Correction des modules pressiométriques et application aux grands projets de construction

Ammar Dhouib

Expert de justice – Expert national agréé par la Cour de Cassation – Président ADECSOL
9 Allée de l'Ile Marante 92700 Colombes (France)
ammar.dhouib@expert-de-justice.org

RESUME

Cette communication présente des essais pressiométriques réels dans des sols très résistants. Les modules y ont été corrigés à partir du coefficient de dilatation de l'appareillage déduit de la courbe d'expansion propre de la sonde pressiométrique et appliqués à des projets d'envergure avec instrumentations, suivis et mesures des tassements des fondations de radiers généraux pour des grandes tours (Immeubles de Grandes Hauteurs : IGH). Des retours d'expérience originaux et inédits et des leçons et renseignements précieux clôturent cette contribution.

ABSTRACT

This communication presents real pressuremeter tests in very resistant soils. The modules were corrected from the expansion coefficient of the apparatus deduced from the expansion curve of the pressuremeter probe and applied to large-scale projects with instrumentation, monitoring and measurement of settlements of general raft foundations for large towers (High-Rise Buildings: HRB). Original and unpublished feedback and valuable lessons and information conclude this contribution.

Mots-clefs : Essai pressiométrique, sol résistant, haute pression, module, correction, dilatation, tassements.

1. Préambule

Le module pressiométrique est un paramètre délicat à mesurer et à évaluer. Il dépend à la fois du matériau testé et de la qualité du forage préalable à l'essai. Dans un sol meuble, la qualité du forage prime. Dans un milieu résistant (calcaire, marne et argile très raide, sable et grave denses, craie saine,…), le module est évalué par « défaut ». Il est indispensable de procéder à la correction des modules à partir du coefficient de dilatation de l'appareillage déduit de la courbe d'expansion propre de la sonde pressiométrique dans un tube métallique de calibrage de la sonde.

Cette communication présente des essais pressiométriques réels dans des sols très résistants. Les modules y ont été corrigés à partir du coefficient de dilatation de l'appareillage déduit de la courbe d'expansion de la sonde pressiométrique et appliqués à des projets d'envergure avec instrumentations, suivis et mesures des tassements des fondations de radiers généraux pour des grandes tours (Immeubles de Grandes Hauteurs : IGH).

Des retours d'expérience originaux et inédits et des leçons et renseignements précieux clôturent cette contribution.

2. Analyse d'essais monotones dans un sol résistant

2.1. Exemple concret d'un essai à très haute pression

Des développements nouveaux en termes d'essais pressiométriques Louis Ménard viennent de voir le jour afin de réaliser des essais de très haute pression comme le montrent la figure 1, qui illustre le pressiomètre « HyperPAC » et la sonde très haute pression de Geomatech (Figure 1.a) et des courbes pression-volume où les pressions ont été poussées dans la sonde jusqu'à 25 MPa (essai avec forage mal calibré sans contact immédiat sonde/paroi de forage) et 19 MPa (essai avec forage bien calibré) sur la figure 1.b.

Figure 1.a : Pressiomètre « HyperPAC »
(Document de Geomatech)

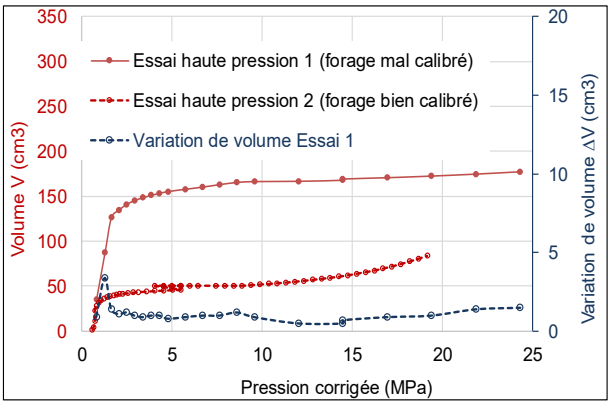


Figure 1.b : Courbes d'essais très haute pression (Document de Geomatech)

2.2. Corrections des modules dans un milieu résistant

Dans un milieu résistant (calcaire, marne et argile très raide, sable et grave denses, craie saine,…), il est indispensable de procéder à la correction des modules à partir du coefficient de dilatation de l'appareillage déduit de la courbe d'expansion propre de la sonde pressiométrique dans un tube métallique de calibrage de la sonde (Figure 2.b) et des essais d'inertie (Figure 2.a).

