

INSTRUMENTATION ET MODÉLISATIONS D'UN BASSIN CIRCULAIRE

INSTRUMENTATION AND NUMERICAL MODELS OF A CIRCULAR STORAGETANK

Julien HABERT

CETE Nord-Picardie, LRPC de Lille, Lille, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de la construction d'un bassin d'orage circulaire de 21 m de profondeur et de 25 m de diamètre par une technique de type paroi moulée, une instrumentation complexe a été mise en place et comparée aux différentes hypothèses retenues et modélisations effectuées (calculs au modules de réaction et en éléments finis 2D et 3D) aux observations in situ.

ABSTRACT – During the construction of a stormwater storagetank designed with a circular diaphragm wall (21 m deep and 25 m in diameter), an extensive instrumentation program was implemented and the data collected are compared to the various design assumptions and numerical models (reaction modulus design and finite element method 2D et 3D).

1. Introduction

Les contraintes d'urbanisation conduisent à aménager préférentiellement des bassins circulaires, qui permettent un compromis intéressant entre un volume de stockage important et une technique de soutènement efficace. En effet, les bassins circulaires construits par la technique de paroi moulée permettent de s'affranchir de tirants ou de butons tout en maintenant des niveaux de déplacements faibles en arrière de l'ouvrage. Parallèlement, des problématiques de gonflement du fond de fouille sont posées quand le niveau final de l'excavation se situe dans des sols argileux susceptibles de présenter des phénomènes de gonflement.

Les méthodes de calculs concomitantes reposent sur différentes hypothèses qu'il est intéressant de confronter à l'instrumentation d'un ouvrage réel.

Dans cet article, le cas du Bassin « Clinquet » est exposé. L'instrumentation effectivement réalisée ainsi que les mesures effectuées sont présentées, puis comparées aux résultats de différentes modélisations.

2. Présentation du cas d'étude

Le bassin de rétention des eaux pluviales de la rue du Clinquet est situé sur la commune de Tourcoing (Département du Nord). Il présente une capacité de 8800 m³, se traduisant par un rayon intérieur de 12,6 m pour une profondeur du bassin en service de 20,9 m.

2.1. Contexte géotechnique

Le bassin du Clinquet est réalisé sur les limons de plateaux *quaternaires* recouvrant les terrains tertiaires yprésiens, correspondant au faciès argileux de l'Argile des Flandres. Au droit de l'ouvrage, l'argile yprésienne présente une épaisseur de 30 à 40 m, dans laquelle est aménagé le radier de l'ouvrage. Plus profondément, les sables d'Ostricourt marquent le début de la sédimentation tertiaire et présentent une nappe en charge dont le niveau correspond globalement au niveau du terrain naturel.

Le modèle géotechnique est présenté sur la figure 1.

