

Ligne C du Métro de Toulouse – Retour d’expérience du dimensionnement et du suivi d’auscultation d’une fouille profonde

Toulouse Subway line C – Feedback on the design and monitoring of a deep excavation

Laure DELVA¹, Thomas LE COR^{1*}, Philippe LEGRAND¹

1 NGE Fondations, Servon sur Vilaine, FRANCE

**tlecor@ngefondations.fr*

RÉSUMÉ : Dans le cadre du projet de construction de la Ligne C du Métro de Toulouse, un nombre important d’ouvrages souterrains (stations, puits de ventilation ou d’accès secours) ont été réalisés, notamment la station La Vache. Cet ouvrage est l’un des plus critiques du tracé Nord de la ligne. En effet il s’agit, de l’ouvrage le plus profond de cette partie de la ligne (fond de fouille à 40m), puits de départ de deux tirs de tunnelier et station en interconnexion avec la ligne B existante. Avant la construction de la ligne C, il n’existait pas ou peu de retours d’expérience d’ouvrages à de telles profondeurs dans la région toulousaine. Cet ouvrage a fait l’objet d’une instrumentation renforcée afin de suivre notamment les déformations des parois moulées ainsi que les efforts dans les butons provisoires lors des différentes phases de terrassement. L’objet de cet article est de présenter dans un premier temps les hypothèses de calcul retenues avec un fort impact sur le dimensionnement des parois moulées (comportement de la Molasse, hypothèses de nappes, contexte normatif particulier...). Dans un second temps, l’article présente une analyse des mesures *in situ* et une comparaison avec le comportement attendu de l’ouvrage.

ABSTRACT: As part of the construction project for Toulouse subway Line C, a significant number of underground structures (stations, ventilation shafts, and emergency access shafts) have been built, including the La Vache station. This structure is one of the most critical on the northern part of the line. Indeed, it is the deepest structure in this part of the line (with an excavation depth of 40 meters), serves as the launch shaft for two tunnel boring machines, and is an interchange station with the existing Line B.

Before the construction of Line C, there was little to no local experience with structures of such depth in the Toulouse region. This structure was equipped with extensive instrumentation to monitor, among other things, the deformation of the diaphragm walls and the forces in the temporary struts during the various excavation phases.

The purpose of this article is twofold: first, to present the key design assumptions that significantly influenced the sizing of the diaphragm walls (including the behavior of the Molasse formation, groundwater assumptions, and specific regulatory context); second, to analyze the *in-situ* measurements and compare them with the expected behavior of the structure.

Mots-clés: Métro ; Parois Moulées ; Instrumentation ; Molasse.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de l’étude

Le projet de la ligne C consiste en la création d’une nouvelle ligne allant de Colomiers à Labège en passant par le centre de la ville de Toulouse, s’étendant sur 27 km et dont 80% du linéaire est souterrain. Plusieurs interconnexions avec les deux lignes existantes sont prévues, notamment au niveau de la station La Vache avec la ligne B.

Lors des travaux de la ligne B, des divergences notables avaient été observées entre le comportement

attendu des parois de soutènement et les mesures réalisées lors de la construction de certaines stations (Vanoudheusden et al., 2005). En effet, ce retour d’expérience mettait en avant une sous-évaluation des déplacements de parois moulées et des efforts dans les appuis provisoires issus des calculs au coefficient de réaction par rapport aux mesures *in situ*.

L’objet du présent article est donc d’apporter un retour d’expérience dans un contexte géotechnique similaire avec un ouvrage plus profond.

1.2 La géologie toulousaine

La Molasse est une formation principalement détritique issue de l'érosion du massif pyrénéen. Les dépôts fluviatiles qui la constituent se sont mis en place entre l'Oligocène supérieur et le Miocène inférieur soit entre -23Ma et -20 Ma (P.-O. Antoine et al., 2006). L'épaisseur de cette formation varie de quelques centaines de mètres à près de trois kilomètres au pied des Pyrénées. Du fait de la faible énergie des ruisseaux qui ont charrié les matériaux, la granulométrie de la Molasse n'excède que rarement la classe des sables grossiers et varie suivant le type de dépôt observé : dépôts de barres de méandres sableux, dépôts de fond de chenaux grossiers (graviers, sables), dépôts de levée (limons)... Par ailleurs, des taux plus ou moins importants de calcite au sein des dépôts molassiques peuvent être observés et résultent de l'évolution pédologique de ces dépôts, ce qui peut conduire à la formation de bancs rocheux au sein de cet horizon pouvant occasionner des difficultés de forage dans le cadre de la réalisation d'ouvrages enterrés. D'un point de vue géotechnique, la Molasse peut être qualifiée de sol induré ou roche tendre aussi appelé SIRT (Guilloux et al., 2005).