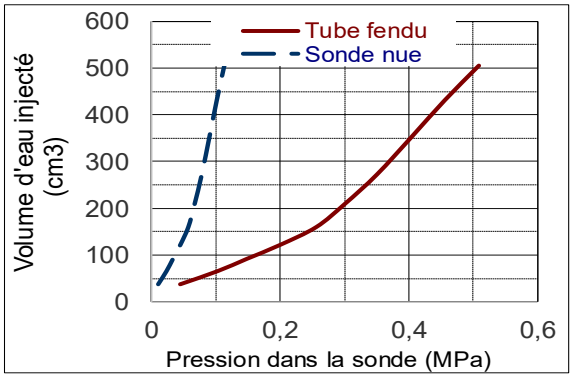


Figure 2.a : Essais d'inertie

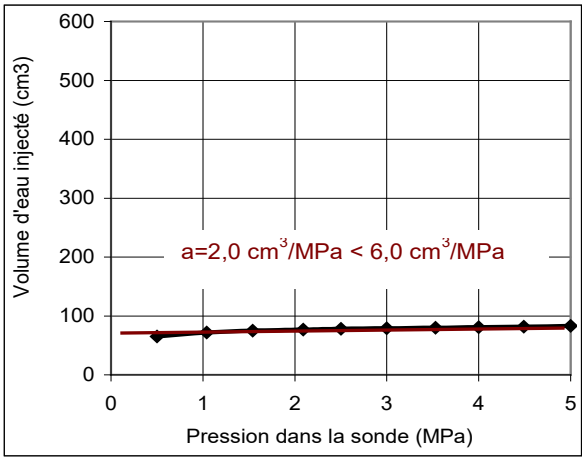


Figure 2.b : Calibrage de la sonde dans un tube métallique (coefficient de dilatation)

Sur la figure 3 sont portés plusieurs dizaines de mesures de modules pressiométriques dans du calcaire et marne très compacts. Ainsi, l'évolution des rapports des modules pressiométriques E'_M corrigés par la prise en compte du coefficient de dilatation (a) de la sonde pressiométrique (Figure 2.b) aux modules pressiométriques non corrigés E_M montre, sur la figure 3, que les modules E'_M sont de 2 à 20 fois plus grands que E_M. Cette correction est nécessaire pour pouvoir justifier les projets géotechniques importants (l'exemple de la Tour étudiée dans le paragraphe 3. qui suivra en est une parfaire illustration, Dhouib 2016).

