

SUR L'INTERPRETATION DES RESULTATS DES CAMPAGNES GEOTECHNIQUES SELON L'EXPERIENCE AU LIBAN

ON THE INTERPRETATION OF RESULTS OF SITE INVESTIGATION PROCEDURES IN LEBANESE TERRITORIES

Youssam KAZAN

Université Libanaise, Roumieh, Liban

RÉSUMÉ – Nous rappelons le phénomène de surdimensionnement des écrans de soutènement dans les excavations profondes dans les principales formations géologiques au Liban. Pour expliquer l'écart significatif entre le comportement réel et les déformations attendues, nous analysons les quelques aspects dans les interprétations des résultats des campagnes géotechniques dans quelques formations principales.

ABSTRACT – In this paper we recall the over design phenomenon in retaining systems used in deep excavations in some geological formation in Lebanon. In order to explain the considerable difference between proposed and deducted values of mechanical parameters, we discuss some common mistakes made by geotechnical engineers in the site investigation stage.

1. Introduction

Les écrans de soutènements de différentes natures, flexibles ou rigides, sont utilisés dans les excavations profondes dans différentes formations géologiques. Les suivis de comportement des écrans après excavations sont maintenant fréquents, et il est courant de trouver des valeurs de déplacement publiées (Kazan 2014) (Fawaz 2014). Le seul critère de validation de la méthode de dimensionnement et des paramètres utilisés dans le calcul de ces structures géotechniques est la stabilité de l'excavation lors des travaux d'exécution. Ainsi, les écrans de soutènements, s'ils sont préconisés et exécutés, sont souvent surdimensionnés d'une façon exagérée. Les géotechniciens ne disposent pas de moyens vraiment efficaces pour donner les preuves sur le bon choix de leurs paramètres mécaniques utilisés dans le calcul.



Figure 1 Soutènement par pieux espacés d'une excavation profonde à Beyrouth

Cette problématique se manifeste en particulier dans deux formations typiques : les marnes et les grès. Ces formations sont parfois rocheuses, compactes et classées de bonne qualité. Dans ce cas, leur caractérisation ne prête pas à une confusion en appliquant les règles de la mécanique des roches classique. Toutefois, elles risquent parfois d'avoir des cavités de taille considérables, et le traitement de ce problème n'entre pas dans le cadre de ce papier. Dans le cas inverse, ces formations sont tendres, elles seront traitées comme de l'argile raide. La caractérisation sera fait selon les normes de la mécanique des sols.

2. Généralités sur le contexte libanais

2.1. Contexte géologique

La quasi-totalité des formations géologiques de la superficie libanaise est sédimentaire (Dubertret 1951) (Khawlie 1987). Ces formations remontent à l'âge jurassique de l'ère secondaire. Les roches calcaires, les formations marneuses et les grès sont les trois formations les plus abondantes. Le volcanisme basaltique est erratiquement présent dans certains endroits du pays, au nord en particulier, ses caractéristiques mécaniques sont proches des roches calcaires compactes.

Le calcaire est présent à plusieurs stades de formations, dur (Jurassique) et tendre (Turonien). Le grès de base du Crétacé est l'une des formations spécifique du Liban. les formations quaternaires occupant une bonne partie de la capitale en surface. Ces formations sont situées au-dessus des autres formations (Miocène et Crétacé en particulier) qui font l'objet de cet article.

2.2. Travaux géotechniques

Dans cet article nous attirons en particuliers l'attention sur les écrans de soutènement dans les excavations profondes. Malgré la diversité des formations géologiques, une étude antécédente a permis d'analyser l'analogie ou bien le parallélisme dans les caractéristiques mécaniques de ces différentes formations.

Le tableau 1 suivant montre la nouvelle classification géologique (Kazan 2002) proposée de point de vu du géotechnicien qui attire l'attention sur les facteurs à étudier en particulier lors du dimensionnement des écrans de soutènement. Nous citons les facteurs liés avec les campagnes de reconnaissance de sol :

- Traitement de la partie superficielle éventuellement décomposée ou friables.
- Caractérisation des massifs par essais in situ.
- Non représentativité des échantillons.
- Bonne identification des paramètres de résistance. par calcul inverse.
- Vérification de la stabilité globale et locale.