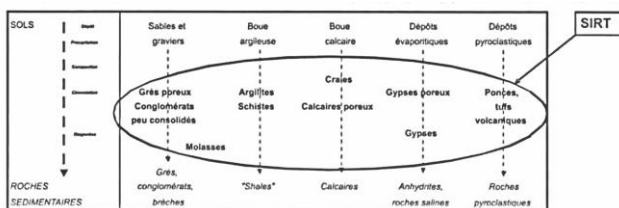


Figure 1. Classification SIRT (Guilloux et al., 2005)

Afin de rendre compte, de la variabilité de la Molasse à l'échelle toulousaine, celle-ci a été découpée, dans le cadre des études la ligne C, en quatre faciès (TISSEO, 2022) : fin (Limons), moyen (Sables limoneux), grossier (Sables grossiers), rocheux (Marnes, Grès). Enfin d'un point de vue hydrologique, deux aquifères sont concernés par le projet de la ligne C : la nappe alluviale portée par le substratum molassique peu perméable et l'aquifère molassique qui abrite une nappe diffuse et plus ou moins continue.

1.3 Ouvrage étudié

La station La Vache constitue la gare la plus profonde de la partie Nord du tracé avec un fond de fouille à presque 40 m sous la surface. Elle est constituée d'une boîte profonde de dimensions 50 m x 25 m et de deux boîtes superficielles de profondeur 10 m situées de part et d'autre des longs pans de la station. En phase provisoire, la station est le point de départ de deux tirs de tunneliers ce qui en fait un ouvrage critique pour cette partie de la ligne.

La boîte profonde de la station est terrassée à l'abri d'une paroi moulée d'épaisseur 1,50 m maintenue en phase provisoire par 5 niveaux de butons métalliques posés à l'avancement des terrassements. Les boîtes superficielles sont terrassées à la fin de la réalisation des tunnels afin de ne pas empiéter sur l'emprise au sol nécessaire notamment pour le stockage des voussoirs du futur tunnel. La coupe de calcul étudiée est présentée en figure 2.

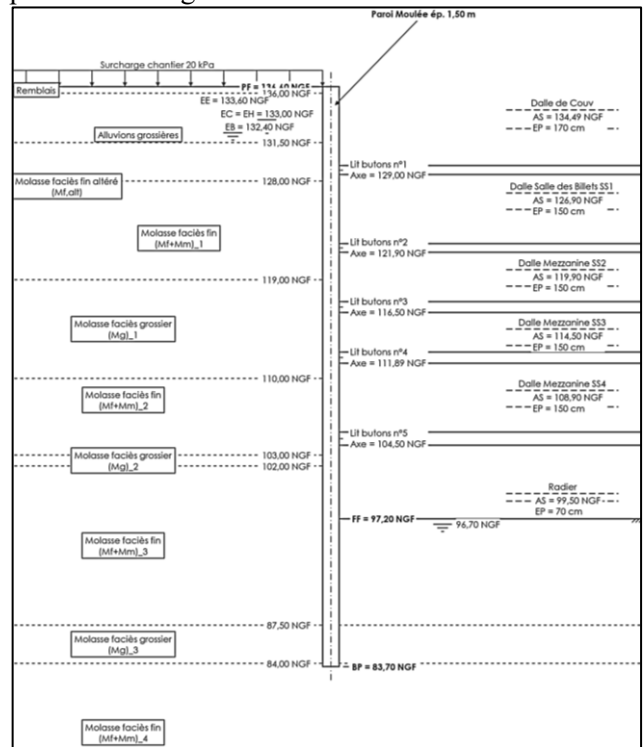


Figure 2. Coupe de calcul étudiée

La coupe de calcul étudiée est située sur l'axe vertical de la station visible sur la figure 3 et correspond à la présence de deux inclinomètres en vis-à-vis, c'est-à-dire au droit des panneaux P05 et P18.

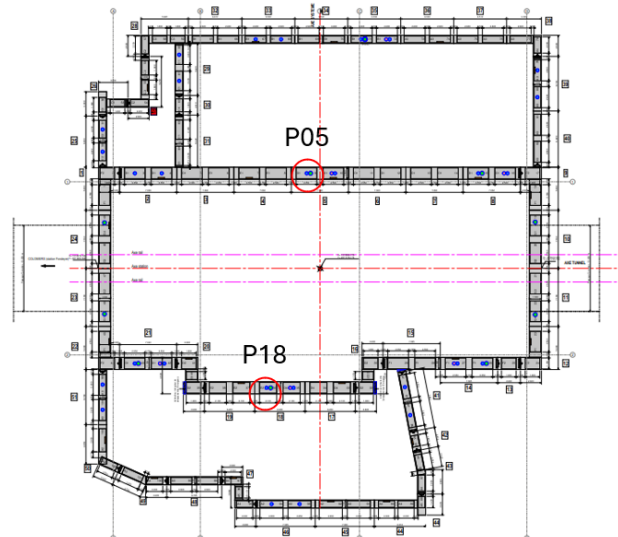


Figure 3. Vue en plan du panneautage de la station et repérage des inclinomètres étudiés

2 HYPOTHÈSES DE CALCULS

2.1 Calcul au coefficient de réaction

Les calculs de paroi moulée ont été réalisés avec la méthode au coefficient de réaction, appelée dans la Norme Ecran NF P 94-282 (AFNOR, 2009) la méthode MISSK et en considérant les valeurs des coefficients de réaction K_h issues de la formule de Schmitt (Schmitt, 1995). A noter, également que les fiches mécaniques des parois moulées des lots 1 et 2, dans les configurations d'appuis hyperstatiques, ont été systématiquement dimensionnées avec la méthode B (CNJOG, 2018) consistant, pour une fiche donnée, à minorer « à la source » les paramètres de butée du coefficient de sécurité recherché (1.5 ou 1.89) et vérifier que la structure (soutènement et appuis) est en mesure de reprendre les efforts induits. Cette approche conduit généralement à des fiches plus courtes que la méthode A.