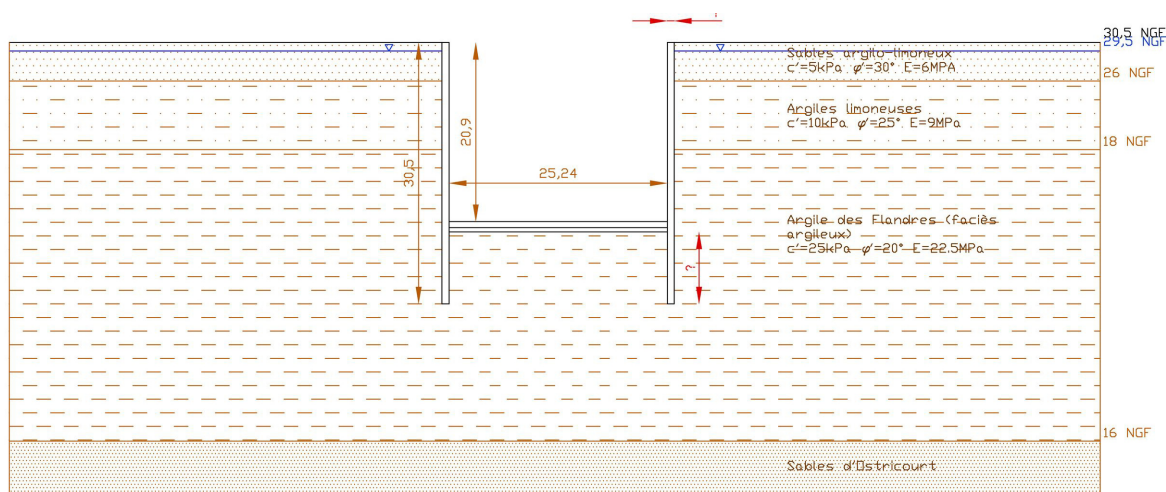


Figure 1. Modèle géotechnique

2.2. Problématique soulevée et mode de construction retenu

Deux problématiques distinctes concernent l'ouvrage projeté. D'une part, la technique de soutènement envisagée est en effet spécifique et différente de celui d'un ouvrage plan : prise en compte de la rigidité circulaire, tout en intégrant la déviation potentielle de l'outil de forage des parois ainsi que la présence de joints entre différents éléments de parois moulées, caractère tridimensionnel des charges. Dans le cas présent, une paroi moulée de 82 cm d'épaisseur et constituée de panneaux rectangulaires jointifs présentant une fiche de 9,6 m a été retenue. D'autre part, le gonflement des matériaux argileux yprésiens en fond de fouille est à considérer. La portance (et la résistance de l'ouvrage au gonflement ascendant) est obtenue en réalisant un système de fondations profondes, désolidarisé du terrain sur leur partie supérieure afin de s'affranchir des efforts ascendants dus au gonflement.

3. Description de l'instrumentation mise en œuvre et résultats obtenus

3.1. Instrumentation du soutènement

L'instrumentation a consisté à mesurer conjointement les déplacements de la paroi ainsi que les efforts de compression orthoradiaux. Le principe général est présenté sur la figure 2.

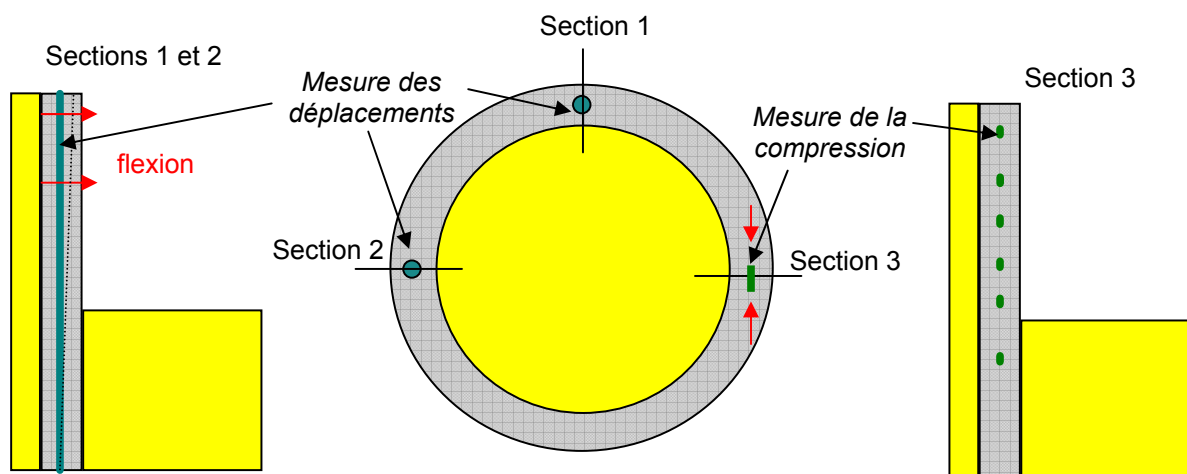


Figure 2 – Schéma général de l'instrumentation du soutènement

3.1.1 Cordes vibrantes

Afin d'obtenir les efforts orthoradiaux au sein des éléments de paroi moulée, huit extensomètres de type cordes vibrantes (Capteurs Roctest C-110) ont été installés à différentes profondeurs.

Après suppression des mesures issues des cordes défectueuses et prises en compte des efforts de traction mesurés avant le début de la phase d'excavation (liés au phénomène de retrait du béton), les valeurs de contrainte obtenues sont reportées sur la figure 3.a (le phasage de l'excavation est reporté sur la figure 3.b).

