

PAROI DE SOUTÈNEMENT EN PIEUX SECANTS – CALCULS ET MESURES

SECANT PILES RETAINING WALL – CALCULATION AND MEASUREMENTS

Horațiu POPA¹, Loretta BATALI¹

1 Département de Géotechnique et Fondations, Université Technique des Constructions de Bucarest, Roumanie

RÉSUMÉ – Les excavations profondes en milieu urbain peuvent mettre en péril l'intégrité des constructions avoisinantes et la réalisation des parois de soutènement constitue une solution classique. L'article présente le cas d'une telle paroi située au centre de la ville de Bucarest. Un suivi très attentif des travaux s'était imposé étant donné l'état des constructions avoisinantes. Les mesures ont indiqué l'efficacité de la paroi, mais également des différences entre les valeurs mesurées et celles calculées dues principalement aux difficultés de modélisation.

ABSTRACT – Deep excavations in urban areas can endanger the integrity of neighbouring buildings and retaining walls are the classical solution to this problem. The paper presents the case of such retaining wall located in the centre of Bucharest. A monitoring of the wall was imposed by the poor condition of the neighbouring buildings. The measures indicate a good efficiency of the retaining wall, but also differences between measured and calculated values, mainly due to some modelling difficulties.

1. Introduction

La réalisation des nouvelles constructions en milieu urbain suppose souvent l'exécution d'excavations profondes à proximité des bâtiments existants. Pour assurer l'intégrité de ceux-ci et la stabilité de leur terrain de fondation il est nécessaire de réaliser une paroi de soutènement.

Quand l'excavation profonde et les parois de soutènement doivent être exécutées à la limite des constructions avoisinantes la solution en pieux forés avec fourreau récupérable est préférée, afin que le terrain de fondation soit perturbé au minimum.

Pour une excavation profonde qui descend au dessous du niveau de la nappe, l'étanchéité de la paroi de soutènement est obtenue par l'exécution de pieux sécants.

L'article présente le cas d'une telle paroi de soutènement exécutée dans un site situé au centre de la ville de Bucarest. L'excavation profonde d'environ 6 m est entourée sur trois cotés par des constructions existantes situées à la limite de celle-ci et sur le quatrième côté se trouve une rue passagère. Certaines constructions avoisinantes se trouvant dans un état de dégradation assez avancé (bâtiments anciens, avec des fondations en maçonnerie), un suivi très attentif de ces constructions et du comportement de la paroi de soutènement s'était imposé.

Ainsi, les déplacements horizontaux de la paroi ont été contrôlés par des mesures inclinométriques et sur les bâtiments avoisinants ont été montés des repères pour la vérification des déplacements et de l'état de fissures déjà existantes.

2. Présentation de l'ouvrage et de l'emplacement

L'ouvrage de soutènement est situé dans le centre ville de Bucarest dans une zone très urbanisée. L'excavation profonde d'environ 6.0 m est nécessaire pour la construction du sous-sol d'un nouveau bâtiment. Pour gagner des places en sous-sol, celui-ci est réalisé sur toute la surface de l'emplacement disponible. Dû à cette spécificité, l'excavation se trouve quasiment tangente aux constructions avoisinantes sur trois cotés et à proximité de la rue sur le quatrième.

Le régime d'hauteur des constructions avoisinantes est différent, R+1, R+2 et R+5 avec sous-sol respectivement. Dans la figure 1 sont présentées les photos de 2 des bâtiments avoisinants.



Figure 1. Photos des bâtiments avoisinants

Les constructions R+1 et R+2 sont très anciennes, avec des fondations en maçonnerie, se trouvant dans un état de dégradation assez avancé. Ainsi, ces bâtiments présentaient beaucoup de fissures dans les parois dues à des tassements différentiels au long des constructions.

Dans de telles conditions il a été nécessaire d'adopter une solution de soutènement qui influence le moins possible le terrain de fondations des structures avoisinantes.

Finalement une paroi de soutènement réalisée en pieux forés a été choisie. Pour des raisons de résistance, le diamètre des pieux est de 60 cm. Etant donné que l'excavation descend au-dessous de la nappe d'environ 2-3 m, les pieux sont sécants en alternant des pieux en béton armé (de résistance) avec ceux en béton simple (d'étanchéité). A partir des conditions de stabilité et d'étanchéité à la base, la longueur des pieux est établie à 11.50 m.

A la demande du Client, afin d'accélérer les travaux d'exécution de la paroi de soutènement, une solution mixte a été finalement acceptée: parois en pieux sécants seulement sur les cotés en contact direct avec les constructions existantes et parois moulées pour le reste (du côté rue et dans les zones sans constructions à proximité).

Pour éviter des déplacements horizontaux de la paroi de soutènement qui auraient pu mettre en péril l'intégrité des constructions anciennes avoisinantes, la paroi est simplement butonnée au niveau de la poutre de solidarisation (cote -0.50 m).

3. Données géotechniques

Les paramètres géotechniques du terrain sont spécifiques pour la ville de Bucarest, caractérisée par la présence des couches alluvionnaires. Les essais à la boîte de cisaillement et essais triaxiaux à chemins de contraintes imposés ont permis la détermination des paramètres de la résistance au cisaillement (ϕ' , c'), du module d'élasticité (E) et du coefficient de pression des terres au repos (K_0) pour les couches argileuses ; pour les sables ces paramètres ont été établis sur la base d'essais de pénétration standard (SPT).

L'alternance des couches (pratiquement uniforme dans les 3 forages exécutés sur le site) et les valeurs de calcul des paramètres géotechniques sont les suivants (la cote 0.00 m représente le niveau du terrain naturel) :

Tableau 1. Valeurs de calcul pour les paramètres géotechniques

Couche	niveau (m)	γ (kN/m ³)	E (MPa)	K_0	ϕ' (°)	c' (kPa)
Remblai	0.0÷2.3	16	-	-	-	-
Limon	2.3÷4.2	20	25	0.68	20	40
Sable fin	4.2÷6.0	20.5	40	0.6	25	0
Sable grossier avec gravier	6.0÷10.6	20.5	50	0.5	32	0
Argile	10.6÷12.6	20	50	0.7	17	25

Le niveau de la nappe phréatique se trouve à -4.00 m et, conformément aux observations faites dans la zone, il peut varier de ± 1.00 m.

4. La paroi de soutènement et le suivi entrepris

La solution mixte pieux forés (dans les zones limitrophes aux constructions avoisinantes) et paroi moulée a été réalisé sur place.

Dans la figure 2 sont présentées des photos de la paroi pendant les travaux d'excavation et d'exécution du sous-sol du bâtiment.

Le rabattement de la nappe a été réalisé par l'intermédiaire de 4 puits. Etant donnée la pénétration de la paroi dans la couche d'argile peu perméable se trouvant en base, la nappe a été rabattue seulement à l'intérieur de l'enceinte. Ainsi, le terrain de fondation des constructions avoisinantes n'a pas été influencé par ce rabattement.

L'état de dégradation de certaines constructions existantes sur place a imposé un suivi très attentif pendant les travaux d'exécution des parois de soutènement, d'excavation et de l'infrastructure du nouveau bâtiment.

Ainsi, toutes les fissures existantes dans les parois des bâtiments avoisinants ont été instrumentées avec des repères en verre. Egalement, des repères de tassement ont été montés sur les parois de ces constructions.

La paroi de soutènement a été prévue avec 4 tubes inclinométriques (sur chaque coté de l'enceinte) pour la mesure des déplacements horizontaux. Des repères de tassement ont été fixés tout au long de la poutre de solidarisation de la paroi.

Le niveau de la nappe a été suivi par l'intermédiaire d'un piézomètre pendant tous les travaux de l'infrastructure.



Figure 2. Photos de la paroi de soutènement

5. Calcul de la paroi de soutènement

Les calculs de la paroi ont été réalisés par la méthode des éléments finis (critère de Mohr – Coulomb pour le terrain et élasticité linéaire pour la paroi). Les étapes de calcul suivent les phases technologiques d'exécution de l'excavation et de l'infrastructure du bâtiment.

Ainsi, les étapes de calculs sont :

- *étape 1* : exécution de la paroi et le montage des butons au niveau de la poutre de solidarisation ;
- *étape 2* : excavation sur toute la profondeur (environ 6.0 m) ;
- *étape 3* : exécution du radier du bâtiment ;
- *étape 4* : exécution du sous-sol 2 et du plancher sur celui-ci ; démontage des butons.

Les évolutions des moments fléchissants et des efforts tranchants dans les pieux de la paroi en fonction des étapes d'exécution sont présentées dans la figure 3.

Les graphiques montrent que l'étape 2 est la plus difficile du point de vue des sollicitations dans la paroi de soutènement. Dans cette phase, les valeurs du moment sont maximales, environ 300 kNm / pieu.

Le diagramme d'effort tranchant montre également les valeurs de réactions qui se développent au droit des points d'appui de la paroi (butons – étape 2 ; respectivement radier et plancher – étapes 3 et 4). Ainsi, la réaction maximum dans les butons est d'environ 185 kN/m tandis que dans les pieux se développe un effort tranchant maximum de 210 kN. Les étapes 3 et 4 représentent des reprises de modélisation des travaux d'excavation, en considérant des appuis au niveau du radier, respectivement du plancher.

En ce qui concerne les déplacements horizontaux de la paroi, l'évolution de ceux-ci est présentée dans la figure 4. La valeur maximum du déplacement estimée par calcul est d'environ 11 mm. Au niveau du butonage le déplacement obtenu est de

3 mm. Ce déplacement est directement lié à la rigidité considérée pour le buton (tube métallique avec un diamètre de 600 mm et une épaisseur de la paroi de 8 mm).

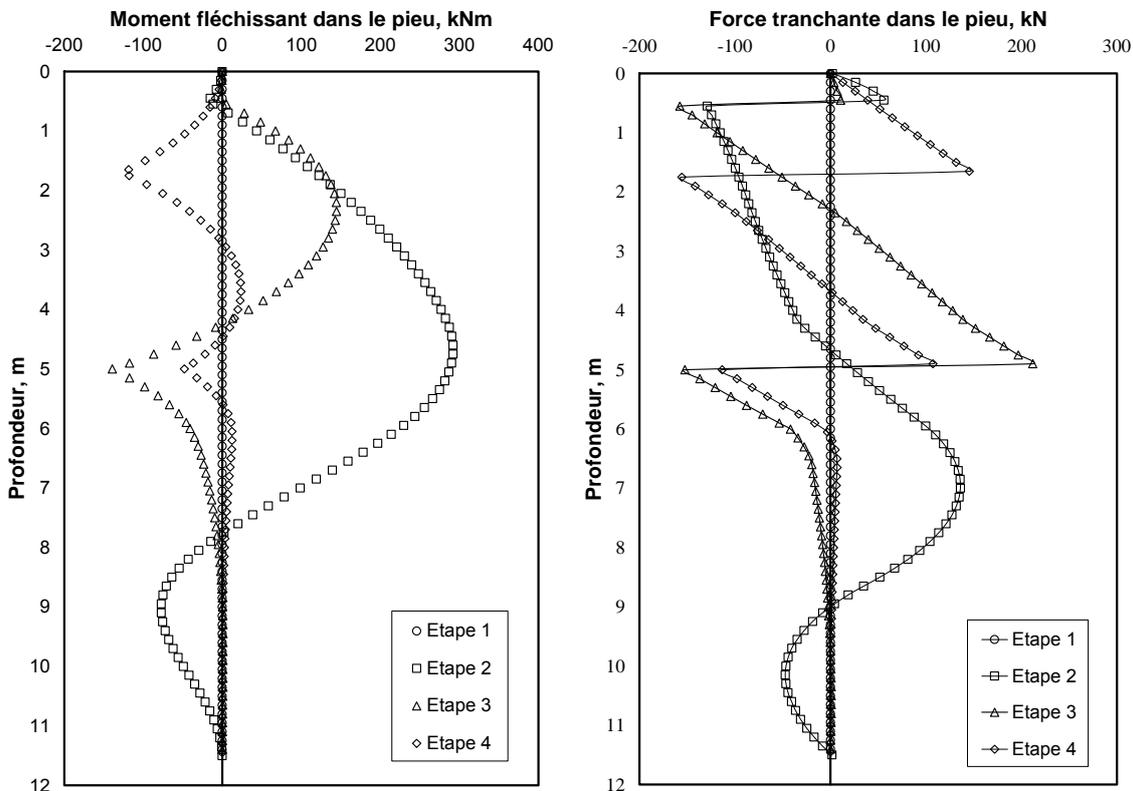


Figure 3. Les moments fléchissants et les efforts tranchants dans les pieux en fonction des étapes de calcul

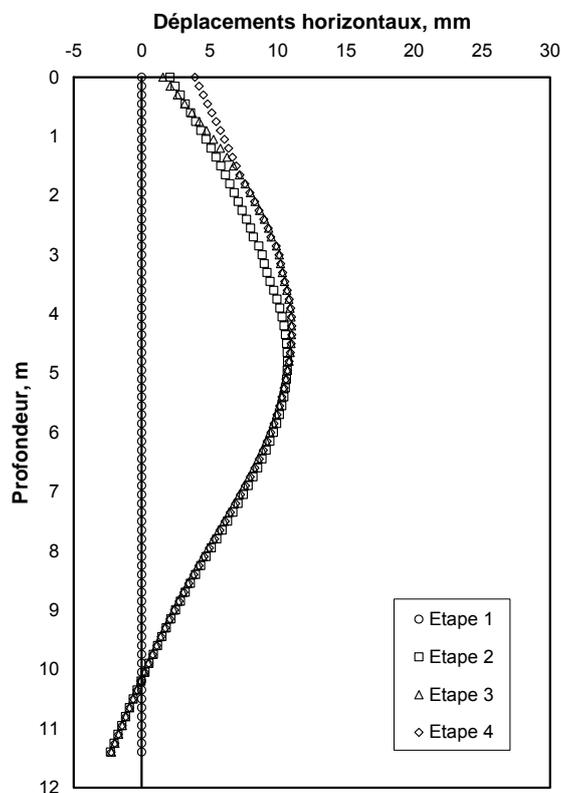


Figure 4. Les déplacements horizontaux de la paroi en fonction des étapes de calcul

Les résultats du calcul présentés dans les figures 3 et 4 sont ceux obtenus pour la paroi du coté bâtiment R+2.

6. Mesures et comparaisons

Conformément aux normes en vigueur, le suivi du comportement de la paroi de soutènement et de l'état des constructions avoisinantes est obligatoire pendant tous les travaux, pour toutes les excavations profondes réalisées en milieu urbain.

En plus, dans ce cas, l'état de dégradation de certains bâtiments existants ont imposé des mesures et observations strictes.

Au moment de la rédaction de ce papier les travaux de l'infrastructure (sous-sol) du nouveau bâtiment sont finalisés et ceux pour la structure ont commencé (2 Sous-sols + 9 étages).

Les tassements des constructions avoisinantes jusqu'à ce moment sont inférieurs à 5 mm, ce qui ne pose aucun problème du point de vue de l'intégrité de leurs structures. Les mesures ont été effectuées par des méthodes topographiques en utilisant des appareils avec une erreur de maximum 1 mm.

Les repères en verre fixés pour évaluer les évolutions de fissures existantes dans les parois des constructions anciennes sont intacts, ce qui montre que ces fissures sont restées dans le même état que celui initial.

En ce qui concerne les déplacements horizontaux de la paroi, dans la figure 5 sont indiquées les mesures réalisées dans le tube inclinométrique qui est situé dans la paroi du coté bâtiment R+2.

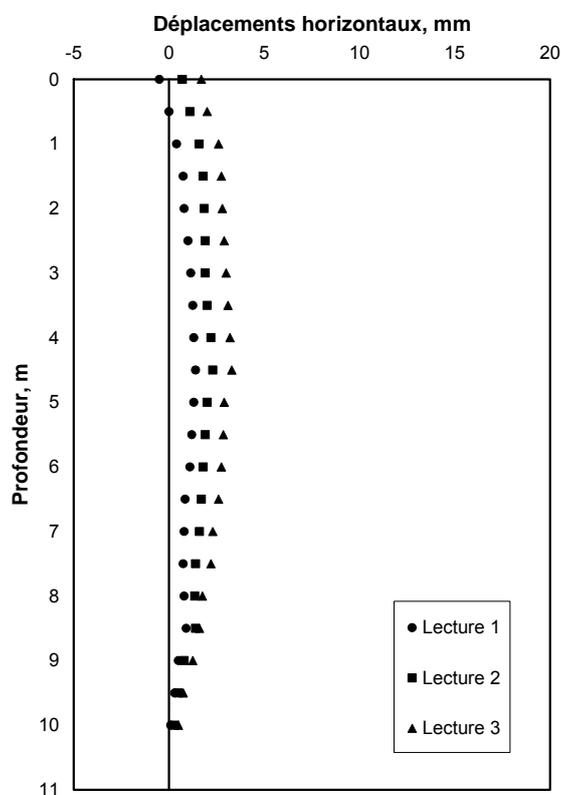


Figure 5. Déplacements horizontaux de la paroi de soutènement – mesures inclinométriques

Les trois lectures présentées sur le graphique représentent les mesures effectuées pendant les travaux d'excavation, jusqu'à la cote finale. Ainsi, la lecture no. 1 est réalisée au début des travaux d'excavation, la lecture no. 2 nous donne la mesure intermédiaire, alors que la troisième lecture représente les valeurs du déplacement à la fin des travaux des excavations.

On peut remarquer, en faisant la comparaison avec les déplacements estimés par calcul, que les mesures indiquent des valeurs beaucoup plus faibles, la valeur maximum du déplacement horizontal étant égal à environ 35% de la valeur estimée.

Cette différence peut être expliquée par plusieurs raisons :

- Les erreurs possibles en ce qui concerne la stratification et les paramètres du terrain. Les prospections géotechniques ont été réalisées seulement à l'intérieur du contour de la paroi de soutènement étant donné que à l'extérieur existent des propriétés privées construites. En plus, sur le site se trouvaient les restes d'un bâtiment démolé ce qui a certainement influencé les investigations du terrain sur les premiers mètres.
- La difficulté de modéliser les constructions avoisinantes et leur influence. Les plans d'architecture de ces bâtiments n'ont pas été connus, donc les charges introduites et la modalité d'application (le type de fondation) ont été estimées.
- Les erreurs de mesure données d'une part par la précision de l'appareil et d'autre part par les difficultés liées à l'instrumentation et à l'accès sur le chantier pour effectuer ces mesures.

7. Conclusions

Le papier présente le cas d'une paroi de soutènement réalisée pour une excavation profonde d'environ 6 m. La présence de divers bâtiments à proximité de cette excavation a imposé des mesures strictes de suivi pendant les travaux.

Pour affecter le moins possible le terrain de fondation, la solution paroi en pieux forés sous protection d'un tube métallique récupérable a été choisie pour toutes les zones limitrophes aux constructions avoisinantes. Pour le reste de la paroi, la solution paroi moulée a été acceptée.

En vue de limiter les déplacements horizontaux de la paroi, celle-ci a été simplement butonnée au niveau de la poutre de solidarisation.

Les mesures de déplacements (tassements des constructions avoisinantes, déplacements de la paroi de soutènement) et le suivi de l'intégrité des bâtiments (évolution des fissures existantes dans les parois) ont montré l'efficacité de l'ouvrage de soutènement.

Par contre, les déplacements mesurés sont beaucoup plus faibles que les valeurs estimées par calcul. Cela est dû aux difficultés de modélisation des interactions complexes « structures existantes – terrain – ouvrage de soutènement » qui se développent. Les simplifications adoptées dans les calculs conduisent aux erreurs sur les résultats. Il faut aussi mentionner les limitations du critère de Mohr Coulomb.

Également, d'une autre part, il ne faut pas oublier les erreurs de mesure sur des ouvrages réels.

8. Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude aux collègues de l'UTCB qui ont mis à leur disposition les mesures effectuées sur le chantier.

0. Références bibliographiques

- Marcu, A., Popa, H., Marcu, D., Coman, M., Vasilescu, A., Manole, D. (2007), Impact deep excavations on neighboring buildings, National Conference AICPS, 1 June 2007 (in Romanian).
- Marcu A. & Popa H. (2004), Calculations and measurements of deformations and displacements of a retaining wall for a deep excavation and of the neighboring structures. 10th National Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 16-18 September 2004, Bucharest, Romania, pp. 311-322 (in Romanian).
- Popa H. (2002) Contributions to the study of the soil - structure interaction in case of underground structures, PhD thesis, Technical University of Civil Engineering Bucharest, 311 p.
- Popa H., Thorel L., Batali L. (2007) Retaining walls in urban areas. Numerical modelling, characteristic interaction parameters. Proc. of 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 24-27 September, Madrid, Spain, p. 629-634.