Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ANALISIS RETROSPECTIVO DEL CALCULO DE MUROS PANTALLA DE LA LINEA 16 DEL GRAND PARIS

TRABAJO FIN DE MASTER

Trabajo realizado por:
Javier Espada Fraile

Dirigido:
Jorge Castro González

Titulación:
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Santander, septiembre de 2021

Resumen

Presentación

Este Trabajo de Fin de Master tiene por objeto estudiar el comportamiento de los muros pantalla de varias estaciones subterráneas realizadas en el proyecto del Grand Paris Express. Esta memoria presenta un retroanálisis del cálculo de las pantallas a partir de los resultados de las campañas de auscultación realizadas durante las fases de ejecución de las obras del lote 1 de la línea 16 del Grand Paris. El objetivo de este trabajo es mejorar la predicción del comportamiento de los muros pantalla y, en última instancia, proponer ciertas recomendaciones para mejorar el cálculo de futuros proyectos.

El retroanálisis relativo al cálculo de los muros pantalla estudia 36 secciones de cálculo diferentes. Los resultados proporcionados por los inclinómetros instalados en los muros pantalla permiten estudiar las desviaciones de los desplazamientos horizontales entre el comportamiento real de estas pantallas y las estimaciones obtenidas a partir de los modelos de coeficiente de balasto. En función de estos resultados iniciales, se cuestionan las diferentes hipótesis de cálculo tomadas en el proyecto (i.e. parámetros geotécnicos, acciones aplicadas sobre el terreno o rigidez de las vigas de atado que permiten limitar los desplazamientos de la pantalla). Tras esta etapa de estudio de todas las hipótesis realizadas en el proceso de cálculo, se seleccionan aquellas que tienen una influencia mayor en el comportamiento de las pantallas para profundizar sobre ellas. Podemos entonces, proceder a una calibración de los modelos de coeficiente de balasto con el objetivo de mejorar la predicción en el comportamiento de los muros pantalla.

El estudio presentado en esta memoria también aborda secciones singulares de pantalla. Estas secciones singulares se caracterizan por tener un comportamiento particular que no puede ser estimado por los modelos de coeficiente de balasto. Algunas de las misiones realizadas han sido cuantificar la relevancia de estas secciones y proponer un método para la estimación de los desplazamientos del muro pantalla.

Este trabajo también presenta un capítulo completamente dedicado a los puntales provisionales instalados entre pantallas (empleados frecuentemente en estaciones subterráneas realizadas con un procedimiento *bottom-up*). Este estudio ha sido posible gracias a los resultados de los extensómetros instalados en estos puntales metálicos. Así pues, se realiza una comparación entre las tensiones soportadas por los puntales metálicos y las estimaciones calculadas inicialmente en la fase de cálculo del proyecto. Algunas hipótesis como la consideración del efecto térmico, se analiza en detalle con el estudio de los gradientes térmicos y los grados de empotramiento en sus extremidades.

Conclusiones

El retroanálisis ha permitido poner de manifiesto las discrepancias existentes entre las mediciones inclinométricas y las estimaciones de los desplazamientos horizontales derivadas de los modelos de coeficiente de balasto. Este primer paso muestra desviaciones medias de más del 30% en la cabeza y el vientre de la pantalla.
Los inclinómetros de las secciones de cálculo realizadas en *bottom-up* son más sensibles que las realizadas en *top-down* y presentan mayores desviaciones frente a unas mismas hipótesis de cálculo iniciales.
Se realizaron, a su vez, unos estudios de sensibilidad de las hipótesis de calculo que permitieron comprender el impacto de ciertas hipótesis en los resultados, sobre todo en lo que respecta a los desplazamientos. Este paso es esencial para la calibración de los modelos iniciales de cálculo. El estudio particular de cada sección de cálculo y de cada obra permite proponer nuevas hipótesis de cálculo. Es importante subrayar que la calibración de modelos presentada en este proyecto se ha realizado de forma lógica y coherente, tratando siempre de acercarse a los resultados medidos *in situ* a partir de los datos disponibles.
En cuanto a la calibración de los modelos iniciales, los resultados pueden considerarse muy satisfactorios desde el punto de vista de que se han reducido las desviaciones de los desplazamientos horizontales iniciales. Los resultados de la calibración también confirman la pertinencia de las hipótesis propuestas.

Las numerosas secciones singulares identificadas entre el conjunto de secciones estudiadas en este proyecto han demostrado que casi el 40% de las secciones se caracterizan por un comportamiento singular. Los modelos de coeficiente de balasto no son capaces de estimar bien este comportamiento. Este porcentaje de secciones singulares (40%) no debería variar demasiado del total del proyecto asumiendo que las estructuras estudiadas son representativas del proyecto y por tanto la cantidad de secciones singulares no se concentra en las estructuras estudiadas, sino que se reparte por todo el Lote 1 de la Línea 16. Por lo tanto, podemos concluir que la existencia de secciones singulares debe tenerse en cuenta en futuros proyectos de similares características.
El estudio particular de las secciones singulares permitió, además, familiarizarse con la localización de este tipo de secciones. En particular, se encuentran cerca de las zonas de discontinuidad desde un punto de vista tridimensional. Es decir, en las proximidades de los paneles de las pantallas perpendiculares (en las esquinas de las estaciones). A partir de las secciones singulares encontradas en este estudio, la identificación de dichas secciones en otros proyectos de similares características se convierte en una tarea bastante intuitiva y, a priori, factible.
El desarrollo de un modelo de elementos finitos ayudó a comprender y verificar el fenómeno físico de los efectos de borde que provoca la aparición de secciones singulares. Además, este modelo permitió proponer un método para estimar el desplazamiento real de estos cortes. Se ha

observado la importancia de los tímpanos en las estructuras subterráneas, especialmente los llamados tímpanos "cortos", para los que los efectos de los bordes son siempre más importantes porque el muro pantalla se ve afectado por la proximidad de las dos esquinas del tímpano. Además, hay que recordar que los tímpanos se ven afectados muy a menudo por las inyecciones realizadas detrás de la pantalla para facilitar el paso de la tuneladora. Este tratamiento del suelo también puede afectar al comportamiento del muro.
Gracias a la aplicación del método citado, las desviaciones de las estimaciones de las secciones singulares se redujeron, de media, en casi un 30%.

El retroanálisis de los puntales permitió constatar las desviaciones entre las mediciones de los extensómetros y los esfuerzos obtenidos en fase de cálculo.
El empuje de tierras es uno de los factores más importantes que explican estas diferencias. La calibración de los modelos de coeficiente de balasto ayuda a comprender las numerosas diferencias entre las mediciones y los estudios. El dominio de este tipo de modelización de forma eficiente permitiría mejorar el diseño de los puntales.
El efecto térmico es el otro gran tema de estudio en esta memoria con respecto al análisis de los puntales. Se ha demostrado que los gradientes térmicos no están bien considerados y deberían corregirse en el caso de futuros proyectos en función de exposición al sol de los puntales.
El grado de empotramiento de los puntales es, en definitiva, un parámetro a tener en cuenta si se quiere modelizar adecuadamente el verdadero comportamiento elástico del muro pantalla y del terreno. Como conclusión de este trabajo, se propone considerar un grado de empotramiento de al menos el 50% para los puntales bi-empotrados.

Palabras clave : Grand Paris Express, muro pantalla, puntal, retroanálisis, auscultación.

Résumé

Ce projet de fin d'études vise à étudier le comportement réel des parois moulées multi-butonnées exécutées dans le cadre du projet du Grand Paris Express. Le travail consiste à la rétro-analyse du calcul des parois moulées et du butonnage basée sur les données d'auscultation recueillies pendant les phases travaux des ouvrages du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris. L'objectif est d'approfondir les connaissances du comportement des parois moulées et des butons ainsi que de proposer certaines recommandations à considérer dans de futurs projets.

La rétro-analyse concernant le calcul des parois moulées présente l'étude de 36 coupes de calcul. Les données inclinométriques disponibles permettent d'étudier les écarts des déplacements horizontaux entre le comportement réel des parois moulées et les estimations obtenues des modèles MISS-K. Les hypothèses de calcul sont donc rediscutées à travers un étalonnage des modèles initiaux. Le comportement des coupes singulières est aussi discuté en détail et approfondi avec la proposition d'une méthode pour l'estimation des déplacements au niveau du ventre de la paroi moulée.

De son côté, le butonnage des parois moulées est étudié à l'aide d'une rétro-analyse basée sur les mesures des extensomètres disponibles. Une première étude concernant les efforts de compression dans les butons est réalisée. Cette étude vise à quantifier les écarts entre les mesures recueillies et les estimation calculées en phase d'études. Par ailleurs, la prise en compte de l'effet thermique pour le calcul des butons est analysée en détail avec l'étude des gradients thermiques et des degrés de restriction des appuis.

Mots-clés : Grand Paris Express, paroi moulée, butonnage, rétro-analyse, auscultations

Abstract

This Master's degree thesis aims to study the real behavior of the multi-butted flexible retaining walls executed in the framework of the Grand Paris Express project. The work consists of the back-analysis of the calculation of the diaphragm walls and the struts based on the monitoring data collected during the construction of the lot 1 of the line 16 of Grand Paris project. The objective is to deepen the knowledge of the behavior of the diaphragm walls and the struts and to propose some recommendations to be considered in future projects.

The back-analysis concerning the calculation of diaphragm walls presents the study of 36 calculation sections. The available inclinometer data allow the study of the deviations of the horizontal displacements between the real behavior of the diaphragm walls and the estimates obtained from the subgrade reaction coefficient modelling. The calculation hypotheses are therefore analyzed through the calibration of the initial modelling. The behavior of the singular sections is also discussed in detail and deepened with the proposal of a method for the estimation of the displacements of the diaphragm walls.

In turn, the struts of diaphragm walls are studied through a back-analysis based on the measurements of the available extensometers. An initial study of the compressive forces in the struts is carried out. This study aims to quantify the differences between the measurements collected and the estimations calculated in the design phase. In addition, the thermic effect in struts also is analyzed in detail with the study of the thermic gradients and the degrees of restriction of the supports.

Keywords: Grand Paris Express, diaphragm wall, buttressing, back-analysis, monitoring

Sommaire

INTRODUCTION 13
1. Motivation et objectifs 13
2. Organisation du mémoire 13
PARTIE I – LE CALCUL ET COMPORTEMENT DES PAROIS MOULEES 15
1. Les parois moulées 15
1.1. Généralités 15
1.2. Phasage de construction 16
1.3. Méthodes de calcul 16
2. Comportement global de la paroi moulée 17
2.1. Fiche 17
2.2. Epaisseur de l'écran 18
2.3. Appuis intermédiaires 18
3. Calcul des écrans de soutènement 18
3.1. Parois moulées 18
3.2. Butonnage 23
4. Suivi du comportement des écrans de soutènement 25
4.1. Principe des auscultations 25
4.2. Méthode des auscultations 25
PARTIE II – RETRO-ANALYSE DU CALCUL DES PAROIS MOULEES 28
1. Introduction 28
1.1. Objet 28
1.2. Ouvrages étudiés 28
1.3. Méthodologie 29
2. Etat des lieux 30
2.1. Données disponibles 30
2.2. Résultats 31
3. Etudes de sensibilité 35
3.1. Introduction 35
3.2. Surcharge du sol 37
3.3. Niveaux hydrologiques 39
3.4. Paramètres de résistance de sol 40
4. Etalonnage des modèles MISS-K 43
4.1. Méthodologie 43
4.2. Exemple d'application de l'étalonnage 44
4.3. Application 48
5. Coupes singulières 53
5.1. Introduction 53
5.2. Méthode proposée pour l'estimation des effets de bord 54
PARTIE III – RETRO-ANALYSE DU CALCUL DU BUTONNAGE 60
1. Introduction 60
1.1. Objet 60
1.2. Méthodologie 60
2. Etat des lieux 61
2.1. Données disponibles 61

2.2. Résultats 62
3. Effet thermique 65
3.1. Gradient thermique 65
3.2. Degré de restriction du buton 68
4. Exemple d'étalonnage 74
4.1. Considérations préalables 74
4.2. Résultats 75
PARTIE IV – SYNTHESE DE RESULTATS ET CONCLUSIONS FINALES 76
1. Récapitulatif des résultats des parois moulées 76
1.1. Commentaires généraux 76
1.2. Commentaires sur les hypothèses de calcul 77
2. Récapitulatif des résultats du butonnage 78
3. Travail futur 79
Bibliographie 81

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de résistance de calcul du béton pour les fondations profondes 23
Tableau 2 : Contraintes admissibles dans les aciers en traction 23
Tableau 3 : Ecarts relatifs en fonction du phasage (état des lieux) 34
Tableau 4 : Ecarts en fonction de type de coupe (état des lieux) 35
Tableau 5 : Exemple d'hypothèses considérées pour les études de sensibilité. 36
Tableau 6 : Ratios de ferraillage de la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$ en fonction des hypothèses étalonnées. 48
Tableau 7 : Ecarts en fonction de type de coupe (après l'étalonnage) 50
Tableau 8 : Optimisation d'aciers en considérant l'étalonnage. 51
Tableau 9 : Optimisation d'armature moyenne en fonction de l'hypothèse étalonnée. 52
Tableau 10 : Récapitulatif des écarts après la prise en compte d'effets singuliers 59
Tableau 11 : Comparaison sur précision de la méthode appliquée. 59
Tableau 12 : Disponibilité des données pour la rétro-analyse de calcul de butons. 61
Tableau 13 : Variations de température mesurées par ouvrage 67
Tableau 14 : Rapport d'efforts mesurés et théoriques pour le buton B408 de LCO et le buton B109 de $34^{E}01$ 68
Tableau 15 : Efforts de poussée de terres utilisés pour le calcul des butons de la section 1.... 74
Tableau 16 : Gradients thermiques considérés pour les calculs des butons de la section 1..... 74
Tableau 17 : Réduction moyenne d'efforts de compression en fonction de l'hypothèse étalonnée. 75

Liste des figures

Figure 1 : Terrassement d'un ouvrage de soutènement du Grand Paris [8]. 15
Figure 2 : Loi pression-déplacement déterminée pour la méthode MISS-K [9]. 19
Figure 3 : Abaque de Chadeisson [13]. 21
Figure 4 : Chaîne inclinométrique (à gauche) [7] et schéma de calcul de déplacement horizontal avec inclinomètres (à droite) [5]. 26
Figure 5 : Extensomètre installé sur un buton de l'ouvrage $01^{E}01$ du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris. 27
Figure 6 : Ouvrages du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris. 28
Figure 7 : Méthodologie pour la rétro-analyse des parois moulées. 29
Figure 8 : Vue en plan du découpage de l'ouvrage $01^{E}01$. 31
Figure 9 : Situation de la coupe C-3 de l'ouvrage $02^{E}01$. 31
Figure 10 : Etude de la coupe C-3 de l'ouvrage $02^{E}01$: déplacements retenus en phase études et mesurés sur place. 32
Figure 11 : Etude de la coupe C-11-0 de l'ouvrage $34^{E}01$ (à gauche) et étude de la coupe C-3 de l'ouvrage LCO (à droite). ó 33
Figure 12 : Récapitulatif d'écarts moyens par ouvrage en tête et en ventre (état des lieux).... 34
Figure 13 : méthodologie pour la sélection d'hypothèses d'étude. 36
Figure 14 : Coupes type utilisées pour les études de sensibilité avec phasage descendant (à gauche) et phasage ascendant (à droite). 37
Figure 15 : Déplacement en tête en fonction du terrassé normalisé (phasage ascendant et descendant). 38
Figure 16 : Influence du niveau d'eaux de chantier en fonction du phasage 40
Figure 17 : Extrait du profil en long géologique au droit de l'ouvrage $01^{E}01$. 40
Figure 18 : Influence de la cohésion en fonction du phasage 41
Figure 19 : Influence de l'angle de frottement en fonction du phasage 42
Figure 20 : Influence du coefficient de réaction dans le ventre en fonction du phasage. 42
Figure 21 : Méthodologie pour l'étalonnage du modèle d'une coupe de calcul. 43
Figure 22 : Déplacements de la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$ sans étalonnage et plan de situation. 44
Figure 23 : Niveau piézométrique mesuré pour la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$ 45
Figure 24 : Phase de rétro-analyse de la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$. 46
Figure 25 : Aciers en flexion théoriques pour la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$ 47
Figure 26 : Comparaison des écarts moyens par ouvrage avant et après étalonnage 49
Figure 27 : Optimisation d'armature en fonction de l'hypothèse étalonnée. 52
Figure 28 : Coupes courantes et singulières de l'ouvrage LCO. 53
Figure 29 : Vue en plan de la localisation des coupes courantes et singulières de la gare LCO. 54
Figure 30 : Schéma, en plan, du fonctionnement du tympan. 55
Figure 31 : Déplacements du modèle plaque avec modélisation d'appuis latéraux 55

Figure 32 : Estimation de la longueur du développement du ventre..... 56
Figure 33 : Estimation du développement du ventre relatif. 57
Figure 34 : Effet de tympan court dans l'estimation des effets singulières. 58
Figure 35 : Méthodologie suivie pour la rétro-analyse du calcul des butons..... 61
Figure 36 : Effort mesuré (MN) pour les butons B108-B207-B313 (section S1)..... 62
Figure 37 : Situation en plan de la section S1 62
Figure 38 : Analyse du buton B207 63
Figure 39 : Effort de compression par lit de butons 63
Figure 40 : Analyse des taux des butons. 64
Figure 41 : Effet thermique sur le buton B108 de l'ouvrage $01^{E}01$. 65
Figure 42 : Gradient thermique mesurés pour les butons non-abrités des ouvrages $01^{E}01$ et LCO 66
Figure 43 : Gradients thermiques mesurés pour les butons mi-abrités de l'ouvrage $34^{E}01$ 67
Figure 44 : Degré d'autocontrainte pour appui bi-encastré du buton B-108 69
Figure 45 : Degré d'autocontrainte pour appui bi-encastré pour l'ensemble de butons 70
Figure 46 : Schéma des appuis élastiques du buton. 71
Figure 47 : Comparaison du degré de restriction du buton en fonction des conditions d'appuis considérées. 72
Figure 48 : Effet de la raideur paroi moulée-sol dans l'effort de compression d'un buton. 73
Figure 49 : Réduction des efforts de compressions dans les butons de la section 1. 75

Liste des abréviations

B_i – Lit intermédiaire de buton

EC – Niveau d'eaux de chantier

ELMC – Modèle élastique linéaire parfaitement plastique de Mohr-Coulomb

ELS – Etat Limite de Service

ELU – Etat Limite Ultime

HSM – Hardening Soil Model

FF – Fond de fouille

LCO – Gare de La Courneuve

MC – Marne et Caillasse

MEL – Modélisation aux équilibres limites

MISS-F – Modélisation aux éléments finies

MISS-K – Modélisation aux coefficients de réaction

PM – paroi moulée

SB – Sables de Beauchamp

S_i – Niveau intermédiaire en béton armé

TBM – Tunnel Boring Machine

INTRODUCTION

1. Motivation et objectifs

Le Grand Paris est un mégaprojet destiné à transformer la vie des habitants d'Ile de France et notamment de la région parisienne. Ce projet vise à améliorer leur façon de voyager en proposant des nouvelles alternatives qui peuvent corriger les inégalités territoriales.

Le projet du Grand Paris comprend la réalisation de quatre nouvelles lignes de métro ainsi que le prolongement d'une ligne déjà existante. Cela signifie la construction de 68 nouvelles gares et la mise en service de plus de 200 km de tunnel.

Ce présent projet de fin d'études porte notamment sur les travaux correspondant à l'exécution du Lot 1 de la Ligne 16, situé au nord-est de la région parisienne. Ce méga-lot consiste à la construction de 5 nouvelles gares, de 5 ouvrages d'entonnement et de 15 ouvrages annexes. Un total de 6 tunneliers permet le creusement de presque 20 km de tunnel.

Après le démarrage des travaux il y a quatre ans, on se retrouve dans un moment avec une importante partie des travaux exécutés ainsi qu'avec une quantité nombreuse des données d'auscultation. Pendant l'exécution des travaux souterrains, plusieurs systèmes d'auscultation ont été mis en place afin de vérifier les seuils d'efforts et de déplacements établis pendant la phase de conception. De plus, les données issues des campagnes d'auscultation complémentées avec d'autres sources d'information permettent d'analyser le comportement réel des ouvrages souterrains et d'améliorer les connaissances dans ce domaine.

De son côté, les phases d'études ont permis également d'obtenir des estimations du comportement des ouvrages. On se retrouve donc face à la possibilité de réaliser un retour d'expérience et d'analyser les mesures prises sur le terrain avec les estimations réalisées préalablement. De manière générale, on obtient des écarts assez importants qui mettent en évidence un surdimensionnement et donc, un surcoût associé.

Cette recherche a pour objectif de comprendre le comportement réel des ouvrages souterrains, notamment des parois moulées et du butonnage provisoire. Par ailleurs, on vise à quantifier les écarts précédemment évoqués entre les mesures d'auscultation et les estimations calculées en études. En outre, on propose certaines recommandations pour la réalisation de futurs projets.

2. Organisation du mémoire

Le présent mémoire est organisé dans quatre parties.

La première partie comprend quatre chapitres portant sur l'état de l'art concernant le calcul et le comportement des écrans de soutènement et plus concrètement des parois moulées. Le premier chapitre présente les parois moulées comme technique habituelle choisie pour la réalisation des fondations profondes du Grand Paris. Le deuxième décrit plusieurs aspects importants concernant le comportement global des parois moulées à prendre en compte

notamment dans leur conception. Le troisième chapitre explique les bases principales pour le calcul des écrans de soutènement (parois moulées et butonnage provisoires y compris). Finalement, le quatrième chapitre porte sur le suivi de comportement des écrans de soutènement grâce aux instruments d'auscultation.

La deuxième partie porte sur la rétro-analyse du calcul des parois moulées. Elle est organisée en cinq chapitres. Le premier chapitre présente les objectifs et décrit la méthodologie globale suivie. Le deuxième présente un état des lieux des écarts initiaux obtenus entre les mesures d'auscultation et les estimations calculées en phase d'études (concernant les déplacements horizontaux des parois moulées au fur et à mesure de leur terrassement). Les écarts repérés nécessitent une remise en question des hypothèses qui est abordée dans le chapitre suivant. Le troisième chapitre porte notamment sur les hypothèses de calcul à étalonner pour une modélisation aux coefficients de réaction (MISS-K) qui se rapproche mieux des déplacements observés. Il présente les études de sensibilité des hypothèses considérées ayant une influence importante dans la modélisation des parois moulées. Le quatrième chapitre consiste à la réalisation d'un étalonnage des modèles initiaux MISS-K en essayant de se rapprocher du comportement réel de parois moulées. Finalement, le cinquième chapitre présente les coupes caractérisées par un comportement singulier et propose une méthode pour l'estimation de leurs déplacements en ventre.

La troisième partie porte sur la rétro-analyse du calcul du butonnage et contient quatre chapitres. Cette partie a une structure très similaire à la deuxième partie. D'abord, un premier chapitre présente les objectifs et la méthodologie suivie. Puis, un état des lieux est dressé afin d'analyser les écarts entre les efforts des butons mesurés et calculés. Le troisième chapitre porte notamment sur les hypothèses de calcul concernant la prise en compte de l'effet thermique. Le dernier et quatrième chapitre présente un exemple d'étalonnage grâce aux recommandations proposées précédemment.

La dernière partie récapitule les conclusions les plus importantes de ce projet de fin d'études. Elle contient un premier chapitre consacré aux parois moulées et un deuxième réservé au butonnage. Finalement, un dernier chapitre présente quelques voies de travail futur.

PARTIE I – LE CALCUL ET COMPORTEMENT DES PAROIS MOULEES

1. Les parois moulées

1.1. Généralités

Le développement d'ouvrages de soutènement permet aujourd'hui la réalisation d'ouvrages souterrains dans des environnements très complexes en milieu urbain. La domination des murs-poids aux XVIIIe et XIXe siècles [10] a été rendue possible grâce à la réussite des ingénieurs dans le développement des théories expliquant le phénomène de la poussée des terres exercée sur ce type d'ouvrages. Plus tard, au début du XXe siècle, le développement des écrans de soutènement souples a conduit à une révolution dans le dimensionnement des ouvrages souterrains [10].

Les écrans de soutènement souples s'opposent à la poussée de terres en travaillant en flexion (*flexible walls*). Aujourd'hui, on maitrise de nombreuses techniques pour la réalisation d'écrans de soutènement telles que les rideaux de palplanches, les parois lutéciennes ou les parois moulées, par exemple. Ces dernières sont donc le principal sujet de ce projet de fin d'études portant notamment sur leur dimensionnement et leur calcul.

Figure 1 : Terrassement d'un ouvrage de soutènement du Grand Paris [8].

Les parois moulées (désormais PM) consistent dans panneaux verticaux juxtaposés et réalisés en béton armé, coulés avant le terrassement. Leur but est de créer une boite étanche au fur et à mesure que l'on réalise l'excavation. Cette technique propose de nombreux avantages. La liste

ci-dessous reprend les avantages les plus importants, qui font de la PM la technique retenue pour la réalisation des fondations profondes des ouvrages du Grand Paris :

- Les techniques employées permettent la réalisation des PM de grande profondeur et garantissant des déplacements horizontaux admissibles afin de limiter les tassements sur les structures avoisinantes, ce qui n'est pas faisable en utilisant d'autres techniques.
- La technique est optimale pour tout type de terrains.
- La continuité de l'écran permet aussi de contrôler la nappe phréatique.
- La PM joue un rôle d'écran de soutènement mais aussi de fondation profonde recevant les charges des dalles intermédiaires ou d'autres structures en surface.

1.2. Phasage de construction

Le phasage de construction d'un ouvrage est un aspect qui détermine son dimensionnement, tout spécialement dans les ouvrages souterrains. Le phasage peut être conditionné par plusieurs facteurs, l'utilité de l'ouvrage pendant leur phase travaux et service étant un des plus importants.

Dans la réalisation de ce type d'ouvrages, on distingue les phasages suivants :

- Ascendant (*bottom-up*) : après l'exécution des parois moulées, on réalise le terrassement de l'intérieur de la boîte et on se sert de butons métalliques provisoires pour atteindre le fond de fouille. Puis, les différents niveaux intermédiaires sont réalisés en ascendant en s'appuyant sur des étaiements.
- Descendant (*top-down*) : après l'exécution des parois moulées, on répète des cycles successifs de réalisation de dalles et de terrassement du niveau immédiatement inférieur jusqu'au fond de fouille.

Le phasage ascendant permet l'arrivée au fond de fouille de manière plus accélérée. D'un côté, l'excavation est réalisée à ciel ouvert ce qui augmente les cadences de terrassement. D'un autre côté, l'installation des butons est moins laborieuse que l'exécution d'une dalle en béton armé. Cependant, ce phasage peut produire des déplacements de la paroi majeurs, par rapport aux ouvrages avec un phasage descendant, caractérisés par l'exécution d'une dalle très raide avant de recevoir les efforts de la poussée de terres dus au terrassement postérieur.

1.3. Méthodes de calcul

Actuellement, trois types de modèles sont souvent employés pour le calcul d'écrans de soutènement :

- Modèle aux équilibres limites (MEL) : il permet le calcul de l'état d'équilibre limite pour une configuration donnée à travers l'emploi des théories dites classiques. Il est souvent utilisé pour les vérifications relatives à la fiche de l'écran et à la butée mobilisée

en ce qui concerne le calcul des écrans de soutènement souples [1]. Son utilisation aujourd'hui reste très limitée en comparaison aux modèles présentés dans la suite.

- Modèle aux coefficients de réaction (MISS-K) : la paroi est modélisée comme une poutre élastique et on impose une loi d'interaction sol-structure expliquant la relation entre la pression et le déplacement horizontal de la PM. Cette méthode nécessite de définir quatre coefficients selon les caractéristiques du sol et la géométrie de la PM. Cette méthode est présentée en détail dans le chapitre 3.

- Modèle aux éléments finis (MISS-EF) : la paroi et le massif du sol sont définis à l'aide d'un maillage (2D ou 3D). Cette méthode permet de résoudre des équations aux dérivées partielles et d'obtenir les déplacements ainsi que les contraintes dans les différents nœuds (éléments finis) du maillage. Les modèles de comportement du sol les plus souvent employés sont le modèle élastique linéaire parfaitement plastique de Mohr Coulomb (ELMC) et le modèle Hardening Soil Model (HSM).

2. Comportement global de la paroi moulée

Le comportement global d'une paroi moulée détermine le fonctionnement de cette structure pendant les phases d'exécution et d'exploitation. Dans les parties qui suivent, on présente certains aspects clés à déterminer dans la phase de prédimensionnement de la PM, permettant ainsi d'assurer sa stabilité.

2.1. Fiche

La fiche d'une paroi moulée correspond à sa partie inférieure sous le radier, celle-ci étant enterrée pendant la durée de vie de l'ouvrage. On peut distinguer la fiche mécanique et la fiche hydraulique. La première a pour but de contribuer à la résistance structurelle de l'écran et sa côte détermine l'arase inférieure des cages d'armature. La seconde a pour objet de s'ancrer dans une couche moins perméable afin de rendre l'intérieur de l'ouvrage plus étanche et d'améliorer les conditions hydrauliques pendant les phases travaux et éviter des problèmes d'instabilité de fond de fouille. Dans certaines occasions, où les couches perméables sont très profondes, on peut opter pour la réalisation d'une jupe injectée dont le but est le même.

On s'intéresse donc principalement à la longueur de la fiche mécanique déterminant les distributions des pressions, des moments fléchissant et des déplacements horizontaux de la PM. Blum [6] a montré, d'une façon qualitative, l'influence de la longueur de la fiche sur le comportement d'un écran de soutènement ancré en tête par un lit de tirants. Il a donc constaté que les ouvrages présentant une fiche courte seront simplement butés par le sol et que l'augmentation de la fiche conduit à la création d'un encastrement de l'écran dans le sol.

L'objectif est alors de trouver la fiche la plus courte permettant la mobilisation d'un encastrement en pied de l'écran. Dans un prédimensionnement, un bon point de départ est la proposition d'une fiche mécanique égale à 30% de la hauteur totale de l'écran. Celle-ci peut

être ajustée afin de vérifier la butée mobilisée et la faible rotation en pied de l'écran. Cet exercice est actuellement favorisé grâce au développement des outils numériques.

2.2. Epaisseur de l'écran

L'épaisseur de l'écran joue un rôle fondamental dans le prédimensionnement car il détermine, d'une certaine façon, la rigidité de l'ensemble de l'ouvrage. D'un côté, il faut garantir une rigidité suffisante pouvant limiter les déplacements en tête et en ventre afin de respecter les conditions imposées pour les états limites de service. D'un autre côté, une rigidité trop élevée génèrera des sollicitations très importantes qui augmenteront la quantité d'acier et de béton employée. Trouver l'équilibre entre ces deux conditions afin d'optimiser le dimensionnement est donc essentiel.

2.3. Appuis intermédiaires

La conception d'un ouvrage souterrain est un exercice complexe qui nécessite la définition des différents niveaux intermédiaires, notamment sur les écrans de soutènement étudiés dans ce projet étant caractérisés par des profondeurs importantes. Ces niveaux intermédiaires peuvent être définitifs, tels que les dalles coulées ou liernes en béton armé, ou provisoires, tels que les butons métalliques ou les ancrages, par exemple.

Dans cet exercice de conception, il faut prendre en compte plusieurs aspects de l'ouvrage tels que son utilisation en phase travaux et en phase définitive, son phasage de réalisation ou les moyens nécessaires pour respecter celui-ci. Cela permet de définir le nombre d'appuis, la distance verticale entre eux et leurs raideurs minimales nécessaires.

Pour la phase travaux, les appuis les plus utilisés sont les dalles pleines en béton armé, les liernes en béton armé avec trémies, les butons provisoires et les ancrages.

3. Calcul des écrans de soutènement

3.1. Parois moulées

3.1.1. Méthode aux coefficients de réaction

Principe de la méthode

La méthode d'interaction sol-structure aux coefficients de réactions (désormais MISS-K) associe le modèle d'une poutre en flexion représentative de l'écran et celui d'une distribution de ressorts juxtaposés élasto-plastiques représentative de l'interaction sol/écran [15].

Le comportement en flexion de la poutre représentative de l'écran peut être décrit à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{d^2}{dz^2}\left(EI_i\frac{d^2w_i}{dz^2}\right) + Rc_i \cdot w_i = q_i^{ext} - \left(r_i^d - r_i^g\right) - r_i^a$$

Avec :

- w_i : flèche (déplacement transversal) de l'écran « i » (positive vers la droite) [m];
- EI_i : produit d'inertie de l'écran « i » [kNm²/m];
- Rc_i : rigidtié cylindrique de l'écran « i » [kN/m³] ;
- r_i^d : densité de la réaction horizontale du sol côté droite de l'écran « i » [kN/m/m];
- r_i^g : densité de la réaction horizontale du sol côté gauche de l'écran « i » [kN/m/m];
- r_i^a : densité de la réaction horizontale des ancrages connectés à l'écran « i » [kN/m/m];
- q_i^{ext} : densité horizontale des charges extérieures appliquées sur l'écran « i » [kN/m/m].

La loi d'interaction sol-écran détermine la relation entre l'incrément de pression et l'incrément de déplacement horizontal le long de la paroi. Haliburton [10] a proposé un modèle de réaction linéaire du sol en intégrant des seuils correspondant aux états d'équilibre limites de poussée et de butée. Ce modèle est présenté dans la Figure 2.

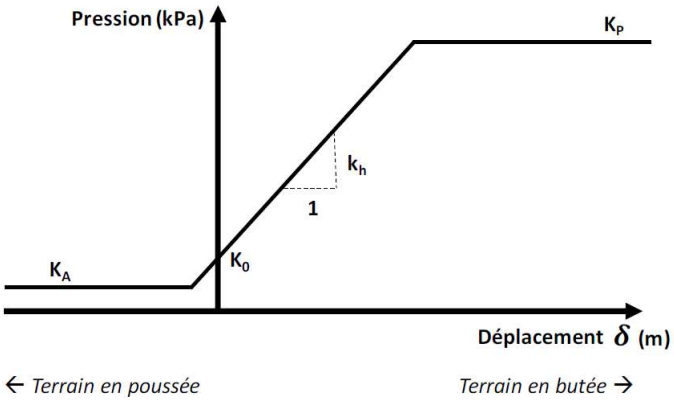


Figure 2 : Loi pression-déplacement déterminée pour la méthode MISS-K [9].

Cette méthode permet en particulier la prise en compte de conditions aux limites variées ainsi que de multiples niveaux d'appuis pouvant être traités comme des appuis élastiques ou encore comme des déplacements imposés. Elle permet par ailleurs, à la différence des méthodes classiques, d'obtenir les distributions d'efforts sur l'écran pour différentes configurations de l'ouvrage.

Estimation des coefficients

La définition de la loi d'interaction sol/écran nécessite l'estimation de quatre paramètres : le coefficient des terres au repos k_0, le coefficient de poussée k_a, le coefficient de butée k_p et le coefficient de réaction k_h.

Coefficient des terres au repos

Ce coefficient est un paramètre de comportement, toutefois il n'est pas intrinsèque à un matériau. En effet, les expérimentations ont montré qu'il dépend des propriétés du sol et de l'histoire des contraintes horizontale et verticale [12].

En prenant l'hypothèse d'un sol normalement consolidé, l'utilisation de l'élasticité linéaire isotrope conduit à l'expression :

$$k_0 = \frac{\nu'}{1 - \nu'}$$

Compte tenu des valeurs généralement attribuées à ν' cette formule peut conduire à des estimations peu réalistes de k_0. Jaky [12] a ainsi étudié de façon théorique la stabilité d'un massif avec le critère de Mohr-Coulomb et a établi la valeur du k_0 à l'équilibre limite. L'expression habituellement simplifiée et utilisée est connue comme la formule de Jaky :

$$k_0 = 1 - \sin \varphi'$$

Coefficient de poussée et butée des terres

Les coefficients de poussée et butée des terres ont été initialement étudiés par les méthodes classiques développées par Coulomb, Rankine et Caquot & Kérisel [11].

La théorie de Coulomb est la plus ancienne et donne des résultats acceptables pour le calcul de la poussée des sols sans cohésion [11]. Le développement postérieur de la théorie de Rankine ainsi que la résolution d'équation de Boussinesq par Caquot & Kérisel ont permis d'obtenir ces paramètres en prenant en compte la cohésion du sol ainsi que l'interaction entre le sol et l'écran.

$$k_a = tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2}\right) - \frac{2 \cdot c \cdot \sqrt{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2}\right)}}{\gamma' \cdot z}$$

$$k_p = tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right) + \frac{2 \cdot c \cdot \sqrt{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right)}}{\gamma' \cdot z}$$

Coefficient de réaction

La méthode aux coefficients de réaction nécessite la détermination de ce dernier paramètre. Sa particularité est qu'il ne s'agit pas d'un paramètre intrinsèque du sol car il dépend de l'inertie de l'écran. Dans la littérature, plusieurs formules sont proposées pour le déterminer. Les approches les plus couramment employées sont présentées ci-dessous.

- Approche de Balay : méthode basée sur la théorie du calcul de tassement superficiels. Cette théorie montre qu'il n'y a pas d'uniformité du champ de pression et du tassement [11].

$$\frac{1}{k_h} = \frac{1}{E_M}\left[\frac{(\alpha \cdot a)}{2} + 0.133(9a)^{\alpha}\right]$$

Avec :

- α : coefficient rhéologique du sol ;
- E_M : module pressiométrique exprimé en MPa ;

- a : paramètre dimensionnel exprimé en mètres ;

- Approche de Schmitt : proposition empirique basée sur l'observation de parois moulées instrumentées [11]. Cette approche est celle utilisée pour la modélisation des parois moulées du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris.

$$k_h = 2\frac{\left(\frac{E_M}{\alpha}\right)^{4/3}}{\left(\frac{E_{PM}\cdot I_{PM}}{B_0}\right)^{1/3}}$$

Avec :

- α : coefficient rhéologique du sol ;
- E_M : module pressiométrique exprimé en MPa ;
- E_{PM} : module du matériau constituant la PM exprimé en MPa ;
- I_{PM} : inertie du soutènement exprimé en m^4.
- B_0 : largeur de référence prise égale à 1 m.

- Approche de Chadeisson : l'emploi de l'abaque de Chadeisson permet d'obtenir le coefficient de réaction en fonction de la cohésion et de l'angle de frottement [11].

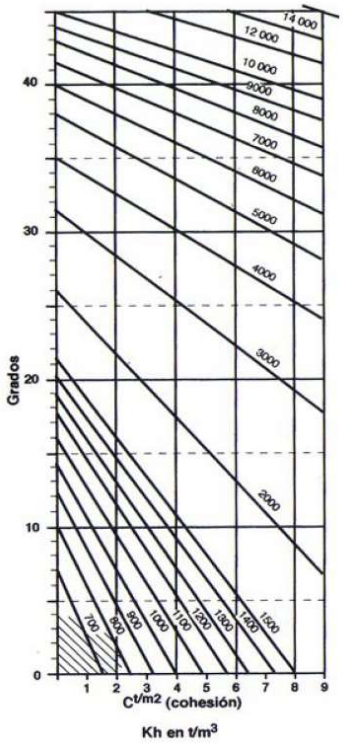


Figure 3 : Abaque de Chadeisson [13].

Calcul des déplacements et sollicitations

L'emploi d'outils numériques facilite grandement la résolution des équations considérées par la méthode aux coefficients de réaction. La résolution est faite de façon itérative jusqu'à la convergence du vecteur déplacement (constitué par les déplacements et les rotations de chaque nœud de la poutre) pour une configuration donnée, en fonction de la géométrie, de la géotechnique et du phasage [15].

Une fois les déplacements obtenus, la poussée de terres peut être calculée en tout nœud de chaque élément grâce à la loi de comportement sol-écran définie préalablement dans la Figure 2 (la poussée de terres totale permet finalement de calculer les efforts tranchant et fléchissant sur la paroi).

3.1.2. Dimensionnement du ferraillage

Dans les chapitres précédents, on a introduit quelques considérations relatives à la conception des parois moulées telles que la détermination de la fiche, l'épaisseur et les appuis intermédiaires. Cependant, il est aussi nécessaire de garantir l'intégralité structurelle des PM. Cette section est donc consacrée au dimensionnement du ferraillage des PM à partir de résultats des sollicitations issues des modèles MISS-K préalablement présentés.

On présente uniquement certaines considérations spécifiques pour le dimensionnement en béton armé de fondations profondes d'après la norme NF P 94-262 [4] et NF P 94-282 [1]. Cependant, on remarque que le dimensionnement du ferraillage des parois moulées nécessite également la prise en compte des considérations générales telles que le décalage de la courbe du moment, l'écrêtage d'effort fléchissant ou l'écrêtage d'effort tranchant, parmi autres. Ces considérations sont suivies d'après la norme NF EN 1992-1-1 [2] pour les structures en béton armé.

Considérations spécifiques des ouvrages de soutènement

Résistance de calcul du béton

La résistance du calcul du béton est calculée d'après l'expression suivante :

$$f_{cd} = \min(\alpha_{cc} k_3 \frac{f_{ck}^*}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{f_{ck}(t)}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{C_{max}}{\gamma_c})$$

Avec :

- $\alpha_{cc} = 1.00$;
- $k_3 = 1.20$;
- f_{ck}^* : résistance caractéristique du béton à la compression des fondations profondes ;
- $f_{ck}(t)$: résistance caractéritique du béton à la compression pour l'instant considéré ;
- C_{max} : paramètre qui tient compte des sujétions de mise en œuvre du béton ;

Tableau 1 : Valeurs de résistance de calcul du béton pour les fondations profondes

Situation ELU	Durable ou transitoire	Accidentelle
γ_c	1.50	1.20
$f_{cd}(MPa)$	20.5	25.6

Limitation de l'ouverture de fissure

La norme NF P 94-262 [4] définit les valeurs limites admissibles pour l'ouverture de fissure en fonction du contact du parement de la paroi avec le terrain :

- Parement externe sans revêtement d'étanchéité : $w_k = 0.2\ mm$.
- Parement interne : $w_k = 0.3\ mm$.

Contraintes admissibles des aciers à l'état limite de service quasi-permanent

La contrainte de traction admissible dans les aciers à traction est $\sigma_{s,max} = 1000 \cdot w_{max}$. Les valeurs de calcul sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Contraintes admissibles dans les aciers en traction

Parement	Interne	Externe
$w_{max}(mm)$	0.2	0.3
$\sigma_{s,max}(MPa)$	200	300

3.2. Butonnage

3.2.1. Choix de la section

Les butons métalliques sont généralement utilisés en tant qu'appuis provisoires en ouvrages réalisés par phasage ascendant. Leur intérêt consiste à permettre une arrivée au fond de fouille rapide après l'installation de plusieurs lits de butons au fur et à mesure du terrassement et la maitrise de la déformation des parois moulées.

La première question que l'on se pose pour le calcul de butons est liée au choix de la section de ceux-ci. Chaque lit de butons doit accomplir deux conditions :

1. Le lit de butons doit avoir une telle raideur moyenne par mètre linéaire capable de tenir la paroi moulée avec des déplacements estimés en-dessous des seuils établis pour des raisons fonctionnelles.

2. La section du buton doit avoir une aire d'acier capable de garantir son intégralité structurelle. Les vérifications comprennent notamment la compression simple avec la prise en compte du flambement.

Un dimensionnement optimal des butons doit donc garantir d'une façon cohérente et équitable ces deux critères de déformabilité et de résistance structurelle.

3.2.2. Actions agissant sur les butons

Les butons métalliques sont soumis à deux actions principales : la poussée de terres et l'effet thermique. On présente ceux deux actions ci-dessous.

Poussée de terres

La poussée de terres produit des déplacements des parois moulées vers l'intérieur de l'ouvrage. Cette déformation subit donc une augmentation dans la compression des butons installés, qui s'opposent à la poussée et essayent de contrôler les déplacements de la paroi.

On peut donc se servir des modèles MISS-K pour le calcul de parois moulées afin d'estimer les déplacements au niveau des butons et ainsi calculer les efforts de compressions de ceux-ci.

Effet thermique

Pour la prise en compte de l'effet thermique, on définit gradients thermiques de calcul en fonction de la couleur du buton (peint en blanc ou pas) et de son exposition au soleil (abrité, mi-abrité ou non-abrité).

Pour la définition des gradients thermiques de calcul, il faut d'abord tenir compte de la température d'installation du buton qui va déterminer le point de départ à partir duquel on considère le gradient thermique positif ou négatif. En réalité, il n'est pas possible d'anticiper cette température d'installation qui peut varier grandement le long de la journée. Les gradients thermiques généralement considérés sont donc assez défavorables vis-à-vis de l'incertitude et la variabilité de la température d'installation de butons.

Une fois que le gradient thermique est déterminé, on fait l'hypothèse de buton bi-encastré dans ses extrémités pour le calcul de l'effort thermique. L'expression utilisée pour le calcul de cet effort est :

$$N^{\theta}_{théorique} = E_{acier} \cdot A_{eff} \cdot \alpha_{acier} \cdot \Delta T$$

Avec :

- E_{acier} : module de Young de l'acier ;
- A_{eff} : section effective du butons ;
- α_{acier} : coefficient thermique de dilation de l'acier ;
- ΔT : gradient thermique de calcul ;

Cette hypothèse est très sécuritaire car elle ne tient pas compte du comportement réel de la paroi moulée et du sol, qui sont élastiques. Le buton n'est pas donc bi-encastré. Ce point sera étudié dans le chapitre 3 de la Partie III.

4. Suivi du comportement des écrans de soutènement

4.1. Principe des auscultations

La conception des ouvrages géotechniques implique la réalisation de modèles et la prise en compte de nombreuses hypothèses essayant de décrire le comportement de tels ouvrages dans leur environnement. Les instruments d'auscultation permettent de vérifier le comportement des ouvrages et de remettre en question certaines hypothèses sur lesquelles les calculs sont basés.
Par ailleurs, les données des instrumentations ainsi que d'autres sources d'information recueillies pendant la réalisation des travaux du lot 1 de la ligne 16, ont permis d'amener à terme ce projet de fin d'études dont le but est de mieux maitriser le comportement des ouvrages souterrains.

Les méthodes d'auscultation employées pour les rétro-analyses réalisées dans les Partie II et Partie III sont détaillées dans la suite.

4.2. Méthode des auscultations

4.2.1. Inclinomètres

Les inclinomètres permettent la mesure des déplacements horizontaux des structures verticales, notamment des parois moulées dans le cadre de ce projet. La prise de cette mesure nécessite l'installation préalable, à l'intérieur de la PM, d'un tube rainuré dans deux directions perpendiculaires. Pour la mesure des déplacements horizontaux, on s'intéresse uniquement à l'axe perpendiculaire à la paroi.

Pour effectuer une lecture sur un inclinomètre, la sonde est d'abord insérée dans le tube de l'inclinomètre, descendue jusqu'au fond et connectée à un indicateur numérique [9]. Puis, la circulation d'une sonde de 500 mm de longueur avec un pas de mesure égal à la longueur de la sonde permet de mesurer l'inclination de la sonde par rapport à la verticale à chaque pas. En calculant, à chaque pas de mesure, l'écart que fait l'extrémité supérieure de la sonde par rapport à la verticale passant par l'extrémité inférieure et en cumulant les déplacements élémentaires, on détermine la position du tube par rapport à la verticale issue du pied du tube [5]. Afin de limiter l'erreur systématique liée au calibrage de la sonde, la sonde est retournée de 180° et réinsérée dans le tube pour reprendre les mesures à partir du fond du tube [9]. Les données sont stockées dans une unité de lecture.

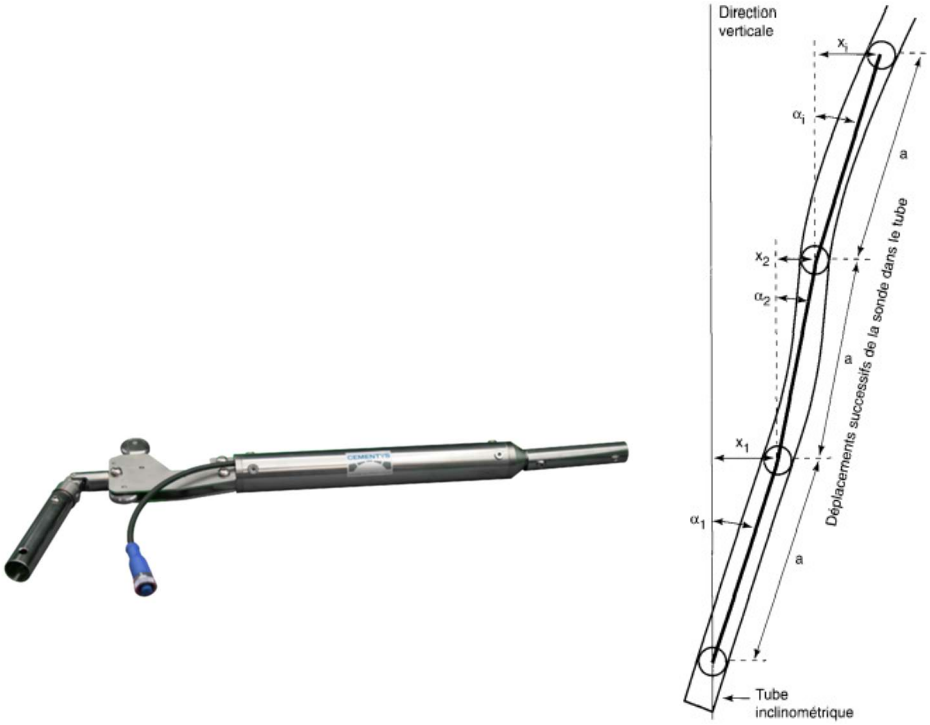


Figure 4 : Chaîne inclinométrique (à gauche) [7] et schéma de calcul de déplacement horizontal avec inclinomètres (à droite) [5].

La précision des mesures inclinométriques dépendent notamment des fournisseurs mais les valeurs actuelles sont autour de ± 1 mm/m, ce qui donnerait une précision de ±4 mm en tête pour une paroi moulée type du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris avec des longueurs atteignant les 40 m de profondeur [9].

4.2.2. Cibles topographiques

Les cibles topographiques permettent de mesurer les déplacements des certains points à l'aide d'une station totale ou d'un théodolite. Ces cibles consistent à des prismes installés sur des éléments très divers tels que les bâtiments avoisinants, le terrain naturel autour des fouilles ou les structures potentiellement sensibles (viaducs ferroviaires ou ponts routiers). De plus, les cibles topographiques sont habituellement installées aux différents niveaux des parois afin de contrôler les déplacements de celles-ci au fur et à mesure du terrassement de l'ouvrage.

Les cibles sur les parois moulées sont aussi installées en tête des inclinomètres permettant ainsi la vérification de leurs déplacements horizontaux (on rappelle que les mesures des inclinomètres sont prises du fond du tube vers la tête de la paroi et l'erreur totale est donc cumulée en tête).

4.2.3. Extensomètres

L'extensomètre ou capteur d'allongement permet de mesurer la déformation de l'élément où on l'installe. Dans le cadre de ce projet, on s'intéresse aux extensomètres mis en place sur les butons métalliques des parois moulées. Ce type d'instrumentation permet de calculer la

déformation locale de butons mais aussi d'en déduire les contraintes et les efforts de compression dans chacun d'eux.

La mise en place des butons métalliques est très sensible aux défauts d'installation. En premier lieu, il est important de mettre en œuvre les capteurs d'allongement quand le buton est toujours en état de repos. Une erreur typique est de prendre la mesure zéro quand le buton est déjà en état de compression. En deuxième lieu, il serait très intéressant de réaliser un suivi de la température d'installation des butons qui permettrait de réaliser une analyse très complète en rétrospective du comportement des butons face aux effets thermiques. Pourtant, ce type de données n'est pas toujours disponible comme cela est expliqué dans la Partie III consacrée à la rétro-analyse du butonnage.

Figure 5 : Extensomètre installé sur un buton de l'ouvrage 01^{E}01 du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris.

PARTIE II – RETRO-ANALYSE DU CALCUL DES PAROIS MOULEES

1. Introduction

1.1. Objet

L'objet de cette deuxième partie est de réaliser une rétro-analyse du calcul des parois moulées basée sur les mesures inclinométriques enregistrées dans les ouvrages du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris.

On trouve très souvent des écarts entre les mesures inclinométriques et les déformées théoriques des parois moulées. Dans cette partie II, on analyse ces écarts afin de comprendre le comportement réel des écrans et on essaie de formuler des recommandations permettant d'améliorer le dimensionnement dans de futurs projets.

1.2. Ouvrages étudiés

Parmi les nombreux ouvrages réalisés dans le Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris, ceux étudiés ont été sélectionnés pour des raisons de disponibilité des données, d'avancement de travaux et d'intérêt particulier de l'ouvrage.

Les ouvrages analysés sont les ouvrages d'entonnement $01^{E}01$, $02^{E}01$ et $34^{E}01$, l'ouvrage annexe 3303P et la gare de La Courneuve (LCO). La situation de ces ouvrages est indiquée dans la Figure 6.

Les ouvrages sont présentés en détail sans l'Annexe 1.

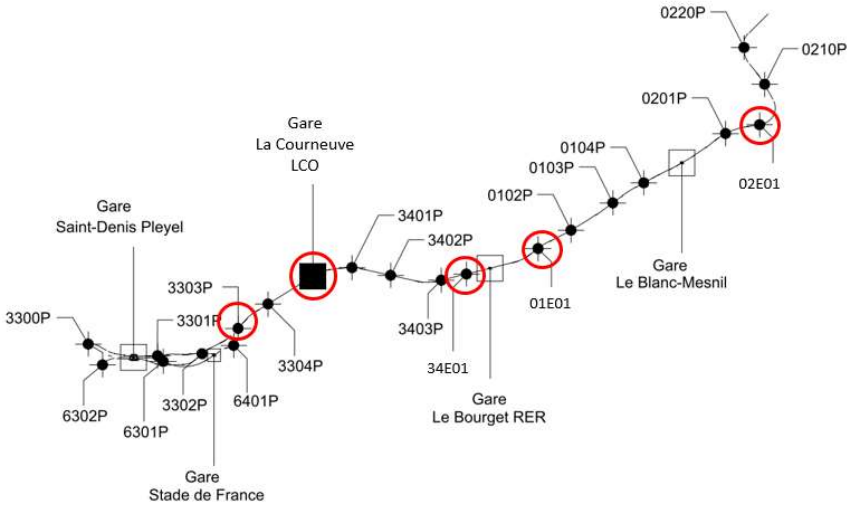


Figure 6 : Ouvrages du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris.

1.3. Méthodologie

Dans le cadre de cette rétro-analyse des parois moulées, on définit plusieurs étapes permettant de suivre une démarche logique et compréhensible du travail réalisé.

D'abord, on réalise un état des lieux permettant de comparer les mesures inclinométriques issues des campagnes d'auscultation avec les déformées issues des modèles de calcul MISS-K générés en phase de dimensionnement. Cette étape permet de mener une première évaluation des écarts trouvés en termes de déplacements horizontaux en tête et en ventre ainsi que de détecter certains patrons dans les déformées des parois moulées. En outre, cet état des lieux a également pour but de faciliter l'identification des possibles défauts d'hypothèses.

En fonction des résultats de cette première étape, on remet en question certaines hypothèses du calcul. L'objectif est de quantifier à quel point certaines hypothèses peuvent exercer une influence significative dans les résultats des modèles aux coefficients de réaction. Ainsi, on peut garder les hypothèses ayant le plus impact sur les calculs des coupes des ouvrages analysés.

A partir des résultats obtenus, un étalonnage est réalisé pour chaque coupe de calcul en essayant de réduire les écarts repérés préalablement. L'étalonnage permet ainsi de se rapprocher du comportement réel de la PM.

Parmi autres, cet étalonnage nous amène également à l'identification et l'étude postérieure de coupes singulières avec la prise en compte d'effets de bord. Une méthode est proposée dont le but est d'estimer l'influence de ces effets tridimensionnels générés par la proximité à des zones de discontinuité.

Globalement, la méthodologie décrite permet de détecter les hypothèses ayant le plus d'influence dans le calcul de PM, de comprendre leur comportement et de tirer des conclusions applicables dans d'autres projets similaires.

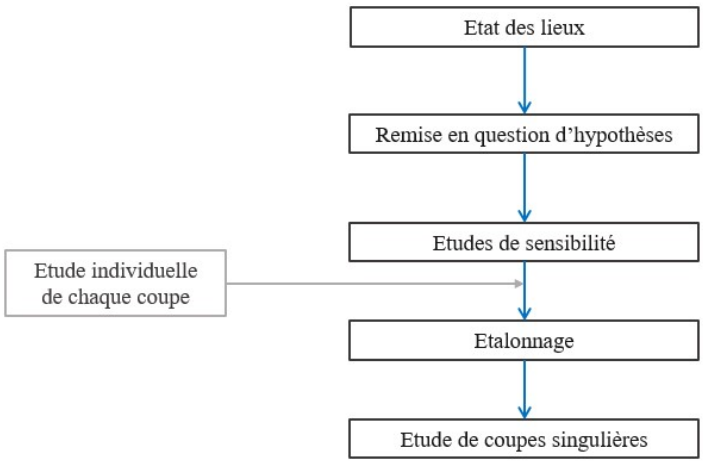


Figure 7 : Méthodologie pour la rétro-analyse des parois moulées.

2. Etat des lieux

2.1. Données disponibles

Ce projet de fin d'études dépend notamment de la disponibilité des mesures d'auscultation. Dans cette Partie II, les mesures inclinométriques permettent principalement d'accomplir la première étape de la rétro-analyse, l'état des lieux.

Pour les ouvrages sélectionnés, on dispose globalement de mesures inclinométriques depuis les premières phases de terrassement jusqu'à l'arrivée au fond de fouille ($01^{E}01$), au coulage du radier (LCO) ou au retrait de butons provisoires des lits inférieurs ($34^{E}01$, $02^{E}01$, 3303P).

En règle générale, les écarts calculés entre les inclinomètres et les modèles sont toujours par rapport à la dernière phase dont les données sont disponibles. En effet, c'est toujours la phase la plus défavorable parmi les phases analysables. Le reste des phases antérieures servent à vérifier les mouvements de la paroi tout le long des phases de terrassement.

La disponibilité des mesures d'auscultation complémentaires telles que les prismes de couronnement (δ_{prisme}), permet de vérifier leur corrélation avec les mesures inclinométriques en tête ($\delta_{tête}$), ce qui confère un degré de fiabilité important. Cependant, ces prismes ne sont pas toujours installés et peuvent être parfois endommagés.

Dans les cas pertinents, on a effectué la correction Δ_{total} suivante :

$$\Delta_{total} = \frac{\delta_{prisme} - \delta_{tête}}{2}$$

En suivant cette expression, on repartit équitablement la confiance de chacune des mesures disponibles (inclinomètre et prisme de couronnement). La correction en tête Δ_{total} est distribuée de manière linéaire sur toute la hauteur de la paroi en admettant que l'erreur se cumule du pied à la tête.

2.1.1. Coupes de calcul et pré-étalonnage

Le procès de calcul et de dimensionnement des parois moulées d'un ouvrage souterrain nécessite la définition de coupes de calcul. Ce découpage permet de distinguer les coupes en fonction de leurs caractéristiques particulières qui sont donc soumises à des contraintes différentes. Les caractéristiques considérées habituellement sont : le niveau de fond de fouille, l'épaisseur de la PM, les surcharges à l'arrière de la PM, les niveaux d'appuis intermédiaires provisoires et définitifs, la stratigraphie, les niveaux d'eaux et le phasage. On réalise alors que le découpage d'un ouvrage est unique. A titre d'exemple, on présente dans la Figure 8, le découpage considéré pour l'ouvrage $01^{E}01$, chaque tronçon coloré représente une coupe de calcul.

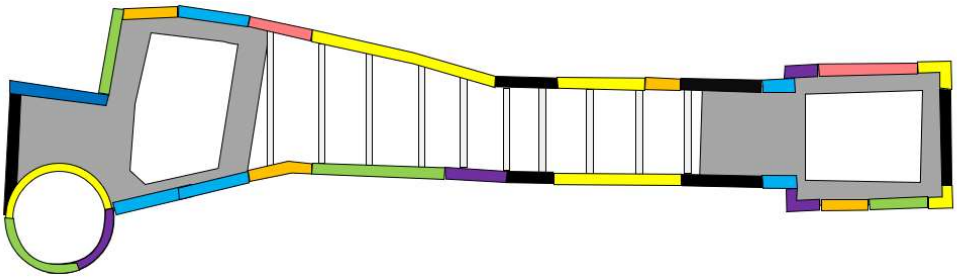


Figure 8 : Vue en plan du découpage de l'ouvrage 01^{E}01.

Les coupes mesurent toujours plusieurs mètres de longueur et leurs rigidités intermédiaires ne sont jamais constantes le long de la coupe (notamment à cause de la présence de trémies et butons espacés par une distance qui n'est pas toujours constante). Pour l'élaboration des modèles MISS-K, il faut toujours considérer le point de la coupe le plus pénalisant. On pourrait comparer directement les résultats de ces modèles initiaux avec les mesures inclinométriques si les inclinomètres étaient installés aux endroits critiques de la coupe.

Cependant, les inclinomètres ne sont pas toujours installés au droit de ces points défavorables et un ajustement de chaque modèle est nécessaire afin de pouvoir le comparer aux mesures des inclinomètres. Cet ajustement ne concerne que les raideurs de liernes en béton armé ainsi que des butons.

Une fois le pré-étalonnage réalisé, on peut procéder à l'analyse des écarts entre les inclinomètres et les modèles. Cette analyse est présentée dans la suite de ce mémoire.

2.2. Résultats

Les résultats de l'état des lieux sont indiqués ci-dessous. D'abord, une analyse particulière de trois coupes est réalisée. Puis, on présente les résultats généraux à l'échelle globale.

2.2.1. Analyse particulière

L'analyse particulière a pour objet de comprendre les mouvements de la paroi selon les différentes phases de terrassement pour chaque coupe de calcul étudiée. Avant de se lancer dans une analyse globale, on présente plusieurs exemples pour aider à comprendre les déplacements d'une PM. Pour cela, on prend d'abord la coupe C-3 avec l'inclinomètre 57 de l'ouvrage 02^{E}01 comme premier exemple.

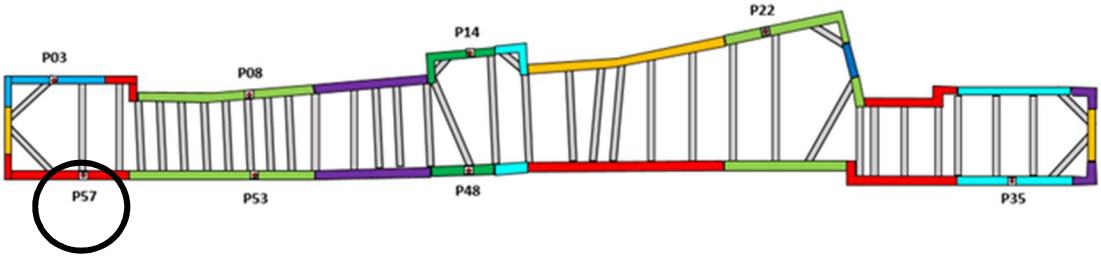


Figure 9 : Situation de la coupe C-3 de l'ouvrage 02^{E}01.

La coupe C-3 se trouve dans le tympan ouest, comme indiqué sur la Figure 9. Le phasage est caractérisé par l'exécution des premiers niveaux en descendant (dalle de couverture et dalle S1). Puis, le fond de fouille est atteint après la pose des lits de butons B2 et B3. Finalement, le radier est réalisé et les butons sont déposés (dernière phase analysée).

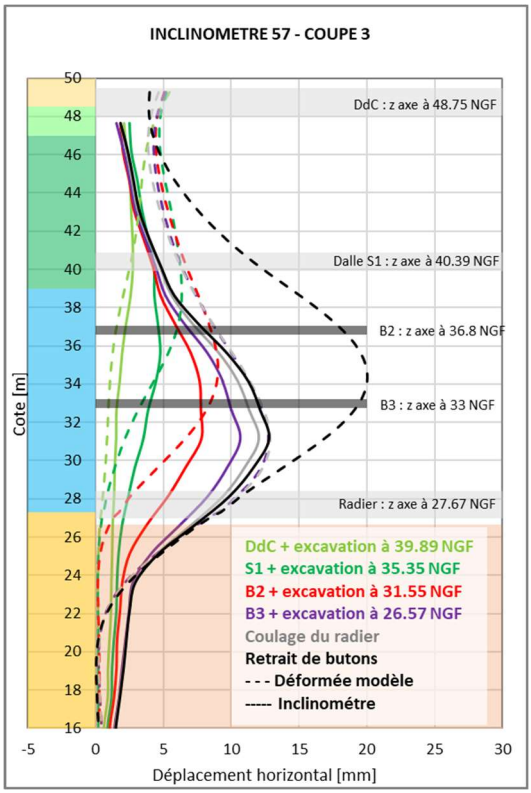


Figure 10 : Etude de la coupe C-3 de l'ouvrage 02^{E}01 : déplacements retenus en phase études et mesurés sur place.

Les déplacements horizontaux de la paroi constatés sont cohérents avec le phasage et les déformées du modèle MISS-K. Les écarts semblent être plus ou moins contrôlés sauf pour la dernière phase correspondante au retrait des butons. Les écarts à cette dernière phase sont à peu près de 50% en tête et de 40% en ventre.

On observe que les déplacements en tête sont généralement très réduits. Si l'on utilise l'expression ci-dessous pour le calcul des écarts, ε, on remarque qu'ils sont très sensibles et dépendent notamment du déplacement estimé δ_{MISS-K}.

$$\varepsilon = \frac{|\delta_{MISS-K} - \delta_{mesuré}|}{\delta_{MISS-K}}$$

Il est donc conseillé de regarder les écarts absolus en tête. Pour cette même coupe, on constate un écart absolu en tête d'environ 2 mm qui semble *a priori* plus acceptable.