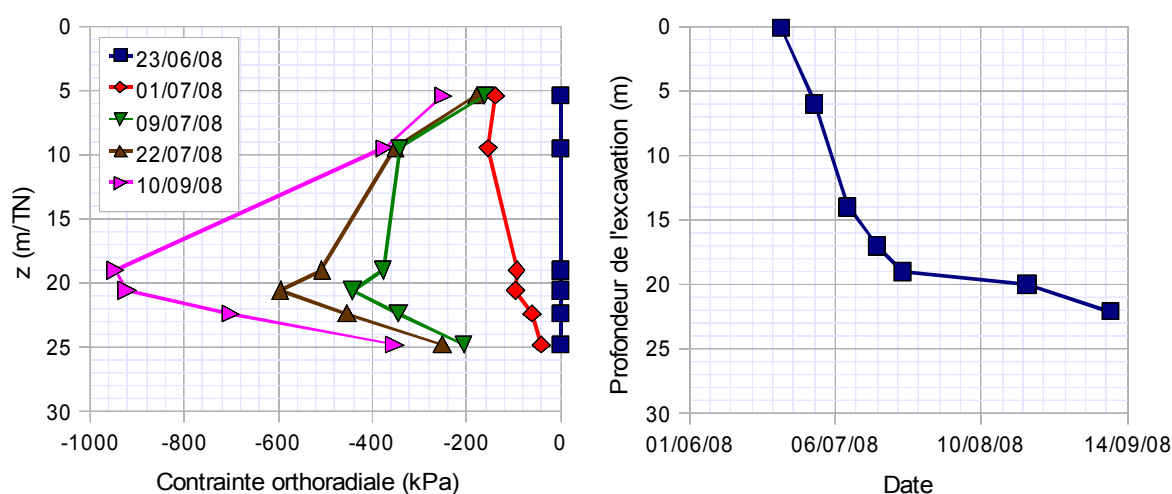


Figure 3 .a – Contraintes dans les cordes vibrantes, b – Phasage de l'excavation

3.1.2. Déplacements inclinométriques

Un suivi inclinométrique a été projeté afin d'appréhender les déplacements de la paroi au fur et à mesure de l'excavation. Deux tubes inclinométriques ont été mis en œuvre dans des tubes de carottage solidaires des cages d'armatures et descendus jusqu'à la profondeur de 28,5 m.

Plusieurs mesures ont été effectuées au cours du processus d'excavation dont les plus représentatives sont reportées sur les figure 4a et 4b.

