

ÉVALUATION DU CONFORT BIOCLIMATIQUE DES PASSAGERS DES MINIBUS URBAINS (TOKPA-TOKPA) À COTONOU (BÉNIN).

Résumé :

Dans les villes d'Afrique de l'Ouest, les transports collectifs artisanaux constituent une composante essentielle de la mobilité quotidienne, mais leurs caractéristiques constructives exposent les usagers à des conditions thermiques contraignantes. À Cotonou, les minibuses urbains communément appelés tokpa-tokpa présentent une forte sensibilité aux contraintes climatiques en raison de leur carrosserie métallique, de leur faible isolation thermique, de leur ventilation essentiellement naturelle et de leur forte densité d'occupation. Cette étude évalue la charge bioclimatique supportée par les passagers et les travailleurs du secteur en analysant l'effet combiné du rayonnement solaire, de l'humidité élevée et des phases de congestion routière.

Une campagne d'observation instrumentée a été conduite sur 90 trajets répartis sur trois corridors majeurs de l'agglomération de Cotonou : Védoko-Dantokpa, Étoile Rouge-Godomey et Akpakpa-Dantokpa. Des thermo-hygromètres embarqués synchronisés par GPS ont permis de caractériser les variations spatiotemporelles de l'environnement intérieur, tandis que 540 passagers et 45 conducteurs/apprentis ont participé aux enquêtes de perception thermique fondées sur les échelles TSV et ASHRAE.

Les résultats montrent une augmentation moyenne de 6,8 °C entre l'intérieur des véhicules en congestion et l'environnement extérieur durant les périodes critiques, avec des températures intérieures maximales atteignant 39,7 °C et une humidité relative supérieure à 75 %. L'Humidex intérieur dépasse fréquemment 45, indiquant une situation de stress thermique élevé. Les votes thermiques révèlent que 82,2 % des passagers ressentent une sensation de chaleur inconfortable et que les symptômes dominants sont la sudation excessive, la sensation d'étouffement et la fatigue aiguë.

Mots-clés : confort thermique ; transport informel ; microclimat urbain ; Cotonou ; stress thermique.

Abstract: Bioclimatic comfort assessment of passengers in informal urban minibuses (tokpa-tokpa) in Cotonou (Benin). Informal collective transport systems represent a major component of daily mobility in West African cities, yet their physical characteristics expose users to severe thermal conditions. In Cotonou, urban minibuses known as tokpa-tokpa are highly vulnerable to climatic constraints because of their metallic body structure, limited thermal insulation, natural ventilation dependence and high passenger density. This study assesses the bioclimatic burden experienced by passengers and transport workers by analysing the combined influence of solar radiation, high humidity and traffic congestion periods.

An instrumented observation campaign was conducted on 90 trips distributed across three major transport corridors in the Cotonou metropolitan area: Védoko-Dantokpa, Étoile Rouge-Godomey and Akpakpa-Dantokpa. GPS-synchronised onboard thermo-hygrometers were used to characterize indoor environmental variations, while 540 passengers and 45 drivers/apprentices participated in thermal perception surveys based on TSV and ASHRAE scales.

Results show an average increase of 6.8 °C between congested vehicle interiors and outdoor conditions during critical periods, with maximum indoor temperatures reaching 39.7 °C and relative humidity frequently exceeding 75 %. Indoor Humidex values regularly surpass 45,

indicating high thermal stress conditions. Thermal sensation votes reveal that 82.2 % of passengers experience unacceptable heat perception, with excessive sweating, suffocation sensation and acute fatigue identified as the main symptoms.

Keywords: thermal comfort; informal transport; urban microclimate; Cotonou; heat stress.

1. Introduction

La croissance urbaine rapide des métropoles africaines modifie profondément les systèmes de mobilité quotidienne. Dans plusieurs capitales d'Afrique subsaharienne, les transports collectifs informels assurent une part importante des déplacements grâce à leur accessibilité économique et leur capacité d'adaptation aux besoins des populations urbaines. À Cotonou, les minibus appelés tokpa-tokpa constituent un mode de déplacement populaire reliant les principaux pôles résidentiels, commerciaux et administratifs.

Ces véhicules sont généralement issus de fourgons réaménagés dont la conception initiale n'intègre pas d'exigence particulière de confort thermique. Leur carrosserie métallique non isolée absorbe fortement le rayonnement solaire, tandis que leur ventilation dépend principalement des ouvertures latérales et du déplacement du véhicule. En situation de congestion, caractéristique fréquente des corridors urbains de Cotonou, la diminution de la vitesse réduit considérablement le renouvellement d'air intérieur et favorise l'accumulation de chaleur sensible et latente.