La Figure 11 permet d'observer la disparité en ce qui concerne la précision des modèles MISS-K. A titre d'exemple, on présente la coupe 11-0 de l'ouvrage 34^{E}01 et la coupe 3 de la gare LCO.

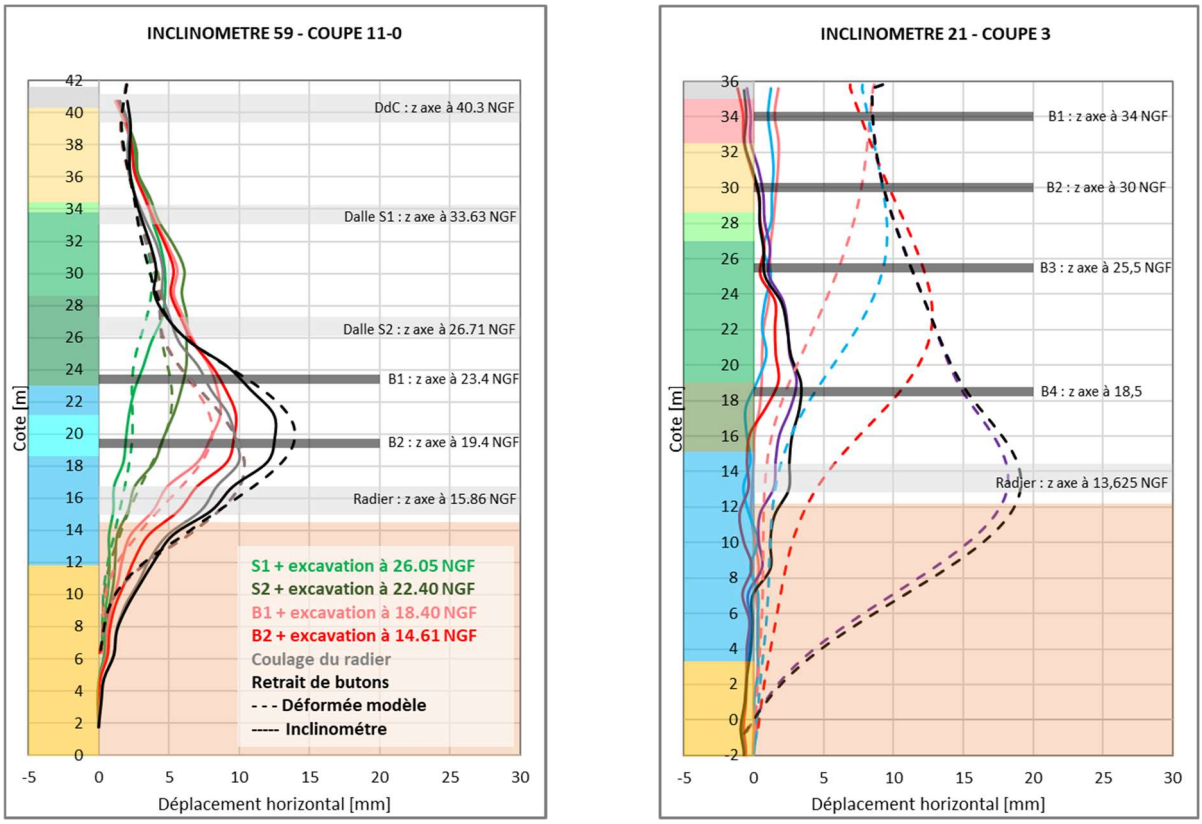


Figure 11 : Etude de la coupe C-11-0 de l'ouvrage 34^{E}01 (à gauche) et étude de la coupe C-3 de l'ouvrage LCO (à droite).

La coupe 11-0 située dans la partie centrale de l'ouvrage 34^{E}01 et caractérisée par un phasage descendant montre une bonne corrélation entre les mesures inclinométriques et les déformées des modèles. L'estimation de déplacements pendant le terrassement reste toujours dans des valeurs acceptables avec un écart final nul en tête et de 10% en ventre.

La coupe 3 de la gare LCO se trouve dans le tympan ouest de l'ouvrage et est caractérisée par un phasage ascendant. Les écarts sont très importants, supérieurs à 80% sur toute la hauteur de la PM, et décrivent un comportement singulier de la coupe.

Cette analyse particulière montre donc des comportements différents pour chaque coupe et est utile afin de vérifier la cohérence des mesures pendant les phases de terrassement. Cependant, elle n'est pas suffisante pour tirer de conclusions générales. Une analyse globale est nécessaire et détaillée dans la section suivante.

2.2.2. Analyse globale

Cette section poursuit l'élaboration d'un récapitulatif de résultats globaux de l'état des lieux. Après avoir étudié chaque coupe, on analyse les résultats par ouvrage et en fonction du phasage, entre autres.

Le Figure 12 récapitule, par ouvrage, les écarts en tête et en ventre de tous les inclinomètres analysés dans ce projet.

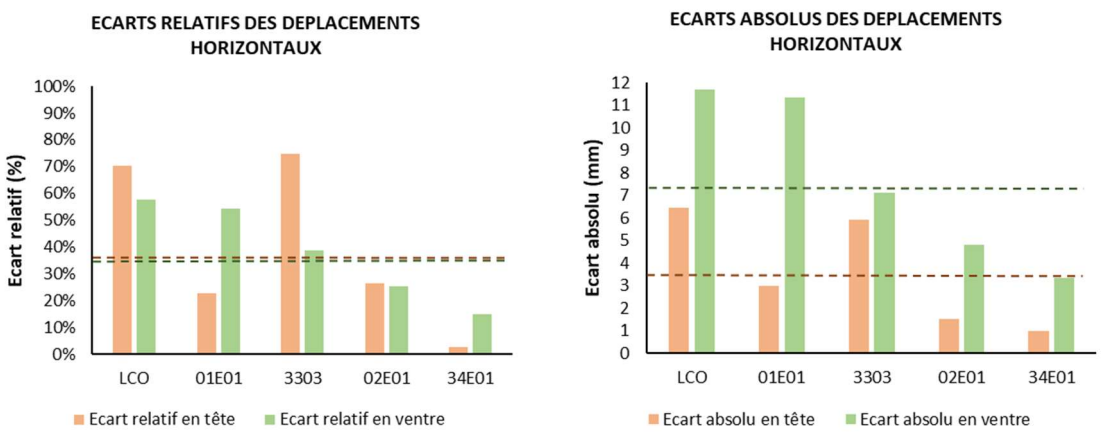


Figure 12 : Récapitulatif d'écarts moyens par ouvrage en tête et en ventre (état des lieux).

Un total de 36 inclinomètres ont été étudiés avec leurs coupes de calcul correspondantes. De manière générale, on constate un écart relatif moyen favorable en tête et en ventre d'environ 35%. C'est-à-dire que les déplacements sont inférieurs de 35% aux déformées calculées en phase études par les modèles MISS-K.

Les écarts en ventre les plus importants correspondent à la gare LCO et à l'ouvrage 01^{E}01 dont les écarts relatifs sont supérieurs à 50%. Ce phénomène peut être expliqué si on regarde leur phasage. La stabilité de la plupart de l'ouvrage, en phase travaux, est garantie par la mise en place de butons provisoires installés au fur et à mesure du terrassement (phasage ascendant). Ces butons provisoires sont généralement moins raides que les dalles en béton, même avec l'existence de trémies, ce qui explique que ces ouvrages soient plus sensibles face aux défauts d'hypothèses. Dans le cas opposé, la réalisation d'une dalle de couverture, avant de commencer le terrassement, apporterait une raideur plus élevée à l'ensemble de la PM de l'ouvrage.

Cette affirmation est évidemment aussi valable pour le comportement des parois en tête. On constate donc que les écarts absolus en tête sont plus importants dans les mêmes ouvrages mentionnés précédemment, à l'exception de l'ouvrage 3303. Ce dernier cas particulier est analysé dans le chapitre 4.

Ces idées peuvent être contrastées si l'on analyse, cette fois-ci, les écarts de toutes les coupes en fonction du phasage (car un ouvrage peut avoir des coupes avec phasages différents). Dans le Tableau 3, on présente les résultats en fonction du phasage pour confirmer ce qui a été précédemment exposé.

Tableau 3 : Ecarts relatifs en fonction du phasage (état des lieux)

PHASAGE	No de cas	Ecart relatif en tête (%)	Ecart relatif en ventre (%)
Ascendant	14	56.9%	45.0%
Descendant	22	23.0%	31.1%

Le Tableau 3 montre que les écarts dans les coupes de phasage ascendant sont toujours supérieurs aux écarts des coupes de phasage descendant. Il est donc justifié de dire que le phasage ascendant est plus sensible aux différents défauts d'hypothèses de calcul. Pour cette raison, ce projet porte plus spécifiquement sur des coupes de telles caractéristiques ayant une marge d'amélioration plus importante.

Tableau 4 : Ecarts en fonction de type de coupe (état des lieux)

COUPE	No de cas	Ecart relatif en ventre (%)	Ecart absolu en ventre (mm)
Courante	21	20.1%	4.4
Singulière	15	62.3%	12.1

Cet état des lieux permet également de mettre en évidence l'existence des coupes singulières (voir Tableau 4). Ces coupes sont caractérisées par un comportement imprévu à cause d'effets de bord qui ne peuvent pas être modélisés à l'aide d'une modélisation aux coefficients de réaction. Parmi l'ensemble des coupes étudiées, presque 40% (15 sur 36) est caractérisé par certaines particularités avec des écarts très importants. A titre d'exemple, les écarts relatifs en ventre, pour les coupes courantes, sont autour de 20% alors qu'ils dépassent les 60% pour les coupes singulières. Ce phénomène sera aussi étudié en détail dans le chapitre 5.

Malgré tout, ces résultats restent insatisfaisants compte tenu que les courbes de déplacements issues de la modélisation MISS-K en phase études n'arrivent pas à bien estimer ce qui se passe sur le terrain.

Dans un premier temps, il faut tenir compte d'hypothèses propres d'une étude de dimensionnement, qui sont très souvent prises de manière forfaitaire afin d'être sécuritaires. Il est donc compréhensible d'obtenir des déplacements de PM plus réduits que ceux initialement estimés. Dans un second temps, un certain nombre d'hypothèses possèdent une incertitude liée à l'estimation des paramètres géotechniques (par exemple, le manque de sondages ou le niveau variable de la nappe phréatique). Cette incertitude se traduit par la prise d'hypothèses de calcul parfois trop défavorables du point de vue de l'optimisation du calcul.

On constate donc l'existence de plusieurs aspects liés à la modélisation des coupes de calcul, dont la grande marge d'optimisation peut contribuer à améliorer le dimensionnement des parois moulées. Ces aspects sont analysés dans le chapitre suivant.

3. Etudes de sensibilité

3.1. Introduction

Ce chapitre poursuit l'état des lieux dressé dans le chapitre 2. Il semble pertinent de remettre en question les différentes hypothèses réalisées dans tout le procès de calcul de parois moulées et d'identifier celles ayant un impact plus important dans le calcul.

L'objet est donc d'obtenir une liste des hypothèses dont l'étalonnage permettra de mieux estimer le comportement des parois moulées.

Avant de se lancer dans cette étude, la prise en compte de deux indicateurs de chaque hypothèse d'étude potentielle est nécessaire. D'un côté, le degré d'incertitude de celle-ci et de l'autre, son influence dans les déplacements. Cette étape permet de rejeter une bonne partie des hypothèses et de se concentrer sur les plus importantes.

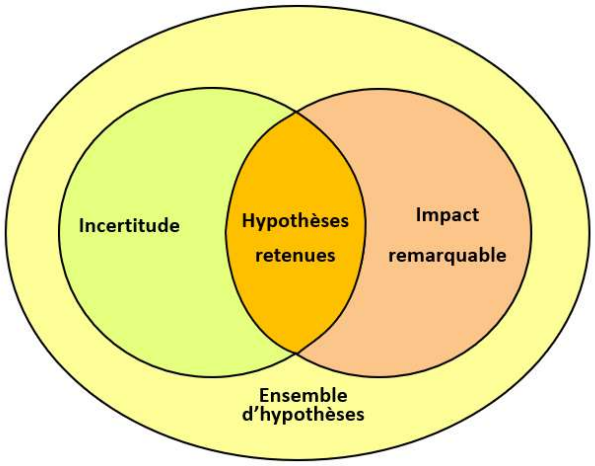


Figure 13 : méthodologie pour la sélection d'hypothèses d'étude.

Cette première analyse a permis d'étudier certaines hypothèses de calcul, comme présenté dans le Tableau 5. On montre quelques exemples des hypothèses rejetées.

Tableau 5 : Exemple d'hypothèses considérées pour les études de sensibilité.

Variable analysée	Commentaire	Incertitude	Influence
Raideur des appuis intermédiaires GC	Des modèles aux éléments finis sont employés pour déterminer la raideur des appuis intermédiaires en béton armé. A défaut, des expressions analytiques permettent également de les calculer de manière précise.	Faible	Forte
Modélisation de l'inertie de la PM	On utilise l'inertie brute non fissurée de la PM dans la modélisation MISS-K d'après [1]. Cela permet de ne prendre en compte les aciers et l'état de fissuration et donc, de ne réaliser des nouveaux modèles MISS-K jusqu'à la convergence du problème.	Faible	Faible
Module de Young du béton	La norme [1] propose d'adopter des valeurs du module de Young égale à 20 et 10 GPa pour les phases durables et provisoires, respectivement. La prise en compte du fluage d'après l'Eurocode-2 [2] donne des valeurs similaires.	Faible	Forte

Les hypothèses retenues finalement sont les surcharges du sol à l'arrière de la PM, le niveau de la nappe phréatique, les paramètres mécaniques du sol (notamment ceux des couches proches au niveau du ventre).

3.1.1. Coupes type utilisées pour les études de sensibilité

Pour la réalisation des études de sensibilité, une coupe représentative de chaque type de phasage est considérée. Le but est de jouer, pour chaque coupe, avec différentes valeurs d'une variable en fixant toutes les autres pour analyser l'influence de chaque variable choisie.

On présente brièvement ci-dessous les deux coupes sélectionnées.

1. Coupe de phasage ascendant : son phasage consiste à l'installation de trois lits de butons provisoires au fur et à mesure du terrassement.

2. Coupe de phasage descendant : son phasage consiste à l'exécution des niveaux de génie civil avant le terrassement du niveau immédiatement inférieur. Sous la dalle S2, on installe deux lits de butons provisoires pour arriver au fond de fouille.

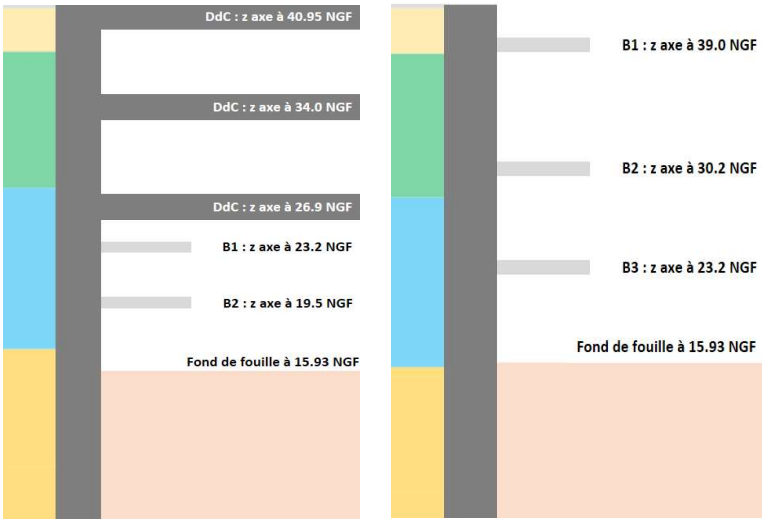


Figure 14 : Coupes type utilisées pour les études de sensibilité avec phasage descendant (à gauche) et phasage ascendant (à droite).

3.2. Surcharge du sol

3.2.1. Origine et définition des surcharges

Les surcharges appliquées au niveau de la surface peuvent représenter l'action dont les origines sont très diverses : immeubles avoisinants, grues tour installées dans le chantier, zones destinées au stockage de matériel, équipements ou engins, effet de risbermes ou même, surcharges forfaitaires imposées de manière sécuritaire.

Chaque type de surcharge peut se définir de la façon suivante :

- Surcharge de Caquot : surcharge semi-infinie et destinée généralement à définir une surcharge forfaitaire de 20 KPa dans le présent projet. Cette valeur peut être augmenté à 50KPa si on considère des zones de stockage de voussoirs du tunnel, par exemple.

- Surcharge de Boussinesq : surcharge verticale généralement sur la surface du terrain naturel de largeur L (m), de densité q (kN/m) et à une distance x (m) de l'écran. Elle est très utilisée pour la définition des charges spécifiques qui sont bien connues (grues à tour ou immeuble avoisinant, par exemple).

3.2.2. Méthodologie

Afin d'évaluer l'influence des surcharges, une surcharge de Caquot a été modélisée dans chacun des phasages. On impose une surcharge de Caquot de 0, 20, 40 et 80 kPa et puis on mesure les déplacements en tête et en ventre pour les deux phasages.

3.2.3. Résultats

La Figure 15 montre les résultats des déplacements en tête en fonction du terrassé normalisé au fond de fouille pour les deux phasages considérés (le terrassé normalisé au FF représente le rapport entre le terrassement exécuté et le terrassement total à réaliser jusqu'au fond de fouille).

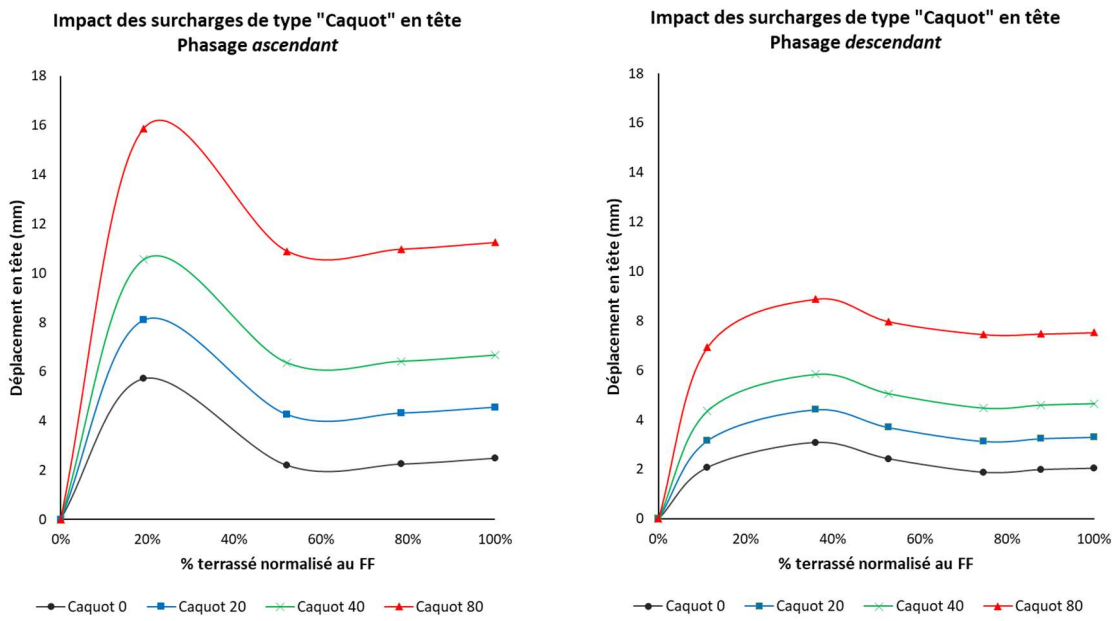


Figure 15 : Déplacement en tête en fonction du terrassé normalisé (phasage ascendant et descendant).

On constate que les déplacements sont plus défavorables pour un phasage ascendant, notamment pour la première phase de terrassement. Ce phénomène s'explique par la cote d'installation du premier buton qui est toujours quelques mètres au-dessous de la tête, à la différence du phasage descendant où la dalle de couverture est coulée tout en haut de la paroi. En tout cas, la tête revient légèrement en arrière dans les phases postérieures.

En ce qui concerne les déplacements finaux en tête, ils sont toujours plus importants pour le phasage ascendant. Les déplacements supplémentaires en tête pour le phasage descendant correspondent à peu près aux deux tiers de ceux pour le phasage ascendant.

Les déplacements en ventre, à cause de la surcharge du sol, ne sont pas aussi remarquables. Pour les parois moulées étudiées, l'application d'une surcharge forfaitaire de 20 kPa ne produit que des déplacements de l'ordre de 1 mm pour les deux phasages considérés.

3.3. Niveaux hydrologiques

3.3.1. Niveaux d'eaux de référence

Les niveaux d'eaux de référence sont utilisés pour représenter l'action de l'eau. Celle-ci dépend de la nappe phréatique qui peut varier de manière très significative dans la durée de vie d'un ouvrage. La norme [3] établit la définition de quatre niveaux de référence.

- Niveau quasi-permanent ou de basses eaux (EB) : niveau susceptible d'être dépassé pendant la moitié du temps de référence (100 ans pour les ouvrages analysés dans ce projet).
- Niveau fréquent (EF) : niveau susceptible d'être dépassé pendant 1% du temps de référence.
- Niveau caractéristique ou de hautes eaux (EH) : niveau de période de retour égal au temps de référence de l'ouvrage (100 ans).
- Niveau accidentel (EE) : niveau des plus hautes eaux connues ou prévisibles.

Un dernier niveau de référence utilisé pour les calculs en phase travaux existe, c'est le niveau d'eaux de chantier (EC). Utilisé comme niveau de référence pour les phases travaux, il correspond à la valeur maximale entre, soit la moyenne du niveau quasi-permanent et fréquent, soit le niveau maximum de la chronique relevée sur la période du projet.

De manière générale, ces niveaux reçoivent une définition très statistique. Ils sont parfois trop défavorables par rapport à la situation réelle sur le terrain. Il est certain que les niveaux d'eaux de référence ne doivent pas être modifiés car ils permettent de prendre compte de l'éventualité d'évènements extrêmes. Cependant, sachant qu'on est à la recherche d'hypothèses ayant une influence importante sur les parois moulées, cette hypothèse a une influence remarquable (il ne faut pas oublier que l'eau derrière la PM produit toujours un effet de poussée défavorable, perpendiculaire à la paroi, avec un coefficient horizontal k_{eau} égal à l'unité).

3.3.2. Méthodologie

Afin d'évaluer l'influence du niveau d'EC, on modélise la nappe phréatique d'un aquifère libre à plusieurs profondeurs depuis le terrain naturel. L'objet est d'obtenir les déplacements supplémentaires en ventre pour une remontée ou une descente donnée du niveau d'EC.

3.3.3. Résultats

La Figure 16 présente les résultats des déplacements en ventre en fonction de la distance de la nappe phréatique au terrain naturel.

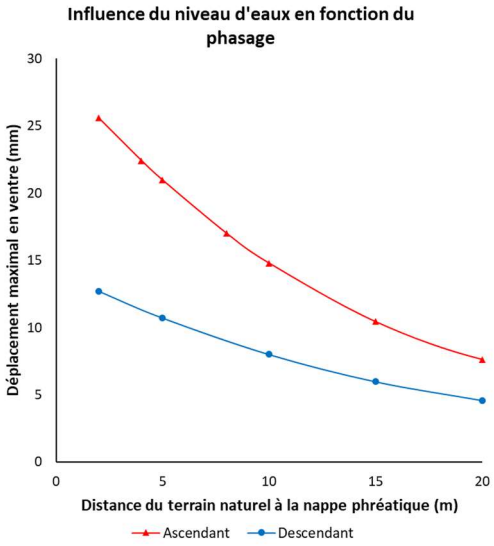


Figure 16 : Influence du niveau d'eaux de chantier en fonction du phasage

On constate que la courbe correspondante au phasage ascendant (en rouge) est plus pentue que celle pour le phasage descendant (en bleu). Il faut donc faire spécialement attention à la nappe phréatique des coupes de phasage ascendant (l'ouvrage LCO et certains tronçons des ouvrages $01^{E}01$ et $02^{E}01$).

3.4. Paramètres géotechniques du sol

3.4.1. Sélection des paramètres

La Figure 17 montre le profil en long géologique au droit de l'ouvrage $01^{E}01$.

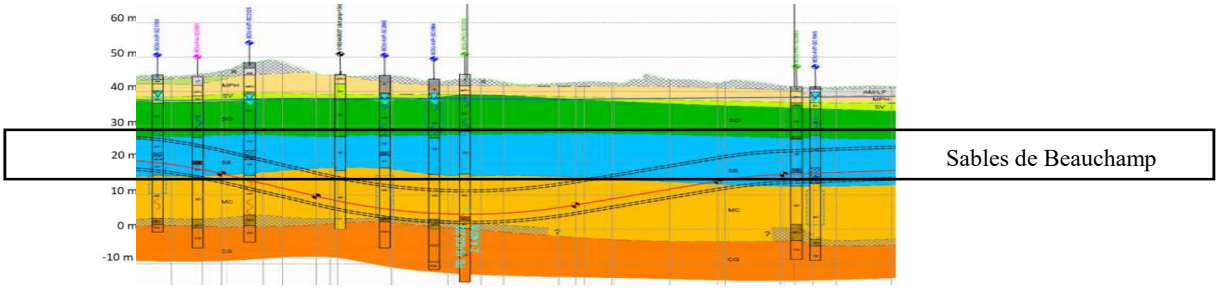


Figure 17 : Extrait du profil en long géologique au droit de l'ouvrage $01^{E}01$.

On constate l'homogénéité par rapport aux couches de sol rencontrées. En fait, le profil géologique est très constant le long du Lot 1 de la Ligne 16. On peut donc partir de l'hypothèse que les Sables de Beauchamp (en couleur bleu) est la couche au droit des ventres développés par les parois moulées après le terrassement pour tous les ouvrages analysés dans ce mémoire. On va donc étudier l'influence de la cohésion, l'angle de frottement et le coefficient de réaction de cette couche dans les résultats des modèles MISS-K.

3.4.2. Méthodologie

Pour évaluer l'influence des paramètres, on a imposé des valeurs entre 0 et 40 kPa pour la cohésion et des valeurs entre 25 et 25º pour l'angle de frottement. En ce qui concerne le coefficient de réaction, il a été majoré de ±20% et de ±40% par rapport à la valeur établie par défaut dans le projet.

3.4.3. Résultats

Cohésion

La Figure 18 montre l'influence de la cohésion dans les déplacements maximaux en ventre en fonction de phasage. On constate que la dernière phase correspondant à l'arrivé au fond de fouille (terrassé de 100%, en bleu) est légèrement plus défavorable pour une coupe de phasage ascendant. Plus concrètement, on obtient un déplacement supplémentaire d'environ 1 mm pour ce type de coupes.

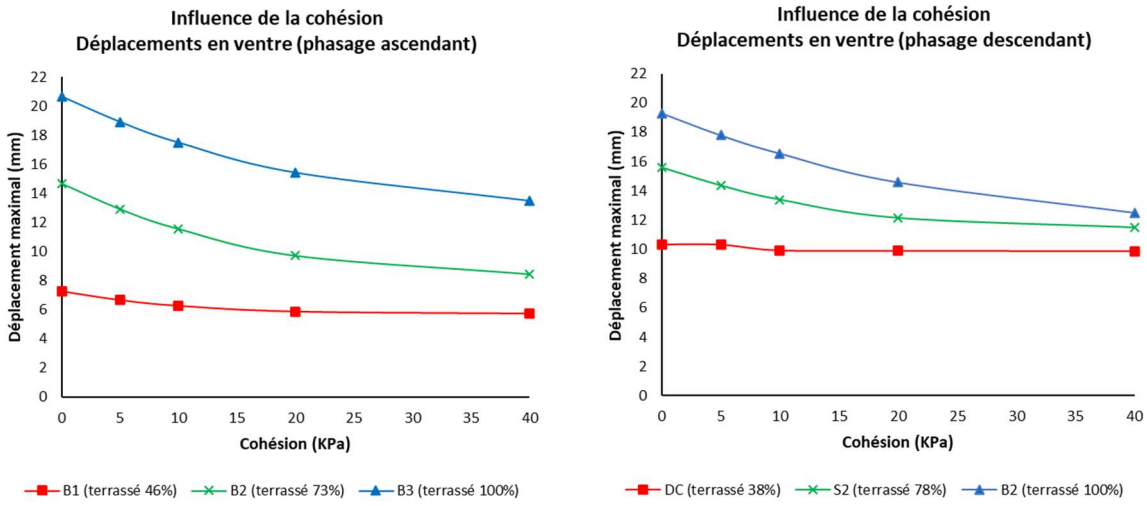


Figure 18 : Influence de la cohésion en fonction du phasage

Toutefois, il est à noter la différence en termes de déplacements, en ventre, en fonction de la cohésion. Une amélioration des capacités compétentes du sol avec une valeur de cohésion qui passe de 0 kPa à 20 kPa peut produire une réduction des déplacement d'environ 4 mm pour la phase concernant l'arrivée au fond de fouille (en bleu). Ce phénomène est moins important pour les phases de terrassement antérieures. Il est aussi à noter que l'amélioration mentionnée n'est pas linéaire et tend à se stabiliser. Ceci veut dire que l'utilisation de traitement d'amélioration des propiétées du sol (i.e. injections) peut être très utile pour les sols très peu compétents. La réalisation de grandes injections n'ajouterait pas beaucoup d'amélioration, en termes de déplacements, puisque les courbes tendent à se stabiliser.

Angle de frottement

La Figure 19 montre l'influence de l'angle de frottement dans les déplacements maximaux, en ventre, en fonction du phasage. On constate que les coupes de phasage ascendant se déforment

plus que les coupes de phasage descendant. Ce phénomène est plus accentué pour des valeurs faibles de l'angle de frottement.

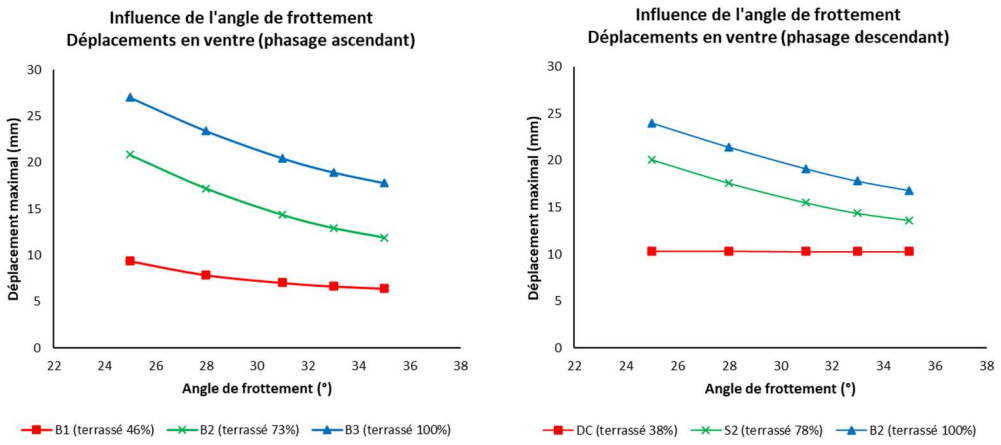


Figure 19 : Influence de l'angle de frottement en fonction du phasage

Les écarts des déplacements en ventre pour la phase concernant l'arrivée au fond de fouille (en bleu) augmentent de manière plus ou moins linéaire. Globalement, il faut une augmentation de la valeur de l'angle de frottement d'au moins 3º pour constater une réduction des déplacements de plus de 2 mm. Cet effet est légèrement moins remarquable pour les coupes de phasage descendant.

Coefficient de réaction

La Figure 20 montre l'influence du coefficient de réaction dans les déplacements maximaux, en ventre, en fonction du phasage. On constate que la pente de la courbe correspondant au phasage descendant est positive alors que celle du phasage ascendante est négative. Cela implique que les coupes de phasage descendant sont plus sensibles face aux variations de la valeur du coefficient de réaction. Ce phénomène est *a priori* surprenant d'après les résultats observés précédemment, où les coupes de phasage ascendant étaient plus sensibles face aux défauts d'hypothèses.

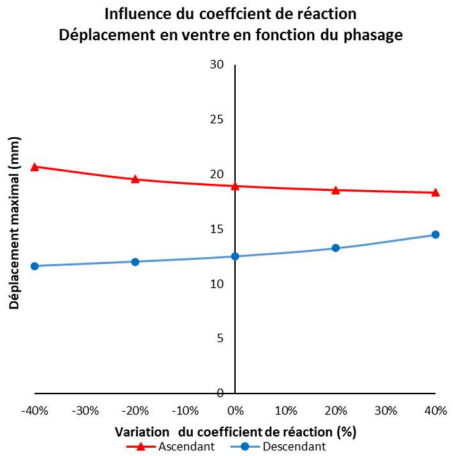


Figure 20 : Influence du coefficient de réaction dans le ventre en fonction du phasage.

4. Etalonnage des modèles MISS-K

4.1. Méthodologie

L'étalonnage des modèles permet d'approcher les courbes des déplacements estimés par rapport aux mesures inclinométriques. Le but de cet étalonnage est de se rapprocher au maximum du comportement réel de la paroi toujours en prenant de nouvelles hypothèses cohérentes et réalistes.

Pour proposer ces nouvelles hypothèses, il faut d'abord mener une étude complète de chaque coupe. En fonction des écarts initiaux, on réalise une comparaison des toutes les données d'entrée du modèle avec toutes les informations disponibles (note d'hypothèses ou données du chantier, par exemple) ce qui va permettre, le cas échéant, de proposer de nouvelles hypothèses.

Afin de rendre plus compréhensible le déroulement de ce chapitre, on présente un exemple de l'étalonnage appliqué sur la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$. Dans cet exemple, on réalise une série de considérations préalables pour la proposition de nouvelles hypothèses et puis, on analyse les nouveaux écarts trouvés. De manière complémentaire, on a évalué l'impact de cet étalonnage sur le calcul du ratio d'armatures.

Après la présentation de l'exemple, on récapitule les résultats de l'étalonnage de l'ensemble de coupes étudiées.

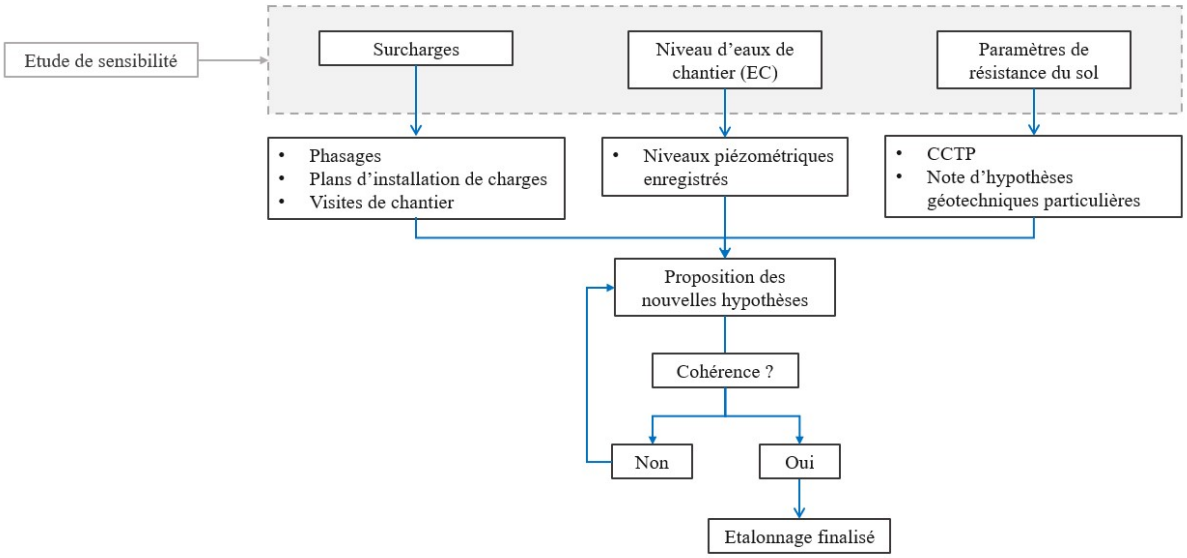


Figure 21 : Méthodologie pour l'étalonnage du modèle d'une coupe de calcul.

4.2. Exemple d'application de l'étalonnage

4.2.1. Considérations préalables

La coupe étudiée dans cet exemple est la coupe C-5 de l'ouvrage 01^{E}01. Avant d'appliquer de nouvelles hypothèses vis-à-vis des résultats des études de sensibilité, il est nécessaire de réaliser une analyse spécifique de chaque coupe et de chaque chantier.

La Figure 22 présente la situation initiale en ce qui concerne les déplacements horizontaux de la PM pour la coupe étudiée.

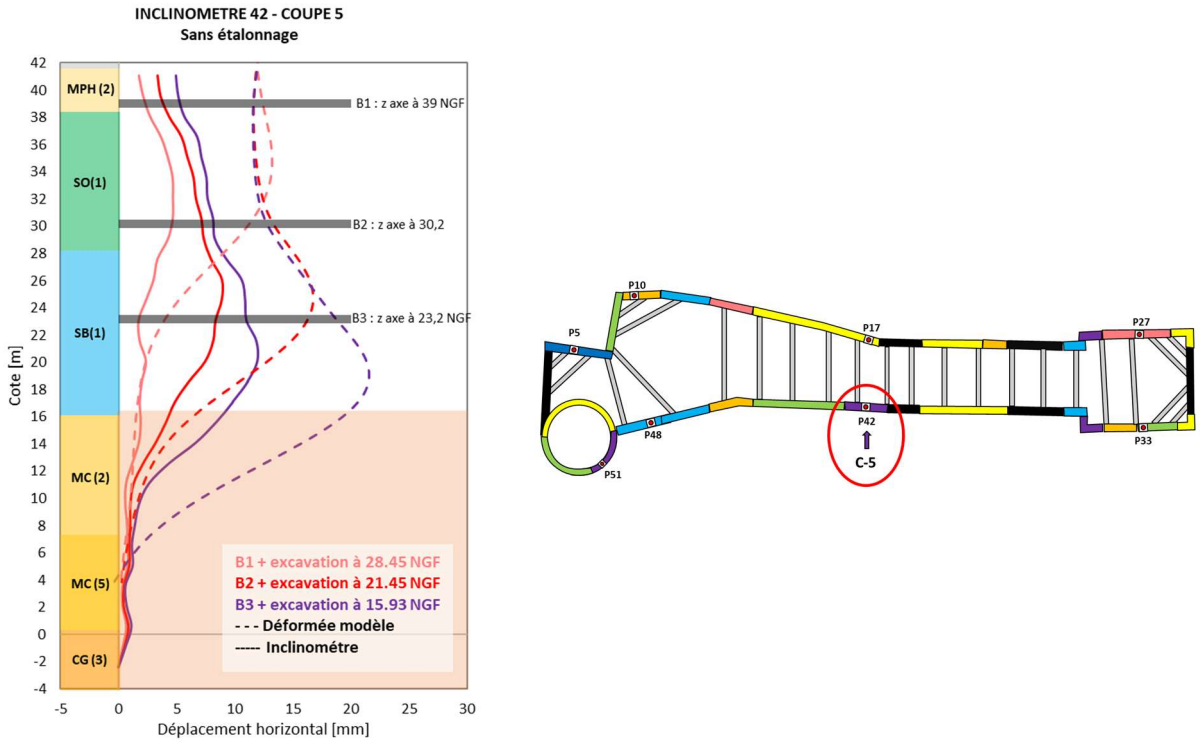


Figure 22 : Déplacements de la coupe C-5 de l'ouvrage 01^{E}01 sans étalonnage et plan de situation.

D'abord, on constate un déplacement en tête très réduit par rapport à la déformée estimée initialement par le modèle MISS-K. En fait, les surcharges du sol définies sur le modèle de calcul initial représentent une charge forfaitaire de 20 kPa et une charge due à une grue à tour. Dans le même temps, une visite sur chantier a permis de vérifier que la grue ne se trouve pas à cet endroit du chantier et qu'il n'existe pas d'aires de stockage à proximité de la dite coupe. On envisage donc l'annulation de la charge de la grue et une réduction de la charge forfaitaire de 20 à 5 kPa.

En outre, les déplacements au niveau du ventre sont aussi excessifs par rapport à l'estimation initiale du modèle MISS-K. On regarde donc les niveaux piézométriques et les paramètres de résistance du sol qui peuvent avoir une influence sur les déplacements en ventre, comme présenté dans les études de sensibilité.

En ce qui concerne les niveaux d'eaux, on constate que la nappe phréatique est toujours inférieure au niveau d'eaux de chantier (EC) utilisé pour le modèle de calcul. Comme l'indique la Figure 23, on peut envisager de réduire le niveau d'eaux de chantier de 38.2 m NGF à 35.0 m NGF d'après les enregistrements des niveaux piézométriques du chantier.

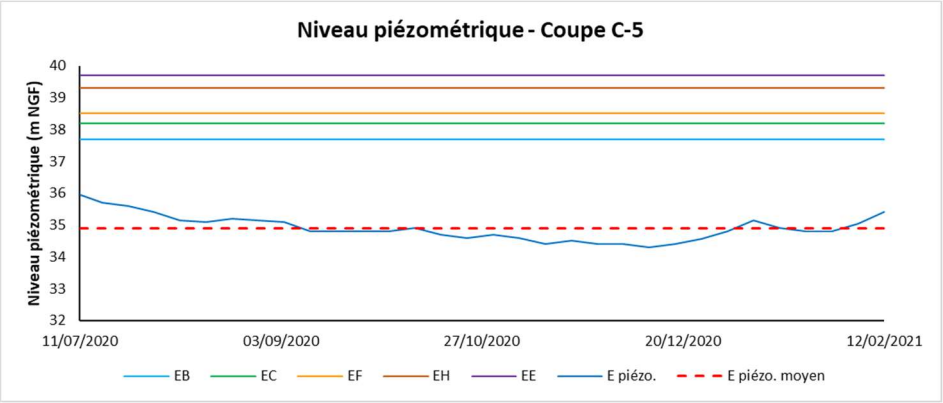


Figure 23 : Niveau piézométrique mesuré pour la coupe C-5 de l'ouvrage 01^{E}01

Les dernières hypothèses à remettre en question sont les paramètres de résistance mécanique du sol. D'abord, les couches pouvant avoir une influence plus importante sur le déplacement au ventre sont celles situées à proximité du fond de fouille : les Sables de Beauchamp (1) et les Marnes et Caillasses (2). Ces couches peuvent être trouvées en couleur bleu et jaune dans la Figure 22.

- SB (1) : il s'agit du sous-faciès le moins résistant parmi les Sables de Beauchamp avec une cohésion de 5 kPa et un angle de frottement de 33°. En consultant les différents documents du projet tels que le CCTP et la note d'hypothèses géotechniques particulières de cet ouvrage, on observe un manque de sondages qui caractérisent bien ce sous-faciès qui n'est pas très fréquent dans le projet. En outre, les résultats des sondages réalisés donnent des valeurs plus élevées pour la cohésion et l'angle de frottement. Pourtant, il semble que le manque de sondages suffisants a conduit à la prise de valeurs plus faibles et par conséquent, plus sécuritaires. Pour l'étalonnage des paramètres de cette couche, on propose finalement une cohésion de 15 kPa et un angle de frottement de 35° qui correspondent aux valeurs du sous-faciès SB (3) définies dans le CCTP.

- MC (2) : il s'agit aussi du sous-faciès le moins résistant de ce type de sol, présent uniquement à proximité de l'ouvrage 01^{E}01, avec une cohésion de 20 kPa et un angle de frottement de 30°. La particularité de ce sous-faciès est qu'il n'y a pas de sondages réalisés et on pourrait envisager l'amélioration de ces capacités résistantes vis-à-vis du comportement de la PM à la hauteur de cette couche. Pour l'étalonnage, on propose donc une cohésion de 35 kPa et un angle de frottement de 32°.

Ces remarques permettent d'étalonner le modèle dont les résultats sont présentés dans la suite de ce mémoire.

4.2.2. Résultats

La Figure 24 présente les résultats de l'étalonnage d'hypothèses de la coupe C-5 de l'ouvrage 01^{E}01. On constate une amélioration significative de l'estimation de déplacements horizontaux à chaque étape de l'étalonnage.

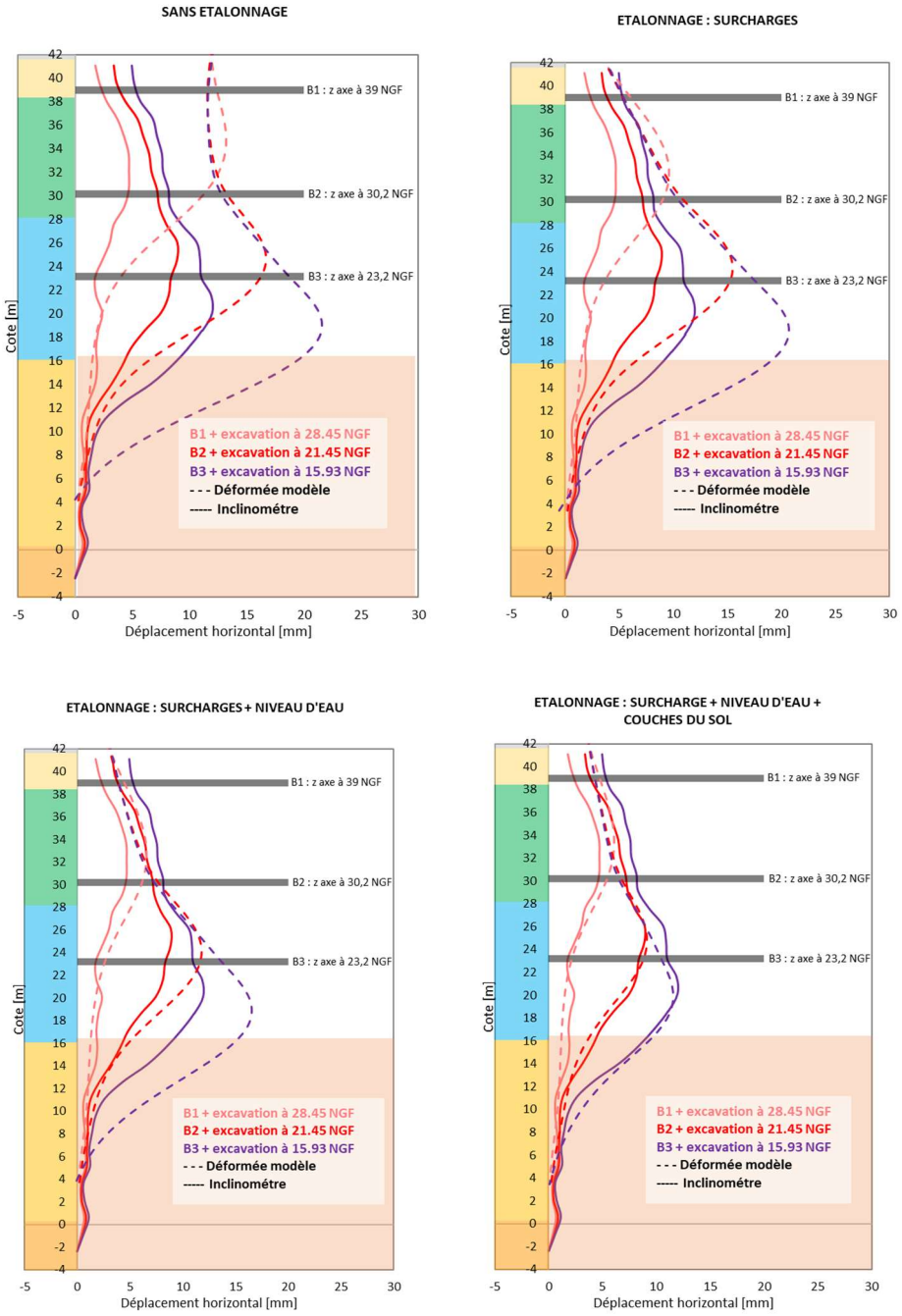


Figure 24 : Phase de rétro-analyse de la coupe C-5 de l'ouvrage 01^{E}01.

On peut donc conclure que les hypothèses proposées sont satisfaisantes. Les écarts ont été réduits de 40% et le modèle est bien étalonné par rapport aux mesures inclinométriques. On constate que les surcharges forfaitaires initiales de 20 kPa sont assez défavorables et que la charge de la grue n'a pas été bien placée dans le modèle. Cette situation peut s'expliquer par

une incertitude importante par rapport à l'emplacement final de la grue en phase études, parfois trop en amont de l'exécution.

En ce qui concerne le niveau piézométrique, on observe une descente importante de ce niveau à l'extérieur de l'ouvrage. Sachant que la fiche hydraulique de la paroi moulée est ancrée dans les couches de calcaire, étant très imperméables, il doit y avoir un autre phénomène qui puisse expliquer cette descente dans le niveau piézométrique. Dans la région parisienne, il existe un horizon argileux médian des Sables de Beauchamp assez imperméable qui peut jouer le rôle d'écran étanche entre deux aquifères. La condition nécessaire pour que cet horizon puisse provoquer une descente du niveau piézométrique, c'est qu'il soit continu. Il semble donc cohérent de postuler que l'on a considéré, de manière sécuritaire, un niveau médian de SB discontinu. On peut conclure que la présence de cet horizon doit être donc prise en compte pour la modélisation du profil hydrostatique dans l'ouvrage $01^{E}01$.

Finalement, on constate que les paramètres de résistance de sol de couches sont très sous-estimés, visiblement du fait que les sous-faciès impliqués ne sont pas très fréquents dans le projet. D'ailleurs, il est à noter un manque de sondages qui caractérisent bien leurs paramètres de résistance, notamment des couches au niveau de ventre. Plus spécifiquement pour les Sables de Beauchamp, il est à noter la précision des modèles en adoptant une cohésion minimale de 15 kPa pour cette couche.

4.2.3. Ratio de ferraillage

Après l'étalonnage d'hypothèses et la précision trouvée entre les mesures inclinométriques et les déformées issues des nouveaux modèles, on analyse l'impact de cet étalonnage sur la quantité nécessaire d'aciers pour garantir la résistance structurelle de la PM.

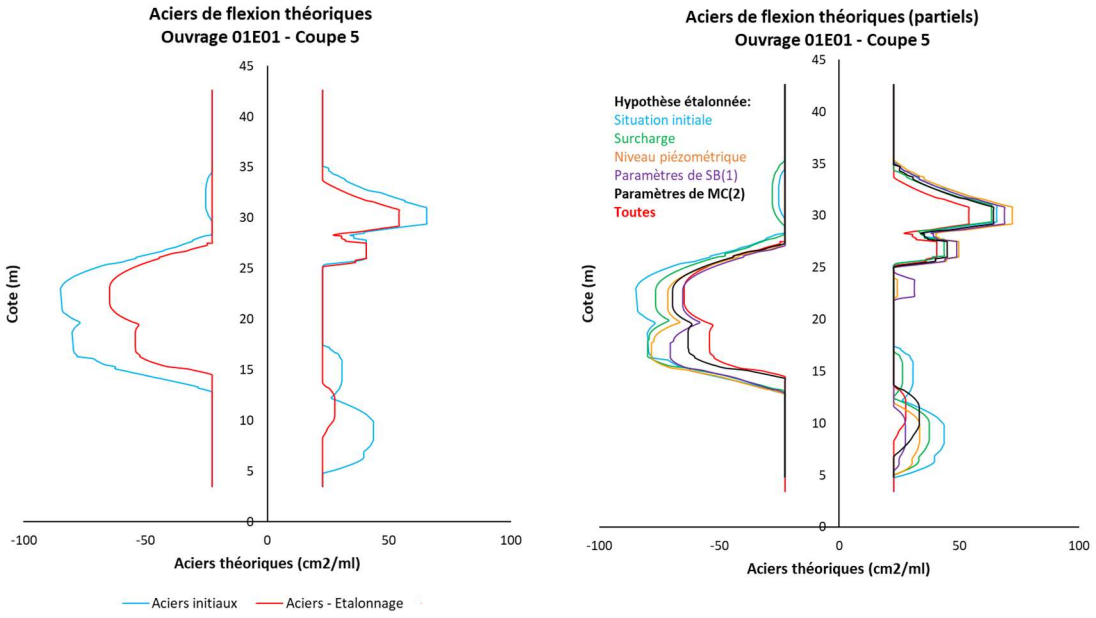


Figure 25 : Aciers en flexion théoriques pour la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$.

La Figure 25 présente, à gauche, les aciers de flexion théoriques avant et après l'étalonnage de toutes les hypothèses analysées. Le ratio d'aciers pour le calcul initial est de 95.8 kg/m^3. L'étalonnage envisagé permet de réduire la quantité d'acier de 17.7% avec un nouveau ratio total de 78.8 kg/m^3.

Dans la même Figure 25, à droite, on observe les aciers nécessaires le long de la PM en considérant l'étalonnage des différentes hypothèses individuellement, qui permet d'identifier l'importance de chaque défaut d'hypothèse d'un point de vue économique. Le Tableau 6 présente également le calcul de ratio total pour chacun des cas.

Tableau 6 : Ratios de ferraillage de la coupe C-5 de l'ouvrage 01^{E}01 en fonction des hypothèses étalonnées.

Hypothèse étalonnée	Ratio (kg/m3)	Optimisation
Situation initial	95.8	-
Surcharges	91.8	4.2%
Niveau piézométrique	90.2	5.8%
Paramètres de Sables de Beauchamp SB (1)	87.2	9.9%
Paramètres de Marnes et Caillasses (2)	84.4	11.9%
TOTAL	**78.8**	**17.7%**

On constate que pour ce cas particulier, le défaut d'hypothèse relatif aux surcharges est le moins important en termes d'optimisation de ferraillage, avec une réduction de 4% d'acier. De son côté, l'étalonnage du niveau piézométrique permet l'optimisation de 6%. En ce qui concerne l'étalonnage des paramètres mécaniques du sol des Sables de Beauchamp et des Marnes et Caillasses, on observe une optimisation d'acier d'environ 10% et 12%, respectivement. Toutefois, il faut tenir compte qu'il n'est pas toujours possible de procéder à un étalonnage si efficace (cela dépend de chaque ouvrage particulier).

En outre, on peut aussi constater que l'optimisation totale d'acier d'une valeur de 17% ne correspond pas à l'optimisation cumulée de chacun des étalonnages partiels. Ce phénomène est dû aux aciers minimaux qui ne permettent pas de continuer à réduire la quantité d'acier au-delà d'une certaine limite.

4.3. Application

La démarche présentée précédemment a été appliquée à toutes les coupes étudiées dans ce mémoire.

Avant de présenter les résultats, il faut rappeler que certaines coupes ne permettent pas un étalonnage aussi effectif que celui présenté pour la coupe 5 de l'ouvrage 01^{E}01. Cela dépend notamment de la disponibilité de certaines données comme les mesures piézométriques et les plans d'installation de charges de tous les ouvrages impliqués mais aussi de l'ordre de grandeur des écarts initiaux qu'on prétend réduire.

4.3.1. Résultats par ouvrages

La Figure 26 présente une comparaison des écarts entre les modèles initiaux et les modèles étalonnés. Les écarts en tête et en ventre sont groupés par ouvrages.

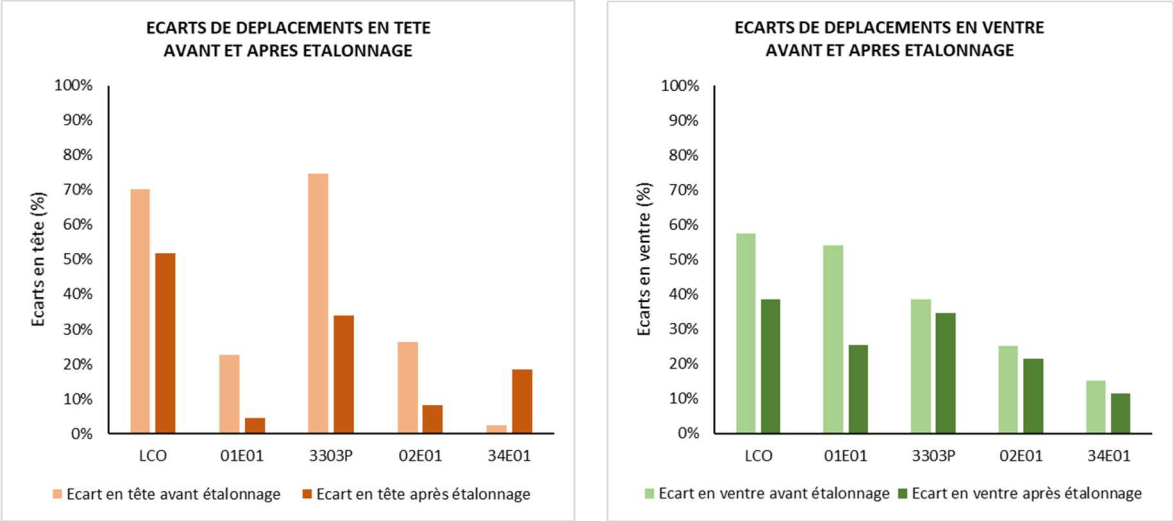


Figure 26 : Comparaison des écarts moyens par ouvrage avant et après étalonnage

L'ouvrage 01^{E}01 a été globalement bien étalonné avec une réduction moyenne des écarts de 20% en tête et de 30% en ventre. La disponibilité des données et le fait d'avoir des écarts initiaux trop élevés donnent, également, une marge très large d'amélioration pour l'étalonnage d'hypothèses. Dans cet ouvrage, on a constaté : une définition des surcharges forfaitaires, très sécuritaire, qui ne représente pas bien la réalité ; l'existence d'un horizon argileux des Sables de Beauchamp médiane qui n'a pas été initialement considéré ; et une cohésion minimale de 15 kPa caractérisant aussi les Sables de Beauchamp.

La gare LCO se trouve sur une situation similaire avec une réduction moyenne des écarts de 20% en tête et en ventre. Dans cette ouvrage on a constaté : une définition des surcharges forfaitaire trop pénalisante ; et un niveau piézométrique à l'extérieur de l'ouvrage très bas du fait du rabattement de la nappe phréatique à l'intérieur de cette ouvrage qui n'est pas ancrée dans le calcaire (le débit élevé de pompage confirme cette hypothèse).

Pour l'ouvrage 3303P, il est à noter que les écarts initiaux en tête étaient très élevés. La retro-analyse a permis de trouver une explication possible à ce phénomène : ce chantier sert comme point de lancement du tunnelier TBM2a et donc des charges forfaitaires de 50 kPa représentant le stockage de voussoirs ont été modélisées pour toutes les phases. Cependant, les voussoirs ne sont pas stockés dans les premières phases de terrassement de l'ouvrage. On peut donc considérer l'application de cette surcharge plus tard dans le phasage. Ainsi, cet effet défavorable concernant le stockage des voussoirs n'est pris en compte qu'une fois exécutés les premiers niveaux en béton armé, qui apportent de la rigidité à la PM à ce stade du phasage.

Ce même principe, considérer l'instant de l'application des surcharges à l'arrière de la PM, a permis également de réduire légèrement les écarts en tête dans l'ouvrage 02^{E}01.

On constate également une augmentation des écarts en tête pour l'ouvrage 34^{E}01 alors que l'étalonnage a pour but de les réduire. En fait, les écarts relatifs sont calculés en suivant l'expression :

$$\varepsilon = \frac{|\delta_{MISS-} - \delta_{mesuré}|}{\delta_{MISS-K}}$$

Il faut noter que les déplacements en tête initiaux (δ_{MISS-K}) sont très réduits et par conséquent, une modification légère des hypothèses de calcul pourrait faire varier de manière significative la valeur de l'écart relatif. Cependant, les écarts absolus resteraient toujours négligeables.

En ce qui concerne les écarts en ventre des ouvrages 3303P, 02^{E}01 et 34^{E}01, on remarque notamment une amélioration, après étalonnage, très légère. Toutefois, l'étalonnage a permis de constater : la prise en compte d'une cohésion minimale de 15 kPa pour les Sables de Beauchamp est adéquate ; et les coupes de phasage descendant sont plus raides face aux modifications potentielles des données d'entrée. D'ailleurs, la marge d'amélioration dans la modélisation était moins importante vu les écarts initiaux trouvés dans ces ouvrages.

De manière générale, on peut conclure que l'étalonnage a permis d'obtenir une réduction d'écarts dans toutes les coupes en tête et en ventre de l'ordre de 22% d'une part et de 12% d'autre part.

4.3.2. Résultats par type du comportement de coupe

Parmi tous les résultats obtenus de cette rétro-analyse, l'importance des coupes singulières dans l'ensemble du projet est une des plus remarquables. On rappelle que le comportement de ce type de coupes ne peut pas être bien estimé par la modélisation MISS-K. Dans le chapitre 2, on avait déjà remarqué l'identification d'un 40% de coupes singulières parmi l'ensemble de cas étudiés. Dans cette section, on constate de grandes différences entre les écarts des coupes courantes et singulières, même après l'étalonnage. On précise dans le Tableau 7 les écarts de déplacements en tête et en ventre après l'étalonnage en fonction du type de coupe.

Tableau 7 : Ecarts en fonction de type de coupe (après l'étalonnage)

COUPES	No de coupes	Ecart en tête (%)	Ecart en ventre (%)
Courantes	22	9%	10%
Singulières	14	50%	49%

On constate donc des écarts en tête et en ventre autour de 10 % pour les coupes courantes ce que l'on peut considérer comme résultats assez satisfaisants. Cependant, les écarts obtenus pour les coupes singulières atteignent 50 % tant en tête qu'en ventre.

Il semble donc que l'étalonnage réalisé est capable d'améliorer la modélisation MISS-K pour se rapprocher du comportement réel des parois, mais uniquement pour les coupes courantes. La grande quantité de coupes singulières, toujours compliquées à bien estimer, nous amène donc à considérer leur étude en profondeur, abordée dans le chapitre 5.

4.3.3. Impact sur le calcul de ferraillage

Préalablement dans la section 4.2, on a présenté en détail les différentes phases de l'étalonnage de la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$. L'analyse de cette coupe a montré la marge de gain en termes d'optimisation de ferraillage.

Cette section a pour but de montrer le gain en quantité d'acier dans le dimensionnement du ferraillage des PM si l'on était capables de maitriser les données d'entrée dans un premier temps. Cette analyse nous permet donc d'identifier les hypothèses plus intéressantes depuis un point de vue économique.

Pour cela, on a sélectionné les coupes avec l'étalonnage le plus effectif de chaque ouvrage – celui qui donne une réduction d'écarts plus importante - et on a recalculé les armatures nécessaires en prenant en compte chaque nouvelle hypothèse.

Le Tableau 8 présente les coupes sélectionnées pour le recalcul de ferraillage en fonction de la réduction des écarts grâce à l'étalonnage. On présente également l'optimisation globale d'acier pour chaque coupe.

Tableau 8 : Optimisation d'aciers en considérant l'étalonnage.

OUVRAGE	COUPE	Réduction d'écart de déplacement en tête	Réduction d'écart de déplacement en ventre	Optimisation d'acier
01E01	C-5	49%	41%	**21%**
LCO	C-8	8%	30%	**5%**
3303P	C-6	49%	0%	**1%**
02E01	C-8	27%	2%	**4%**
34E01	C-7-1	20%	16%	**18%**

Ainsi, on repère une optimisation considérable dans les coupes C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$ et C-7-1 de l'ouvrage $34^{E}01$. Il semble que la réduction des écarts en ventre est globalement plus efficace que la réduction des écarts en tête quand on parle d'optimisation d'acier. Cependant, ce phénomène ne survient pas pour la coupe C-8 de LCO. Elle présente une optimisation de la quantité d'acier très faible par rapport à la réduction d'écarts de déplacements en ventre. Cette dernière coupe est, de base, moins ferraillée que les autres, donc cela explique qu'elle arrive au ferraillage minimal plus rapidement et ne permet pas une optimisation majeure.

La Figure 27 et le Tableau 9 propose un récapitulatif des résultats de ce nouveau calcul de ferraillage en fonction d'hypothèses étalonnées.

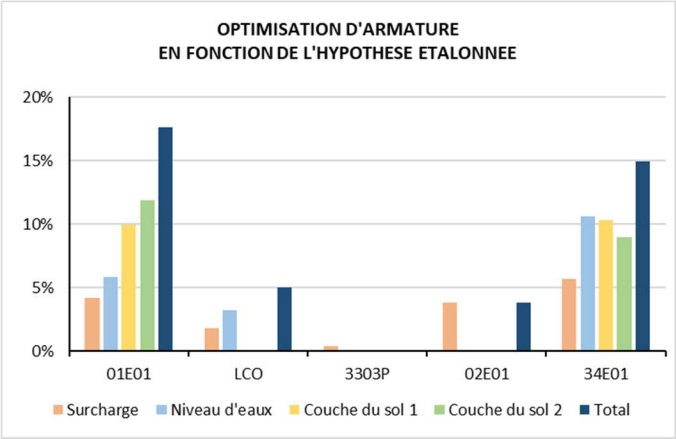


Figure 27 : Optimisation d'armature en fonction de l'hypothèse étalonnée.

Tableau 9 : Optimisation d'armature moyenne en fonction de l'hypothèse étalonnée.

OPTIMISATION D'ARMATURE	HYPOTHESE ETALONNEE			
	Surcharge	Niveau d'eau	Couche du sol 1	Couche du sol 2
MOYENNE	3.10%	6.50%	10.10%	10.40%

On observe que l'impact de l'étalonnage de paramètres de résistance du sol est le plus important par rapport à la quantité d'acier économisée, de 10%, mais il n'est pas toujours envisageable. Il dépend de la détermination initiale des paramètres du sol pour un ouvrage.

L'étalonnage de la surcharge montre toujours une optimisation des aciers inférieure, d'autour 3% en moyenne, mais elle est presque toujours envisageable (il ne faut pas oublier que l'étalonnage de cette hypothèse peut ramener des réductions importantes de déplacements en tête).