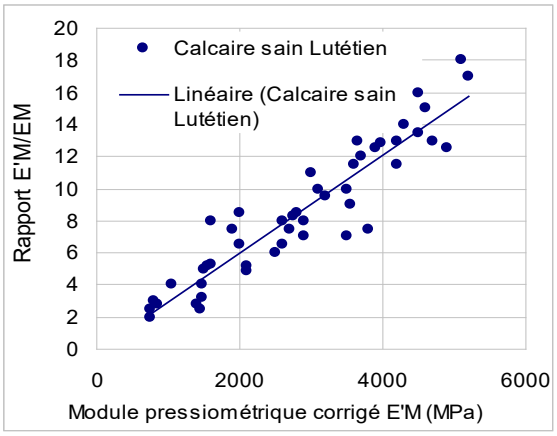


Figure 3.a : Correction des modules pressiométriques dans du calcaire sain

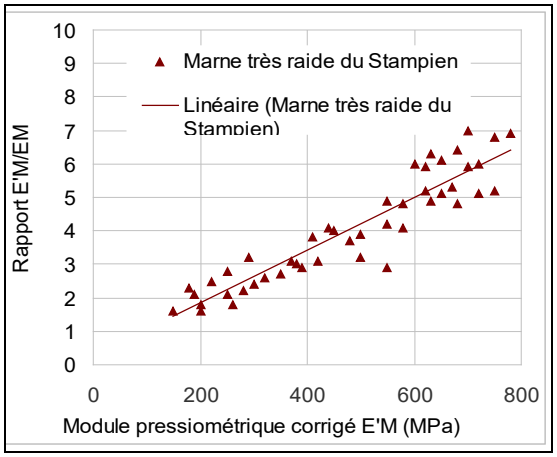


Figure 3.b : Correction des modules pressiométriques dans des marnes raides

3. Justifications de fondations multiples

3.1. Corrections des modules

Des sondages effectués dans le cadre de l'avant-projet ne permettaient pas de justifier les fondations multiples par radier, barrettes et massifs ponctuels semi-profonds en mini-barrettes, en termes de tassements différentiels et non pas en termes de portance. En effet, les caractéristiques pressiométriques fournies dans le cadre de l'avant-projet sont peu représentatives du substratum compact. Afin de raffiner le toit du substratum par les sondages complémentaires carottés et destructifs en phases préparatoires de l'exécution, cinq sondages

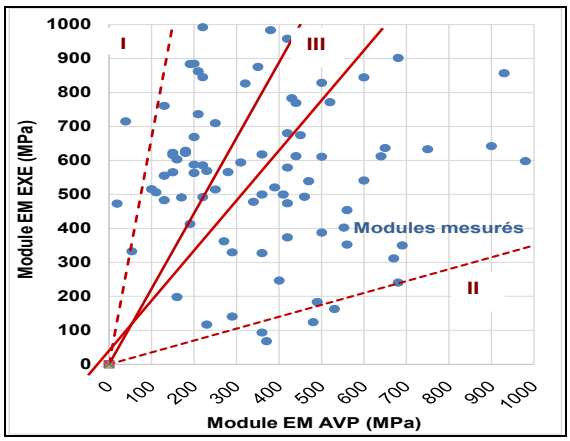
pressiométriques ont été effectués et les essais pressiométriques Louis Ménard y ont été conduits, avec spécifiquement :

- des sondes « rocher » afin de pousser les pressions limites mesurées à 13,5 MPa,
- des modules de déformation pressiométrique corrigés en fonction de la dilatation des sondes.

Comme le stipulent les règles en vigueur, relatives aux essais sur site, la correction des modules pressiométriques dans les sols très compacts et assimilés (rocher) pour la prise en compte de la dilatation de la sonde par le biais du coefficient de dilatation « a » est nécessaire et très utile pour justifier les fondations des projets géotechniques (Dhouib et al., 2002-a, Dhouib, 2016). De ce fait, les essais pressiométriques mesurés dans les investigations géotechniques de l'avant-projet et celles préalables à la phase d'exécution ont été analysés dans le détail en termes de courbes pressions-volumes et de modules pressiométriques et leur correction en fonction du coefficient de dilatation de la sonde (a).

Cette analyse a conduit aux données synthétiques de la figure 4. En effet, la figure 4 met en évidence la synthèse des modules pressiométriques EM corrigés à partir du calibrage des sondes (Figure 2.b) obtenus par des sondes « rocher » où les pressions ont été poussées jusqu'à 13,5. Comme il est usuel de dire « Oser et aboutir » : la modification du mode de fondations en phase d'EXE a été motivée, malgré de fortes réticences du bureau de contrôle technique[1], par une analyse très fine des données mécaniques entre la phase d'avant-projet et la phase EXE.