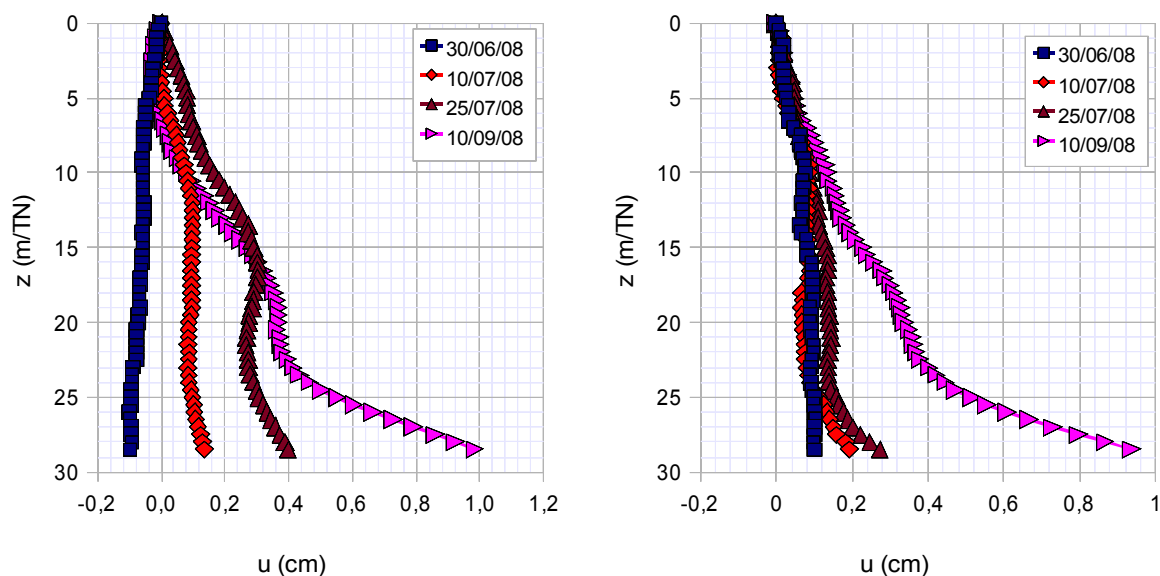


Figure 4.a Inclinomètre I1, b – Inclinomètre I2

Un comportement similaire est obtenu pour les deux inclinomètres. Les déplacements maximums se situent en pied d'inclinomètre et atteignent 10 mm. Cependant, l'examen plus approfondi de la déformée en plan des inclinomètres montre un comportement distinct, traduisant le caractère non axisymétrique de l'excavation.

3.2. Instrumentation du radier

Pour étudier le gonflement des Argiles des Flandres suite au déconfinement résultant de l'excavation, un système de 4 piges fichées à différentes profondeurs a été installé en fond de bassin (Figure 3.a). Les forages ont été effectués dès que possible après la fin des terrassements mais avant la réalisation du radier. La mise en place des repères a été réalisée après la réalisation du radier et le premier nivellement a eu lieu le jour même. Les mesures effectuées sont présentées sur la figure 5.c (mesures provisoirement stoppées pour des raisons d'exploitation).

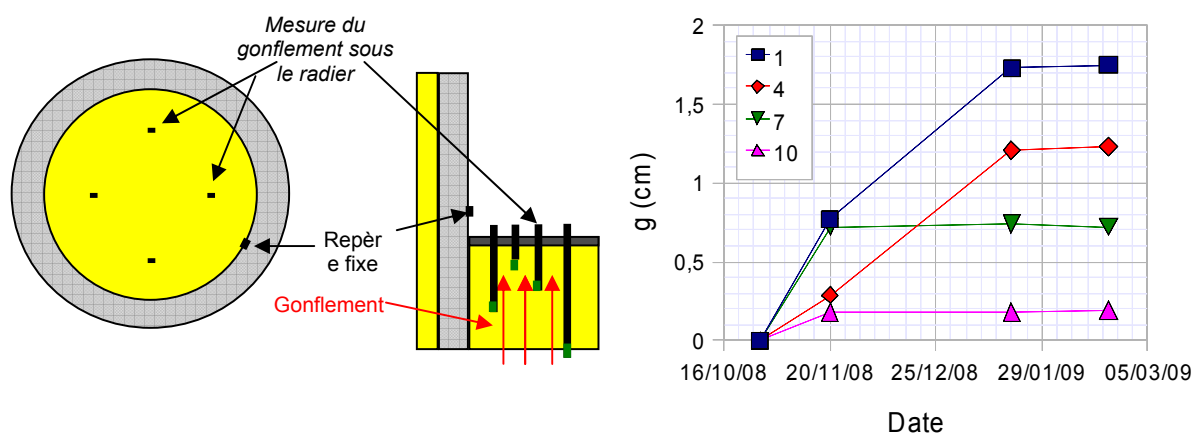


Figure 5.a – Schéma de l'instrumentation, b - mesures réalisées

3.3. Exploitation des mesures :

Bien que les inclinomètres permettent d'obtenir la déformée (et les variations angulaires) du soutènement, les déplacements obtenus permettent également de remonter aux moments fléchissants (nécessitant une phase préalable d'interpolation qui n'est pas décrite ici), et, dans l'hypothèse d'un comportement purement axisymétrique de l'ouvrage et de déplacements purement radiaux, aux efforts de compression dans la paroi, en utilisant les relations (1) et (2) :

$$M = E I \frac{d^2 u_r}{dz^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = E \varepsilon_{\theta\theta} = E \frac{u_r}{R} \quad (2)$$

Dans un premier temps, les efforts de compression orthoradiaux issus des deux méthodes sont reportés sur la figure 6, ce qui fait apparaître des différences significatives entre les valeurs de contraintes obtenues. Cela s'explique par les raisons suivantes :

- Les cordes vibrantes se trouvent à « l'intérieur » des panneaux de paroi moulée, et traduisent donc le comportement « local » d'un panneau, tandis que les inclinomètres traduisent le comportement « global » de l'ouvrage, intégrant notamment les caractéristiques inférieures des joints et la déviation possible de l'outil de forage ;
- Caractère en réalité non axisymétrique du problème, ce qui est lié à la position ponctuelle de l'engin assurant l'excavation et du niveau non homogène du fond de l'excavation (Marten, 2005).