2.2 Caractéristiques mécaniques de sol

Le Mémoire de synthèse géologique, géotechnique, hydrogéologique (Cahier B1) du projet donne, pour chaque ouvrage, 3 jeux de caractéristiques :

- Des caractéristiques drainées (c' , ϕ'),
- Des caractéristiques « drainées à moyen terme » applicables aux phases travaux (c_{tvx} , ϕ_{tvx}),
- Des caractéristiques « non drainées » (c_u , ϕ_u).

Le calcul de la stabilité horizontale des parois moulées en contraintes effectives est réalisé :

- Pour les phases travaux :
 - à partir des caractéristiques travaux « drainées à moyen terme » (c_{tvx} , ϕ_{tvx}) pour les horizons concernés, pour des durées de sollicitation de l'ordre de 6 mois (et jusqu'à 10 mois). Cela revient, à considérer ces paramètres jusqu'au coulage du radier pour les boîtes profondes comme pour la station La Vache.
 - à partir des caractéristiques drainées (c' , ϕ'), le cas échéant (soit pour des durées de sollicitations supérieures à 6 mois) ;
- Pour les phases services :
 - à partir des caractéristiques drainées (c' , ϕ').

Les paramètres de calcul retenus sont donc les suivants :

Tableau 1. Paramètres pressiométriques

| Terrains | Em (MPa) | α |
|---|----------|----------|
| Remblais | 5 | 0.5 |
| Alluvions grossières | 16 | 0.33 |
| Molasse faciès fin altéré + faciès grossier | 50 | 0.67 |

| | | |
|---------------------------------|-----|------|
| Molasse faciès fin et moyen (1) | 115 | 0.67 |
| Molasse faciès grossier (1) | 134 | 0.67 |
| Molasse faciès fin et moyen (2) | 156 | 0.67 |
| Molasse faciès grossier (2) | 172 | 0.67 |
| Molasse faciès fin et moyen (3) | 180 | 0.67 |
| Molasse faciès grossier (3) | 187 | 0.67 |
| Molasse faciès fin et moyen (4) | 190 | 0.67 |

Tableau 2. Caractéristiques de cisaillement

| Terrains | ϕ_{tvx} (°) | c_{tvx} (kPa) | ϕ' (°) | c' (kPa) |
|--|------------------|-----------------|-------------|------------|
| Remblais | | | 25 | 0 |
| Alluvions grossières | | | 35 | 0 |
| Molasse faciès fin alt + faciès grossier | 20 | 90 | 32.5 | 15 |
| Molasse faciès fin et moyen (1) | 30 | 70 | 30 | 45 |
| Molasse faciès grossier (1) | | | 35 | 0 |
| Molasse faciès fin et moyen (2) | 30 | 70 | 30 | 45 |
| Molasse faciès grossier (2) | | | 35 | 0 |
| Molasse faciès fin et moyen (3) | 30 | 70 | 30 | 45 |
| Molasse faciès grossier (3) | | | 35 | 0 |
| Molasse faciès fin et moyen (4) | 30 | 70 | 30 | 45 |

2.3 Poussée d'eau

Le projet recoupe 2 grands aquifères :

- L'aquifère des remblais et alluvions, soutenu par les formations molassiques semi-imperméables sous-jacente ; il abrite une nappe de surface en relation directe avec les cours d'eau locaux (le Touch, la Garonne, et l'Hers) ;
- L'aquifère des formations molassiques du substratum, qui abrite une nappe diffuse, avec des circulations préférentielles dans les horizons sableux.

Tableau 3. Niveaux de nappe

| Nappe | EC (NGF) | EB (NGF) | EH (NGF) | EE (NGF) |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| Nappe des Alluvions | 133 | 132,40 | 133 | 133,60 |
| Nappe de la Molasse | 127,40 | 126,60 | 127,40 | 128,20 |

Les niveaux d'eaux de chantier (EC) sont pris égaux aux EH, suivant les recommandations du CFMS (CFMS, 2022.). En phase provisoire et en phase définitive, les diagrammes de pression d'eau sont pris en compte sous la forme d'un régime hydrostatique depuis la nappe des alluvions.

3 COMPARAISONS CALCULS/MESURES

3.1 Déformations de la paroi moulée

Nous représentons ici les déformations de paroi moulée mesurées au droit de l'inclinomètre du panneau P05 et pour les phases suivantes :

- Niveaux de butons B1 B2 B3 B4 posés et terrassement à 103,50 NGF
- Niveaux de butons B1 B2 B3 B4 B5 posés et terrassement au fond de fouille à 97,20 NGF
- Radier réalisé et dépose du niveau de butons B5 (terrassement au fond de fouille à 97,20 NGF)

Sur le même graphique, nous indiquons les déformations théoriques calculées pour les phases précédemment citées.

