

Organisation des horizons superficiels d'altération et propriétés géotechniques des sols de fondation de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso)

Hamma Fabien Yonli^{1,2,*}, Michel Wendwaoga Kaboré^{3,4}, Aristide Compaoré³

¹Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE), Université Joseph KI-ZERBO, BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

²Ecole Supérieure d'Ingénierie, Université Yembila Abdoulaye TOGUYENI, BP 46 Fada N'Gourma, Burkina Faso

³Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics, BP 133 Ouagadougou 01, Burkina Faso

⁴Ecole Nationale des Travaux Publics, BP 2054 Ouagadougou 01, Burkina Faso

Reçu : 18 Mars 2026 / Reçu sous sa forme révisée : 13 Mai 2026 / Accepté : 12 Juin 2026

Résumé :

Cette étude présente une synthèse des données géotechniques de la ville de Ouagadougou, dans un contexte de forte urbanisation. Elle se fonde sur l'analyse de 117 sites investigués par sondages manuels de 0 à 4 m de profondeur, complétée par des essais de pénétration dynamique. Les résultats obtenus montrent une organisation verticale des formations reflétant celle des horizons d'altération. De 0,5 m à 2 m de profondeur, les formations latéritiques indurées (carapace et cuirasse) sont majoritaires. Leur forte cimentation ferrugineuse leur confère une bonne capacité portante et une faible compressibilité, propices à l'ancrage des fondations superficielles. À 3 m de profondeur, ce sont les formations argileuses qui dominent ; cette situation traduit une augmentation potentielle des tassements. À l'échelle des 117 sites étudiés, les contraintes admissibles calculées varient entre 0,08 et 0,20 MPa, avec une moyenne de 0,17 MPa, ce qui indique que les conditions de portance sont généralement modérées à élevées. Par ailleurs, le test de Kruskal-Wallis met en évidence une influence significative de la lithologie sur les contraintes admissibles. Les résultats soulignent également les relations entre la microstructure décrite dans la littérature, la lithologie et le comportement mécanique des sols de fondation.

Mots-clés : Reconnaissance géotechnique ; Fondations superficielles ; Pénétromètre dynamique lourd ; Contrainte admissible ; Burkina Faso.

Abstract:

This study presents a summary of the geotechnical data for the city of Ouagadougou, in a context of rapid urbanization. It is based on an analysis of 117 sites investigated by hand-drilled boreholes ranging from 0 to 4 m in depth, supplemented by dynamic penetration tests. The results show a vertical stratification of the ground that mirrors that of the weathering horizons. From 0.5 m to 2 m depth, hardened lateritic formations (carapace and cuirass) predominate. Their strong iron-rich cementation

*Auteur correspondant:

Adresse e-mail : fabienyonli@yahoo.fr (H.F. Yonli)
<https://doi.org/10.70974/mat10126077>

gives them good bearing capacity and low compressibility, which are favourable for the anchoring of shallow foundations. At a depth of 3 m, clay formations dominate; this situation indicates a potential increase in settlement. Across the 117 sites studied, the calculated allowable stresses range from 0.08 to 0.20 MPa, with an average of 0.17 MPa, indicating that bearing capacity conditions are generally moderate to good. Furthermore, the Kruskal–Wallis test highlights a significant influence of lithology on allowable stresses. The results also underscore the relationships between the microstructure described in the literature, lithology and the mechanical behaviour of foundation soils.

Keywords : Geotechnical investigation; Shallow foundations; Dynamic cone penetration test; Allowable bearing capacity; Burkina Faso.

1. Introduction

Au Burkina Faso, l'augmentation de la densité des populations urbaines, en particulier dans la capitale Ouagadougou, s'accompagne de nombreux problèmes en matière d'aménagement du territoire. Cette dynamique accentue la pression sur les terrains constructibles et renforce les enjeux liés à la qualité des sols de fondation. Dans ce contexte, la compréhension des propriétés des sols de la ville de Ouagadougou et de leur variabilité est déterminante pour la conception d'ouvrages stables et durables. La performance de tels ouvrages dépend étroitement des propriétés mécaniques, en particulier de la capacité portante des sols de fondation [1]. L'évaluation de cette capacité portante doit être rigoureuse, particulièrement dans le cas des fondations superficielles, qui sont largement utilisées en raison de leur économicité [2].

La caractérisation des sols de fondation repose sur une combinaison d'investigations *in situ* et d'essais en laboratoire. Parmi les méthodes *in situ*, l'essai au pénétromètre dynamique, en raison de sa simplicité, de son faible coût et de sa portabilité, constitue un outil particulièrement adapté, surtout lorsque les moyens d'investigation sont limités. Il permet de mesurer la capacité portante des sols, laquelle est influencée par des facteurs tels que la granulométrie, la densité ou la teneur en eau [4, 5]. La mise en œuvre de l'essai est rapide et peut ainsi favoriser la constitution de bases de données géotechniques [6].

Lorsque ces propriétés sont organisées en bases de données, elles permettent de définir des campagnes de reconnaissance à la fois économiques et fiables; elles permettent également d'optimiser les investissements et d'orienter l'urbanisation de façon rationnelle [7]. Leur intégration dans la planification territoriale contribue à renforcer la prévention des risques géotechniques et l'anticipation des aléas. Les bases de données géotechniques constituent à ce titre de véritables outils d'aide à la décision. Des auteurs tels que Idris *et al.* [8] ont mis en évidence que la rétro-analyse d'accidents géotechniques, accompagnée d'une analyse des bases de données structurées, permet aussi d'identifier les facteurs d'instabilité structurale et d'améliorer les stratégies de prévention. L'intérêt de ces bases de données est maximal lorsqu'elles sont couplées à des outils modernes d'analyse spatiale. Dans plusieurs métropoles, la structuration des informations géotechniques a conduit à la production

de cartes thématiques, de modèles 3D du sous-sol et de zonages d'aptitude, qui sont devenus de véritables outils d'aide à la décision. À Djelfa (Algérie), ces bases se sont avérées utiles pour conduire des études préliminaires avant investigations, notamment grâce à la connaissance des capacités portantes des sols [9]. En France, la base de données « pathologies liées à la sécheresse » a permis d'analyser la relation entre les désordres structurels et la nature des sols supports [10]. Il convient de souligner qu'à travers les bases de données géotechniques, les ingénieurs disposent d'informations importantes sur les unités lithologiques, les profondeurs d'ancrage et les contraintes admissibles, facilitant ainsi le dimensionnement adapté des ouvrages [9]. Brentini [11], dans son étude du bassin genevois, souligne qu'une gestion efficace des géoressources repose avant tout sur une organisation rigoureuse et cohérente de leurs propriétés, en particulier lorsque l'on fait face à une hétérogénéité des informations géologiques.

Au Burkina Faso, le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) réalise chaque année un volume important d'investigations géotechniques dans la ville de Ouagadougou. Sur la base de ces investigations, plusieurs travaux ont été conduits. Ces investigations constituent une source importante de données pour les études de fondation des bâtiments et des ouvrages d'art. Plus récemment, Yonli *et al.* [12] ont estimé les tassements différentiels des sols de fondation de bâtiments par une approche couplée géotechnique–géophysique. Toutefois, ces travaux antérieurs demeurent ponctuels et sectoriels. À notre connaissance, aucune synthèse intégrée à l'échelle urbaine n'a encore permis de structurer, voire de cartographier, l'ensemble des données géotechniques disponibles pour la ville de Ouagadougou. Un tel référentiel constituerait pourtant un outil stratégique pour les urbanistes, ingénieurs et décideurs, y compris non spécialistes de la géotechnique.

En plus de la capacité portante des sols de fondation, il est également nécessaire de bien appréhender leur nature lithologique. Des auteurs tels que Taypondou *et al.* [13] ont mis en évidence que la géomorphologie et les processus pédogénétiques influencent la capacité portante des sols de fondation. Ebikeme et Tamuno [14] ont établi qu'en milieu sédimentaire, les dépôts sableux peuvent offrir de bonnes capacités portantes, avec des angles de frottement élevés et une cohésion quasi nulle,

favorables à la mise en œuvre de fondations superficielles.

Le présent article constitue une première étape vers l'élaboration d'une synthèse des données géotechniques à l'échelle urbaine de Ouagadougou, en mettant en relation la variabilité lithologique observée et les propriétés mécaniques associées, interprétées à la lumière des contrôles microstructuraux décrits dans la littérature. L'étude s'appuie sur l'analyse de 117 sondages et présente une description des sols issue des logs géotechniques pour des profondeurs comprises entre 0 et 3 m, ainsi que les valeurs de contraintes admissibles rencontrées dans la ville. Le type d'ouvrages concerné par cette étude est léger à modéré (maisons individuelles, petits immeubles d'habitation, bâtiments scolaires ou administratifs simples, de type R+0 à R+1, parfois R+2, etc.).

2. Matériel et méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude

La ville de Ouagadougou est située au centre du Burkina Faso et en constitue également la capitale politique (Figure 1). Avec une superficie de 520 km², elle compte 12 arrondissements et 55 secteurs. En raison de son statut, la ville abrite la plupart des grands projets de construction du pays, nécessitant au préalable une analyse du sol. Sur le plan géologique, selon Castaing *et al.* [15], la ville de Ouagadougou est principalement constituée de formations cristallines et cristallophyl-liennes du Paléoprotérozoïque. On observe des intrusions de dolérites, de pegmatites et d'aprites d'âge méso-

protérozoïque dans ces formations granitoïdes, ainsi que d'importantes fractures orientées du nord au sud, du nord-est au sud-ouest et du nord-ouest au sud-est. La couche d'altération est épaisse et peut atteindre jusqu'à 40 m par endroit. Une couche d'altération latéritique alumino-ferrugineuse recouvre les altérites argileuses et les arènes granuleuses, formant ainsi le profil géologique complet. Les premiers horizons de l'altération abritent les fondations des ouvrages.