De son côté, l'impact du niveau d'eaux de chantier reste significatif avec une réduction moyenne d'aciers de 6%. Son étalonnage a dépendu de la disponibilité des mesures piézométriques.

Ce chapitre a permis, parmi d'autres, de signaler la quantité d'acier que l'on pourrait économiser en déterminant plus précisément les hypothèses de calcul. Cependant, il faut rappeler que l'on a toujours besoin d'hypothèses conservatrices. Sinon, un défaut porterait directement à la ruine structurelle.

5. Coupes singulières

5.1. Introduction

Le chapitre précédent a mis en évidence l'importance des coupes singulières dans l'ensemble du projet. Les écarts entre les modèles de calcul et le comportement réel des parois moulées peuvent être parfois trop importants même après un étalonnage. Dans ce chapitre, on étudie le comportement des coupes singulières et propose une méthode pour l'estimation des effets de bord (effets tridimensionnels) qui provoquent ces comportements particuliers dans les coupes.

On rappelle d'abord la définition de coupe singulière. C'est une coupe de calcul dont le comportement n'est pas bien estimé du fait des limites propres de la modélisation aux coefficients de réaction. Dans les cas les plus généraux, ce type de modélisation peut se rapprocher, plus ou moins bien, du comportement réel du sol et de la PM. Cependant, ce type de modèles ne permet pas la prise en compte d'effets de bord tel que la proximité aux coins, soit concaves ou convexes. En conséquence, le comportement des coupes singulières ne peut pas être bien estimé même avec l'étalonnage présenté dans le chapitre 4.

A la suite de cette partie, on présente toutes les coupes étudiées dans la gare LCO avec leurs mesures inclinométriques et leurs courbes des modèles étalonnés.

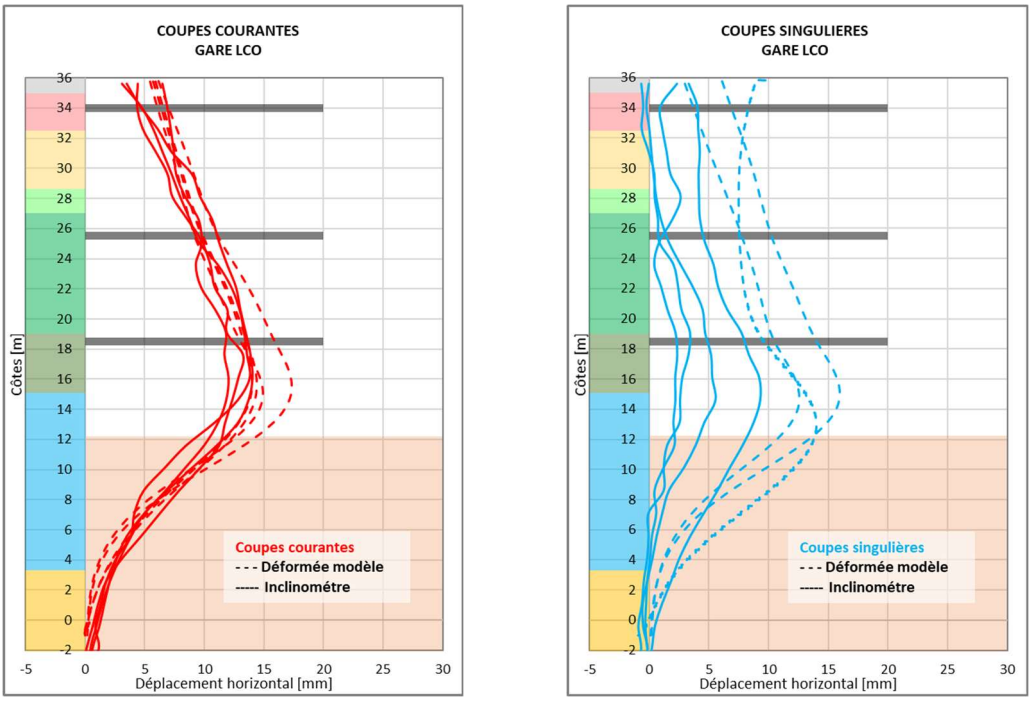


Figure 28 : Coupes courantes et singulières de l'ouvrage LCO.

On constate dans la Figure 28 que les mesures correspondant aux coupes singulières, en bleu, restent toujours très éloignées de leurs déformées estimées, même après un étalonnage antérieur. En rouge, on remarque un très bon couplage entre mesures et déformées estimées de coupes courantes.

En observant toujours la Figure 28, un des aspects à considérer également porte sur la similarité parmi les déformées des modèles. Cet indicateur pourrait justifier, dans une certaine mesure, que le découpage de PM n'est pas optimal car la plupart de coupes se comportent d'une façon similaire.

Dans la Figure 29, on peut identifier l'emplacement des coupes courantes et singulières dans l'ouvrage. On réalise alors que les coupes singulières, en bleu, sont toujours à proximité des angles de l'ouvrage. Le tympan est donc une zone potentielle de développement des coupes singulières. Dans le même temps, il semble y avoir un point limite à partir duquel les effets singuliers ne sont plus efficaces, ce qui expliquerait que l'inclinomètre P17, proche de l'angle du tympan, soit considéré comme appartenant à une coupe courante.

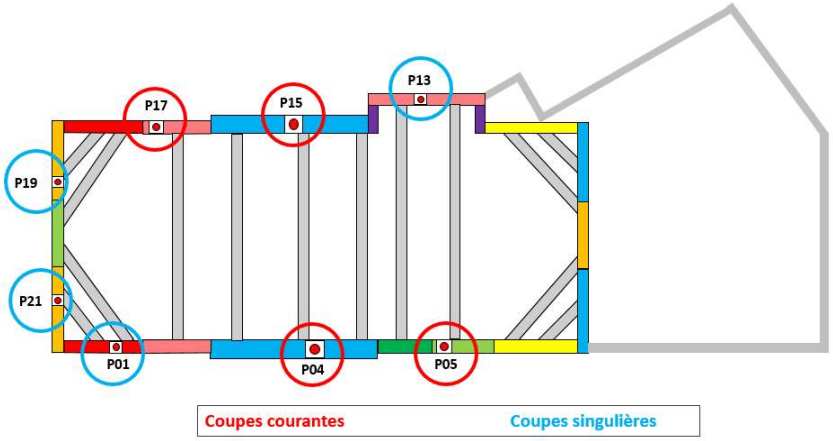


Figure 29 : Vue en plan de la localisation des coupes courantes et singulières de la gare LCO.

De plus, on observe une tendance à la mise en place de butons orientés dans les tympans. Ces butons orientés permettent de garantir la stabilité de l'ouvrage en profitant des effets de poussée de deux panneaux transversaux. On rappelle que les effets singuliers étudiés dans ce chapitre provoquent une réduction importante dans les déplacements de la PM des tympans par rapport aux déplacement issus des modèles MISS-K. On obtient donc que les butons sont aussi surdimensionnés par la non prise en compte de ces effets singuliers. Le dimensionnement de butons est traité en détail dans la Partie III.

Cette introduction a permis de démontrer que les coupes proches d'une paroi transversale font partie des coupes singulières, dont le comportement n'est pas bien estimé par les modèles MISS-K. Dans la suite du chapitre, on s'intéresse donc aux coupes avec une paroi transversale à proximité.

5.2. Méthode proposée pour l'estimation des effets de bord

5.2.1. Principe de la méthode

Après avoir introduit les coupes singulières, le but est de proposer une méthode permettant d'estimer et de quantifier les effets singuliers que l'on peut trouver éventuellement dans ce type de coupes.

Pour cela, on va d'abord étudier ce phénomène à l'aide d'un modèle de type plaque. Le principe consiste à définir le panneau d'un tympan avec des appuis latéraux qui représentent les panneaux transversaux (appuis rigides) tel comme il présenté dans la Figure 30.

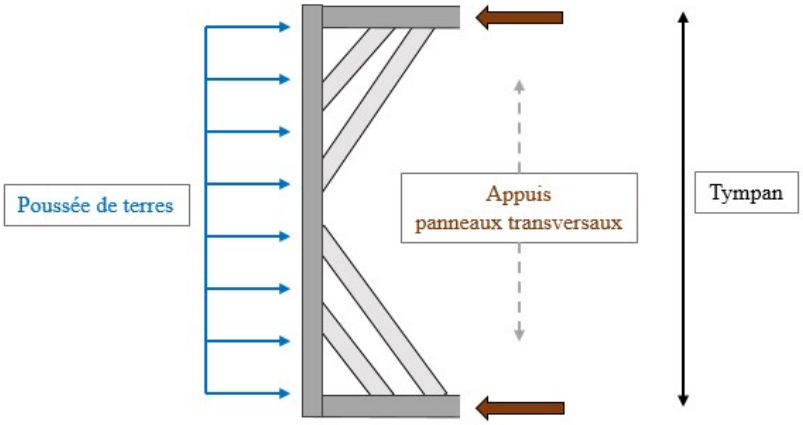


Figure 30 : Schéma, en plan, du fonctionnement du tympan.

Pour la réalisation de ce modèle, on a pris la géométrie et la géotechnique de la coupe C-3 de la gare LCO, considérée comme une coupe multi-butonnée représentative du projet. Les actions modélisées correspondent à la poussée de terres sont issues du modèle MISS-K. Les détails de ce modèle se trouvent dans l'Annexe 4.

Les résultats de ce modèle plaque sont présentés dans la Figure 31.

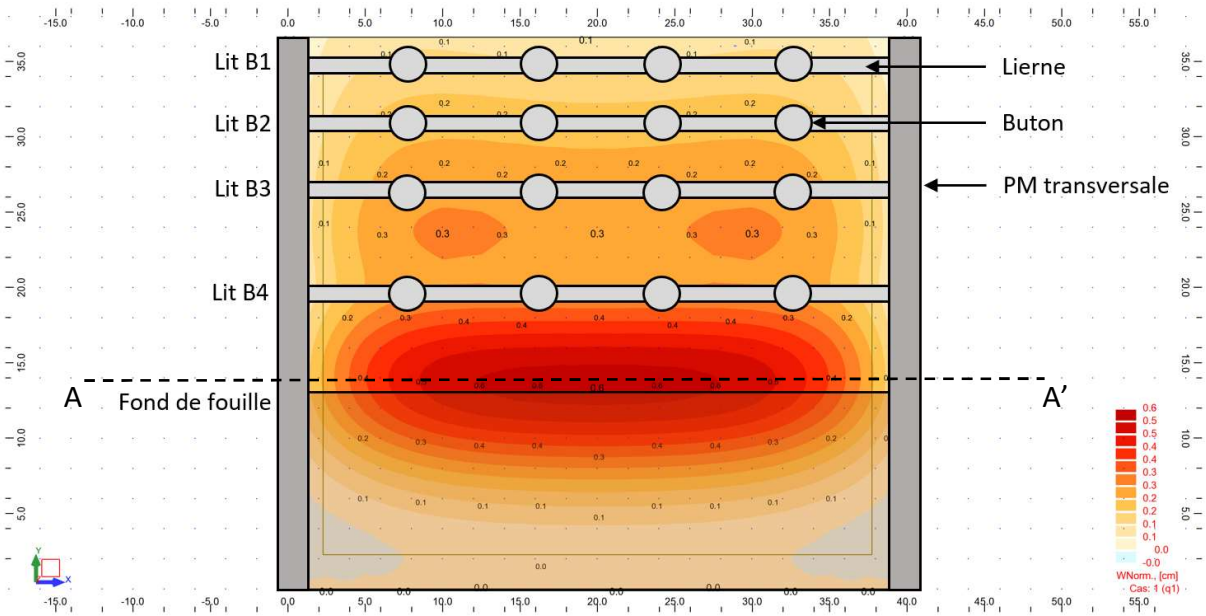


Figure 31 : Déplacements du modèle plaque avec modélisation d'appuis latéraux.

On constate que la modélisation des appuis latéraux le long de la hauteur de la paroi amène avec soi la génération d'un effet de voûte (à la hauteur de la coupe A-A' de la Figure 31). Le ventre se trouve dans la même hauteur mais il ne se développe complètement qu'à une certaine

distance de l'appui latéral. Cette distance L est appelée distance nécessaire pour le développement du ventre.

La réalisation de plusieurs modèles jouant avec les variables a permis de constater que les variables avec plus d'influence sur le développement de la voûte sont l'épaisseur de la PM, h, et la distance entre le dernier lit de butons et le fond de fouille, H.

L'épaisseur peut influencer l'ordre de grandeur du déplacement maximal en ventre, mais la distance entre le dernier lit des butons et le fond de fouille H est la variable fondamentale qui vient déterminer la distance nécessaire pour le développement du ventre L. On présente dans la Figure 32, l'estimation de la distance L en fonction de la hauteur H.

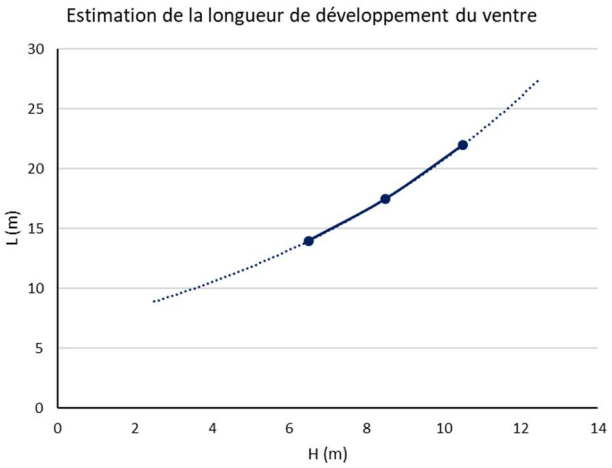


Figure 32 : Estimation de la longueur du développement du ventre

A titre d'exemple, pour la configuration présentée dans la figure ci-dessus, pour une distance entre butons (lit B4) et fond de fouille de 8.5 m, la distance de développement du ventre obtenue est de 17.5 m.

La détermination de cette longueur nécessaire pour le développement complète du ventre permet de calculer la position relative du point d'étude X/L, où X est la distance entre le coin au point d'étude.

On a constaté grâce aux modèles réalisés, que pour une position relative donnée X/L, on trouve toujours le même développement relatif du ventre, β. Ce développement relatif correspond au rapport entre le déplacement réel du ventre et le déplacement maximal calculé sans prendre en compte les effets de bord avec une modélisation MISS-K.

La Figure 33 permet donc de calculer le développement relatif du ventre, β, en fonction de la position relative du point d'étude.

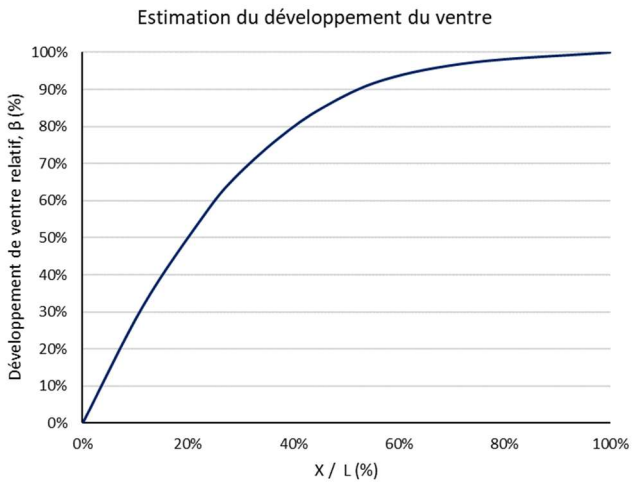


Figure 33 : Estimation du développement du ventre relatif.

Finalement, on peut obtenir une estimation du nouveau déplacement en ventre à partir du déplacement étalonné :

$$\delta_{effet\ singulier} = \beta \cdot \delta_{étalonné}$$

Nota : un exemple d'application de la méthode proposée est détaillé en annexe.

5.2.2. Cas de tympan court

La méthode proposée permet d'estimer une correction de déplacements en ventre pour une coupe singulière. Cette méthode a été toujours appliquée en considérant que le tympan étudié a une longueur toujours supérieure à deux fois la longueur nécessaire pour le développement total du ventre.

En réalité, les tympans ne sont généralement pas très longs. Pour les cas où leurs longueurs sont inférieures à deux fois la longueur nécessaire du développement total du ventre, on dit qu'il s'agit donc, d'un tympan court.

Pour ce cas, on peut bénéficier d'une réduction complémentaire du déplacement du ventre car le point d'étude est impacté par la proximité des deux coins. La modélisation d'un tympan court permet de vérifier cette affirmation. On montre ce phénomène dans la Figure 34.

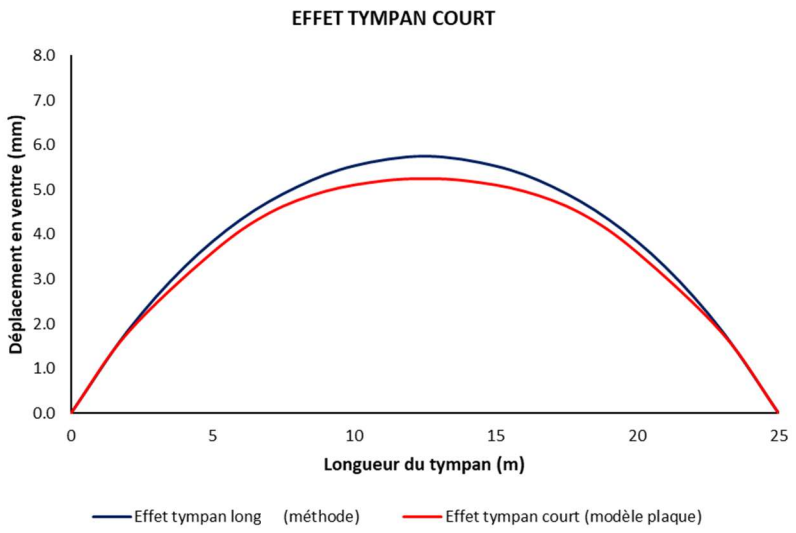


Figure 34 : Effet de tympan court dans l'estimation des effets singulières.

5.2.3. Limites de la méthode

La méthode proposée dépend notamment de la modélisation sur robot d'un panneau représentant une paroi moulée. Cette modélisation nécessite de la prise en compte de plusieurs hypothèses. On montre dans la suite les limites de la méthode :

- La méthode ne tient compte que des résultats issus de la modélisation d'une seule coupe multi-butonnée.
- La modélisation sur le logiciel employé ne permet pas la prise en compte de tous les phases travaux. On n'a considéré que la phase correspondant à l'arrivée au fond de fouille.
- La poussée de terres modélisée sur le modèle plaque est issue d'un modèle MISS-K.
- Le cas d'étude pour l'élaboration de la méthode prend uniquement en compte le cas d'une coupe de phasage ascendant pour la phase concernant l'arrivée au fond de fouille. D'autres cas plus complexes n'ont pas été considérés. Il faut donc mener des études complémentaires pour que la méthode soit plus consistante.
- La méthode donne une estimation de déplacement du ventre mais il ne permet de comprendre ce qui se passe dans le reste de la PM.

5.2.4. Application

Dans cette section, on présente les résultats des nouveaux écarts au niveau du ventre après l'application de la méthode pour la considération des effets de bord sur les coupes singulières.

On rappelle que l'on a appliqué la méthode décrite, malgré les limites exposées dans la section précédente, à toutes les coupes singulières identifiées.

Le Tableau 10 présente un récapitulatif des écarts sur l'ensemble des coupes singulières.

Tableau 10 : Récapitulatif des écarts après la prise en compte d'effets singuliers

OUVRAGE	Ecart initial (%)	Correction étalonnage (%)	Correction effet singulier (%)	Ecart final (%)
MOYENNE	**58%**	**12%**	**28%**	**21%**

On constate une réduction très significative entre les écarts initiaux de 58% et les écarts finaux de 21% grâce à l'étalonnage et à l'application de la méthode proposée précédemment. L'étalonnage a produit une réduction des écarts dans les coupes singulières de 12% alors que la méthode proposée rajoute une réduction de 28%. Il est donc à noter que cette méthode est beaucoup plus efficace que l'étalonnage en ce qui concerne l'estimation des déplacements.

En outre, il faut tenir compte que l'effet de tympan court n'a pas été pris en compte. Pourtant, il est présent dans nombreuse coupes. On peut donc remarquer que la réduction d'écarts à cause d'effets singuliers a encore de la marge d'amélioration.

Le Tableau 11 présente un exemple de comparaison des résultats après l'application de la méthode proposée sur une coupe de chaque ouvrage.

Tableau 11 : Comparaison sur précision de la méthode appliquée.

OUVRAGE	COUPE	INCLINOMETRE	Ecart après étalonnage (%)	Ecart après étalonnage + méthode proposée (%)
01E01	11	33	44%	39%
34E01	5-0	43	45%	13%
02E01	7	14	39%	4%
LCO	6	1	60%	30%
3303P	2	5	72%	3%

Le fait que la méthode soit beaucoup plus précise dans certaines coupes est lié à ses limites présentées précédemment dans la section 5.2.3. De plus, on souligne l'importance de la sensibilité de paramètres utilisés par la méthode et les géométries, très variées, qui ne se rapprochent pas suffisamment de celle prise de base pour l'élaboration de la méthode.

PARTIE III – RETRO-ANALYSE DU CALCUL DU BUTONNAGE

1. Introduction

1.1. Objet

Cette troisième partie est consacrée à la retro-analyse du calcul du butonnage basée sur les mesures d'extensomètres enregistrées dans les ouvrages du Lot 1 de la Ligne 16 du Grand Paris. Les butons provisoires sont très couramment utilisés dans la réalisation d'ouvrages souterrains grâce aux nombreux avantages associés. Toutefois, on trouve très souvent des écarts non négligeables entre les mesures des extensomètres et les efforts de compression théoriques calculés, ce qui met en évidence une marge d'optimisation importante.

Dans cette partie, on analyse ces écarts afin de comprendre le comportement réel des butons métalliques. Dans le même temps, cette analyse permettra d'obtenir des recommandations pour optimiser le dimensionnement dans de futurs projets.

Les mêmes ouvrages considérés pour la Partie II ont été également sélectionnés pour l'étude du butonnage présentée dans la suite de cette partie.

1.2. Méthodologie

On définit dans cette section la méthodologie suivie pour la rétro-analyse du calcul du butonnage qui permet de comprendre le déroulement des étapes d'étude accomplies.

D'abord, on réalise un état des lieux permettant de comparer les mesures d'efforts de compression d'extensomètres avec les efforts de compression calculés en phase d'études. Cette étape permet donc de réaliser une première évaluation des écarts ainsi que de mettre en évidence les besoins de mieux maitriser le dimensionnement de butons.

Puis, on remet en question certaines hypothèses du calcul, notamment la poussée de terres et la prise en compte de l'effet thermique qui sont les variables ayant une influence plus importante dans le calcul de butons comme expliqué dans la Partie 1 – Chapitre 3. L'objectif est de comprendre le comportement de butons et pouvoir proposer de nouvelles hypothèses de calcul qui se rapprochent mieux de leur comportement réel.

A partir de la proposition de nouvelles hypothèses, on mène à terme un exemple d'étalonnage du dimensionnement de butons et on analyse les résultats.

De manière générale, la démarche décrite ci-dessus permet de bien connaître les hypothèses de calcul et de tirer des conclusions applicables dans d'autres projets similaires.

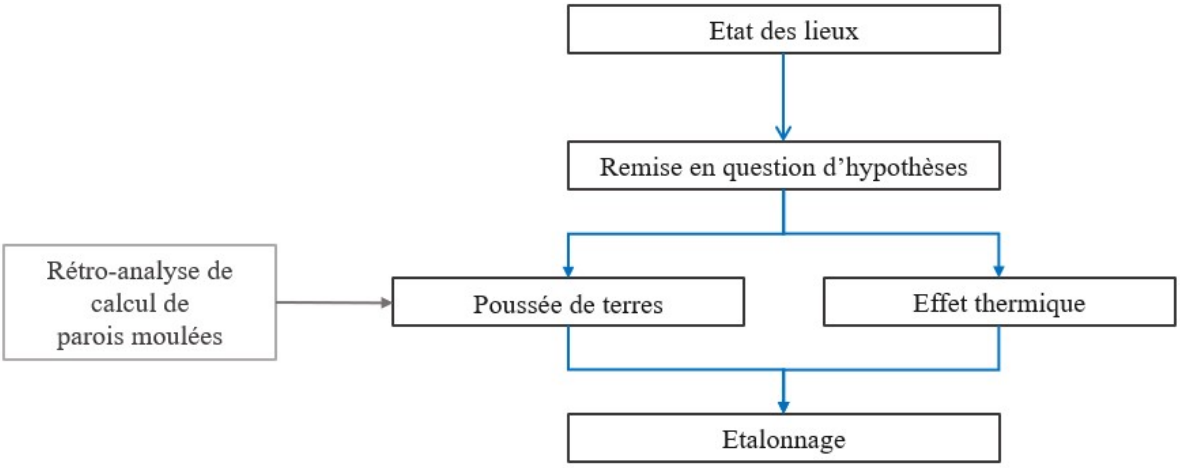


Figure 35 : Méthodologie suivie pour la rétro-analyse du calcul des butons.

2. Etat des lieux

2.1. Données disponibles

Cette Partie III consacrée aux butons nécessite la disponibilité de mesures d'extensomètres permettant d'obtenir leurs déformations et par conséquent, leurs efforts de compression. De manière complémentaire, la disponibilité de mesures de température dans chaque lit de butons permet aussi de comprendre l'influence de l'effet thermique dans ces éléments provisoires.

Parmi les ouvrages sélectionnés (les mêmes que ceux étudiés pour la Partie II), on dispose des données montrées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Disponibilité des données pour la rétro-analyse de calcul de butons.

OUVRAGE	Mesures d'extensomètres dans les butons	Mesures de température dans les butons
$01^{E}01$	✓	✓
LCO	✓	✓
$34^{E}01$	✓	✓
$02^{E}01$	✓	X
3303	✓	X

On remarque que malgré la nombreuse quantité d'instruments d'auscultation mise en place pour le suivi du comportement des ouvrages, on retrouve parfois des instruments endommagés. Les données restant exploitables sont toutefois suffisants pour garantir une étude intéressante et fiable.

On présente dans la suite de ce mémoire les résultats de l'état des lieux avec les écarts entre les efforts mesurés et calculés dans les butons.

2.2. Résultats

2.2.1. Analyse particulière

Cette analyse microscopique a pour but de comprendre le comportement des butons en fonction des phases de terrassement et analyser les écarts entre mesures du terrain et les études pour des cas de butons spécifiques.

La Figure 36 présente les résultats de la mesure des efforts de compression des trois lits de butons pour la section S1. Cette section, de phasage ascendant, est située dans la partie centrale de l'ouvrage 01^{E}01, comme indiqué dans la Figure 37.

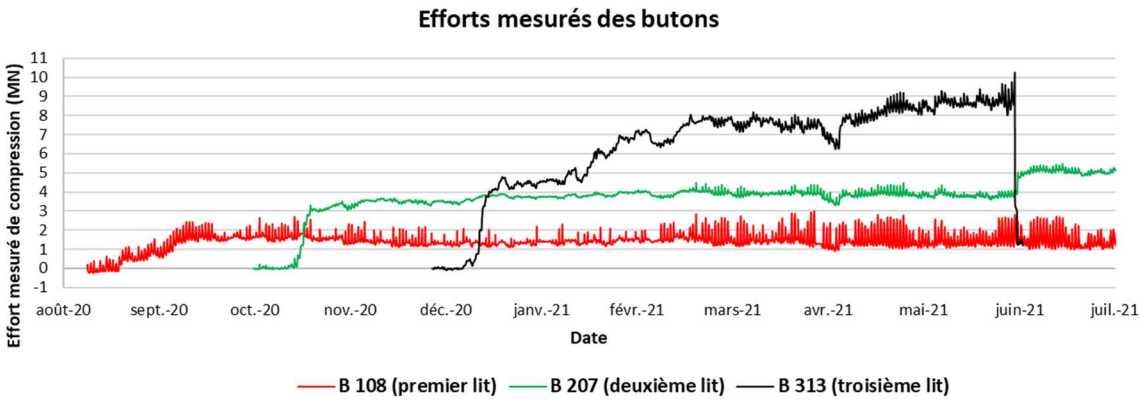


Figure 36 : Effort mesuré (MN) pour les butons B108-B207-B313 (section S1)

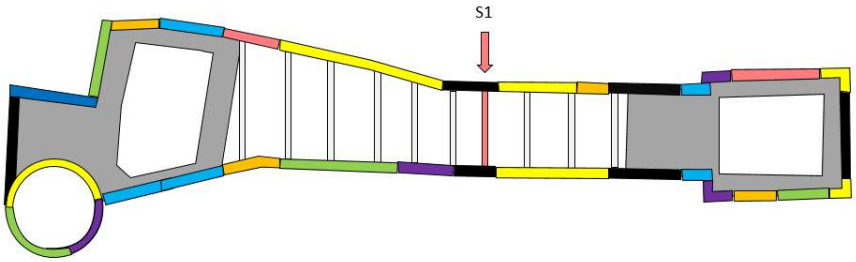


Figure 37 : Situation en plan de la section S1

On constate une augmentation importante de l'effort de compression quelques jours après l'installation de chacun des lits des butons correspondant au redémarrage du terrassement du niveau immédiatement inférieur. Cet effort de compression atteint une valeur limite qui reste plus ou moins constante pendant les phases suivantes d'excavation pour le premier et deuxième lit (B1 et B2). Pour le troisième lit (B3), on remarque un effet échelonné entre décembre 2020 et janvier 2021 correspondant à l'arrêt des travaux pour la période de Noël. De plus, pour ce même lit B3, on constate de légères oscillations pendant les mois d'avril, mai et juin. En regardant les enregistrements des niveaux piézométriques, il semble que ces oscillations sont provoquées par des variations du niveau de la nappe phréatique qui descend jusqu'à un minimum de 33.9 NGF pour le mois d'avril et remonte jusqu'à un maximum de 36.4 NGF pour le mois de juin. On constate donc que les variations de la nappe phréatique ont plus d'influence sur les lits les plus profonds, comme attendu.

A grande échelle, on observe également des variations journalières de la compression à cause de l'effet de la température. Ces variations sont remarquables pour le premier lit mais elles restent plus limitées pour les lits inférieurs. Ce point est abordé en détail dans le chapitre 3 de cette Partie III.

La Figure 38 présente l'effort de compression mesuré du deuxième lit B_2(en vert) et les efforts calculés à ELU en fonction de la phase de terrassement N_{Ed} (en bleu).

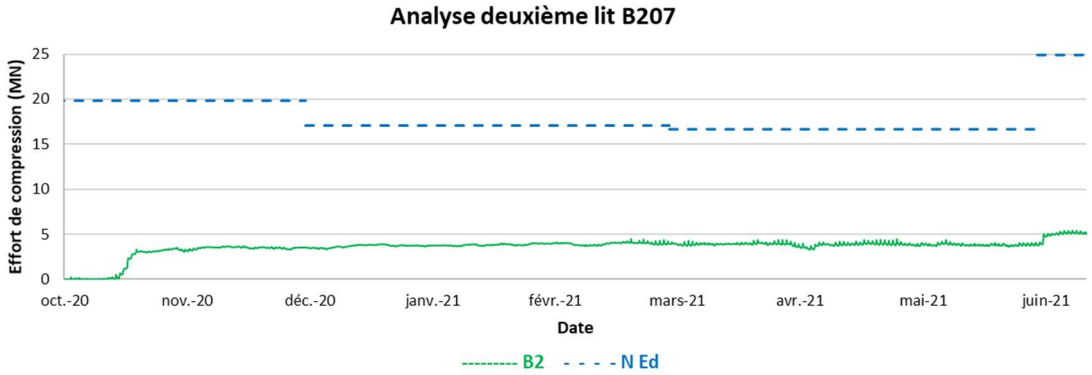


Figure 38 : Analyse du buton B207

On constate que les efforts calculés, en bleu, se trouvent très éloignés de ceux mesurés, en vert, ce qui se traduit par un surdimensionnement.

En regardant le retrait du dernier lit de butons en début juin 2021 dans la Figure 38, on observe une augmentation de la compression du deuxième lit qui passe de 4 MN à 5 MN, alors que l'augmentation théorique était estimée autour de 8 MN. On constate donc cette tendance à surestimer les efforts de compression de manière générale dans toutes les phases de calcul.

On analyse le dimensionnement des différents lits de buton dont les efforts de compression (mesurés, calculés et de résistance) sont présentés dans la Figure 39.

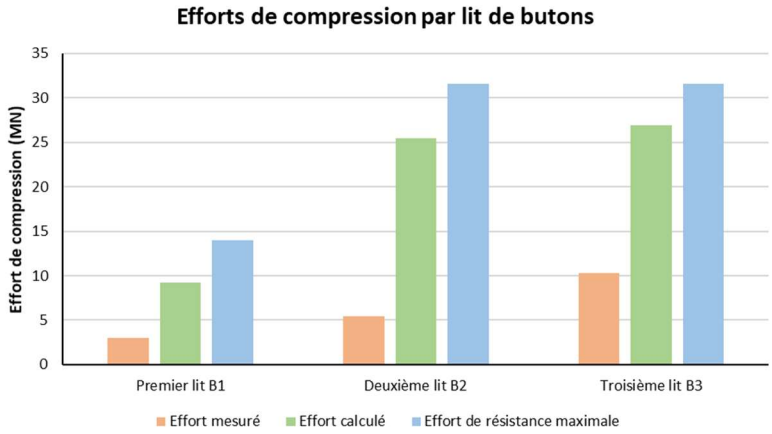


Figure 39 : Effort de compression par lit de butons

On constate des efforts mesurés très inférieurs à ceux calculés en phase d'études pour tous les lits. Dans la suite de ce chapitre, on offre un regard plus général à partir des résultats de l'ensemble des butons analysés.

2.2.2. Analyse globale

Cette section présente un récapitulatif de résultats globaux de l'état des lieux après avoir étudié chaque buton équipé avec extensomètres.

D'abord, on définit les deux taux suivants :

- Taux à ELS : il représente le rapport entre l'effort de compression mesuré et l'effort calculé à l'état limite de service. Il sert d'indicateur pour la prise en compte de la poussée de terres. La valeur idéalement attendue se rapproche de 100%.

- Taux à ELU : il représente le rapport entre l'effort de compression mesuré et l'effort calculé à l'état limite ultime. Il sert d'indicateur pour la prise en compte de la poussée de terres et de l'effet thermique. La valeur idéalement attendue se rapproche de 70%

$$Taux\ ELS = \frac{N_{mesuré}}{N_{ELS}} \qquad Taux\ ELU = \frac{N_{mesuré}}{N_{ELU}}$$

Après avoir défini ces deux valeurs, on est en mesure de présenter les résultats obtenus, par ouvrage, dans la Figure 40.

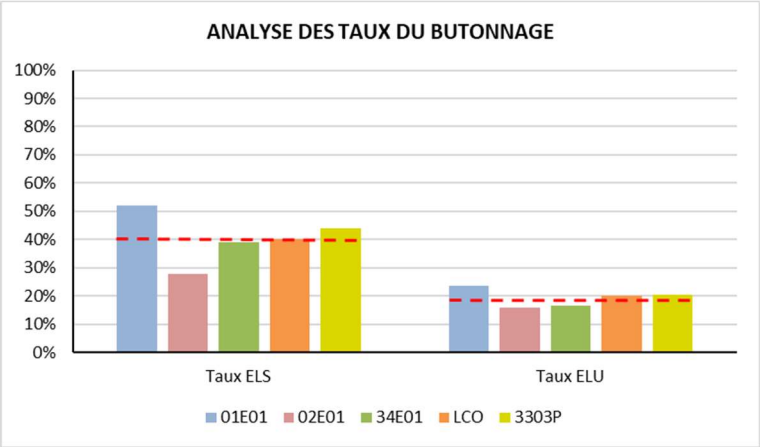


Figure 40 : Analyse des taux des butons.

On constate un taux à ELS et un taux à ELU moyen respectivement de 38% et 19%. Ces valeurs sont très éloignées des valeurs idéales définis ci-dessus. Ces résultats mettent en évidence le besoin de reconsidérer les différentes hypothèses pour le calcul du butonnage (notamment pour la modélisation de la poussée de terres et de l'effet thermique, les actions principales).

L'état des lieux a donc permis de montrer des potentielles marges d'amélioration dans le calcul du butonnage. D'un côté, l'action de la poussée de terres dépend notamment des modèles MISS-K employés pour le calcul de parois moulées. Par conséquent, on peut utiliser toutes les considérations présentées dans la Partie II pour l'étalonnage de la poussée de terres qui

détermine le dimensionnement de butons. D'un autre côté, il faut analyser la prise en compte de l'effet thermique, présenté dans le chapitre suivant.

3. Effet thermique

3.1. Gradient thermique

Le gradient thermique est un effet très important dans le calcul de butons métalliques. La Figure 41 montre l'historique des mesures d'efforts de compression et de température pour le buton B108 de l'ouvrage $01^{E}01$ (il appartient à la même section présentée dans le chapitre précédent).

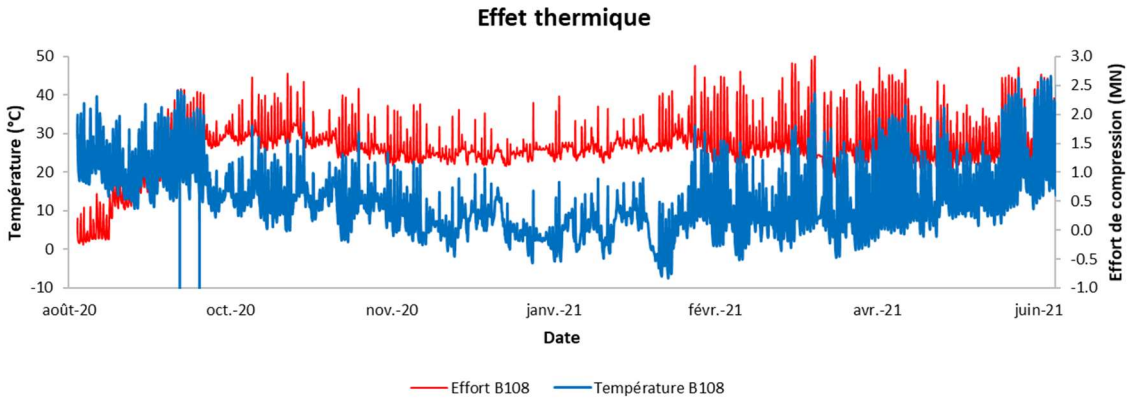


Figure 41 : Effet thermique sur le buton B108 de l'ouvrage $01^{E}01$.

On remarque que les variations journalières de température produisent des oscillations importantes dans l'état de contraintes des butons, qui peuvent atteindre presque 2 MN/jour pour le cas présenté. On constate également que les variations annuelles de température entre l'hiver et l'été ne se ressentent quasiment pas dans l'état de compression du buton.

3.1.1. Butons non-abrités

La Figure 36 a mis en évidence un gradient thermique différent pour les butons non-abrités de l'ouvrage $01^{E}01$ en fonction de leurs profondeurs d'installation. Ainsi, l'effet thermique constaté dans le premier lit de l'ouvrage $01^{E}01$ n'est pas aussi remarquable au fur et à mesure qu'on se rapproche du fond de fouille.

Une fois constaté ce phénomène, on peut mettre en question l'hypothèse de calcul pour la considération d'un gradient thermique unique pour tous les butons non-abrités, indépendamment de sa profondeur d'installation.

Avant d'entrer dans le détail, on rappelle d'abord que le gradient thermique de calcul pour les butons non-abrités peints en blanc est de +20/-30°C. Il serait intéressant, dans un premier temps, de comparer le gradient thermique positif (+20°C) par rapport au gradient maximal mesuré en prenant compte de la température d'installation, T_i. Cela permettrait d'évaluer l'adéquation de ce gradient thermique de calcul d'une façon précise. Malheureusement, on ne dispose pas de cette mesure avec précision. Toutefois, vu les températures maximales constatées, il semble raisonnable de faire l'hypothèse que la température d'installation T_i a un ordre de grandeur

similaire à $T_{maximale} - 20°C$ (sans oublier le coefficient de combinaison de 1.5 pour la température qui peut prendre compte de la variabilité de cette action).

On revient donc sur la question du gradient thermique en fonction de la profondeur. On présente les mesures de température pour les butons non-abrités des ouvrages 01^{E}01 et LCO dans la Figure 42. L'historique de mesures représenté correspond à la période dont les gradients thermiques mesurés sont les plus importants parmi les enregistrements disponibles. Les températures des lits sont représentées en couleur rouge, vert et noir au fur et à mesure que l'on descend en profondeur.

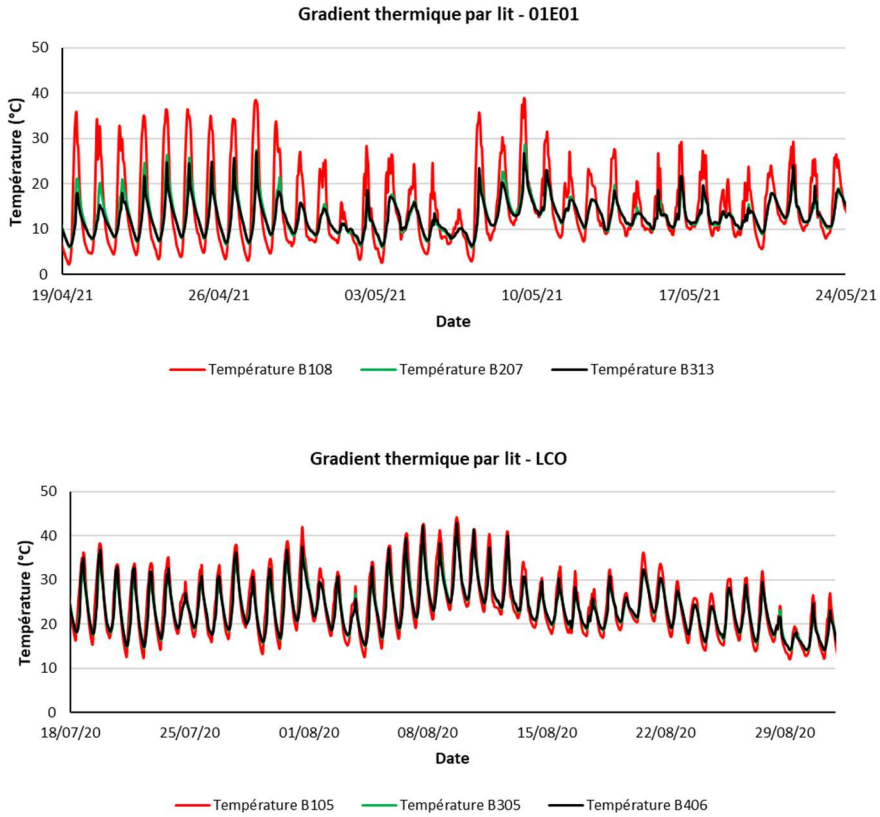


Figure 42 : Gradient thermique mesurés pour les butons non-abrités des ouvrages 01^{E}01 et LCO

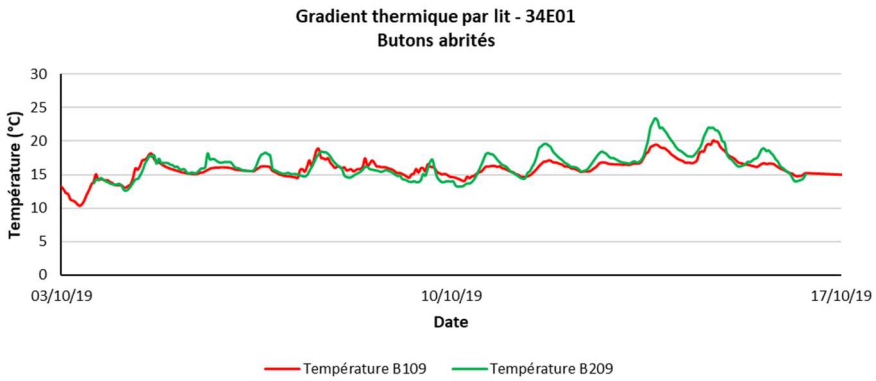
On observe que le phénomène constaté pour l'ouvrage 01^{E}01 n'a pas lieu pour l'ouvrage LCO. Les gradients mesurés sur l'ouvrage LCO sont superposés indépendamment du lit de butons, Ainsi, on ne peut pas proposer une adaptation du gradient thermique de calcul en fonction des lits pour tous les butons non-abrités indépendamment de l'ouvrage d'étude.

On cherche à expliquer ce phénomène et l'hypothèse est la suivante : l'exposition au soleil des butons non-abrités peut varier de manière significative en fonction de la géométrie de l'ouvrage, notamment en fonction de la largeur et la profondeur. Ainsi, les butons de l'ouvrage 01^{E}01, qui est très étroit et profond, sont soumis à des gradients thermiques différents en fonction de leurs profondeurs d'installation. De son côté, l'ouvrage LCO a une géométrie beaucoup plus ouverte (10 m de largeur sur 01^{E}01 contre 23 m de largueur sur LCO) et une profondeur légèrement plus petite (26 m de profondeur sur 01^{E}01 contre 24 m sur LCO).

La possibilité d'anticiper ces effets d'exposition au soleil reste toujours assez complexe en phase d'études. Cependant, cette analyse peut être utile en tant que l'on tente de comprendre les raisons de surdimensionnement de butons et en tant que l'on puisse appliquer ces conclusions à des ouvrages très similaires dans des projets futurs.

3.1.2. Butons abrités ou mi-abrités

De manière équivalente à ce qui a présenté pour les butons non-abrités, on présente dans la Figure 43 les mesures de température pour la période avec des gradients thermiques maximaux pour les butons abrités et mi-abrités.



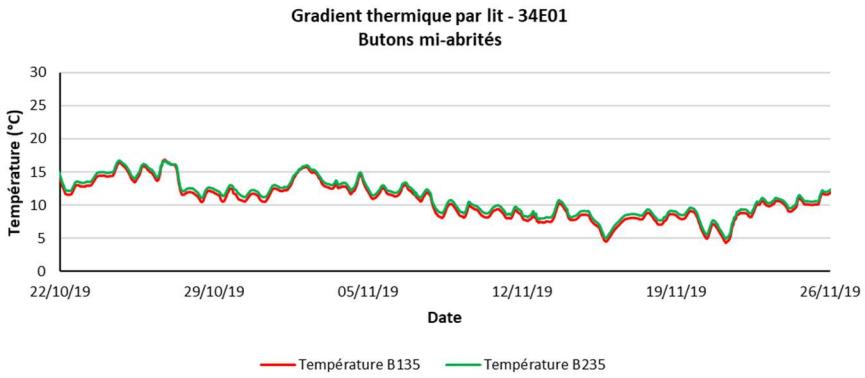


Figure 43 : Gradients thermiques mesurés pour les butons mi-abrités de l'ouvrage 34^{E}01

On constate que les gradients thermiques de calcul pour les buton abrités ou mi-abrités ne varient pas beaucoup, du fait qu'ils sont protégés de l'exposition au soleil. Il est à noter qu'il n'y a pas des mesures correspondantes à la saison estivale. Le Tableau 13 présente les variations maximales de température journalière pour ces types de butons.

Tableau 13 : Variations de température mesurées par ouvrage

OUVRAGE	Buton	$\Delta T_{max\ mesuré}$	$\Delta T_{max\ de\ calcul}$
01E01	Abrité	5.6	+14 / -11
34E01	Abrité	8	+14 / -11
	Mi-abrité	6.5	+17 / -20

On observe que les gradients de calcul sont très surestimés par rapport aux gradients mesurés. On propose donc une reconsidération des gradients thermiques de calcul pour ce type de butons.

3.2. Degré de restriction du buton

3.2.1. Introduction

Cette section est dédiée à l'étude du comportement des butons en réponse à l'action thermique. Comme expliqué dans la Partie I, on fait l'hypothèse d'appuis bi-encastrés pour la prise en compte de l'effet thermique. On rappelle l'expression utilisée pour le calcul de l'effort axial produit par un gradient de température donné :

$$N^{\theta}_{théorique} = E_{acier} \cdot A_{eff} \cdot \alpha_{acier} \cdot \Delta T$$

En étudiant les variations de température mesurées dans chaque lit de butons, on repère que les oscillations de leurs contraintes ne surviennent pas aux valeurs théoriques calculées.

A titre d'exemple, le Tableau 14 présente ce phénomène pour le buton B408 de l'ouvrage LCO et le buton B109 de l'ouvrage $34^{E}01$.

Tableau 14 : Rapport d'efforts mesurés et théoriques pour le buton B408 de LCO et le buton B109 de $34^{E}01$

OUVRAGE	BUTON	$\Delta N_{mesuré}$ (MN)	$\Delta T_{mesuré}$ (°C)	$\Delta N_{théorique}$ (MN)	ΔN_m / $\Delta N_{théorique}$
LCO	B408	1.39	22.10	5.03	28%
34E01	B109	0.17	2.75	0.48	35%

3.2.2. Comportement des butons face aux effets thermiques

Comme mentionné précédemment, le comportement des butons face aux effets thermiques n'est pas bien considéré. Les butons métalliques installés sont appuyés sur une paroi et un sol à l'arrière de celle-ci qui se comportement comme un milieu élastique capable d'absorber, grâce à sa déformation, une partie de l'effet thermique. On parle alors d'une déformation apparente de la PM, et par conséquent du buton, qui réduit les efforts de compression provoqués par un gradient thermique dans les butons.

Cet effet est étudié par Daktera [9] et Nejjar [14] à l'aide du paramètre appelé degré d'autocontrainte ou degré de restriction du buton, selon l'un et l'autre, respectivement (on prend le nom de degré de restriction du buton pour ce mémoire). Ce paramètre, M, représente donc le rapport entre la variation d'effort mesuré et la variation d'effort théorique.

$$M = \frac{\Delta N_{mesuré}}{\Delta N_{théoriqu}}$$

Le degré de restriction représente le comportement de l'ensemble paroi moulée-sol face à l'action du buton qui est soumis aux nombreux cycles de dilatation et de contraction. Il est alors compréhensible de penser que ce coefficient dépend notamment de la couche de sol à l'arrière de la PM. Les butons appuyés à la hauteur de couches plus raides, situés généralement en niveaux plus profonds, devraient avoir des coefficients de restriction plus élevés car les couches empêchent les butons de se dilater et par conséquent, ils sont soumis à des compressions plus

importantes. En outre, ce paramètre doit aussi dépendre d'une certaine manière, de l'inertie de la PM, qui détermine sa capacité de déformation et celle du buton en question.
La maitrise de ce paramètre peut donc permettre d'améliorer la prise en compte de l'effet thermique et d'optimiser le dimensionnement des butons.

3.2.3. Calcul du degré de restriction du buton

Cette section est consacrée au calcul du degré de restriction afin de pouvoir optimiser le calcul de butons. On présente le calcul du degré de restriction en supposant des appuis des butons bi-encastrés (rigidité infinie), et puis en supposant des appuis de type ressort élastique.

Degré de restriction pour appuis bi-encastrés ($M_{bi-encastré}$)

Le calcul du degré de restriction est réalisé à partir des variations maximales d'efforts de compression et de température journalières (pendant les phases lesquelles ne produisent pas d'augmentations dans les efforts de compression). Ainsi, pour un buton donné, on peut calculer le paramètre M le long de son installation comme suit :

$$M_{bi-encastré} = \frac{\Delta N_{mesuré}}{E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta T_{mesurée}}$$

Avec :

- $\Delta N_{mesuré}$: variation de l'effort de compression mesuré ;
- $\Delta T_{mesuré}$: variation de température journalière mesurée ;
- E_{acier} : module de Young de l'acier ;
- A_{buton} : section d'acier du buton ;
- α_{acier} : coefficient de dilatation thermique de l'acier.

La Figure 44 présente donc la valeur de ce paramètre pour le buton B-108 de l'ouvrage 01^{E}01 pendant l'historique total de mesures.

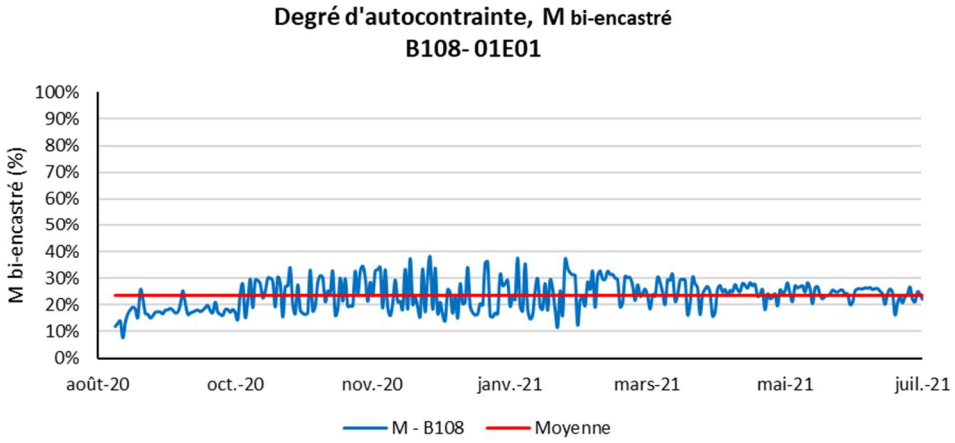


Figure 44 : Degré d'autocontrainte pour appui bi-encastré du buton B-108

On constate des légères oscillations dans chaque cycle de dilation et contraction avec une valeur toujours autour de 20% et 30%, et avec une moyenne de 22% (la moyenne est calculée à partir d'octobre 2020, une fois le buton est bien comprimé). Il est à noter qu'une valeur de M proche de 0 représente l'extrémité du buton libre alors qu'une valeur proche de l'unité représente un appui complètement bi-encastré. Les valeurs intermédiaires qui oscillent mettent en évidence que les conditions d'appui changent dans le temps. Le degré de restriction du buton sert à mesurer ces conditions au niveau de l'appui. D'un côté, on repère une première période proche au moment de l'installation du buton, avant le terrassement du niveau immédiatement inférieur, où on ne pourrait pas garantir un bon degré d'encastrement du buton et on obtient donc les valeurs les plus faibles de M. D'un autre côté, quelques semaines après le redémarrage du terrassement, les déplacements de la paroi mettent le buton en compression et on atteint la valeur maximale du degré de restriction autour de 30-40%.

Vis-à-vis des résultats pour le buton B-108 de l'ouvrage 01^{E}01, on s'intéresse dans ce stade au calcul des degrés de restriction de tous les butons pour analyser ce comportement de manière plus générale. On représente les résultats moyens pour chaque buton dans la Figure 45.

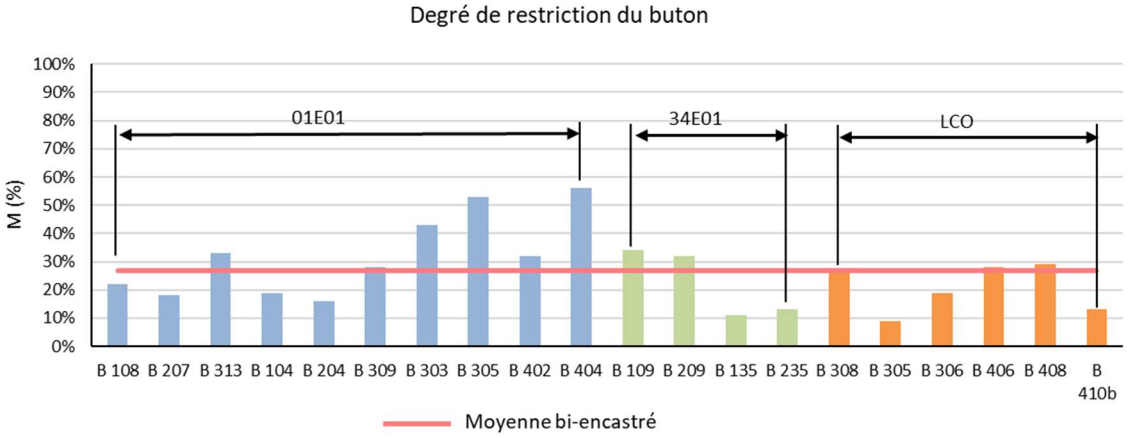


Figure 45 : Degré d'autocontrainte pour appui bi-encastré pour l'ensemble de butons

On constate que la valeur de ce paramètre arrive au maximum d'autour 30% à exception des butons B303, B305 et B404 de l'ouvrage 01^{E}01. Ces butons sont tous caractérisés par être appuyés sur une paroi en L et par l'exécution d'un bouchon injecté à l'arrière de celle-ci (le buton B404 se trouve dans la même situation). D'un côté, le fait d'avoir une paroi transversale (paroi dite en L) augmente la rigidité réelle de l'ensemble dans cette zone d'intérêt. D'un autre côté, le traitement du terrain provoque une amélioration de la cohésion du sol. On peut donc faire l'hypothèse que la paroi transversale et que les couches traitées sont globalement plus raides, ce qui justifierait des meilleures conditions d'appui des butons et le fait d'avoir obtenu des valeurs plus importantes du degré de restriction pour ces butons mentionnés.

En suivant cette hypothèse, il faut prendre en compte que les panneaux de paroi moulée affectée par la réalisation du bouchon seraient donc surdimensionnés si l'on n'a pas pris en compte le traitement de terrain pour la modélisation MISS-K.

On constate finalement un degré de restriction du buton pour des appuis bi-encastré de l'ordre de 28%.

Degré de restriction du buton pour appuis élastiques ($M_{élastique}$)

Le calcul de l'effort de compression pour un buton appuyé sur des ressorts représentant la raideur en série de paroi moulée et du sol permettrait de calculer le degré de restriction pour appuis élastiques à l'aide de l'expression suivante :

$$M_{élastique} = \frac{\Delta N_{mesuré}}{\Delta N_{élastique}}$$

Le calcul de ce degré de restriction pour appuis élastiques devrait de donner des valeurs proches à l'unité si l'on était capables de bien estimer l'effort théorique en prenant compte du comportement élastique de l'ensemble sol-paroi.

Figure 46 : Schéma des appuis élastiques du buton.

L'obtention de ce paramètre peut être calculé facilement à l'aide de logiciels de calcul de structures. D'abord, on calcule la raideur de l'ensemble paroi moulée-sol avec les modèles MISS-K. Il suffit de modéliser une force linéique du même ordre de grandeur que ceux des efforts subis par des gradients thermiques et voir comment la paroi se déforme. Une fois la raideur calculée, on peut modéliser les butons sur un logiciel d'éléments finis soumis à un gradient thermique connu et en supposant des appuis élastiques avec une raideur égale à la raideur calculée précédemment.

Il est à noter que le degré de restriction pour appuis élastiques peut atteindre une valeur supérieure à l'unité. Ainsi, une valeur de M proche de 0 représente l'extrémité libre du buton alors qu'une valeur proche de l'unité représente une bonne estimation de la raideur paroi moulée-sol. Si la valeur de M est supérieure à 1, on est en train de sous-estimer cette raideur. En revanche, si la valeur de M est inférieure, alors on la surestime. L'utilité du degré de restriction est toujours de mesurer si les conditions modélisées représentent bien la réalité.

On présente dans la Figure 47 le calcul du degré de restriction pour l'ensemble de butons avec la considération des appuis élastiques. Pour chaque buton, on observe le degré de restriction pour appuis bi-encastrés (barre à gauche de couleur claire) et le degré de restriction pour appuis élastiques (barre à droite de couler foncée). Cela permet de comparer les valeurs de ce paramètre.

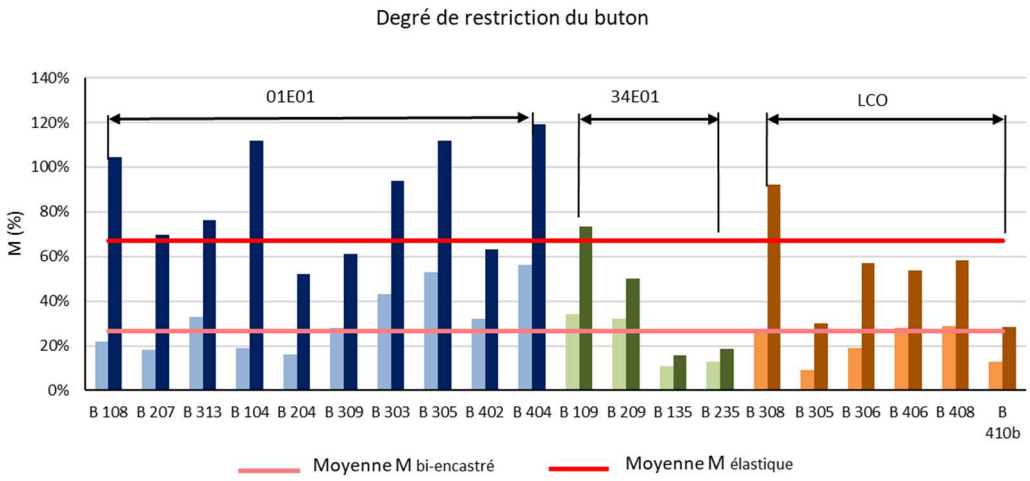


Figure 47 : Comparaison du degré de restriction du buton en fonction des conditions d'appuis considérées.

On observe logiquement des valeurs plus élevées pour le degré de restriction en considérant des appuis élastiques. Cela démontre qu'un appui élastique, tel qui a été modélisé, représente mieux la condition réelle d'appui des butons sur la PM puisque le coefficient M est plus proche de l'unité.

Les valeurs du degré de restriction sont toujours inférieures ou très proches à l'unité. Parmi les butons avec degrés de restriction plus élevés, on repère deux situations différentes :

- Butons B303, B305, B402 et B402 de l'ouvrage $01^{E}01$: ils ont été étudiés précédemment. Les conditions de contour (l'existence d'une paroi transversale et d'un bouchon injecté) rendent l'ensemble de paroi moulée-sol plus raide et les butons peuvent être mieux fixés et donc plus comprimés. Pour ces cas-là, les degrés de restriction pour appuis bi-encastrés ou élastiques sont élevés du fait que l'effort de compression mesuré est important.
- Butons B108 et B104 de l'ouvrage $01^{E}01$ et buton B308 de l'ouvrage LCO : la raideur paroi moulée-sol obtenue par la modélisation MISS-K est très faible et elle permet donc une dilation importante des butons face aux gradients thermiques. Cela se traduit par un degré de restriction élevé.

Avant de tirer des conclusions, il faut analyser en détail cette dernière situation. On rappelle que les raideurs calculées par les modèles MISS-K sont très faibles. Si l'on regarde la variation de l'effort de compression théorique d'un buton par rapport à la raideur paroi moulée-sol, on observe qu'elle n'est pas du tout linéaire et par ailleurs, elle est très sensible pour les raideurs très faibles. Ce phénomène est présenté dans la Figure 48.

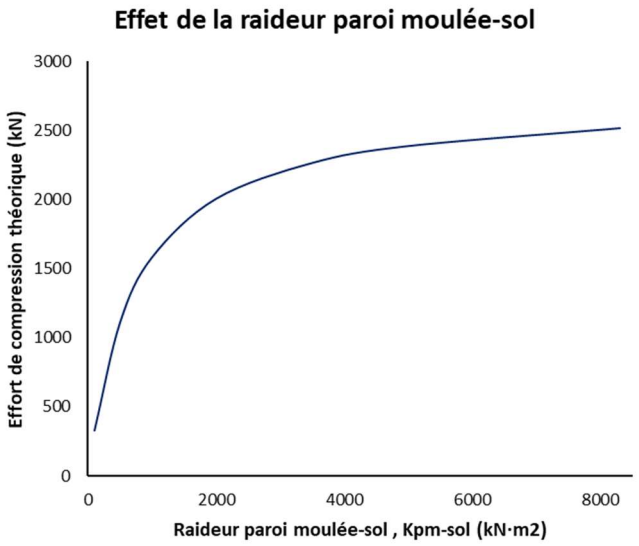


Figure 48 : Effet de la raideur paroi moulée-sol dans l'effort de compression d'un buton.

Dans la Partie II, on a constaté de manière générale que les modélisations MISS-K ne représentent parfaitement le comportement des écrans de soutènement. On a observé, en moyenne, des déplacements mesurés inférieurs à ceux estimés, ce qui pourrait mettre en évidence une certain sous-estimation de la raideur PM-sol. Par conséquent, cela expliquerait les valeurs élevées du degré de restriction pour les cas présentés ci-dessus.

La valeur moyenne pour le degré de restriction pour appuis élastiques est autour de 70%. Si l'on ne considère pas les butons de caractéristiques particulières (B303, B305, B402 et B404 de l'ouvrage $01^{E}01$), la valeur moyenne du degré de restriction chute à 60%.

3.2.4. Recommandation pour la prise en compte de l'effet thermique

On récapitule les valeurs du degré de restriction obtenus en fonction des hypothèses de calcul. D'une part, si on considère les appuis bi-encastrés, la valeur moyenne du degré de restriction est d'environ 30%. D'une autre part, ce paramètre atteint une valeur de 60% pour la condition des appuis élastiques.

Il semble donc cohérent de proposer une valeur pour la prise en compte de l'effet thermique de 50% l'effet thermique calculé pour appuis bi-encastrés :

$$N_{études}^{\theta} = 50\% \cdot N_{bi-encastré} = 0{,}5 \cdot E_{acier} \cdot A_{eff} \cdot \alpha_{acier} \cdot \Delta T$$

Dans la pratique, cette valeur représente la prise en compte du comportement élastique du PM-sol. Dans le même temps, on garde une marge sécuritaire de 40% par rapport aux mesures disponibles d'extensomètres, comme le montre cette rétro-analyse. De plus, le calcul de l'effet thermique en supposant des appuis bi-encastrés permet de bénéficier toujours de la simplicité de l'expression montrée ci-dessus.

4. Exemple d'étalonnage

Le but de ce dernier chapitre est de présenter l'étalonnage d'une section grâce aux nouvelles considérations issues de cette rétro-analyse. La section d'étude est la même employée pour l'analyse particulière de l'état des lieux du chapitre 2. On rappelle qu'il s'agit d'une section de phasage ascendant située dans la partie centrale de l'ouvrage $01^{E}01$ (voir Figure 37).