Les environnements thermiques confinés combinant température élevée et humidité importante représentent un facteur reconnu d'inconfort et de contrainte physiologique pour les occupants exposés [P. Höppe, 2002, p. 661]. Le confort thermique dépend simultanément des paramètres environnementaux, de l'activité métabolique et des caractéristiques individuelles [P. Fanger, 1970, p. 18]. Les modèles normalisés tels que le PMV/PPD permettent d'évaluer cette interaction, bien que leur interprétation nécessite une adaptation aux contextes chauds et humides [J. Nicol, 2012, p. 280].

Dans ce contexte, cette étude répond à la question suivante : dans quelle mesure les caractéristiques physiques des tokpa-tokpa et les conditions de circulation urbaine génèrent-elles une exposition thermique critique pour les passagers et les travailleurs du secteur ? L'hypothèse principale considère que les phases de congestion provoquent une augmentation significative de la charge thermique intérieure par réduction de la ventilation dynamique et accumulation radiative.

L'objectif est d'évaluer le confort bioclimatique des usagers des tokpa-tokpa à Cotonou à partir d'une approche combinant mesures microclimatiques embarquées, positionnement GPS et perception thermique humaine.

2. Matériel et méthodes

2.1 Zone d'étude et sélection des corridors

L'étude est réalisée dans la ville de Cotonou, capitale économique du Bénin située sur la côte littorale d'Afrique de l'Ouest. S'étendant entre 6°20' et 6°23' de latitude Nord et 2°22' et 2°28' de longitude Est, la commune couvre une superficie de 79 km². Elle est délimitée au Nord par le lac Nokoué, au Sud par l'océan Atlantique, à l'Ouest par la commune d'Abomey-Calavi et à l'Est par celle de Sèmè-Podji.



Figure 1 : Carte de situation géographique de la ville de Cotonou

La ville présente un climat tropical humide caractérisé par des températures élevées toute l'année, une forte humidité atmosphérique et quatre périodes saisonnières distinctes : deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches.

Trois corridors majeurs du réseau tokpa-tokpa sont sélectionnés afin de représenter différentes configurations urbaines et niveaux de congestion :

- Corridor Vêdoko-Dantokpa, caractérisé par une forte activité commerciale. C'est l'axe commercial central traversant des nœuds denses soumis à des congestions sévères ;
- Corridor Étoile Rouge-Godomey, axe reliant Cotonou aux zones périurbaines. C'est l'axe radial structurant reliant le centre-ville aux zones résidentielles et périurbaines de l'ouest ;
- Corridor Akpakpa-Dantokpa, corridor soumis à une forte densité de circulation. C'est l'axe oriental canalisant un transit massif à travers des goulots d'étranglement (ponts de Cotonou).

2.2 Dispositif de mesures microclimatiques embarquées et géolocalisation

L'acquisition des données microclimatiques s'appuie sur une campagne de mesures in situ réalisée sur 90 trajets. Dans chaque véhicule, quatre enregistreurs thermo-hygrométriques autonomes ont été installés à une hauteur comprise entre 1,10 m et 1,40 m du plancher pour correspondre à la zone de respiration et de ressenti thermique des occupants assis :

- Capteur Avant : fixé à hauteur du buste du conducteur ;
- Capteur Centre : positionné au milieu de la cabine passagers ;
- Capteur Arrière-Soleil : placé au niveau de la rangée arrière sur le flanc exposé au rayonnement direct ;
- Capteur Arrière-Ombre : situé sur la rangée arrière opposée au rayonnement.

Les enregistrements ont été programmés à un pas de temps régulier d'une minute. Un capteur témoin sous abri ventilé a été disposé à l'extérieur des véhicules pour évaluer le microclimat

ambiant (pour comparer l'évolution intérieure et extérieure), et les données météorologiques synoptiques de la station ASECNA (Cotonou-Aéroport) ont servi de référence externe. Chaque véhicule a été équipé d'un récepteur GPS synchronisé afin d'associer à chaque enregistrement thermo-hygrométrique les variables cinématiques : vitesse instantanée, durée des phases d'arrêt et régimes de circulation (fluide vs congestionné).

Cette approche permet d'identifier l'influence directe de la ventilation dynamique liée au déplacement du véhicule.

2.3 Calcul des indices bioclimatiques et analyse thermique

L'évaluation du confort thermique intérieur repose sur une approche combinant les paramètres physiques mesurés et les réponses physiologiques déclarées par les occupants. Les variables instrumentales intégrées dans l'analyse sont la température de l'air intérieur, l'humidité relative, la température extérieure de référence, la durée d'exposition et la dynamique de déplacement du véhicule.