En atteste le graphe synthétique de la figure 4 qui suit



Paramètres	AVP	EXE
Moyenne harmonique M_h	76	415
Moyenne M_a	390	588
Ecart type σ	189	197
M-σ/2	295	489
E_M harmonique simulations	**180**	**415**

I (MAX) : E_M EXE = 6,7. E_M AVP,
II (MIN) : E_M EXE = 0,35. E_M AVP
III (MEDIANE) : E_M EXE = 2,5. E_M AVP.

Figure 4 : Correction des modules pressiométriques E_M

[1] Le contrôleur technique prédisait des tassements totaux de 60 à 80 mm au droit du radier général sur gros béton, et des tassements de 10 à 15 mm des autres fondations proches du radier général.

3.2. Analyse des tassements des fondations

Le but de cette analyse est de justifier la mise en œuvre sous le noyau central d'une grade tour (IGH) de plusieurs modes de fondations, à la fois superficielles (radier général sous le noyau et massifs semi-profonds sur mini-barrette) et profondes (barrettes en périphérie du noyau), fondations qui sont réputées tasser très différemment. La figure 5, qui suit, illustre les modélisations en éléments finis (PLAXIS-2D) des diverses fondations :

- Radier général sous 750.000 kN : 35.000 kN de charge linéique en périphérie et 40.000 kN répartie en partie courante (Figure 5.a),
- Barrettes et mini-barrettes, sous charges ponctuelles respectivement de 7.100 et 22.000 kN (Figures 5.b).

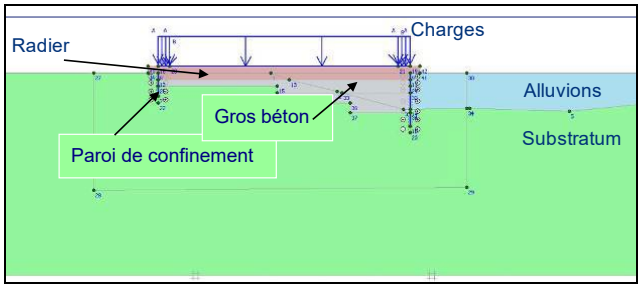


Figure 5.a : Modélisation en deux dimensions (2D) du radier sous le noyau central

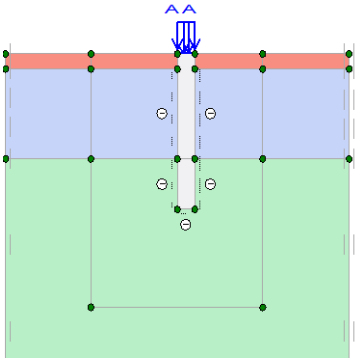


Figure 5.b : Modélisation (2D) de barrette en périphérie

Les champs de déplacements (tassements) du radier général et de la barrette isolée sont portés sur la figure 6.

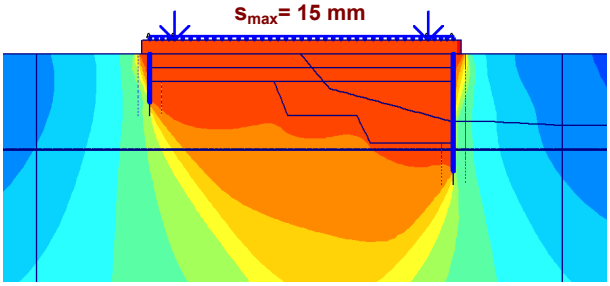


Figure 6.a : Champ de déplacements sous radier général du noyau central de la tour

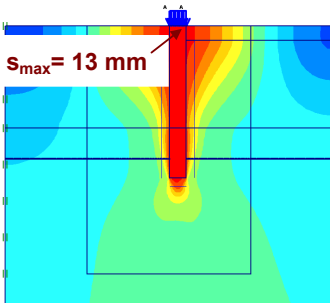


Figure 6.b : Champ de déplacements autour de la barrette isolée en périphérie

La figure 7 fait la synthèse des calculs analytiques : Règles T5 de Ménard, 1959, Giroud, 1973, Boussiesq, 11885, approche équivalente, et les modélisations numériques de calage en éléments finis à deux dimensions par le logiciel « PLAXIS ». Ces tassements sont confrontés aux mesures des tassements sous radier (Figure 8 qui suivra).