2.2. Sélection des données et représentativité de l'échantillon

Dans la présente étude, 117 données de sondages géotechniques, réalisés sur le territoire de la ville de Ouagadougou, ont été exploitées. Les données proviennent des archives techniques du LNBTP et concernent l'année 2020. La répartition spatiale des sondages, bien qu'étendue sur l'ensemble de la ville, présente une densité plus élevée dans la zone centrale, où étaient localisés la plupart des projets d'aménagement. Il en résulte une couverture plus diffuse dans les zones périphériques, notamment dans les secteurs nord de la ville (Figure 2).

Malgré l'application de protocoles d'essais normalisés pour le pénétromètre dynamique, les conditions opératoires peuvent influencer sur les données collectées. Soulignons par ailleurs que les données ont été collectées dans une logique opérationnelle et non dans le cadre d'un protocole expérimental dédié à la présente étude. Toutefois, un contrôle qualité basé sur la complétude des informations et la cohérence des profils stratigraphiques a été réalisé pour surmonter ces limites.

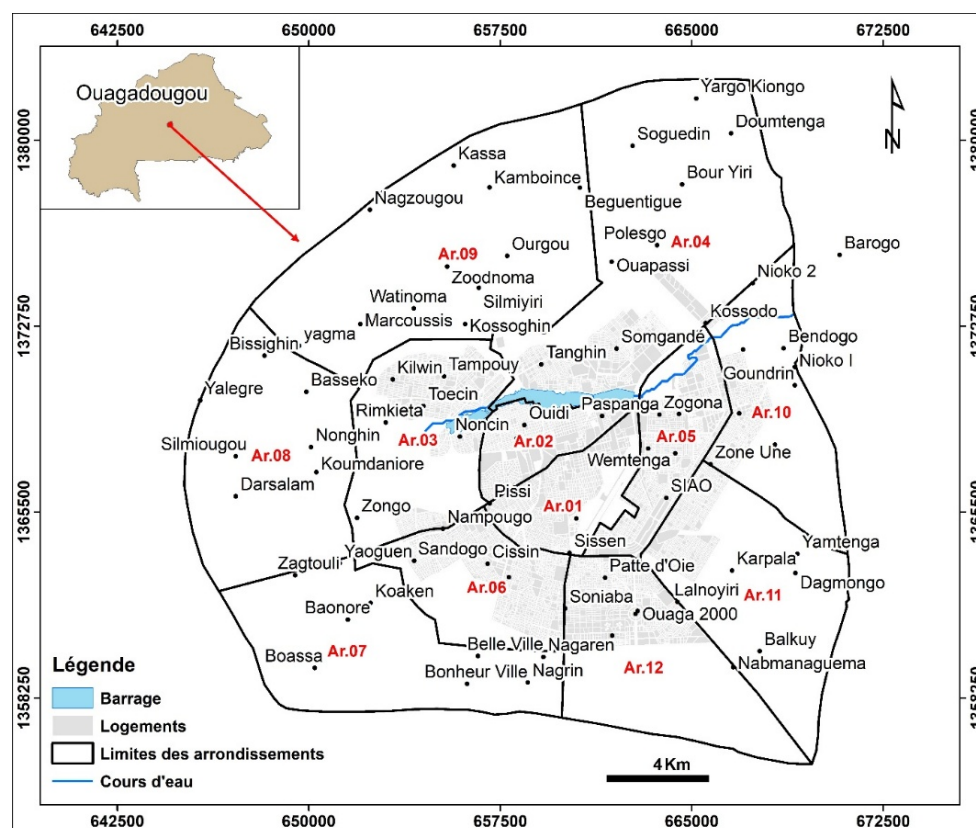


Fig. 1. Carte de la ville de Ouagadougou.

2.3. Description lithologique des sites : sondages manuels

Des sondages manuels réalisés à travers des puits à ciel ouvert ont permis d'obtenir les coupes lithologiques des sites où les essais géotechniques ont été effectués (Figure 3). Ces sondages ont permis de décrire de manière détaillée la structure des sols de chaque site. Pour la présente étude, la profondeur des sondages manuels variait de 0 à 4 m.

2.4. Essais au pénétromètre dynamique lourd de type B

L'ensemble des données issues des essais de pénétration a été obtenu à l'aide d'un pénétromètre dynamique lourd équipé de dispositifs de marques telles que APAFOR 100, APAFOR 100H, APAFOR 110,

APAFOR 13 ROU et GEOTOOL LMSR. Le nombre d'essais par site variait en fonction du programme de reconnaissance géotechnique établi pour chaque site.

La profondeur des essais de pénétration dynamique dépend de la profondeur de refus de la pointe lors de la pénétration ; dans le cadre de la présente étude, les refus ont été enregistrés entre 1 et 7 m.

Les essais de pénétration dynamique consistent à enfoncer dans le sol, de manière quasi-continue, une tige munie à son extrémité d'une pointe, au moyen de battage par chute d'un mouton. Le nombre de coups correspondant à une pénétration donnée est relevé au fur et à mesure de l'enfoncement de la pointe dans le sol. Les caractéristiques du pénétromètre, ainsi que les principes de base de l'essai, sont régis par la norme NF P 94-115 [16].

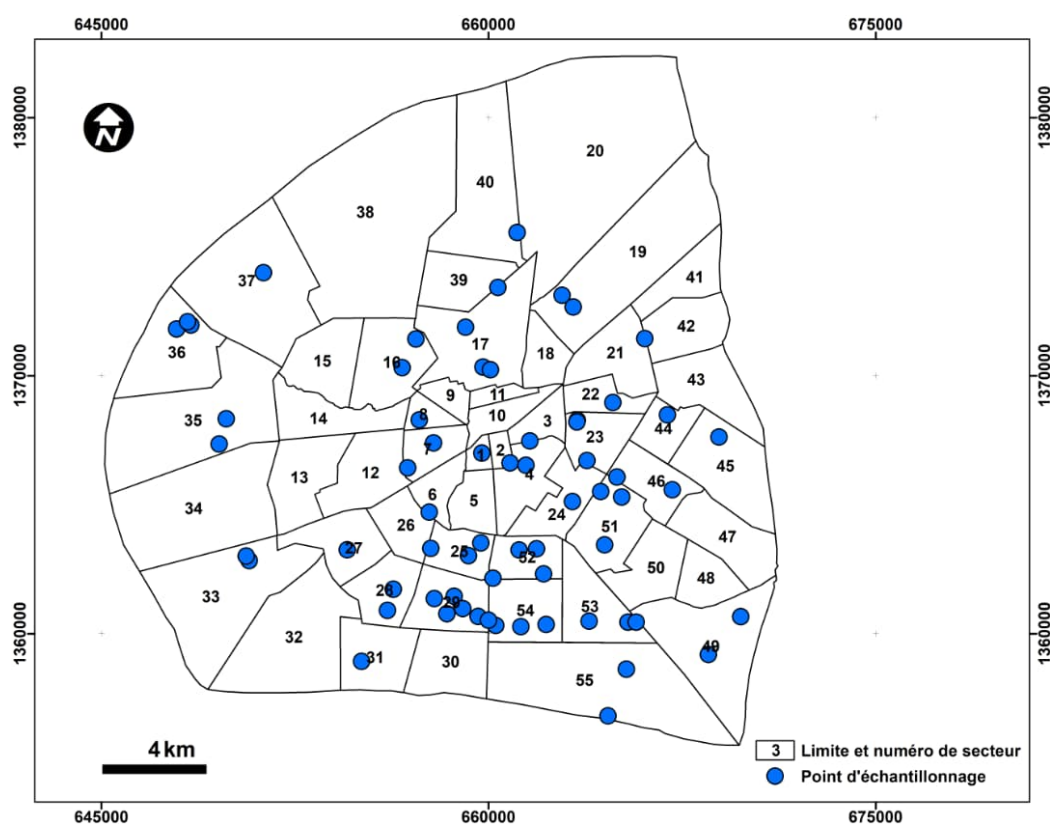


Fig. 2. Carte de localisation des sites investigués.



(a) Sondage manuel (puits à ciel ouvert).



(b) Fond de fouille.



(c) Description des sols en vue de l'établissement des coupes lithologiques.

Fig. 3. Investigations de terrain pour la description lithologique des sites.

2.5. Calcul de la contrainte admissible

L'essai au pénétromètre (Figure 4(a)) permet de déterminer la résistance dynamique de pointe q_d , exprimée par la formule énergétique dite des Hollandais :

$$q_d = \frac{m \cdot g \cdot H}{A \cdot e} \cdot \frac{m}{m + m'} \quad (1)$$

où m est la masse du mouton (kg), g est l'accélération de la pesanteur (m s^{-2}), H la hauteur de chute du mouton (m), A la surface de base de la pointe (m^2), e l'enfoncement par coup (m), et m' la masse de l'équipement (kg).

L'expression ainsi formulée est homogène à une contrainte (Pa).

À partir de chaque essai de pénétration dynamique réalisé sur un site, on obtient un graphique logarithmique représentant la profondeur en fonction de la résistance dynamique de pointe (Figure 4(b)). Parmi les résistances à la pénétration obtenues, on retient pour le site celle présentant le comportement le plus défavorable. Cette dernière est alors utilisée pour déterminer la contrainte admissible σ_a (Pa) du sol de fondation, qui représente une estimation de la capacité portante.