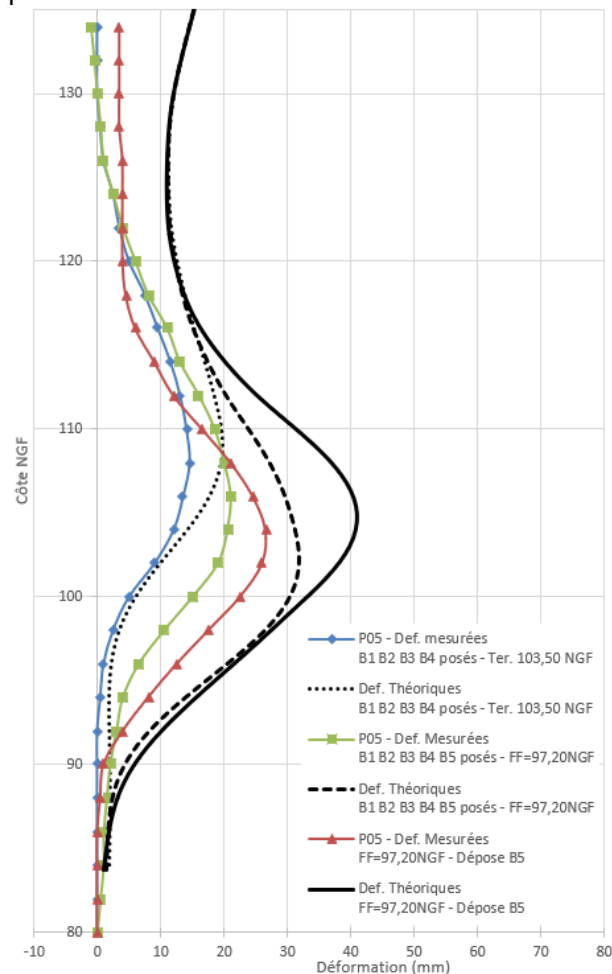


Figure 4. Inclinomètre P05 vs déformations calculées

Nous observons que les déformées mesurées sont plus faibles que les déformées théoriques calculées.

Sur le côté Sud, en face du P05, se trouve l'inclinomètre du P18.

Pour cet inclinomètre, nous représentons les déformations de paroi moulée mesurées pour les phases suivantes :

- Niveaux de butons B1 B2 B3 posés et terrassement à 110,89 NGF
- Niveaux de butons B1 B2 B3 B4 posés et terrassement à 103,50 NGF
- Niveaux de butons B1 B2 B3 B4 B5 posés et terrassement au fond de fouille à 97,20 NGF
- Radier réalisé et dépose du niveau de butons B5 (terrassement au fond de fouille à 97,20 NGF)

Comme précédemment indiqué, nous indiquons les déformations théoriques calculées pour les phases précédemment citées sur le même graphique :

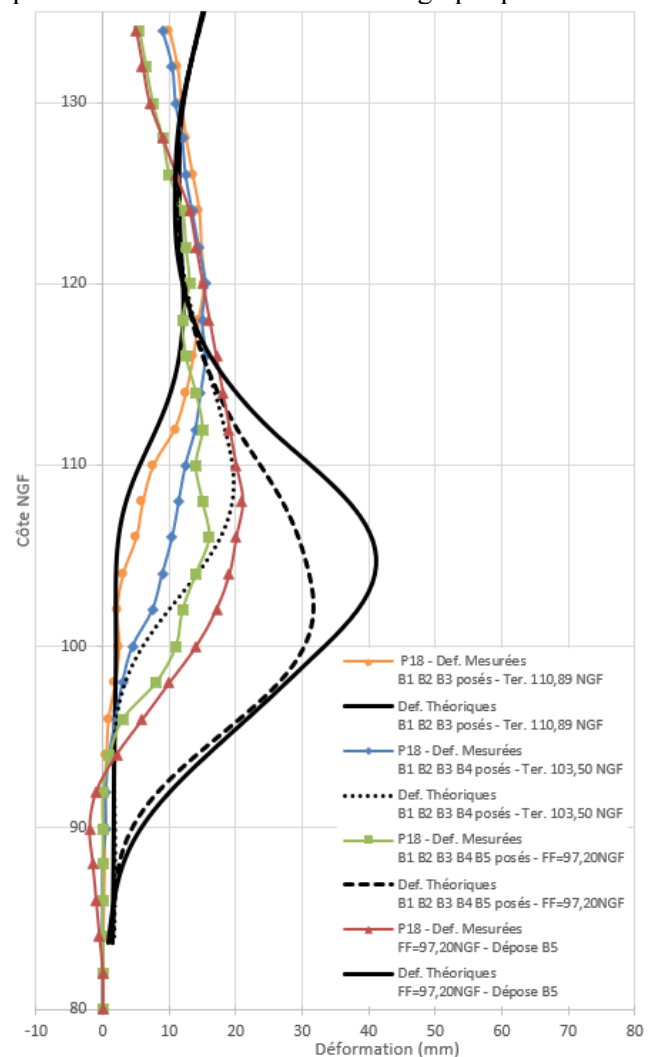


Figure 5. Inclinomètre P18 vs déformations calculées

De même que pour le P05, nous observons que les déformées mesurées sont nettement plus faibles que les déformées théoriques calculées notamment au niveau du ventre, au-dessus du fond de fouille entre 100 et 110 NGF. L'allure globale de la déformée est néanmoins assez différente de la déformée calculée.