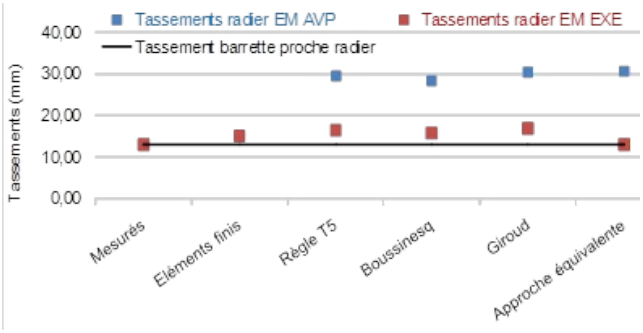


Figure 7 : Synthèse des tassements du radier et des barrettes

Les tassements du radier de la tour ont été suivis sur une période de 19 mois sur plusieurs cibles, tassements que résume la figure 8 pour quatre cibles disposées sur la périphérie du noyau en comparaison avec les tassements prédits par des calculs analytiques et numériques en éléments finis en deux dimensions.

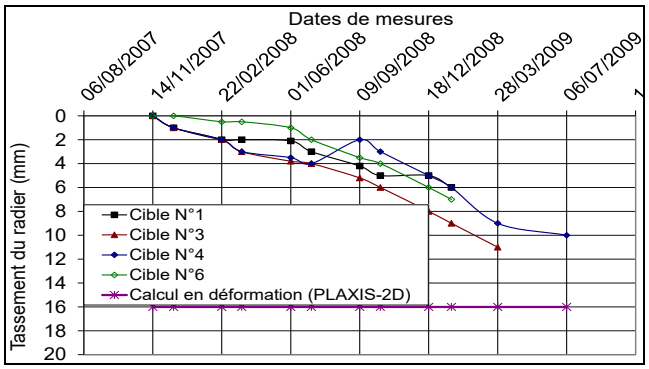


Figure 8 : Tassements mesurés et prédits du radier général de la tour

Des résultats de la figure 8 ressort ce qui suit :

- Avec les données de l'avant-projet (module pressiométrique E_M de 180 MPa), les tassements théoriques du radier général avoisinent les 30 mm pour un tassement des barrettes qui se réduit au raccourcissement pour un tassement de barrette de 13 mm. A ce niveau de tassement, les tassements différentiels conduisent à des rapports de 0,009 à 0,020, largement supérieurs à 0,002 (règle usuelle du BAEL et Eurocodes).
- La donnée d'un module pressiométrique E_M de 415 MPa, déduit des sondages et essais complémentaires préalablement à l'exécution, a permis de réduire les tassements du radier à 12 à 16 mm, pour un tassement de barrettes de 13 mm, et respecter, ainsi, les tassements différentiels (0,0001 à 0,002) entre barrettes et radier général

C'est en procédant ainsi que le projet a été étudié, justifié, validé et construit avec la « bénédiction » du bureau de contrôle et dans une bonne « humeur » partagée.