La formule utilisée pour ce calcul est donnée par Sanglerat *et al.* [17] :

$$\sigma_a = \frac{q_d}{20} \quad (2)$$

Cette relation empirique est valable pour les fondations superficielles, dans le cas de tassements admissibles limités à 2,5 cm. Le facteur utilisé au dénominateur est un coefficient de sécurité, traduisant un critère de service plutôt qu'une loi théorique fondamentale du comportement des sols.

Il convient de souligner que la formule utilisée est principalement adaptée aux sols pulvérulents ; le coefficient de sécurité de 20 est relativement conservatif, ce qui conduit généralement à une estimation prudente,

voire sous-estimée, de la contrainte admissible.

Au cours de l'essai de pénétration dynamique, des refus de pénétration ont parfois été observés. Ces refus reflètent des horizons fortement indurés. Les valeurs correspondantes ne permettant pas le calcul de la contrainte admissible ont été exclues des analyses.

2.6. Analyse statistique des données

L'analyse statistique repose sur l'échantillon de 117 sites investigués dans la ville de Ouagadougou en 2020.

Dans un premier temps, une analyse descriptive des formations lithologiques et des contraintes admissibles a été conduite afin de bien comprendre la variabilité des données en lien avec la microstructure. Ensuite, une analyse statistique comparative (test de Kruskal-Wallis) a été effectuée afin d'évaluer l'influence de la lithologie sur la contrainte admissible.

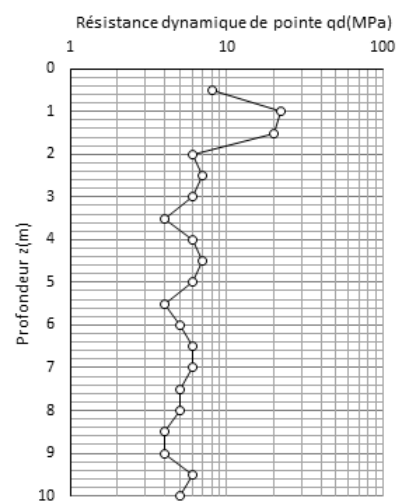
2.6.1. Analyse descriptive des formations lithologiques et des contraintes admissibles

L'analyse de la variabilité des formations lithologiques a été effectuée à différentes profondeurs caractéristiques : 0 m, 0,5 m, 1 m, 2 m et 3 m. Pour chacune de ces profondeurs, la fréquence relative des différentes formations lithologiques a été déterminée à partir des observations issues des 117 sondages.

Parallèlement, la distribution des contraintes admissibles a été analysée en termes de fréquences, indépendamment de la profondeur, afin d'identifier les classes de valeurs les plus représentées au sein de l'échantillon. Une telle analyse permet d'apprécier la variabilité globale des propriétés mécaniques des sols de fondation. La contrainte admissible a également fait l'objet du calcul des indicateurs statistiques classiques : les valeurs minimale et maximale, l'étendue, la moyenne, la médiane, l'écart-type et la variance ont été calculées. Les quartiles (Q_1 et Q_3) ainsi que l'intervalle interquartile (IQR) ont également été déterminés afin d'apprécier la dispersion et le degré d'homogénéité des données.



(a) Mise en œuvre de l'essai de pénétration dynamique.



(b) Exemple de diagramme pénétrométrique.

Fig. 4. Essai au pénétromètre dynamique lourd.

La précision de l'estimation de la contrainte admissible moyenne de la ville de Ouagadougou a été évaluée à l'aide d'un intervalle de confiance à 95 %, calculé selon la distribution de Student, afin de fournir une fourchette pour la valeur moyenne et d'évaluer sa robustesse statistique.

2.6.2. Analyse statistique comparative (test de Kruskal–Wallis)

Afin d'évaluer l'influence de la lithologie sur la contrainte admissible, une analyse comparative a été réalisée en regroupant les formations lithologiques en quatre (4) familles définies à la profondeur de 1 m. L'horizon de 1 m a été choisi car il représente la profondeur d'ancrage privilégiée des fondations dans la ville de Ouagadougou. Les quatre familles considérées sont : (i) cuirasse latéritique, (ii) carapace latéritique, (iii) sols latéritiques non indurés et (iv) sols argileux.

Le test de Kruskal–Wallis a été retenu car il permet de comparer plusieurs groupes indépendants sans hypothèse de distribution normale. Par ailleurs, le jeu de données considéré comporte des valeurs extrêmes et une inégalité des effectifs des familles considérées.

L'ensemble des valeurs de contrainte admissible a été classé par ordre croissant, et un rang a été attribué à chaque observation. En présence d'ex æquo, des rangs moyens ont été utilisés afin d'éviter tout biais dans l'estimation. Pour chaque groupe i , la somme des rangs R_i et l'effectif n_i ont été calculés.

La statistique du test H a été déterminée selon la relation :

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (3)$$

où $N = 117$ est le nombre total d'observations et $k = 4$ le nombre de groupes.

La valeur de H est comparée à la valeur critique correspondante de la loi du χ^2 pour un seuil de signification de 5 %.

2.7. Analyse spatiale des contraintes admissibles et des formations

Afin d'analyser la répartition spatiale des formations et des contraintes admissibles, deux représentations cartographiques ont été produites :

- (i) Une carte de distribution des contraintes admissibles, classées en trois (3) intervalles d'égale amplitude :
 - 0,08 – 0,12 MPa (faible portance),
 - 0,12 – 0,16 MPa (portance modérée),
 - 0,16 – 0,20 MPa (portance élevée).
- (ii) Une carte de distribution des familles lithologiques à 1 m, permettant d'établir une correspondance spatiale entre nature du sol et contrainte admissible. Les familles considérées sont les mêmes que celles utilisées pour le test de Kruskal–Wallis.

Pour les représentations cartographiques, les analyses adoptées sont volontairement non interpolées en raison de la densité de points insuffisante au regard

de la superficie étudiée, d'une structuration spatiale faible (absence de variogramme robuste) et du risque d'introduire des artefacts d'interpolation. L'approche retenue est donc une analyse spatiale ponctuelle visant à éviter la surinterprétation.

3. Résultats et discussion

3.1. Formations lithologiques rencontrées en surface (0 m de profondeur)

Les résultats montrent que la surface du sol est constituée de terre végétale et de remblais à des fréquences de 57 % et 33 % respectivement (Figure 5). Dans le cadre de cette étude, les remblais sont de type tout-venant (majoritairement), graveleux, argileux et latéritiques.

En surface, la terre végétale occupe logiquement un peu plus de la moitié des sols rencontrés (57 %). Issue de la décomposition de la matière organique, elle est habituellement décapée lors des travaux de construction, afin d'éliminer les matériaux organiques instables et de mettre en place une plateforme de travail plus stable, indépendamment de la profondeur finale des fondations. La présence de remblai résulte quant à elle des activités anthropiques. Dans ces contextes, la terre végétale est fréquemment décapée puis remplacée par des matériaux de rechargement disponibles localement.

3.2. Formations lithologiques rencontrées à 0,5 m de profondeur

Les résultats indiquent qu'à une profondeur de 0,5 m, les sols sont principalement constitués de carapace latéritique à hauteur de 47 % (Figure 6). Les coupes lithologiques mettent également en évidence la présence de grave argileuse latéritique, de cuirasse latéritique et de terre végétale, représentant respectivement 11 %, 9 % et 7 %.

Comparativement à la surface du sol, on note une présence significative de formations latéritiques.

La prédominance des formations latéritiques laisse prévoir un comportement favorable du sol vis-à-vis de l'implantation d'un ouvrage. La carapace latéritique, majoritairement présente, est un horizon peu à moyennement induré, formé par des éléments latéritiques partiellement cimentés, souvent de nature discontinue, nodulaire ou pisolithique. Cette organisation nodulaire est cohérente avec la microstructure agrégée décrite par Yue *et al.* [18], où les particules fines s'assemblent en agrégats sous l'effet de la cimentation ferrugineuse, générant une porosité inter-agrégats relativement importante.

L'horizon de 0,5 m de profondeur représente potentiellement une profondeur d'ancrage intéressante. En effet, la nature des formations laisse prévoir une portance bonne à modérée. Toutefois, les couches situées dans cet horizon sont souvent très altérées et sensibles aux cycles d'humidification–dessiccation. Il en résulte que les fondations y seraient fortement exposées aux variations de teneur en eau, aux gonflements/retraits ; il faut également tenir compte de l'érosion superficielle, qui peut conduire à un déchaussement progressif des

fondations. À 0,5 m de profondeur, on note également la présence de formations argileuses (23 % au total). Les formations argileuses étant compressibles, ces terrains sont propices à l'apparition de tassements.

3.3. Formations lithologiques rencontrées à 1 m de profondeur

Les résultats montrent qu'à une profondeur de 1 m, les sols sont majoritairement constitués de carapace

latéritique à hauteur de 44 % (Figure 7). Ils mettent également en évidence la présence de cuirasse latéritique, d'argile compacte, d'argile latéritique graveleuse et de gravier argilo-latéritique, représentant respectivement 14 %, 9 %, 8 % et 8 %.