3.2 Efforts dans les butons

Les efforts de plusieurs butons de chaque lit ont été suivis à l'aide de jauges extensométriques avec un démarrage des mesures en janvier 2024 pour le 1^{er} lit. La figure suivante présente l'implantation des butons instrumentés de chaque lit.

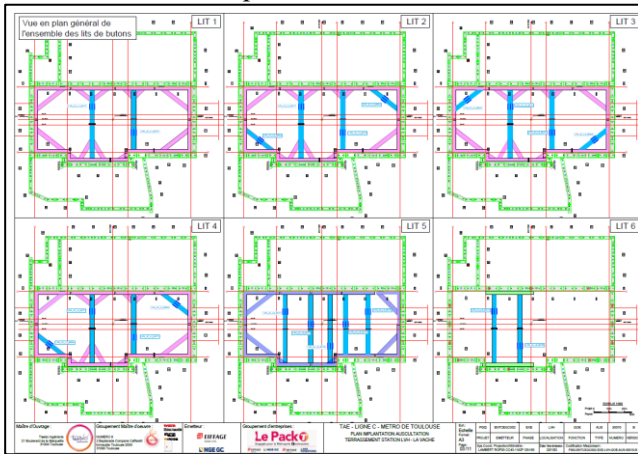


Figure 6. Plan de repérage des butons instrumentés

Afin de faciliter la lecture des courbes d'efforts, le tableau ci-après liste les différentes phases de réalisation et leur temporalité.

Tableau 4. Temporalité des travaux de terrassement

| Phase | Date approx. |
|--------------------------------|--------------|
| Terrassement Lit 1 | 14/01/2024 |
| Lit 1 posé Terrassement Lit 2 | 06/02/2024 |
| Lit 2 posé Terrassement Lit 3 | 26/02/2024 |
| Lit 3 posé Terrassement Lit 4 | 11/03/2024 |
| Lit 4 posé Terrassement Lit 5 | 31/03/2024 |
| Lit 5 posé Terrassement Lit FF | 06/05/2024 |
| Radier coulé et Lit 5 déposé | 16/07/2024 |

Nous présentons dans les figures qui suivent l'évolution des efforts mesurés dans les butons droits qui intéressent la coupe de calcul D, et représentons également l'effort maximal attendu pour chaque lit. À noter que certaines mesures ont été interrompues à la suite de la détérioration des jauges extensométriques.