Malheureusement ces thèmes sont généralement mal traités par les géotechniciens lors des études préliminaires. Nous essayons dans le paragraphe suivant de proposer des réflexions nécessaires pour analyser les procédures suivis, par habitude, pour ressortir les erreurs courantes commises par les ingénieurs.

Tableau 1 : Nouvelle classification géologique des formations géologiques libanaises

FORMATION	Mode de soutènement suggéré	Principaux facteurs à étudier
JURASSIQUE	Souvent sans soutènement ou soutènement ponctuel, (boulonnage par exemple). La présence de l'eau est peu nuisible.	Orientation et conditions des joints. Prolongement des fractures verticales. Stabilité des dièdres rocheux. Maîtrise des mécanismes de rupture particuliers.
Base du CRETACE	Stabilité globale souvent vérifiée. Stabilité locale assurée par un Soutènement ponctuel. Rabattement de la nappe par pompage simple.	Limite des stratifications. Traitement de la partie superficielle éventuellement décomposée ou friables.
CRETACE (moyen, supérieur) EOCENE	Soutènement léger dans certaines périodes saisonnières. Protection contre l'eau (Béton projeté ou autre).	Problème d'interfaces. Discontinuités.
NEOGENE et QUATERNAIRE alluvionnaire	Soutènement léger, lourd uniquement pour les excavations très profondes (>10 m de profondeur). Soutènement par éléments horizontaux avec des tirants d'ancrage ou des clous passifs.	Caractérisation des massifs par essais in situ. Non représentativité des échantillons. Evaluation des paramètres mécaniques par calcul inverse.
QUATERNAIRE	Soutènement lourd. Soutènement par éléments verticaux (paroi moulée ou pieux sécants ou tangents). Parois étanches en cas de présence d'eau.	Vérification de la stabilité globale et locale. Bonne identification des paramètres de résistance. Paramètres de déformations nécessaires.

3. Ecrans de soutènement surdimensionnés

Plusieurs écrans de soutènement ont été suivis dans différentes formations. Les résultats de mesure in situ ainsi que leurs analyses ont été publiés (Saydi 2013) (Kazan 2014). La figure 2 reprend un exemple typique montrant le grand écart (4 fois) entre les valeurs de déplacement attendues et les valeurs mesurées.

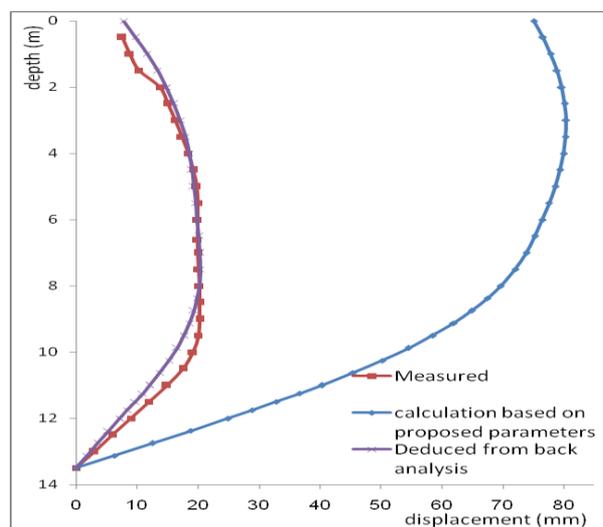


Figure 2 Ecart significatif entre le comportement réel et anticipé

Les analyses inverses de ces cas ont permis de proposer les paramètres mécaniques réels des sols réels. L'accordance entre les résultats de calcul basé sur les nouveaux

paramètres et les valeurs mesurées ont confirmé la validité de ces paramètres. Le tableau 2 suivant montre la comparaison entre ces paramètres mécaniques et le module d'élasticité.

Tableau 2. Comparaison entre les paramètres mécaniques proposés à partir des essais au laboratoire et les valeurs réelles trouvées par analyse inverses dans plusieurs formations.

	paramètres	Couche superficielle	Couche principale
Valeurs classiques déduites de la campagne de reconnaissance	C (KPa)	30	100
	φ degré	26	28
	γ (KN/m ³)	20	21
	E (MPa)	20	40
Valeurs réalistes confirmées par suivi et analyse inverse	C (KPa)	30	500
	φ degré	34	40
	γ (KN/m ³)	20	21
	E (MPa)	50	200

Ce grand écart impose de faire une vraie réflexion sur les raisons qui sont à leur origine et chercher les erreurs commises lors des campagnes géotechniques.

