période chaude.

L'analyse de toutes ces données confirme que le taux d'ouverture (ratio) et le type de vitrage ont un impact considérable sur le fonctionnement thermique du bâtiment, le confort thermique des occupants et la consommation énergétique de la construction. Cet impact est néanmoins tributaire d'autres critères qu'il faut prendre en considération comme le type de climat et les spécificités du contexte. Ces paramètres interviennent ensemble et exigent d'être considérés comme des éléments déterminants pour la conception des façades afin d'assurer la performance du bâtiment et le confort de l'utilisateur.

5. Conclusion

Cet article a présenté les principaux résultats d'une étude basée sur des prises de mesures in situ ainsi que sur une simulation numérique avec le logiciel TRNSYS validée par des données expérimentales. L'objectif était d'étudier l'impact des ouvertures de la façade sur le confort thermique et l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux dans un climat chaud et aride. L'optimisation des caractéristiques des ouvertures de la façade en agissant sur deux paramètres (le taux d'ouverture et le type de vitrage) a également été tentée.

L'étude empirique qui a été effectuée sur un bâtiment administratif existant à Biskra, a apporté quelques éclaircissements sur les conséquences de l'utilisation d'un double vitrage simple sans gaz avec une grande surface vitrée et sans protection solaire. De tels choix architecturaux (double vitrage sans gaz) se sont avérés inefficaces et défavorables relativement à un climat chaud et aride et ont engendré des situations inconfortables pendant toute l'année en particulier pendant l'été. Par ailleurs, le cadre du vitrage s'il est en aluminium avec une couleur foncée entraîne systématiquement une augmentation de la température ambiante et une sensation thermique inconfortable chez les usagers. Donc, le choix du taux et du type

de vitrage doivent être bien réfléchis conformément au climat considéré. De même, les caractéristiques thermiques des matériaux essentiellement l'effusivité et la diffusivité thermique doivent être pris en considération.

La simulation numérique a confirmé l'effet négatif de l'augmentation de la surface vitrée avec un simple vitrage sur le confort thermique des usagers pendant toute l'année. En hiver, l'accroissement de la température ambiante peut atteindre jusqu'à 11,5 °C et en été, il est de l'ordre de 6,3 °C. Cette augmentation engendre une hausse énorme des besoins énergétiques de l'ordre de 28,06 % en hiver et de 52,31 % en été. Pour sa part, le type de vitrage influe sur le fonctionnement thermique du bâtiment. Un double vitrage de basse émissivité avec gaz diminue les gains de chaleur transférés et améliore la température ambiante jusqu'à 8,67 % en hiver et 4,82 % en été. Ce qui permet de réduire la consommation énergétique pour les besoins de chauffage jusqu'à 23,49 % et la climatisation 27,60 %.

Les résultats obtenus, à l'issue de cette recherche, montrent que la maîtrise des phénomènes thermiques se répercute directement sur l'efficacité thermique et énergétique des constructions. Un choix adéquat de la surface vitrée combiné à un type de vitrage approprié, améliore considérablement les conditions thermiques intérieures et la performance énergétique du bâtiment de 20 à 40 %. Par ailleurs, dans un climat chaud et aride, et du point de vue du confort thermique dans les bureaux, on recommande l'utilisation d'un taux de vitrage de 20 % en double vitrage de basse émissivité avec gaz vu ses atouts démontrés sur le plan thermique et énergétique. Enfin, en guise de recherches futures à développer, ces résultats devraient ouvrir la voie à plusieurs perspectives, notamment, dans le domaine de l'impact du facteur d'ombrage.

Références

- Alwetaishi, M., A. Alzaed, G. Sonetti, R. Shrahily, L. Jalil (2017) Microclimate investigation in school buildings using advanced energy equipment: Case study. *Environmental Engineering Research* 23 (1) : 10-20.
- APRUE, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (2009). *Consommation énergétique finale de l'Algérie, chiffres clés Année 2007*. Algérie : Ministère de l'Energie et des Mines.
- Arnal, E. (2013) *Modélisation et commande hiérarchisées du bâtiment pour l'amélioration des performances énergétiques, thermiques et optiques*. Thèse de Doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Boudhen, C. (2007) Influence of glass curtain walls on the building thermal energy consumption under Tunisian climatic conditions: The case of administrative buildings. *Renewable Energy* 32: 141-156.
- Bouchahm, G., F. Bourebia (2010) L'impact de l'orientation des parois transparentes sur le confort thermique dans une salle de classe à Constantine. *Revue des sciences et technologie* 31: 71-80.
- Buratti, C., E. Moretti, E. Belloni, F. Cotana (2013) Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings. *Building and Environment* 59 : 482-491.
- Daverat, C. (2012) *Etude expérimentale de la convection Naturelle en canal vertical à flux de Chaleur imposé*. Thèse de Doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

