

Estimation des tassements différentiels des sols de fondation de bâtiment : contribution des sondages de résistivité électrique

Hamma Fabien YONLI^{1,2}, Gilbert MANO¹, Mahamadou KOÏTA³, Aristide COMPAORE⁴

¹Ecole Supérieure d'Ingénierie, Université de Fada N'Gourma, BP 54 Fada N'Gourma, Burkina Faso

²Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (LPCE), Université Joseph KI-ZERBO, BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso

³Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA), Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 01 BP 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso

⁴Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP), BP 133 Ouagadougou 01, Burkina Faso

NFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 31 août 2023

Reçu en format révisé le : 07 septembre 2023

Accepté le : 25 décembre 2023

Mots-Clés : Tassements différentiels, géophysique, sondages électriques, bâtiment

Keywords : Differential settlements, geophysics, vertical electrical soundings, building

ABSTRACT

To estimate differential settlements of building foundation soils, the site on which the structure is based must be geotechnically surveyed in order to determine the deformation parameters and the thickness of the compressible soil layers in various places. This involves conducting destructive surveys. In this study, the use of geophysical methods (electrical soundings) as a substitute for the conventional methods used was considered. The Schlumberger electrodes array was deployed at the level of a control borehole and at three projected footings. The combination of the results of the electrical soundings with the lithological section of the borehole reveals a significant correlation between the variations of cumulative resistivities and the lithological section of the subsoil. The thickness of the compressible layers at the level of the projected footings is estimated to vary between 5 and 6 m. Oedometric differential settlements have an estimated maximum value of 4.56 cm.

RESUME

Pour estimer les tassements différentiels des sols de fondation de bâtiment, le site sur lequel est fondé l'ouvrage doit faire l'objet d'une reconnaissance géotechnique afin de déterminer les paramètres de déformation et l'épaisseur des couches de sols compressibles en divers endroits. Cela passe par la réalisation de sondages destructifs. Dans cette étude, il a été envisagé le recours à des méthodes géophysiques (sondages électriques) en substitution aux méthodes conventionnelles employées. Le dispositif Schlumberger a été déployé au droit d'un forage témoin et au niveau de trois semelles projetées. La combinaison des résultats des sondages électriques avec la coupe lithologique du forage révèle une corrélation significative entre les variations de résistivités cumulées et la coupe lithologique du sous-sol. L'épaisseur des couches compressibles au droit des semelles projetées est estimée comme variant entre 5 et 6 m. Les tassements différentiels œdométriques ont une valeur maximale estimée de 4,56 cm.

I. INTRODUCTION

Les bâtiments reposent souvent sur des fondations superficielles constituées de semelles isolées en béton armé. Les charges appliquées sur ces fondations entraînent des déformations du sol. Ces déformations dépendent de la compressibilité de ce sol. Lorsque ces déformations ne sont pas uniformes d'une semelle à l'autre, elles peuvent engendrer de graves problèmes structurels, se manifestant par l'apparition de fissures atteignant parfois plusieurs mètres de long. En effet, le bâtiment étant directement en contact avec le sol ne peut que suivre les déformations de

ce dernier. Ces déformations inégales sont appelées tassements différentiels et doivent être appréhendées afin de prévenir les désordres. La Borderie et Breyse (2007) soulignent que les variations spatiales de la rigidité du sol entraînent des tassements et des tassements différentiels, qui génèrent des contraintes parasites et des déplacements dans les ouvrages tels que les ossatures, les réseaux enterrés, les dallages et les chaussées, pouvant parfois conduire à leur fissuration.

L'estimation des tassements différentiels est complexe car elle nécessite une étude géotechnique du site sur lequel le bâtiment est fondé. Cette étude vise à déterminer les paramètres de déformation, ainsi que la succession

lithologique des terrains et leurs épaisseurs en différents points. Elle implique la réalisation de sondages destructifs par forages ou par fouilles manuelles. Selon l'ampleur du projet, ces sondages peuvent être longs et coûteux, et ils peuvent également avoir un impact négatif sur la structure du sol dont on cherche à évaluer les propriétés.