L'indice PMV (Predicted Mean Vote) et l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) sont calculés selon l'approche développée par Fanger et normalisée par la norme ISO 7730 afin d'estimer la sensation thermique moyenne et la proportion probable d'occupants insatisfaits. Les paramètres humains utilisés correspondent aux conditions réelles d'utilisation des tokpa-tokpa :

- Métabolisme énergétique : 1,5 met pour les passagers assis ;
- Métabolisme énergétique : 2,0 met pour les conducteurs et apprentis ;
- Résistance thermique vestimentaire: 0,4 clo(tenue légère);
- Vitesse de l'air intérieur (v_a) ajustée selon la cinématique GPS du véhicule.

Compte tenu du contexte tropical humide, l'interprétation du PMV est complétée par une approche adaptative intégrant les votes déclaratifs des occupants. Les situations dépassant les limites classiques de neutralité thermique sont interprétées en termes de contrainte thermique plutôt qu'en simple inconfort.

L'Humidex intérieur est également calculé afin d'intégrer l'effet combiné de la température et de l'humidité :

$$\text{Humidex} = T + 0,5555(e - 10)$$

où T représente la température de l'air en degrés Celsius et e la pression de vapeur d'eau. Le tableau 1 suivant présente l'échelle de classification des valeurs de Humidex.

Tableau1: Échelle de classification et niveaux de contrainte thermique de l'indice Humidex

Plage de l'Humidex	Niveau d'inconfort	Impact physiologique et recommandations
< 20	Confort thermique optimal	Aucune contrainte ressentie
20 à 29	Confort acceptable	Absence d'inconfort pour la majorité des individus
30 à 39	Inconfort thermique modéré	Sensation de chaleur, début de sudation corporelle
40 à 45	Inconfort marqué / Sensation généralisée	Forte contrainte thermique, baisse d'activité recommandée
> 45	Danger / Stress thermique critique	Coup de chaleur imminent, arrêt impératif des efforts

L'indice Humidex évalue le stress thermique combiné de la température et de l'humidité relative. Entre 20 et 29, la situation est jugée confortable pour l'organisme. Dès 30, un inconfort modéré s'installe, progressant vers un inconfort marqué à partir de 40. Les valeurs excédant 45 indiquent un niveau de contrainte thermique critique imposant un arrêt des efforts

physiques et un risque imminent de coup de chaleur, particulièrement en milieu confiné non ventilé.

Le taux d'accumulation thermique interne est estimé par la différence entre la température intérieure du véhicule et la température extérieure de référence :

$$\Delta T = T_{\text{intérieur}} - T_{\text{extérieur}}$$

Il n'existe pas de classification universellement reconnue par une norme ISO pour interpréter directement le différentiel thermique intérieur-extérieur (ΔT). Cependant, dans les études de microclimat des espaces confinés, des transports et des bâtiments non climatisés, une classification indicative peut être utilisée pour caractériser l'intensité de l'accumulation thermique interne. Le tableau 2 suivant présente cette classification.

Tableau 2. Classification indicative du différentiel thermique intérieur-extérieur (ΔT)

Valeur de ΔT	Niveau d'accumulation thermique	Interprétation bioclimatique
$\Delta T \leq 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Faible	Influence limitée de l'enveloppe du véhicule, ventilation efficace
$2 \text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Modérée	Accumulation thermique perceptible, diminution du confort thermique
$5 \text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Forte	Surchauffe intérieure significative, stress thermique probable
$\Delta T > 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Très forte	Surchauffe critique, risque élevé d'inconfort et de contrainte physiologique

L'analyse du différentiel thermique (ΔT) a permis d'identifier la capacité d'un habitacle à accumuler de la chaleur par rapport à son environnement extérieur. Dans les tokpa-tokpa étudiés, les valeurs dépassant régulièrement $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ indiquent une forte amplification thermique liée à la carrosserie métallique, au rayonnement solaire et aux apports métaboliques des occupants. Les situations présentant un ΔT supérieur à $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ correspondent aux phases de congestion prolongée où la ventilation naturelle devient insuffisante. Cet indicateur complète les indices thermiques classiques en mettant en évidence l'effet spécifique de la conception du véhicule sur l'exposition thermique des usagers.

Cette approche permet d'identifier l'effet spécifique de l'enveloppe métallique et de la densité d'occupation sur la formation d'un microclimat intérieur contraignant.

2.4. Enquêtes de perception thermique et analyse statistique

Une enquête transversale est réalisée auprès de 540 passagers et 45 travailleurs du secteur comprenant conducteurs et apprentis.

Le recrutement repose sur un échantillonnage par quotas occasionnels réparti selon :

- les trois corridors étudiés ;
- les quatre saisons climatiques ;
- les périodes horaires de forte activité ;
- les phases de circulation fluide et congestionnée.