4.1. Considérations préalables

On présente d'abord les différentes considérations pour l'étalonnage de la section indiquée. Elles abordent plusieurs conclusions obtenues le long de ce mémoire.

4.1.1. Poussée de terres

Concernant la poussée de terres appliqué sur les butons, on reprend le modèle MISS-K étalonné pour la rétro-analyse du calcul des parois moulées. La section de butons étudiée correspond à la coupe C-5 de l'ouvrage $01^{E}01$. On peut donc prendre directement les valeurs de ce nouveau modèle.

On présente les valeurs de la poussée de terres utilisées avant et après l'étalonnage de modèles MISS-K dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Efforts de poussée de terres utilisés pour le calcul des butons de la section 1.

BUTON	Effort avant étalonnage(kN/ml)	Effort après étalonnage (kN/ml)
B108	538	268
B207	2090	1807
B313	2084	1637

On observe une réduction d'efforts de poussée de terres du fait de la réduction des déplacements grâce à l'étalonnage du modèle.

4.1.2. Gradient thermique

D'après les résultats de l'étude relative au gradient thermique, on propose les gradients indiqués dans le Tableau 16. On rappelle que les butons sont non-abrités et l'ouvrage est très étroit et profond, ce qui permet une réduction du gradient thermique pour les lits inférieurs.

Tableau 16 : Gradients thermiques considérés pour les calculs des butons de la section 1.

BUTON	Gradient thermique initial (ºC)	Gradient thermique considéré (ºC)
B108	20	20
B207	20	15
B313	20	15

4.1.3. Degré de restriction

Le degré de restriction est fixe pour tous les butons. Sa valeur est prise de 50% pour la considération des appuis bi-encastrés.

4.2. Résultats

La prise en compte de considérations présentées ci-dessous permet de réduire les efforts de compressions calculés dans les butons. On présente la réduction de ces efforts dans la Figure 49. Les valeurs moyenne de ces réductions sont indiquées dans le Tableau 17.

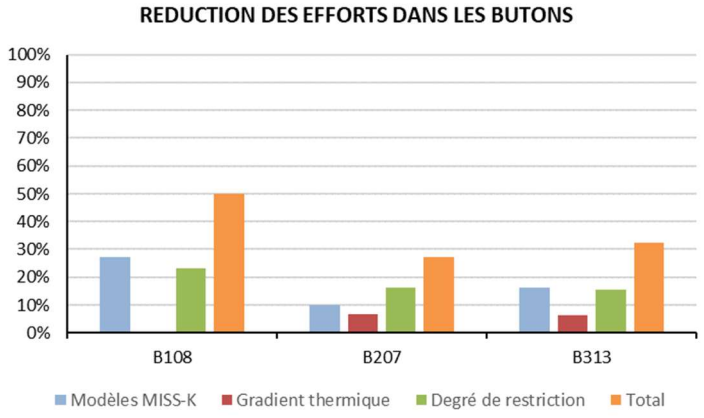


Figure 49 : Réduction des efforts de compressions dans les butons de la section 1.

En premier lieu, on constate donc une réduction des efforts grâce à l'étalonnage des modèles MISS-K dans tous les lits avec une valeur moyenne de 18%. En deuxième lieu, le gradient thermique ne permet qu'une réduction de 4% des efforts, étant plus important évidemment sur les lits inférieurs (on rappelle que premier lit n'expérimente pas une réduction des efforts car le gradient n'est pas modifié). Finalement, la prise en compte du degré de restriction produit une réduction moyenne des efforts de 18%.

Cet exemple met en évidence la marge d'optimisation d'une section des butons grâce aux recommandations proposée dans ce projet de fin d'études. L'optimisation totale pour cette section est de 37%, une valeur très élevée qui permettrait d'économiser en acier dans de futurs projets.

Tableau 17 : Réduction moyenne d'efforts de compression en fonction de l'hypothèse étalonnée.

REDUCTION DES EFFORTS	HYPOTHESE ETALONNEE			
	Modèles MISS-K	Gradient thermique	Degré de restriction	Total
MOYENNE	18%	4%	18%	37%

PARTIE IV – SYNTHESE DE RESULTATS ET CONCLUSIONS FINALES

1. Récapitulatif des résultats des parois moulées

1.1. Commentaires généraux

La rétro-analyse a permis de mettre en évidence les écarts existants entre les mesures inclinométriques et les estimations des déplacements horizontaux issues de modèles aux coefficients de réaction à l'aide d'un état des lieux. Cette première étape montre des écarts relatifs moyens dépassant le 30% en tête et en ventre.

Les inclinomètres des coupes de calcul avec un phasage ascendant sont plus sensibles aux défauts d'hypothèses. On obtient d'écarts supérieurs vis-à-vis des mêmes hypothèses initiales de calcul.

Les nombreuses coupes singulières identifiées parmi l'ensemble de coupes étudiées dans le présent projet de fin d'études ont permis de constater que presque un 40% de coupes sont caractérisées par un comportement singulier. Les modèles MISS-K ne sont pas capables de bien estimer ce comportement. Ce pourcentage des coupes singulières (40%) ne devrait trop varier de celui total du projet en admettant que les ouvrages étudiés sont représentatifs du projet et donc la quantité de coupes singulières n'est pas concentrée sur les ouvrages étudiés mais répartie sur tout le Lot 1 de la Ligne 16. Par conséquent, l'existence des coupes singulières doit être prise en compte dans de futurs projets de caractéristiques similaires.

Les études de sensibilité ont été très utiles pour comprendre l'impact de certaines hypothèses sur les résultats notamment en termes de déplacements. Cette étape est essentielle pour la réalisation de l'étalonnage des modèles initiaux MISS-K. L'étude particulière de chaque coupe de calcul et de chaque chantier permet la proposition de nouvelles hypothèses de calcul. Il est important de souligner que l'étalonnage présenté dans ce projet de fin d'études a été réalisé de manière logique et cohérente, toujours en cherchant de se rapprocher aux résultats mesurés sur le terrain à partir de données disponibles.

En ce qui concerne l'étalonnage des modèles initiaux, les résultats peuvent être considérés très satisfaisants du point de vue que les écarts des déplacements horizontaux initiaux ont été réduits. Le dimensionnement de parois moulées pourrait être donc mieux maitrisé. Les résultats de l'étalonnage permettent également de confirmer la pertinence d'hypothèses proposées.

L'étalonnage réalisé permet de mettre en évidence les différences parmi les différents ouvrages en matière de précision des hypothèses initiales. Par exemple, les paramètres de résistance des couches du sol des ouvrages $01^{E}01$ et $34^{E}01$ ont pu être modifiées vis-à-vis des sondages géotechniques disponibles (ou manquants : on a démontré qu'un manque de sondages

géotechniques semble être la raison pour laquelle les paramètres de plusieurs couches ont été sous-estimés dans un premier temps).

L'étude particulière des coupes singulières a permis, d'abord, de se familiariser avec la localisation de ce type de coupes. Elles se trouvent notamment à proximité des zones de discontinuité d'un point de vue tridimensionnel. C'est-à-dire, à proximité des panneaux de paroi moulée transversaux. A partir des coupes singulières trouvées dans le cadre de ce projet fin d'études, l'identification de ce type de coupes dans d'autres ouvrages ou d'autres projets devient une tâche assez intuitive et, *a priori*, faisable.

L'élaboration d'un modèle sur Robot a aidé à comprendre et vérifier le phénomène physique des effets de bord qui provoquent l'apparition des coupes singulières. Par ailleurs, ce modèle a permis la proposition d'une méthode pour l'estimation du déplacement réel de ces coupes. On a donc constaté l'importance de tympans dans les ouvrages souterrains, notamment des tympans appelés « courts » pour lesquels les effets de bord sont toujours plus importants car la paroi moulée est affectée par la proximité des deux coins du tympan. De plus, on rappelle que les tympans sont très souvent affectés par les bouchons injectés derrières la PM qui ont pour objectif d'améliorer la cohésion et de réduire la perméabilité de la couche traitée. Ce traitement du sol peut impacter aussi les comportement de la paroi.

Grâce à l'application de la méthode, les écarts des coupes singulières ont été diminués, en moyenne, de presque 30%. Par ailleurs, cette méthode estime le déplacement réel et ne donne jamais des résultats en déplacements en-dessous des mesures d'inclinomètres, même quand elle est appliquée après un étalonnage préalable. C'est-à-dire que la méthode, malgré ses limites, ne surestime pas les effets singuliers.

1.2. Commentaires sur les hypothèses de calcul

L'étalonnage a permis de vérifier la proposition des nouvelles hypothèses. On récapitule ci-dessous les points de vigilance dans la modélisation des parois moulées.

1.2.1. Surcharges

La définition de surcharges est une question importante dans le calcul de parois moulées. Il a été démontré que la précision dans la détermination de cette hypothèse signifie un gain de 3% d'acier pour les ouvrages étudiés. Il faut rappeler que ce pourcentage d'optimisation d'aciers, dans des projets tels comme le Grand Paris, peut signifier une quantité remarquable d'armatures économisées.

L'étude de sensibilité a permis de vérifier que cette action domine les déplacements au niveau de la tête de la paroi. Parmi l'ensemble d'actions appliquées en surface, celles ayant plus d'incertitude sont la définition des charges des grues à tour ou des charges forfaitaires, notamment quand les études sont réalisées trop en amont. Il est donc important de bien anticiper le plan d'installations du chantier avec les équipes méthodes. En parallèle, on a constaté une définition des surcharges qui ne respecte pas toujours le phasage de l'ouvrage. Il est à noter que

la définition d'une surcharge élevée telle que le stockage de voussoirs à l'arrière de la paroi moulée ne devrait pas être définie avant la mise en place des butons dans le cas de coupes avec phasage ascendant.

1.2.2. Niveau d'eaux de chantier

Les mesures piézométriques ont démontré une définition du niveau de référence de la nappe phréatique très défavorable dans plusieurs ouvrages. Il est donc conseillé de chercher la raison pour cette mauvaise estimation de la nappe. On a présenté deux phénomènes à retenir :

- Sables de Beauchamp médians : il est un horizon argileux imperméable, très souvent dans la région parisienne, qui agit comme un écran étanche. Par conséquent, il peut induire une descente du gradient hydrostatique en-dessous de cette couche. Il est donc important la réalisation des sondages suffisants pour rechercher la possible continuité et l'efficacité de cet horizon.

- Ecoulement de la nappe phréatique : le rabattement de la nappe phréatique à l'intérieur des ouvrages produit un écoulement d'eau remarquable (de l'extérieur à l'intérieur) quand la fiche hydraulique de la paroi moulée n'est pas ancrée dans une couche imperméable (comme le calcaire). Il serait donc intéressant de prendre en compte ce phénomène dans la modélisation afin d'estimer la descente du niveau d'eaux à l'extérieur des ouvrages pendant les phases de terrassement.

On proposer donc de bien étudier de ces phénomènes, en phase d'études, car ils peuvent avoir une influence importante et notable dans le dimensionnement des aciers. On remarque aussi l'importance de garder le sens statistique pour le calcul des niveaux d'eaux de référence qui doit pas être modifié car il doit prendre compte de la variabilité de la nappe phréatique et d'un éventuel endommagement du système de pompage.

1.2.3. Paramètres de comportement des couches de col

La plupart des paramètres utilisés pour les modèles de calcul donnent des résultats cohérents, notamment pour les couches plus fréquentes dans le Lot 1 de la Ligne 16, qui sont bien caractérisées. Toutefois, il est à noter l'existence de certaines couches avec sous-faciès très peu étudiés à cause d'un manque de sondages. A proximité des ouvrages $34^{E}01$ et $01^{E}01$, on a mis en évidence une sous-estimation des paramètres de résistance des Sables de Beauchamp à cause de l'incertitude vis-à-vis de ce manque de sondages. Les conséquences économiques de cette sous-estimation peuvent être évaluées en regardant la quantité d'aciers que l'on aurait optimisé avec une meilleure caractérisation. La rétro-analyse effectuée permet de suggérer une cohésion minimale de 15 kPa pour les Sables de Beauchamp qui aurait optimisé 10% des armatures dans les ouvrages $34^{E}01$ et $01^{E}01$.

2. Récapitulatif des résultats du butonnage

De manière parallèle à la rétro-analyse propre aux études des parois moulées, un état des lieux initial a été dressé pour commencer la rétro-analyse du butonnage. Il a permis de constater les

écarts que l'on trouve très souvent dans les mesures d'efforts de compressions de butons par rapport à ce que l'on avait estimé en phase études. En moyenne, les taux à ELS et à ELU sont de 38% et de 19%, respectivement.

La poussée de terres est un des facteurs plus importants expliquant ces écarts. L'étalonnage des modèles MISS-K permet de comprendre les nombreuses différences entre les mesures et les études. La maitrise de ce type de modélisation de manière efficace permettrait d'améliorer donc le dimensionnement de butons.

L'effet thermique est l'autre des grands sujets d'étude de ce mémoire en ce qui concerne l'analyse du butonnage. On a pu démontrer une mauvaise considération de gradients thermiques qui mérite d'une réflexion dans le cas d'un futur dimensionnement. Ces gradients thermiques pourraient être reconsidérés et redéfinis pour chaque ouvrage en essayant de se rapprocher mieux aux conditions locales du chantier en termes d'exposition au soleil.

Le degré de restriction de butons est en fin un paramètre à tenir compte si l'on s'intéresse à bien modéliser le vrai comportement élastique de la paroi moulée et du sol face aux compressions des butons produites par un gradient thermique donné. Suite à l'étude réalisé dans ce projet de fin d'études, on propose la considération d'un degré de restriction, d'au moins, 50% pour des appuis bi-encastrés.

Finalement, les résultats de l'étalonnage réalisé pour une section ont permis d'observer une grande marge d'optimisation dans le calcul de butons. On a constaté une réduction des efforts de compression théoriques d'environ 37%.

3. Travail futur

Ce projet fin d'études a permis d'approfondir et mieux maitriser le comportement réel des écrans de soutènement. Cependant, il y a certaines perspectives de travail abordées qui permettent toujours un développement majeur. On présente ci-dessous une liste non-exhaustive des aspects à étudier dans un travail futur :

- Utiliser les mesures des inclinomètres pour le calcul de sollicitations réelles des parois moulées. Les déplacements mesurés sont en fait la première solution d'une modélisation MISS-K. Il faut uniquement résoudre un système matriciel à partir des matrices de rigidité de l'écran, du sol et des appuis et du vecteur déplacement déjà connu. Les sollicitations permettraient de recalculer les aciers d'armatures sans besoin d'un étalonnage.

- Approfondir les analyses de sensibilité des couches du sol. Des études de sensibilité plus élaborées permettent de proposer une campagne de sondages mieux dirigée et de réaliser des modélisations plus efficaces.

- Analyser les données d'auscultations des inclinomètres par rapport aux estimations des modèles aux éléments finis (MISS-EF) pour compléter.

- Approfondir la compréhension des coupes singulières à l'aide des modèles 3D. Les modèles permettraient de contraster les résultats de la méthode proposée pour l'estimation de déplacements réels au niveau du ventre. En outre, les modèles 3D seraient très utiles dans l'étude et dimensionnement des butons orientés.

- Etudier en profondeur les tympans courts qui se déforment moins que les tympans dits longs. Les modélisations aux éléments finis sont nécessaires, soit en 2D ou 3D, pour prendre compte des effets de bord.

- Analyser la détermination du coefficient de réaction k_hà partir d'autres formules de la littérature. L'approche de Schmitt est prise de base car elle donne des résultats acceptables mais elle pourrait être soumise à des modifications.

Bibliographie

[1] AFNOR. *Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement - Ecrans*. NF P 94-282. 2012, p. 26, 42.

[2] AFNOR. *Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bàtiments*. NF EN 1992-1-1. 2005

[3] AFNOR. *Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles génerales*. NF P 94-251-1/NA. 2016, p. 10.

[4] AFNOR. *Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations Profondes*. NF P 94-262. 2012, p. 40-43.

[5] BIGOT, Gérard. Les mesures à l'inclinomètre. *In Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. Paris : 1997, p.127-131.

[6] BLUM H., *Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken*. Berlin, W. Ernst et Sohn, 1951, 32 p.

[7] CEMENTYS. IPILog : Chaîne inclinométrique. Disponible sur <https://cementys.com/fr/ipilog-chaine-inclinometrique> (consulté le 14.07.2021)

[8] CUIRA, Fahd. *Conception des ouvrages géotechniques : Conception des écrans de soutènement*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Avril, 2019

[9] DAKTERA, Tomasz. *Evaluation des méthodes de calcul des écrans de soutènement à partir du retour d'expérience de grands travaux récents*. Mémoire de thèse : géotechnique. Université Paris-Est, 2020.

[10] DELATTRE, Luc. Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de sutènement : L'approche par le calcul – Les méthodes classiques et la méthode au coefficient de réaction. *In Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. Paris : 2001, p.35-55.

[11] FIXOT, Jean. *Analyse comparative de la norme NF P 94 282 sur les écrans de soutènement*. Mémoire de diplôme d'ingénieur : construction et aménagement (géotechnique). Paris : Conservatoire National des Arts et Métiers, 2013.

[12] MESTAT, Philippe. Etat de contraintes initiales dans les sols et calcul par éléments finis. *In Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. Paris : 1998, p.15-32.

[13] MONET A., Module de réaction, coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul élastoplastique, *Revue française de Géotechnique* nº 65, 1994, p. 337-345.

[14] NEJJAR, Khadija. *Comportement des parois de soutènement dans un contexte exceptionnel (grande profondeur, formation déformables, environnement sensible) : Application à la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart du Grand Paris Express et comparaison avec les mesures réalisées sur site*. Mémoire de thèse : matérieux, mécanique, génie civil, electrochimie. Université Grenoble Alpes, 2019.

[15] TERRASOL. *K-REA V4. Notice technique*. Disponible sur <https://www.terrasol.fr/catalogue/k-rea-v4> (consulté le 10.02.2021)

Annexe 1 – Présentation des ouvrages étudiés

1. Ouvrage 01E01

Description de l'ouvrage

L'ouvrage $01^{E}01$ est implanté dans la commune de Le Bourget et assure l'accès de secours et ventilation des lignes 16 et 17 en phase service. Cet ouvrage d'entonnement est concerné par le démontage du TBM4a et du TBM4b. Le TBM5 passe à proximité de l'ouvrage et est connecté au puits de l'ouvrage à travers un rameau.

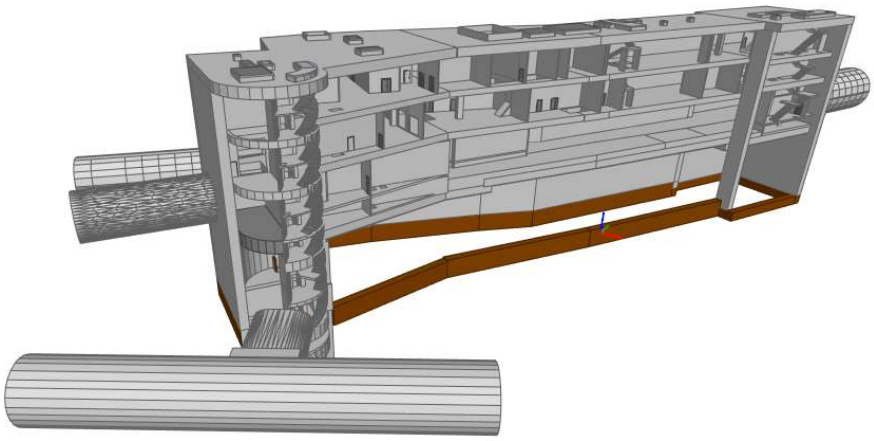


Figure 50 : Vue en 3D de l'ouvrage spécial $01^{E}01$.

Géométrie

Les principales caractéristiques géométriques de l'ouvrage en paroi moulée sont définies ci-après :

- Épaisseur de la paroi moulée 1.50 m
- Épaisseur de la dalle de couverture 1.50 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S1 1.00 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S2 1.20 m
- Épaisseur du radier 1.50 m (var)
- Plateforme de travail pour forage de la paroi moulée 42.60 m NGF
- Niveau du fond de fouille 15.93 m NGF (var.)

Phasage

Le phasage détaillé est présenté ci-après :

Tableau 18 : Phasage général de l'ouvrage 01E01.

Etape	Zone Nord	Partie centrale	Zone Sud
1			Réalisation PM + injection bouchon rameau
2	Réalisation PM	Réalisation PM	Jet grouting bouchon
3	réalisation longrines		Jet grouting
	Pompage de la boîte (2 m en dessous de fond de fouille)		
4	Réalisation des liernes en béton DC		Réalisation des liernes en béton DC
5	Terrassement à la côte 38.00 m en dessous du premier lit de butons et	Terrassement à la côte à 33.385 m en dessous des liernes S1	
6	Réalisation des liernes S1 +	pose du premier lit de butons à 39.00m	Terrassement à la côte 33.385m en dessous des liernes S1
7	Terrassement T3 à la côte 29.20m en dessous du deuxième lit de butons	Terrassement aux côtes en dessous des liernes GC S2 et pose du premier lit de butons à 39.00m	Réalisation des liernes S1
8	Réalisation des liernes S2	Terrassement à la côte 29.20m en dessous du deuxième lit de butons et pose du deuxième lit de butons à 30.20m	Terrassement à la côte en dessous des liernes GC S2
9	Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 22.20	Pose du deuxième lit de butons à 30.20m Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 22.20	Réalisation des liernes S2
10	Pose troisième lit de butons	Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 22.20 Pose troisième lit de butons	Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 22.20
11	Pose troisième lit de butons Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 18.50	Pose troisième lit de butons Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 18.50	Pose troisième lit de butons
12	Pose quatrième lit de butons	Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 18.50	Terrassement à la côte en dessous du troisième lit de butons à 18.50
13	Terrassement à la côte en dessous du radier	Terrassement à la côte en dessous du radier	Pose quatrième lit de butons
14	Réalisation radier	Réalisation radier Terrassement à la côte en dessous du radier	Terrassement à la côte en dessous du radier
15	Dépose butons B3 et B4	Réalisation radier Dépose butons B3 et B4	Réalisation radier
16		Dépose butons B3 et B4	Dépose butons B3 et B4
17			Démontage TBM4a
18		Réalisation dalle S2	
19		Dépose butons B2 Réalisation dalle S1	
20		Dépose butons B1 Réalisation dalle DC	
21	Fermeture trémies nord		Démontage TBM4b
22			Fermetures trémie sud

Stratigraphie

Le tableau ci-dessous montre les cotes des différentes formations identifiées au droit de l'ouvrage. Les côtes correspondent au toit des couches.

Tableau 19 : Stratigraphie de l'ouvrage 01^{E}01.

Formation	Stratigraphie profil Sud-Ouest *(m NGF)*	Stratigraphie profil Centre *(m NGF)*	Stratigraphie profil Nord-Est *(m NGF)*
Remblais (R)	44.90 (TN)	42.50 (TN)	42.70 (TN)
Marnes à Pholadomyes 2 (MPH_2)	41.60	-	39.10
Sables verts 2 (SV_2)	-	38.70	38.10
Calcaire de Saint-Ouen 1 (SO_1)	38.40	34.60	31.80
Sables de Beauchamp 1 (SB_1)	27.80	27.40	25.90
Marnes et Caillasses 2 (MC_2)	16.00	15.40	16.60
Marnes et Caillasses 5 (MC_5)	7.30	6.80	8.20
Calcaire grossier 3 (CG_3)	0.30	1.50	1.15

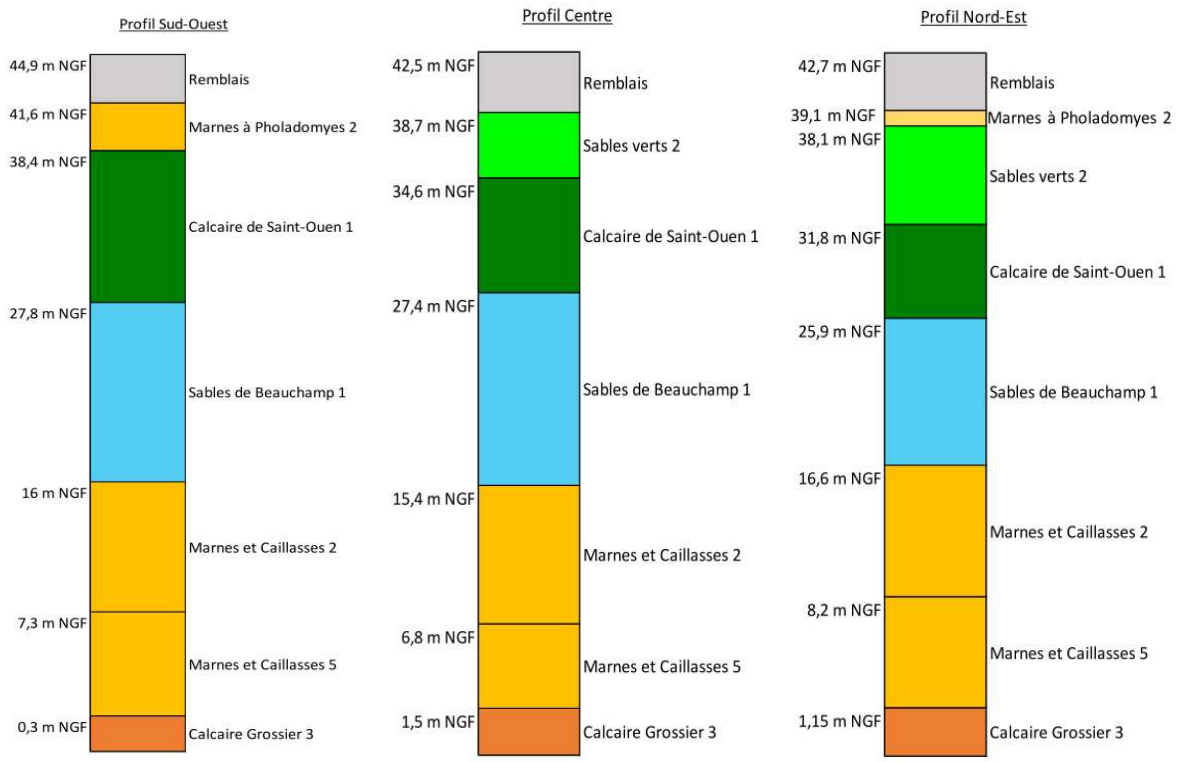


Figure 51 : Profils géologiques de l'ouvrage 01^{E}01.

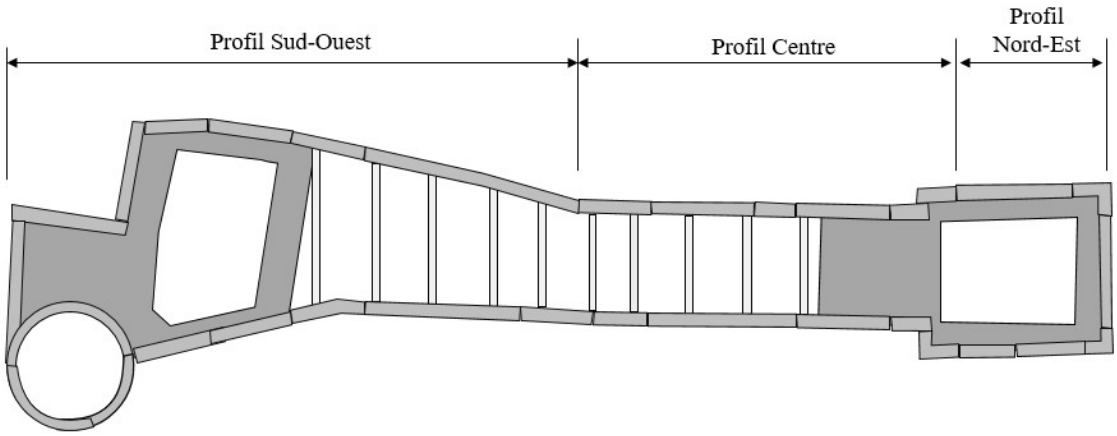


Figure 52 : Vue en plan de la stratigraphie de l'ouvrage 01^{E}01.

Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques utilisés pour la modélisation MISS-K sont présentés ci-après.

Tableau 20 : Paramètres géotechniques utilisés pour l'ouvrage 01^{E}01.

Sol	γ_h (kN/m3)	E_M (MPa)	α (-)	Phase Service		Phase Travaux		K_0
				c' (kPa)	φ' (°)	c_{trav} (kPa)	φ_{trav} (°)	
R	19,0	7	0,50	0	28	0	28	0,53
MPH (2) SV (2)	19,5	20	0,50	5	34	10	34	0,44
SO (1)	17,5	10	0,33	10	33	10	33	0,46
SB (1)	21,0	50	0,50	5	33	5	33	0,46
MC (2)	20,0	45	0,33	20	30	20	30	0,50
MC (5)	20,0	200	0,50	50	35	50	35	0,43
CG (3)	21,0	260	0,50	100	35	100	35	0,43

Avec :

- γ_h : poids volumique humide (kN/m3)
- E_M : Module pressiométrique de Ménard (en MPa)
- α : coefficient rhéologique de Ménard
- c' : cohésion effective (kPa)
- φ' : angle de frottement effectif (°)
- c_{trav} : cohésion en phase travaux (kPa)
- φ_{trav} : angle de frottement en phase travaux (°)
- K_0 : coefficient de terres au repos

Niveau d'eaux de référence

On présente dans la table ci-dessous les niveaux de référence pris en compte :

Tableau 21 : Niveaux d'eaux de référence de l'ouvrage 01^{E}01.

Niveaux d'eau caractéristiques					
Aquifère	Niveau Quasi-Permanent	Niveau de Chantier	Niveau Fréquent	Niveau caractéristique	Niveau accidentel
	EB (NGF)	EC (NGF)	EF (NGF)	EH (NGF)	EE (NGF)
R/SO/SB/MC/CG	37.7	38.2	38.5	39.3	39.7

Coupes de calcul

Le découpage de l'ouvrage pris en compte est présenté ci-après.

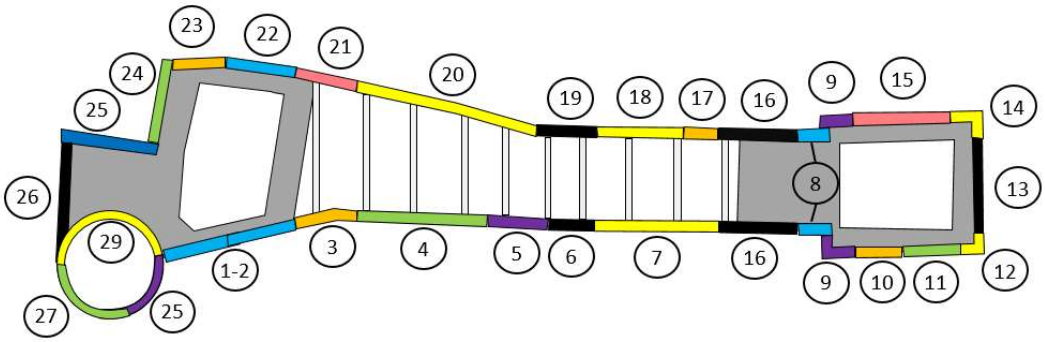


Figure 53 : Découpage de l'ouvrage 01^{E}01.

Plan d'instrumentation

Inclinomètres

Les inclinomètres employés pour les analyses d'auscultation sont présentés ci-dessous.

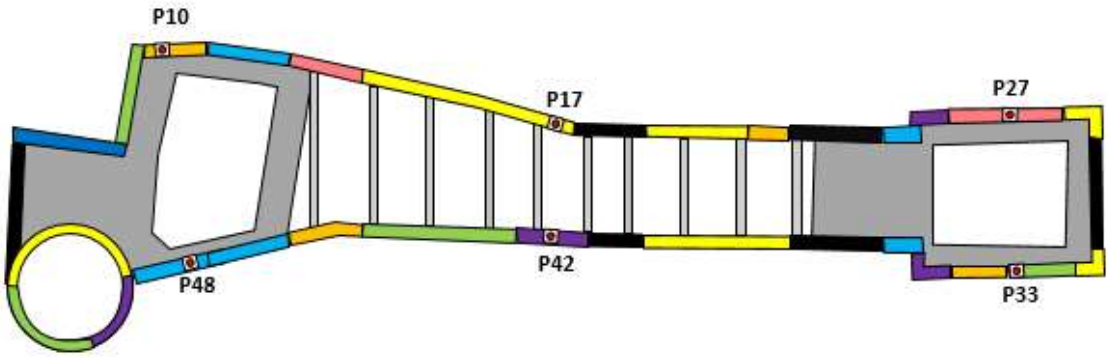


Figure 54 : Plan d'instrumentation (inclinomètres) sur l'ouvrage 01^{E}01.

Extensomètres (premier lit B1)

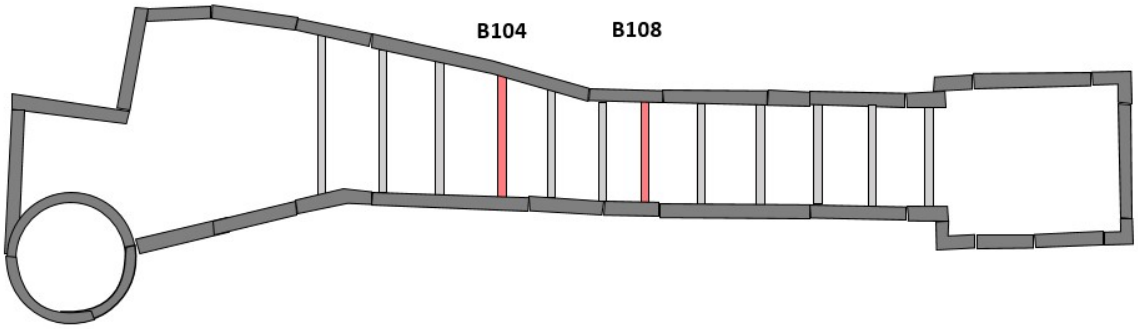


Figure 55 : Plan d'extensomètres du premier lit B1 sur l'ouvrage 01^{E}01.

Extensomètres (deuxième lit B2)

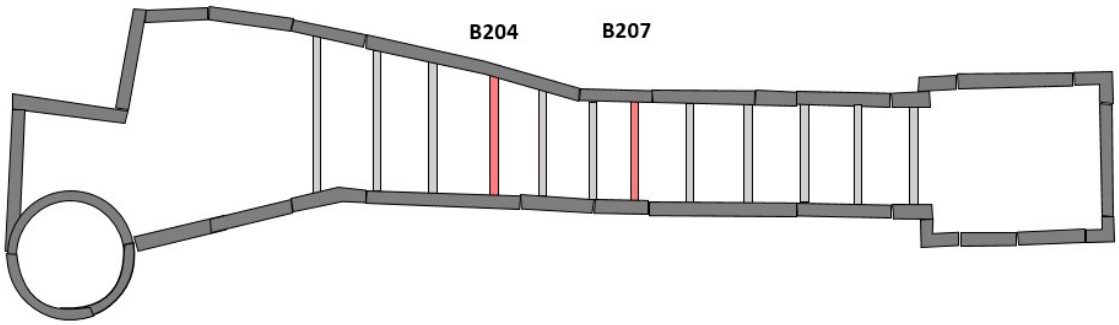


Figure 56 : Plan d'extensomètres du deuxième lit B2 sur l'ouvrage 01^{E}01.

Extensomètres (troisième lit B3)

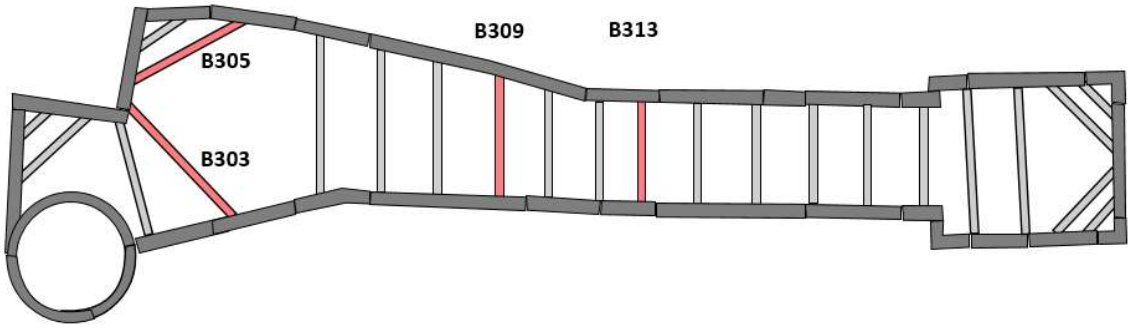


Figure 57 : Plan d'extensomètres du troisième lit B3 sur l'ouvrage 01^{E}01.

Extensomètres (quatrième lit B4)

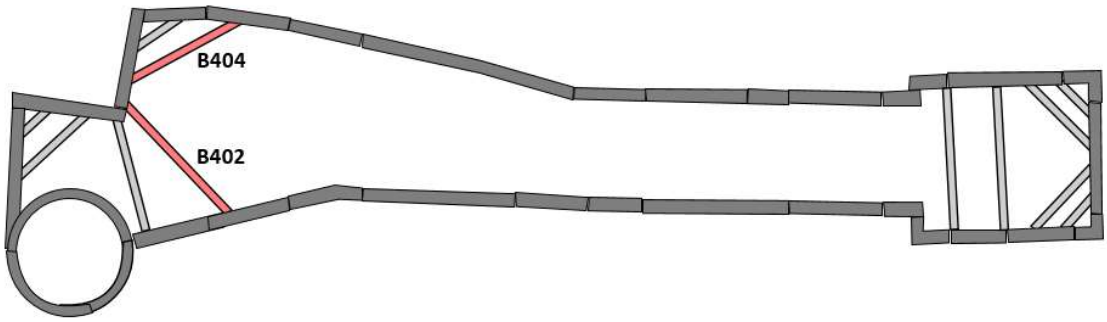


Figure 58 : Plan d'extensomètres du quatrième lit B4 sur l'ouvrage 01^{E}01.

2. Ouvrage 34E01

Description de l'ouvrage

L'ouvrage $34^{E}01$ se trouve sur la commune de La Courneuve. Pendant la phase travaux, il permet le lancement de 4 tunneliers - TBM3, TBM4a, TBM4b ET TBM5 - ainsi que la gestion de flux liés au creusement. En phase service, l'ouvrage assure les fonctions d'accès de secours et de ventilation et désenfumage pour les tunnels des lignes 16 et 17.

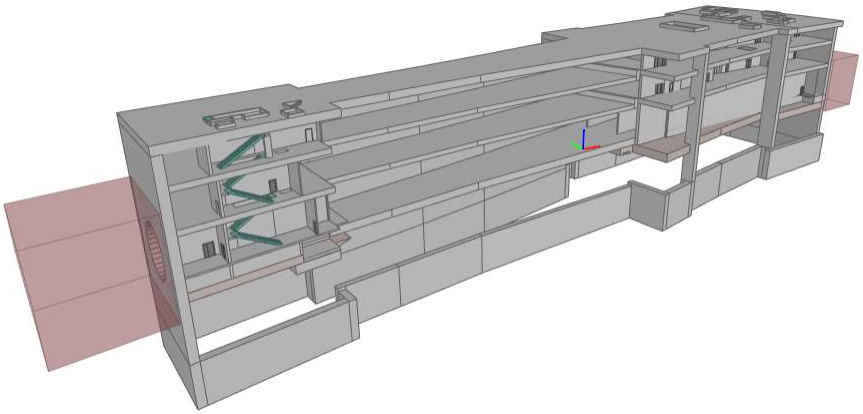


Figure 59 : Vue en 3D de l'ouvrage spécial $34^{E}01$.

Géométrie

Les principales caractéristiques géométriques de l'ouvrage en paroi moulée sont définies ci-après :

- Épaisseur de la paroi moulée 1.20 m et 1.50 m
- Épaisseur de la dalle de couverture 1.50 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S1 1.00 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S2 1.00 m
- Épaisseur du radier 1.50 m – 2.15 m
- Niveau d'arase supérieur de la paroi moulée 41.35 m NGF
- Niveau du fond de fouille 13.20 m NGF

Phasage

Le phasage détaillé est présenté ci-après :

Tableau 22 : Phasage général de l'ouvrage 34^{E}01.

Etape	Zone Ouest	Zone centrale	Zone Est
1	Réalisation PM	Réalisation PM	Réalisation des barrettes d'appui + Réalisation PM
2	←		Réalisation de la dalle de couverture
3	←		Terrassement à la cote 32.98 NGF en dessous du niveau N-1
4	←		Réalisation de la dalle N-1
5	Terrassement à la cote 26.06 NGF en dessous du niveau N-2	→	
6	Réalisation de la dalle N-2	→	
7	Terrassement jusqu'au premier niveau de butons B1		
8	Pose du premier lit de butons B1		
9	Terrassement jusqu'au deuxième niveau de butons B2		
10	Pose du deuxième lit de butons B2		
11	Terrassement jusqu'au niveau de fond de fouille FF		
12	←		Réalisation du radier
13	Dépose des lits de butons		
14	Montage et démarrage des tunneliers TBM3, TBM4a, TBM4b et TBM5		
15	Coulage de la dalle N-2 définitive		
16	Coulage de la dalle N-1 définitive		
17	Coulage de la dalle de couverture définitive		

Stratigraphie

Le tableau ci-dessous montre les cotes des différentes formations identifiées au droit de l'ouvrage. Les côtes correspondent au toit des couches.

Tableau 23 : Stratigraphie de l'ouvrage 34^{E}01.

Formation	Stratigraphie 1 (m NGF)	Stratigraphie 2 (m NGF)	Stratigraphie 3 (m NGF)
Remblais (R)	41.6	42	43
Alluvions modernes (Am)	-	-	40.3
Marnes à Pholadomyes (MPH)	40.3	40.7	38.7
Sables verts (SV)	34.4	35.3	37
Calcaire de Saint-Ouen (SO)	33.8	34.7	35.8
Sables de Beauchamp (SB)	23	24.0	26.6
Marnes et Caillasses (MC)	11.8	12.2	15.1
Calcaire grossier (CG)	-4.0	-2.5	0.5

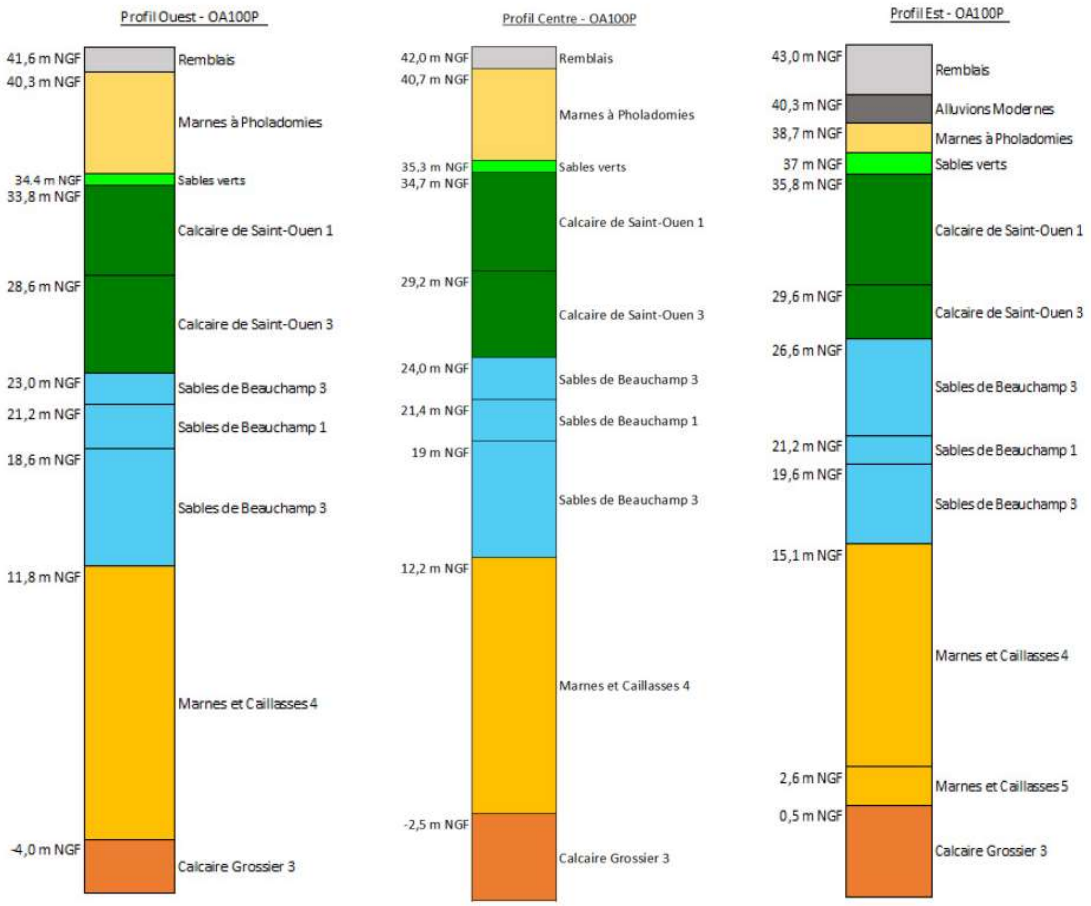


Figure 60 : Profils géologiques pour l'ouvrage 34^{E}01.

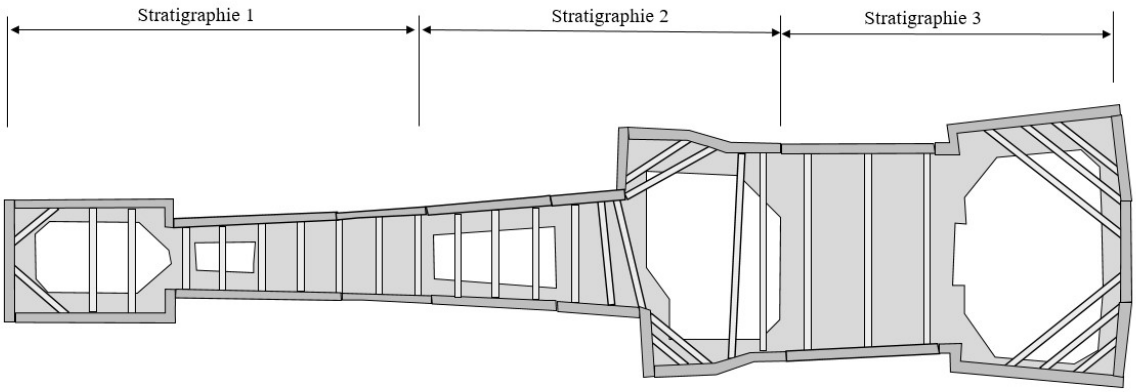


Figure 61 : Vue en plan de la stratigraphie de l'ouvrage 34^{E}01.

Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques sont présentés ci-après.

Tableau 24 : Paramètres géotechniques utilisés pour l'ouvrage 34^{E}01.

Sol	γ_h (kN/m^3)	E_M (MPa)	α	Phase service		Phase travaux		K_0
				c' (kPa)	ϕ' (°)	c_{trav} (kPa)	Φ_{trav} (°)	
R	19	7	0,5	0	28	0	28	0,53
Am	19	22	0,5	0	30	0	30	0,50
MPH	19	20	0,5	5	34	15	34	0,44
SV	19,5	16	0,5	10	34	10	34	0,44
SO(1)	17,5	12	0,33	10	33	20	33	0,46
SO(3)	17,5	65	0,33	25	35	35	35	0,43
SB(1)	21	15	0,5	5	33	5	33	0,46
SB(3)	21	60	0,5	15	35	15	35	0,43
MC(4)	20	200	0,5	50	35	50	35	0,43
MC(5)	20	250	0,66	50	35	50	35	0,43
CG	21	460	0,5	100	35	100	35	0,43

Avec :

- γ_h : poids volumique humide (kN/m3)
- E_M : Module pressiométrique de Ménard (en MPa)
- α : coefficient rhéologique de Ménard
- c' : cohésion effective (kPa)
- φ' : angle de frottement effectif (°)
- c_{trav} : cohésion en phase travaux (kPa)
- φ_{trav} : angle de frottement en phase travaux (°)
- K_0 : coefficient de terres au repos

Niveau d'eaux de référence

On présente dans la table ci-dessous les niveaux de référence pris en compte :

Tableau 25 : Niveaux d'eaux de référence de l'ouvrage 34^{E}01.

Formation	Aquifère	EB (m NGF)	EC (m NGF)	EF (m NGF)	EH (m NGF)	EE (m NGF)
R/MPH PROFIL 1	Superficiel	38,6	39,9	40,4	42,2	43,0
R/MPH PROFIL 2	Superficiel	37,6	38,9	39,4	41,2	42,0
R/MPH PROFIL 3	Superficiel	37,2	38,5	39,0	40,8	41,6
SO/SB/MC/CG	Eocène supérieur et moyen	37,1	37,5	37,8	38,6	39

Coupes de calcul

Le découpage de l'ouvrage pris en compte est présenté ci-après.

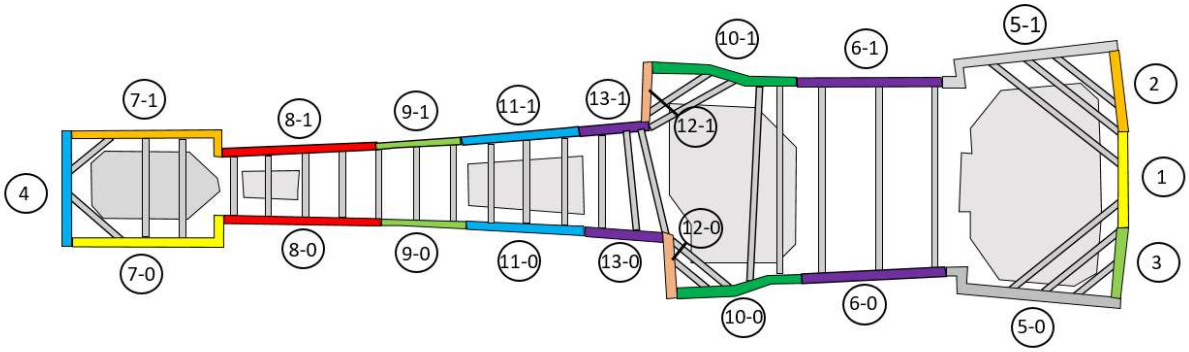


Figure 62 : Découpage de l'ouvrage 34^{E}01.

Plan d'instrumentation

Inclinomètres

Les inclinomètres employés pour les analyses d'auscultation sont présentés ci-dessous.

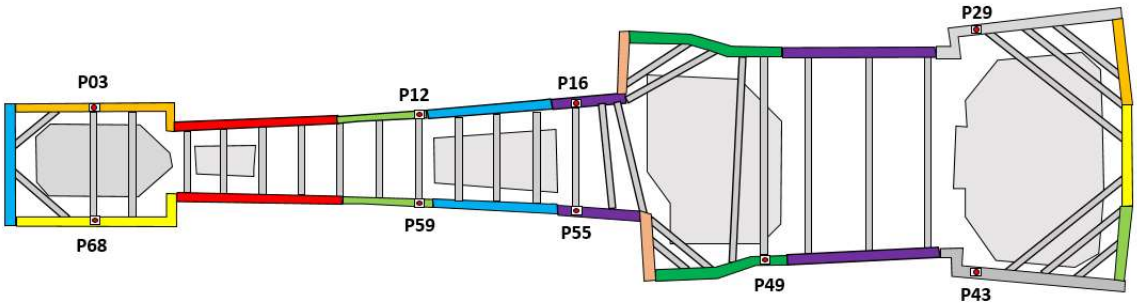


Figure 63 : Plan d'instrumentation (inclinomètres) sur l'ouvrage 34^{E}01.

Extensomètres (premier lit B1)

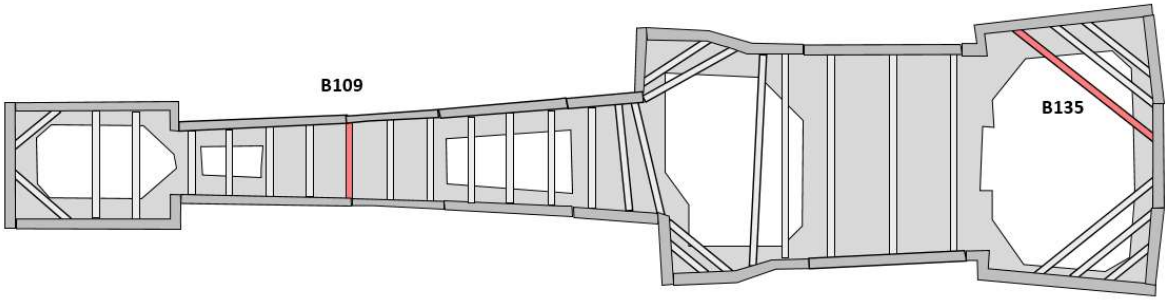


Figure 64 : Plan d'extensomètres du premier lit B1 sur l'ouvrage 34^{E}01.

Extensomètres (deuxième lit B2)

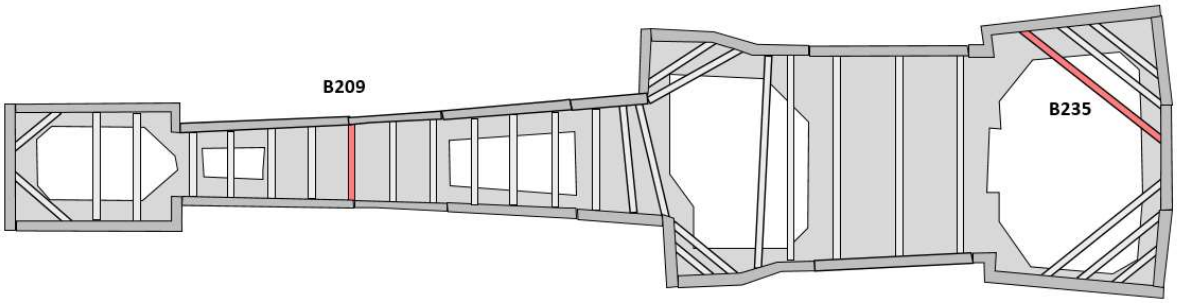


Figure 65 : Plan d'extensomètres du deuxième lit B2 sur l'ouvrage 34^{E}01.

3. Ouvrage 02E01

Description de l'ouvrage

L'ouvrage $02^{E}01$ se situe dans la commune d'Aulnay-Sous-Bois. En phase travaux, l'ouvrage sert de puits de lancement du tunnelier pour le lot 2 de la ligne 16 et du tunnelier TBM6 du lot 1. Pendant la phase service, l'ouvrage assure les fonctions d'accès de secours et de ventilation.

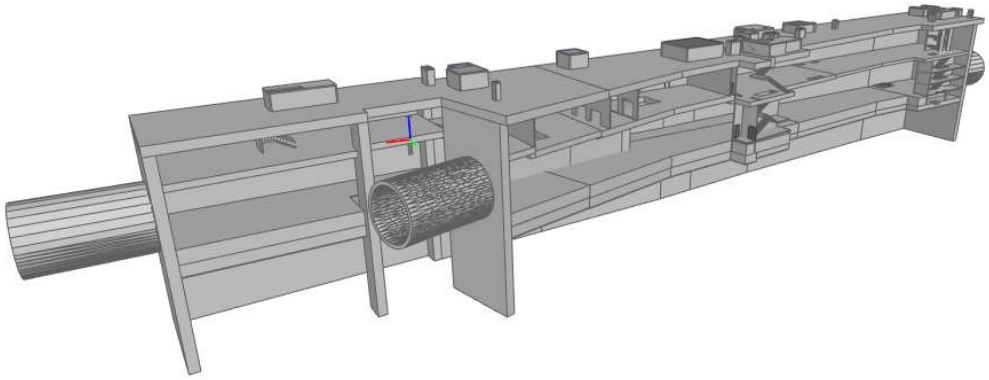


Figure 66 : Vue en 3D de l'ouvrage spécial $02^{E}1$.

Géométrie

Les principales caractéristiques géométriques de l'ouvrage en paroi moulée sont définies ci-après :

- Épaisseur de la paroi moulée 1.20 m
- Épaisseur de la dalle de couverture 1.00 à 1.60 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S1 0.70 à 1.10 m
- Épaisseur du radier 1.20 à 1.80 m
- Plateforme de travail pour forage de la paroi moulée 48.75 à 49.25 NGF
- Niveau du fond de fouille 25.52 à 28.80 NGF

Phasage

Le phasage détaillé est présenté ci-après :

Tableau 26 : Phasage général de l'ouvrage 02^{E}01.

Etape	Zone Ouest (phasage considéré descendant)	Zone Est (phasage considéré ascendant)
1	Réalisation PM	Réalisation PM
2	Réalisation de la dalle de couverture	Réalisation de la dalle de couverture
3	Terrassement à la cote 39.89 NGF en dessous du niveau N-1	Terrassement à la cote 41.25 NGF en dessous du premier lit de butons B1
4	Réalisation de la dalle N-1	Pose du premier lit de butons B1
5	Terrassement à la cote 35.35 NGF en dessous du premier lit de butons B1	Terrassement à la cote 35.45 NGF en dessous du deuxième lit de butons B2
6	Pose du premier lit de butons B1	Pose du deuxième lit de butons B2
7	Terrassement à la cote 31.55 NGF en dessous du deuxième lit de butons B2	Terrassement à la cote 32.15 NGF en dessous du troisième lit de butons B3
8	Pose du deuxième lit de butons B2	Pose du troisième lit de butons B3
9	Terrassement à la cote 26.57 NGF jusqu'au fond de fouille FF	Terrassement à la cote 27.31 NGF jusqu'au fond de fouille FF
10	Réalisation du radier	Réalisation du radier
11	Dépose butons B1 et B2	Dépose butons B2 et B3
12	Terrassement à la côte en dessous du radier	Pose quatrième lit de butons
13	Réalisation radier	Terrassement à la côte en dessous du radier
14	Fermeture trémies	Réalisation radier
15		Dépose butons B2 et B3
16		Coulage de la dalle N-1
17		Dépose butons B1
19		Fermetures trémies

Stratigraphie

Le tableau ci-dessous montre les cotes des différentes formations identifiées au droit de l'ouvrage. Les côtes correspondent au toit des couches.

Tableau 27 : Stratigraphie de l'ouvrage 02^{E}01.

Formation	Stratigraphie ouest *(m NGF)*	Stratigraphie est *(m NGF)*
Remblais (R)	54 (T.N.)	54 (T.N.)
Marnes à Pholadomyes (MPH)	51	50.75
Sables verts (SV)	50	47.4
Calcaire de Saint-Ouen (SO)	49	46.3
Sables de Beauchamp (SB)	38.7	38.5
Marnes et Caillasses (MC)	26.2	24.2
Calcaire grossier (CG)	10.7	10.3

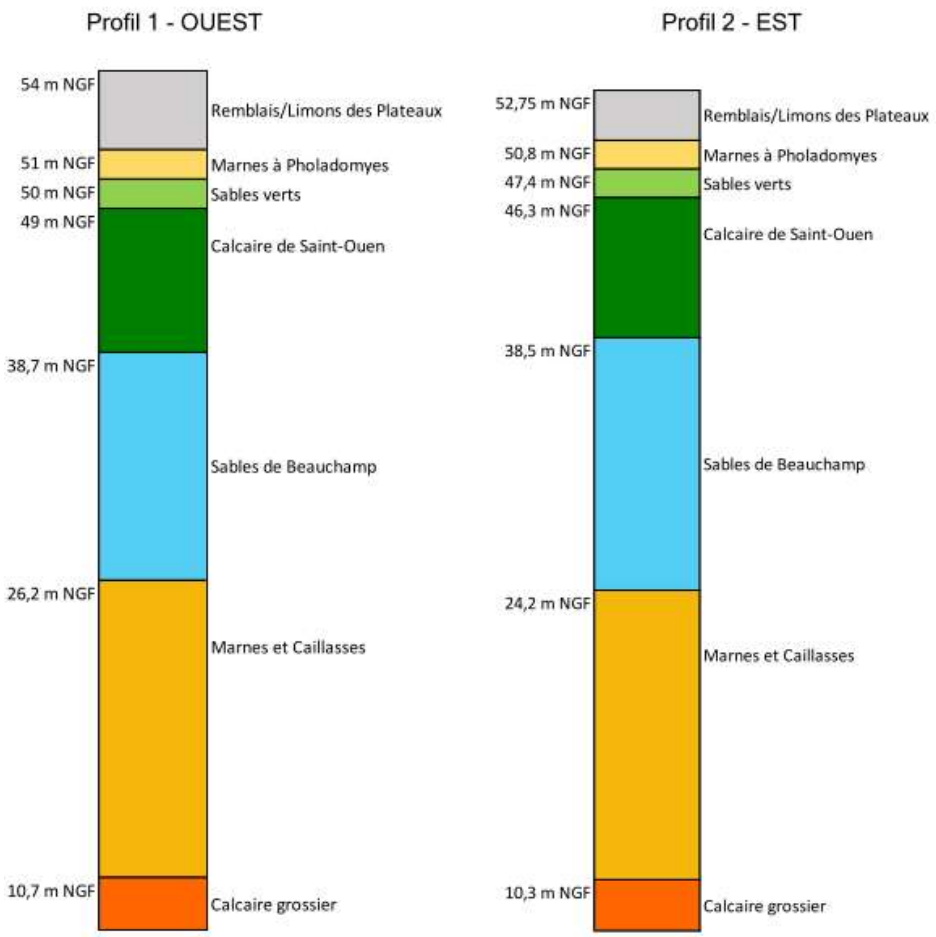


Figure 67 : Profils géologiques pour l'ouvrage 02^{E}01.

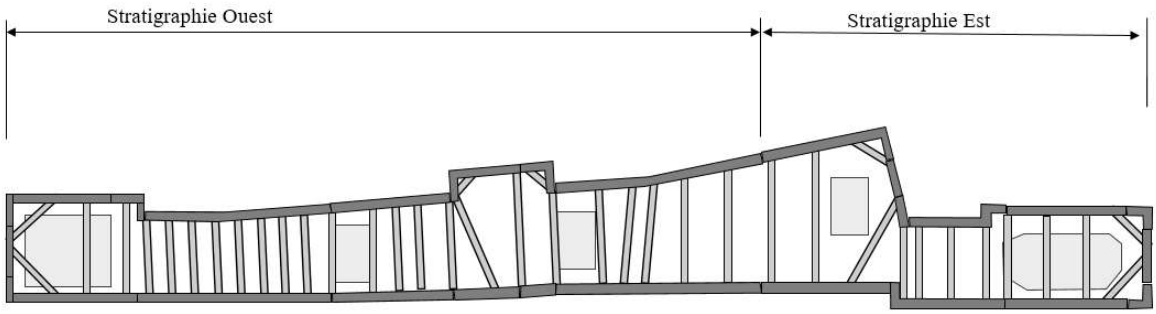


Figure 68 : Vue en plan de la stratigraphie de l'ouvrage 02^{E}01.

Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques sont présentés ci-après.

Tableau 28 : Paramètres géotechniques utilisés pour l'ouvrage 02^{E}01.

Sol	γ_h (kN/m3)	E_M (MPa)	α (-)	Phase Service		Phase Travaux	
				c' (kPa)	φ' (°)	c_{trav} (kPa)	φ_{trav} (°)
R	19.00	14	0.5	0	28	0	28
MPH (2)	19.00	15	0.5	5	34	15	34
SV (1)	19.00	15	0.5	10	34	10	34
SO (1)	17.50	15	0.33	10	33	20	33
SB (2)	21.00	65	0.5	10	33	10	33
MC (3)	20.00	150	0.33	25	35	35	35
MC (4)	20.00	300	0.66	50	35	50	35
CG (1)	21.00	155	0.5	100	35	100	35

Avec :

- γ_h : poids volumique humide (kN/m3)
- E_M : Module pressiométrique de Ménard (en MPa)
- α : coefficient rhéologique de Ménard
- c' : cohésion effective (kPa)
- φ' : angle de frottement effectif (°)
- c_{trav} : cohésion en phase travaux (kPa)
- φ_{trav} : angle de frottement en phase travaux (°)
- K_0 : coefficient de terres au repos

Niveau d'eaux de référence

On présente dans la table ci-dessous les niveaux de référence pris en compte :

Tableau 29 : Niveaux d'eaux de référence de l'ouvrage 02^{E}01.

Niveaux d'eau caractéristiques					
Aquifère	Niveau Quasi-Permanent	Niveau de Chantier	Niveau Fréquent	Niveau caractéristique	Niveau accidentel
	EB (NGF)	EC (NGF)	EF (NGF)	EH (NGF)	EE (NGF)
R/MPH/SV	47,7	48	48,2	48,7	49,0
SO/SB/MC/CG	43,9	46,14 (1)	45,2	46,4	47,0

Coupes de calcul

Le découpage de l'ouvrage pris en compte est présenté ci-après.

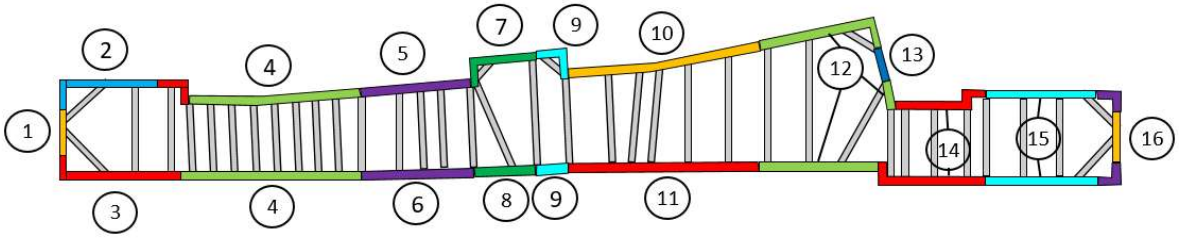


Figure 69 : Découpage de l'ouvrage 02^{E}01.

Plan d'instrumentation

Inclinomètres

Les inclinomètres employés pour les analyses d'auscultation sont présentés ci-dessous.