4. Réflexions sur les campagnes de reconnaissance de sols

D'abord notons que l'appellation « reconnaissance de sols » n'est pas toujours adéquate pour les campagnes géotechniques. En générale on connaît la nature du sol par expérience antérieure ou après consultation des cartes géologiques disponibles ou des rapports géotechniques sur des terrains similaires. Dans ce cas il faut appeler notre intervention géotechnique « Campagne de caractérisation de sols ».

La question que doit se poser un vrai expert en géotechnique est: « Pourquoi on n'arrive pas à proposer les valeurs plus représentatives lors de notre campagne de caractérisation de sol ». Les idées du paragraphe suivant devraient aider à trouver la réponse.

4.1. Essai *in situ* SPT dans les formations gréseuses

4.1.1. Procédure classique

L'essai Standard Pénétration Test est largement utilisé pour les formations sablonneuses. Elle permet de déterminer l'état de compaction du sable entre deux limites : très dense et très lâche. L'essai consiste à faire pénétrer (par battage au mouton) le carottier de trois intervalles de quinze cm (somme 45 cm). On néglige le nombre de battement N₁ du premier intervalle (sous prétexte qu'il s'agit d'un sol perturbé) et on fait la somme correspondant aux deux derniers, $N = N_2 + N_3$. Cet essai ne mesure pas les paramètres intrinsèques du sol. L'interprétation de la valeur N, en utilisant des tableaux de corrélation, fait proposer le paramètre mécanique φ , angle de frottement interne. Dans tous les cas on suppose l'absence totale de la cohésion c. Les paramètres mécaniques seront ensuite déterminés à partir des tableaux de corrélations.

4.1.2. Mauvaise interprétation de la cohésion

Le grès est une formation sablonneuse cimentée. L'origine de cette cohésion est la présence du calcaire dans cette formation ou bien les particules fines siliceuses limoneuses et parfois argileuses. Les règles de la sécurité exagérées qui consistent à

supposer que même la présence de la cohésion peut être remise en cause par la présence occasionnelle de l'eau ne sont pas justifiés pour les deux raisons suivantes :

- Nous ne devons pas négliger la cohésion dans les sables cimentés dans le dimensionnement des structures provisoires comme les écrans de soutènement pendant les travaux de terrassement.
- Cette formation est perméable et était durant toute sa vie le siège des écoulements d'eaux. La présence additionnelle saisonnière de l'eau ne va pas affecter cette cohésion. En fait ceci pourrait affecter une formation argileuse quoique raide mais pas une formation sablonneuse dense.

La question qui se pose maintenant est de savoir combien et comment évaluer la valeur de la cohésion. La question se complique encore quand on soumet l'échantillon prélevé du SPT aux essais au laboratoire.

En effet lors des essais d'identification ; analyse granulométrique ou limites d'Atterberg, les particules fines seront fortement cimentés aux grains de sables. Dans ce cas, ils seront considérés comme faisant partie des gros grains (parfois graviers fins) et donne l'impression que l'échantillon, qui est déjà perturbé, n'est pas cohésif. Il s'agit ici d'une erreur courante dans les essais au laboratoire.

4.1.2. Erreur courante concernant la grande valeur de N

Il est très courant d'avoir une valeur très grande lors des essais SPT dans les sables cimentés. En plus beaucoup des essais SPT seront «refusés» pour la raison «rebondissement du mouton » (Refusal Test). Ce résultat reflète théoriquement un état très compact du sol.

Ce résultat doit nous amener normalement à attribuer des valeurs très élevés pour les paramètres mécaniques. Une valeur très grande pour l'angle de frottement interne qui doit atteindre ou même dépasser 40 degré et une valeur significative pour la cohésion. Toutefois les ingénieurs s'abstiennent par phobie de sécurité et sous prétexte qu'ils ont trouvé des valeurs plus modérées lors de cette campagne dans ce même massif.

En effet, dans la conception même de l'essai SPT, on néglige la valeur N1 du premier intervalle de 15 cm parce que nous supposons que le sol correspondant est très remanié. Dans le cas des sables cimentés par les particules fines, il est très logique que cette altération s'étend également au deuxième intervalle. Ceci pourrait se faire naturellement dans les zones relativement profondes (plus que 8 m de profondeur) à cause des particules fines ou bien les sables fins se trouvant dans l'eau de circulation utilisé pendant les travaux de forages. La décantation rapide de ces particules fait augmenter l'épaisseur de sables altérés. Dans ce cas les valeurs modérées provenant de N2, comme N1, sont également non crédibles.