Les questionnaires collectent le niveau de gêne thermique ; l'intensité de la sudation ; les symptômes ressentis (sensation d'étouffement, céphalées, fatigue, malaise thermique) et la sensation thermique subjective TSV (Thermal Sensation Vote) selon l'échelle ASHRAE à 7 niveaux. Le tableau 3 suivant présente l'échelle ASHRAE et son interprétation bioclimatique.

Tableau 3. Échelle de sensation thermique ASHRAE 55 (TSV)

Vote numérique	Sensation thermique	Interprétation bioclimatique
+3	Très chaud (<i>Hot</i>)	Contrainte thermique chaude sévère
+2	Chaud (<i>Warm</i>)	Inconfort thermique chaud marqué

+1	Légèrement chaud (<i>Slightly warm</i>)	Légère déviation chaude de la neutralité
0	Neutre (<i>Neutral</i>)	Zone de confort thermique / Équilibre thermique
-1	Légèrement frais (<i>Slightly cool</i>)	Légère déviation fraîche de la neutralité
-2	Frais (<i>Cool</i>)	Inconfort thermique frais
-3	Froid (<i>Cold</i>)	Contrainte thermique froide sévère

L'échelle ASHRAE standardise le vote de sensation thermique (TSV) sur 7 niveaux symétriques centrés sur la neutralité (0). Les classes positives (+1 à +3) mesurent l'intensité croissante de la contrainte chaude, tandis que les valeurs négatives (-1 à -3) caractérisent l'exposition au froid. Dans les environnements tropicaux confinés, cette échelle subjective permet de quantifier la déviation par rapport à la zone de confort et de calibrer les modèles prédictifs d'inconfort bioclimatique.

Les données ont fait l'objet d'analyses statistiques descriptives (moyennes, écarts-types, fréquences) et inférentielles : une analyse de corrélation linéaire de Pearson a été réalisée pour évaluer la relation entre la vitesse de déplacement (GPS) et le différentiel thermique (ΔT), complétée par un test t de Student pour échantillons appariés afin de tester la significativité du gradient thermique entre les zones exposées et ombragées de l'habitable (seuil de significativité fixé à $\alpha = 0,05$).

3. Résultats

3.1 Profils thermo-hygro-métriques diurnes et impact du régime de trafic

L'analyse temporelle met en évidence une forte dépendance entre les conditions de circulation et l'évolution thermique interne des tokpa-tokpa. La figure 2 présente l'évolution temporelle comparée de la température intérieure du minibus, de la température extérieure et de la vitesse GPS illustrant les hausses thermiques instantanées lors des congestions.

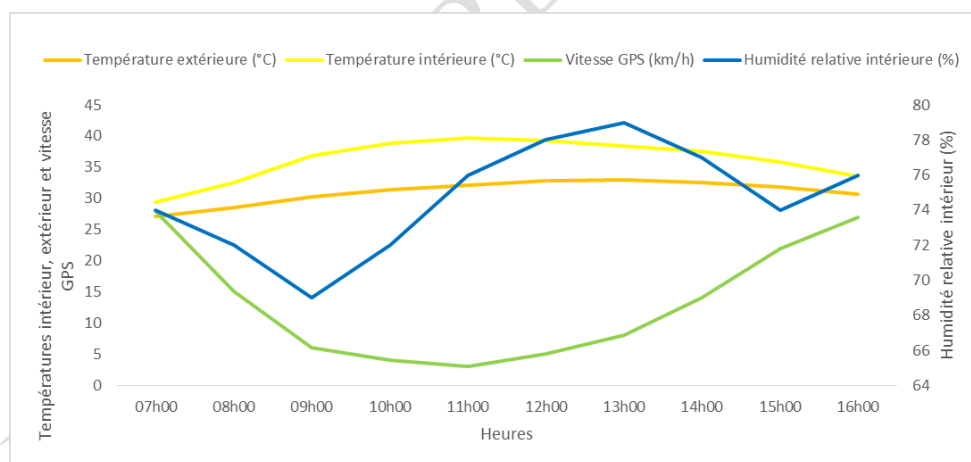


Figure 2. Évolution journalière de la température intérieure, température extérieure et vitesse GPS dans un tokpa-tokpa à Cotonou

Source : Données issues du dispositif métrologique embarqué et traitement statistique de l'étude.

L'analyse de cette figure montre que les variations thermiques observées à l'intérieur des tokpa-tokpa sont fortement conditionnées par le régime de circulation urbaine et par la capacité de renouvellement d'air liée au déplacement du véhicule.