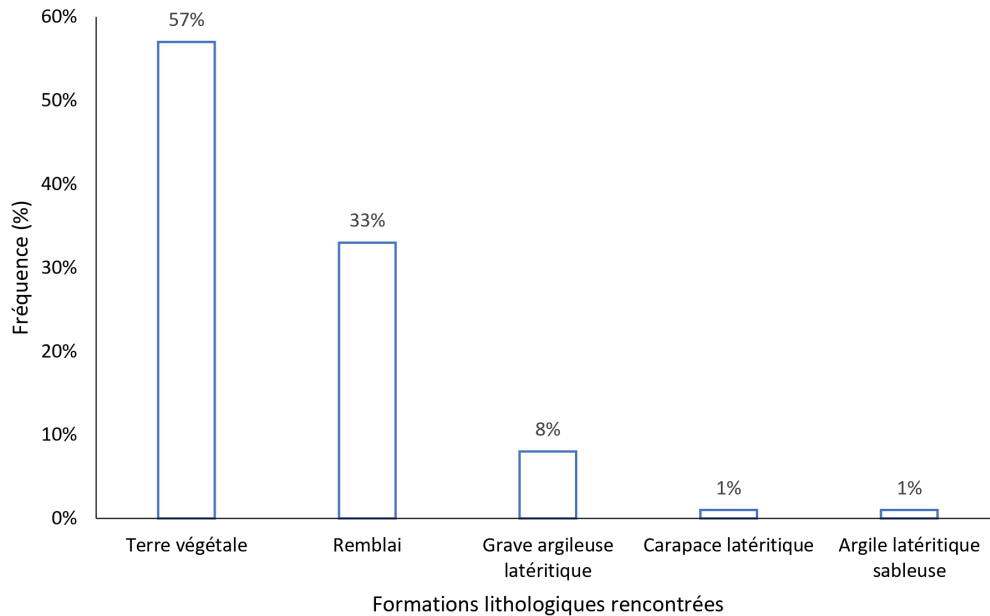


Fig. 5. Distribution des formations lithologiques en surface de la ville de Ouagadougou.

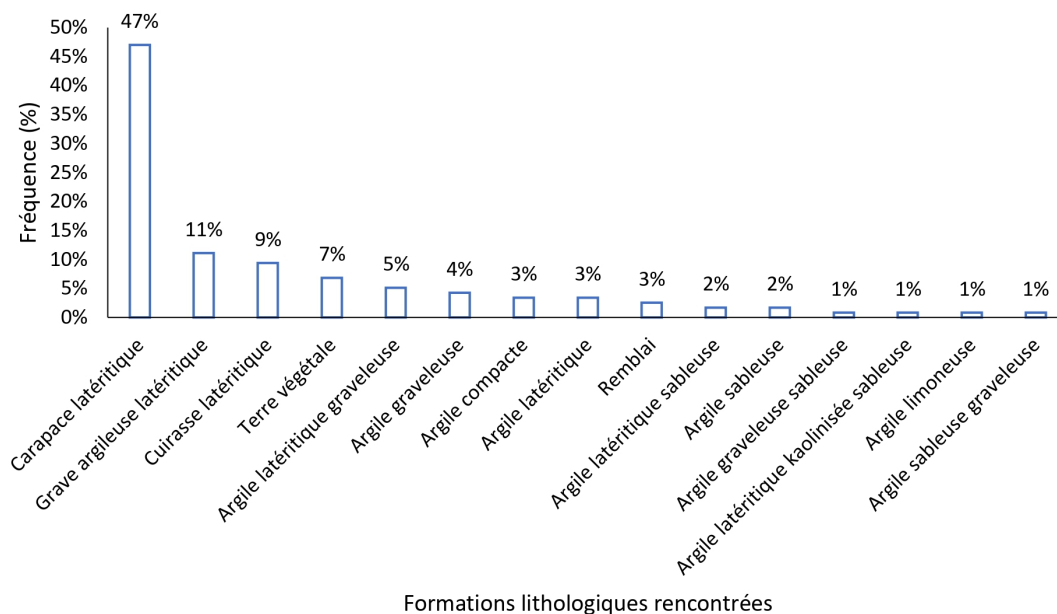


Fig. 6. Distribution des formations lithologiques à 0,5 m de profondeur de la ville de Ouagadougou.

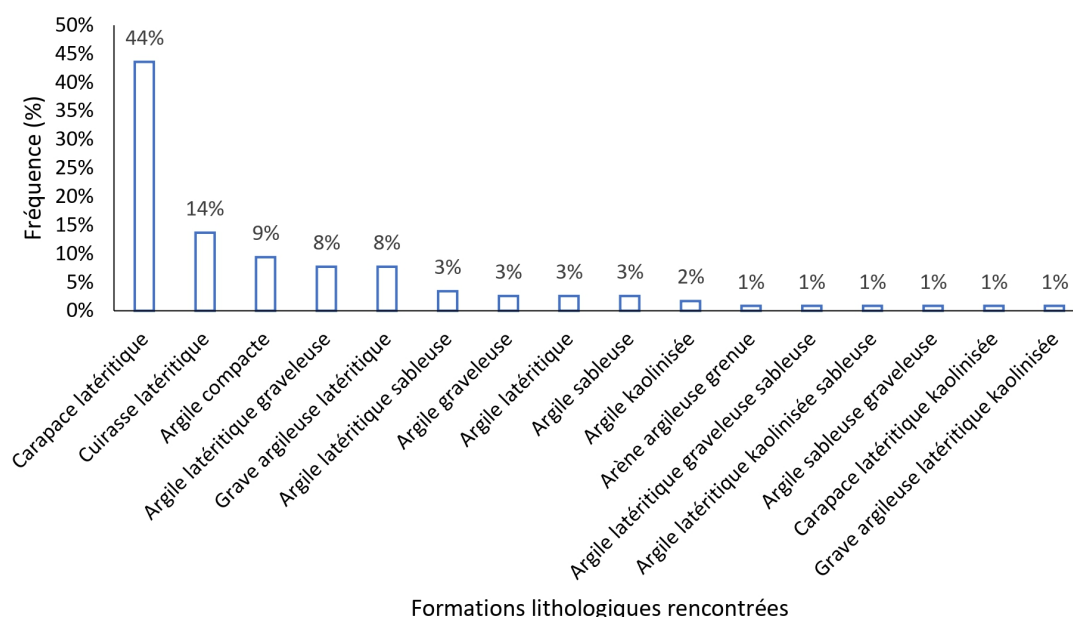


Fig. 7. Distribution des formations lithologiques à 1 m de profondeur de la ville de Ouagadougou.

À la profondeur de 1 m, les résultats sont globalement similaires à ceux obtenus à 0,5 m ; ils traduisent ainsi une présence significative de formations latéritiques. Comme précédemment, il apparaît que plus de la moitié des sols présente potentiellement des capacités portantes modérées à élevées, compte tenu de leur nature lithologique. Cette interprétation doit toutefois être nuancée, car la lithologie seule ne permet pas de caractériser le comportement mécanique des sols.

Les résultats obtenus confirment une certaine continuité lithologique des horizons du sol entre 0,5 m et 1 m de profondeur. L'horizon de 1 m de profondeur constitue une zone favorable pour l'ancrage des fondations des ouvrages, sous réserve de vérifications locales. En effet, outre sa nature, le sol y est moins perturbé par les activités anthropiques, la diffusion des contraintes est meilleure et les effets hydriques sont moindres.

Cependant, à l'horizon de 1 m de profondeur, il convient aussi de souligner l'existence d'une proportion non négligeable de formations argileuses (34 %). L'observation est identique, en termes de continuité, à celle faite pour les formations latéritiques. En effet, le pourcentage de sols argileux augmente entre 0,5 m et 1 m de profondeur, ce qui accroît les risques et l'amplitude des tassements.

3.4. Formations lithologiques rencontrées à 2 m de profondeur

À 2 m de profondeur, la fréquence de la carapace latéritique demeure la plus élevée, bien que son occurrence diminue comparativement à l'horizon de 1 m. Elle cède progressivement la place à la cuirasse latéritique, qui est un matériau semblable mais plus continu et fortement induré, présentant un véritable intérêt en tant que sol porteur (Figure 8).

Cette transition vers la cuirasse latéritique correspond à un stade avancé de latéritisation, marqué par

un enrichissement en sesquioxydes de fer, comme le confirment les travaux de Bakouan *et al.* [19]. Ces auteurs rapportent, pour des latérites du Burkina Faso, des teneurs significatives en hématite (11,43 – 13,36 %) et en goethite (6,31 – 7,44 %), témoignant d'une altération poussée et d'une concentration résiduelle des phases ferrugineuses. Ces composés agissent comme agents de cimentation, générant une structure rigide et fortement indurée, comme l'ont démontré Zhao *et al.* [20]. Leur étude met par ailleurs en évidence le lien entre signature minéralogique et comportement géomécanique des latérites, qui sont peu sujettes aux tassements car peu compressibles.

On note également que les formations argileuses : argile compacte (15 %), argile latéritique graveleuse (12 %), argile latéritique graveleuse kaolinisée (8 %), résultant des processus d'altération physico-chimiques, s'imposent progressivement.

Une telle évolution traduit une transition vers des horizons plus fins et plus compressibles. Un ancrage des fondations à 2 m impose la prise en compte accrue du phénomène de consolidation des argiles, qui peut induire des tassements significatifs. Par ailleurs, le choix et les dimensions des fondations doivent tenir compte du fait que les formations argileuses sont à faible portance.

3.5. Formations lithologiques rencontrées à 3 m de profondeur

Les résultats indiquent qu'à une profondeur de 3 m, les sols sont principalement des formations argileuses ; on note en particulier une prédominance d'argile latéritique kaolinisée (33 %) (Figure 9). Les formations latéritiques indurées (carapace latéritique, cuirasse latéritique, grave argileuse latéritique) y présentent une occurrence plus faible : 17 % au total.