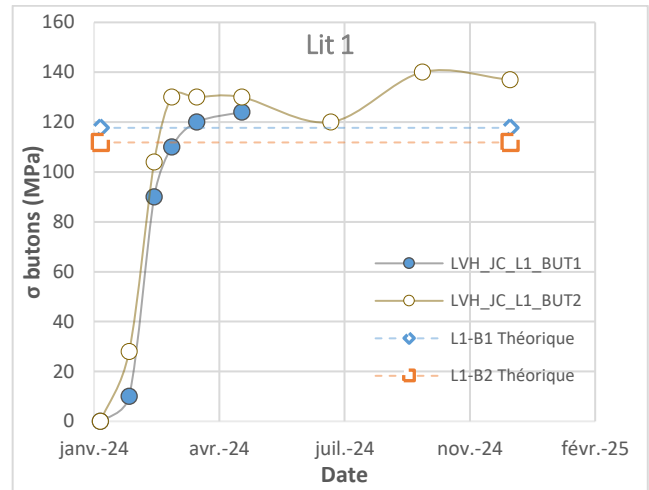


Figure 7. Suivi contrainte normale butons lit 1

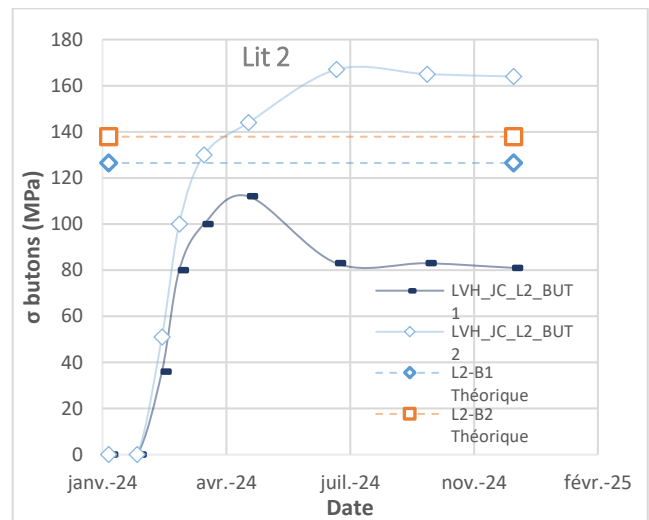


Figure 8. Suivi contrainte normale butons lit 2

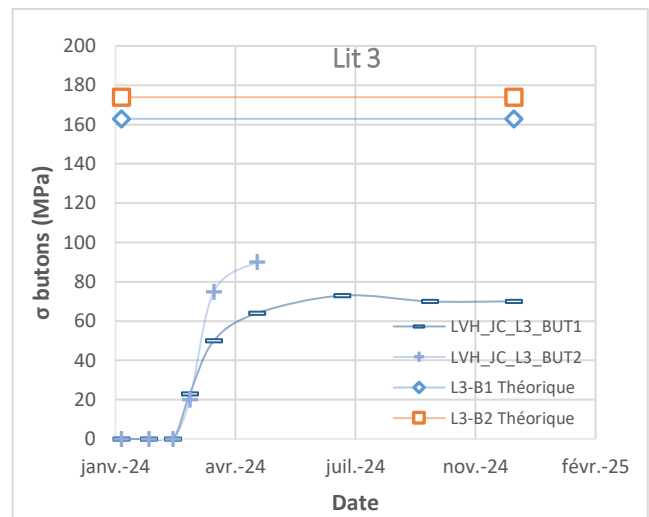


Figure 9. Suivi contrainte normale butons lit 3

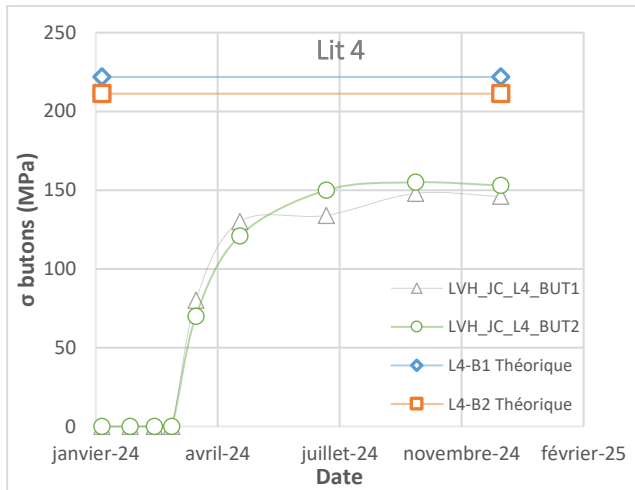


Figure 10. Suivi contrainte normale butons lit 4

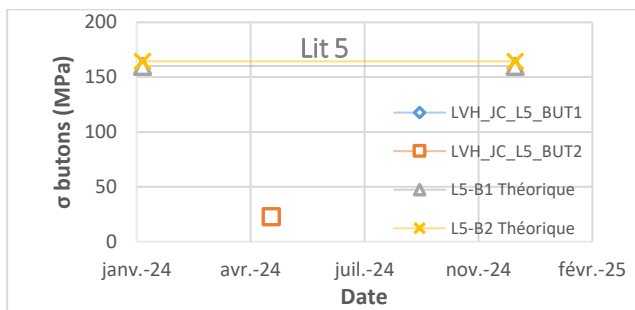


Figure 11. Suivi contrainte normale butons lit 5

4 ANALYSES

4.1 Déformations de la paroi

L'observation des déformations mesurées au droit des inclinomètres P05 et P18 permet de voir le déplacement progressif de la paroi moulée vers la fouille.

Les 1^{ères} phases des terrassements sont manquantes mais à partir de la phase du terrassement à 103,50 NGF jusqu'à la phase terrassement fond de fouille à 97,20 NGF, nous observons la formation progressive d'une déformée en ventre autour de 110 NGF (15 mm) qui descend au fur et à mesure pour se stabiliser vers 102 NGF (20-25 mm).

L'allure des déformées mesurées au niveau du ventre est donc en accord avec la forme théorique calculée pour l'inclinomètre P05. L'amplitude des déformations est en revanche plus faible ce qui peut traduire une poussée réduite sur le soutènement par rapport au calcul. Concernant le P18, la déformée mesurée, bien qu'également plus faible que celle calculée au niveau du ventre, présente une allure assez éloignée de la déformée théorique avec une déformation mesurée plus importante en tête. Dans la mesure où les charges en surface ne présentent pas de dissymétrie majeure, une explication possible est

l'absence de poutre de couronnement dans cette zone ce qui conduit à un moins bon maintien de la tête de paroi.

Toujours au niveau de la tête de la paroi moulée, un écart est observé dès les 1^{ères} phases de terrassement sur le P05 ; en effet les déformations mesurées sont très faibles par rapport à la courbe théorique (déplacement vers la fouille en tête). Cette allure théorique est héritée de la 1^{ère} phase de terrassement en console pour laquelle le calcul conduit à une valeur de 18 mm qui est conservée par la suite durant tout le phasage. Dans la mesure, où une poutre de couronnement est présente sur l'intégralité du linéaire de paroi du côté du P05, on peut tenter d'expliquer l'écart observé par un effet « rigidifiant » de cette poutre, non pris en compte dans le calcul.

4.2 Efforts butons

L'analyse de l'évolution des efforts dans les butons est réalisée lit par lit.

4.2.1 Lit 1

Concernant le lit 1, la montée en charge des butons avec la progression du terrassement se poursuit jusqu'à l'atteinte du 5^{ème} lit. La mise en charge ne s'arrête donc pas après la pose du 2nd lit mais continue bien au-delà. Il est à noter que le buton n°1 du 1^{er} lit n'a pu être suivi au-delà du terrassement au fond de fouille, néanmoins on observait à ce moment-là un ralentissement dans sa mise en contrainte laissant présager l'atteinte d'un palier d'effort. Par ailleurs, les efforts mesurés dans le lit 1 sont supérieurs aux efforts attendus de l'ordre de 20%. Néanmoins, le dimensionnement de ces butons, les moins chargés de l'ouvrage, présentait suffisamment de marge pour ne pas nécessiter de renforcement pour reprendre ce surplus d'effort.