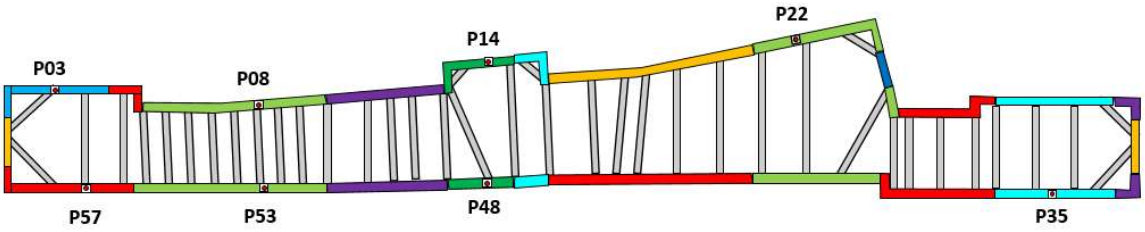


Figure 70 : Plan d'instrumentation (inclinomètres) sur l'ouvrage 02^{E}01.

Extensomètres (premier lit B1)

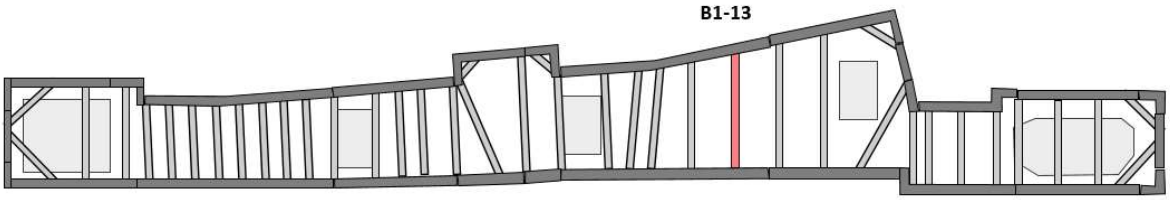


Figure 71 : Plan d'extensomètres du premier lit B1 sur l'ouvrage 02^{E}01.

Extensomètres (deuxième lit B2)

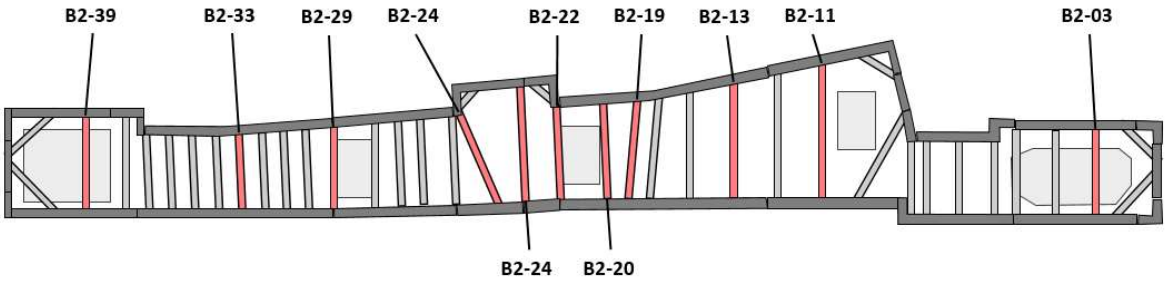


Figure 72 : Plan d'extensomètres du deuxième lit B2 sur l'ouvrage 02^{E}01.

Extensomètres (troisième lit B3)

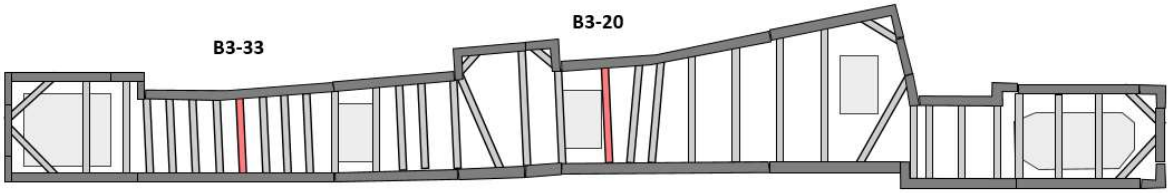


Figure 73 : Plan d'extensomètres du troisième lit B3 sur l'ouvrage 02^{E}01.

4. Gare de La Courneuve (LCO)

Description de l'ouvrage

La gare de La Courneuve « Six Routes » (LCO) est l'une des cinq gares du lot 1 de la ligne 16 et se situe sur la commune de La Courneuve. Cette gare est constituée d'une émergence et d'une boîte souterraine. La gare est composée d'un niveau d'accueil avec quatre niveaux souterrains.

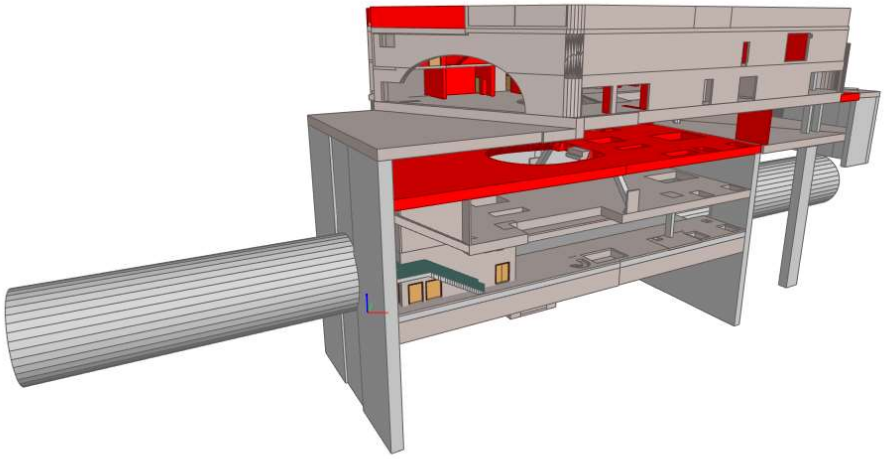


Figure 74 : Vue en 3D de la gare La Courneuve (LCO).

Géométrie

Les principales caractéristiques géométriques de l'ouvrage en paroi moulée sont définies ci-après :

- Épaisseur de la paroi moulée — 0.80, 1.20 et 1.50 m
- Épaisseur de la dalle de couverture — 0.80, 1.20 et 1.50 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S1 — 1.20 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S2 — 1.20 m
- Épaisseur du radier — 1.75 m
- Plateforme de travail pour forage de la paroi moulée — 35.60 à 36.80 NGF
- Niveau du fond de fouille — 10.97 à 12.22 NGF

Phasage

Le phasage détaillé est présenté ci-après :

Tableau 30 : Phasage général de l'ouvrage 02^{E}01.

Etape	Coupe centrale	Coupe tympan
1	Réalisation PM	
2	Terrassement à la cote 32.50 NGF en dessous du premier lit de butons B1	
3	Pose du premier lit de butons B1	Pose du premier lit de butons B1
4	Terrassement à la cote 24.00 NGF en dessous du troisième lit de butons B3	Terrassement à la cote 24.00 NGF en dessous du deuxième lit de butons B2
5	Pose du troisième lit de butons B3	Pose du deuxième lit de butons B2
6	Terrassement à la cote 24.00 NGF en dessous du quatrième lit de butons B4	Terrassement à la cote 24.00 NGF en dessous du troisième lit de butons B3
7	Pose du quatrième lit de butons B4	Pose du troisième lit de butons B3
8	Terrassement à la cote 10.97 NGF jusqu'au fond de fouille FF	Terrassement à la cote 24.00 NGF en dessous du quatrième lit de butons B4
9	Réalisation radier	Pose du quatrième lit de butons B4
10	Retrait et remontée des butons B4	Terrassement à la cote 10.97 NGF jusqu'au fond de fouille FF
11	Dépose butons B2 et B3	Réalisation radier
12	Coulage de la dalle N-1	Retrait de butons B4 et coulage des paliers des escaliers butonnant
13	Dépose butons B1	Dépose butons B2 et B3
14	Coulage de la dalle de couverture	Coulage de la dalle N-1
15	Dépose butons B4	Dépose butons B1
16		Coulage de la dalle de couverture
17		Dépose butons B4

Stratigraphie

Le tableau ci-dessous montre les cotes des différentes formations identifiées au droit de l'ouvrage. Les côtes correspondent au toit des couches.

Tableau 31 : Stratigraphie de la gare LCO

Formation	Stratigraphie générale *(m NGF)*	Stratigraphie tympan Est *(m NGF)*
Remblais (R)	37.00 (TN)	37.00 (TN)
Alluvions modernes (Am)	35.00	-
Marnes à Pholadomyes (MPH_1)	32.50	34.20
Sables verts (SV_1)	28.60	25.40
Calcaire de Saint-Ouen (SO_1)	27.00	23.80
Calcaire de Saint-Ouen (SO_3)	19.00	19.00
Sables de Beauchamp (SB_3)	15.10	13.0
Marnes et Caillasses (MC_4)	3.30	1.00

Calcaire grossier (CG_3)	-13.40	-13.40

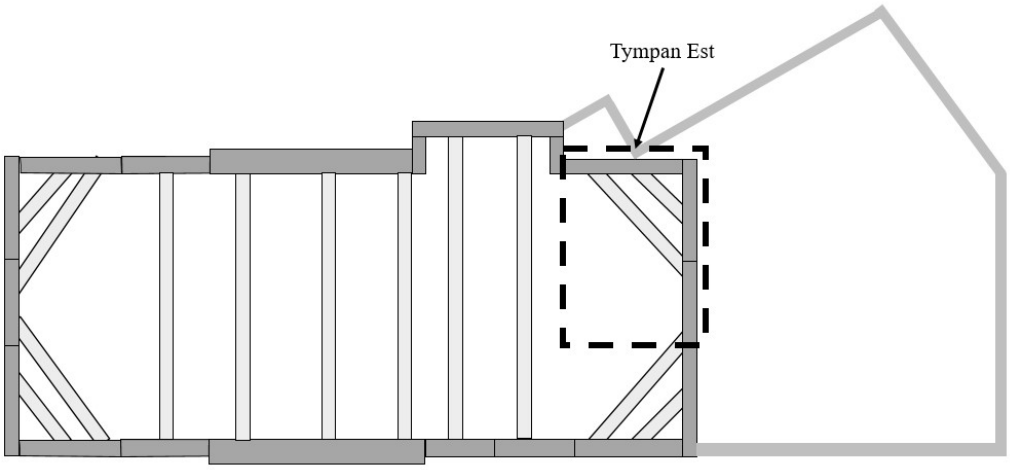


Figure 75 : Vue en plan du tympan avec une stratigraphie particulière de la gare LCO.

Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques sont présentés ci-après.

Tableau 32 : Paramètres géotechniques utilisés pour la gare LCO.

Sol	γ_h (kN/m3)	E_M (MPa)	α (-)	Phase Service		Phase Travaux		K_0
				c' (kPa)	φ' (°)	c_{trav} (kPa)	φ_{trav} (°)	
R	19,00	4,00	0,50	0	28	0	28	0,53
Am	19,00	10,00	0,50	0	30	0	30	0,50
MPH (1)	19,00	12,00	0,50	5	34	15	34	0,44
SV (1)	19,50	9,00	0,50	10	34	10	34	0,44
SO (1)	18,00	9,00	0,33	10	33	20	33	0,46
SO (3)	18,00	35,00	0,33	25	35	35	35	0,43
SB (3)	21,00	60,00	0,50	15	35	15	35	0,434
MC (4)	20,00	190,00	0,50	50	35	50	35	0,43
CG (3)	21,00	410,00	0,50	100	35	100	35	0,43

Avec :

- γ_h : poids volumique humide (kN/m3)
- E_M : Module pressiométrique de Ménard (en MPa)
- α : coefficient rhéologique de Ménard
- c' : cohésion effective (kPa)
- φ' : angle de frottement effectif (°)
- c_{trav} : cohésion en phase travaux (kPa)
- φ_{trav} : angle de frottement en phase travaux (°)
- K_0 : coefficient de terres au repos

Niveau d'eaux de référence

On présente dans la table ci-dessous les niveaux de référence pris en compte :

Tableau 33 : Niveaux d'eaux de référence de la gare LCO.

Niveaux d'eau caractéristiques					
Aquifère	Niveau Quasi-Permanent	Niveau de Chantier	Niveau Fréquent	Niveau caractéristique	Niveau accidentel
	EB (NGF)	EC (NGF)	EF (NGF)	EH (NGF)	EE (NGF)
R/AM/MPH	Sec				
SO/SB/MC/CG	30.6	31.5	31.3	32.7	33.3

Coupes de calcul

Le découpage de l'ouvrage pris en compte est présenté ci-après.

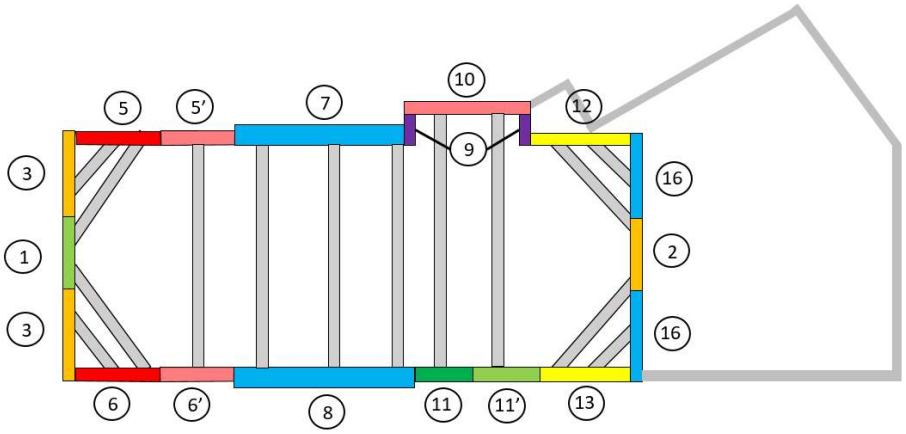


Figure 76 : Figure 77 : Découpage de la gare LCO.

Plan d'instrumentation

Inclinomètres

Les inclinomètres employés pour les analyses d'auscultation sont présentés ci-dessous.

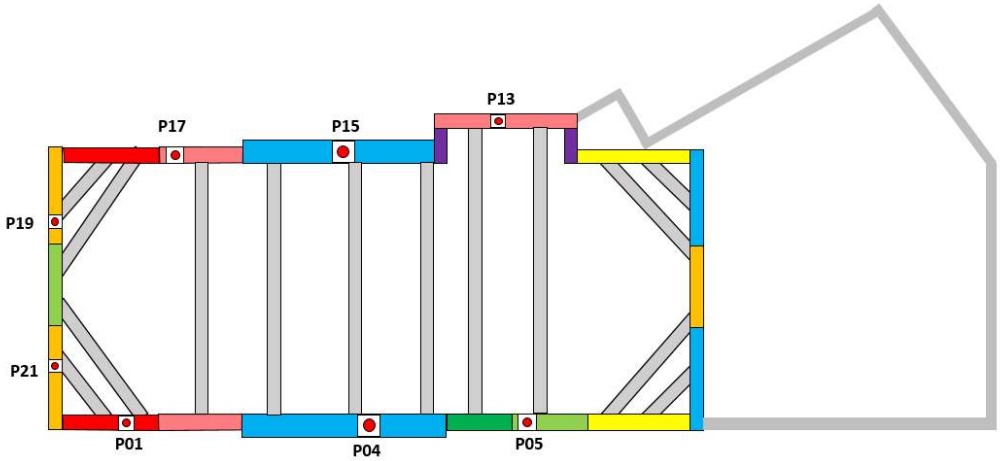


Figure 78 : Plan d'instrumentation (inclinomètres) sur la gare LCO.

Extensomètres (troisième lit B3)

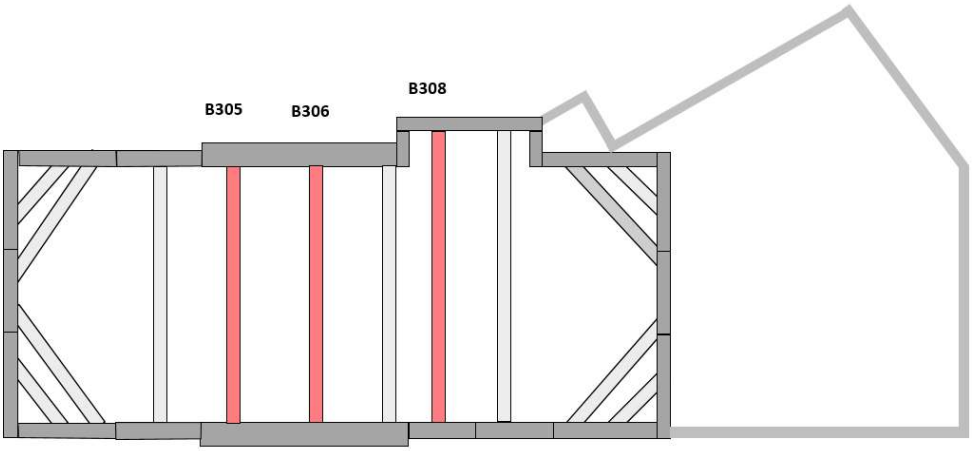


Figure 79 : Plan d'extensomètres du troisième lit B3 sur l'ouvrage LCO.

Extensomètres (quatrième lit B4)

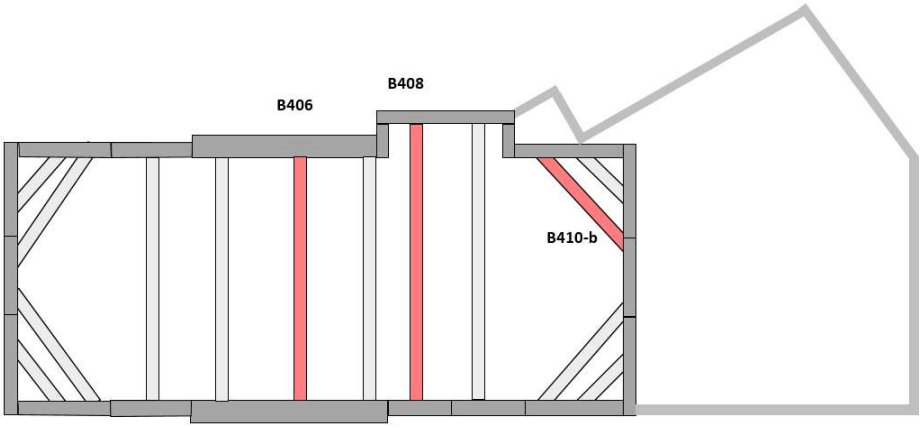


Figure 80 : Plan d'extensomètres du quatrième lit B4 sur l'ouvrage LCO.

5. Ouvrage 3303P

Description de l'ouvrage

L'ouvrage 3303P se trouve sur la commune d'Aubervilliers et se caractérise par sa géométrie rectangulaire. En phase travaux, il permet le lancement du tunnelier TBM2a et la sortie tu tunnelier TBM3. Pendant la phase service, l'ouvrage assure la fonction d'accès de secours au tunnel des lignes 16 et 17.

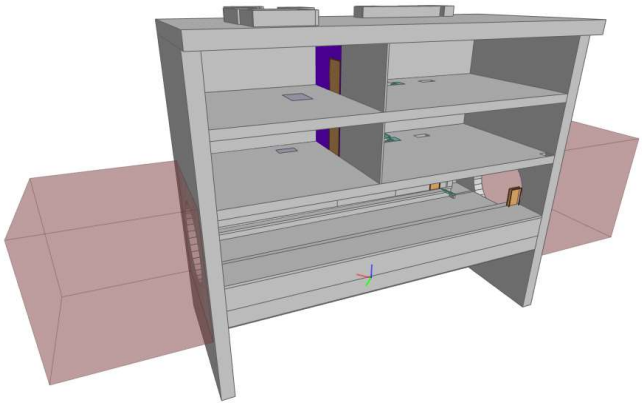


Figure 81 : Vue en 3D de l'ouvrage spécial 3303P

Géométrie

Les principales caractéristiques géométriques de l'ouvrage en paroi moulée sont définies ci-après :

- Épaisseur de la paroi moulée 1.50 m
- Épaisseur de la dalle de couverture 1.50 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S1 1.00 m
- Épaisseur du plancher intermédiaire niveau S2 1.00 m
- Épaisseur du radier 2.00 m
- Plateforme de travail pour forage de la paroi moulée 32.90 m NGF
- Niveau du fond de fouille 3.88 m NGF

Phasage

Le phasage détaillé est présenté ci-après :

Tableau 34 : Phasage général de l'ouvrage 3303P.

Etape	Phasage général
1	Réalisation de la PM
2	Terrassement à la cote 32.83 NGF en dessous du niveau de la dalle de couverture
3	Réalisation des liernes de la dalle de couverture
4	Terrassement à la cote 25.43 NGF en dessous du niveau N-1
5	Réalisation des liernes S1
6	Terrassement à la cote 18.07 NGF en dessous du niveau N-2
7	Réalisation des liernes S2
8	Terrassement à la côte en dessous du premier lit de butons B1 à 13.15 NGF
9	Pose du premier lit de butons B1
10	Terrassement à la côte en dessous du deuxième lit de butons B2 à 8.35 NGF
11	Pose du deuxième lit de butons B2
12	Terrassement jusqu'au fond de fouille FF
13	Réalisation radier par pianotage des B2
14	Dépose butons B1 et B2
15	Coulage de la dalle N-2 définitive
16	Coulage de la dalle N-1 définitive
17	Coulage de la dalle de couverture définitive

Stratigraphie

Le tableau ci-dessous montre les cotes des différentes formations identifiées au droit de l'ouvrage. Les côtes correspondent au toit des couches.

Tableau 35 : Stratigraphie de l'ouvrage 3303P

Formation	Cote au toit de la couche (M NGF)
Remblais (R)	35,9 TN
Alluvions modernes (Am)	34,4
Marnes à Pholadomyes (MPH) et Sables verts (SV)	31,0
Calcaire de Saint-Ouen (SO1)	28,5
Calcaire de Saint-Ouen (SO2)	23.0
Sable de Beauchamp (SB2)	17,5
Sable de Beauchamp (SB4)	12.0
Marnes et Caillasses (MC)	6,0
Calcaire grossier (CG)	-8,0

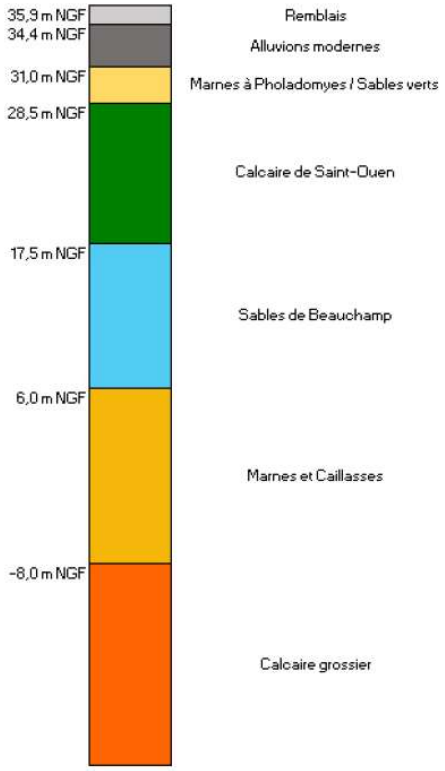


Figure 82 : Profil géologique de l'ouvrage 3303P.

Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques sont présentés ci-après.

Tableau 36 : Paramètres géotechniques utilisés pour l'ouvrage 3303P.

Sol	ϒh kN/m3	EM MPa	α	Phase service C' kPa	Phase service Φ' °	Phase travaux C'trav KPa	Phase travaux Φ'trav °	K0
R	19,0	3	1/2	0	28	0	28	0,53
Am	19,0	37	1/2	0	30	0	30	0,50
MPH/SV	19,0	5	1/2	5	34	15	34	0,44
SO (1)	17,5	15	1/3	10	33	20	33	0,46
SO (2)	17,5	30	1/3	20	33	30	33	0,46
SB (2)	21,0	83	1/2	10	33	10	33	0,46
SB (4)	21,0	220	2/3	50	35	50	35	0,43
MC (5)	20,0	500	2/3	50	35	50	35	0,43
CG (3)	21,0	270	1/2	100	35	100	35	0,43

Avec :

- γ_h : poids volumique humide (kN/m3)
- E_M : Module pressiométrique de Ménard (en MPa)
- α : coefficient rhéologique de Ménard
- c' : cohésion effective (kPa)

- φ' : angle de frottement effectif (°)
- c_{trav} : cohésion en phase travaux (kPa)
- φ_{trav} : angle de frottement en phase travaux (°)
- K_0 : coefficient de terres au repos

Niveau d'eaux de référence

On présente dans la table ci-dessous les niveaux de référence pris en compte :

Tableau 37 : Niveaux d'eaux de référence de l'ouvrage 3303P..

Aquifère	Niveau Quasi-Permanent	Niveau de Chantier	Niveau Fréquent	Niveau caractéristique	Niveau accidentel
	EB (NGF)	EC (NGF)	EF (NGF)	EH (NGF)	EE (NGF)
Am/MPH/SO/SB/MC/CG	30.9	31.6	32.3	34	34.9

Coupes de calcul

Le découpage de l'ouvrage pris en compte est présenté ci-après.

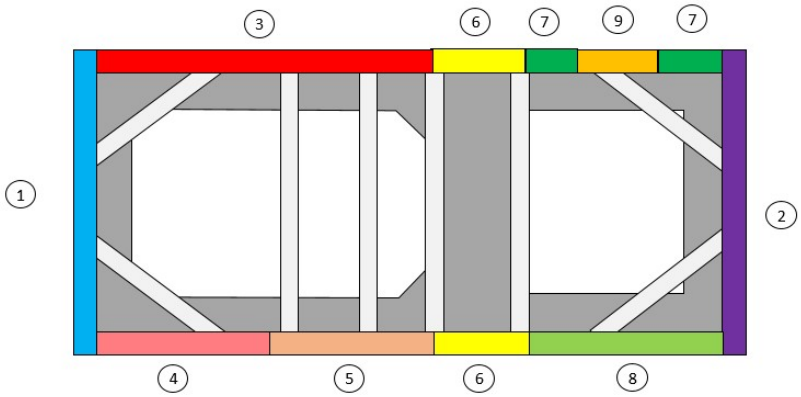


Figure 83 : Découpage de l'ouvrage 3303P.

Plan d'instrumentation

Inclinomètres

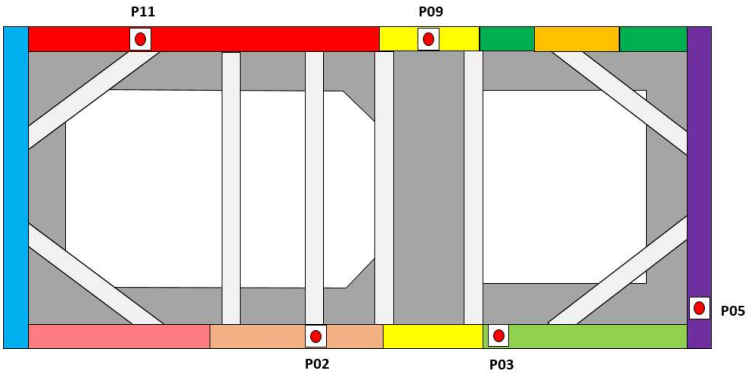


Figure 84 : Plan d'instrumentation (inclinomètres) sur l'ouvrage 3303P.

Extensomètres (premier lit B1)

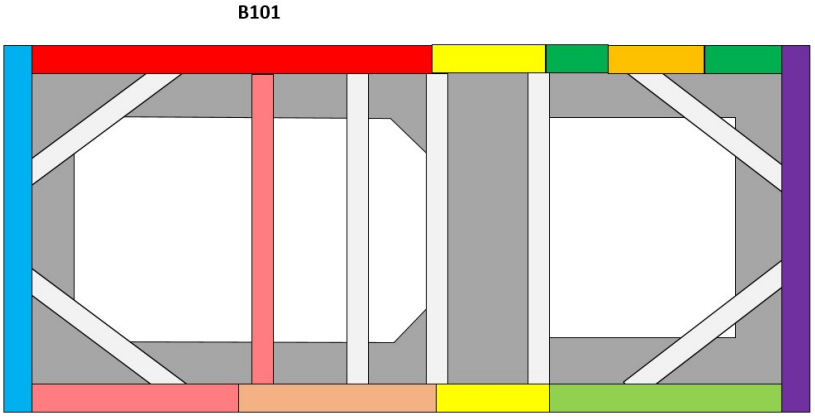


Figure 85 : Plan d'extensomètres du premier lit B1 sur l'ouvrage 3303P.

Deuxième lit B2

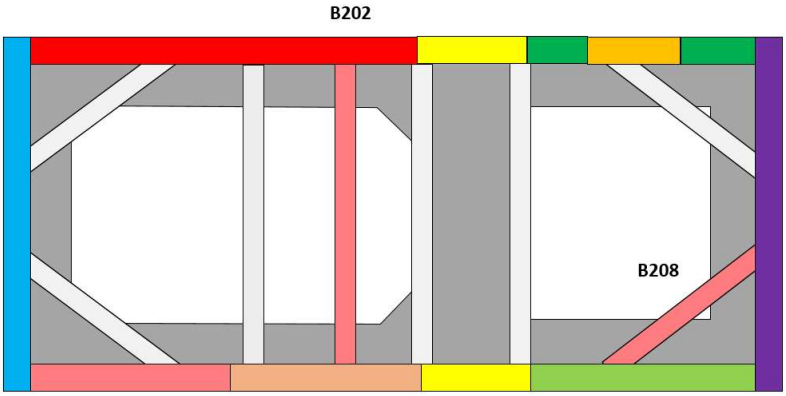


Figure 86 : Plan d'extensomètres du premier lit B1 sur l'ouvrage 3303P.

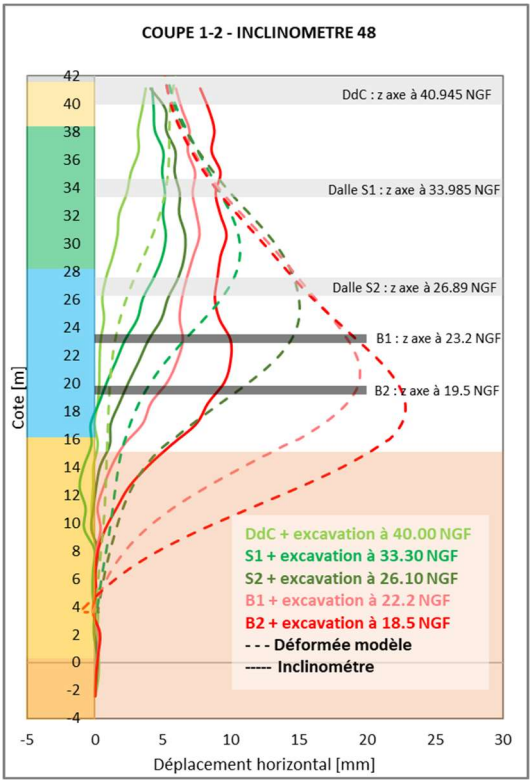
Annexe 2 - Résultats de l'état des lieux

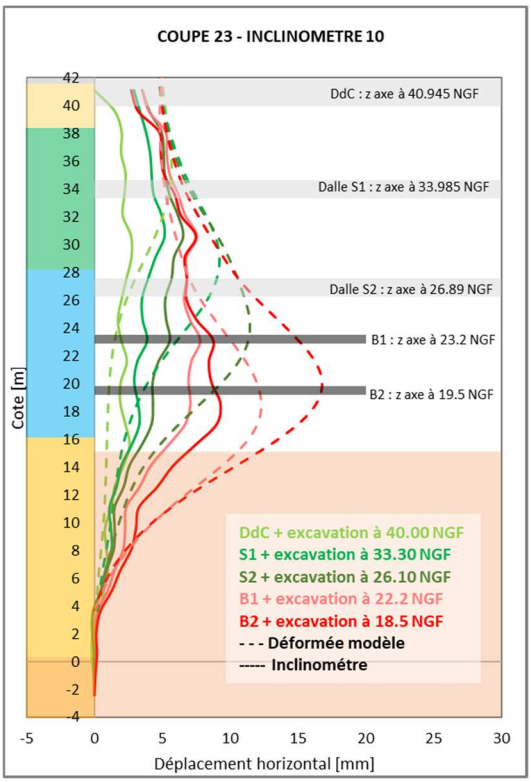
1. Etat des lieux des parois moulées

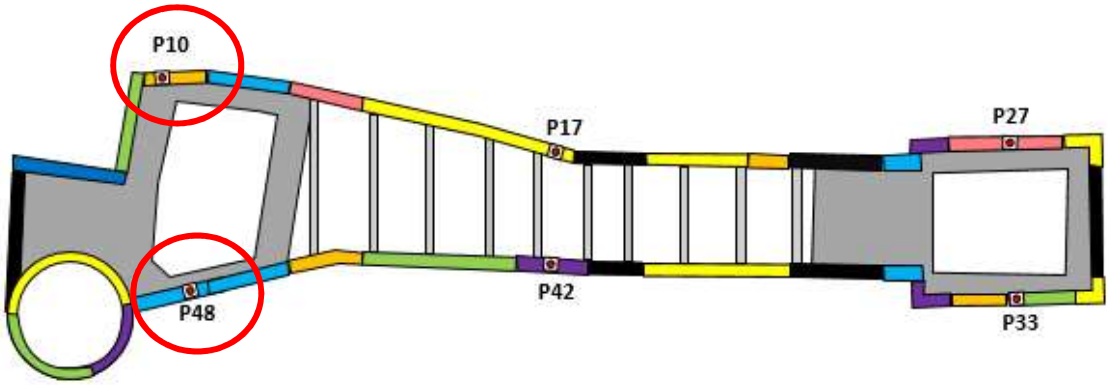
Résultats par ouvrages

Ouvrage 01^{E}01

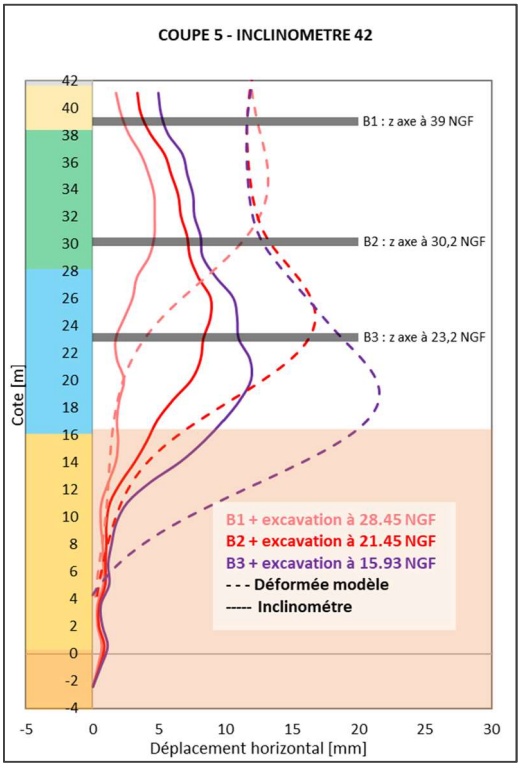
- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 1-2 – Inclinomètre 48 & Coupe 23 – Inclinomètre 10

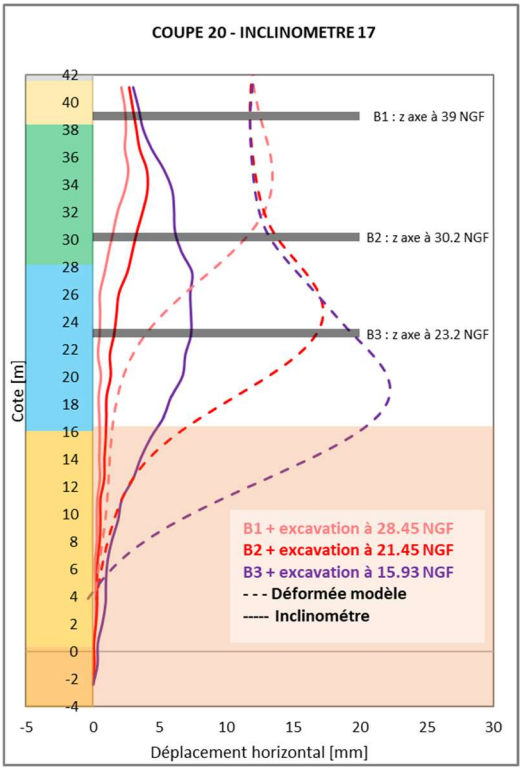


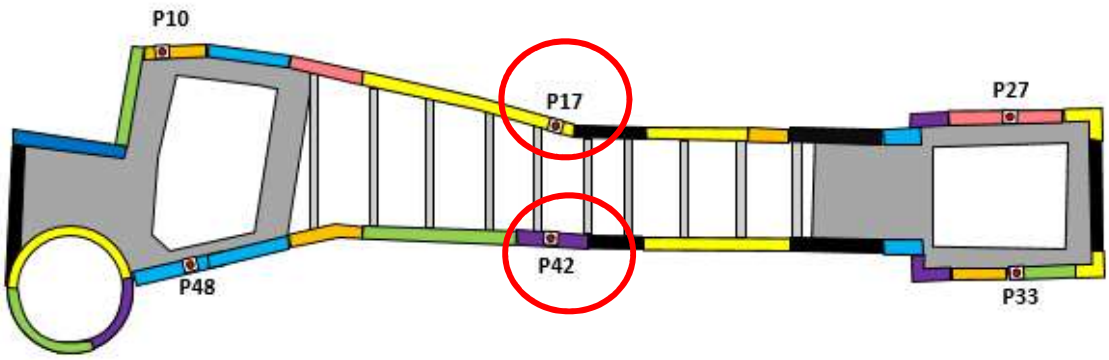




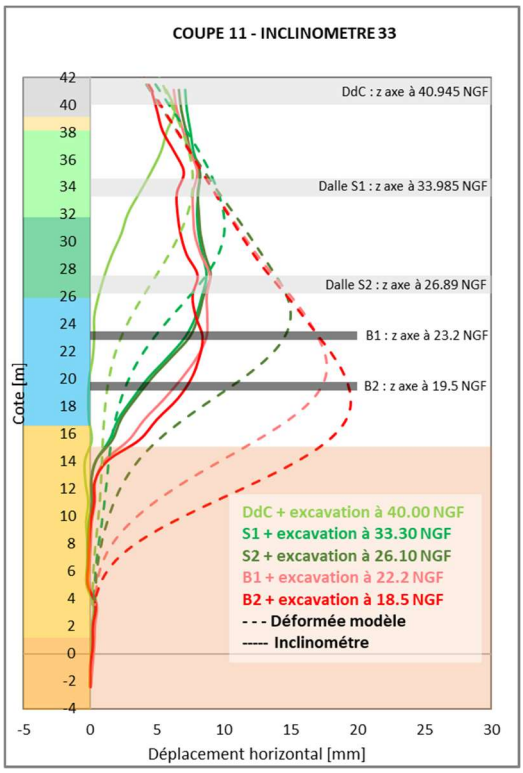
- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 5 – Inclinomètre 42 & Coupe 20 – Inclinomètre 17

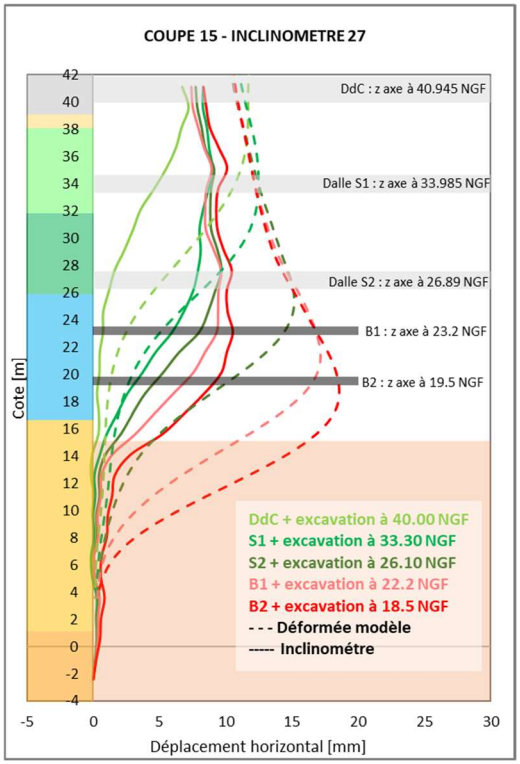


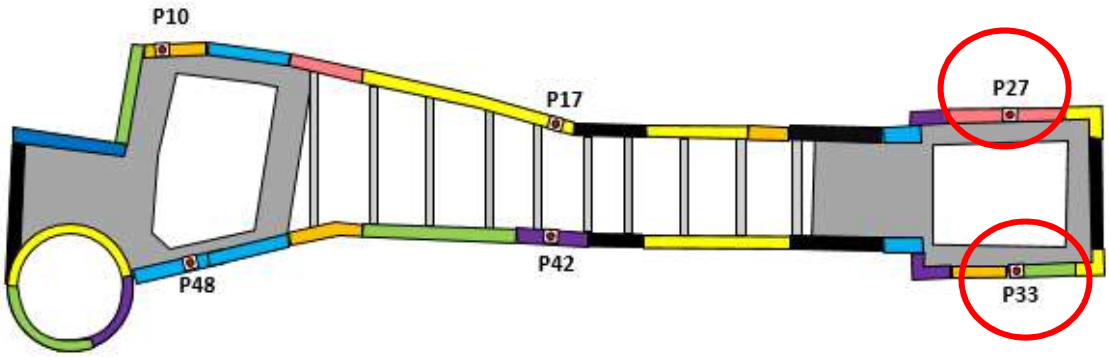




- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 11 – Inclinomètre 33 & Coupe 15 – Inclinomètre 27

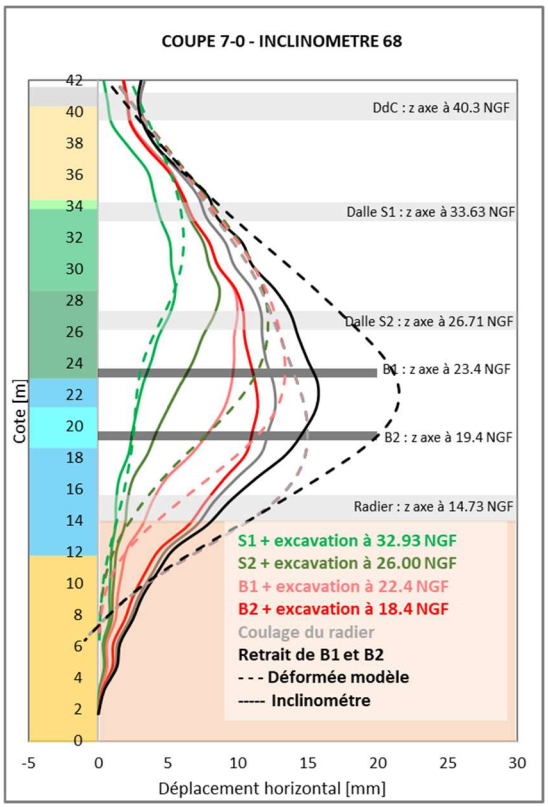


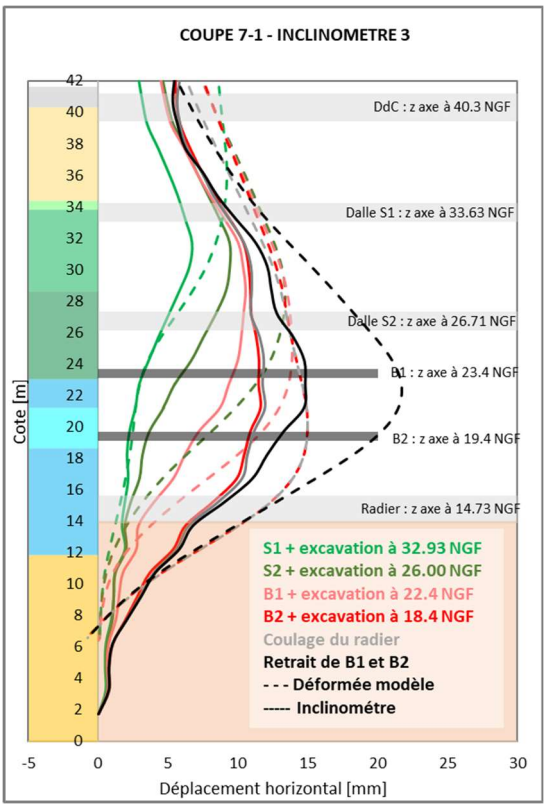


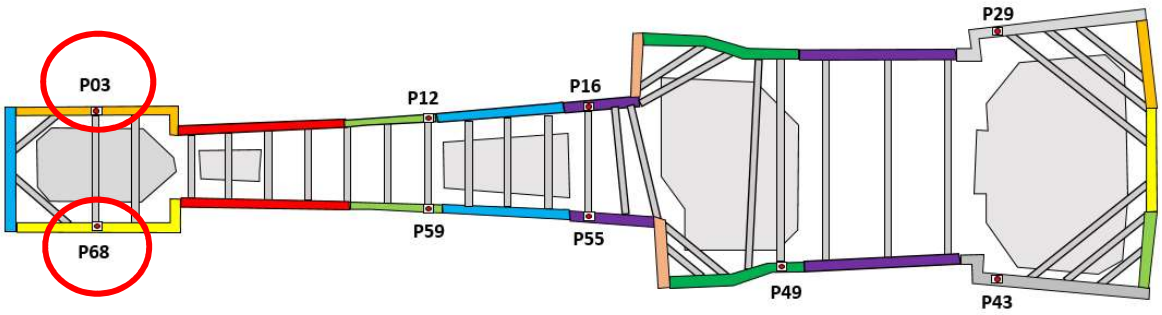


Ouvrage 34^{E}01

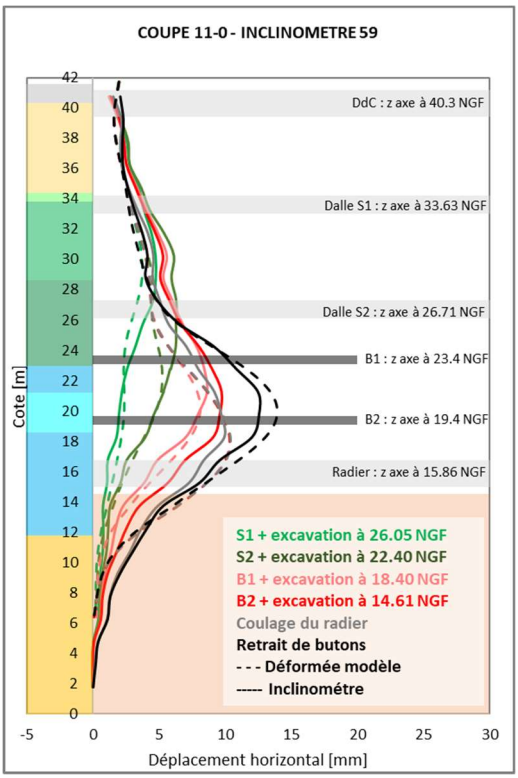
- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 7-0 – Inclinomètre 68 & Coupe 7-1 – Inclinomètre 3

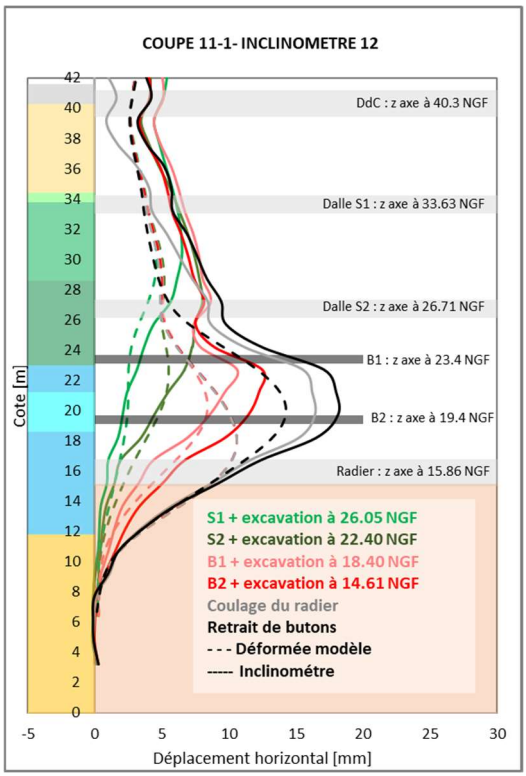


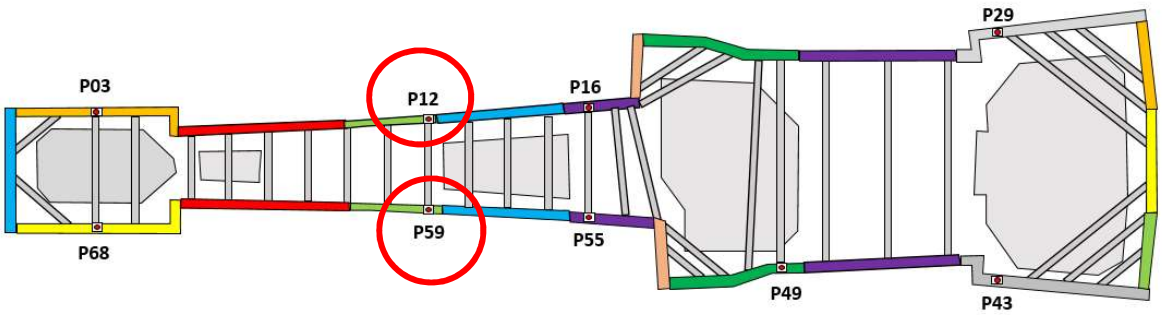




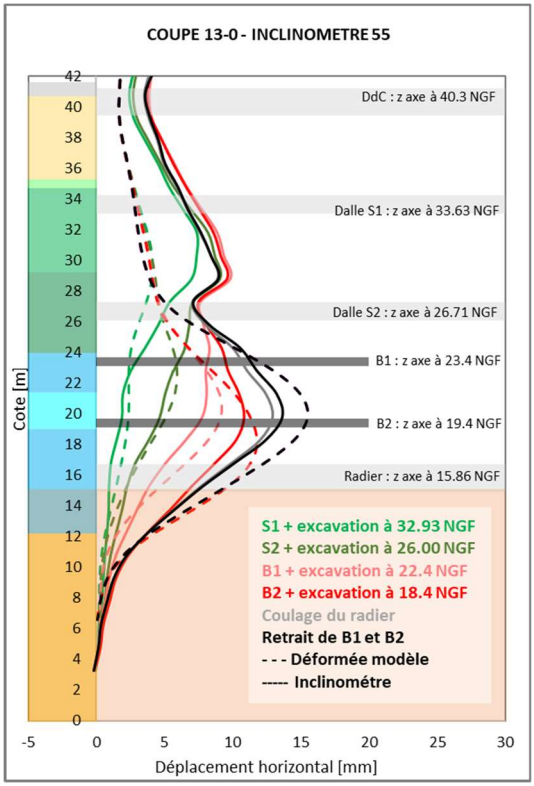
- OUVRAGE 34E01 : Coupe 11-0 – Inclinomètre 59 & Coupe 11-1 – Inclinomètre 12

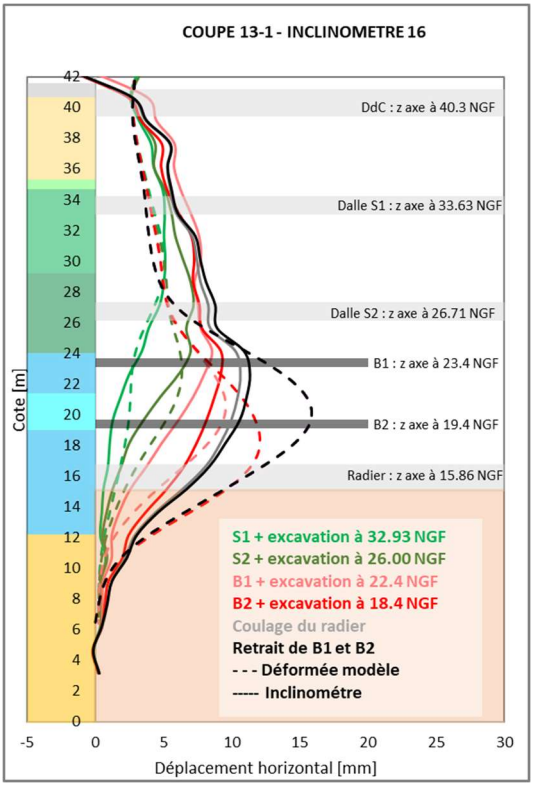


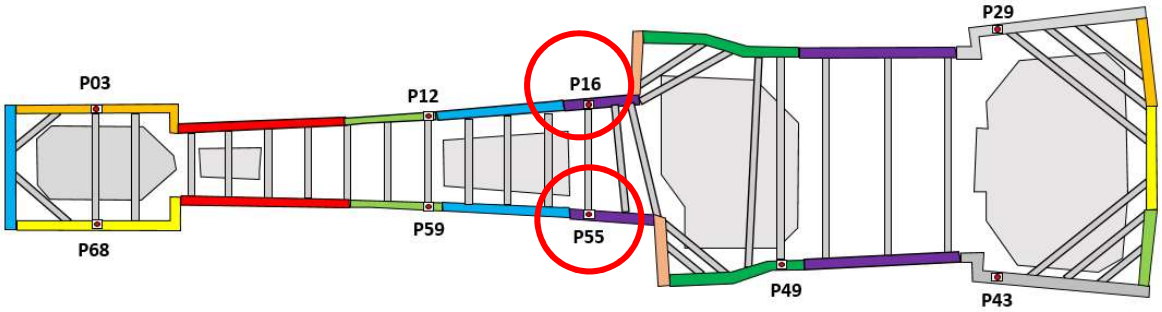




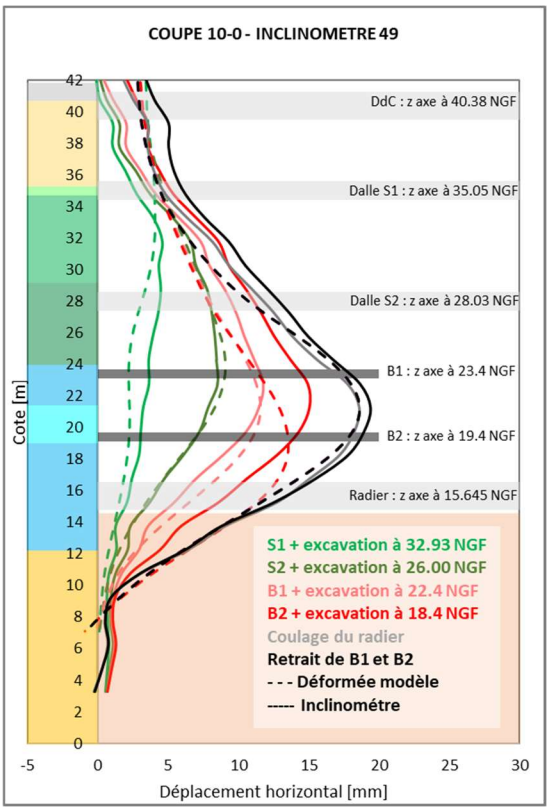
- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 13-0 – Inclinomètre 55 & Coupe 13-1 – Inclinomètre 16

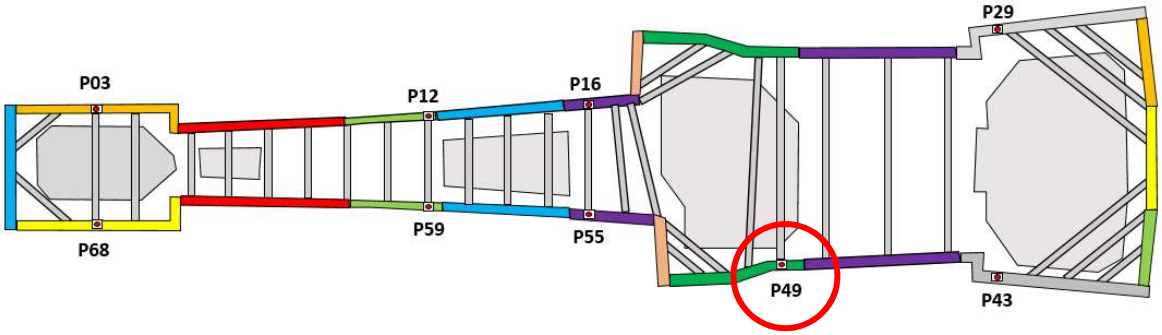




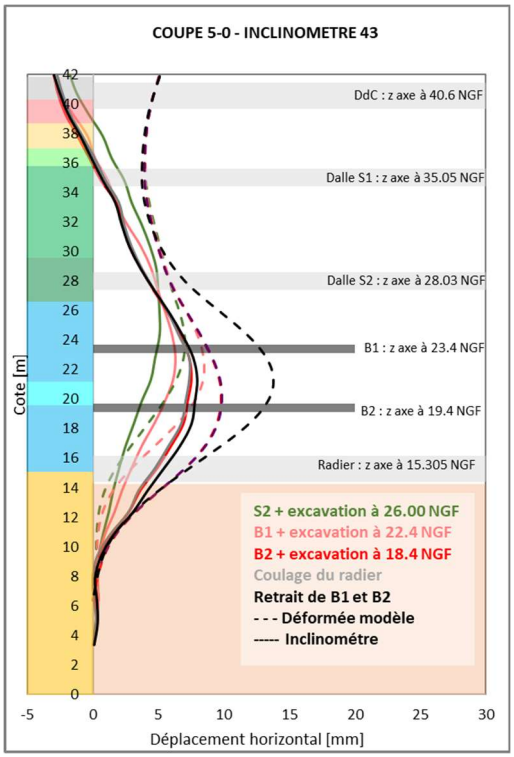


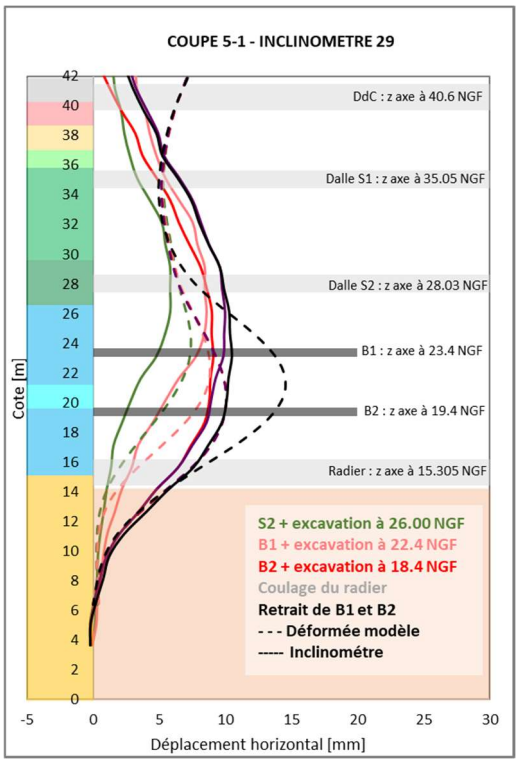
- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 10-0 – Inclinomètre 49

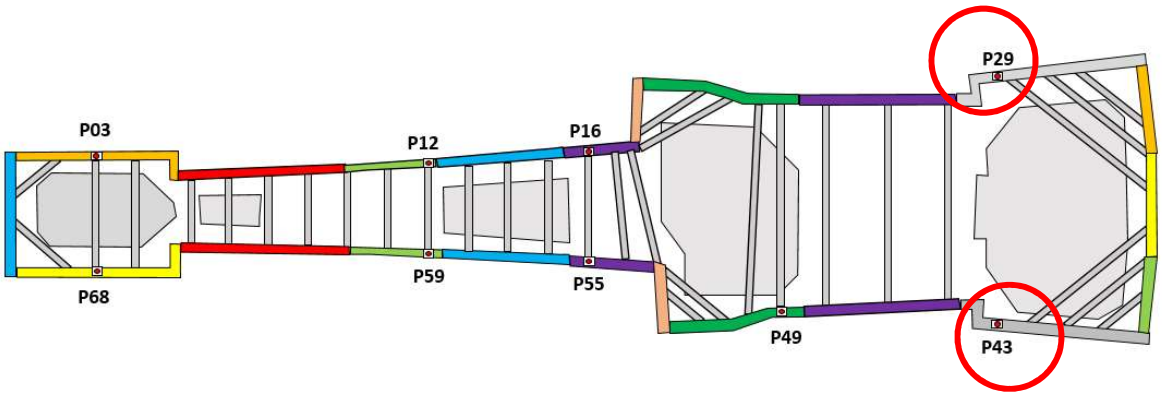




- OUVRAGE 34E01 : Coupe 5-0 – Inclinomètre 43 & Coupe 5-1 – Inclinomètre 29

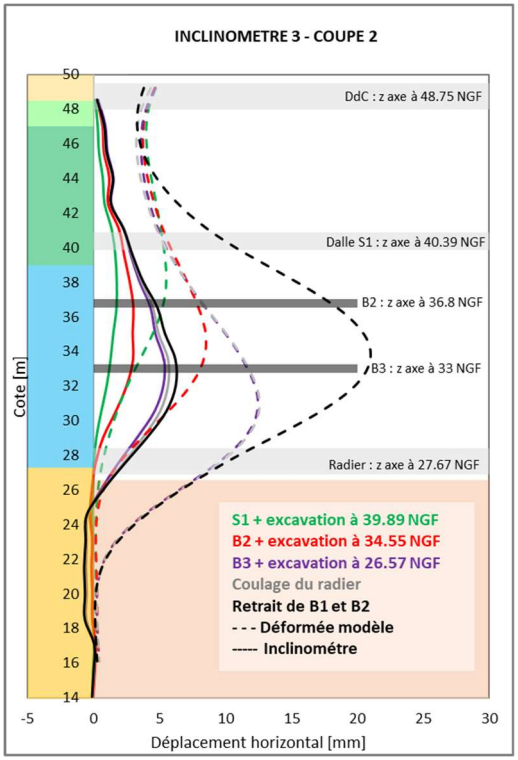


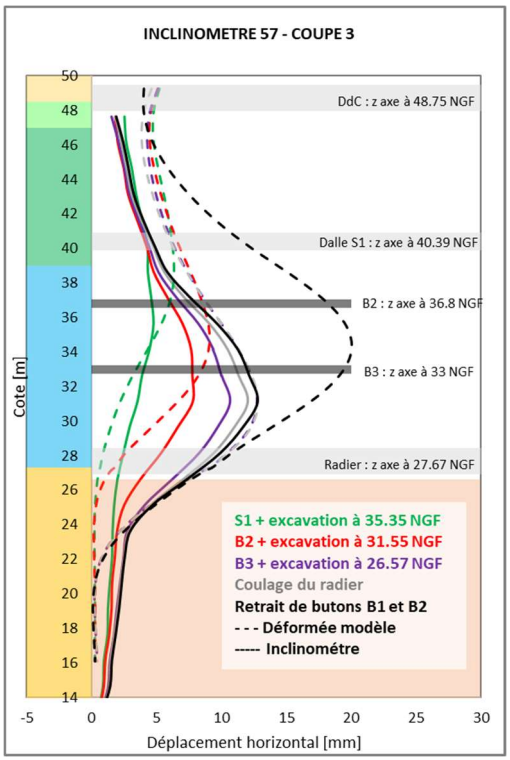


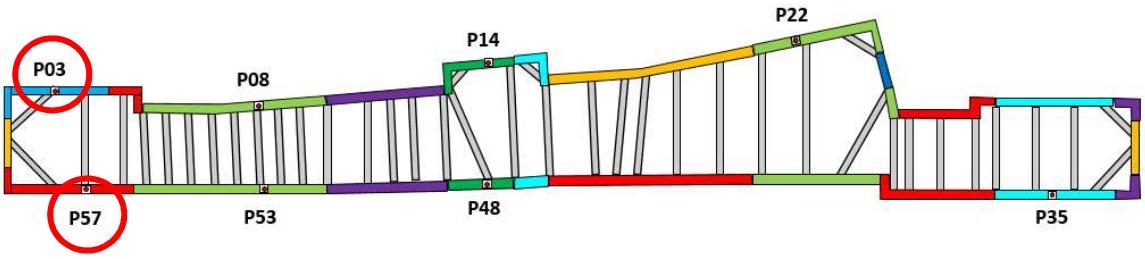


Ouvrage 02^{E}01

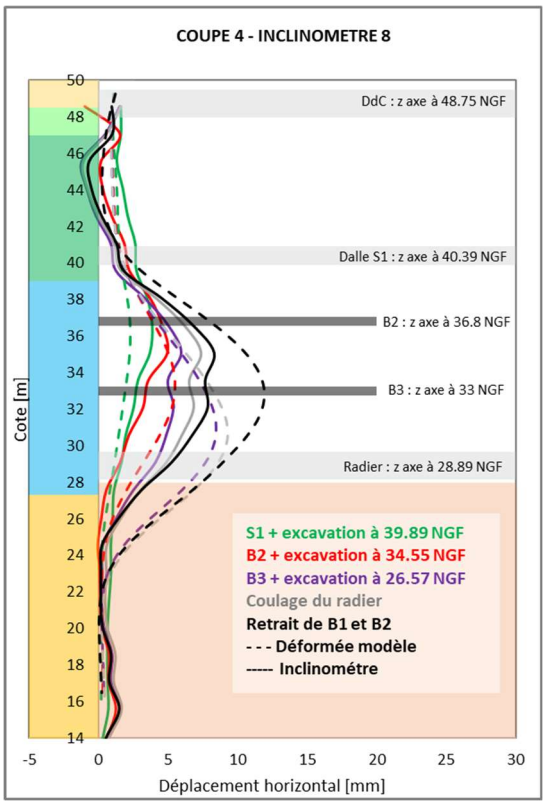
OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 2 – Inclinomètre 3 & Coupe 3 – Inclinomètre 57

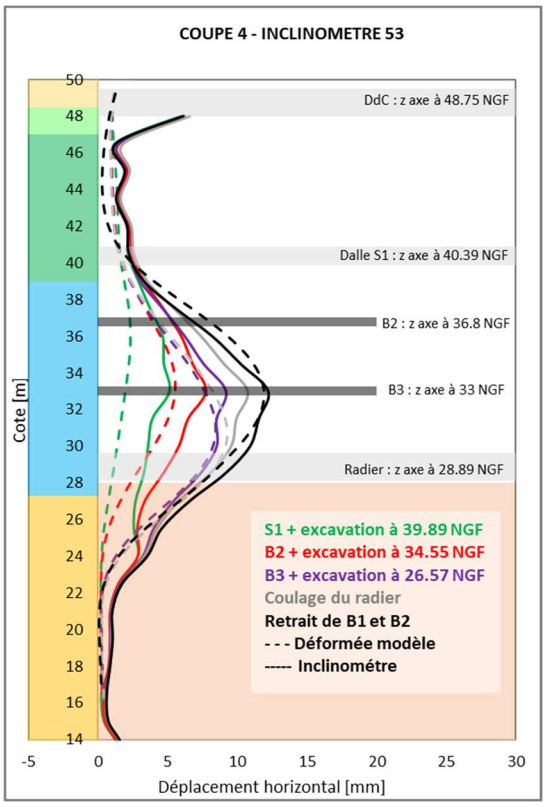


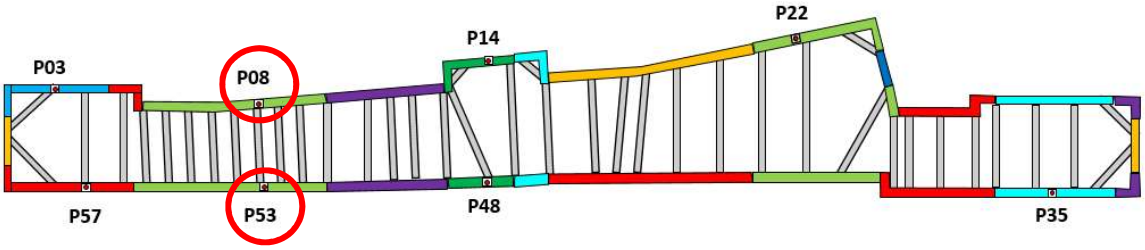




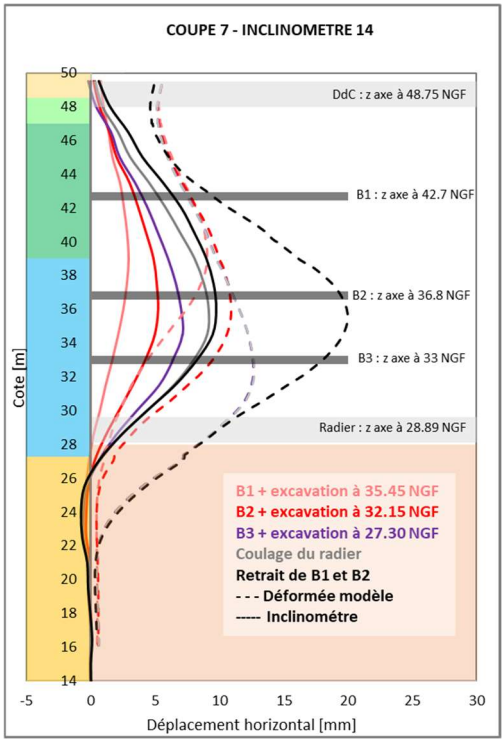
- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 4 – Inclinomètre 8 & Coupe 4 – Inclinomètre 53

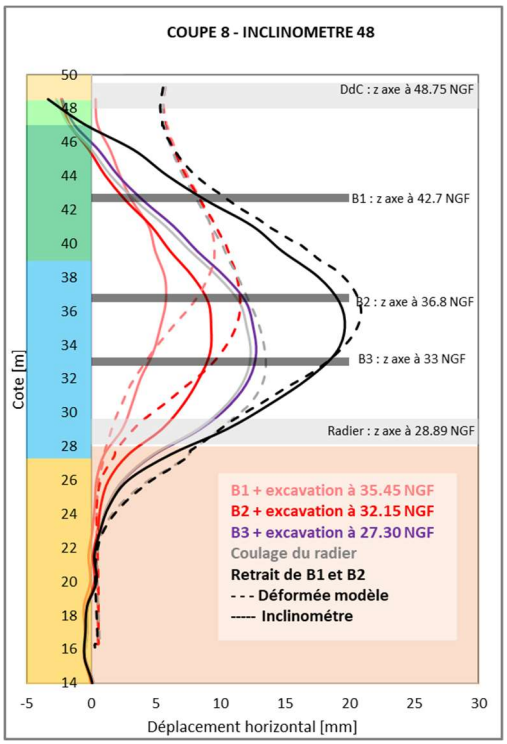


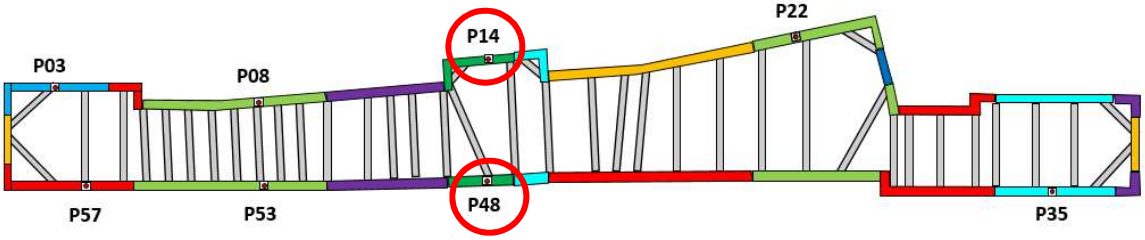




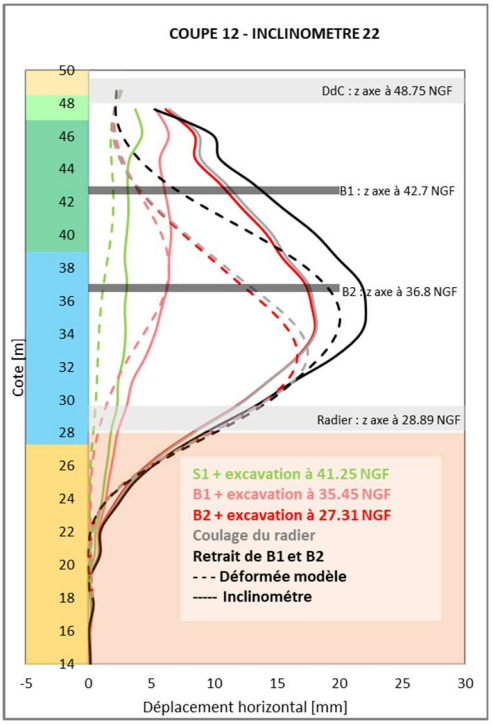
- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 7 – Inclinomètre 14 & Coupe 8 – Inclinomètre 48

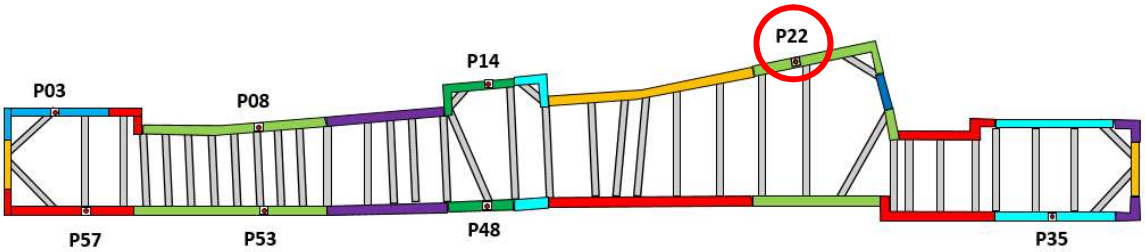




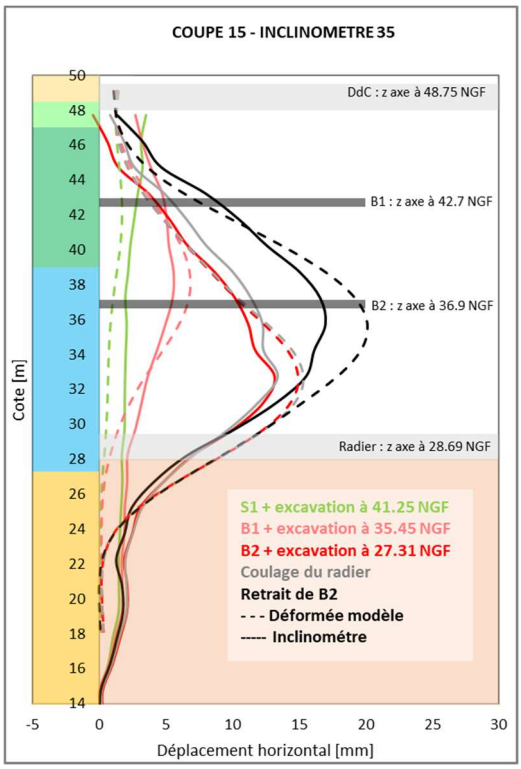


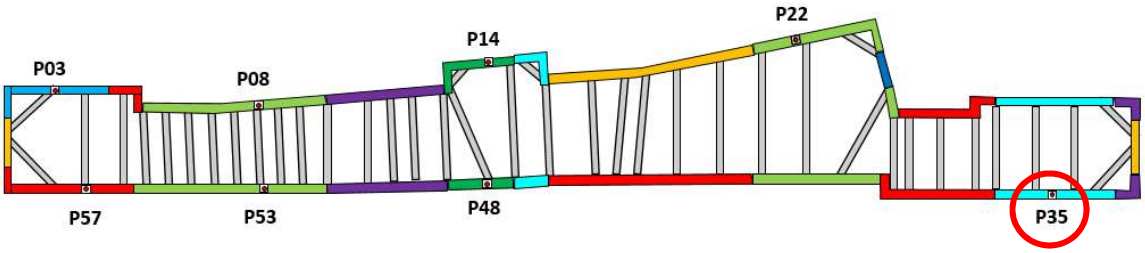
- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 12 – Inclinomètre 22





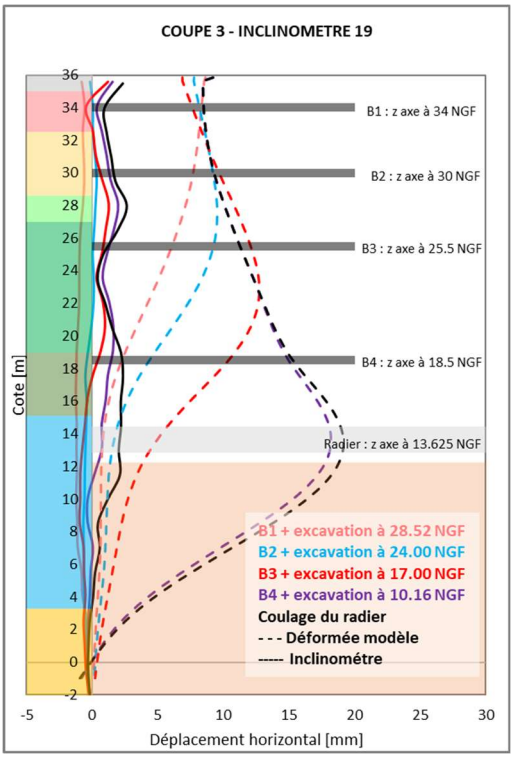
- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 15 – Inclinomètre 35

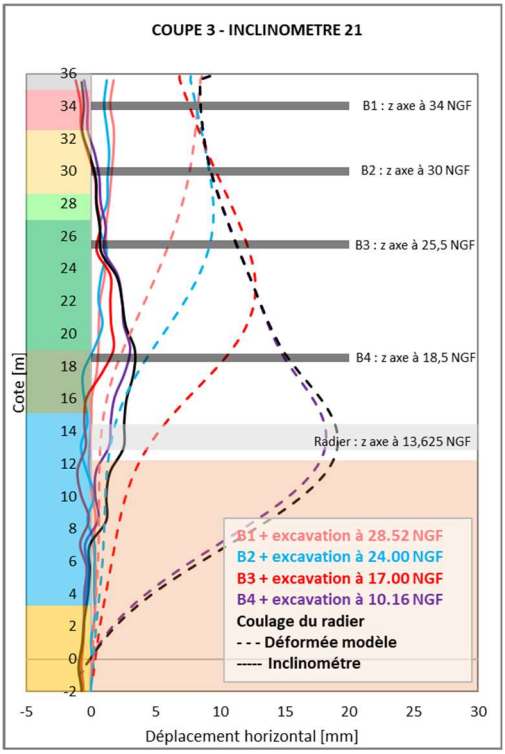


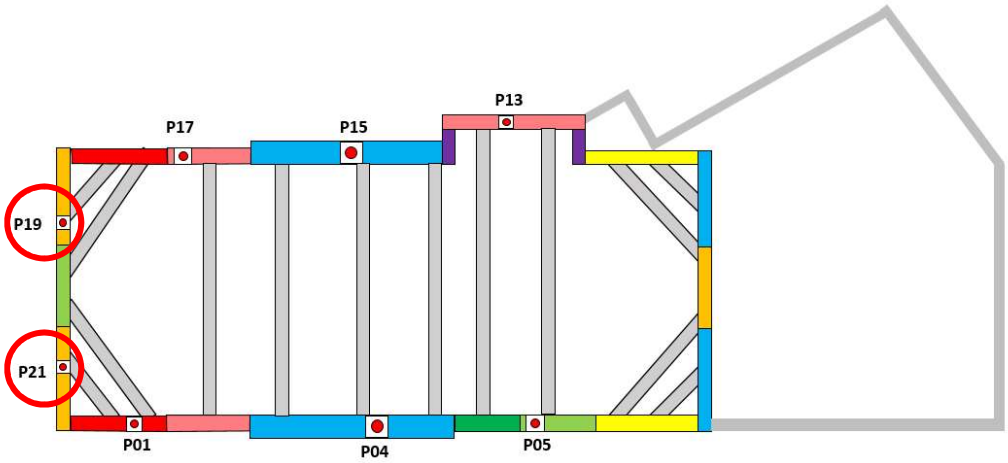


Gare de La Courneuve (LCO)

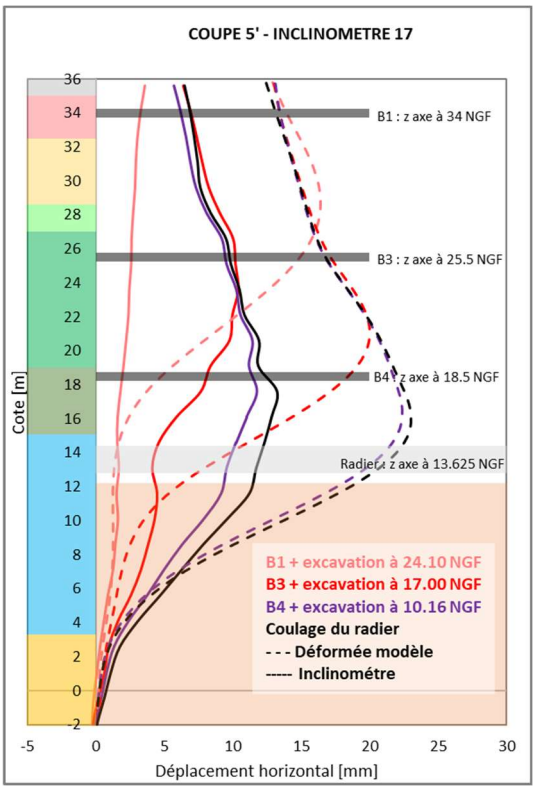
- GARE LA COURNEUVE : Coupe 3 – Inclinomètre 19 & Coupe 3 – Inclinomètre 21

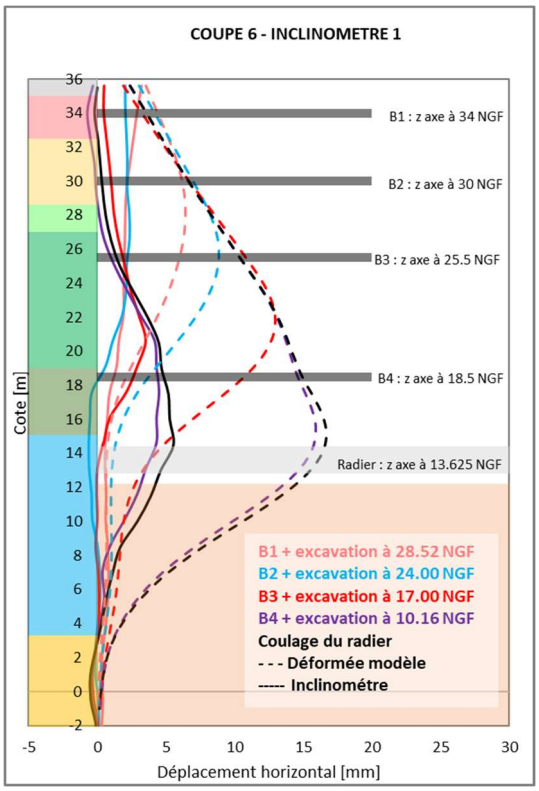


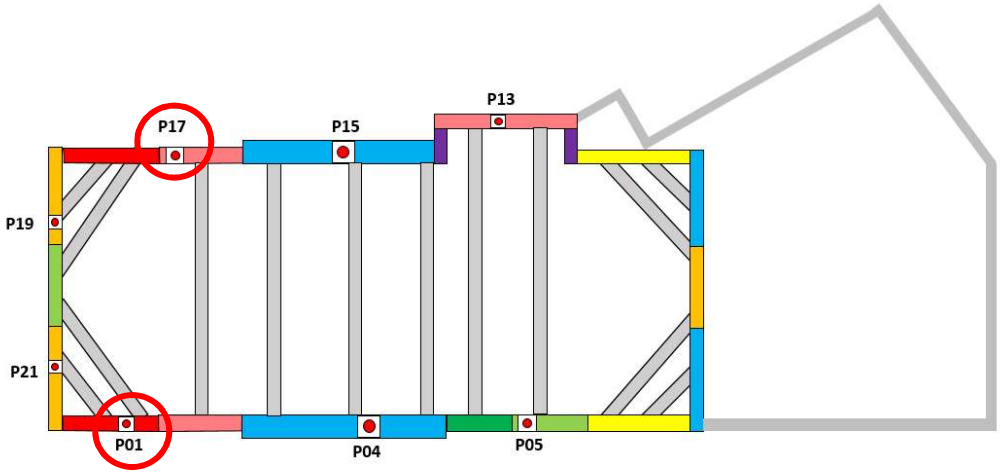




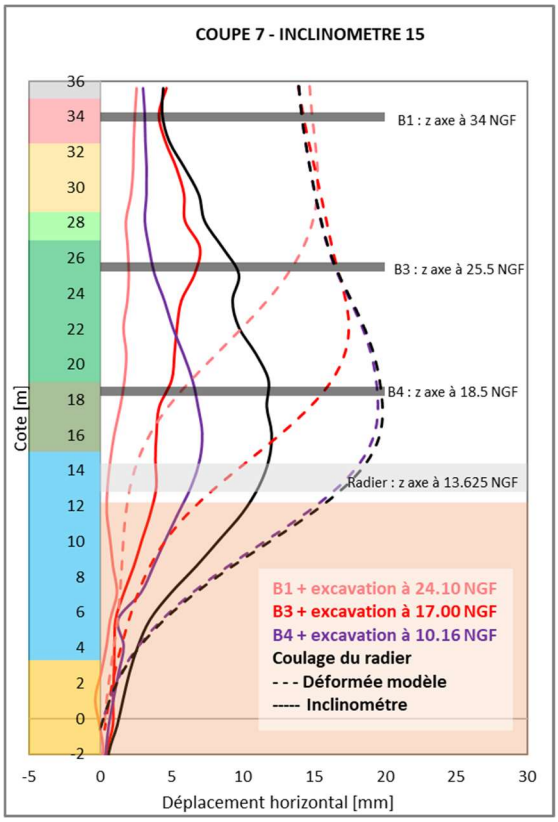
- GARE LA COURNEUVE : Coupe 5’ – Inclinomètre 17 & Coupe 6 – Inclinomètre 01

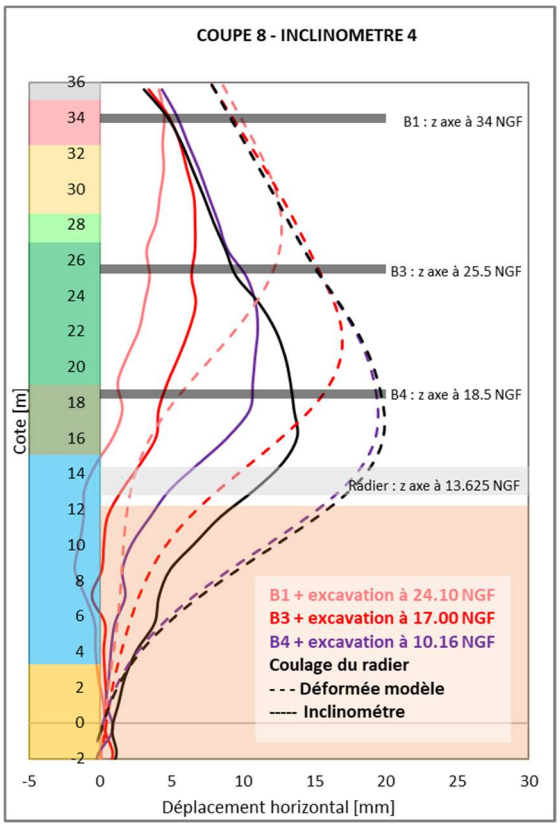


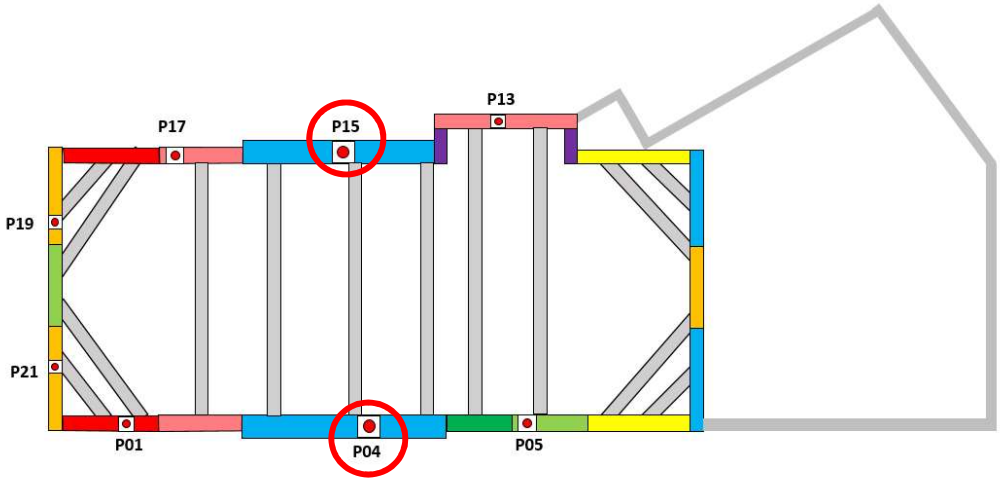




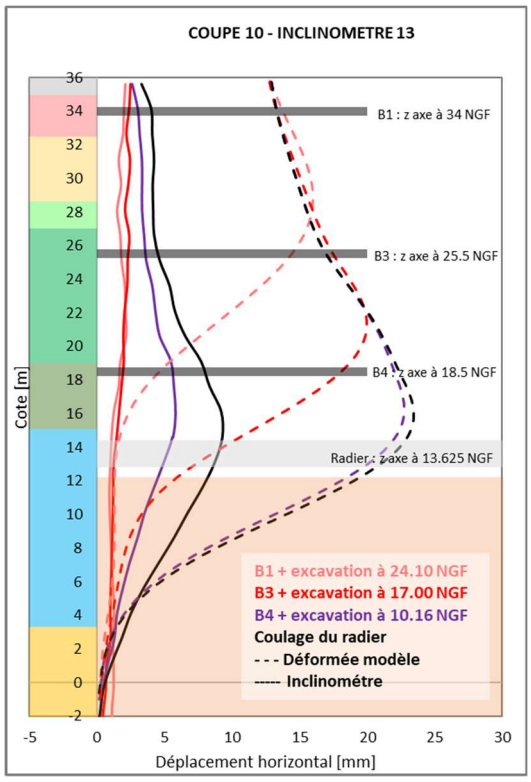
- GARE LA COURNEUVE : Coupe 7 – Inclinomètre 15 & Coupe 8 – Inclinomètre 04

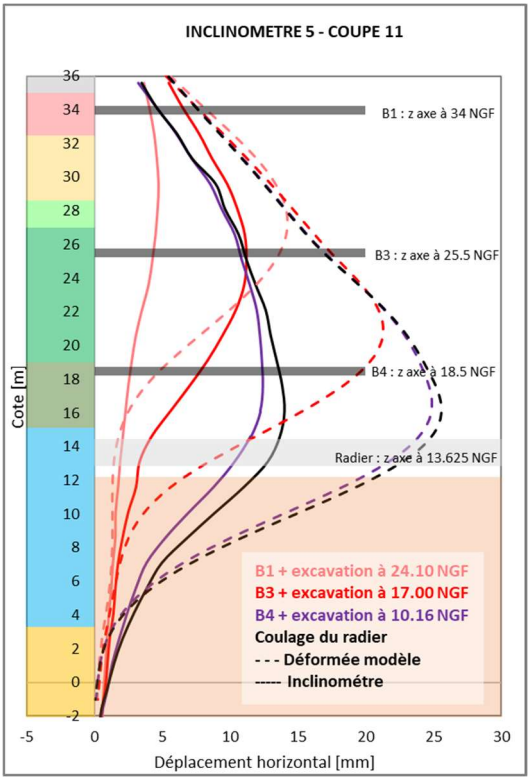


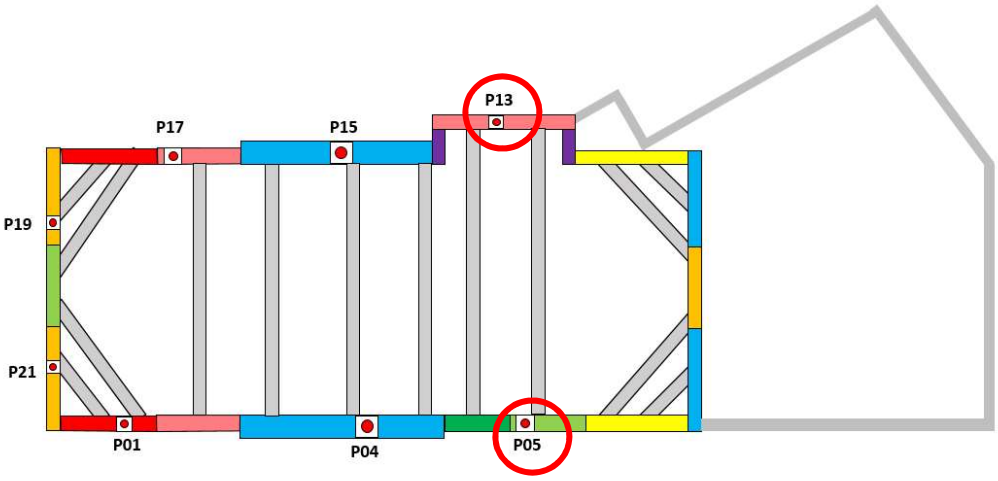




- GARE LA COURNEUVE : Coupe 10 – Inclinomètre 13 & Coupe 11 – Inclinomètre 5

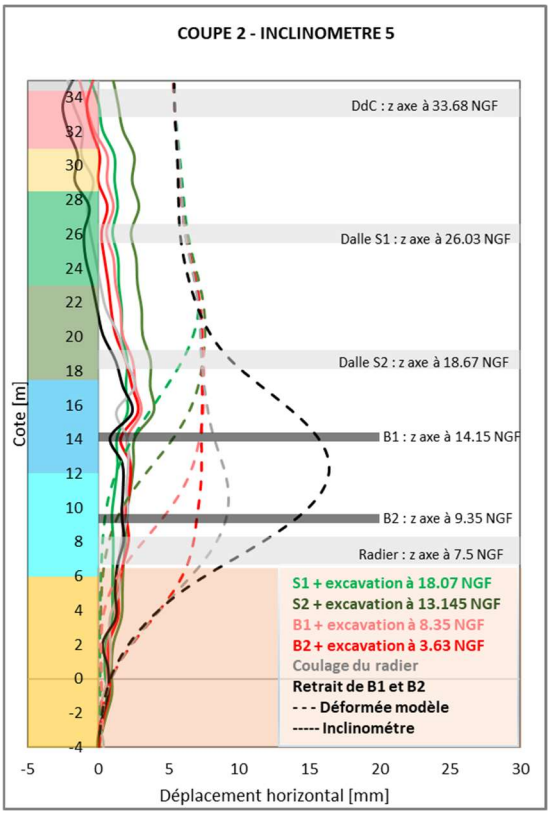


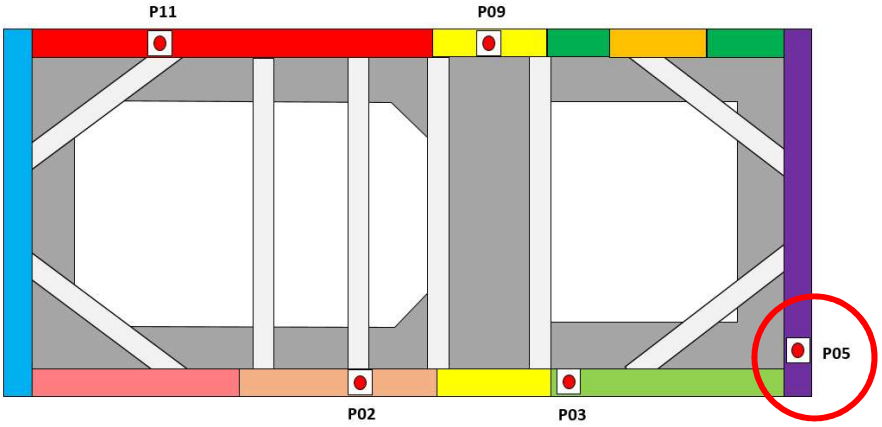




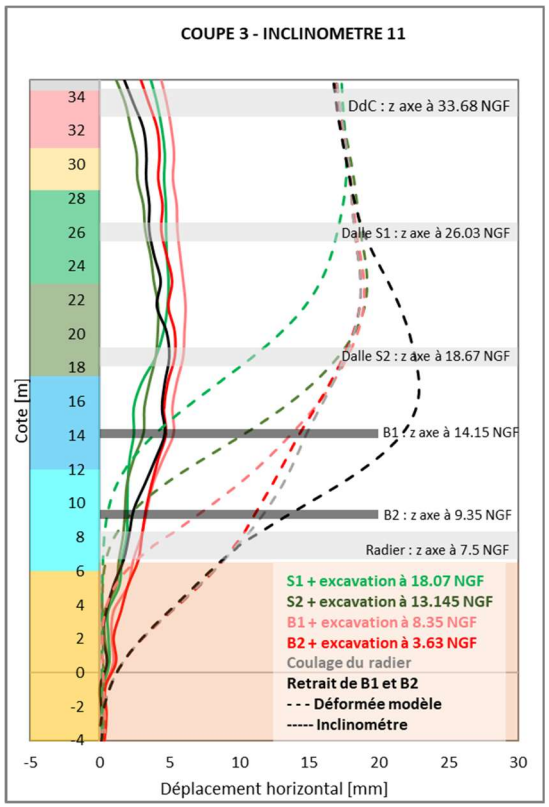
Ouvrage 3303P

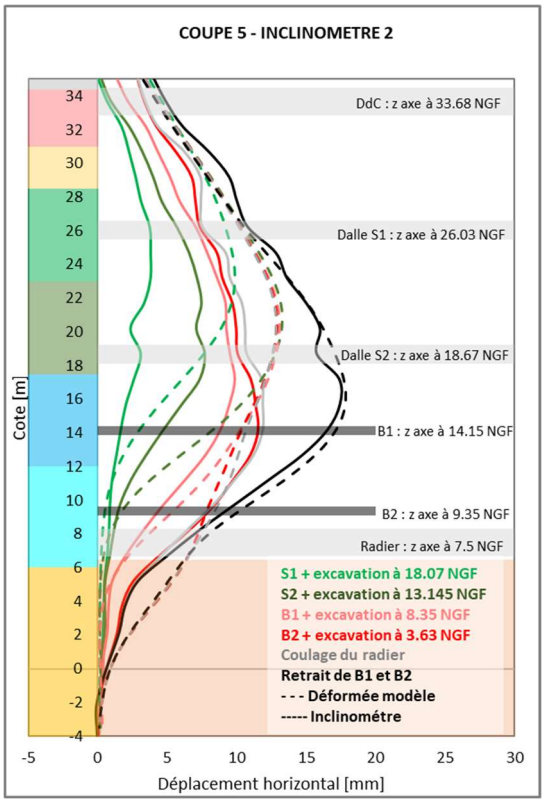
- OUVRAGE 3303P : Coupe 2 – Inclinomètre 5

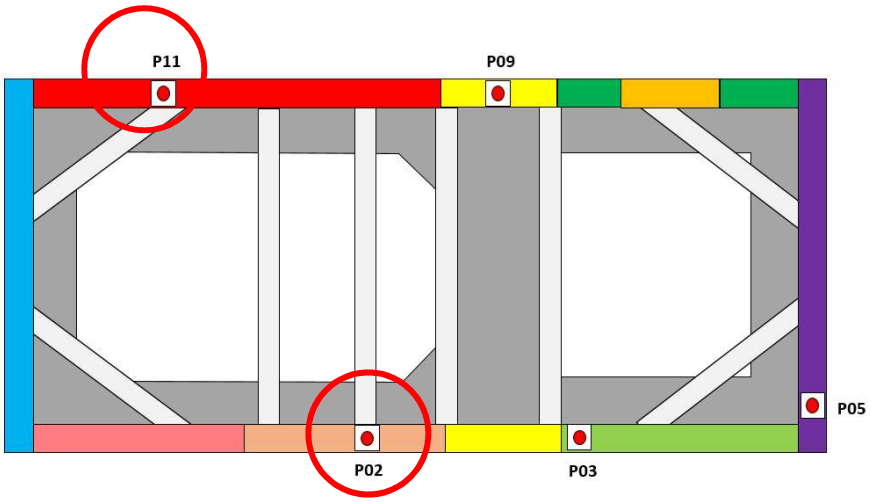




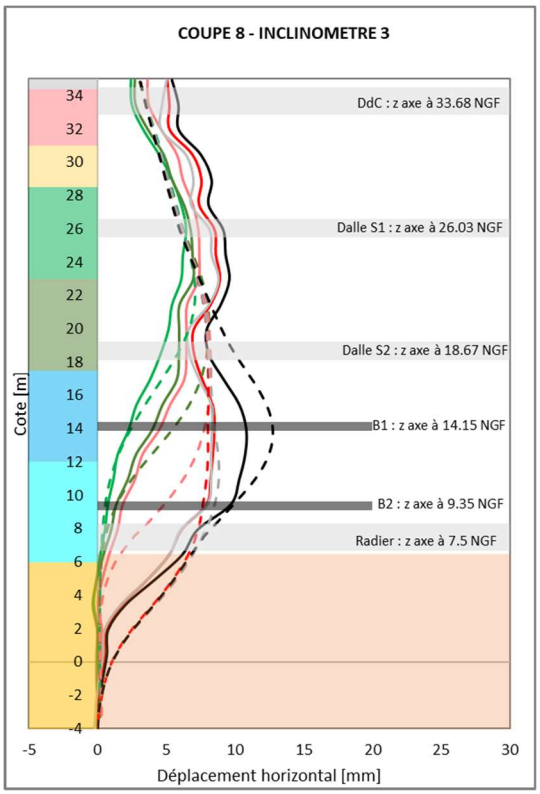
- OUVRAGE 3303P : Coupe 3 – Inclinomètre 11 & Coupe 5 – Inclinomètre 2

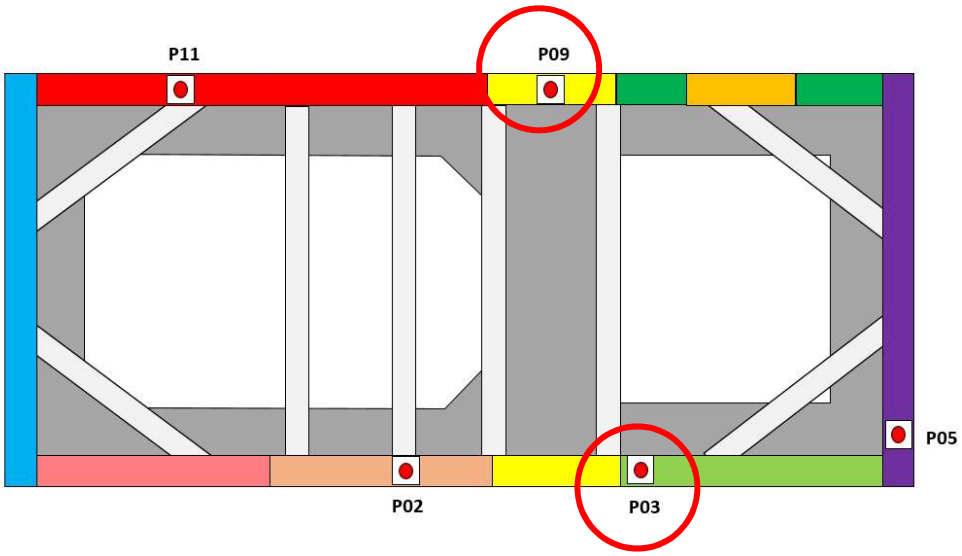






- OUVRAGE 3303P : Coupe 6 – Inclinomètre 9 & Coupe 8 – Inclinomètre 3





Récapitulatif de résultats

On présente ci-dessous un tableau récapitulatif des résultats de l'état des lieux des parois moulées (la dernière phase mesurées est celle prise en compte pour le calcul des écarts).

Ouvrage	Coupe	Inclino.	Phasage	Type	Ecart absolu en tête (mm)	Ecart relatif en tête (%)	Ecart absolu en ventre (mm)	Ecart relatif en ventre (%)
01E01	1-2	48	Descendant	Singulière	2.4	47%	12.6	56%
01E01	23	10	Ascendant	Singulière	1.0	20%	8.0	50%
01E01	5	42	Ascendant	Courante	7.2	60%	9.7	45%
01E01	20	17	Ascendant	Courante	9.2	75%	14.7	66%
01E01	11	33	Descendant	Singulière	0.0	0%	11.0	58%
01E01	15	27	Descendant	Singulière	3.0	27%	8.0	43%
34E01	7-0	68	Descendant	Courante	2.0	200%	6.3	30%
34E01	7-1	3	Descendant	Courante	5.0	60%	9.4	38%
34E01	11-0	59	Descendant	Courante	0.0	0%	1.5	10%
34E01	11-1	12	Descendant	Courante	2.0	66%	3.7	26%
34E01	13-0	55	Descendant	Courante	2.0	66%	1.5	10%
34E01	13-1	16	Descendant	Courante	2.0	66%	4.3	27%
34E01	10-0	49	Descendant	Courante	1.0	30%	0.8	4%
34E01	5-0	43	Descendant	Singulière	7.0	140%	6.1	45%
34E01	5-1	29	Descendant	Singulière	4.0	50%	4.5	30%
02E01	2	3	Descendant	Singulière	3.0	67%	15.0	71%
02E01	3	57	Descendant	Courante	2.0	44%	7.5	38%
02E01	4	8	Descendant	Courante	0.0	0%	4.0	33%
02E01	4	53	Descendant	Courante	0.0	0%	0.0	0%
02E01	7	14	Ascendant	Singulière	4.0	100%	10.0	50%
02E01	8	48	Ascendant	Courante	6.0	171%	0.8	4%
02E01	12	22	Ascendant	Courante	3.0	120%	2.0	10%
02E01	15	35	Ascendant	Courante	0.0	0%	3.0	15%
LCO	7	15	Ascendant	Courante	10.0	67%	8.0	40%
LCO	8	4	Ascendant	Courante	5.0	50%	6.5	33%
LCO	10	13	Ascendant	Singulière	10.0	77%	14.0	61%
LCO	11'	5	Ascendant	Courante	1.0	18%	12.0	47%
LCO	3	19	Ascendant	Singulière	8.0	100%	16.0	84%
LCO	3	21	Ascendant	Singulière	8.0	100%	16.0	84%
LCO	6	1	Ascendant	Singulière	3.0	100%	11.0	67%
LCO	5'	17	Ascendant	Courante	6.5	50%	10.0	44%
3303	2	5	Descendant	Singulière	7.5	144%	14.0	85%
3303	6	9	Descendant	Courante	5.0	71%	2.0	19%
3303	8	3	Descendant	Courante	2.0	69%	1.0	8%
3303	3	11	Descendant	Singulière	15.0	88%	18.5	80%
3303	5	2	Descendant	Courante	0.0	0%	0.0	0%

2. Etats des lieux du butonnage

On présente ci-dessous un tableau récapitulatif des résultats de l'état des lieux des butons. L'effort de compression mesuré correspond à celui le plus défavorable disponible dans l'historique (en MN).

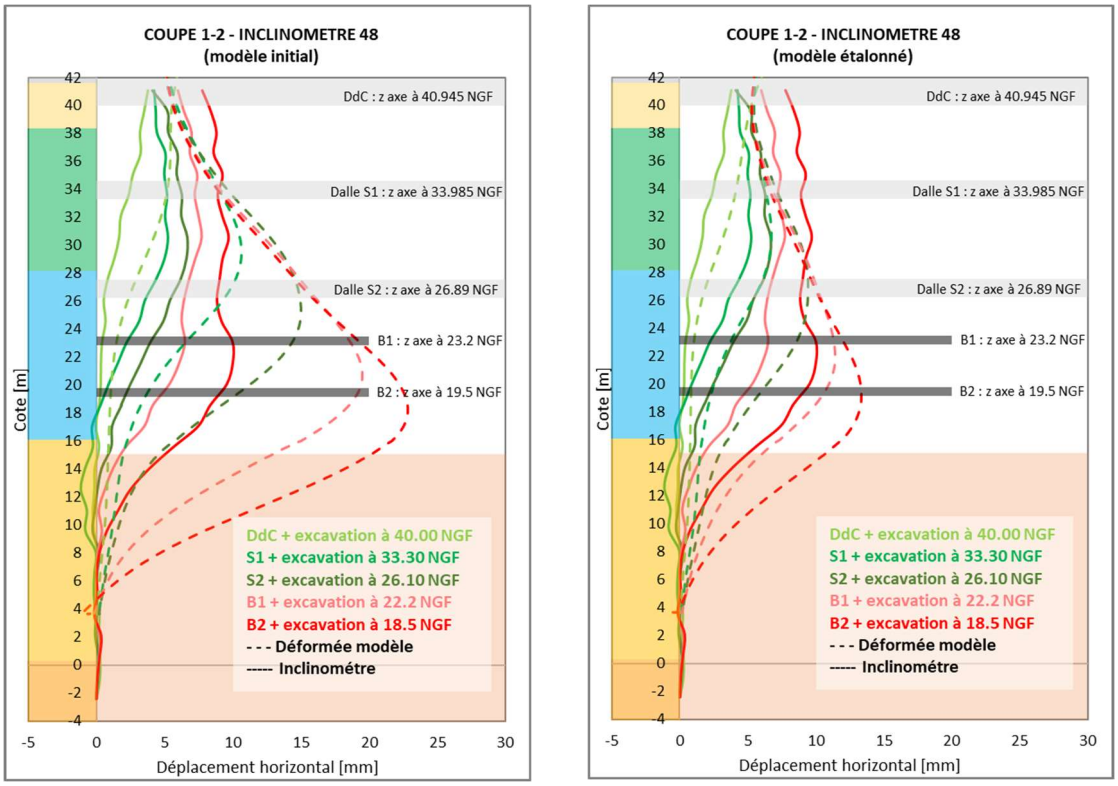
Ouvrage	Buton	Lit	Phasage	L (m)	A (m²)	$N_{max,mesuré}$	N_{ELS}	$N_{thermlque}$	N_{ELU}	$\frac{N_{mesuré}}{N_{ELS}}$	$\frac{N_{mesuré}}{N_{ELU}}$
01E01	B 108	1	Ascendant	10.95	0.05932	2.80	3.50	2.99	9.21	80%	30%
	B 207	2	Ascendant	10.45	0.09532	4.50	13.59	4.80	25.55	33%	18%
	B 313	3	Ascendant	10.55	0.09532	8.00	14.59	4.80	26.90	55%	30%
	B 104	1	Ascendant	14.04	0.09532	3.48	3.34	4.80	11.71	104%	30%
	B 204	2	Ascendant	13.52	0.09532	6.74	13.30	4.80	25.16	51%	27%
	B 309	3	Ascendant	13.53	0.09532	7.35	12.99	4.80	24.74	57%	30%
	B 303	3	Descendant	16.89	0.09532	5.18	9.66	3.36	18.09	54%	29%
	B 305	3	Descendant	14.50	0.09532	2.53	10.71	3.36	19.50	24%	13%
	B 402	4	Descendant	17.12	0.09532	2.89	6.65	3.36	14.02	43%	21%
	B 404	4	Descendant	14.67	0.09532	1.59	8.20	3.36	16.11	19%	10%
34E01	B 109	1	Descendant	9.79	0.06982	1.25	3.81	2.46	8.84	33%	14%
	B 209	2	Descendant	9.79	0.06982	2.08	5.93	2.46	11.70	35%	18%
	B 135	1	Descendant	22.02	0.1149	3.39	5.99	4.92	15.47	57%	22%
	B 235	2	Descendant	22.02	0.1149	1.89	5.91	4.92	15.37	32%	12%
LCO	B 308	3	Ascendant	24.35	0.09017	4.70	10.47	4.54	20.95	45%	22%
	B 305	3	Ascendant	21.70	0.09017	1.85	10.23	4.54	20.63	18%	9%
	B 306	3	Ascendant	21.70	0.09017	5.71	11.97	4.54	22.98	48%	25%
	B 406	4	Ascendant	21.62	0.09017	5.50	10.75	4.54	21.34	51%	26%
	B 408	4	Ascendant	24.28	0.09017	2.95	10.47	4.54	20.95	28%	14%
	B 410b	4	Ascendant	7.18	0.09017	5.38	10.74	4.54	21.32	50%	25%
02E01	B1-13	1	Ascendant	16.60	0.07216	3.35	7.37	2.04	13.00	45%	26%
	B2-03	2	Ascendant	12.30	0.05878	0.90	7.71	1.66	12.89	12%	7%
	B2-11	2	Ascendant	19.60	0.092	1.73	9.69	2.60	16.98	18%	10%
	B2-13	2	Ascendant	16.60	0.07216	2.60	8.28	2.04	14.23	31%	18%
	B2-18	2	Ascendant	15.30	0.0454	2.55	4.54	1.28	8.05	56%	32%
	B2-19	2	Ascendant	13.10	0.07216	3.55	9.07	2.04	15.30	39%	23%
	B2-20	2	Ascendant	12.80	0.07216	1.50	8.51	2.04	14.54	18%	10%
	B2-22	2	Ascendant	16.40	0.05878	0.80	5.47	1.66	9.88	15%	8%
	B2-24	2	Ascendant	13.20	0.05878	2.02	7.13	1.66	12.11	28%	17%
	B2-29	2	Ascendant	11.10	0.05878	1.30	5.73	1.66	10.22	23%	13%
	B2-33	2	Ascendant	11.70	0.0349	0.92	3.82	0.99	6.63	24%	14%
	B2-39	2	Ascendant	13.10	0.05878	1.20	6.07	1.66	10.68	20%	11%
	B3-20	3	Ascendant	12.80	0.07216	1.48	7.46	2.04	13.12	20%	11%
	B3-33	3	Descendant	11.70	0.0349	1.21	3.02	0.99	5.56	40%	22%
3303P	B102	1	Descendant	15.66	0.11498	4.00	7.79	4.93	17.91	51%	22%
	B108	1	Descendant	5.76	0.11498	3.50	16.81	4.93	30.08	21%	12%
	B201	2	Descendant	15.70	0.11498	5.00	8.41	4.93	18.75	59%	27%

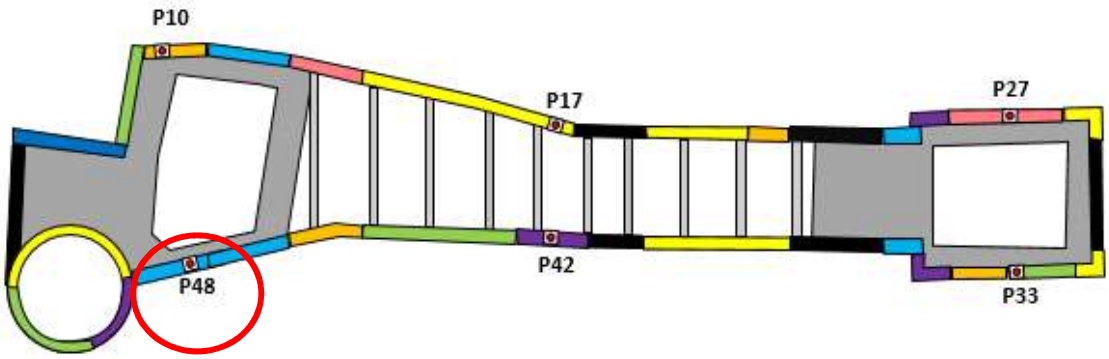
Annexe 3 – Résultats de l'étalonnage

Résultats par ouvrage

Ouvrage 01^{E}01

- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 1-2 – Inclinomètre 48

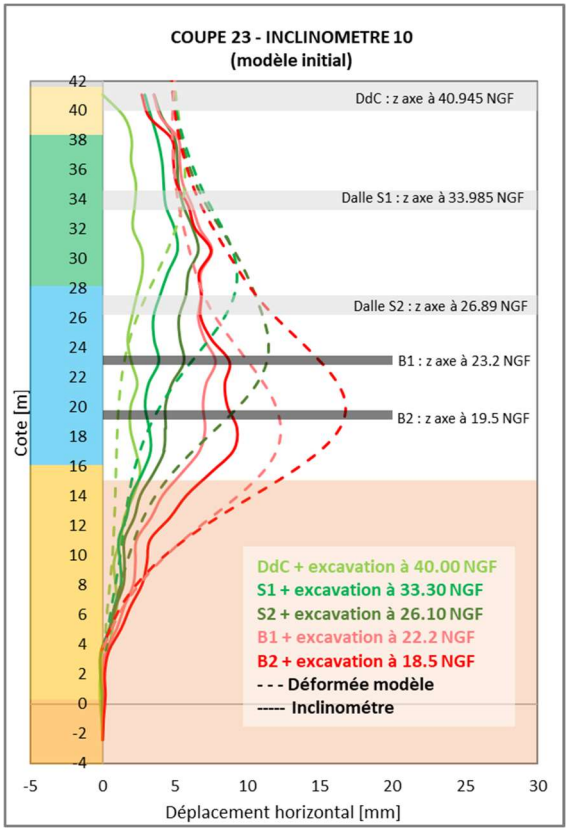


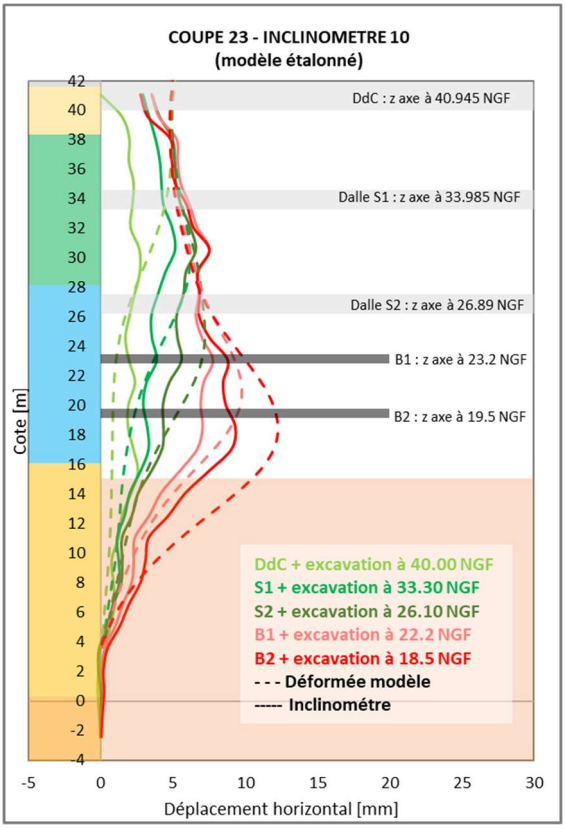


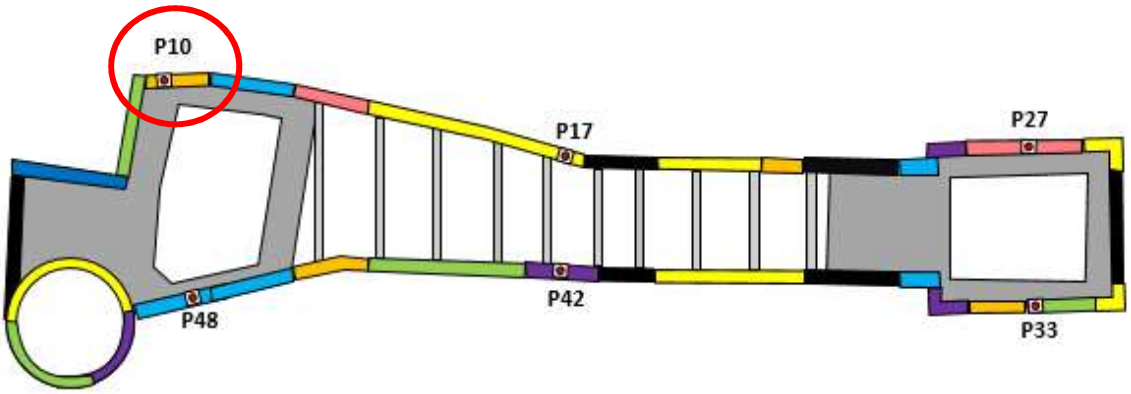
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 38.2 à 35.2 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Marne et Caillasse (couche jaune en dessous de Sables de Beauchamp) : cohésion de 30 à 35 kPa.

- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 23 – Inclinomètre 10



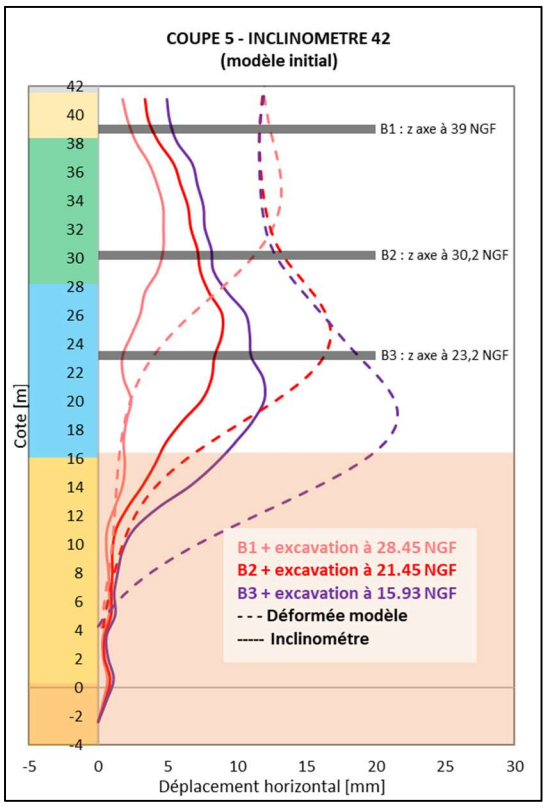


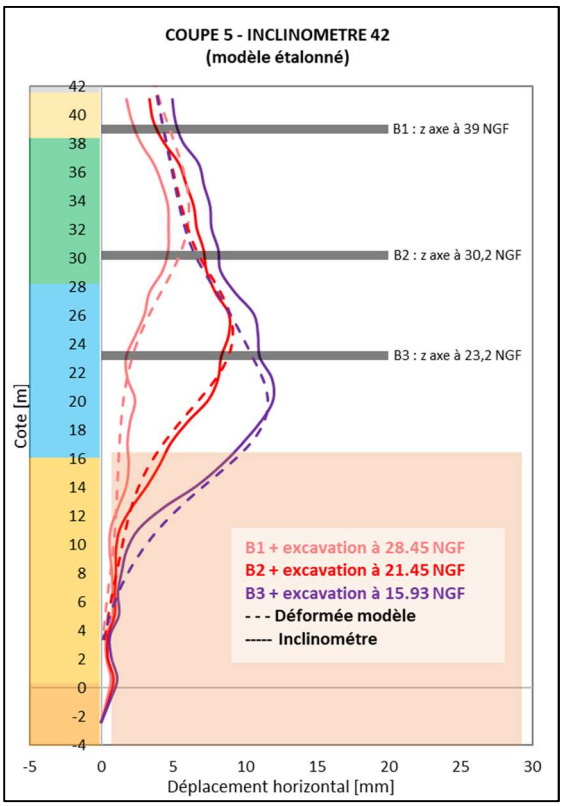


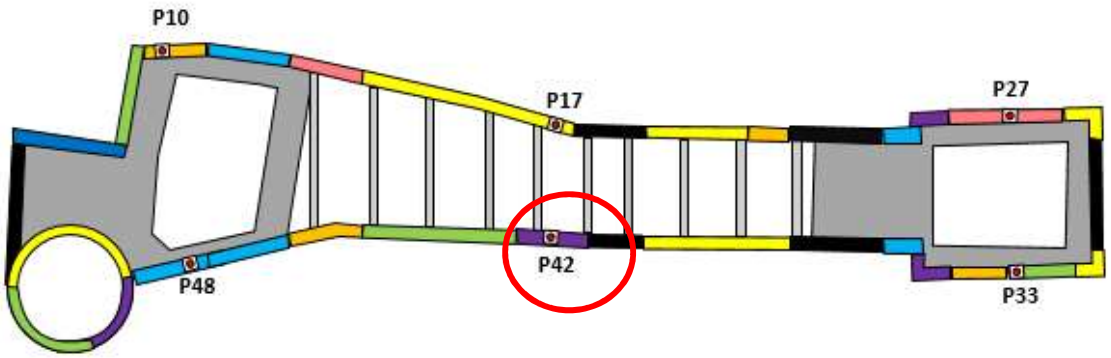
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 38.2 à 35.2 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Marne et Caillasse (couche jaune en dessous de Sables de Beauchamp) : cohésion de 30 à 35 kPa.

- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 5 – Inclinomètre 42



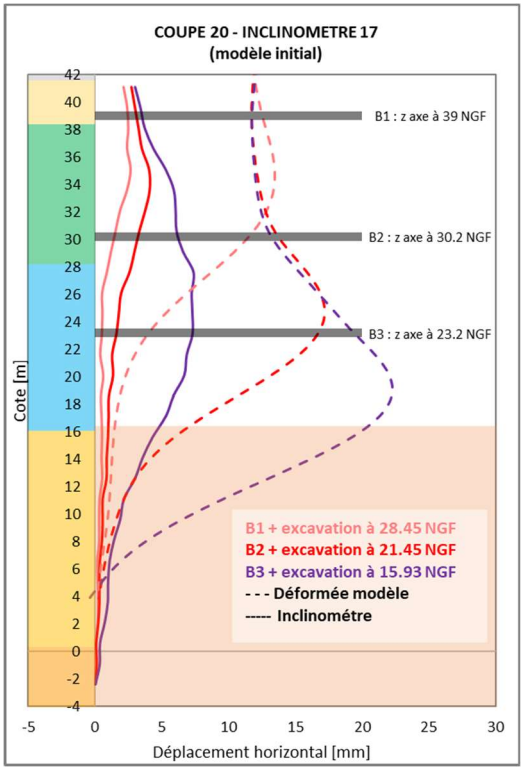


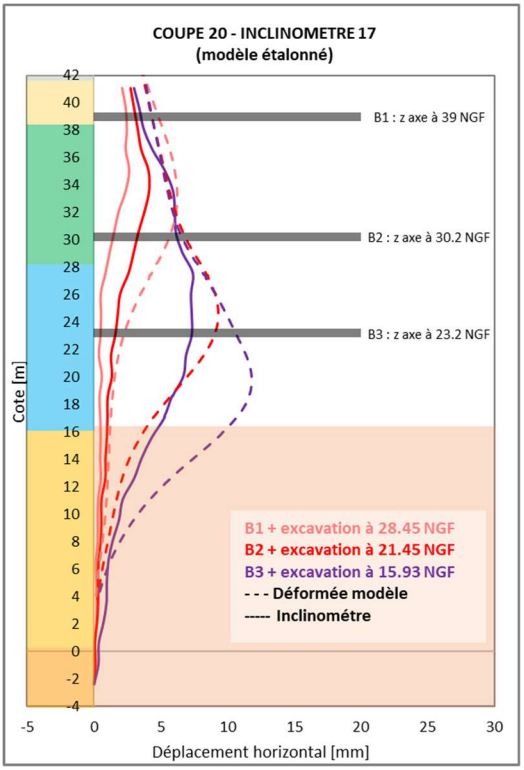


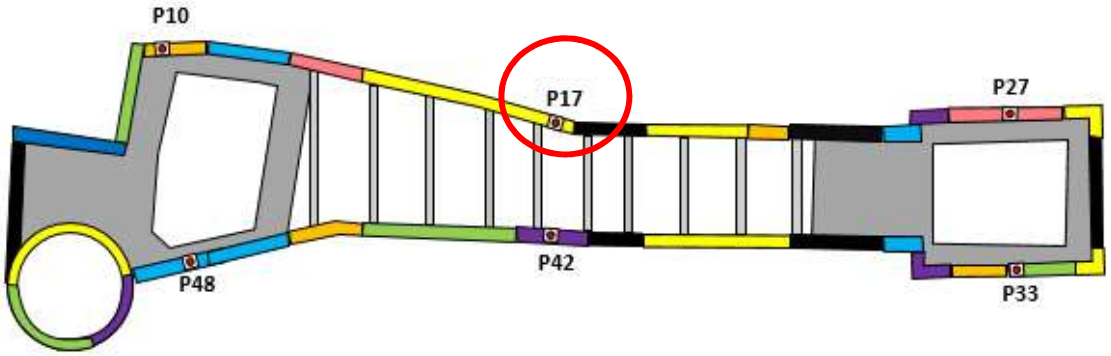
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Boussinesq d'une grue à tour : annulée
- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 38.2 à 35.2 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Marne et Caillasse (couche jaune en dessous de Sables de Beauchamp) : cohésion de 30 à 35 kPa.

- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 20 – Inclinomètre 17



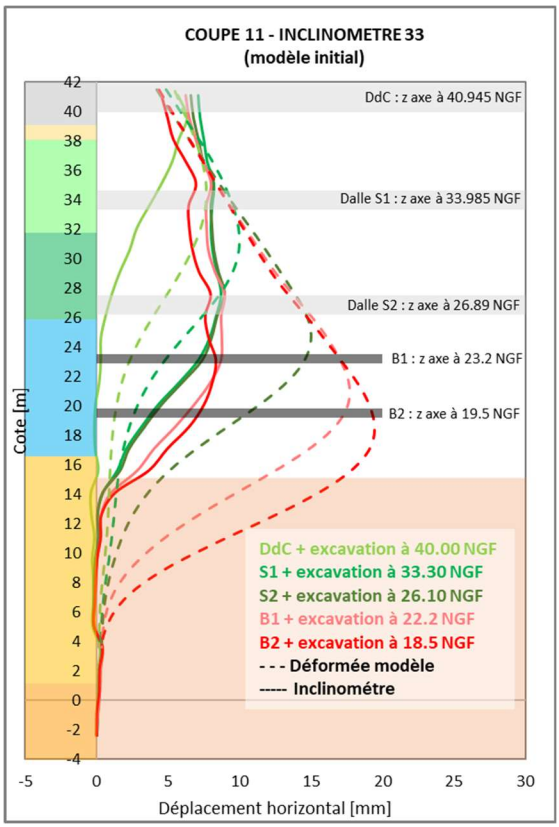


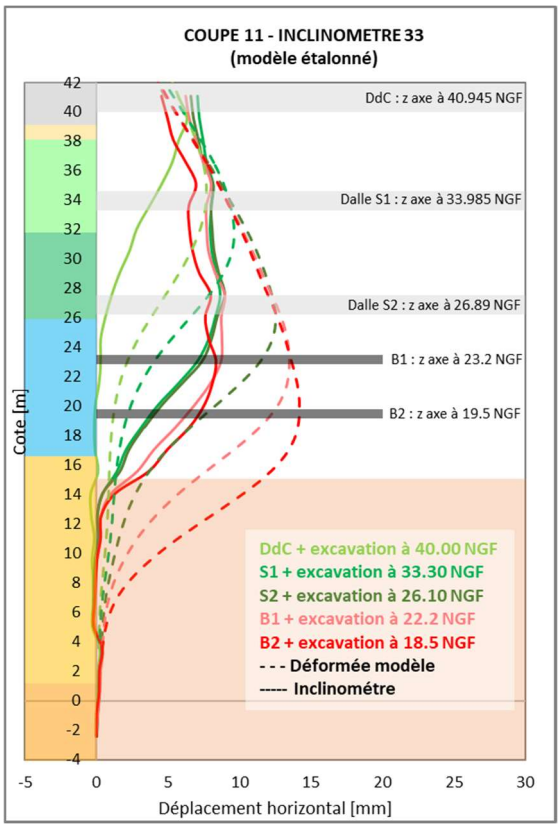


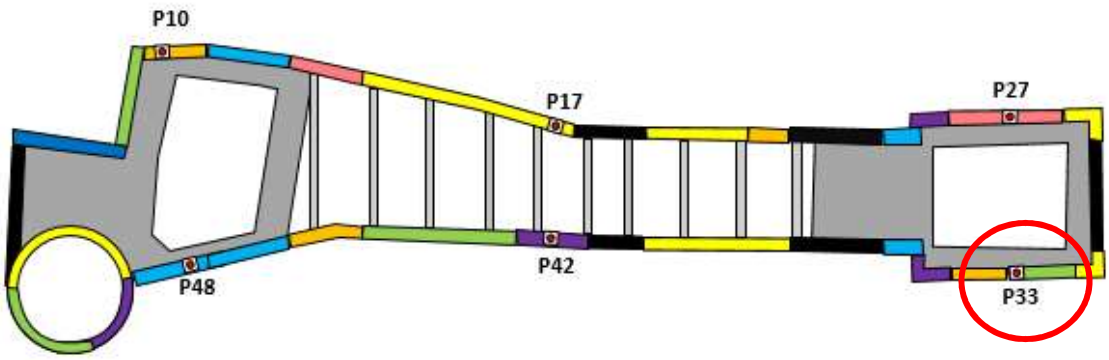
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Boussinesq d'une grue à tour : annulée
- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 38.2 à 35.2 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Marne et Caillasse (couche jaune en dessous de Sables de Beauchamp) : cohésion de 30 à 35 kPa.

- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 11 – Inclinomètre 33



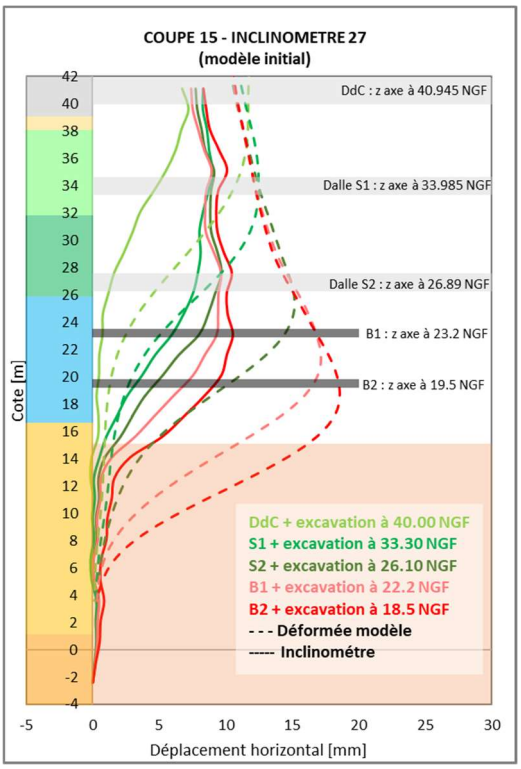


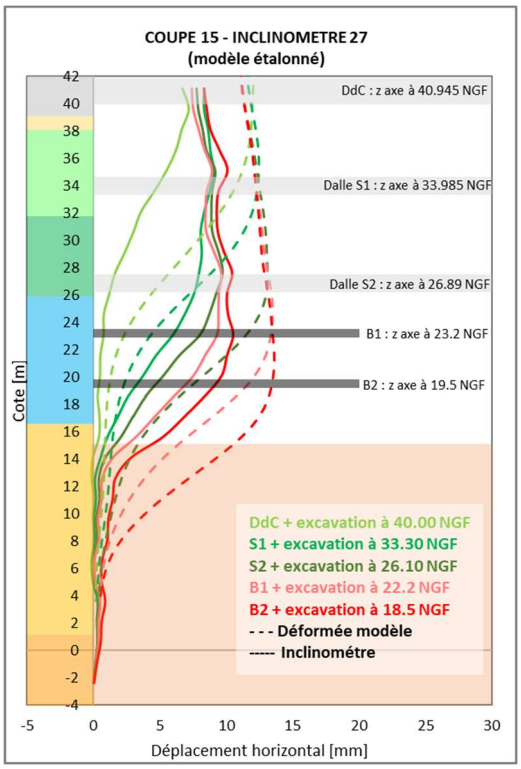


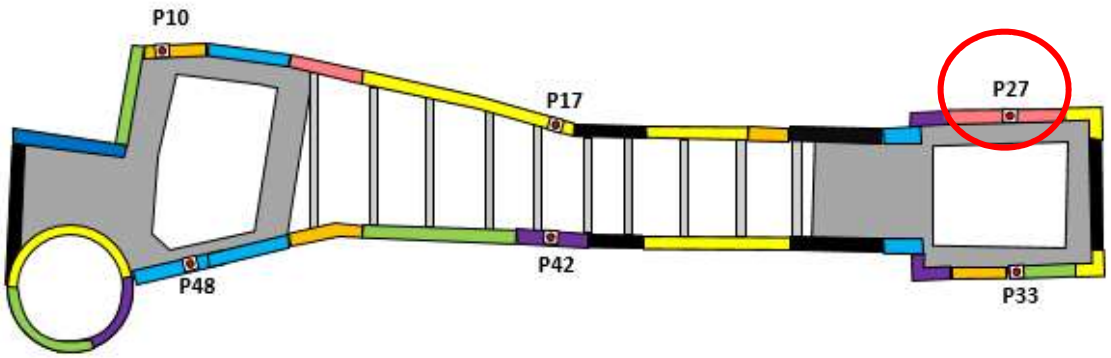
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 38.2 à 35.2 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Marne et Caillasse (couche jaune en dessous de Sables de Beauchamp) : cohésion de 30 à 35 kPa.

- OUVRAGE 01^{E}01 : Coupe 15 – Inclinomètre 27



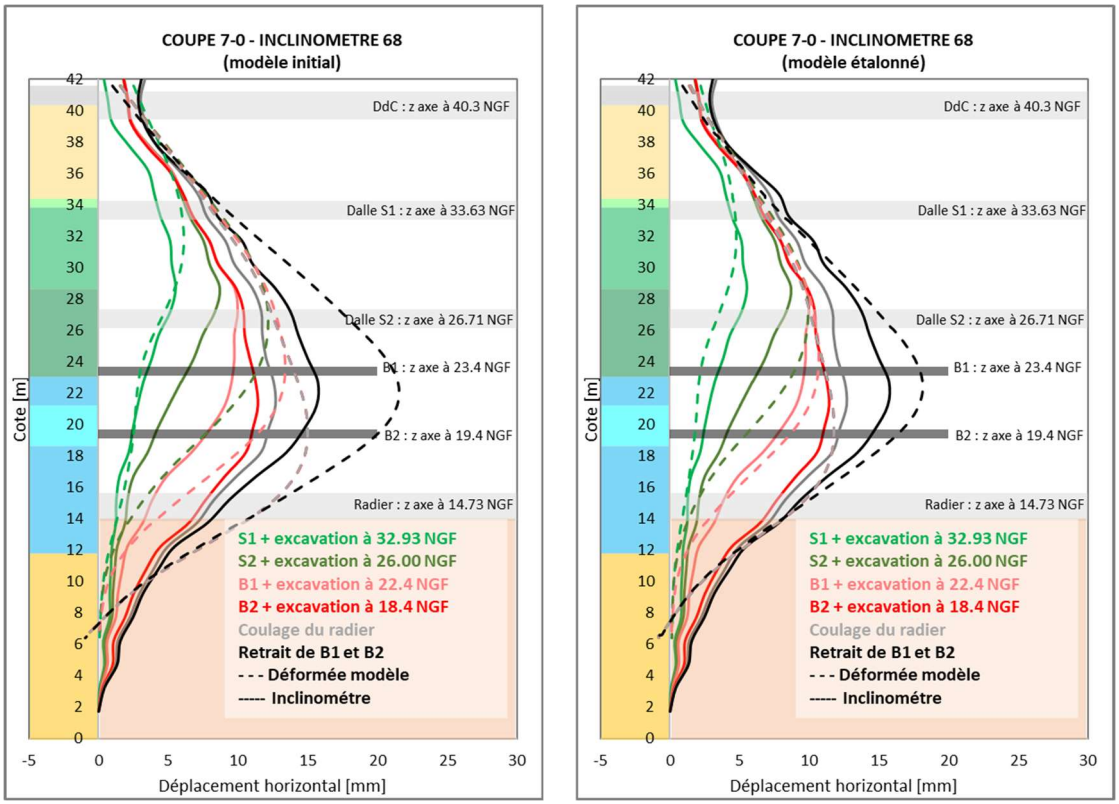


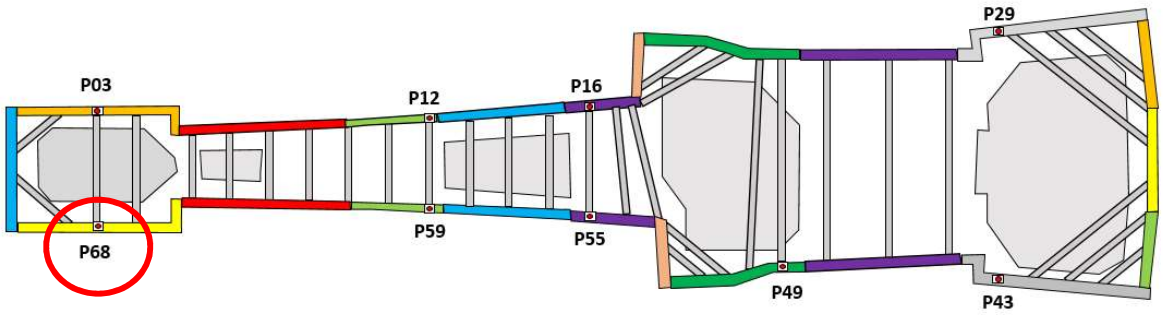


<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 38.2 à 35.2 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Marne et Caillasse (couche jaune en dessous de Sables de Beauchamp) : cohésion de 30 à 35 kPa.

- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 7-0 – Inclinomètre 68

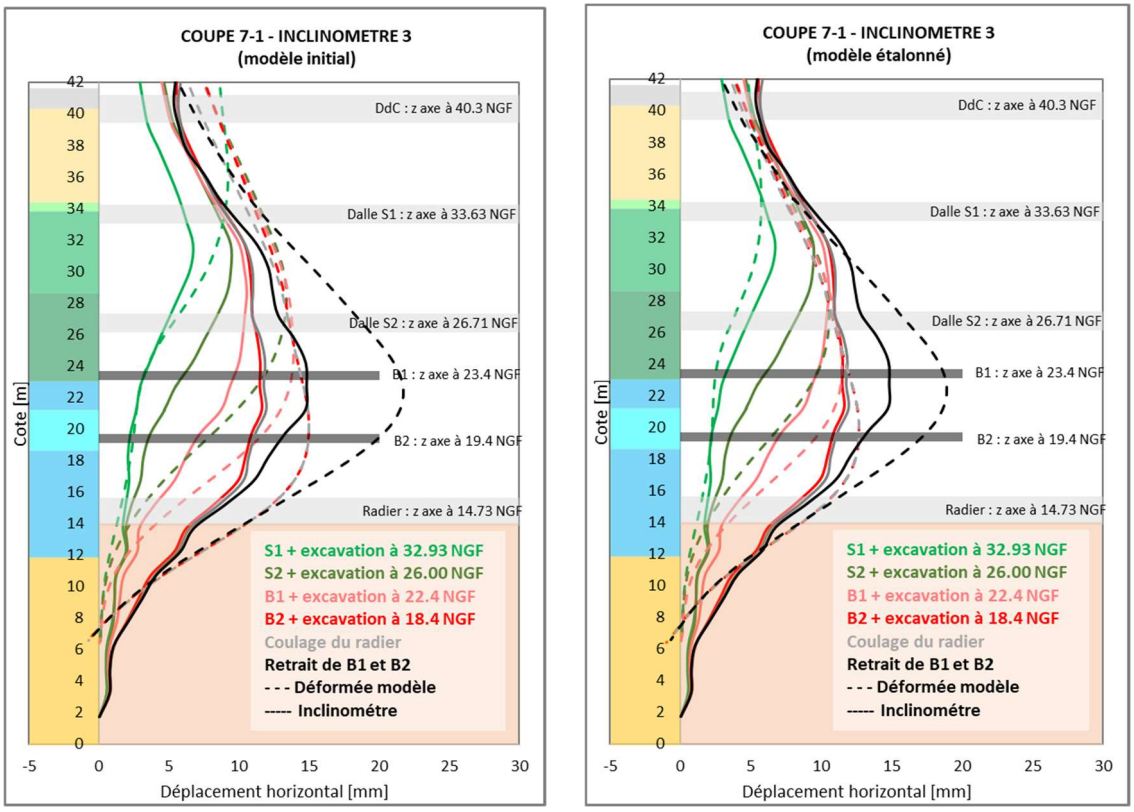


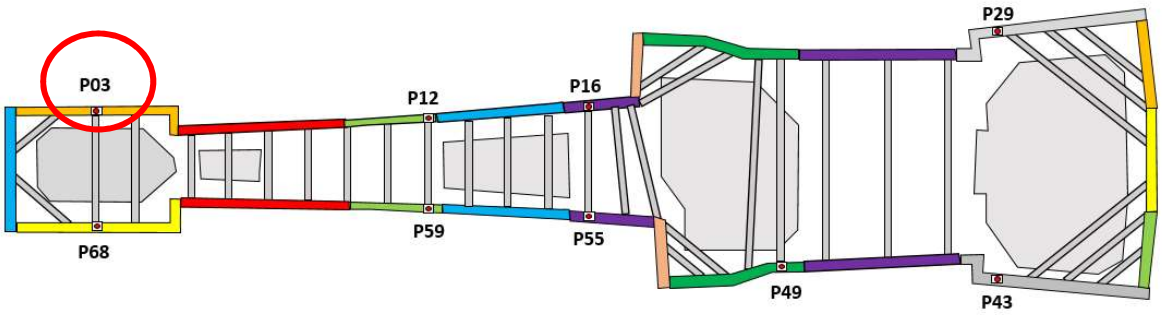


<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Boussinesq réduite de 150 à 70 kPa.
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Sables de Beauchamp [3] (couche bleu foncée) : module pressiométrique de Menard de 60 à 100 MN/m2.
- Calcaire de Saint-Ouen [1] (couche verte de 29 à 34 NGF) : angle de frottement de 33 à 35 °.

- OUVRAGE 34E01 : Coupe 7-1 – Inclinomètre 3

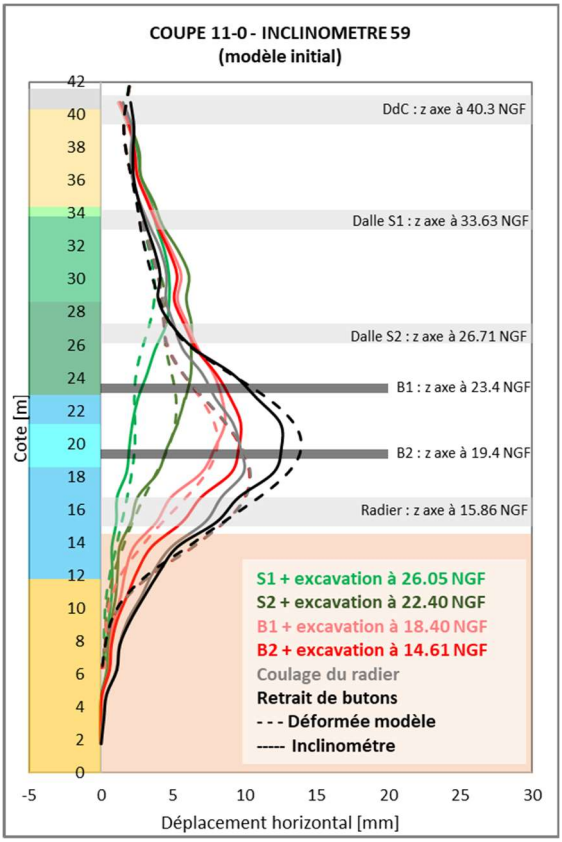


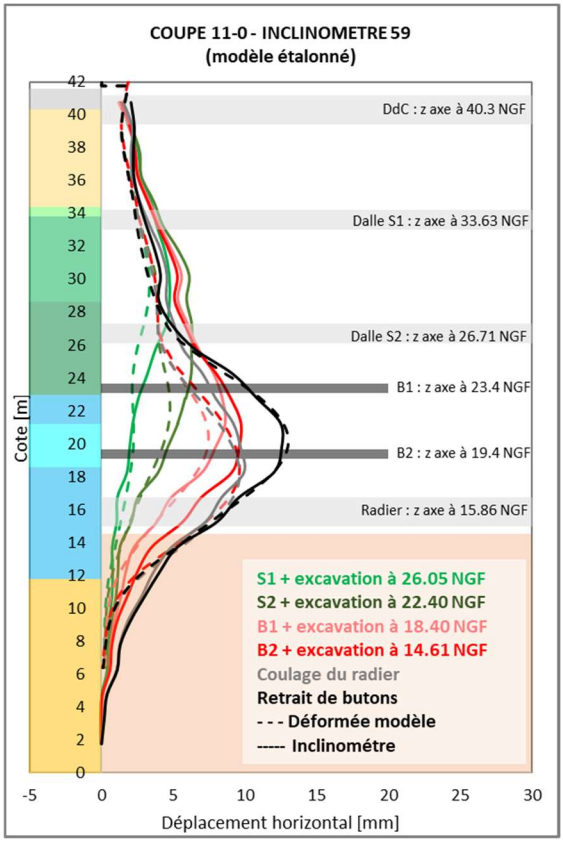


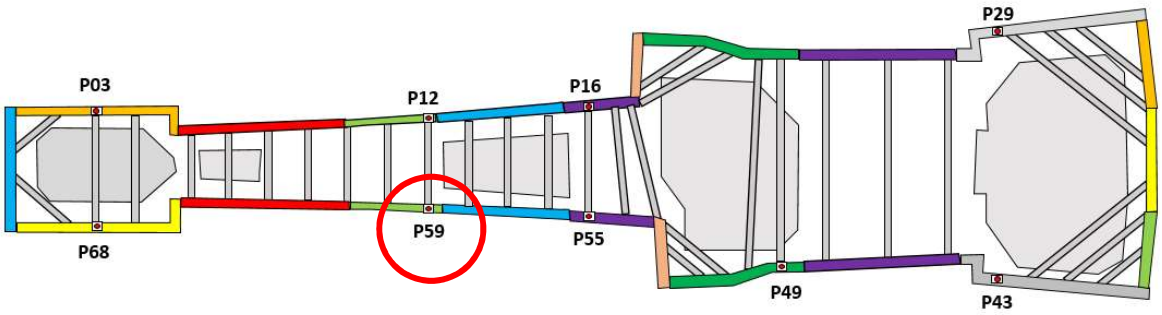
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Boussinesq réduite de 150 à 70 kPa.
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Sables de Beauchamp [3] (couche bleu foncée) : module pressiométrique de Menard de 60 à 100 MN/m2.
- Calcaire de Saint-Ouen [1] (couche verte de 29 à 34 NGF) : angle de frottement de 33 à 35 °.

- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 11-0 – Inclinomètre 59



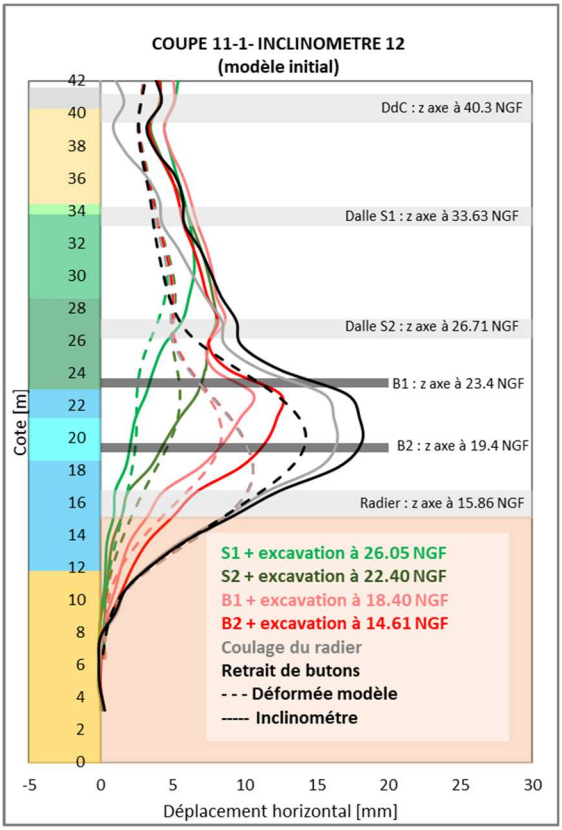


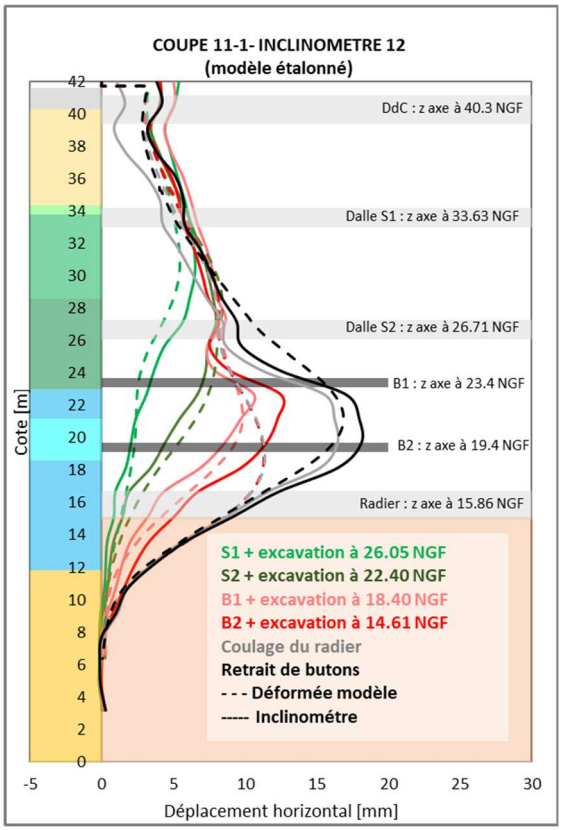


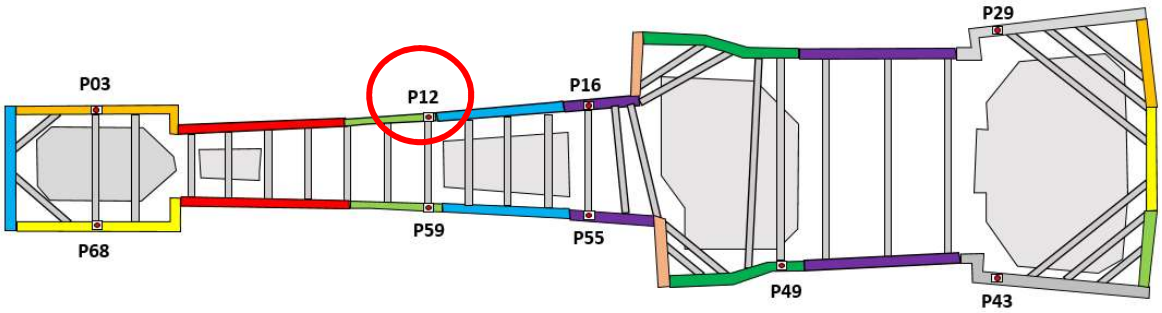
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 11-1 – Inclinomètre 12



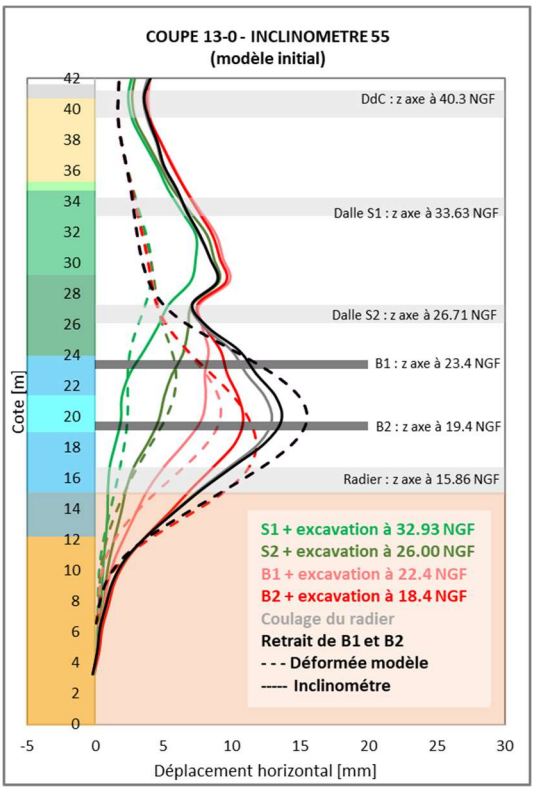


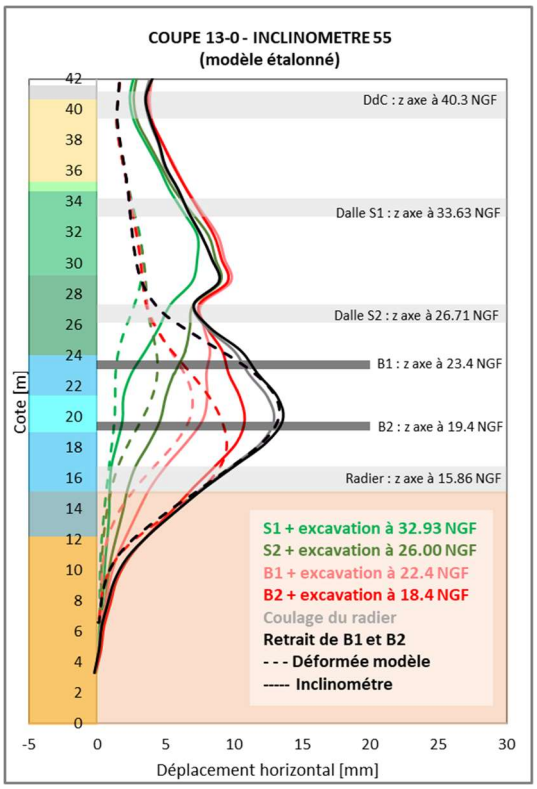


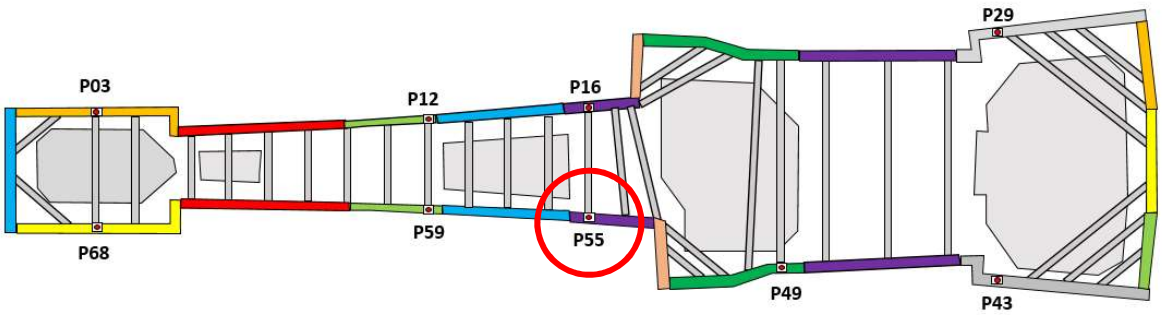
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Raideurs des niveaux intermédiaires réduites (inclinomètre placé dans une zone de transition très sensible pour la détermination de la raideur exacte) : de 800.000 à 400.000 kN/m2

- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 13-0 – Inclinomètre 55



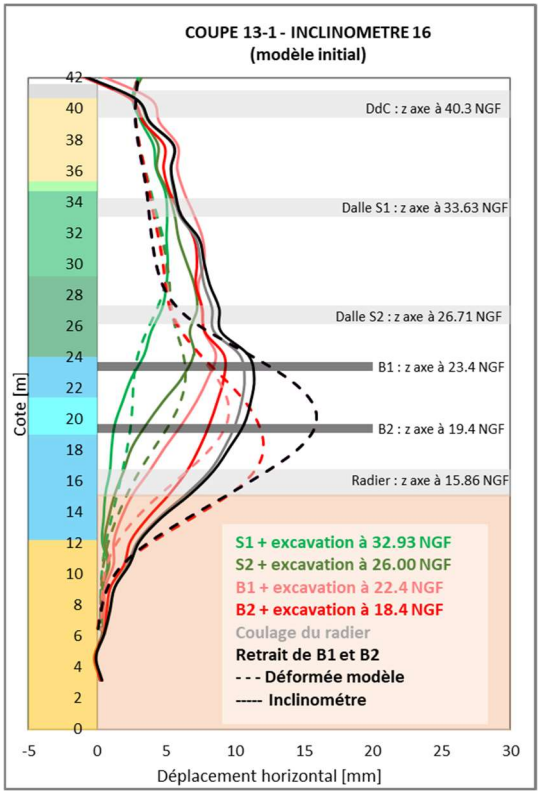


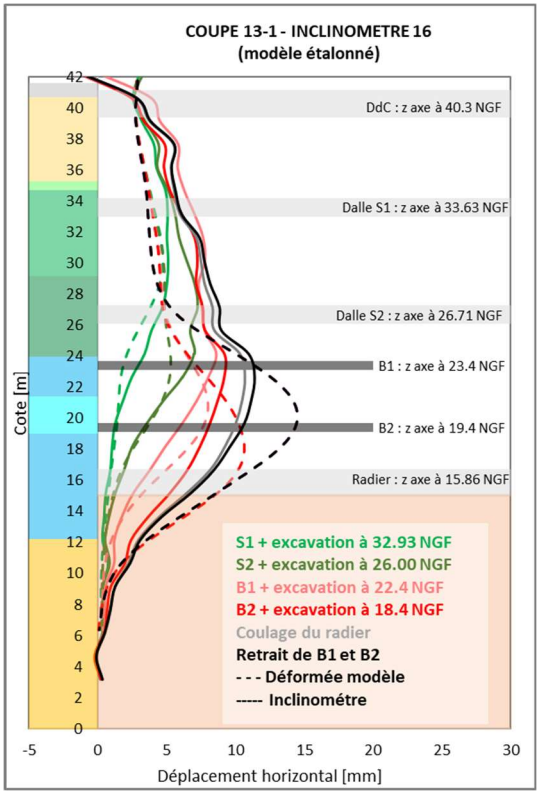


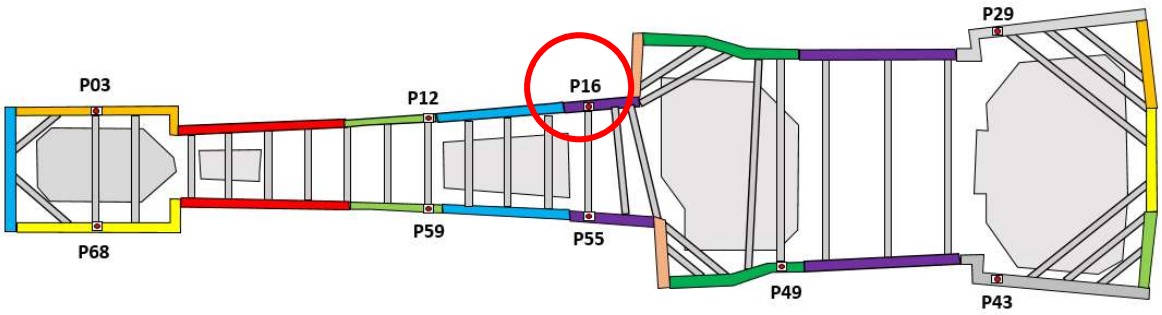
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 13-1 – Inclinomètre 16





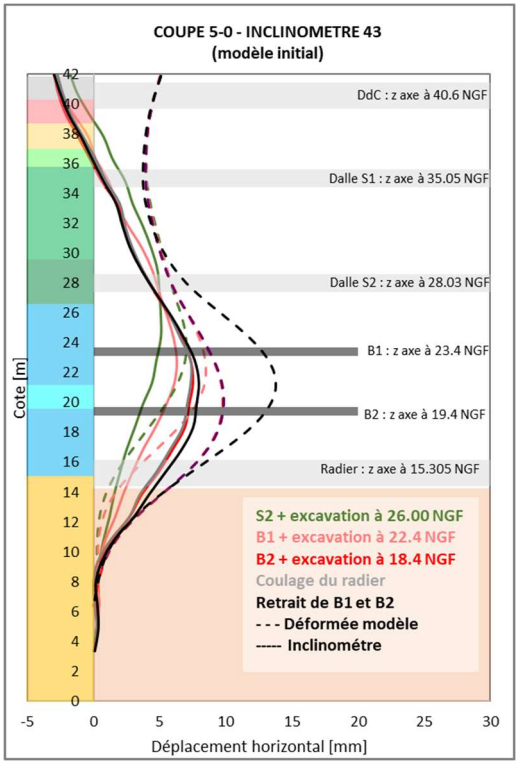


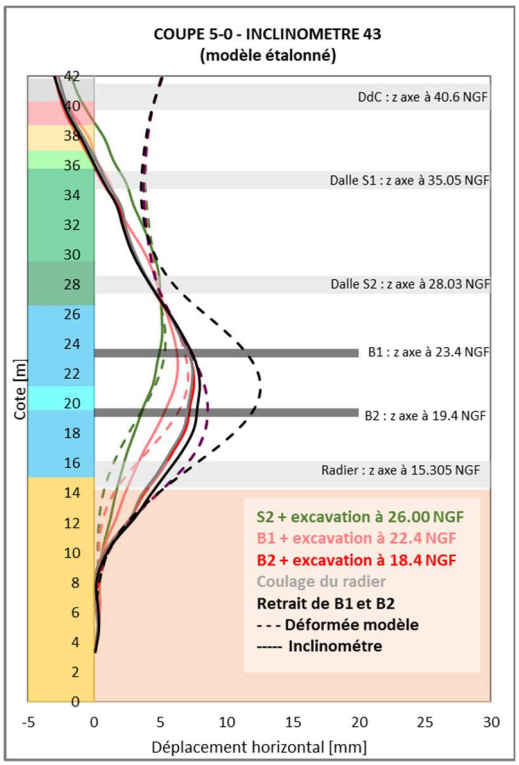
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

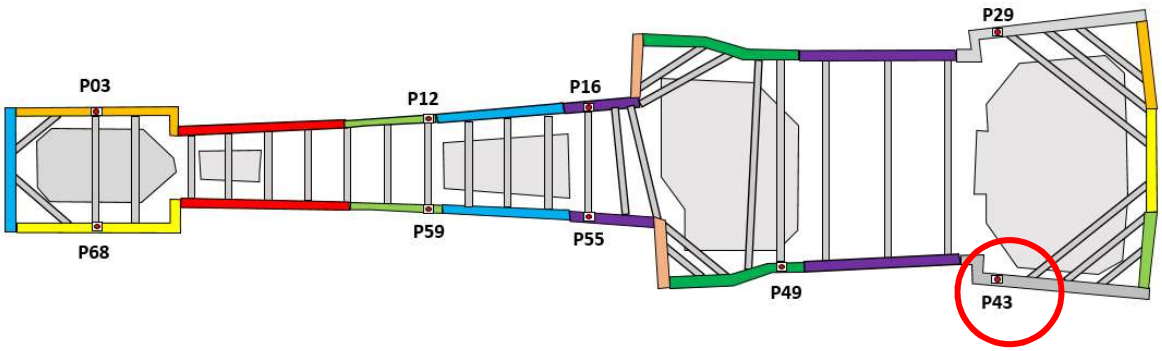
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 10-0 – Inclinomètre 49 (sans étalonnage)

- OUVRAGE 34^{E}01 : Coupe 5-0 – Inclinomètre 43



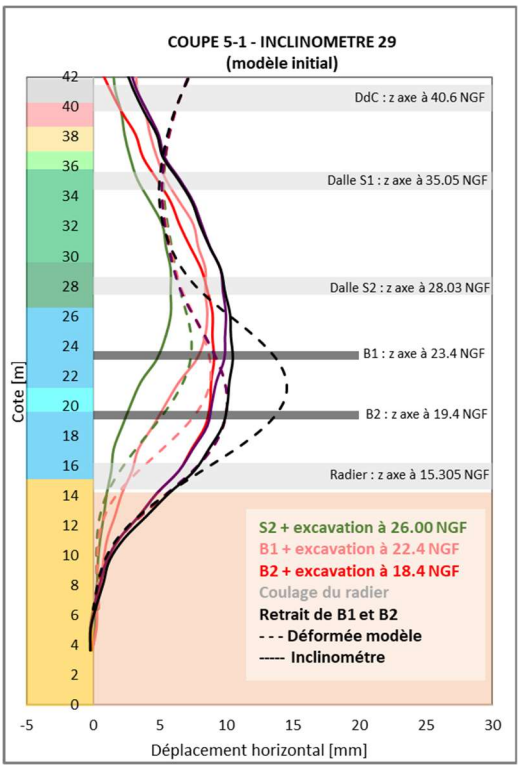


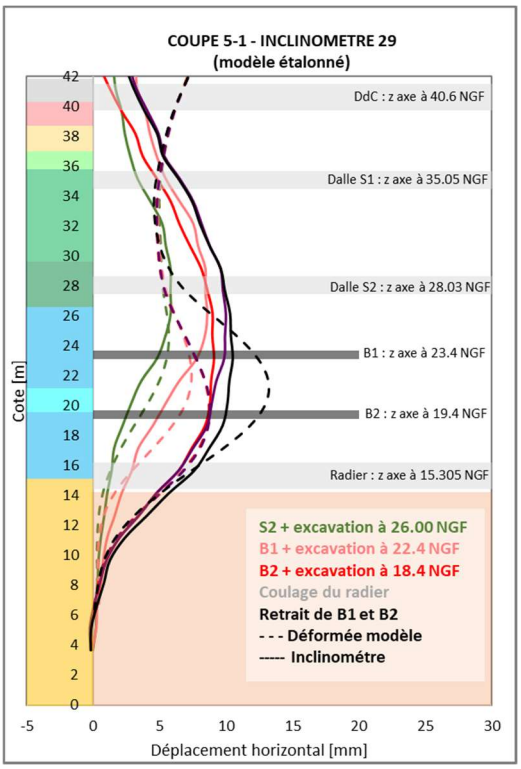


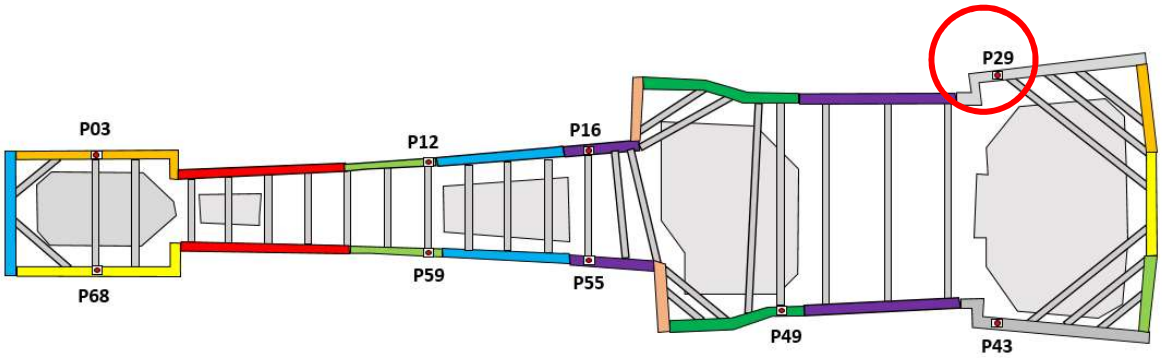
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 34E01 : Coupe 5-1 – Inclinomètre 29



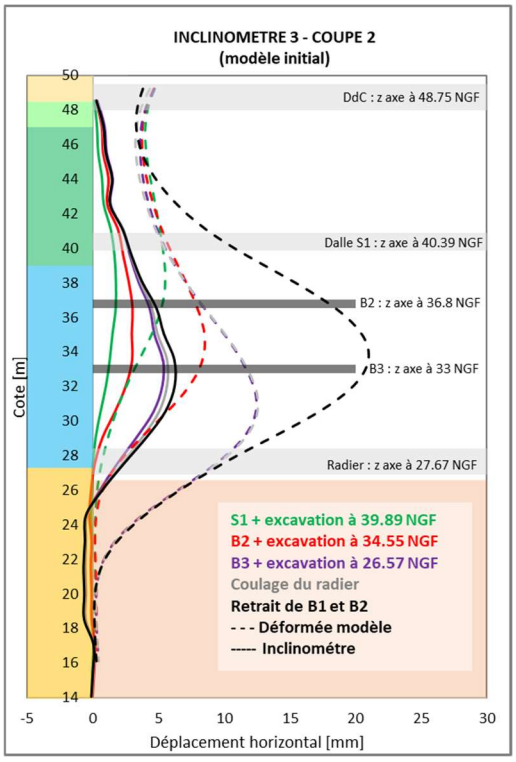


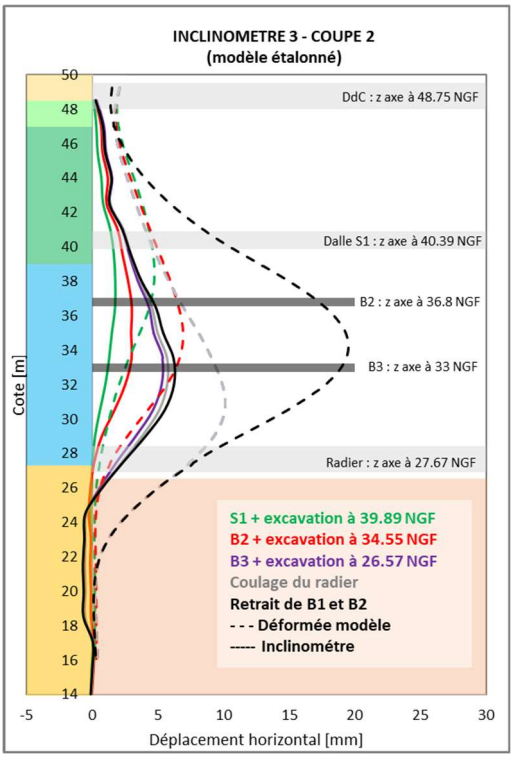


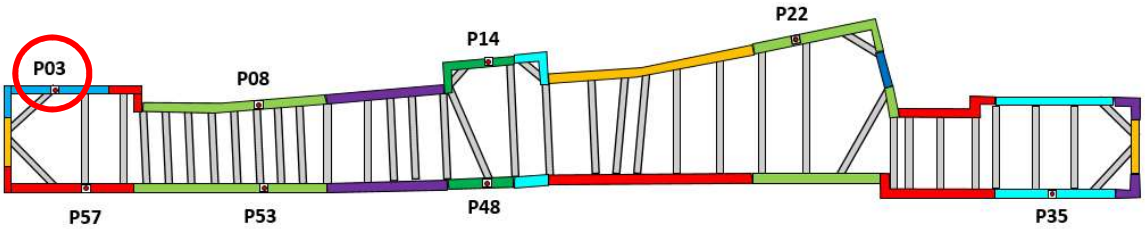
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 37.5 à 36.0 NGF
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 5 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 2 – Inclinomètre 3



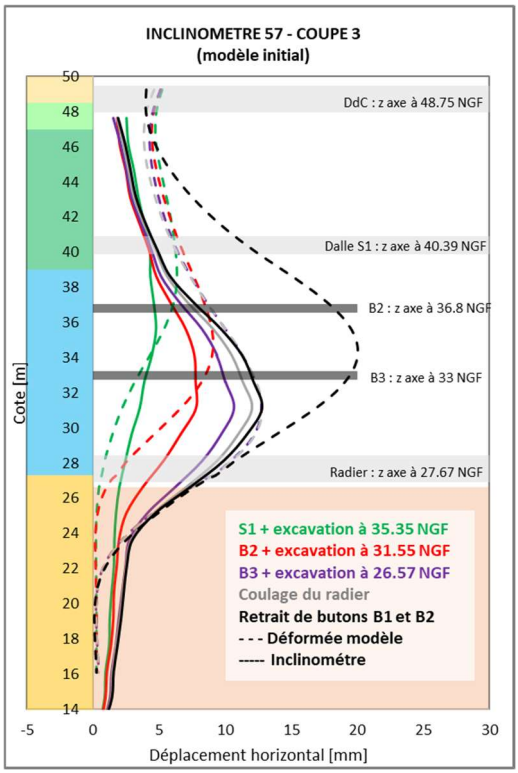


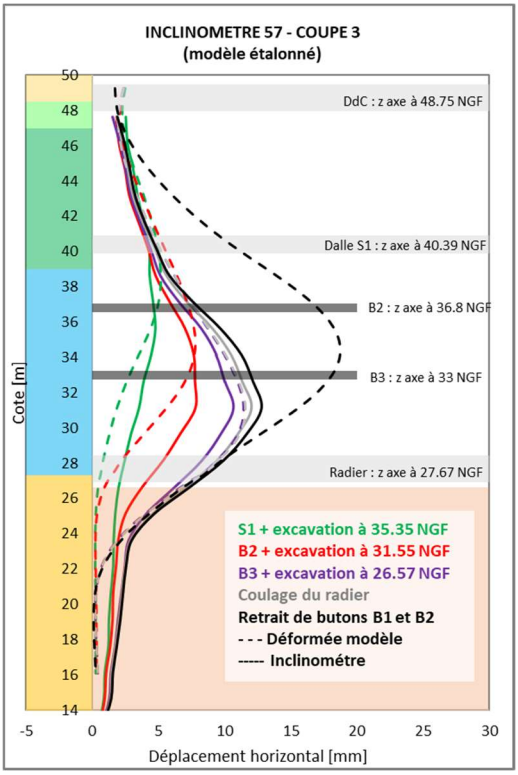


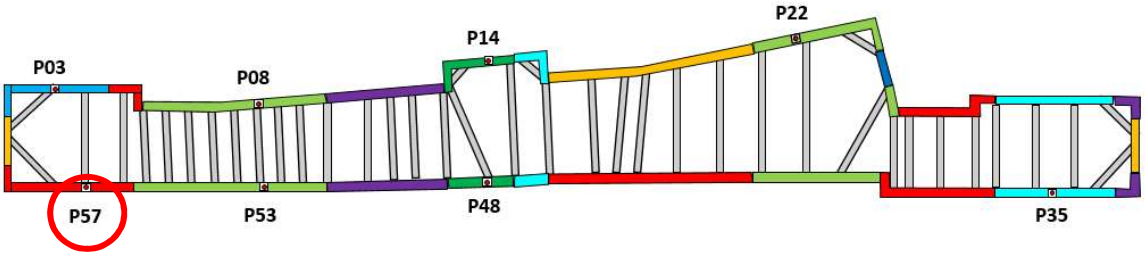
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Boussinesq d'une grue : annulée
- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 10 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 3 – Inclinomètre 57



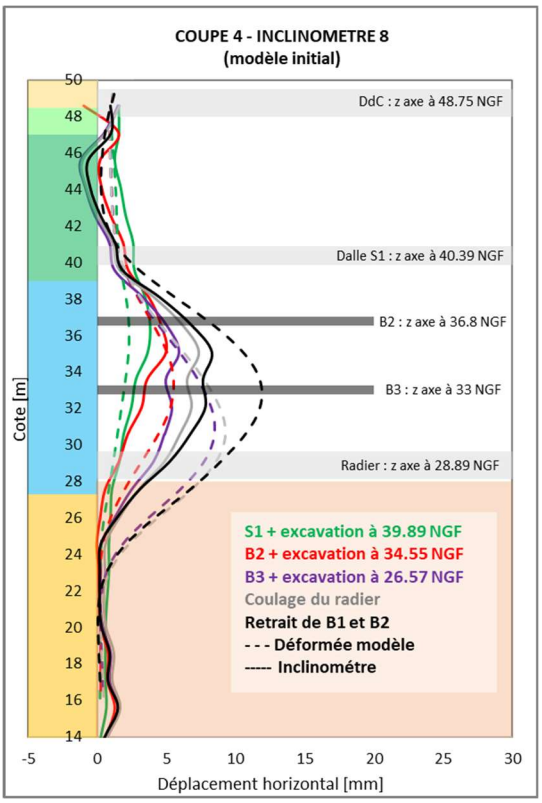


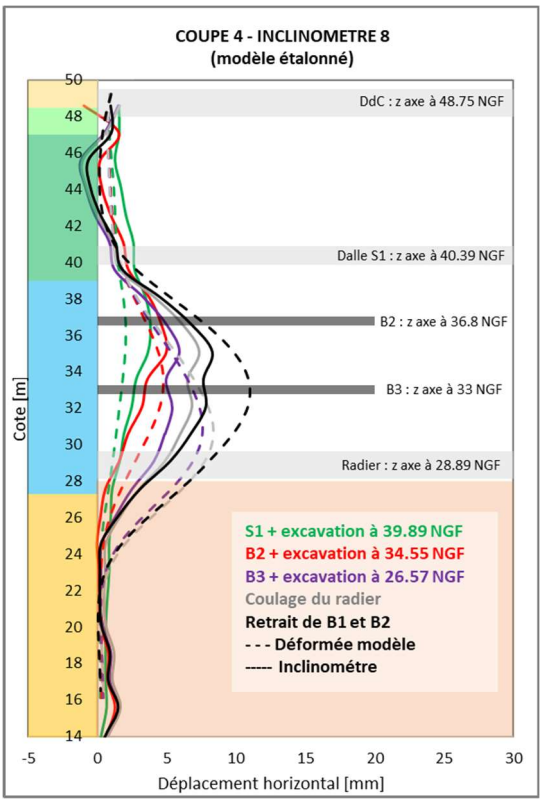


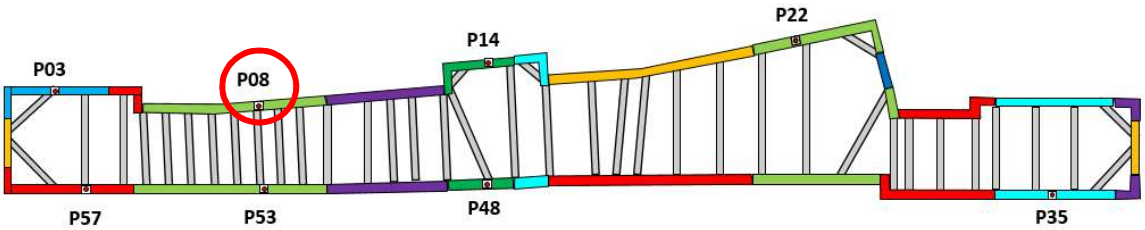
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Boussinesq d'une grue : annulée
- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 10 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 4 – Inclinomètre 8



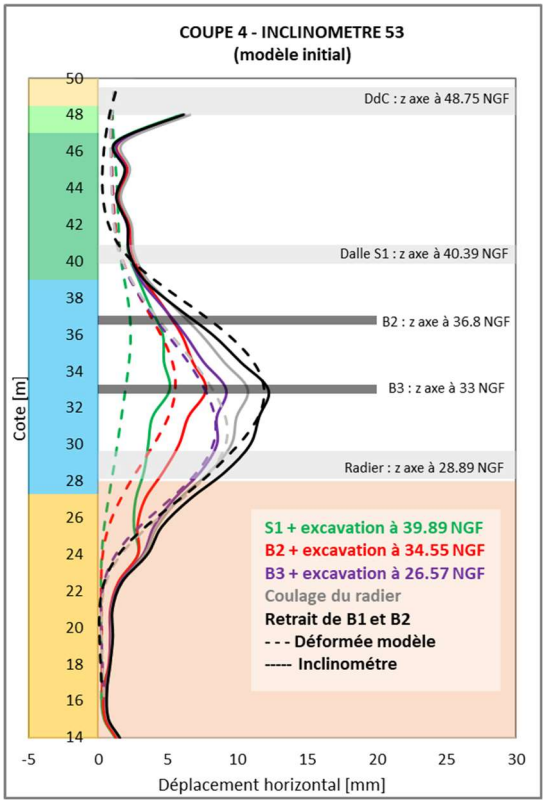


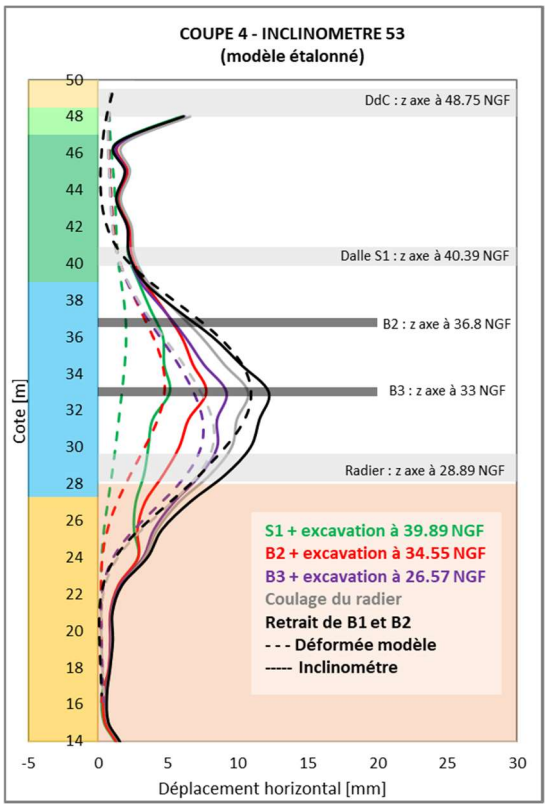


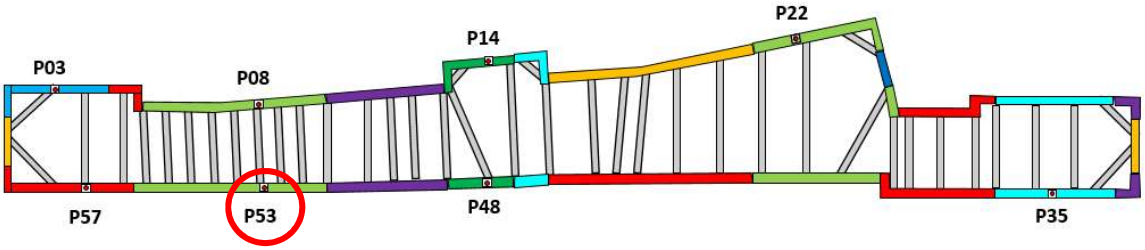
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 10 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.
- Hypothèses possibilité de la descente du niveau piézométrique à cause de Sb médianes ?

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 4 – Inclinomètre 53



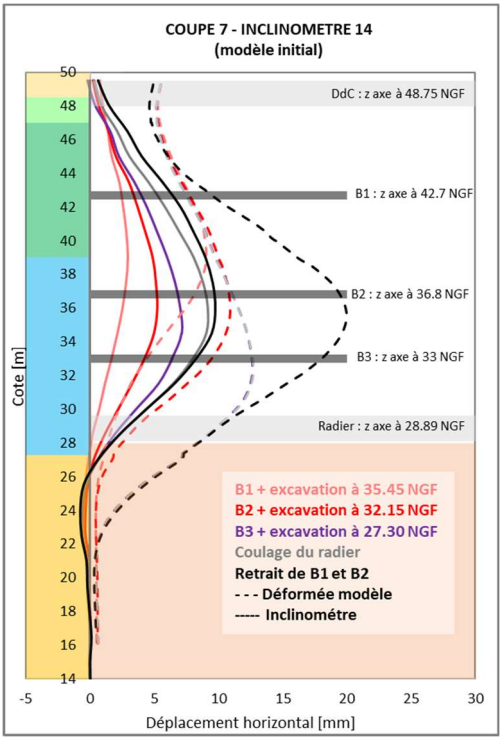


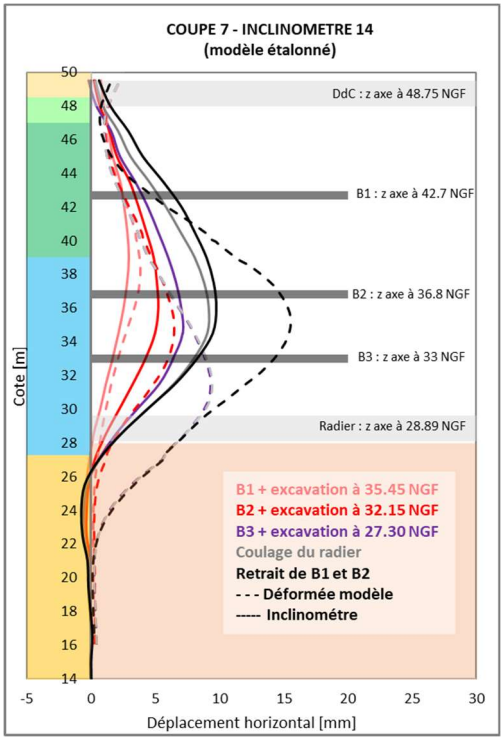


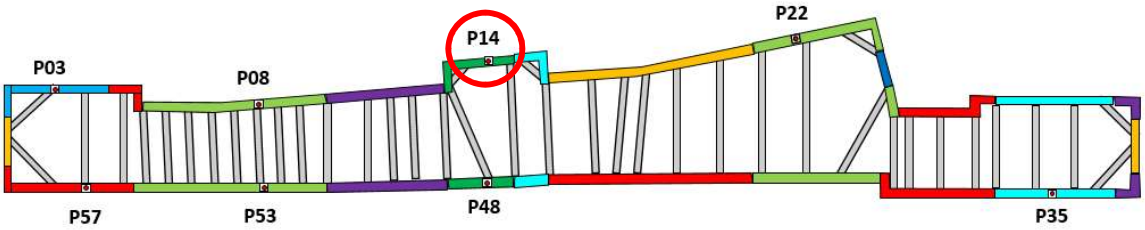
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 10 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 7 – Inclinomètre 14



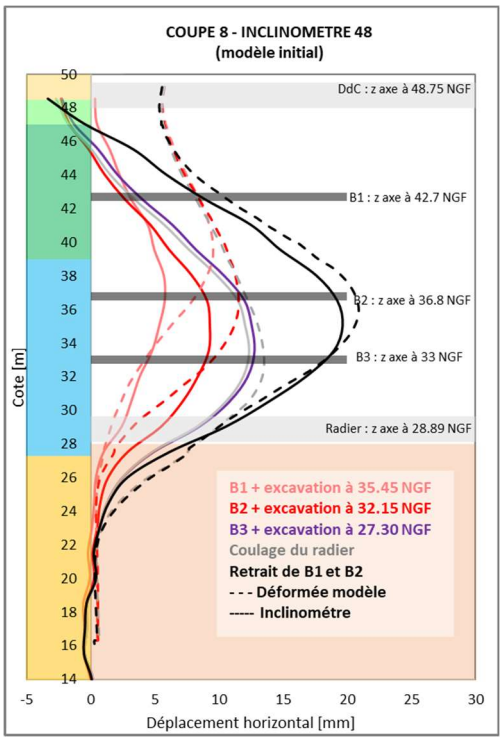


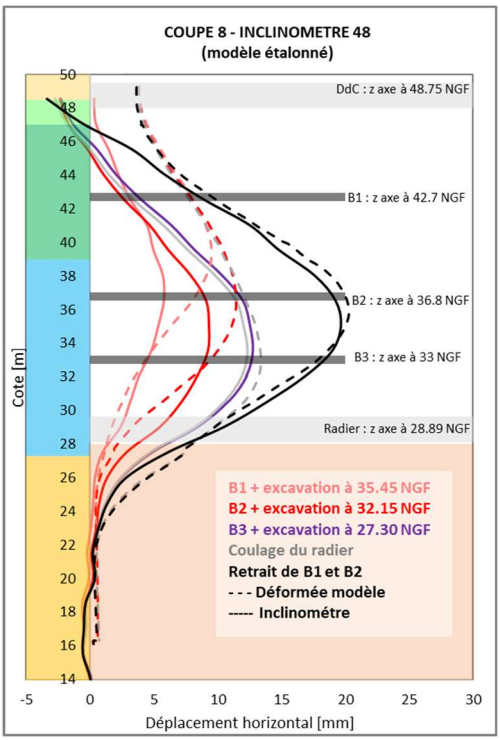


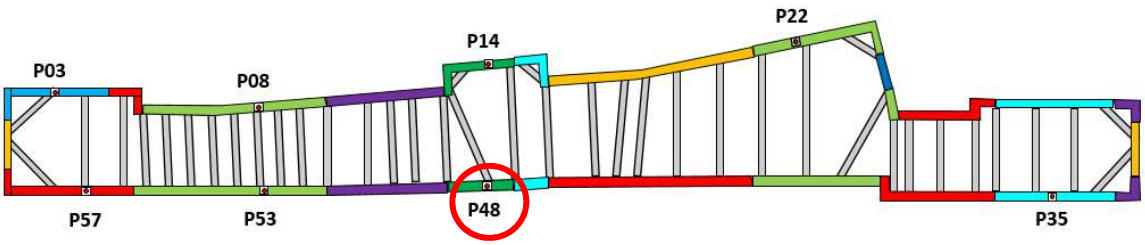
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 10 kPa
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 10 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 8 – Inclinomètre 48





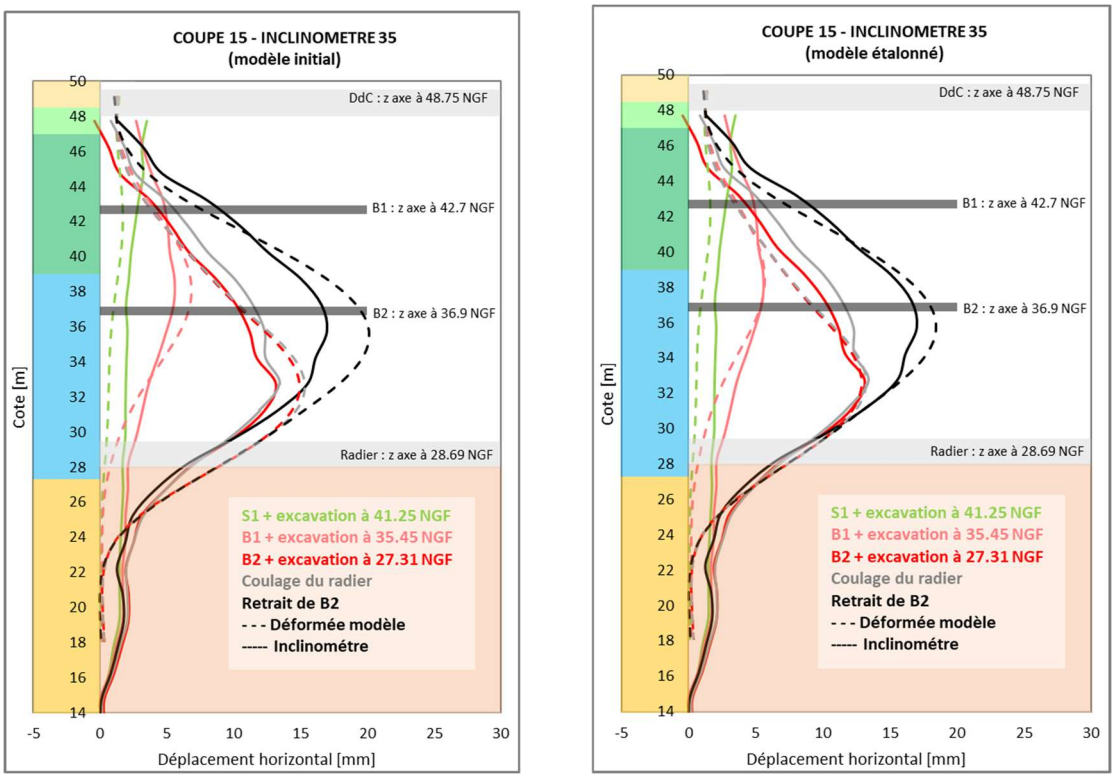


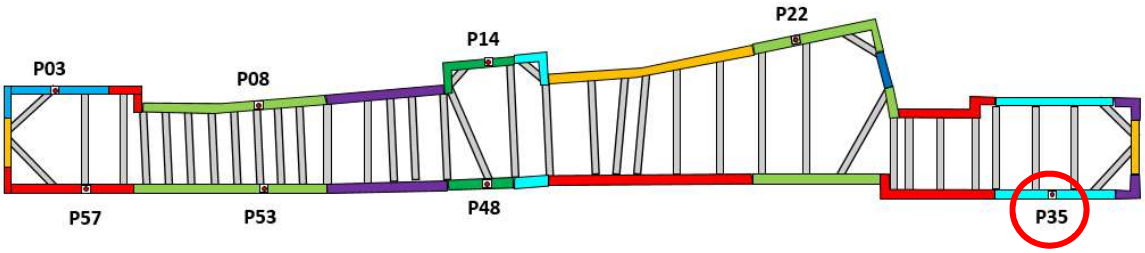
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Boussinesq d'une grue : annulée
- Surcharge Caquot de 20 à 10 kPa
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 10 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 12 – Inclinomètre 22 (sans étalonnage)

- OUVRAGE 02^{E}01 : Coupe 15 – Inclinomètre 35



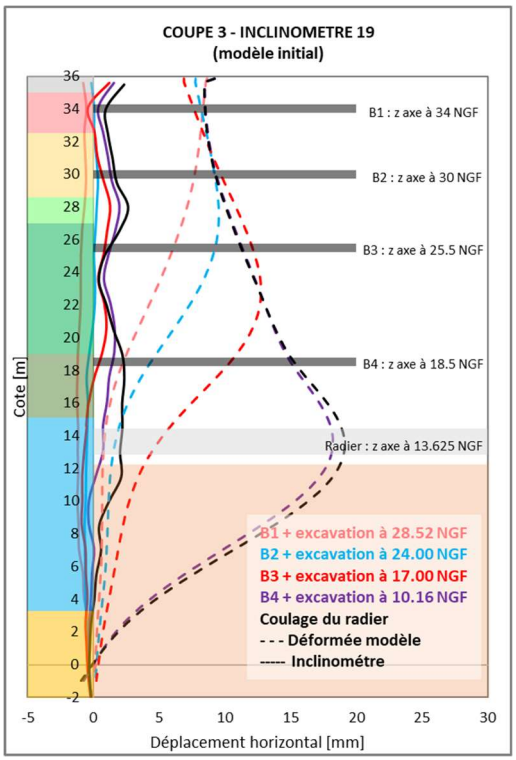


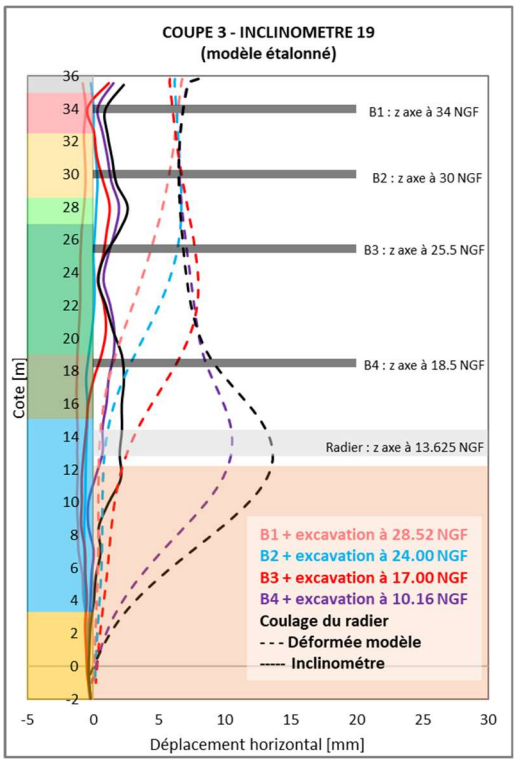
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

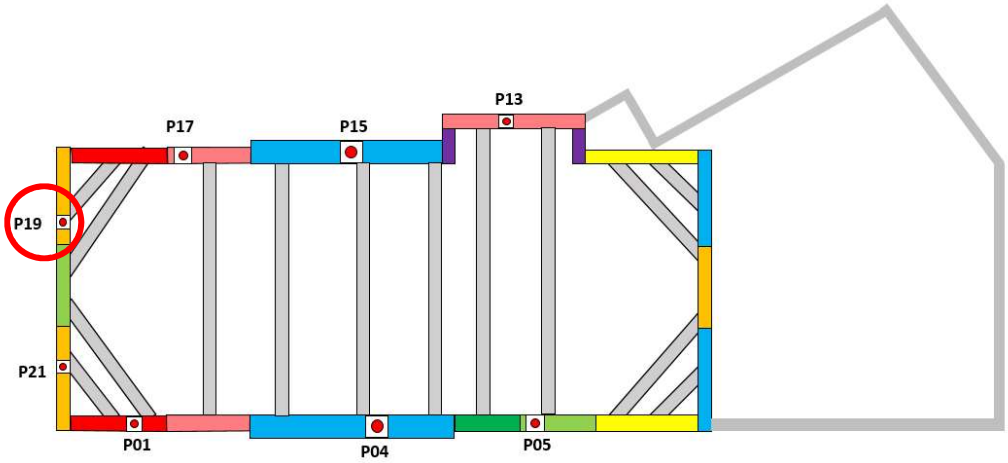
- Sables de Beauchamp (couche bleu) : cohésion de 10 à 15 kPa et angle de frottement de 33 à 35°.