- Derradji, L., A. Hamid, B. Zeghmati, M. Amara, A. Bouttout, F.B. Errebai (2015) Experimental Study on the use of microencapsulated phase change material in walls and roofs for energy savings. *Journal of Energy Engineering* 04014046, doi: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000238
- Derradji, L., F.B. Errebai, M. Amara (2017) Effect of PCM in Improving the Thermal Comfort in Buildings. 3rd International Conference on Energy and Environment Research, ICEER, Barcelona, Espagne.
- D.T.R. C 3-2 (1997) Document Technique Réglementaire-fascicule 1, Algérie, ministère de l'habitat.
- Faure, X. (2007) Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1, France.
- Franck, M., M.A.B Hernandez, M. Alain, D. Olivier, C.G Hélène Babok, A. Yves, R. Fabrice (2011) Livre blanc : Confort et Santé dans les immeubles de bureaux énergétiquement performants - Approche globale et Interactions entre confort et performance énergétique : Première édition. États-Unis, Steelcase.
- Frédéry, L., B. Frédéric, T Françoise (2015) Qualité des ambiances dans les bâtiments : Première édition. Paris, Presses des MINES-collection Développement durable.
- Gallo, C., M. Sala, A.A.M. Sayigh (1998) Architecture : confort and energy : Première édition. Royaume-Uni, Elsevier.
- Giovanni, Z., F. Andrea (2014) Evolutionary Optimisation of Facade Design A New Approach for the Design of Building Envelopes: First Edition. London, Springer.
- Gossard, D. (2011) Impact de l'enveloppe sur la performance énergétique des bâtiments : de la caractérisation jusqu'à l'optimisation. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.
- Guichard, S. (2013) Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changements de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale. Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, La Réunion.
- Gratia, E., A. Herde (2006) Thermique des immeubles de bureaux : Première édition. Paris, Presses universitaires de Louvain.
- Heiselberg, P. (2009) Expert Guide – Part 1 Responsive Building Concepts: First Edition. Danemark, Université d'Aalborg.
- Hong, T., S.K. Chou, T.Y. Bong (1999) A design day for building load and energy estimation. *Building and Environment* 34: 469-477.
- Khadraoui M.A., L. Sriti (2017a) L'impact des caractéristiques matérielles de la façade sur son comportement thermique : cas des bureaux dans un climat chaud et aride. 18^{ème} Journées Internationales de thermique, Monastir, Tunisie.
- Khadraoui M.A., L. Sriti (2017b) Facades' thermal behavior of the office buildings in a hot and arid climate. *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism* 1(2): 28-38.
- Katarzyna, N., R.W. Małgorzata (2014) Thermal comfort of office rooms with a large area of glazing. *Technical transactions*, Université de la technologie de Cracow.
- Kjell, A. (2014) Design Energy Simulation for Architects Guide to 3D graphics : Première édition. New York, Routledge.
- Konstantinou, T. (2014) Façade Refurbishment Toolbox. Thèse de Doctorat, Delft University of Technology- Faculty of Architecture and The Build Environment, Pays-Bas.
- Liang, R., Y. Wu, R. Wilson (2015) Thermal and visual comfort analysis of an office with thermo chromic smart windows applied. *Proceedings of the International Symposium CISBAT*, Lausanne, Suisse, pp. 71-76.
- Malek, J., B. Omrane (2016) La thermique du bâtiment du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation : Première édition. Paris, Dunod.
- Mansouri O, F. Bourbia, R. Belarbi (2018) Influence de la réflectivité de l'enveloppe sur la demande énergétique des bâtiments et sur le confort thermique. *Nature et Technology* 18: 33-42.
- Miranville, F. (2002) Contribution à l'Étude des Parois Complexes en Physique du Bâtiment : Modélisation, Expérimentation et Validation Expérimentale de Complexes de Toitures incluant des Produits Minces Réfléchissants en climat tropical humide. Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, La Réunion.
- Moreno-sierra, A. (2012) Intégration des aspects énergétiques dans la conception du projet architectural : une approche méthodologique. Thèse de Doctorat, Université de BORDEAUX 1, France.
- Olissan, O.A. (2017) Influence de la fenestration en vitre sur le confort thermique des bâtiments en climat tropical et humide : cas de la bande côtière du Bénin. Thèse de Doctorat, Université de Liège, France.
- Omrany, H., A.K. Marsono (2016) Optimization of Building Energy Performance through Passive Design Strategies. *British Journal of Applied Science and Technology* 13(6): 1-16.
- Quenard, D. (2009) Low emission power generation technologies and energy management. Ed. J.C. Sabonnadière. États-Unis, Wiley, pp. 263-329.
- Rapone, G. (2012) Optimisation of office building façades by means of genetic algorithms. Thèse de Doctorat, Université degli Studi di Udine, Italie.
- Richieri, F. (2008) Développement et paramétrage de contrôleurs d'ambiance multicritères. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Roulet, C.A. (2004) Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments : Première édition. Suisse, presses polytechniques et universitaire Romande- Lausanne.
- Rossi, M. (2009) Innovative Systems for Energy Efficient Building Envelopes. 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA2009, Quebec City, Canada.
- Salem, T. (2007) Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Shan, R. (2013) Optimization for heating, cooling and lighting load in building façade design. *Elsevier-Energy Procedia* 57: 1716 – 1725.
- Soudani, L.C.L. (2016) Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material. Thèse de Doctorat, Université de Lyon, France.
- Spitz, C. (2012) Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France.
- TRNSYS 17, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, volume 5. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, États-Unis.
- Valderrama Ulloa, C.A. (2013) Exploitation et réhabilitation de bâtiments tertiaires : une démarche énergétique d'amélioration environnementale. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, France.
- Velázquez Romo, E.E. (2015) Processus de conception énergétique de bâtiments durables. Thèse de Doctorat, Université Paris Tech, France.
- Westphal, F.S., C. Andreis (2016) Influence of Glazed Facades on Energy Consumption for Air Conditioning of Office Buildings in Brazilian Climates. *International Journal of Engineering Research and Applications* 6(11): 54-60.
- Zelenay, K., M. Perepelitza, D. Lehrer (2011) High-performance facades design strategies and applications in North America and Northern Europe. Rapport, Center for the Built Environment (CBE), Université de Californie, États-Unis.