4. Contrôle des pressions limites et de fluage – portance du sol

Le contrôle des pressions limites (p_l*) et de fluage (p_f*) est primordial dans l'analyse du bilan des charges en relation avec la portance des sols sous constructions existantes sinistrées ou non, car il est prématuré de procéder à une analyse de calcul des contraintes de rupture et celles des deux états limites (ELS et ELU) à partir les règles usuelles en vigueur (DTU et Eurocodes) en cherchant vainement un facteur de portance k_p et une pression limite nette équivalente (p^*_{le}). Puisque le fluage du sol sous les fondations existantes est régi directement par les pressions de fluage « retenues » (Dhouib, 2021, 2022 et 2025), qu'il convient tout simplement de comparer aux contraintes réelles sous fondations issues des charges aux ELU, notée p_{ELU}. La figure 9 présente les rapports des pressions limites p_l* mesurées en SP101 et SP102 aux pressions de fluage (p_f*) correspondantes (Figure 9.a), ainsi que les facteurs de fluage, définis par le rapport p_f^*/p_{ELU} (Figure 9.b) pour les fondations d'un pavillon sinistré par l'effet de gonflement/retrait suite à la sècheresse, déclarant par arrêté, la commune en catastrophe naturelle (CAT NAT).

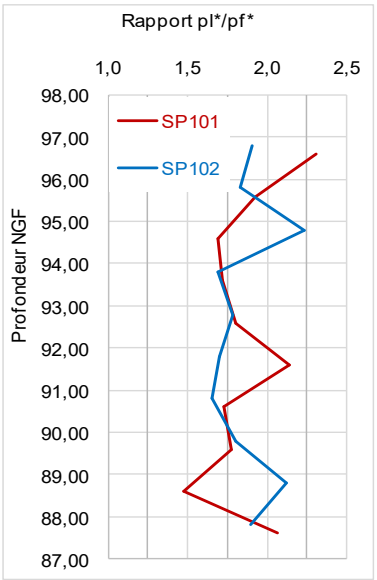


Figure 9.a : Contrôle des pressions limites et de fluage sous fondations existantes de construction sinistrée par la sècheresse (CAT NAT)

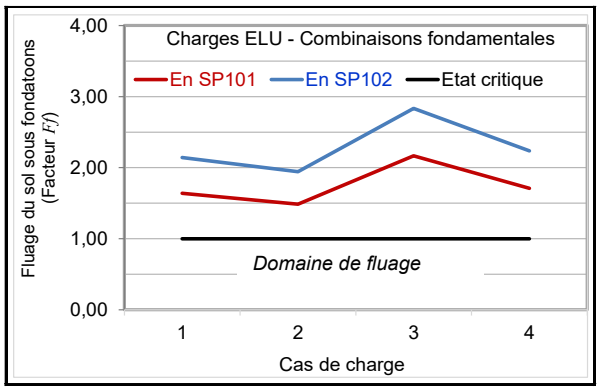


Figure 9.b : Cas de construction sinistrée par la sècheresse (CAT NAT) - Facteur de fluage F_f (Dhouib, 2021, 2022 et 2025)

L'état critique (F_f=1,00) correspond à l'égalité parfaite entre charges résistantes (représentées par la pression de fluage du sol sous la fondation p_f* dans l'équation de F_f) et charges actives (apportées par les fondations de la construction : p_{ELU}). Le facteur de fluage F_f inférieur à 1,00 se traduit par l'amorce de fluage et la ruine du sol sous les fondations. Cette nouvelle approche (Dhouib, 2021, 2022 et 2025) à l'avantage de pouvoir comparer les deux contraintes (p_f* et p_{ELU}) directement sans passer par aucun calcul intermédiaire pour justifier la portance sous fondations existantes avec sinistre.
En conclusion, Il n'y a donc pas de fluage sous les fondations filantes de la construction sinistrée, donc pas de défaut de portance. Ce résultat est logique au regard de l'âge d'une bâtisse construite dans les années 1970 d'après les informations recueillies en cours d'une expertise juridictionnelle

5. Conclusion

Pour bâtir des projets qui tiennent par des hommes et femmes qui comptent, il faut :