Au début de la période d'observation, lorsque la vitesse moyenne atteint 28 km/h, la différence entre la température intérieure et extérieure reste limitée à environ 2,3 °C, traduisant l'effet favorable de la ventilation dynamique générée par le mouvement du véhicule. Cependant, dès l'apparition des ralentissements urbains, une rupture thermique apparaît progressivement. Entre 08h00 et 11h00, la vitesse GPS chute de 15 km/h à seulement

3 km/h tandis que la température intérieure augmente de 32,6 °C à 39,7 °C, soit une élévation de 7,1 °C en trois heures. Durant cette même période, la température extérieure augmente seulement de 3,6 °C, confirmant que l'augmentation thermique interne ne résulte pas uniquement du climat ambiant mais également de phénomènes propres à l'habitacle. L'analyse statistique confirme une forte corrélation négative et hautement significative entre la vitesse instantanée du véhicule et le différentiel thermique intérieur-extérieur ($r = -0,71$; $p < 0,001$). Ce résultat démontre mathématiquement que chaque baisse d'allure lors des ralentissements amplifie directement le gradient d'accumulation de chaleur à l'intérieur de l'habitacle par défaut de convection dynamique.

La combinaison du rayonnement solaire absorbé par la carrosserie métallique, de la chaleur métabolique produite par les occupants et de la diminution des échanges convectifs entraîne une accumulation progressive d'énergie thermique.

Le différentiel intérieur-extérieur atteint son maximum pendant les phases d'arrêt prolongé, avec une valeur proche de 7 °C, indiquant un effet de serre intérieur comparable à celui observé dans d'autres espaces confinés soumis à une forte charge solaire.

L'évolution de l'humidité relative intérieure présente une dynamique bimodale : une chute matinale initiale (69 % à 09h00) liée à l'élévation rapide de la température d'air, suivie d'une saturation progressive (dépassant 78 % à 13h00) provoquée par la sudation massive des passagers en situation d'arrêt prolongé et de confinement. La persistance d'une humidité relative supérieure à 75 % pendant les périodes les plus chaudes limite également l'efficacité de la transpiration comme mécanisme naturel de thermorégulation. Ces résultats démontrent que la congestion routière constitue un facteur aggravant majeur du stress thermique dans les transports collectifs artisanaux de Cotonou.

3.2 Hétérogénéité et gradients thermiques spatiotemporels dans l'habitacle

L'examen spatial de l'habitacle révèle une distribution thermique non homogène liée à l'exposition solaire, à la proximité de la carrosserie métallique et à la densité d'occupation. Le tableau 4 présente la synthèse comparative des températures moyennes d'air, humidités relatives et Humidex selon l'emplacement des sièges.

Tableau 4. Distribution thermique moyenne selon les positions d'occupation dans les tokpa-tokpa.

Zone intérieure	Température moyenne (°C)	Humidité relative (%)	Humidex moyen	PMV moyen
Rangée avant conducteur	35,8	72	43,7	+2,8
Rangée centrale	34,6	75	42,1	+2,4
Rangée arrière côté soleil	37,2	74	46,1	+3,1
Rangée arrière côté ombre	35,1	76	43,0	+2,6

Source : Mesures thermo-hygrométriques embarquées.

L'examen de ce tableau 4 met en évidence une forte hétérogénéité spatiale des conditions thermiques à l'intérieur des tokpa-tokpa, révélant que l'exposition thermique des passagers dépend directement de leur position dans l'habitacle.

La zone arrière située du côté exposé au rayonnement solaire présente les conditions les plus défavorables avec une température moyenne de 37,2 °C, soit une différence de 2,6 °C par rapport à la rangée centrale, considérée comme la zone de référence intérieure. Cette augmentation s'explique principalement par la proximité immédiate de la paroi métallique chauffée par le rayonnement solaire, qui augmente les échanges radiatifs entre la carrosserie et les occupants.

Le test t de Student pour séries appariées met en évidence une différence statistiquement très significative entre les températures enregistrées côté exposé au soleil et celles du côté opposé à l'ombre ($t = 8,46$; $p < 0,001$). Cette disparité confirme l'impact prépondérant de l'onde

thermique convective et radiative émise par la paroi métallique non isolée sur le microclimat perçu par les passagers.

La même zone présente également l'Humidex moyen le plus élevé avec une valeur de 46,1, traduisant une combinaison critique entre température élevée et forte humidité atmosphérique. Le PMV moyen supérieur à +3 dans cette position indique que les occupants ressentent une chaleur importante dépassant largement la zone de confort thermique acceptable.

La rangée centrale bénéficie d'un environnement légèrement moins contraignant grâce à une exposition radiative réduite et une meilleure circulation de l'air, mais reste néanmoins caractérisée par un niveau d'inconfort thermique élevé avec un Humidex supérieur à 42. Les valeurs observées dans toutes les zones dépassent les seuils généralement associés à un environnement thermiquement neutre, ce qui confirme que l'organisation spatiale intérieure des véhicules joue un rôle déterminant dans l'exposition individuelle.