4.2.2 Lit 2

Pour le lit 2, la mise en charge se fait peu ou prou avec la même allure que le lit 1 jusqu'à la phase de terrassement fond de fouille, mais nous observons un comportement divergeant entre les deux butons droits instrumentés à partir de la phase de dépose du lit 5 : pour le buton n°2 cette phase correspond à l'atteinte d'un plateau d'effort maximal là où pour le buton n°1 on observe un effort moindre qu'en phase fond de fouille. Le comportement du buton n°2 semble logique dans la mesure où cela correspond à la phase critique de l'ouvrage avec une portée maximale entre le dernier lit de butons et le radier (avec un dépassement de la contrainte attendue). En revanche, la forte diminution de contrainte dans le buton n°1 est difficile à expliquer hormis par un report de charges sur les butons à proximité (buton n°2 et bracon n°2).

4.2.3 Lit 3

Pour le lit 3, les données sont partielles, puisque les capteurs du buton n°2 ont été endommagés après l'atteinte du fond de fouille. Sur le buton n°1 la mise en charge se poursuit jusqu'à la dépose du lit 5. Dans l'ensemble les efforts mesurés sur ce lit sont très inférieurs à ceux calculés (d'un facteur proche de 2). Une partie de l'écart provient de l'adaptation de section des butons par rapport au calcul initial : les tubes de grands diamètres (1550mm) et forte épaisseur (36mm) ont été remplacés, faute de disponibilité, par un ensemble de 5HEB1000 soudés (soit une augmentation de la section de 17%). Néanmoins même en corrigeant la contrainte théorique attendue, le taux de travail mesuré serait de l'ordre de 70% de celui attendu.

4.2.4 Lits 4 et 5

Le lit 4 présente une montée en charge rapide jusqu'à l'atteinte du terrassement du lit 5. La montée en charge ralentit ensuite pour le buton n°1 tandis qu'elle augmente plus significativement pour le buton n°2 jusqu'à la phase de dépose du lit 5 traduisant un report de charge du lit 5 vers le lit 4. Comme pour le lit 3, les tubes initialement prévus ont été remplacés par 6HEB1000 (section supérieure de 20%). En corrigeant la contrainte attendue de cette augmentation de section on obtiendrait un taux de travail de 80% de celui attendu.

4.2.5 Conclusions

L'analyse des efforts dans les butons montre donc que les deux premiers lits de butons ont des niveaux de contrainte proches de ceux calculés. A l'inverse, les lits 3 et 4 ont des taux de travail significativement plus faibles. Le lit 5, quant à lui, a un taux de travail très inférieur à celui attendu ce qui peut être mis en relation avec la déformée mesurée au droit de sa position qui est également beaucoup plus faible qu'attendue.

5 CONTRE-CALCULS EXPLORATOIRES

5.1 Hypothèses recalées

Au regard des déformées plus faibles observées et de l'analyse des efforts mesurés dans les butons, nous pouvons interroger les poussées s'exerçant réellement sur le soutènement et donc sur certaines des hypothèses de calculs retenues pour le dimensionnement de la paroi.

En analysant le contexte hydrogéologique, nous pouvons faire l'hypothèse que la nappe de surface située dans les alluvions est plus basse qu'attendue. Nous proposons d'étudier un recalage avec un niveau

d'eau à 122 NGF c'est-à-dire dans la partie inférieure de la couche de Molasse à faciès grossier.

Par ailleurs, nous observons que la tête de la paroi moulée semble tenue. Nous proposons de modéliser la présence de la poutre de couronnement, initialement ignorée, via un appui de faible raideur ($\approx 10\,000$ kN/ml) en tête de paroi moulée.

Pour ce contre-calcul, nous concentrons la comparaison sur la phase « Radier réalisé et dépose du niveau de butons B5 (terrassement au fond de fouille à 97,20 NGF) ».

5.2 Résultats

Nous superposons les courbes de déformations mesurées pour les inclinomètres P05 et P18 avec la courbe de déformation obtenue via le contre-calcul (figure 13).

La déformée issue du contre-calcul présente une allure et une amplitude proches des déformées mesurées sur l'inclinomètre du P05. La diminution de la charge d'eau à l'arrière de la paroi conduit à une réduction de l'amplitude des déformées tandis que la prise en compte d'une raideur en tête de paroi conduit à un redressement de la déformée sur les premiers mètres de la paroi.

En revanche, l'allure de la déformée reste assez éloignée de celle mesurée sur le P18 où l'on n'observe pas de point d'inflexion à proximité du lit 3 comme sur le P05.