Les méthodes de prospection électrique par courant continu offrent une solution non destructive pour déterminer la répartition des matériaux dans le sol en utilisant la résistivité électrique. Gonçalves et al. (2021) ont démontré l'efficacité de ces méthodes en utilisant la Tomographie de Résistivité Électrique (TRE) en association avec le Test de Pénétration Standard (SPT) lors d'une étude géotechnique sur trois sites présentant différentes propriétés de sol à Bahia, au Brésil. Cette étude visait à établir une corrélation entre la résistivité électrique de ces sites et le nombre de coups du SPT dans les sols tropicaux brésiliens. Dans le cadre de projets de barrages nécessitant des budgets importants, il est essentiel de réaliser des études géotechniques et d'utiliser des méthodes de mesure géophysique afin de définir la zone de travail et minimiser les risques d'erreur pour garantir la sécurité des structures d'ingénierie (Sari et al, 2020).

De nombreuses autres études d'applications de la géophysique en association avec la géotechnique ont été menées. Kim et al. (2022) ont utilisé la tomographie pour surveiller la stabilité du sous-sol à proximité d'une excavation de fondation. Shin et al. (2019) ont utilisé cette méthode pour la détection précoce de la rupture d'un barrage en caractérisant les changements temporels des comportements souterrains. Neyamadpour (2018) a montré qu'il est possible d'utiliser la TRE pour étudier l'extension verticale et horizontale de fissures existantes dans la structure d'une route recouverte de grès asphaltique. Des études telles que les travaux de Martínez-Pagán (2013) ont prouvé que les méthodes géophysiques électriques sont très efficaces et adaptées pour fournir des informations suffisantes sur des cavités peu profondes du sous-sol. Yonli et al (2023) ont montré que l'utilisation de telles méthodes peuvent permettre d'anticiper de potentiels désordres liés aux travaux de fonçage sous les routes. Cependant, à notre connaissance, aucune recherche n'a été entreprise pour estimer les tassements différentiels des sols de fondation en associant l'étude géotechnique à la prospection géophysique. C'est pourquoi la présente étude a pour objectif principal d'évaluer les tassements différentiels par une approche couplée géotechnique-géophysique. Les sondages électriques verticaux sont employés pour estimer l'épaisseur des couches de sols compressibles, facilitant ainsi le calcul des tassements différentiels. L'étude est menée au Burkina Faso, en Afrique de l'Ouest, sur un site dont le contexte géologique est celui d'une zone de socle cristallin.

Cependant, à notre connaissance, aucune recherche n'a été entreprise pour estimer les tassements différentiels des sols de fondation en associant l'étude géotechnique à la prospection géophysique. C'est pourquoi la présente étude a pour objectif principal d'évaluer les tassements différentiels par une approche couplée géotechnique-géophysique. Les sondages électriques verticaux sont employés pour estimer l'épaisseur des couches de sols compressibles, facilitant ainsi le calcul des tassements différentiels. L'étude est menée au Burkina Faso, en Afrique de l'Ouest, sur un site dont le contexte géologique est celui d'une zone de socle cristallin.

II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est une parcelle située au Sud de la ville de Ouagadougou, au Burkina Faso, plus précisément dans

le quartier de Ouaga 2000 (Fig. 1). Le contexte géotechnique local est marqué par une prédominance de terre végétale en surface, de formations latéritiques comprises entre 0 et 1 m par rapport à la surface et une prédominance de formations argileuses allant de 1 à 3 m par rapport à la surface (Kaboré, 2020). Le site est destiné à supporter un bâtiment de type R+5 à usage de bureaux. La figure 2, présente trois semelles du bâtiment au droit desquelles seront évalués les tassements. La profondeur d'ancrage des fondations D et la contrainte admissible σ_a du sol sont respectivement de 2,5 m et de 0,20 MPa.

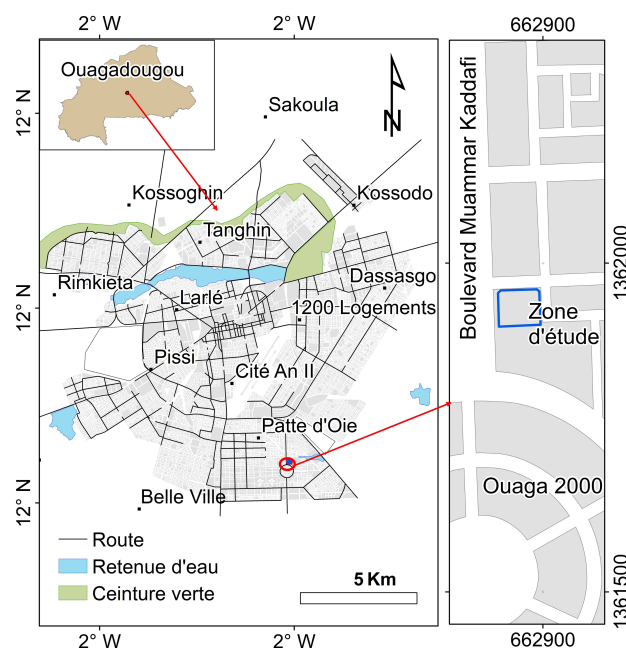


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude.