1- Vérifier la bonne compatibilité des données de la conception de la phase projet (G2-PRO, NF P4-500) avec les données pouvant être rencontrées avant l'exécution,
2- Etablir les données d'exécution, qu'ils soient en phase ou, si nécessaire, en contradiction (moyennant des sondages, essais et études complémentaires) avec les entrants de la conception,
3- Adapter et optimiser les fondations des ouvrages à exécuter (G3 – Phase Etude, NF P94-500),
4- Bien exécuter les fondations des ouvrages de construction avec contrôle régulier (autocontrôle par l'entreprise dans le cadre de la G3-Suivi et la méthode observationnelle diligentée par le maître de l'ouvrage et ses conseillers techniques),
5- Suivre leur comportement pendant les travaux et, si nécessaire, après leur réception (Phase de supervision de mission G4 (NF P94-500) à la charge du maître de l'ouvrage quel que soit le contrat de construction : contrat de construction uniquement (entreprise exécutante), contrat de conception/réalisation ou PPP (Partenariat Public Privé),
6- Promouvoir la « Méthode observationnelle » (Allagnat, 2005), afin de donner à l'ouvrage la dimension qu'il mérite, notamment les ouvrages de grands projets.

Remerciements

L'auteur adresse ses remerciements à ses anciens collègues : Lina Bawji, Marylise Dupras et Sophie Lelièvre. Elles ont contribué, sous sa direction, à des projets phares de VINCI, y compris celui de la tour étudiée ici.

Références bibliographiques

AFNOR, (2013), "Justification des ouvrages géotechniques Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations superficielles – NF P94-261", Paris.

AFNOR, (2000), "Missions géotechniques normalisées : NF P94-500", Paris.

Allagnat D, (2005), "La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages", sous la direction de Dominique Allagnat, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

Boussinesq, J. (1885), "Applications des Potentiels à l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques," Gauthier-Villiars, Imprimeur-Libraire, Paris.

Dhouib A., Caquineau X., Gambin M. (2002), "Variations des paramètres mesurés par le pressiomètre Ménard", Symposium International PARAM 2002, Editions Presses des Ponts, 2-3 septembre 2002.

Dhouib A., Caquineau X., Gambin M. (2002), "Variations des paramètres mesurés par le pressiomètre Ménard", Symposium International PARAM 2002, Editions Presses des Ponts, 2-3 septembre 2002.

Dhouib A., (2010), "L'expertise géotechnique et la norme NF P94-500 : Cas de sinistres sur construction", Revue Expert n°92, Octobre 2010, pp. 25-30.

Dhouib, A., (2016), "Géotechnique appliquée aux projets de construction", Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 1041 pages, septembre 2016.

Dhouib, A., (2021), "Géotechnique appliquée aux projets de construction", Presses des Ponts et Chaussées, Paris, Edition complétée, 1104 pages, juin 2021.

Dhouib, A., (2022), "Applied Geotechnics for Construction Projects - Volume 1: Soil and Experimental Data", ISTE / WILEY Edition, London/New York, 392 pages (2022), December 2022.

Dhouib, A., (2022), "Applied Geotechnics for Construction Projects - Volume 2: Fundamental Principles of Soil Mechanics and the Role of Water", ISTE / WILEY Edition, London/New York, 342 pages (2022), December 2022.

Dhouib, A., (2022), "Applied Geotechnics for Construction Projects - Volume 3: Behavior and Design of Projects Foundations and Eurocode Validation", ISTE / WILEY Edition, London/New York, 490 pages (2022), December 2022.

Dhouib A., (2025), "Expertise géotechnique – du Projet au Sinistre : Le Juge désigne, l'Expert exécute et l'Avocat défend", Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 241 pages, mars 2025.

D.T.U. 13-12, (1992), "Fondations superficielles pour les bâtiments", AFNOR P94-11-212, septembre 1992, Paris.

Giroud J-P. (1973), "Tables pour le calcul des fondations", Tomes 1 à 3, Edition Dunod Paris.

Jacquard C., Dhouib A., (2012), "Etude de fondations mixtes sur radier général d'une grande tour – Modélisation simplifiée et retour d'expérience", Conférence au Comité Français de Mécanique des Sols et des Fondations Paris 11 octobre 2012.

Ménard L., (1959), "D60 Notice générale : Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations".