

Instrumentation de la paroi moulée du bassin de Blanc-Mesnil : retro-analyse et calage des modèles de calcul

Instrumentation of the diaphragm wall of the Blanc-Mesnil Basin : retro-analysis and calibration of calculation models

Gutjahr I., Doucerain M., Schmitt P.
SOLETANCHE-BACHY, Paris, France

Heumez S., Maurel C.
CETE-IF, Le Bourget, France

RÉSUMÉ : Le chantier du bassin du Vieux Blanc-Mesnil a fait l'objet d'une instrumentation afin de confronter le comportement réel de l'ouvrage aux calculs aux coefficients de réaction menés lors des études d'exécution, puis en complément aux calculs aux éléments finis. Une particularité de ce projet réside dans le fait que le soutènement est surmonté d'un talus de grande hauteur, le suivi du comportement du soutènement permet donc également de comparer les différentes modélisations d'un talus à la réalité. Suite aux différences constatées entre les courbes de déformée réelle et calculée lors des études d'exécution, il a été procédé à un affinage du modèle géotechnique consistant à ne tenir compte que des sondages les plus proches des sections instrumentées. Il a ainsi été possible de valider les résultats obtenus par les différentes méthodes (coefficient de réaction et éléments finis), moyennant la prise en compte d'une modélisation réaliste du talus et l'utilisation de paramètres de sols équivalents et représentatifs.

ABSTRACT: The diaphragm wall of the Blanc-Mesnil Basin was subject to instrumentation in order to compare the structure's actual behaviour to calculations based on the coefficient of subgrade reaction, as used in the execution studies, as well as to calculations based on the finite element model. A peculiarity of this project lies in the fact that the retaining wall is surmounted by a high slope, thus the monitoring also permits to compare different slope calculation models to reality. Following the differences observed between the measured and calculated displacement curves, the geotechnical model was refined considering the boreholes closest to the surveyed sections. Thus it has been possible to validate the results obtained by different calculation models (finite element and coefficient of subgrade reaction).

Mots-Clés : suivi inclinométrique, modélisation d'un talus, calcul aux coefficients de réaction, calcul aux éléments finis

Keywords: inclinometer survey, slope calculation model, coefficient of subgrade reaction calculation, finite elements calculation

1 INTRODUCTION

Le soutènement périphérique du bassin de retenue du Vieux Blanc-Mesnil est constitué d'une paroi moulée d'épaisseur 0.80m ancrée par un niveau de tirants précontraints à caractère permanent.

Deux sections distinctes ont fait l'objet d'une instrumentation et d'un suivi complets dans le cadre de l'action de recherche FONDAMS pilotée par l'IFSTTAR afin de permettre une analyse du comportement réel de l'ouvrage puis ensuite le comparer non seulement aux calculs aux coefficients de réaction utilisés pour le dimensionnement, mais encore aux calculs aux éléments finis réalisés *a posteriori*.

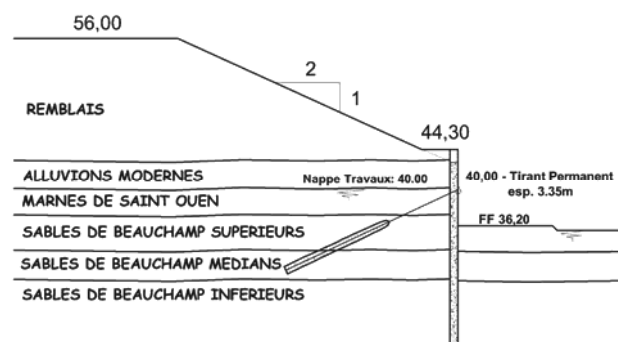


Figure 1. Profil de mesure « Coupe 1 B ».

Un intérêt particulier du projet est la présence d'un talus surmontant la paroi moulée sur une forte hauteur, variable de 7

à 12 m au droit des deux profils de mesure. La comparaison entre le comportement réel de l'ouvrage et les calculs permettra ainsi de confronter les différentes modélisations d'un talus utilisées dans la pratique courante à la réalité des mesures.

On a utilisé le logiciel PARIS (logiciel de calcul interne Solétanche-Bachy) pour les calculs aux coefficients de réaction et le logiciel PLAXIS 2D pour les calculs aux éléments finis.

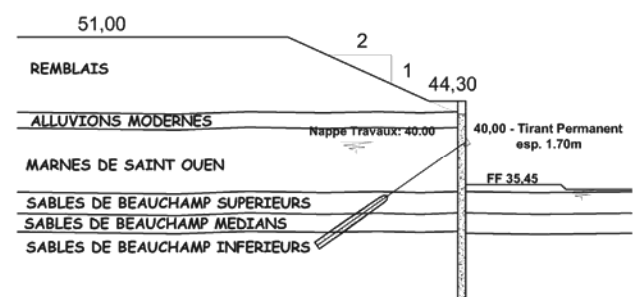


Figure 2. Profil de mesure « Coupe 2 B ».

2 PRÉSENTATION DES MESURES

L'instrumentation de la paroi a consisté en la mise en place de deux inclinomètres scellés dans des tubes de réservation liés aux cages d'armatures de deux panneaux distincts. Plusieurs relevés inclinométriques ont donc été possibles au cours de la réalisation du bassin (un point zéro avant le début des excavations, une mesure lors de la phase en console avant la

mise en tension des tirants, et une mesure en phase fond de fouille). La précision des mesures inclinométriques est de l'ordre de 0,1 mm/m.

Afin de suivre l'évolution des efforts dans les tirants, des cales dynamométriques ont également été installées.

3 MODÉLISATION D'UN TALUS POUR LES CALCULS AUX COEFFICIENTS DE REACTION

Avant de procéder aux calculs de recalage, nous avons d'abord tenté d'établir quelle modélisation du talus est la mieux adaptée à la géométrie et au phasage du projet.

Pour cela nous avons mené une étude comparative portant sur la géométrie de la Coupe 1 B.

3.1 Modélisations étudiées

Nous avons comparé la modélisation du talus fini par différentes méthodes :

- approches en plasticité avec hypothèse sur le schéma de rupture : méthodes de Graux (Graux, 1967) ou Houy par bandes horizontales
- approches en élasticité : méthode de Boussinesq par bandes horizontales ou verticales
- approche en plasticité avec recherche du schéma de rupture critique : module de calcul « talus-risberme » de PARIS par recherche automatique de lignes de rupture critiques (voir figure 3) (Schmitt et al, 2002)

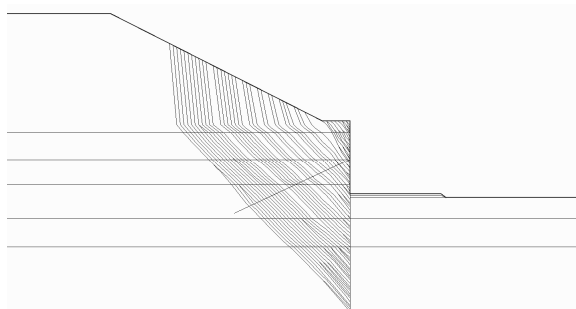


Figure 3. Lignes de rupture – modèle « Talus-Risberme ».

Nous avons complété ces approches par le calcul des talus infinis par les coefficients de Caquot-Kérisel (1990), constituant dans le cadre de notre projet une méthode de référence car :

- l'angle du talus (27°) est inférieur à l'angle de frottement interne des remblais (30°).
- le talus peut être considéré infini par rapport à la hauteur excavée.

Afin de prendre en compte le retrait du talus par rapport à la paroi, nous avons réalisé 2 calculs de talus infini avec 2 cotes de pied de talus correspondant pour l'un à l'impact du prolongement du talus réel avec la paroi (42.90 NGF) et pour l'autre au sommet de la paroi (44.30 NGF) duquel on fait partir un talus fictif parallèle au talus réel, constituant ainsi les 2 bornes de référence pour la comparaison des différentes modélisations.

3.2 Analyse des résultats et conclusion

Les calculs ont été menés avec le logiciel PARIS. Nous avons analysé l'influence des différentes modélisations sur les poussées actives et réelles ainsi que sur les déformées du soutènement par rapport aux bornes de référence données par les calculs des talus infinis.

Les conclusions sont les mêmes pour l'ensemble des paramètres comparés.

On constate notamment que les approches en élasticité donnent des poussées et déformées largement supérieures aux

autres modèles et aux bornes de référence, comme il fallait s'y attendre.

Les approches en plasticité avec hypothèse sur le schéma de rupture donnent des poussées et déformées supérieures aux bornes de référence et au modèle « talus risberme ».

Enfin la modélisation « talus risberme » donne les résultats les plus proches des bornes de référence. De plus, on constate que cette modélisation donne des courbes de poussée lissées, ne présentant pas les sauts observés dans les calculs « talus infini », ce qui devrait se rapprocher le plus des poussées réelles dans le terrain.

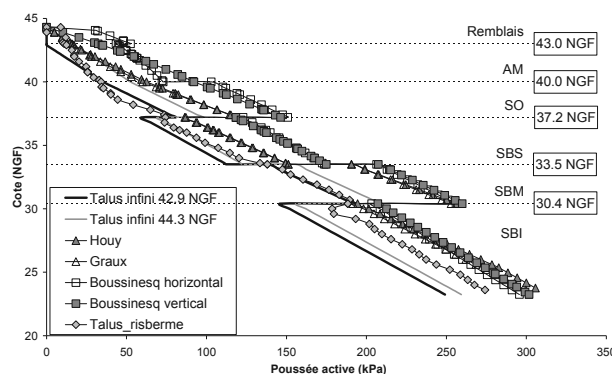


Figure 4. Comparaison des poussées actives selon modèle.

Notons que la modélisation « talus risberme » permet de modéliser l'aménagement d'une plateforme de circulation à l'arrière du soutènement, subtilité ne pouvant pas être prise en compte par les modèles « talus infini » ce qui explique que la poussée calculée par PARIS soit localement inférieure à la borne minimale : ceci traduit simplement le fait que la ligne d'influence du talus intercepte l'écran à une cote inférieure à 42.90, comme on le voit sur la figure 3.

Nous avons donc retenu la modélisation « talus risberme » pour les calculs aux coefficients de réaction.

4 COMPARAISON DES COURBES INCLINOMÉTRIQUES AVEC COURBES DE CALCUL CORRESPONDANT AUX CALCULS D'EXÉCUTION

Après avoir adapté les stratigraphies en fonction des sondages situés à proximité des inclinomètres, nous avons estimé les courbes de déformées théoriques à l'aide de calculs aux coefficients de réaction, en considérant les caractéristiques géotechniques des terrains tels que considérés lors des études d'exécution.

Tableau 1. Caractéristiques des terrains « Etudes d'exécution »

Terrain	EM / pl (MPa)	γ / γ' (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	k (MN/m ³)
Remblais	8.3 / 1.1	20 / 10	30	0	8.1
Alluvions Modernes	6.2 / 0.7	20 / 10	30	0	8.1
Marnes de St. Ouen	8.3 / 1.1	20 / 10	30	0	11.2
Beauchamp Supérieurs	23 / 2.3	22 / 12	35	0	36.5
Beauchamp médians	16 / 2.2	22 / 12	30	5	22.5
Beauchamp Inférieurs	37 / 3.8	22 / 12	35	10	67.5

EM / pl : module pressiométrique / pression limite

γ / γ' : poids volumique / poids volumique déjaugé

ϕ : angle de frottement interne

c : cohésion

k : coefficient de réaction estimé selon la formule de Schmitt(1998)

4.1 Coupe 1 B

On constate que les courbes obtenues pour la phase console divergent tandis qu'elles sont proches pour la phase fond de fouille. Nous en déduisons que pour la phase console les caractéristiques et modèles de calcul initialement retenus sont globalement réalistes, mais les propriétés mécaniques des terrains supérieurs semblent sous-évaluées.

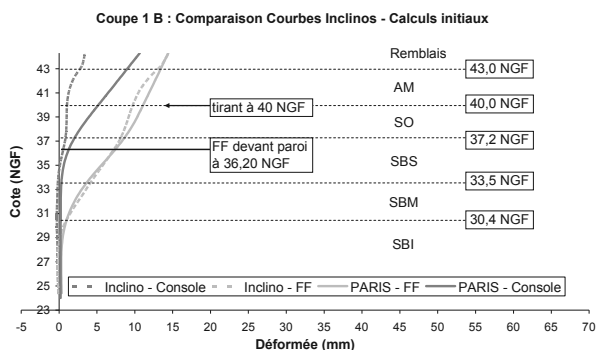


Figure 5. Coupe 1 B : Comparaison des Courbes de Déformées.

4.2 Coupe 2 B

Nous observons que les déplacements calculés sont supérieurs aux déplacements mesurés. Bien que l'influence du talus soit moindre en raison de sa plus faible hauteur, l'écart entre les déplacements calculés et mesurés est systématiquement plus important que dans la coupe 1B, ce qui tend à montrer que les caractéristiques réelles des terrains sont globalement meilleures.

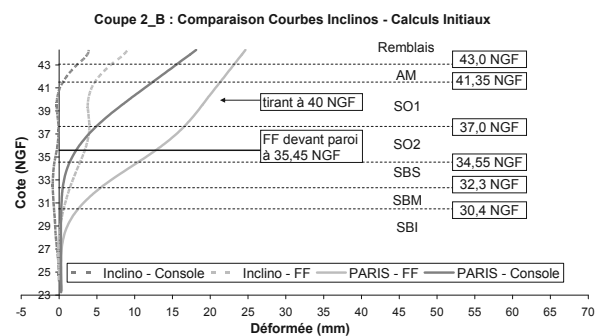


Figure 6. Coupe 2 B : Comparaison des Courbes de Déformées.

L'amplitude des déformations mesurée est parfois très faible, ce qui rend illusoire toute interprétation précise de l'allure des déformées. Par ailleurs des paramètres ne pouvant pas être pris en compte dans les calculs peuvent avoir une influence : la qualité du scellement des tubes inclinométriques, la poutre de couronnement (poids important et discontinuité du bétonnage), la température...

Afin de permettre une bonne interprétation des courbes de déformées obtenues par les mesures inclinométriques, il est toujours utile de disposer de plusieurs relevés concomitants (cibles topographiques, cales des tirants, niveaux piézométriques).

5 CALCULS DE RECALAGE

Suite aux divergences entre les courbes de déformées réelles et théoriques, nous avons recalé le modèle géotechnique en ne tenant compte que des sondages proches des sections étudiées.

En l'absence de mesures du niveau de la nappe phréatique nous avons gardé le niveau de calcul.

5.1 Calculs aux coefficients de réaction

Nous avons introduit deux couches de St.Ouen suite à l'analyse du sondage PR107 situé au droit du profil 2B et qui montre des caractéristiques pressiométriques nettement meilleures dans la partie basse de cette couche. Etant donné que l'épaisseur de la couche de St.Ouen est plus importante au droit du profil 2B (7m) qu'au droit du profil 1B (3m), nous avons considéré cette deuxième partie du St.Ouen uniquement pour les calculs de recalage du profil 2B.

Nous avons également introduit une cohésion à court-terme dans les Alluvions Modernes ainsi que dans les deux couches du St.Ouen, justifiée par la faible durée entre la mesure 0 des inclinomètres et la mesure de la phase console (1 mois).

De plus nous avons revu les valeurs des coefficients de réaction des terrains suite à l'analyse du sondage PR107 montrant des valeurs pressiométriques plus élevées que celles considérées lors des études d'exécution.

Tableau 2. Caractéristiques des terrains obtenus après recalage.

Terrain	E_M / pl (MPa)	γ / γ' (kN/m ³)	ϕ (°)	$c - ct$ (kPa)	$c - lt$ (kPa)	k (MN/m ³)
Remblais	8.3 / 1.1	20 / 10	30	0	0	8.1
Alluvions Modernes	6.2 / 0.7	20 / 10	30	5	0	8.1
Marnes de St. Ouen 1	6.4 / 0.9	20 / 10	30	15	0	20
Marnes de St. Ouen 2	30 / 3.0	20 / 10	30	40	15	75
Beauchamp Supérieurs	40 / 3.2	22 / 12	35	0	0	65
Beauchamp médians	29 / 2.6	22 / 12	30	5	5	35
Beauchamp Inférieurs	55 / 3.5	22 / 12	35	10	10	80

Modifications par rapport aux paramètres initiaux en gras.

Nous obtenons les courbes suivantes :

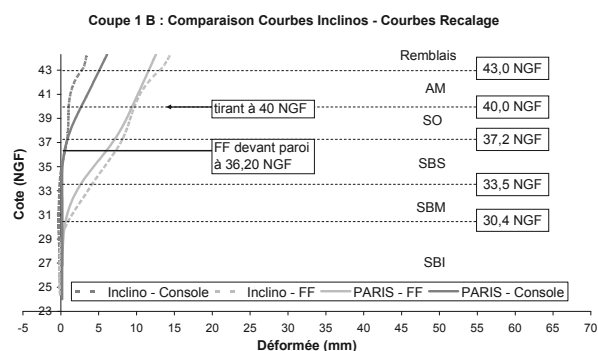


Figure 7. Coupe 1 B : Comparaison des Courbes de Déformées après recalage.

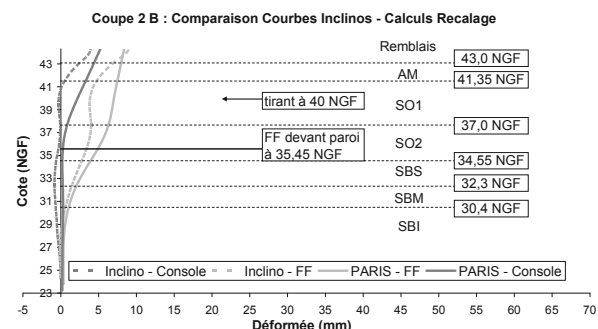


Figure 8. Coupe 2 B : Comparaison des déformées après recalage.

Concernant les efforts dans les tirants, nous observons que les efforts trouvés par le calcul de recalage sont environ 10%

plus importants que les efforts mesurés après le terrassement au fond de fouille.

5.2 Calculs aux éléments finis

Parallèlement aux calculs aux coefficients de réaction, des calculs par la méthode des éléments finis ont été menés à l'aide du logiciel Plaxis2D. Afin de permettre la comparaison entre les deux méthodes de calcul, nous avons repris les mêmes caractéristiques des sols (issues du recalage).

La loi de comportement considérée est élasto-plastique avec critère de plasticité de Mohr-Coulomb. Les modules d'Young ont été fixés grâce à la relation $E_Y=4E_M/\alpha$ (avec E_M module pressiométrique, et α coefficient rhéologique des sols).

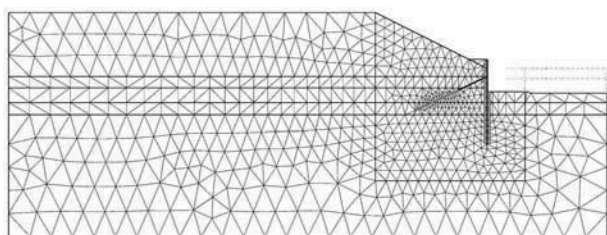


Figure 9. Vue du maillage de la coupe 1B.

La présence de la pente oblige à éloigner assez fortement la limite gauche du modèle pour minimiser l'influence des conditions limites (tout en ne l'éloignant pas trop car cela a une incidence sur la propagation des déformations). La limite droite a été choisie sur l'axe de symétrie du bassin.

Afin de prendre en compte l'inclinaison des contraintes dans la pente, la première phase de calcul a été une phase fictive d'application de la gravité.

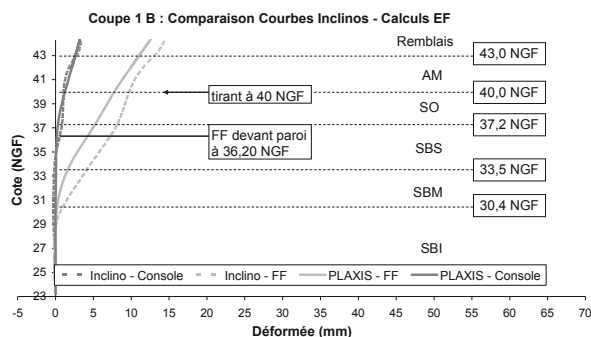


Figure 10. Coupe 1 B : Comparaison des Courbes de Déformées mesurées et calculées par EF.

On constate qu'il existe une bonne concordance entre les déformées mesurées et calculées. Certains phénomènes ne sont cependant pas retrouvés par le calcul, comme la déformation vers 41 m NGF de la coupe 2B (cette déformation est présente dès la phase console, et pourrait être due à la réalisation de la poutre de couronnement).

On notera également qu'il existe un déplacement d'ensemble de la paroi (translation horizontale vers la fouille de 3,2 mm pour 1B et de 1,5 mm pour 2B), non représenté sur les courbes de déformées. Ce déplacement d'ensemble est peu réaliste et est certainement lié à la modélisation numérique, mais en l'absence de suivi topométrique, et avec des mesures inclinométriques ne descendant pas sous la base de la paroi, il n'est pas possible de certifier que ce mouvement d'ensemble n'existe pas.

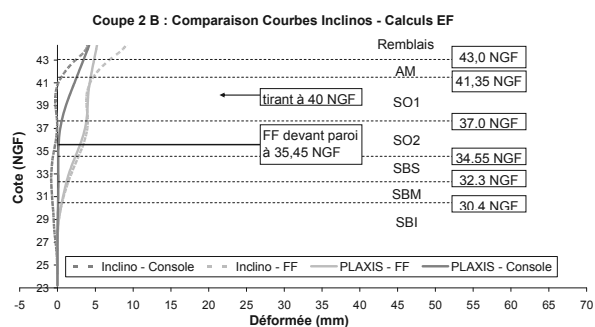


Figure 11. Coupe 2 B : Comparaison des déformées mesurées et calculées par EF.

Quant aux efforts calculés dans les tirants, on constate qu'ils sont sous-estimés de 15% pour la coupe 1B, et surestimés de 20% pour la coupe 2B.

6 CONCLUSIONS

On observe que les résultats des calculs de recalage obtenus avec PARIS et PLAXIS avec les mêmes caractéristiques de terrain, sont très similaires, tant en valeur qu'en allure de déformée et relativement proches des mesures inclinométriques.

L'ensemble des calculs menés, et notamment la similarité des résultats obtenus par PARIS et PLAXIS 2D, montre la validité du modèle « talus risberme » avec recherche automatique des lignes de rupture critiques dans le cadre de cette étude, ainsi que la bonne concordance du calcul aux éléments finis en modèle Mohr-Coulomb ($E_Y=4E_M/\alpha$) avec le calcul aux coefficients de réaction estimés selon Schmitt, ce qui confirme les résultats obtenus sur des chantiers antérieurs (Schmitt 2009)

7 REMERCIEMENTS

Remerciements à l'IFSTTAR qui a permis la mise en place de l'instrumentation et une partie de cette étude dans le cadre de l'opération de recherche FONDAMS.

8 RÉFÉRENCES

- Mestat P., Prat M. 1999. *Ouvrages en interaction*. Hermès.
- Marten S., Delattre L., Magnan J-P. 2005. *Etude expérimentale et méthodologique sur le comportement des écrans de soutènement*. LCPC.
- Schmitt P., 1998. *De l'élasticité linéaire au coefficient de réaction*. Revue Française de Géotechnique n°85.
- Caquot A., Kérisel J. 1990. *Tables de Poussée et Butée 3^{ème} édition*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Graux D, 1967. *Fondations et Excavations Profondes – Tome 1 : Géotechnique Appliquée*. Editions Eyrolles.
- Schmitt P., Dodel E. 2002. *Méthodes Numériques en Géotechnique*. 5^{ème} conférence européenne. NUMGE 2002.
- Schmitt P., 2009. *De l'importance du suivi pour maîtriser le dimensionnement des ouvrages géotechniques*. Revue Française de Géotechnique n°126-127.