Cette observation concorde avec les analyses anté-

rieures de l'organisation verticale des horizons pédologiques. À mesure que la profondeur augmente, on observe une diminution progressive des formations latéritiques indurées, qui laissent place aux formations argileuses. La prédominance des argiles kaolinisées à cette profondeur reflète un stade avancé d'altération minéralogique, marqué par la transformation des silicates primaires en kaolinite. Par ailleurs, la kaolinite est le minéral argileux prédominant dans les sols latéritiques du Burkina Faso. Bakouan *et al.* [19] ont rapporté des teneurs en kaolinite comprises entre 17,05 % et 35,64 %

dans deux échantillons de latérite naturelle provenant du Burkina Faso. Ces teneurs augmentent dans les horizons plus évolués, en particulier les horizons argileux, qui sont le produit de l'altération, comme l'ont montré Sanou *et al.* [21], qui ont quantifié une teneur en kaolinite pouvant atteindre 65,7 % dans une argile latéritique.

Comme évoqué pour l'horizon précédent, des précautions doivent être prises si l'ancrage de fondations y est envisagé.

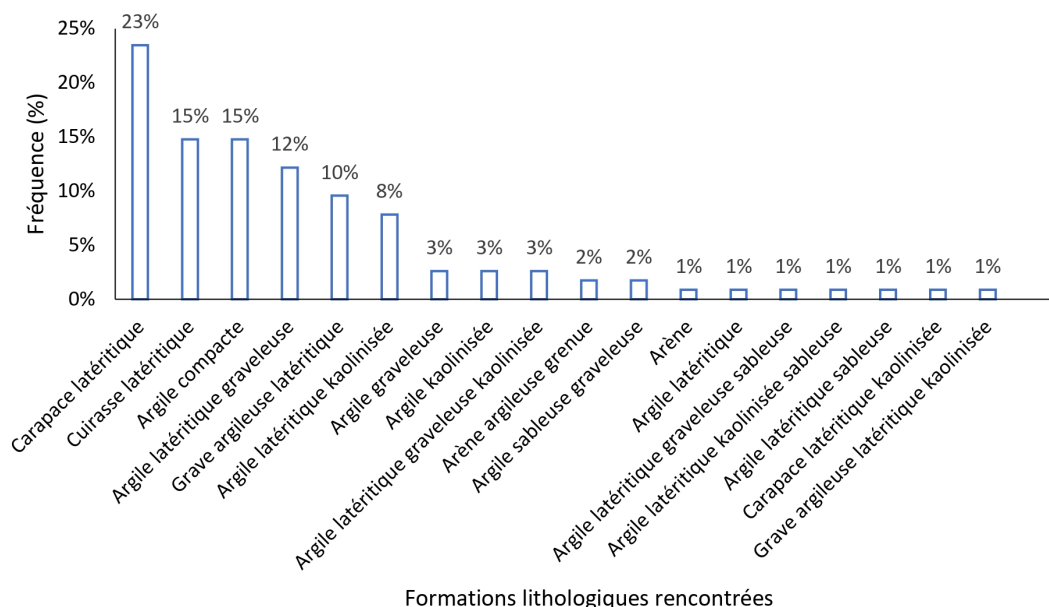


Fig. 8. Distribution des formations lithologiques à 2 m de profondeur de la ville de Ouagadougou.

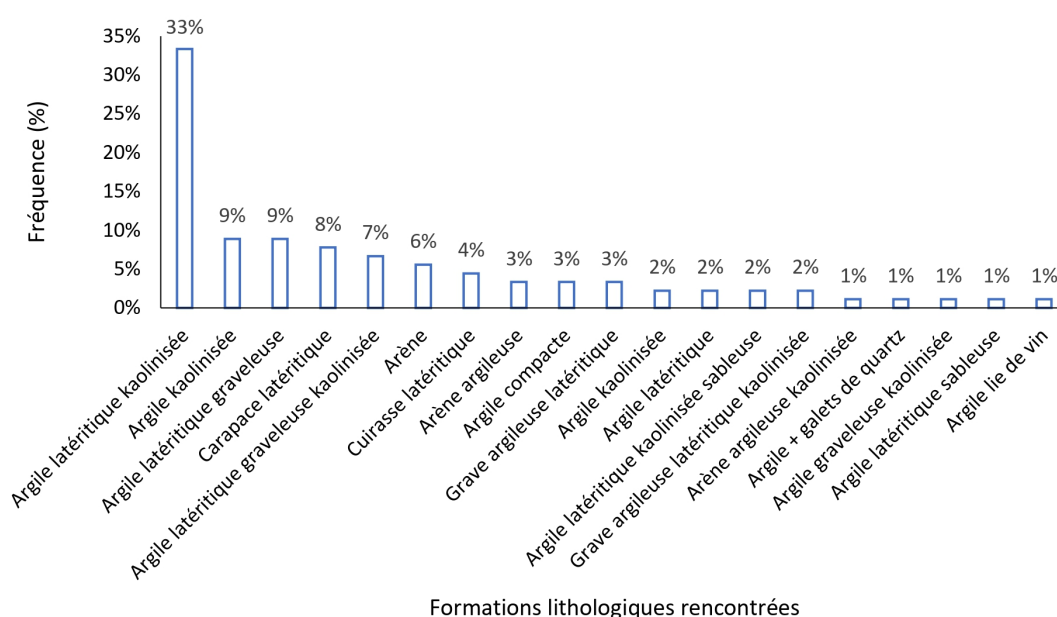


Fig. 9. Distribution des formations lithologiques à 3 m de profondeur de la ville de Ouagadougou.

3.6. Synthèse des contraintes admissibles

Les résultats présentés à la figure 10 montrent que les contraintes admissibles calculées varient entre 0,08 et 0,20 MPa, traduisant une variabilité des propriétés mécaniques des sols de fondation. Par ailleurs, les valeurs élevées, proches de 0,20 MPa, apparaissent fréquentes dans la distribution. Cette situation traduit une prédominance de conditions favorables à la portance, au regard des données disponibles. Ce constat est en accord avec la prédominance de cuirasse et de carapace latéritique entre 0,5 m et 2 m, qui représentent la plage de profondeurs d'ancrage privilégiées pour les fondations superficielles dans la ville de Ouagadougou (Figure 11).

À l'inverse, les valeurs de contrainte admissible de

0,08 MPa, 0,11 MPa, 0,12 MPa et 0,13 MPa sont moins courantes. Cela suggère la présence de sites présentant des formations moins résistantes, notamment argileuses, susceptibles d'entraîner des tassements importants.

La variabilité des contraintes admissibles peut être directement reliée aux différences de microstructure et de minéralogie. Les valeurs élevées sont associées à des horizons riches en oxydes de fer, dont le rôle cimentant a été clairement établi par Zhao *et al.* [20], tandis que les faibles valeurs correspondent à des horizons argileux dominés par la kaolinite [19, 21]. Ainsi, la distribution des contraintes admissibles reflète non seulement la variabilité lithologique, mais également la variabilité microstructurale, en cohérence avec les relations minéralogie–microstructure décrites dans la littérature récente [22].

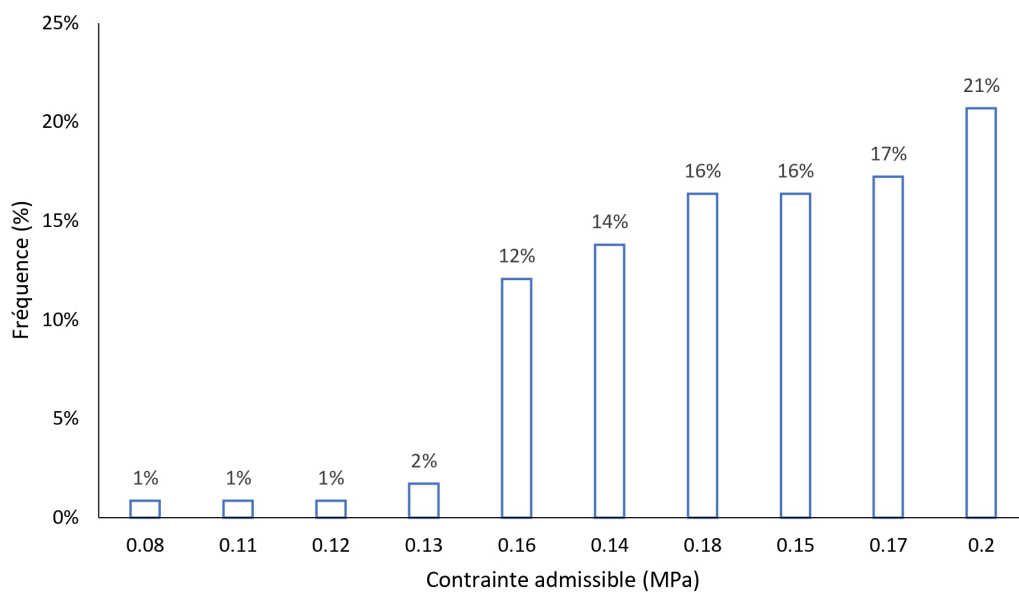


Fig. 10. Distribution des contraintes admissibles des sols de fondation de la ville de Ouagadougou.