Il faut alors attribuer des grandes valeurs mécaniques qui reflètent les vrais caractéristiques du massif et rejoignent les valeurs trouvés par analyse inverses des écrans de soutènement. La bonne question qui se repose maintenant : comment faire pour trouver pour ce géo-matériau la bonne valeur de c. La réponse à cette question sort du cadre de ce papier.

4.2. Prélèvement des échantillons dans les formations marneuses

Les formations marneuses sont des formations marno-calcaires compactes qui peuvent être souvent décrites en termes de mécanique de sols comme "rocher de calcaire dans une matrice argileuse très raide".

Lors des travaux de sondages, nous faisons face à un problème sérieux de récupération d'échantillon. On ne peut pas utiliser le Shelby tube parce que la matrice marneuse est très raide et les essais SPT sont complètement refusés. De même, dans l'opération de carottage, le taux de récupération ne dépasse pas parfois de 20 % même si

nous utilisons des carottiers doubles ou triples. En effet, vu l'hétérogénéité dans la dureté de ces formations, l'eau de circulation utilisée pour la sondeuse "fait fendre" les échantillons, ce qu'on appelle phénomène d'abrasion rapide.

L'ingénieur géotechnicien se retrouve, dans les meilleurs cas, devant une caisse d'échantillons presque vide contenant des courts petits tronçons de pierres laissant l'impression que le milieu s'agit d'un massif rocheux de très mauvaise qualité. Pour compléter sa mission, il trouve à peine un échantillon marneux particulièrement tendre, qui a pu échapper au phénomène d'abrasion rapide pour la soumettre à un essai au laboratoire pour déduire une valeur très basse du module d'élasticité.

Dans ce mauvais protocole d'échantillonnage et d'analyse, les géotechniciens seront amenés à sous-estimer les valeurs des caractéristiques mécaniques. Seuls les analyses inverses antérieures peuvent nous guider pour cibler une campagne de caractérisation de sols.

5. Conclusion

Nous avons rappelé dans ce papier, pour plusieurs formations géologiques, l'écart significatif entre les valeurs des paramètres mécaniques proposés par lors des campagnes géotechniques de reconnaissance de sols et les paramètres réels déduites par calcul par analyse inverse.

Après revue des caractéristiques générales de deux formations en particulier. Nous avons analysé les procédures générales suivies par les ingénieurs géotechniciens. Les erreurs courantes lors de l'interprétation des résultats ont été soulignées, en particulier pour les sables cimentés et les formations marneuses.

6. Références bibliographiques

- Kazan Y. 2014, Modelling and Redesign of Retaining system of a deep excavation in marl formation using back analysis results. Proceeding of the ISRM European Rock Mechanics Symposium, Vigo, May 2014.
- Chour A. 2014 Monitoring and back analysis of retaining system deformation in sandy soils and sandstone. Interior report of Lebanese University, July 2014.
- Fawaz A. et al. (2014) Etude et relation entre les modules pressiométrique et élastique du sol. Actes des JNGG 2014, Beauvais ; France.
- Fawaz A. et al. 2005 Analyse inverse et modélisation d'essais pressiométriques réalisées sur un sol de Beyrouth. Revue Française de géotechnique n° 112 : p43-48.
- Dubertret L., (1951) Carte géologique au 50.000^e du Liban. Diffusé par le ministère des ressources hydrauliques.
- Khawlie M., Ghannam J. (1987) Land suitability and geotechnical studies for the development of greater Beirut Area. Geological society of Hong Kong Bulletin, n° 3, october 1987.
- Kazan Y., (2002) Géologie du Liban vu par un géotechnicien. Impact sur les modes de soutènement à Beyrouth. *Revue française de géotechnique*, 100, 3^{ème} trimestre 2002.
- Kazan Y., (2005) Rôle du pressiomètre dans l'avenir de la géotechnique au Liban en fonction des formations géologiques. *ISP5 – PRESSIO 2005, volume 2*.
- Saydi Ch. and al. 2013 Monitoring, Back analysis and Redesign of a Deep excavation Retaining system in marl formation.. MATEC Web of Conferences journal, proceeding of CMMS 2013, Rabat