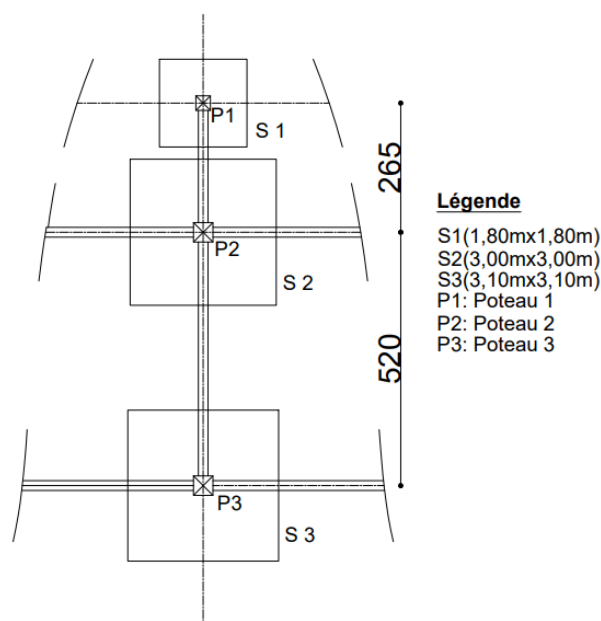


Fig. 2. Semelles du bâtiment R+5 considérées dans le cadre de cette étude.

II.2. Caractérisation géotechnique du site

La caractérisation géotechnique du site a été réalisée au moyen d'un sondage carotté de 15 m de profondeur visant à effectuer une description lithologique du terrain.

Suite à ce sondage, des carottes d'argile furent prélevées à une profondeur comprise entre 8,00 m et 8,60 m. Ces échantillons intacts conservés dans des caisses ont été acheminés en laboratoire pour déterminer les caractéristiques de déformabilité du sol au moyen d'essais œdométriques. Parmi ces paramètres géotechniques, une attention particulière est accordée à l'indice des vides initial e_0 , à la contrainte de préconsolidation σ'_p et à l'indice de compression C_c , car ils interviennent dans la formule d'estimation des tassements.

Les paramètres géotechniques de cette couche d'argile au droit du forage sont représentatifs de tout le site ; en effet des forages secondaires ont permis de constater une continuité latérale de la couche d'argile identifiée.

La courbe de compressibilité représentant l'indice des vides e en fonction de la contrainte effective σ' tracée à partir des résultats des essais œdométriques comporte trois segments distincts permettant de déduire les paramètres relatifs à la compressibilité (fig. 3). L'indice de compression C_c est obtenu sur la droite de plus forte pente (droite n°2) par la formule :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \quad (1)$$

avec Δe : la variation de l'indice des vides ; $\Delta \log \sigma'$: la variation de la contrainte verticale effective ; σ'_p s'obtient par intersection des droites 1 et 2 puis projection sur l'axe des abscisses.

L'indice initial des vides e_0 est obtenu par l'intermédiaire d'une mesure de densité hydrostatique effectué avant l'essai de compressibilité.

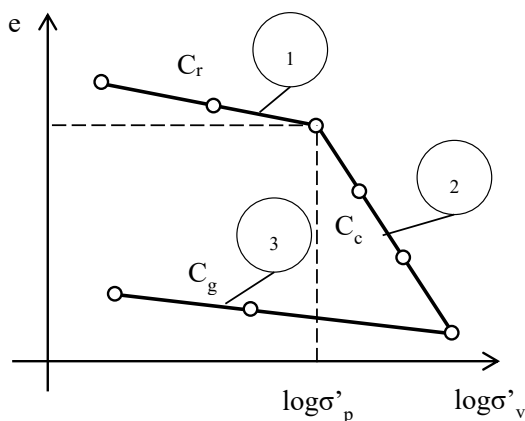


Fig. 3. Interprétation de la courbe de compressibilité œdométrique.