3.3 Réponses perceptives et symptômes d'inconfort thermique déclarés

L'analyse des questionnaires montre une forte cohérence entre les mesures microclimatiques et les perceptions exprimées par les occupants. Les passagers et travailleurs du secteur signalent une exposition thermique importante particulièrement pendant les périodes de forte congestion et durant les heures centrales de la journée. La figure 3 représente la répartition des votes de sensation thermique TSV et prévalence des symptômes physiques liés à l'exposition thermique dans les tokpa-tokpa.

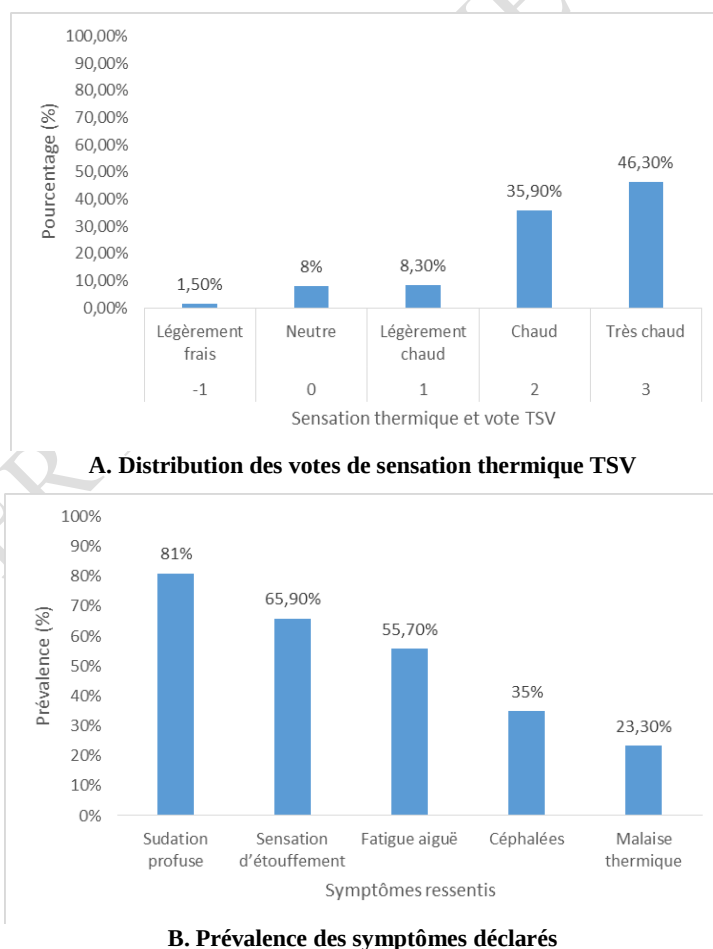


Figure 3. Distribution des sensations thermiques subjectives et symptômes associés chez les usagers des tokpa-tokpa à Cotonou.

Source : Enquêtes de perception thermique auprès des passagers et travailleurs du transport artisanal.

L'analyse de cette figure révèle une concordance importante entre les paramètres physiques mesurés dans les véhicules et les réponses subjectives exprimées par les occupants. Les modalités extrêmes fraîches (-2 et -3) n'ayant recueilli aucun vote (0 %), la distribution se concentre intégralement entre -1 et +3.

La distribution des votes de sensation thermique montre une nette domination des perceptions orientées vers la chaleur excessive, puisque 82,2 % des passagers déclarent ressentir une situation comprise entre « chaud » et « très chaud ». Le vote thermique moyen atteint +2,27, indiquant que la majorité des usagers considère l'environnement intérieur comme significativement inconfortable. La catégorie « très chaud » représente à elle seule 46,3 % des réponses, ce qui traduit une exposition thermique intense et largement perceptible par les occupants.

Cette perception est renforcée par la fréquence élevée des symptômes physiques associés à la contrainte thermique. La sudation profuse constitue la manifestation la plus rapportée avec 81 % des répondants concernés, confirmant l'activation importante des mécanismes physiologiques de refroidissement corporel.

La sensation d'étouffement, déclarée par 65,9 % des participants, traduit quant à elle l'effet combiné de la température élevée, de l'humidité relative importante et du faible renouvellement d'air lors des congestions. La fatigue aiguë observée chez 55,7 % des répondants représente un indicateur préoccupant, particulièrement chez les conducteurs et apprentis soumis à des expositions prolongées. La présence de céphalées chez 35 % des participants suggère également un impact potentiel sur le bien-être et les capacités fonctionnelles pendant les trajets.