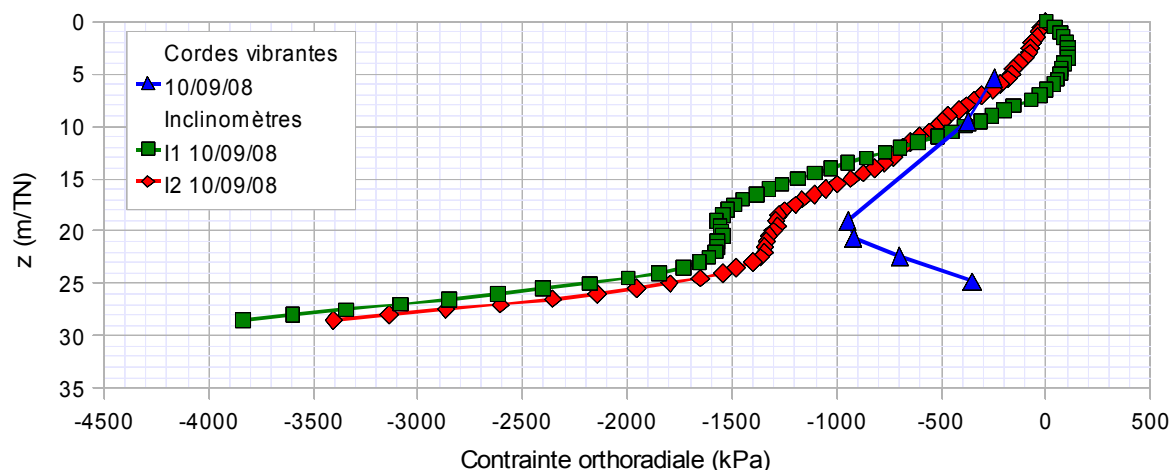


Figure 6 – Contraintes obtenues par les cordes vibrantes et extrapolées à partir des mesures inclinométriques

4. Modélisations et comparaison

4.1. Principe des modélisations

4.1.1. Calcul aux coefficients de réaction

Dans un premier des temps des calculs dits aux coefficients de réaction ont été menés (permettant de modéliser la réaction du sol par un ensemble de ressorts-patins). Le caractère circulaire de l'ouvrage est pris en compte en se plaçant dans le cas axisymétrique en contraintes planes en introduisant une rigidité circulaire K_c , qui est obtenue par l'équation 3.

$$K_c = \frac{Ee}{R^2} \quad (3)$$

Le déroulement des calculs est ensuite similaire à celui effectué pour un rideau plan, et consiste en la résolution de l'équation différentielle 4 avec le déplacement radial u_r comme seule inconnue.

$$EI \frac{d^2 u_r}{dz^2} + (k_h + K_c) u_r = 0 \quad (4)$$

La problématique principale réside dans le choix des propriétés mécaniques de la paroi. En effet la pratique courante pour ce type d'ouvrage consiste à adopter la démarche suivante concernant spécifiquement la détermination de la rigidité circulaire :

- réduction de l'épaisseur de la paroi moulée dans le calcul de la rigidité cylindrique, pour prendre en compte le caractère élémentaire rectangulaire des panneaux rectangulaires de parois moulées ainsi que la déviation potentielle de l'outil de forage. En toute rigueur celle-ci augmente avec la profondeur ce qui a conduit à retenir une inertie variable,
- une réduction du module de déformation différé du béton pour traduire les caractéristiques plus faibles au niveau des joints entre les différents panneaux.