II.3. Caractérisation géophysique du site

La caractérisation géophysique vise à reconstituer de manière non invasive la lithologie et ainsi estimer l'épaisseur des couches de sols compressibles (couches d'argiles dans le présent cas de figure) qui interviennent dans l'estimation des tassements différentiels. La caractérisation a été menée au moyen de sondages électriques verticaux de type Schlumberger au droit des trois (03) semelles projetées ainsi qu'au droit d'un forage témoin (fig. 4). Le sondage au droit du forage témoin vise à s'assurer de la concordance entre les informations issues de la géophysique et la lithologie du forage.

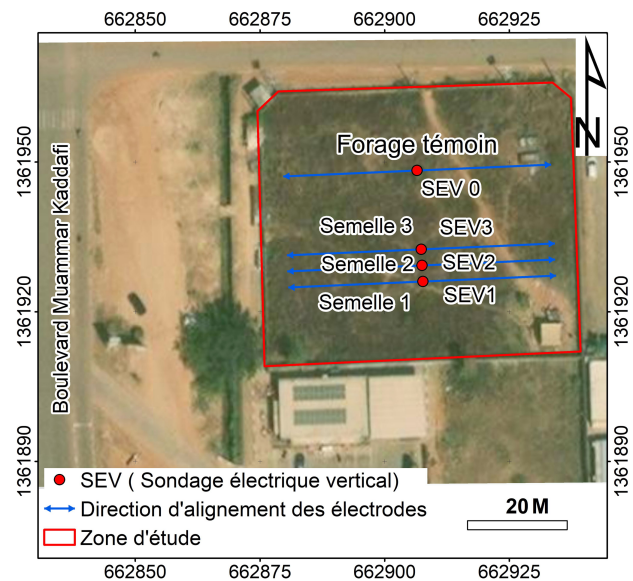


Fig. 4. Positions des sondages électriques verticaux sur le site d'étude.

La méthode d'investigation utilisée est basée sur la mesure des résistivités apparentes du sous-sol.

Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un résistivimètre SYSCAL Junior de la société IRIS INSTRUMENTS. Elles impliquent l'injection d'un courant électrique d'intensité I dans le sol via deux électrodes implantées en des points A et B. Les différences de potentiel ΔV sont mesurées à l'aide d'un autre couple d'électrodes placé en des points M et N. La résistivité apparente est obtenue par la formule :

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

avec : K : le facteur géométrique ; ΔV : la différence de potentiel entre M et N ; I : l'intensité du courant injecté entre A et B.

La figure 5 présente la mise en œuvre d'une mesure de la résistivité électrique effectuée sur le site.



Fig. 5. Mise en œuvre de la mesure de la résistivité électrique.

Le sondage électrique vertical consiste à sonder les profondeurs du sol à travers une série de mesures de résistivité électrique obtenues par une augmentation de la distance entre les électrodes d'injection A et B tout en maintenant constant le centre du dispositif et sa direction. Chaque mesure correspond à une pseudo-profondeur d'investigation de valeur $AB/2$ (m).

Les données de résistivités apparentes collectées lors du sondage électrique sont interprétées par la méthode du calcul des résistivités cumulées. La résistivité cumulée ($\Sigma\rho_{app}$) est obtenue par sommation des résistivités apparentes à partir de la surface jusqu'à une certaine profondeur z . Les points tracés sur le graphique $\Sigma\rho_{app}$ en fonction de z obéissent à l'équation :

$$\{(z; \Sigma\rho_{app})\} = \{(z_1; \rho_1), (z_2; \rho_1 + \rho_2), (z_3; \rho_1 + \rho_2 + \rho_3), \dots (z_n; \rho_1 + \dots + \rho_n)\} \quad (3)$$

avec (z_i, ρ_i) les couples de profondeurs et de résistivités apparentes.

En traçant ce graphe, chaque changement de pente dans la courbe de résistivité cumulée indique une transition d'une couche de sol à une autre (Fig. 6).

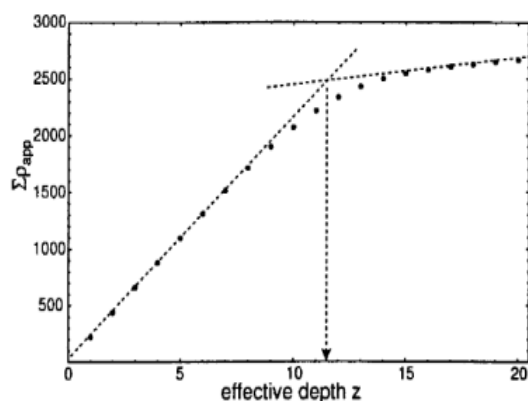


Fig. 6. Détermination de la limite entre deux (02) couches par la méthode des résistivités cumulées (Herman, 2001).