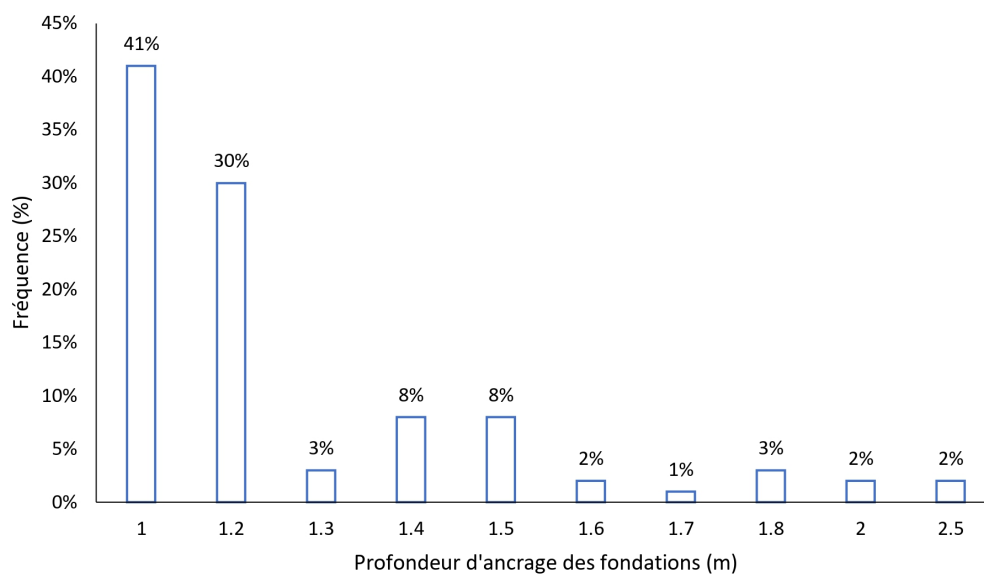


Fig. 11. Distribution des profondeurs d'ancrage des sols de fondation de la ville de Ouagadougou.

Le **tableau 1** présente les principaux indicateurs statistiques des contraintes admissibles. La distribution des valeurs est globalement centrée autour de 0,17 MPa, comme le montrent les valeurs de la moyenne (0,166 MPa) et de la médiane (0,17 MPa). Par ailleurs, sur l'ensemble des 117 sites étudiés dans la ville de Ouagadougou, les contraintes admissibles affichent une dispersion modérée (écart-type de 0,023 MPa). Cela traduit une relative homogénéité de la capacité portante des sols, confirmée par un intervalle interquartile [0,15 – 0,18 MPa] englobant 50 % des observations.

La contrainte admissible moyenne de 0,166 MPa est associée à un intervalle de confiance à 95 % compris entre 0,162 et 0,171 MPa ; ces résultats traduisent une estimation statistiquement robuste au niveau de l'échantillon. Ils traduisent également, de façon globale, des conditions de portance modérées à localement élevées, favorables à l'exécution de fondations superficielles sur les sites étudiés.

À l'échelle opérationnelle, on peut retenir environ 0,17 MPa comme valeur régionale indicative pour les études préliminaires des sols de fondation dans la ville de Ouagadougou. Cette valeur ne peut toutefois pas se substituer à une étude géotechnique spécifique au site, indispensable à la conception sûre des fondations.

Tableau 1
Principaux indicateurs statistiques des contraintes admissibles.

Indicateur	Valeur (MPa)
Minimum	0,08
Maximum	0,20
Étendue	0,12
Moyenne	0,17
Médiane	0,17
Écart-type	0,023
Variance	$5,36 \times 10^{-4}$
1 ^{er} quartile (Q_1)	0,15
3 ^e quartile (Q_3)	0,18
Intervalle interquartile (IQR)	0,03
IC 95 % (borne inférieure)	0,162
IC 95 % (borne supérieure)	0,171

3.7. Résultats du test de Kruskal–Wallis

Le test non paramétrique de Kruskal–Wallis a été appliqué afin d'évaluer l'existence de différences significatives entre les contraintes admissibles en fonction des familles lithologiques définies à la profondeur de 1 m. Les résultats sont synthétisés dans le **tableau 2**.

La statistique de test obtenue est : $H = 41,44$.

Avec $k = 4$ groupes, le nombre de degrés de liberté est $k - 1 = 3$.

La valeur critique du χ^2 pour $\alpha = 0,05$ et 3 degrés de liberté est $\chi^2_{0,05;3} = 7,815$.

Il apparaît donc que la statistique observée H est largement supérieure à la valeur critique χ^2 . L'hypothèse nulle d'égalité des distributions des contraintes

admissibles entre les différentes familles lithologiques est donc rejetée au seuil de 5 %. Cela signifie que la contrainte admissible dépend significativement de la nature lithologique des formations à la profondeur d'ancrage considérée (1 m).

Sur le plan géotechnique, on peut retenir que :

- les cuirasses latéritiques présentent les contraintes admissibles les plus élevées ($\approx 0,19$ MPa), ce qui est cohérent avec leur fort degré d'induration et leur cimentation ferrugineuse ;
- les carapaces latéritiques montrent des valeurs intermédiaires mais relativement élevées ($\approx 0,17$ MPa), traduisant une bonne portance malgré une induration plus faible ;
- les sols latéritiques non indurés présentent des valeurs légèrement plus faibles ($\approx 0,16$ MPa), en accord avec leur structure moins cohésive ;
- les sols argileux affichent les contraintes admissibles les plus faibles ($\approx 0,15$ MPa), ce qui reflète leur forte compressibilité et leur sensibilité à l'eau.

3.8. Organisation spatiale des contraintes admissibles et des formations lithologiques

L'analyse croisée des cartes de contraintes admissibles (**Figure 12**) et de la lithologie à 1 m de profondeur (**Figure 13**) renforce la correspondance entre la nature des formations et leur comportement mécanique.

La cuirasse latéritique, principalement localisée au centre et au centre-est de Ouagadougou, coïncide avec les zones de forte portance (0,16 – 0,20 MPa).

La carapace latéritique s'étend sur l'ensemble de la ville, mais est relativement moins représentée à l'est. Par ailleurs, elle constitue la formation dominante dans les secteurs nord. Elle est associée majoritairement à des portances modérées à élevées.

Les sols latéritiques non indurés sont minoritaires et spatialement limités dans l'échantillon ; ils présentent des portances modérées à élevées.

Les sols argileux se concentrent principalement dans les zones centrales et sud-est de la ville. Ils sont globalement associés à des portances faibles (0,08 – 0,12 MPa) à modérées (0,12 – 0,16 MPa), en lien avec leur forte compressibilité et leur faible cohésion structurale, notamment lorsqu'ils sont dominés par des phases kaoliniques.

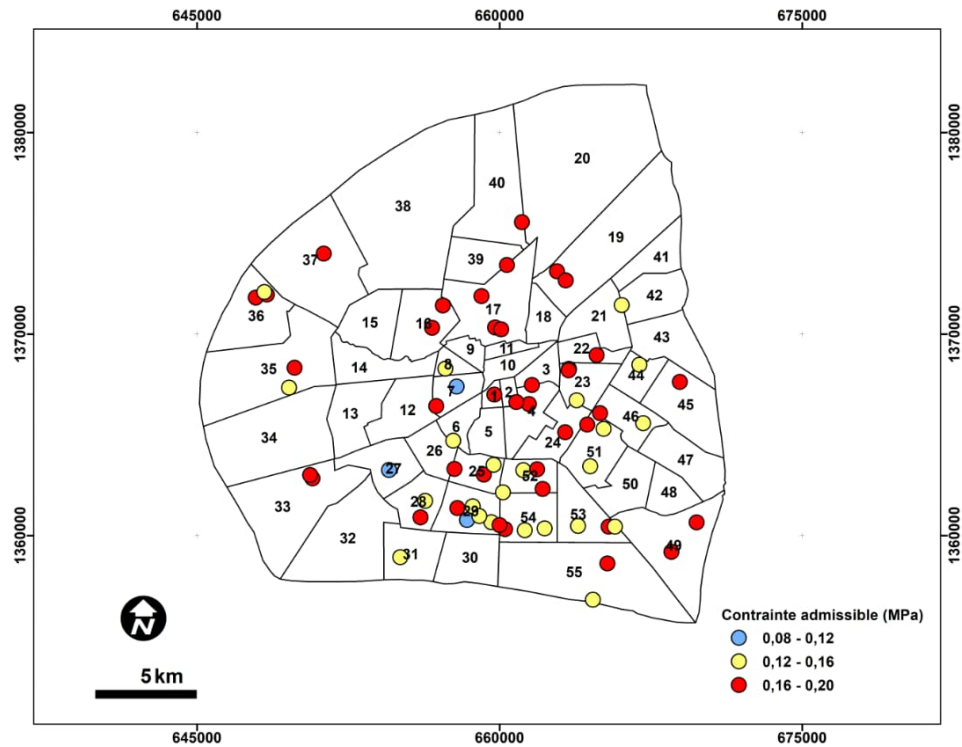
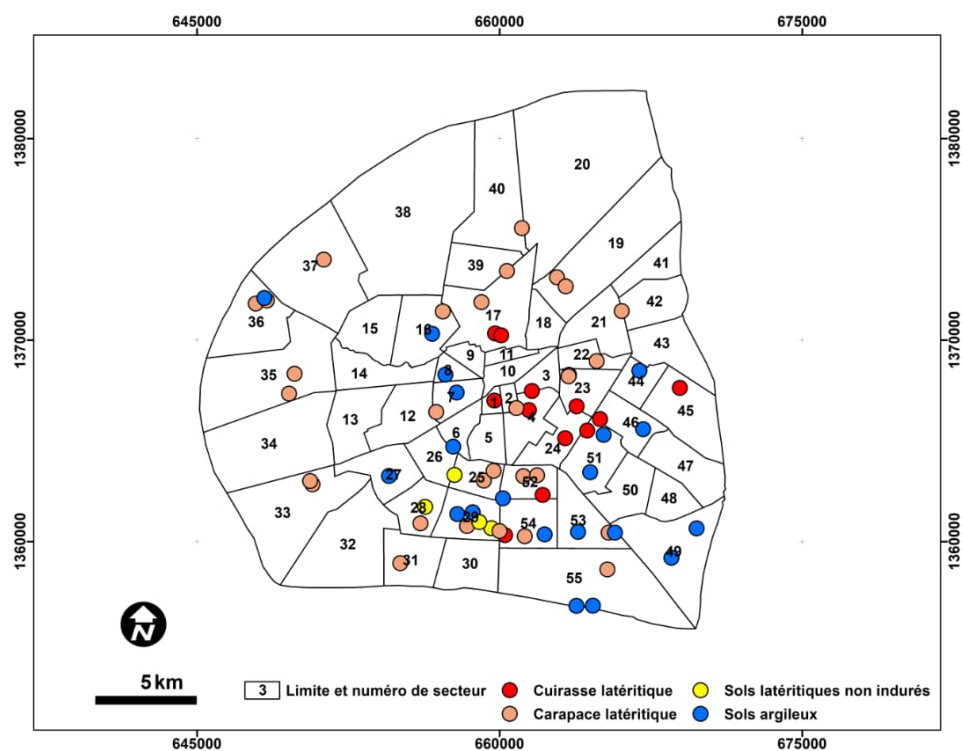
Il convient de souligner que les faibles portances (0,08 – 0,12 MPa) apparaissent de manière ponctuelle et dispersée, sans organisation spatiale marquée. Cette distribution semble traduire des conditions géotechniques localement défavorables, plutôt que l'existence de zones homogènes à l'échelle régionale.