4.1.2. Méthode des éléments finis

Dans un second temps, la méthode des éléments finis a été mise en œuvre, en utilisant le logiciel CESAR-LCPC, en considérant un problème également purement axisymétrique. L'état initial des contraintes initial a été obtenu en utilisant une procédure K_0 et en négligeant l'influence de la mise en place de l'écran sur l'état de contraintes. Des éléments massifs ont été utilisés pour modéliser la paroi et aucune interface n'a été prise en compte. Un critère de Mohr-Coulomb avec une loi d'écoulement non-associé a été utilisée. Un maillage basé sur des éléments de type quadrangulaires a été retenu.

Pour tenir compte des incertitudes sur les joints verticaux entre les différents panneaux et la déviation potentielle lors de la mise en œuvre, le comportement du béton constituant la paroi a été modélisé en retenant un comportement élastique anisotrope (abaissement du module orthoradial du béton pour traduire la plus faible rigidité des joints et la déviation de l'outil de forage). Par rapport à la problématique tridimensionnelle du problème réel (position ponctuelle de l'engin de travail et

caractère non plan du fond de l'excavation), un modèle en trois dimensions a spécifiquement été réalisé.

4.1.3. Synthèse des caractéristiques retenues

Les caractéristiques mécaniques utilisées sont regroupées dans le tableau I.

Tableau I : synthèses des caractéristiques mécaniques retenues

	r_{sat}	c' (kPa)	φ' (°)	γ (°)	E (MPa)	n	k_h (kPa.m ⁻¹)
Sable limoneux	20	5	30	0	6	0,33	400
Argile limoneuse	19,8	10	25		9		600
Argile des Flandres	19	25	20		25		1000/9500

4.2. Résultats obtenus et Comparaison avec l'instrumentation

4.2.1. Déplacements et efforts de la paroi

Concernant la problématique de soutènement, les comparaisons menées sont présentées sur les figures 7.a, 7.b et 7.c.