L'ensemble de ces observations confirme que l'inconfort thermique dans les tokpa-tokpa ne constitue pas uniquement une perception subjective mais correspond à une contrainte environnementale mesurable susceptible d'affecter la santé, la vigilance et la qualité des déplacements urbains.

3.4 Relations entre dynamique de déplacement, accumulation thermique et gradients spatiaux

L'analyse statistique confirme l'influence significative du régime de circulation et de l'exposition solaire sur les conditions thermiques internes des tokpa-tokpa. Le tableau 5 présente la corrélation entre vitesse GPS et gradient thermique intérieur-extérieur (ΔT).

Tableau 5. Relation statistique entre la vitesse de déplacement des tokpa-tokpa et l'accumulation thermique intérieure.

Analyse statistique	Variable 1	Variable 2	Coefficient	p-value	Interprétation
Corrélation de Pearson	Vitesse GPS (km/h)	ΔT (°C)	$r = -0,71$	$< 0,001$	Relation négative forte
Corrélation de Spearman	Vitesse GPS (km/h)	ΔT (°C)	$\rho = -0,68$	$< 0,001$	Association monotone significative

Source : Analyse statistique des mesures thermo-hygrométriques embarquées et données GPS.

L'examen de ce tableau montre une relation inverse significative entre la vitesse du véhicule et l'accumulation thermique intérieure. Le coefficient de Pearson ($r = -0,71$) indique qu'une diminution de la vitesse s'accompagne d'une augmentation importante du gradient thermique ΔT . La corrélation de Spearman confirme cette tendance avec une association robuste ($\rho = -0,68$). Ces résultats démontrent que les phases de congestion réduisent fortement la ventilation dynamique et favorisent l'accumulation de chaleur dans l'habitacle.

Le tableau 6 présente la comparaison thermique entre zones exposées au soleil et zones ombragées de l'habitacle.

Tableau 6. Comparaison des conditions thermiques entre surfaces exposées et zones protégées du rayonnement solaire

Paramètre comparé	Zone exposée au soleil	Zone ombragée	Différence moyenne	Test t apparié	p-value
Température intérieure (°C)	37,2 ± 2,1	35,1 ± 1,8	+2,1 °C	t = 8,46	< 0,001
Humidité relative (%)	74,0 ± 5,2	76,0 ± 4,8	-2,0 %	t = -3,12	0,003
Humidex	46,1 ± 2,7	43,0 ± 2,4	+3,1	t = 9,15	< 0,001

Source : Mesures embarquées synchronisées selon la position des capteurs dans l'habitacle.

L'examen de ce tableau confirme une différence thermique significative entre les zones exposées et ombragées des véhicules. La température moyenne est supérieure de 2,1 °C du côté exposé au rayonnement solaire ($p < 0,001$), tandis que l'Humidex augmente de 3,1 unités. Cette différence traduit l'effet combiné du rayonnement direct et du transfert thermique par la carrosserie métallique. Les résultats indiquent que la position occupée dans l'habitacle constitue un facteur déterminant de l'exposition thermique individuelle.

4. Discussion

Cette étude met en évidence l'existence d'un microclimat intérieur fortement contraignant dans les tokpa-tokpa de Cotonou. La charge thermique observée résulte d'une interaction entre les propriétés physiques des véhicules, la densité d'occupation humaine et les conditions climatiques tropicales humides.

La carrosserie métallique non isolée constitue un facteur déterminant. Les surfaces métalliques absorbent une partie importante du rayonnement solaire et transfèrent rapidement la chaleur vers l'espace intérieur par conduction et rayonnement infrarouge. La significativité statistique du différentiel d'exposition entre les flancs ensoleillé et ombragé ($t = 8,46$; $p < 0,001$) met en relief l'urgence d'isoler la toiture et les parois latérales exposées par des matériaux biosourcés ou des peintures hautement réfléchives. Cette situation est accentuée par la faible inertie thermique des parois minces et l'absence d'isolation sous pavillon.

La densité d'occupation élevée, parfois inférieure à 0,25 m² par passager, augmente également les apports thermiques internes. Chaque occupant contribue par son métabolisme à une production continue de chaleur sensible et latente, tandis que l'accumulation d'humidité réduit progressivement la capacité de refroidissement évaporatif du corps humain [P. Fanger, 1970, p. 72].

Les périodes de congestion représentent le principal facteur aggravant. Lorsque la vitesse chute sous 5 km/h, la ventilation naturelle générée par le déplacement devient insuffisante. Cette corrélation négative marquée ($r = -0,71$; $p < 0,001$) corrobore le fait que l'arrêt ou le ralentissement du véhicule supprime le flux convectif salvateur, transformant l'habitacle en piège thermique pour les passagers. Cette situation rejoint les observations réalisées dans plusieurs systèmes de transport collectif tropicaux où les véhicules fermés ou semi-fermés présentent des niveaux élevés de stress thermique en contexte urbain dense [G. Emmanuel, 2020, p. 114].