Cette absence de structuration spatiale des faibles valeurs tend à indiquer que les risques géotechniques sont essentiellement localisés. Il en résulte que les géotechniciens doivent adopter une approche prudente à l'échelle du site, en procédant à des investigations spécifiques pour chaque projet.

Tableau 2

Comparaison des contraintes admissibles par famille lithologique (test de Kruskal–Wallis).

Famille de formation	Contrainte admissible moyenne (MPa)	Somme des rangs (R_i)	Effectif (n_i)
Cuirasse latéritique	0,19	1460,0	16
Carapace latéritique	0,17	3641,5	52
Sols latéritiques non indurés	0,16	429,5	10
Sols argileux	0,15	1372,0	39

**Fig. 12.** Carte simplifiée des contraintes admissibles de la ville de Ouagadougou.**Fig. 13.** Carte simplifiée des formations lithologiques de la ville de Ouagadougou à 1 m de profondeur.

3.9. Interprétation des profils d'altération superficielle et comparaison des contraintes admissibles avec la littérature

L'organisation verticale des sols observée est en adéquation avec le modèle régional d'altération du socle cristallin ouest-africain. En effet, ce modèle présente une structuration en quatre horizons, du sommet vers la base : l'allotérite, l'isaltérite, l'horizon fissuré et le socle sain fracturé [23]. L'allotérite est caractérisée par une matrice argileuse à kaolinisation marquée, tandis que l'isaltérite contient des matériaux fortement altérés avec des débris grossiers.

Les résultats obtenus, observés sur la fenêtre de 0 à 3 m de profondeur, reflètent simplement une coupe superficielle du système d'altération total, qui s'étendrait dans la couche d'allotérite. La prédominance observée des formations latéritiques indurées entre 0,5 et 1,5 m correspond à une évolution de la cuirasse par enrichissement ferrugineux et induration.

Concernant les valeurs de contraintes admissibles obtenues lors de cette étude, elles s'inscrivent dans les plages de valeurs rencontrées dans la littérature. En effet, les recherches menées dans des contextes géologiques variés mettent en évidence une large gamme de valeurs de capacité portante. Le [tableau 3](#) présente des valeurs représentatives issues d'études récentes, illustrant la forte dépendance de la contrainte admissible au type de sol et aux conditions locales du site.

Les données du [tableau 3](#) montrent que les contraintes admissibles obtenues dans la présente étude s'inscrivent dans la gamme des valeurs rapportées pour plusieurs contextes décrits dans la littérature. Les valeurs comprises entre 0,08 et 0,20 MPa, avec une moyenne de 0,17 MPa, sont voisines de celles rapportées par Salah *et al.* [24] en Égypte pour des couches sableuses investiguées par essais de chargement à la plaque, où les capacités portantes varient entre 0,098 et 0,147 MPa. On note aussi une proximité avec les valeurs obtenues dans les formations altérées du delta du Niger

sud-occidental, comprises entre 0,122 et 0,249 MPa [29]. Ces similitudes suggèrent que les sols de fondation de Ouagadougou présentent globalement des caractéristiques mécaniques comparables à celles de matériaux altérés ou granulaires moyennement consolidés rencontrés dans d'autres environnements.

Les valeurs les plus faibles de cette étude (observées dans les argiles) restent néanmoins supérieures au minimum rapporté dans la vallée de Katmandou au Népal (0,0564 MPa) pour des argiles limoneuses [25]. La différence de capacité portante entre ces deux types d'argile peut s'expliquer par une combinaison de facteurs, notamment : la teneur en eau, la consolidation, la minéralogie et la microstructure. Sans exclure d'autres facteurs explicatifs, tels que la présence éventuelle de minéraux argileux expansifs de type smectite, l'histoire de consolidation ou encore les conditions de mise en place des dépôts, on peut supposer que les argiles de la vallée de Katmandou présentent une teneur en eau plus élevée, liée au climat humide du Népal.

À l'inverse, les contraintes admissibles obtenues dans la présente étude sont inférieures à celles rapportées dans certains contextes. Civelikler [26] rapporte des valeurs comprises entre 0,289 et 1,533 MPa en Turquie, les valeurs maximales étant estimées à 4,5 m de profondeur. Cette différence peut s'expliquer en partie par le fait que, dans la présente étude, les sols porteurs sont situés entre 1 et 2 m, des horizons plus consolidés se trouvant généralement plus en profondeur.

L'étude de Adunoyé *et al.* [27], au Nigéria, rapporte des contraintes admissibles comprises entre 0,705 et 0,766 MPa pour des profondeurs variant de 0,5 à 1 m. Compte tenu de profondeurs d'investigation comparables à celles de la présente étude, les écarts observés semblent principalement liés à la méthode d'investigation utilisée, notamment les essais triaxiaux de laboratoire, ainsi qu'à la méthode de calcul de la contrainte admissible. Dans le présent travail, l'approche basée sur le pénétromètre dynamique et les coefficients de sécurité adoptés conduit à des estimations plus sécuritaires.

Tableau 3

Valeurs représentatives de contraintes admissibles issues d'études récentes.

Localisation / Type de sol	Plage de capacité portante	Méthode	Référence
New Ismailia City, Égypte (couches sableuses)	0,098 – 0,147 MPa	Essai de chargement à la plaque	[24]
Vallée de Katmandou, Népal (argile limoneuse)	0,0564 – 0,163 MPa	Essai de pénétration standard (SPT)	[25]
Eskişehir, Turquie (différentes profondeurs)	0,289 – 1,533 MPa	SPT + Terzaghi	[26]
Ayedaade, Nigéria (sols variés)	0,705 – 0,766 MPa	Essai triaxial + Terzaghi	[27]
Ese Odo, Nigéria (fondations superficielles)	0,1 MPa (moyenne)	Essai de pénétration au cône (CPT)	[28]
Delta du Niger sud-occidental (altéré)	0,122 – 0,249 MPa	Réfraction sismique	[29]
Delta du Niger sud-occidental (consolidé)	0,748 – 1,011 MPa	Réfraction sismique	[29]

De même, les formations du delta du Niger sud-occidental présentent des valeurs atteignant 1,011 MPa [29]. Ces écarts sont clairement liés au degré de consolidation des formations étudiées.

La comparaison avec les travaux de Falowo et Aji-boye [28], qui rapportent une valeur moyenne d'environ 0,1 MPa pour des fondations superficielles au Nigéria, montre par ailleurs que les sols étudiés à Ouagadougou présentent globalement une meilleure capacité portante. Cette situation est à relativiser toutefois, compte tenu de ce que les coefficients de sécurité employés ne sont pas les mêmes.

En somme, les contraintes admissibles obtenues à Ouagadougou sont cohérentes avec celles rapportées dans plusieurs études. Les différences observées d'une étude à l'autre s'expliquent principalement par la lithologie, le degré d'altération, les conditions hydriques, la profondeur d'investigation ainsi que les méthodes d'essai et de calcul utilisées. Les valeurs relativement modérées obtenues dans cette étude traduisent le caractère altéré des horizons superficiels investigués et sont liées à une approche de calcul sécuritaire basée sur le pénétromètre dynamique.

4. Conclusion

La présente étude a permis d'analyser l'organisation lithologique et les propriétés mécaniques des sols de fondation de la ville de Ouagadougou à partir de 117 sondages géotechniques et essais de pénétration dynamique. Les résultats mettent en évidence une structuration verticale progressive des horizons superficiels d'altération. Cette structuration se caractérise par une prédominance des formations latéritiques indurées (carapace et cuirasse latéritique) entre 0,5 et 2 m de profondeur, puis par une augmentation des formations argileuses kaolinisées au-delà.

La structuration observée est en lien avec les propriétés mécaniques, notamment la contrainte admissible. En effet, les horizons latéritiques indurés présentent les contraintes admissibles les plus élevées, comprises majoritairement entre 0,16 et 0,20 MPa ; cela s'explique par leur forte cimentation ferrugineuse et leur microstructure agrégée rigide. Les horizons argileux, quant à eux, dominés par des phases kaoliniques, présentent des contraintes admissibles plus faibles. L'étude souligne ainsi que la variabilité mécanique est contrôlée par l'évolution microstructurale et minéralogique des profils d'altération.

L'analyse statistique confirme cette relation entre lithologie et comportement mécanique. Le test de Kruskal–Wallis révèle une différence significative des contraintes admissibles selon les familles lithologiques. Par ailleurs, la contrainte admissible moyenne obtenue ($\approx 0,17$ MPa) traduit globalement des conditions favorables à la mise en œuvre de fondations superficielles légères à modérées dans les horizons latéritiques superficiels.