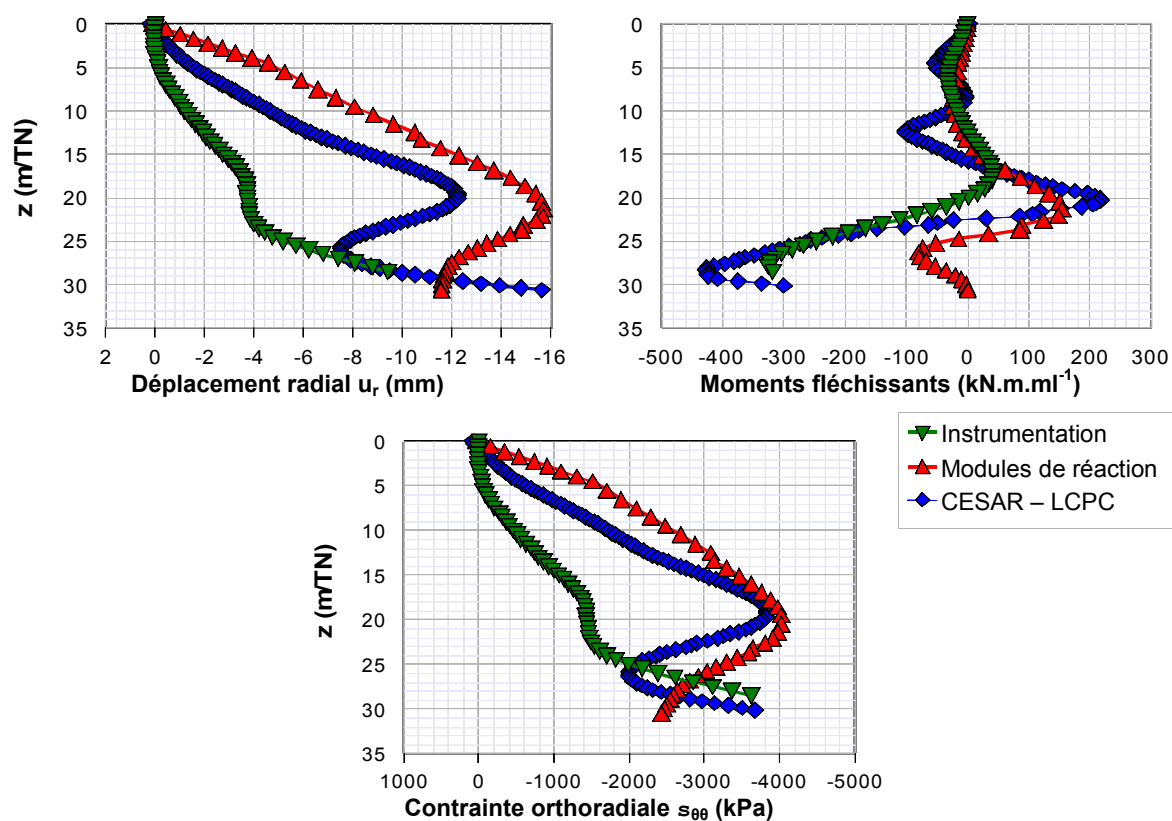


Figure 7.a,b,c – Évolution des déplacements, moments fléchissants et de la contrainte orthoradiale avec la profondeur

Des moments fléchissants sensiblement différents sont obtenus, selon qu'une modélisation aux modules de réaction ou en éléments finis est utilisée.

L'instrumentation et la modélisation par éléments finis conduisent à des résultats similaires, concernant aussi bien les déplacements que les efforts obtenus.

Les calculs aux éléments finis menés en trois dimensions n'ont pas mis en évidence de variations importantes par rapport au cas axisymétrique. Le comportement réel plus complexe effectivement constaté semble plus à relier à l'incertitude sur la géométrie de la paroi, la déviation des éléments de paroi semblant revêtir une importance prépondérante.

4.2.2. Gonflement du fond de fouille

Le calcul du soulèvement prévisible d'un fond de fouille situé dans des matériaux argileux est un sujet complexe, en particulier vis-à-vis du choix des essais pertinents pour caractériser le gonflement du matériau argileux (Lancelot et al., 2002, Boutonnier et Serratrice, 2002). Il a été évalué ici en considérant uniquement l'indice de gonflement C_s obtenu à partir de divers essais œdométriques. Ces hypothèses ont conduit à retenir une amplitude totale de soulèvement du fond de fouille de 31 cm. La cinétique du phénomène a été ensuite étudiée en se calant sur la cinétique de la phase de déchargement étudiée à l'œdomètre. Un modèle 1D en différences finies a été construit pour prendre en compte le phasage précis de l'excavation. Ce modèle conduit à 50 % de gonflement au bout de 3 ans environ.

Du fait des contraintes d'ordre logistique, seuls quelques relevés ont pu être réalisés au moment de la rédaction du présent article, montrant pour l'instant des amplitudes de gonflement du fond de fouille relativement faibles. Les futures mesures seront confrontées aux hypothèses de dimensionnement, afin d'apprécier leur pertinence, tant en terme d'amplitude que de cinématique du phénomène.

5. Conclusions

Dans le cadre de la construction d'un bassin circulaire, une instrumentation conséquente a permis de comparer les résultats de l'instrumentation aux modélisations numériques classiquement effectuées en terme de dimensionnement.

Concernant le dimensionnement du soutènement, ces différents éléments confirment le rôle important des joints présents entre les parois ainsi que l'incertitude sur la géométrie réelle de l'ouvrage (du fait de la déviation possible de l'outil de creusement), non seulement dans l'estimation des déplacements de l'ouvrage (qui restent néanmoins négligeables), mais encore dans l'évaluation des moments fléchissants et des efforts de compression orthoradiaux.

Une instrumentation du gonflement des matériaux argileux en fond de fouille est en cours. Les futures mesures permettront d'apporter des éléments pratiques sur l'amplitude et la cinétique du phénomène.

6. Références bibliographique

- Marten S. (2005), Étude expérimentale et méthodologique sur le comportement des écrans de soutènement, Mémoire de thèse, École Nationale des Ponts et Chaussées et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 308p
- Lancelot L., Shahrour I., Khaddaj S., (2002), Étude en laboratoire du gonflement de l'argile des Flandres, PARAM 2002, 145-151
- Boutonnier L., J.F. Serratrice, (2002), Caractérisation du comportement d'une marne en vue de la réalisation d'un déblai, PARAM 2002, 519-530