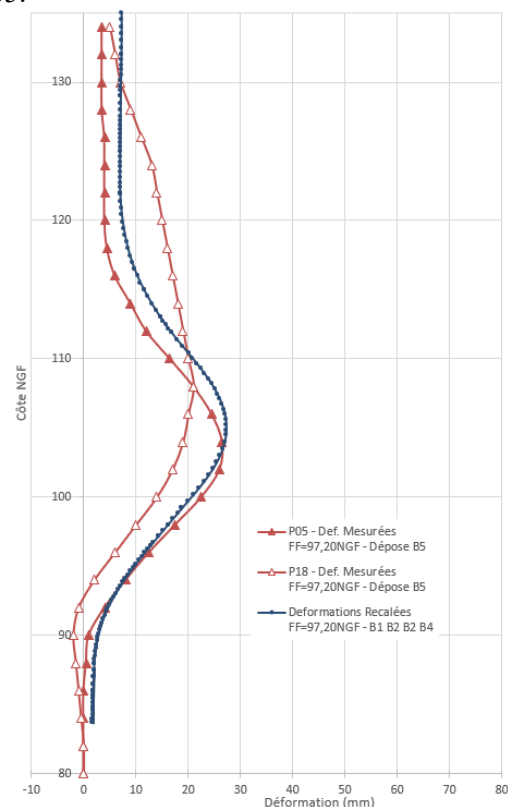


Figure 12. Comparaison contre-calcul vs mesures inclinométriques

5.3 Comparaison avec un REX de la Ligne B

Le retour d'expérience produit sur la Ligne B au niveau de la station Canal du midi (Vanoudheusden et al. 2005) indiquait que les calculs au coefficient de réaction avaient été menés :

- En considérant une pression d'eau constante de 10kPa sur la hauteur excavée (pas de poussée d'eau hydrostatique prise en compte sur la hauteur du soutènement) ; cela avait été rendu possible par la mise en œuvre de barbacanes et perçages sur la hauteur vue du soutènement réalisé,
- Avec des caractéristiques de cisaillement non drainées dans les faciès fin de la Molasse pour les phases travaux, soit un C_u de 300 kPa en butée et 100 kPa en poussée.

Les mesures inclinométriques de la paroi avaient montrées une déformation maximale de 18 mm pour 7,5 mm calculée soit +240%.

Concernant la mesure des efforts dans les appuis (butons et tirants actifs), celle-ci avait également révélé des efforts bien supérieurs à ceux calculés.

L'explication fournie par l'article était que le modèle au coefficient de réaction ne permettait pas de traduire correctement le phénomène d'effet voûte entre les différents appuis (butons et tirants) contrairement au modèle aux éléments fins réalisés.

À la lumière des résultats du présent article, une autre interprétation possible serait une sous-évaluation de la poussée d'eau et/ou une surévaluation du comportement mécanique à court terme des faciès fin de la molasse. L'approche retenue pour les calculs des soutènements de la ligne C, avec la prise en compte de paramètres de cisaillement drainés en phase travaux mais avec une cohésion « court terme » légèrement majorée semble en revanche adaptée au faciès fins de la molasse puisque les résultats d'instrumentation ne montrent pas de dérive importante tant en termes de déformations de la paroi que d'efforts dans les butons.

6 CONCLUSIONS

Les résultats de l'instrumentation de la station de La Vache, ouvrage profond réalisé en parois moulées dans le contexte des terrains molassiques toulousains, ont permis d'établir une comparaison entre les calculs réalisés via une approche classique au coefficient de réaction et le comportement réel de l'ouvrage.

L'analyse des mesures permet de constater que l'approche de calcul retenue donne des valeurs de déformées et d'efforts dans les appuis conservatrices mais réalistes et suffisantes pour appréhender correctement le dimensionnement de l'ouvrage d'une part et son impact sur les avoisinants d'autre part.

De manière plus générale, sur l'ensemble des ouvrages des lots 1 et 2 de la ligne C, correspondant à la partie Nord du projet, et non abordés dans le présent article, les résultats d'instrumentation ont révélé, à de rares exceptions près, des déformations des parois moulées et des efforts dans les butons inférieurs aux résultats des calculs au coefficient de réaction.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier le groupement d'entreprises EIFFAGE-NGE en charge de la réalisation des travaux des lots 1 et 2 de la ligne C du métro de Toulouse pour la collecte des données nécessaires à la rédaction de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR (2009) NF P 94-282 : Calcul géotechnique / Ouvrages de soutènement : Ecrans.
- Antoine P.-O. et al. (2006) Vertébrés de l'Oligocène terminal (MP30) et du Miocène basal (MN1) du métro de Toulouse (Sud-Ouest de la France). Comptes Rendus Palevol, Volume 5, Issue 7, Pages875-884.
<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2006.03.007>.
- CFMS (2022) Recommandations pour la conception, l'exécution et le suivi des rabattements temporaires de nappes.
- CNJOG (2018) Précisions sur la justification de la stabilité d'un écran de soutènement hyperstatique vis-à-vis du défaut de butée
- Guilloux A. et al. (2005). *Note sur la définition des « Sols Indurés Roches Tendres (SIRT) »*, Revue française de géotechnique n°111, pp. 59-66.
- Schmitt P. (1995). Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis-à-vis des ouvrages de soutènement souples. Revue Fr. de Géotechnique n°71, pp 3-10.
- Vanoudheusden E., Petit G., Robert J., Emeriault F. & Kastner R. (2005). *Comportement d'une paroi moulée en site urbain: Modélisations et mesures*. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 10.3233/978-1-61499-656-9-1141.