II.4. Calcul des tassements différentiels par couplage géotechnique- géophysique

Les tassements différentiels Δs_{ij} entre deux semelles consécutives ont été estimés par la formule

$$\Delta s_{ij} = |s_i - s_j| \quad (4)$$

avec s_i et s_j respectivement les tassements absolus des semelles S_i et S_j .

Sur le site d'étude, les terrains étant normalement consolidés, la formule suivante a été employée pour l'estimation des tassements absolus sous une semelle i :

$$s_i = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'}{\sigma'_{v0}} \right) H_i \quad (5)$$

avec C_c : l'indice de compression ; e_0 : l'indice des vides initial ; σ'_{v0} : la contrainte effective verticale initiale ; $\Delta\sigma'$ l'augmentation de contrainte ; H_i l'épaisseur de la couche compressible.

Dans l'équation (5), la donnée H_i provient de l'interprétation des sondages électriques verticaux, tandis que les autres données sont issus de la caractérisation géotechnique.

III. RESULTATS-DISCUSSION

III.1. Propriétés géotechniques du sol de fondation

La coupe lithologique du sous-sol issue de la description du forage témoin est présentée en Fig. 7. En surface, entre 0 et 2 m de profondeur, on observe de l'argile latéritique compacte, présentant une texture graveleuse et une proportion modérée de sable. En dessous, à une profondeur comprise entre 2 et 6 m, on observe une couche de cuirasse latéritique. Entre 6 et 10 m de profondeur, une autre couche d'argile latéritique compacte, comportant davantage de graviers, est identifiée. À une profondeur de plus de 10 m, une roche mère de type saprock granitoïdique est constatée. Le niveau d'eau est localisé à une profondeur de 1,8 m.

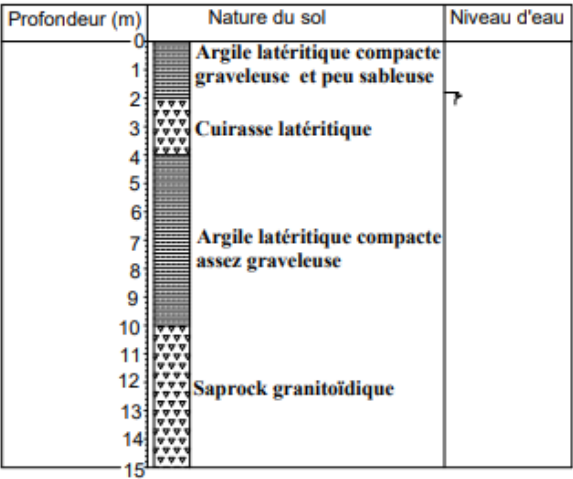


Fig. 7. Coupe lithologique issue du forage témoin

La Table 1 illustre les paramètres de déformabilité obtenus grâce à l'essai œdométrique réalisé sur l'échantillon intact de la couche d'argile prélevé entre 8 m et 8,60 m de profondeur.

Table 1. Paramètres géotechniques de la couche d'argile sous les semelles

Indice des vides initial	Indice de compression	Contrainte de préconsolidation
e_0	C_c	σ'_p (bar)
0,30	0,12	0,91

III.2. Estimation des épaisseurs de couches compressibles au droit des semelles

La Table 2 synthétise les mesures d'épaisseurs de la couche compressible, tirées des divers sondages électriques effectués au niveau des assises S₁, S₂ et S₃. Ces données revêtent une importance primordiale pour appréhender la structure géologique du site et seront exploitées dans le calcul des tassements absolus pour ces mêmes assises.

Table 2. Tassements absolus des différentes semelles

Semelle	Tranche (m)	Epaisseur de la couche compressible H_i (m)	Nature du sol
S ₁	6-12	6	Argile latéritique compacte et assez graveleuse
S ₂	6-11	5	
S ₃	6-12	6	

III.3. Estimation des tassements différentiels

Les tassements absolus calculés aux droits des différentes semelles sont indiqués dans la Table 3. Les tassements différentiels entre semelles consécutives, dérivés de ces tassements absolus, sont consignés dans la Table 4. Il est observé que la valeur maximale du tassement différentiel atteint 4,56 cm. Cette valeur s'approche de la limite de tassement maximal admissible de 4,5 cm, établie par Skempton and Mac Donald (1955) ainsi que par Grant et al. (1974). L'atténuation de ce tassement différentiel peut être envisagée en augmentant les dimensions des assises.