Il convient de préciser que cette étude ne comporte pas d'analyses microstructurales originales (DRX, MEB, porosimétrie) ; les interprétations relatives à la microstructure s'appuient sur la littérature scientifique

existante.

Au-delà des applications en ingénierie géotechnique, cet article met en évidence le rôle fondamental des processus d'altération et de la microstructure dans le contrôle du comportement mécanique des sols de fondation. Les résultats laissent entrevoir qu'une approche multi-échelle intégrant lithologie, minéralogie, microstructure et propriétés mécaniques permettrait de mieux prédire le comportement mécanique des sols de fondation. Un modèle prédictif reliant les premiers paramètres aux seconds pourrait être envisagé dans de futurs travaux.

Remerciements

Les auteurs remercient le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics ainsi que l'ensemble des personnes ayant contribué aux investigations de terrain et à la collecte des données géotechniques utilisées dans cette étude.

Références

- [1] F.O. Olusola, *Geoengineering deterministic properties of tropical red soil in Sobe, Edo State, Nigeria, in relation to civil engineering structures*, IJESKA 4(2) (2022) 226–241.
<https://izlik.org/JA56BP94SF>
- [2] J.T. Oladipupo, U.S. Eze, M.K. Ravari, S.H. Waziri, A.A. Saleh, M.O. Orji, Z.A. Avwena, *Multi-deterministic based assessment of the bearing capacity for a shallow foundation : case study of Lagos Southwest, Nigeria*, Engineering Heritage Journal (GWK) 8(1) (2024) 51–59.
- [3] İ. Keskin, M.A. Memiş, *Prediction of soil strength and dynamic properties through the Dynamic Cone Penetration index*, Discover Civil Engineering 2(1) (2025) 1–14.
<https://doi.org/10.1007/s44290-025-00305-w>
- [4] M. Katakia, P. Sukumaran, V.R. Panchal, *Effect of sand gradation on relation between DCP index and void ratio*, In : "Proceedings of SECON'25", Springer, Cham, vol. 1 (2026) 257–267.
https://doi.org/10.1007/978-3-032-04178-4_23
- [5] L.B. Baya, M.I. Lingwanda, *Review of correlations between Unconfined Compressive Strength (UCS) values and Dynamic Cone Penetrometer (DCP–DN) values of stabilized soils*, MUST Journal of Research and Development 4(4) (2023) 1–16.
<https://mjrd.must.ac.tz/index.php/mjrd/article/view/51>
- [6] L.P.R. Herrera, C.H.D.C. Almeida, B.P. Rocha, H.L. Giacheti, *Characterizing a tropical soil site using Seismic Dynamic Probing Light (SDPL)*, Geotechnical and Geological Engineering 43 (2025) 218.
<https://doi.org/10.1007/s10706-025-03199-8>
- [7] A. Kaïniche, *Conception et réalisation d'une base de données géologiques et géotechniques (« Tunis-data-bank ») orientée vers la cartographie géotechnique automatique (« Tunis-geo-map ») : application à la ville de Tunis (Tunisie)*, Thèse de

- doctorat, INSA Lyon, France (1989).
<https://theses.fr/1989ISAL0056>
- [8] J. Idris, M. Al Heib, T. Verdel, Base de données des accidents et des incidents survenus dans les ouvrages souterrains, Tunnels et Ouvrages Souterrains 182 (2004) 84–89.
 - [9] C. Fayssal, A. Zerguine, A.R. Cheriet, *Development of a geotechnical database using the Geographic Information System approach*, Engineering, Technology & Applied Science Research 13(2) (2023) 10239–10242.
 - [10] S. Arbizzi, C. Kreziak, D. Barraud, F. Larrere, S. Souvignet, B. Nagel, Analyse d'une base de données « pathologies liées à la sécheresse » et mise en relation avec les sols support, In : "Actes du Symposium International SEC2008", n°182 (2008) 385–391.
 - [11] M. Brentini, Impact d'une donnée géologique hétérogène dans la gestion des géo-ressources : analyse intégrée et valorisation de la stratigraphie à travers le bassin genevois (Suisse, France), Terre & Environnement, Genève, Suisse (2018).
 - [12] H.F. Yonli, G. Mano, M. Koïta, A. Compaoré, *Estimation des tassements différentiels des sols de fondation de bâtiment : contribution des sondages de résistivité électrique*, J. P. SOAPHYS 4 (2024) 1–17.
https://www.soaphys.org/journal_article/yonlihfabv4i1/
 - [13] D.J. Taypondou, J.H.K. Tchouata, Y.T. Langollo, A.A. Sam-Tunsa, M.B. Moudoh, G.F.N. Ngon, *Lateral evolution and modeling of Garoua-Boulai soil properties for use in earthen constructions*, Journal of Materials Engineering and Performance 33 (2024) 12573–12592.
<https://doi.org/10.1007/s11665-023-08885-3>
 - [14] S.C. Ebikeme, J.A. Tamuno, *Geotechnical insights on shallow foundations in sedimentary terrains : findings from Bonny Island*, Research Journal of Engineering and Allied Sciences 12(2) (2024) 1–14.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.13789832>
 - [15] C. Castaing, P. Chevrement, M. Donzeau, E. Egal, J. Le Mentour, D. Thieblemont, C. Guerrot, M. Billa, Y. Itard, G. Delpont, Notice explicative de la carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1 000 000, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France (2003).
<https://www.sudoc.abes.fr/cbs/DB=2.1/SRCH?IKT=12&TRM=081686595>
 - [16] AFNOR, Sols : Reconnaissance et essais – Sondage au pénétromètre dynamique type B (Norme NF P94-115, annulée en 2005), (1990).
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p94115/geotechnique-sols-reconnaissance-et-essais-sondage-au-penetrometre-dynamiqu/fa023088/11049>
 - [17] G. Sanglerat, G. Olivari, B. Cambou, Practical Problems in Soil Mechanics and Foundation Engineering (SMFE). Vol. I : Physical Characteristics of Soils, Plasticity, Settlement Calculations, Interpretation of In Situ Tests, Elsevier, Amsterdam (1984).
 - [18] X. Yue, W. Bai, L.W. Kong, A.G. Guo, *Evolution of the shear strength and microstructure of undisturbed lateritic soil under the influence of alkali contamination*, Journal of Testing and Evaluation 52 (2024) 2949–2966.
<https://doi.org/10.1520/JTE20230781>
 - [19] C. Bakouan, L. Chenoy, B. Guel, *Physicochemical and mineralogical characterizations of two natural laterites from Burkina Faso : assessing their potential usage as adsorbent materials*, Minerals 15(379) (2025) 1–24.
<https://doi.org/10.3390/min15040379>
 - [20] M. Zhao, J. Gu, M.H. El Naggar, H. Liu, G. Liu, T. Wang, *Intrinsic compressibility of laterites and lateritic soils*, Canadian Geotechnical Journal 61 (2024) 2774–2784.
<https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0610>
 - [21] S. Sanou, I. Sanou, M. Ouedraogo, H. Bamogo, L.V.L. Gnoumou, Y. Millogo, S. Mohamed, *Stabilization of a lateritic clay from Burkina Faso with cement-metakaolin for an application in road construction*, Journal of Materials Science and Chemical Engineering 11 (2023) 1–20.
<https://doi.org/10.4236/msce.2023.116001>
 - [22] S.T. Owusu, C.W.W. Ng, C. Zhou, *An experimental study of stress-dependent water retention behaviour of two lateritic clays with different minerals*, Engineering Geology 329 (2024) 107398.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107398>
 - [23] D.D. Soro, M. Koïta, A. Biaou, E. Outombe, Y. Koussoubé, C. Alle, H. Yacouba, R. Guerin, J.-M. Vouillamoz, Structure et géométrie d'un aquifère de socle sous climat sahélien : cas du site expérimental de Sanon (Centre Nord du Burkina Faso), In : "Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles", Vingtèmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues, La Roche-sur-Yon (2015).
 - [24] L. Salah, A.M. Hegazi, S.A. Abdelhameed, *Geotechnical suitability of soil for construction and pavement purposes, New Ismailia City, Egypt*, Advances in Environmental and Life Sciences 5(1) (2023) 18–34.
 - [25] K.C. Neeru, K.R. Dahal, *Investigation of soil at different locations of the Kathmandu Valley of Nepal*, American Journal of Science, Engineering and Technology 5(4) (2020) 154–169.
 - [26] E. Civelekler, *Using GIS for the allowable soil bearing capacity estimation in Eskişehir city center, Türkiye*, International Journal of Engineering and Geosciences 8(3) (2023) 310–317.
 - [27] G.O. Adunoyé, A.A. Bello, O.S. Afolabi, *Experimental investigation on the bearing capacity of selected soils in Ayedaade Local Government Area, Osun State, Nigeria*, International Journal of Civil

Engineering, Construction and Estate Management 11(1) (2023) 45–57.

<https://doi.org/10.37745/ijcecem.14/vol11n14557>

- [28] O.O. Falowo, O. Ajiboye, *In-situ foundation characterization and design in Ese Odo Local Government Area of Ondo State, Southwestern Nigeria*,

Global Journal of Engineering and Technology Advances 3(2) (2020) 1–18.

- [29] G.I. Alaminikuma, J.I. Omigie, *Anisotropic properties of the near-surface in South-Western Niger Delta : implications on geotechnical constructions*, Journal of Geology and Mining 12(1) (2020) 1–12.
<https://doi.org/10.5897/JGMR2019.0314>