Les conducteurs et apprentis constituent un groupe particulièrement vulnérable. Leur exposition quotidienne estimée entre 10 et 14 heures combine chaleur, humidité élevée, posture prolongée et absence de récupération thermique suffisante. Les effets chroniques de l'exposition professionnelle à la chaleur comprennent une augmentation de la fatigue, une diminution de la vigilance et une baisse des performances cognitives [A. Kjellstrom, 2016, p. 39].

Plusieurs solutions d'adaptation passive peuvent être envisagées pour améliorer les conditions thermiques sans transformation profonde du modèle économique des tokpa-tokpa :

- application de revêtements de toiture à forte réflectance solaire ;
- installation d'une isolation sous pavillon utilisant des matériaux biosourcés locaux ;
- amélioration des ouvertures latérales par déflecteurs aérodynamiques ;
- utilisation de films athermiques adaptés aux vitrages ;
- optimisation de la disposition intérieure afin de réduire les concentrations de chaleur.

Ces stratégies rejoignent les recommandations internationales sur l'adaptation climatique des espaces occupés en zone tropicale, où les solutions passives représentent souvent une approche plus accessible que les systèmes énergivores de climatisation [J. Nicol, 2012, p. 291].

5. Conclusion

Cette étude caractérise la charge thermique subie par les passagers et les travailleurs des minibus urbains tokpa-tokpa à Cotonou. L'approche combinant mesures thermo-hygrométriques embarquées, données GPS et enquêtes de perception permet d'identifier les mécanismes physiques responsables de l'inconfort thermique dans ces véhicules.

Les résultats montrent que les conditions intérieures peuvent dépasser largement les conditions climatiques extérieures lors des périodes de congestion. Les températures proches de 40 °C, les humidités relatives supérieures à 75 % et les valeurs élevées d'Humidex traduisent une exposition thermique importante. La perception des occupants confirme ces observations avec une majorité de votes thermiques orientés vers une sensation de chaleur excessive.

Les principaux facteurs explicatifs sont la forte absorption radiative de la carrosserie métallique, l'absence d'isolation thermique, la densité d'occupation élevée et la réduction de la ventilation naturelle lorsque les véhicules circulent à faible vitesse.

L'amélioration du confort thermique des tokpa-tokpa constitue un enjeu de santé publique et de mobilité durable pour Cotonou. Les solutions prioritaires doivent privilégier des interventions peu coûteuses et adaptées au contexte local, notamment les revêtements réfléchissants, l'isolation passive et l'amélioration de la circulation d'air.

Cette étude fournit une base scientifique pour intégrer le confort bioclimatique dans les politiques futures d'organisation du transport collectif urbain au Bénin.

Références bibliographiques

1. FangerPoul Ole. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: DanishTechnicalPress; 1970. 244 p.
2. Höppe Peter. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*. 2002;34(6):661-665.
3. Nicol Fergus, Humphreys Michael, Roaf Susan. *Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice*. London: Routledge; 2012. 344 p.
4. International Organization for Standardization. *ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment: Instruments for measuring physical quantities*. Geneva: ISO; 1998.

- 404 5. International Organization for Standardization. *ISO 7730: Ergonomics of the thermal*
405 *environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using*
406 *calculation of PMV and PPD indices*. Geneva: ISO; 2005.
- 407 6. International Organization for Standardization. *ISO 10551: Ergonomics of the thermal*
408 *environment: Assessment of the influence of the thermal environment using subjective*
409 *judgement scales*. Geneva: ISO; 2019.
- 410 7. KjellstromTord, Lemke Bruno, Otto Matthias. Climate conditions, workplace heat and
411 occupational health in tropical regions. *Global Health Action*. 2016;9(1):31245.
- 412 8. Emmanuel Rohinton. Urban heat islands and human health in tropical cities.
413 *SustainableCities and Society*. 2020;54:101953.
- 414 9. Parsons Ken. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold*
415 *Environments on Human Health, Comfort and Performance*. 4th ed. Boca Raton: CRC
416 Press; 2020. 620 p.
- 417 10. Santamouris Mat. Recent progress on urban overheating and heat island research.
418 *Energy and Buildings*. 2020;207:109482.
- 419 11. Steemers Koen, ManchandaSiddharth. Energy efficient design and thermal comfort in
420 tropical urban environments. *Building Research& Information*. 2019;47(3):305-318.
- 421