Table 3. Tassements absolus des différentes semelles

Tassement de la semelle 1 s_1 (cm)	Tassement de la semelle 2 s_2 (cm)	Tassement de la semelle 3 s_3 (cm)
6,42	10,98	12,49

Table 4. Tassements différentiels entre les différentes semelles

Tassement différentiel entre les semelles 1 et 2 Δs_{12} (cm)	Tassement différentiel entre les semelles 2 et 3 Δs_{23} (cm)
4,56	1,51

IV. CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif d'utiliser des méthodes géophysiques, non destructives, en association avec des méthodes géotechniques pour évaluer les tassements différentiels des sols de fondation d'un bâtiment. Cette approche couplée permet d'estimer ces tassements en fournissant des informations sur les paramètres de déformabilité et les caractéristiques géométriques du sol de fondation. Les résultats ont indiqué un tassement maximal de 4,56 cm, indiquant des déplacements significatifs entre différentes parties du sol de fondation, pouvant influencer les structures érigées. Les sondages électriques ont permis de déterminer l'épaisseur de la couche de sol compressible qui varie entre 5 et 6 m sous les semelles. Cette information est cruciale pour la conception de la structure du bâtiment et sa construction. L'avantage est la reproductibilité de la méthode, qui peut être appliquée en divers endroits du site sans dommage. En somme, les sondages électriques associés aux techniques géotechniques sont des outils performants pour estimer les tassements différentiels en informant sur l'épaisseur des couches de sols.

REFERENCES

Gonçalves, J. T. D., Botelho, M. A. B., Machado, S. L., and Netto, L. G., 2021, *Correlation between field electrical resistivity and geotechnical SPT blow*

- counts at tropical soils in Brazil, *Environmental Challenges*, Vol 5, 100220, pp. 1-12.
- Grant, R., Christian, J. T., and Vanmarcke, E. H., 1974, *Differential Settlement of Buildings*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 100, pp. 973-991.
- Herman, R., 2001. *An Introduction to Electrical Resistivity in Geophysics*, American Journal of Physics, 69 (9), pp. 943– 952.
- Kaboré, M. 2020. *Cartographie et Synthèse Des Propriétés des Sols Obtenus lors des Essais de Reconnaissance dans la ville de Ouagadougou*, Mémoire de master en Génie Civil, Ecole Nationale des Travaux Publics, Burkina Faso, 53 pages.
- Kim, B., Joung, I., Cho, A., Shina, D., Han, Y., and Nama, J., 2022. *Monitoring the perturbation zone near a foundation excavation with electrical resistivity tomography: Comparison between time-lapse 3D and 2D inversions in single-profile study*, Journal of Applied Geophysics (205) 104772, pp. 1-10.
- La Borderie, C., and Breysse, D., 2007. *Étude du Tassement Différentiel sur Sols Hétérogènes*, Revue Européenne de Génie Civil, Routledge Taylor & Francis, pp. 1–8.
- Martínez-Pagán, P., Gómez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Mantec, J. I., and Rosique, M. 2013. *The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena (SE Spain)*, Engineering geology 156, pp. 1-10.
- Neyamadpour A. 2018. *Detection of subsurface cracking depth using electrical resistivity tomography: A case study in Masjed-Soleiman, Iran*. A : 191, pp. 1103-1108.
- Sari, M., Seren, A., and Alemdag, S., 2020. *Determination of geological structures by geophysical and geotechnical techniques in Kırklartepe Dam Site (Turkey)*. Journal of Applied Geophysics, 182 pages.
- Shin, S., Park, S., and Kim, J.-H., 2019. *Time-lapse Electrical Resistivity Tomography Characterization for Piping Detection in Earthen Dam Model of a Sandbox*, Journal of Applied Geophysics (170) 103384, pp. 1-7.
- Skempton, A. W., and Macdonald, D. H., 1956, *The allowable settlements of buildings*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol 5, Issue 6, pp. 727-768.
- Yonli, H. F., Koïta, M., Kanla, I., and Compaoré, A., 2023. *Contribution of Electrical Resistivity Tomography to the Anticipation of Potential Disasters: Case of Pipe Ramming Works Under Road Embankments*, Journal of Materials Science and Surface Engineering, 10: pp. 1091-1096.