Gare de La Courneuve (LCO)

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 3 – Inclinomètre 19



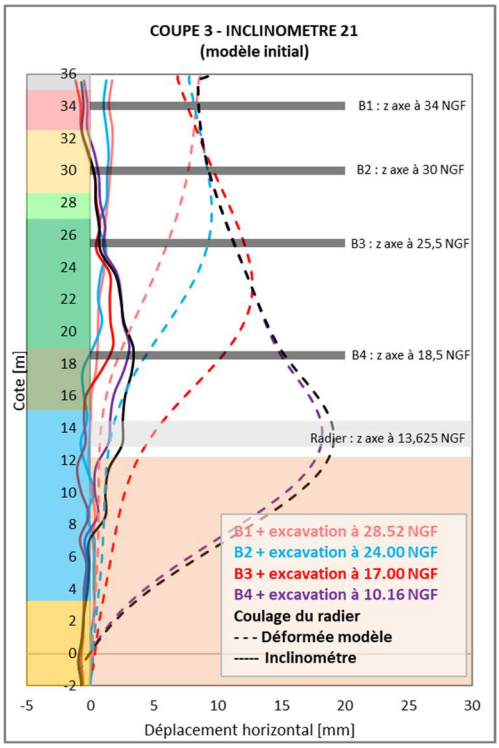


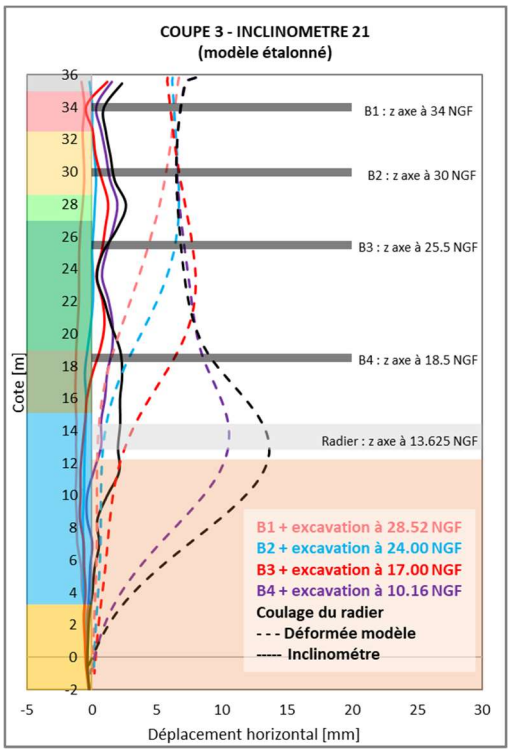


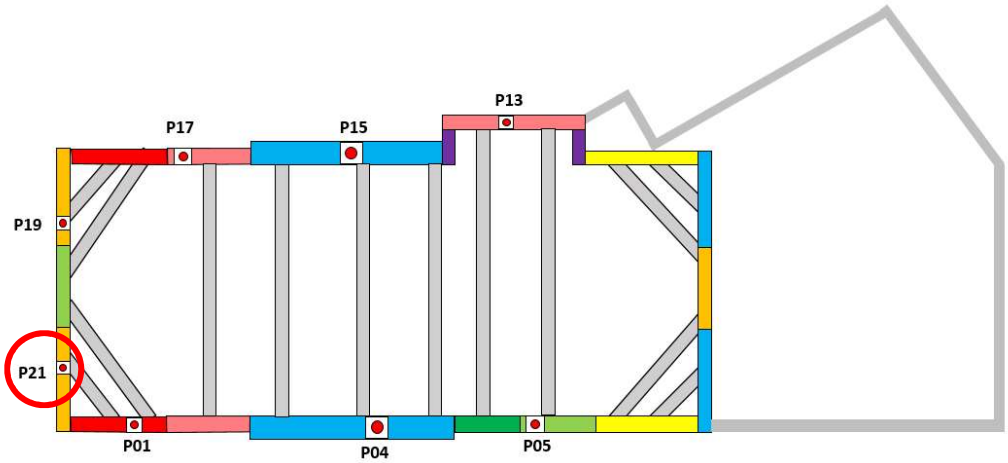
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 3 – Inclinomètre 21



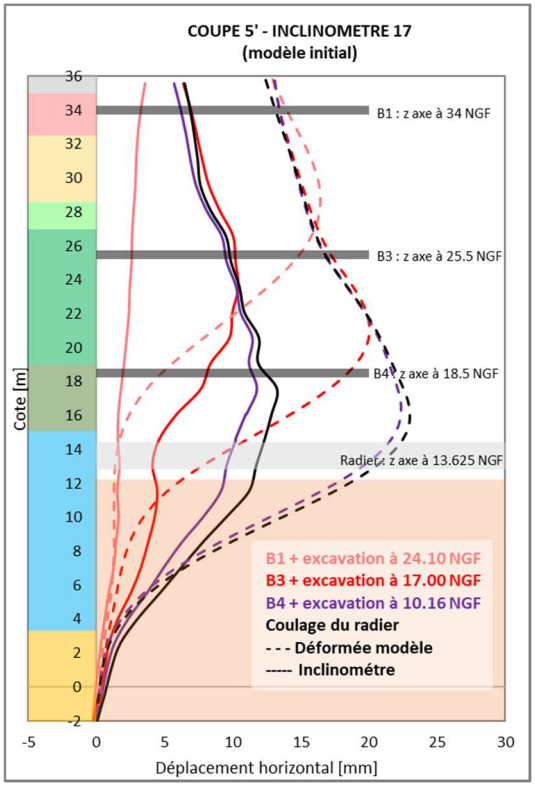


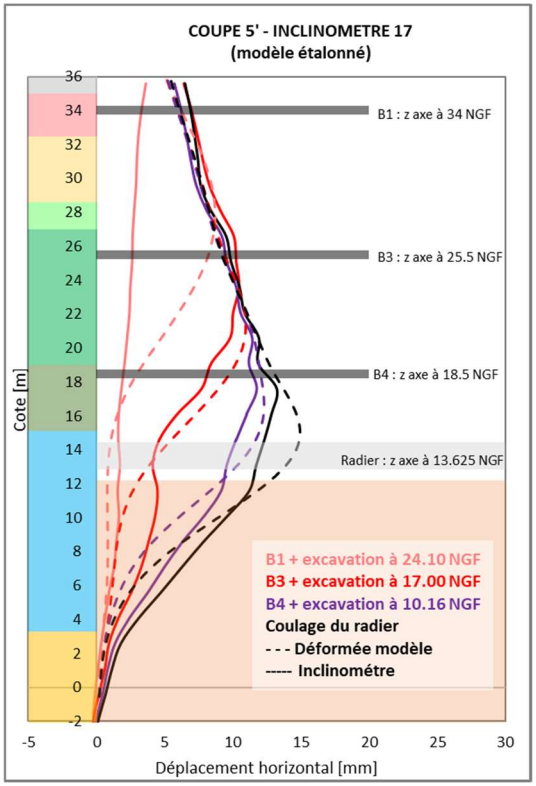


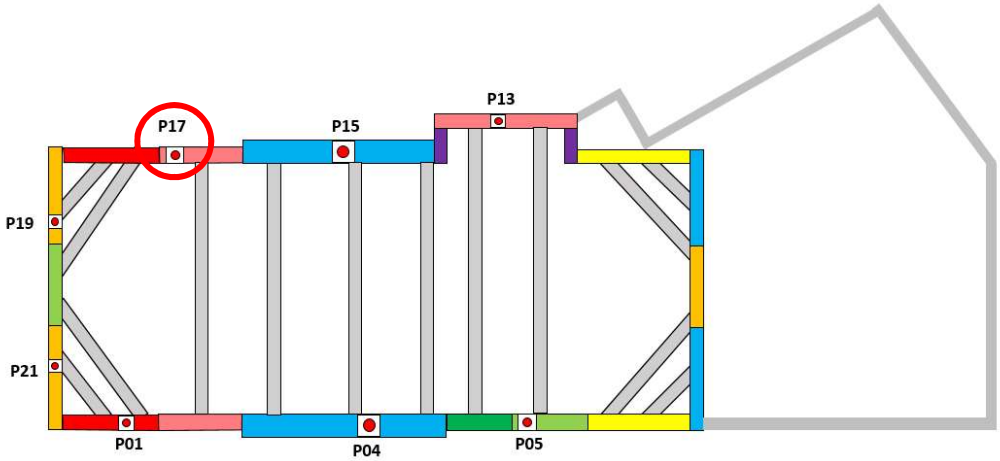
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 5' – Inclinomètre 17



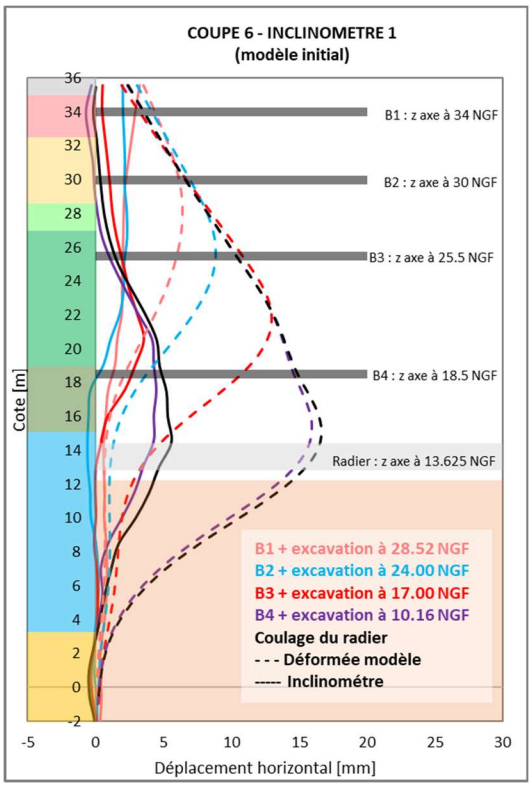


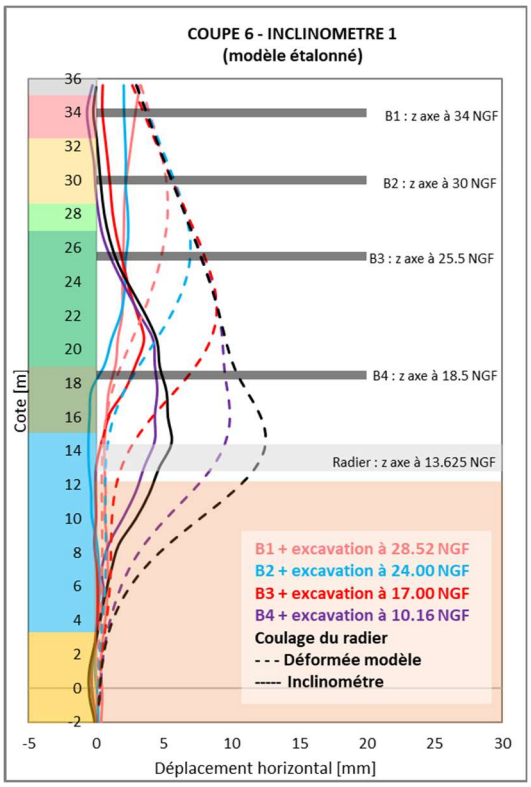


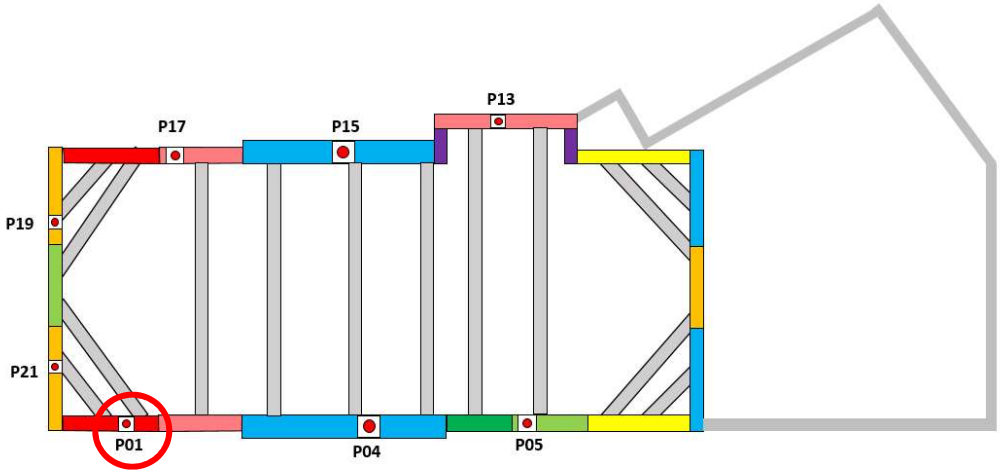
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Surcharge Boussinesq d'une grue : annulée
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 6 – Inclinomètre 01



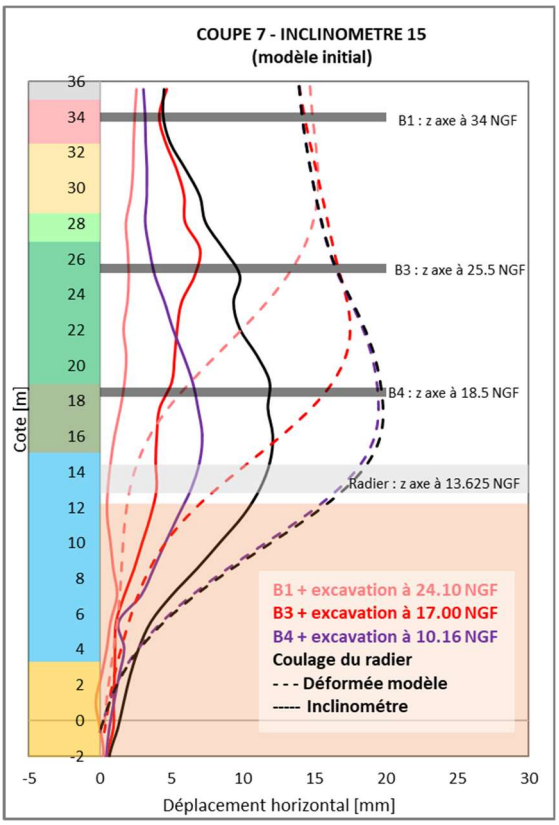


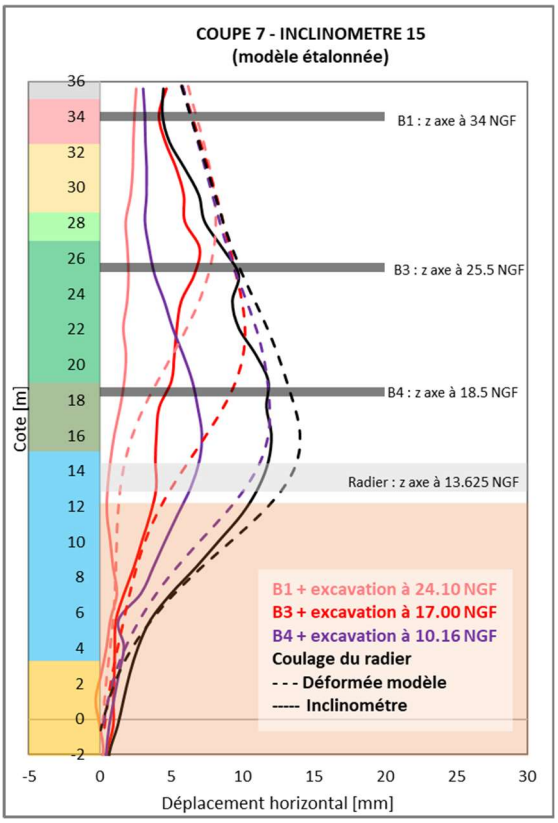


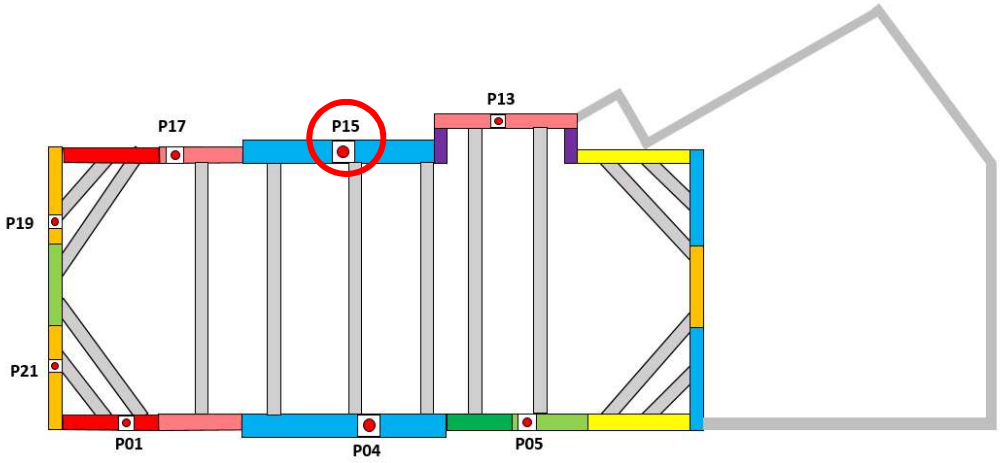
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 7 – Inclinomètre 15



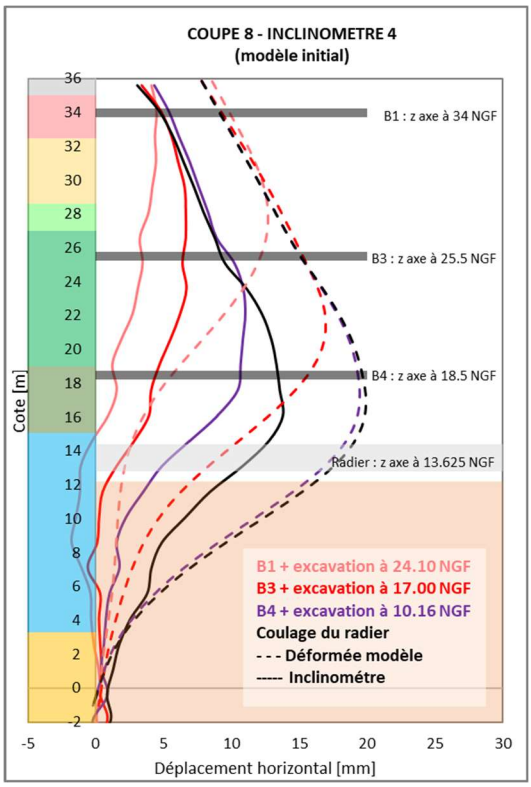


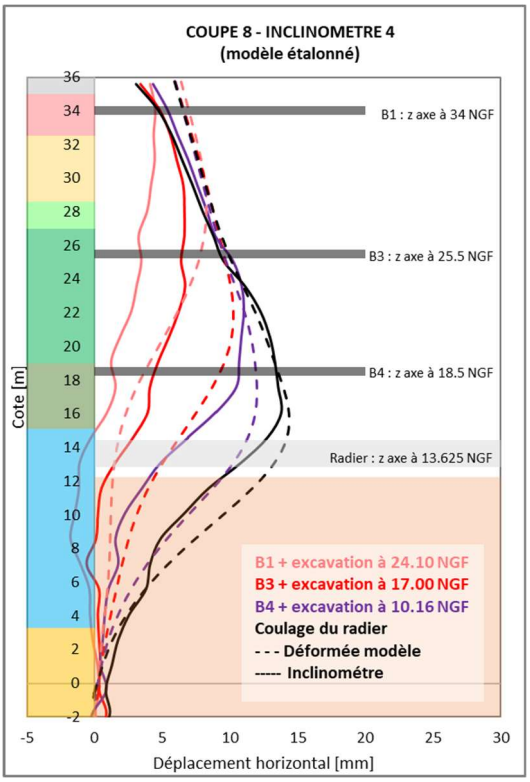


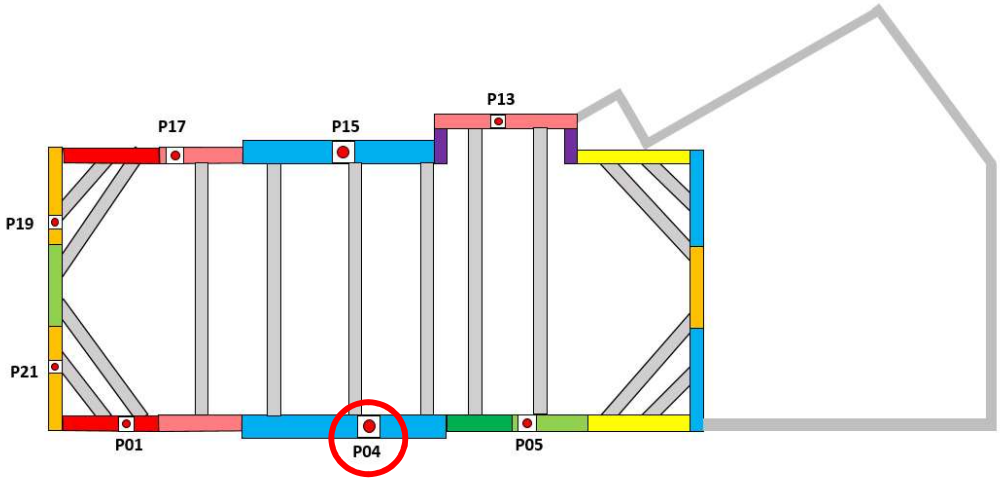
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Surcharge Boussinesq d'une grue : annulée
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 8 – Inclinomètre 04



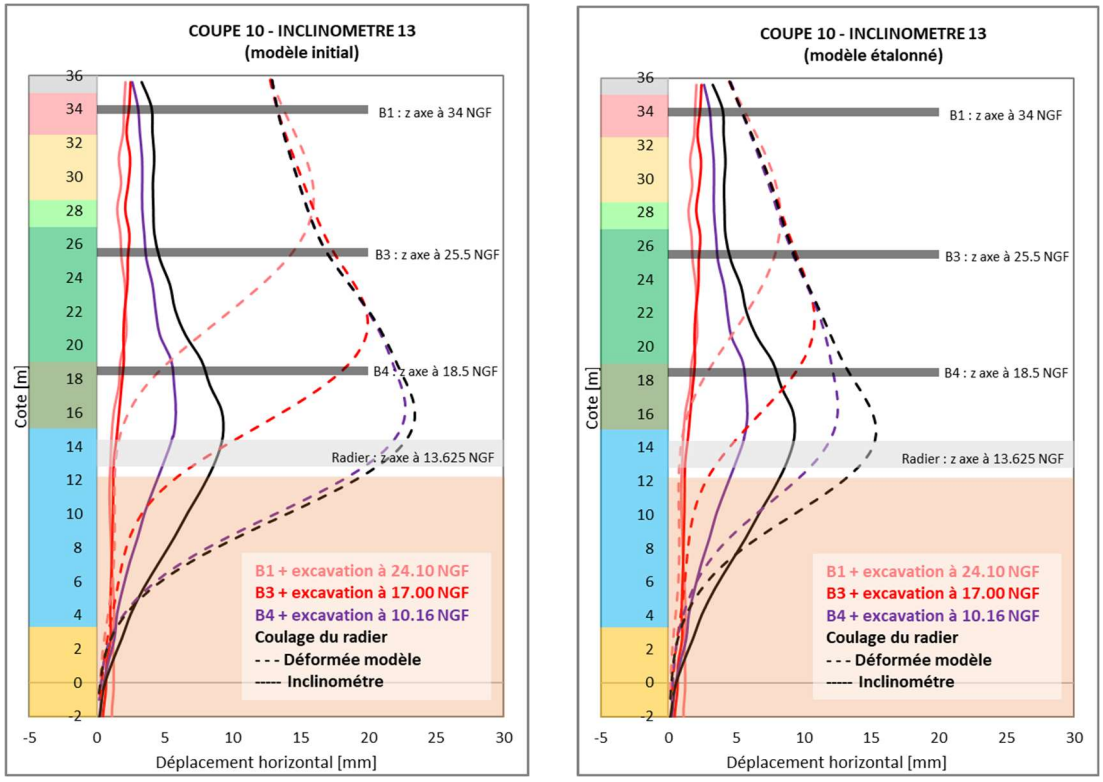


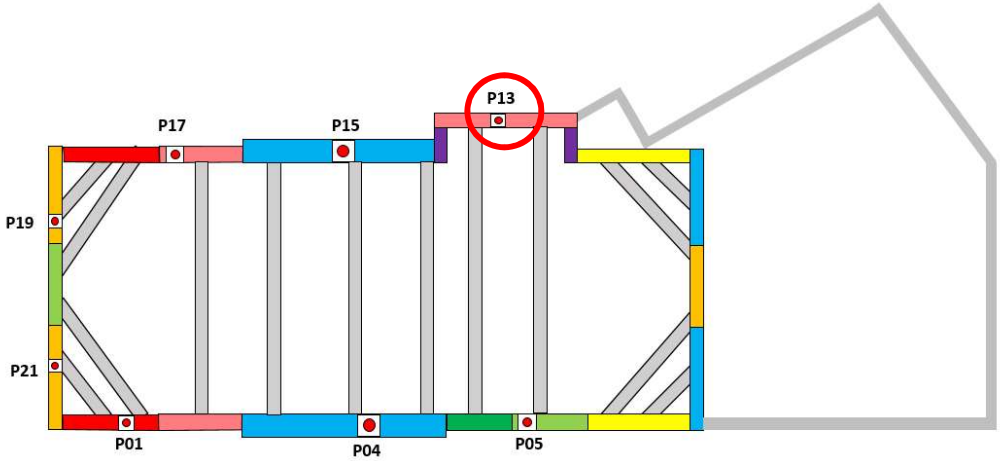


<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 10 – Inclinomètre 13

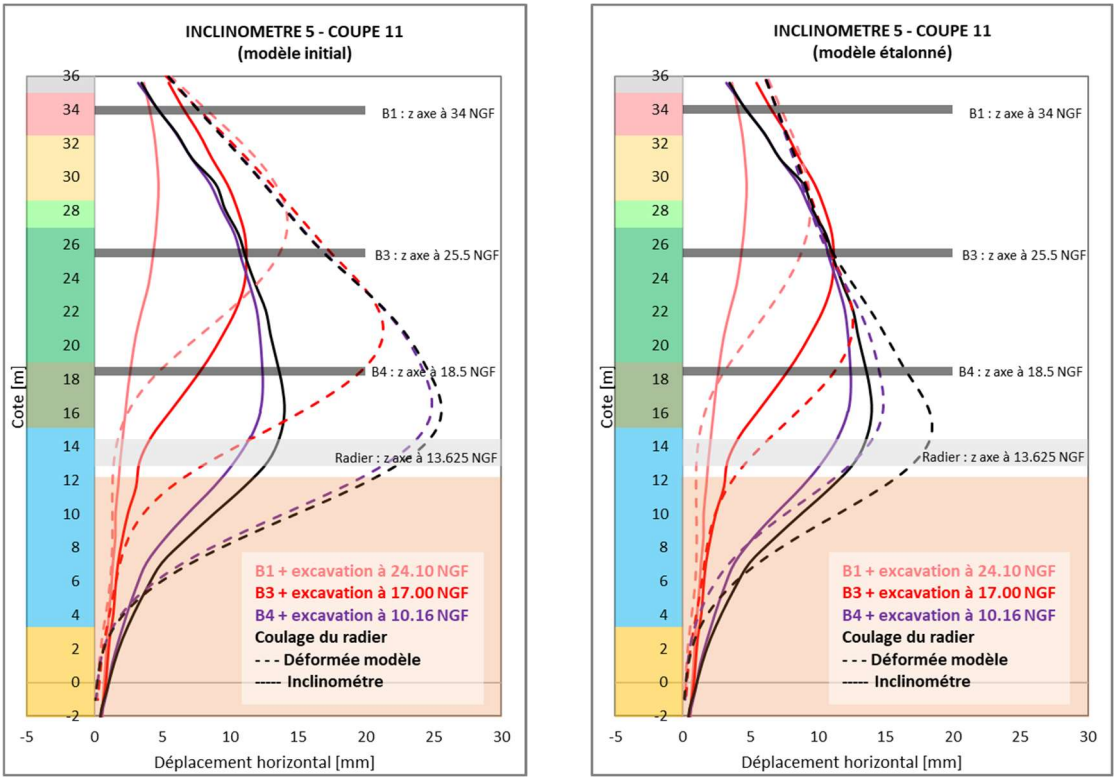


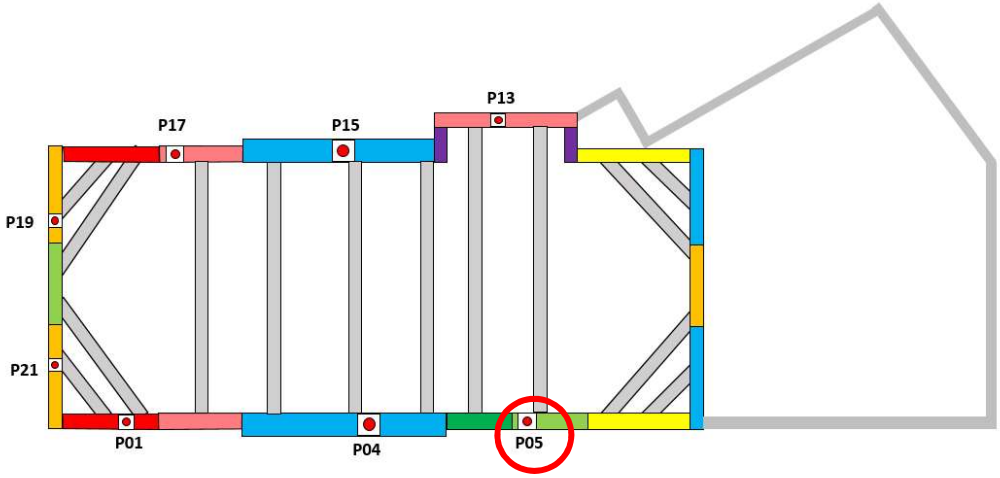


<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Surcharge Boussinesq d'une grue : annulée
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

- GARE LA COURNEUVE : Coupe 11 – Inclinomètre 5



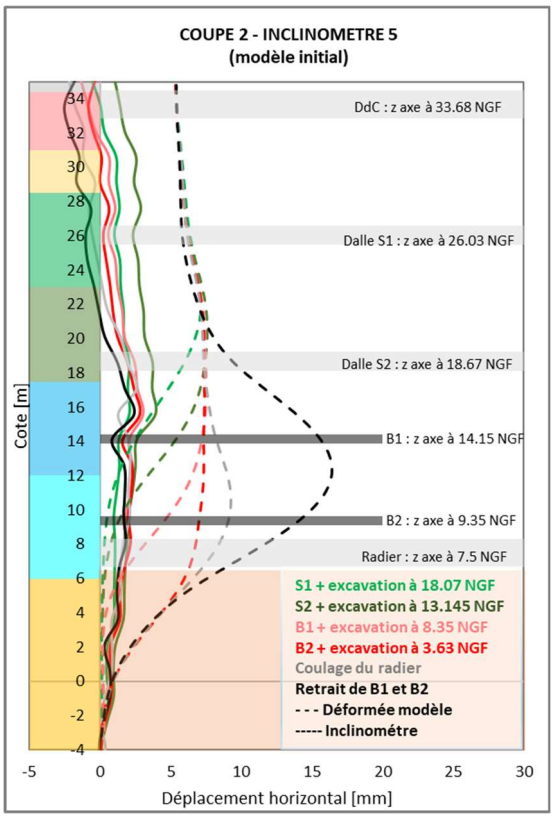


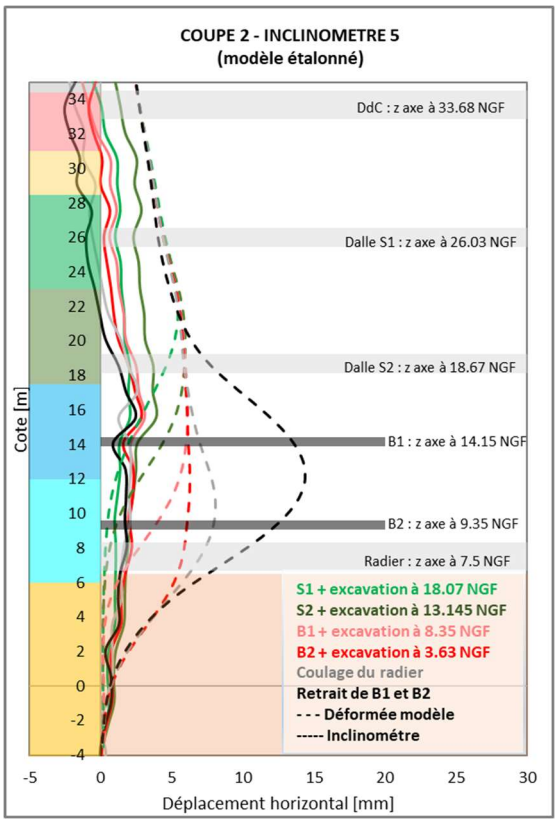
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

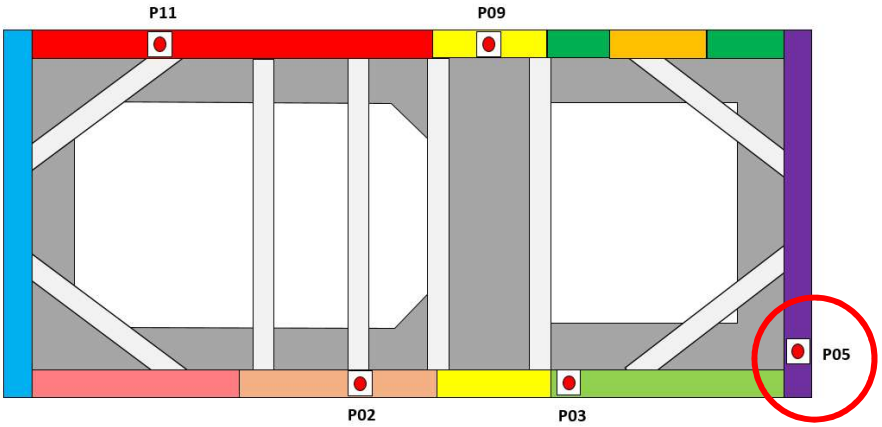
- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.5 à 26 NGF

Ouvrage 3303P

- OUVRAGE 3303P : Coupe 2 – Inclinomètre 5



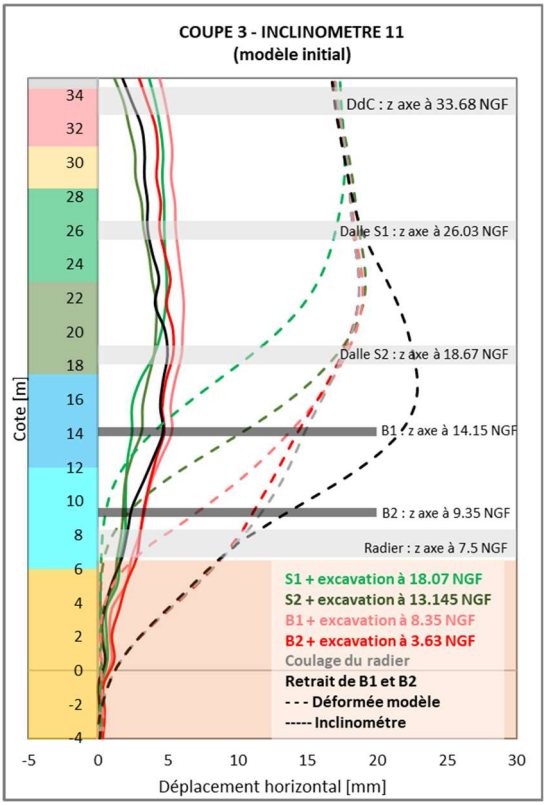


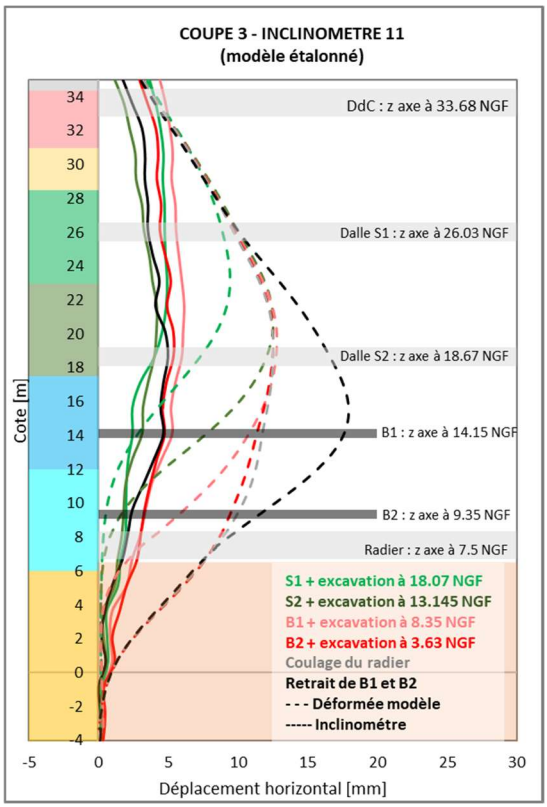


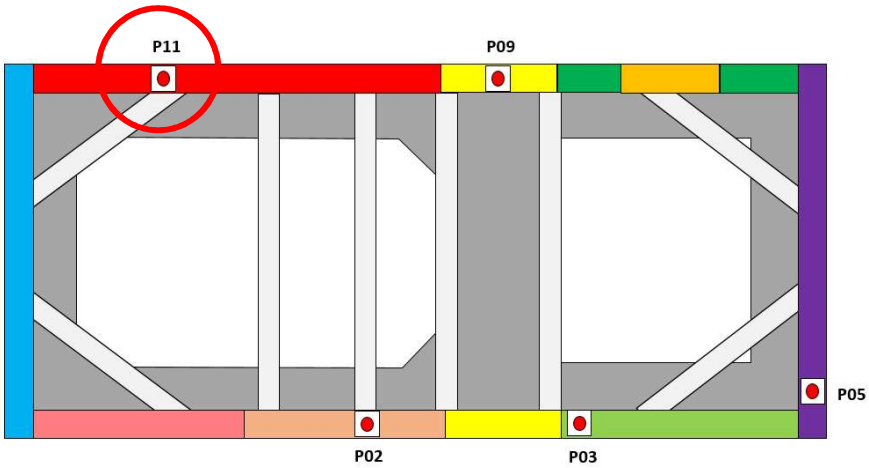
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 20 à 5 kPa
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.6 à 29.5 NGF

- OUVRAGE 3303P : Coupe 3 – Inclinomètre 11





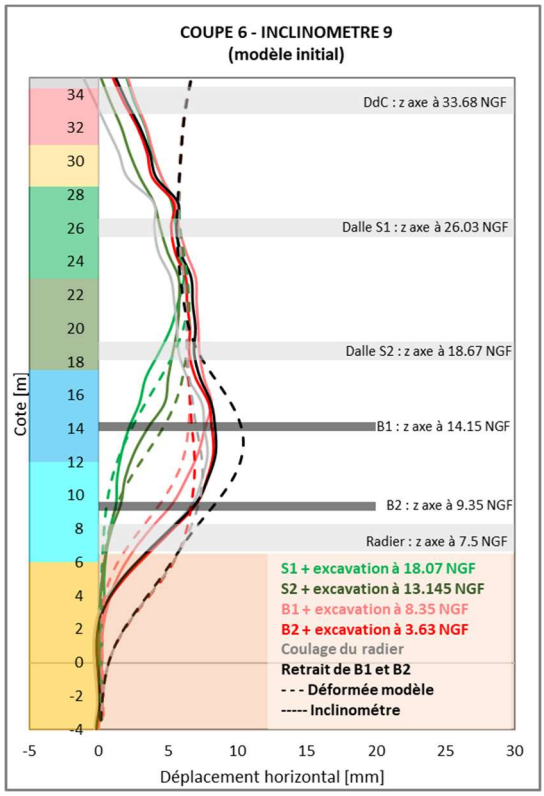


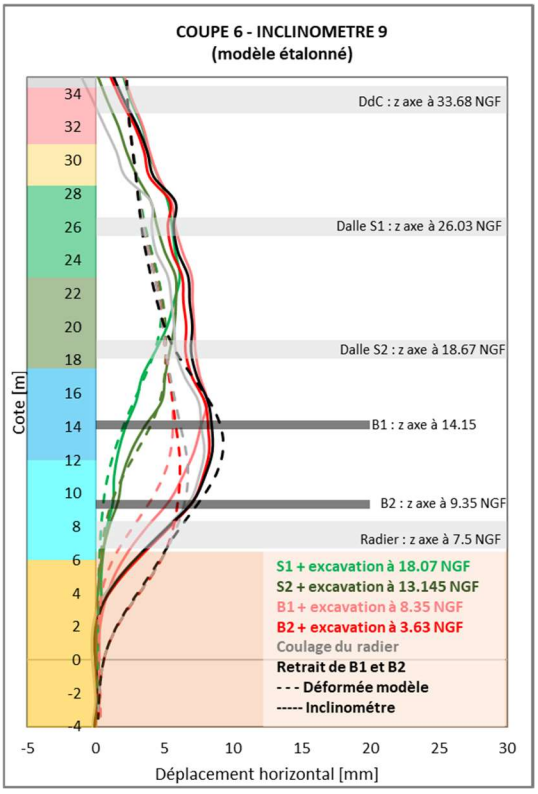
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

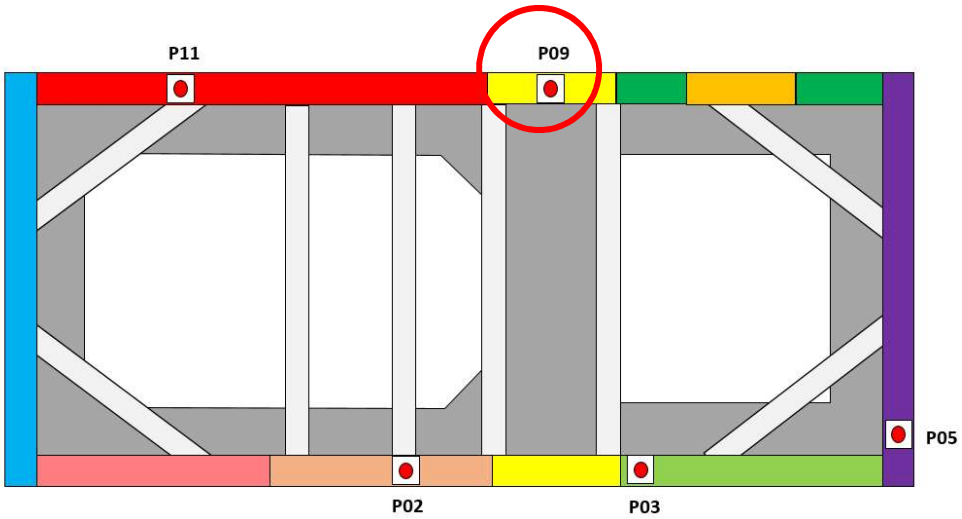
- Surcharge Caquot de 50 à 5 kPa avant le bétonnage de la lierne de la dalle de couverture.
- Mise en place de la surcharge de la grue après le bétonnage de la lierne de la dalle de couverture.
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.6 à 29.5 NGF

- OUVRAGE 3303P : Coupe 5 – Inclinomètre 2 (sans étalonnage)

- OUVRAGE 3303P : Coupe 6 – Inclinomètre 9



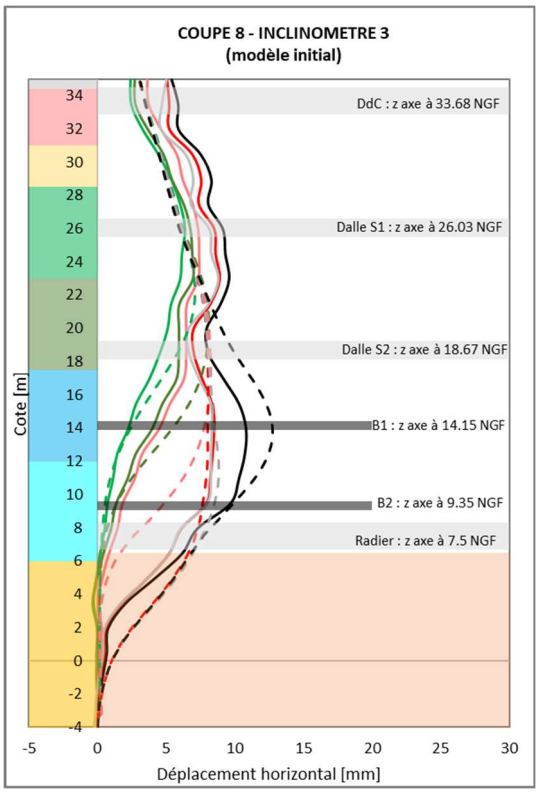


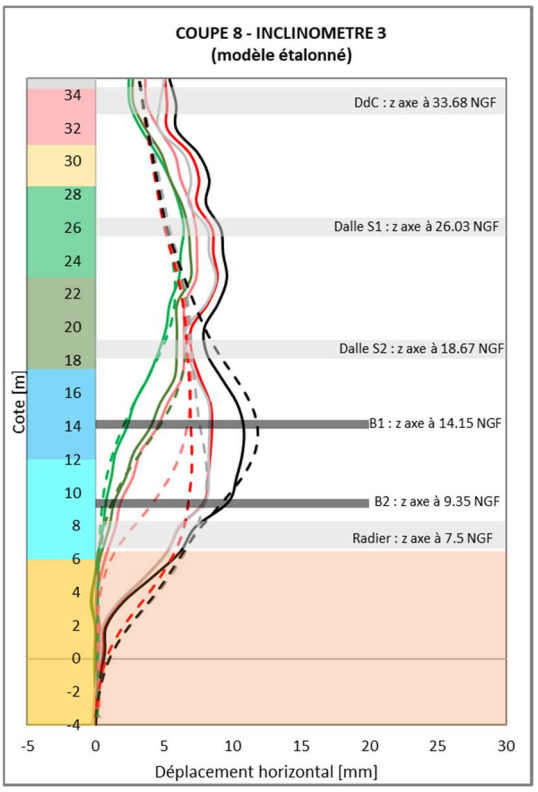


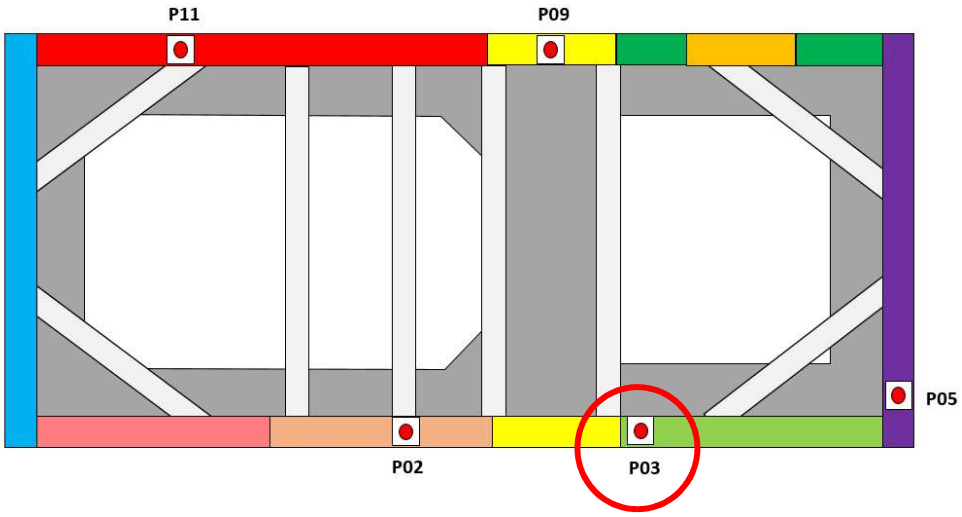
<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Surcharge Caquot de 50 à 5 kPa avant le bétonnage de la lierne de la dalle de couverture.
- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.6 à 29.5 NGF

- OUVRAGE 3303P : Coupe 8 – Inclinomètre 3







<u>Hypothèses étalonnées :</u>

- Niveau d'eaux de chantier (EC) : de 31.6 à 29.5 NGF

Récapitulatif de résultats

On présente ci-dessous un tableau récapitulatif des résultats de l'étalonnage des parois moulées (la dernière phase mesurées est celle prise en compte pour le calcul des écarts).

Ouvrage	Coupe	Inclino.	Phasage	Type	Ecart absolu en tête (mm)	Ecart relatif en tête (%)	Ecart absolu en ventre (mm)	Ecart relatif en ventre (%)
01E01	1-2	48	Descendant	Singulière	1.90	34%	3.40	25%
01E01	23	10	Ascendant	Singulière	2.30	46%	3.00	24%
01E01	5	42	Ascendant	Courante	0.50	11%	0.50	4%
01E01	20	17	Ascendant	Courante	0.66	18%	4.60	38%
01E01	11	33	Descendant	Singulière	0.80	20%	6.20	44%
01E01	15	27	Descendant	Singulière	3.10	28%	3.60	26%
34E01	7-0	68	Descendant	Courante	2.00	200%	2.50	14%
34E01	7-1	3	Descendant	Courante	2.00	80%	4.00	22%
34E01	11-0	59	Descendant	Courante	0.00	0%	0.00	0%
34E01	11-1	12	Descendant	Courante	0.00	0%	1.80	12%
34E01	13-0	55	Descendant	Courante	2.50	125%	0.00	0%
34E01	13-1	16	Descendant	Courante	0.00	0%	3.50	24%
34E01	10-0	49	Descendant	Courante	0.30	9%	0.30	2%
34E01	5-0	43	Descendant	Singulière	7.00	140%	4.80	38%
34E01	5-1	29	Descendant	Singulière	3.50	50%	2.90	22%
02E01	2	3	Descendant	Singulière	0.00	0%	12.00	66%
02E01	3	57	Descendant	Singulière	0.00	0%	5.00	29%
02E01	4	8	Descendant	Courante	0.50	50%	4.00	33%
02E01	4	53	Descendant	Courante	1.00	67%	0.00	0%
02E01	7	14	Ascendant	Singulière	1.20	60%	6.35	39%
02E01	8	48	Ascendant	Courante	5.00	143%	0.50	2%
02E01	12	22	Ascendant	Courante	3.00	120%	2.00	10%
02E01	15	35	Ascendant	Courante	0.00	0%	2.20	11%
LCO	7	15	Ascendant	Courante	1.00	18%	2.00	14%
LCO	8	4	Ascendant	Courante	2.50	42%	0.50	3%
LCO	10	13	Ascendant	Singulière	1.50	50%	7.00	44%
LCO	11'	5	Ascendant	Courante	1.50	30%	3.70	21%
LCO	3	19	Ascendant	Singulière	7.00	88%	11.00	79%
LCO	3	21	Ascendant	Singulière	7.50	94%	11.00	79%
LCO	6	1	Ascendant	Singulière	3.00	100%	6.50	60%
LCO	5'	17	Ascendant	Courante	0.30	6%	1.50	10%
3303P	2	5	Descendant	Singulière	3.00	130%	10.30	72%
3303P	6	9	Descendant	Courante	0.20	6%	0.30	3%
3303P	8	3	Descendant	Courante	1.50	45%	0.80	7%
3303P	3	11	Descendant	Singulière	1.00	29%	12.50	69%
3303P	5	2	Descendant	Courante	0.00	0%	0.00	0%

Annexe 4 – Modèle Robot pour l'étude des coupes singulières

1. Introduction

On présente dans cette annexe, la modélisation d'un tympan sur le logiciel Robot Structural Analysis. L'objectif est d'étudier le comportement des panneaux des parois moulées à proximité des autres parois transversales qui peuvent induire des phénomènes particulières.

2. Modélisation sur Robot

Données d'entrée

On a sélectionné le tympan ouest de l'ouvrage LCO comme exemple pour cette modélisation. On rappelle la localisation du tympan dans l'ouvrage. On présente les détails du modèles ci-dessous.

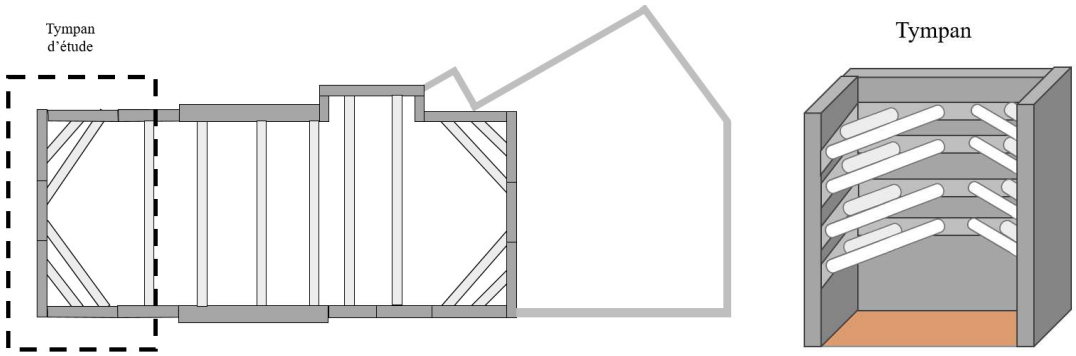


Figure 87 : Schéma du tympan d'étude

Géométrie :

On rappelle la géométrie utilisée pour le modèle Robot :

- Épaisseur de la paroi moulée 1.50 m
- Épaisseur de la dalle de couverture 1.20 m
- Niveau du premier lit des butons à l'axe 34.0 m NGF
- Raideur linéaire du premier lit des butons 220.000 kN/m2
- Niveau du deuxième lit des butons à l'axe 30.0 m NGF
- Raideur linéaire du deuxième lit des butons 220.000 kN/m2
- Niveau du troisième lit des butons à l'axe 25.5 m NGF
- Raideur linéaire du troisième lit des butons 220.000 kN/m2
- Niveau du quatrième lit des butons à l'axe 18.5 m NGF
- Raideur linéaire du quatrième lit des butons 600.000 kN/m2
- Épaisseur du radier 1.75 m
- Plateforme de travail pour forage de la paroi moulée 36.80 NGF
- Niveau du fond de fouille 12.22 NGF

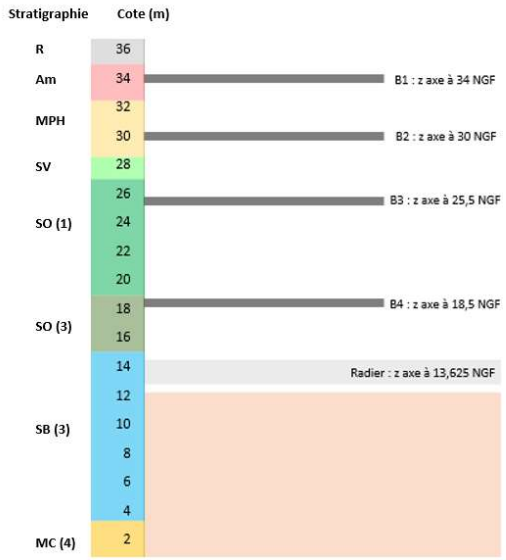


Figure 88 : Schéma, en profil, de la coupe étudiée.

Poussée de terres

La poussée de terres modélisée, sur toute la largeur du tympan, correspond à la phase d'arrivée au fond de fouille. Les résultats sont issus d'un modèle MISS-K dans lequel le phasage n'est pas pris en compte. C'est-à-dire, que l'on a modélisé tout le terrassement et la mise en place de quatre lits de butons dans une seule phase.

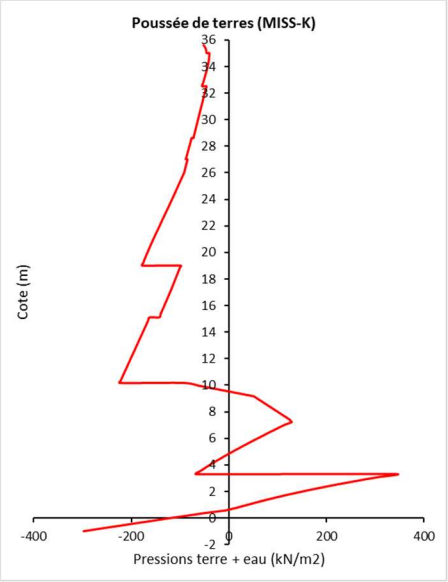


Figure 89 : Poussée de terres modélisé sur Robot.

Les effets des niveaux d'eau ainsi que des surcharges sont considérés dans la poussée présentée.

Modèle plaque

Le modèle plaque a été modélisé à partir d'éléments coques et le maillage des éléments est pris à 0.2 m.

Les appuis latéraux représentant les parois transversales sont rigides.

Résultats

Les résultats de modélisation, concernant les déplacements horizontaux du tympan, sont présentés ci-dessous.

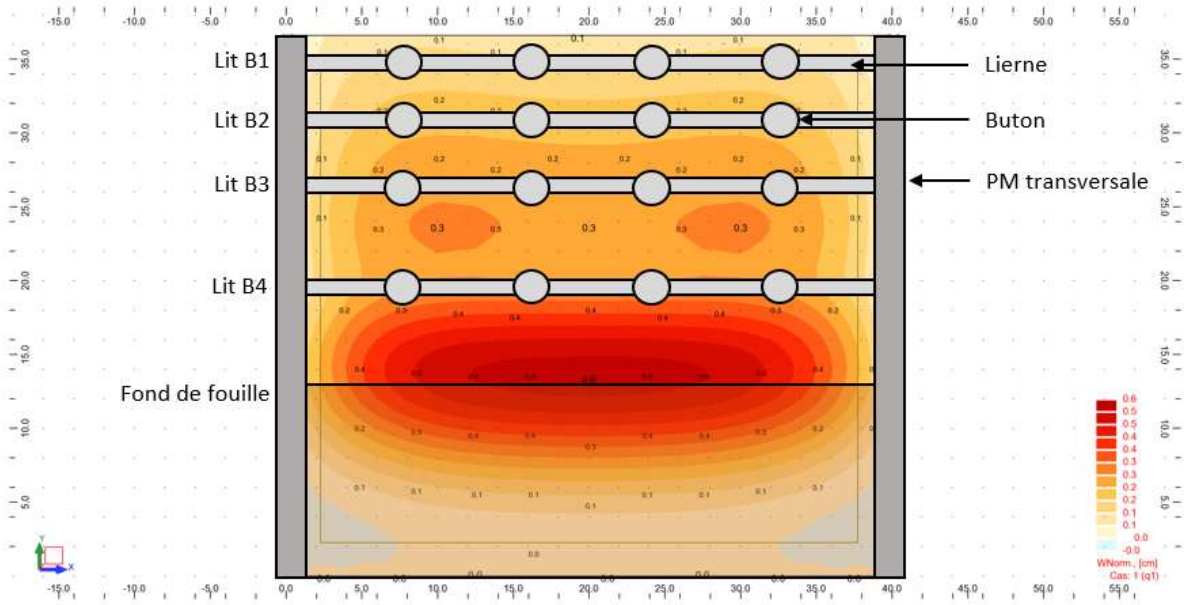


Figure 90 : Déplacements horizontaux du tympan (vue en élévation).

Vérification du modèle avec MISS-K

Avant d'exploiter les résultats du modèle Robot, il est nécessaire de faire une vérification des résultats issus de cette modélisation avec le modèle MISS-K. Pour cette vérification, on prendre les déplacements d'une coupe fictive de la partie centrale du tympan (axe de la coupe x=20m sur la Figure 90), où le ventre est complétement développé.

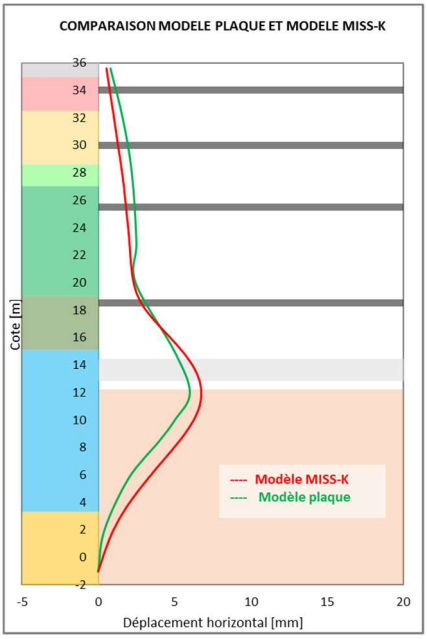


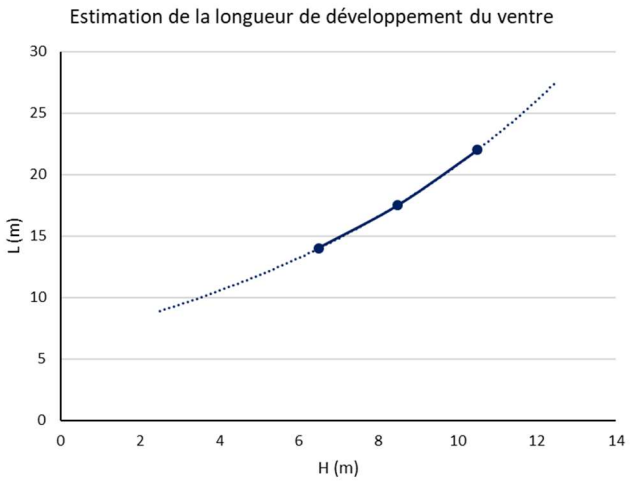
Figure 91 : Comparaison des résultats entre les modèles.

On constate une bonne cohérence dans les résultats. Le modèle Robot est donc vérifié.

3. Proposition de la méthode pour l'estimation des déplacements

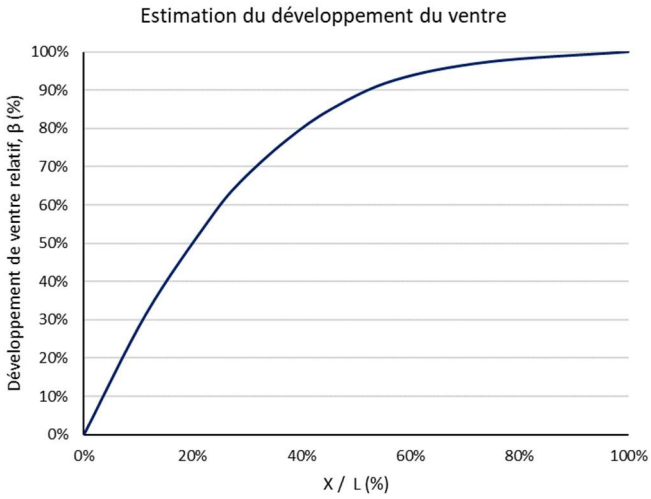
A partir du modèle initial, on a réalisé plusieurs modèles en modifiant certains paramètres tels que l'épaisseur de la paroi moulée et la distance entre le dernier lit de butons et le fond de fouille. Cela a permis de constater les points suivants.

1. La distance entre le dernier lit de butons et le fond de fouille (H) détermine la distance nécessaire pour que le ventre soit complètement développé (L).



La détermination de cette longueur nécessaire pour le développement complète du ventre permet de calculer la position relative du point d'étude X/L, où X est la distance entre le coin au point d'étude.

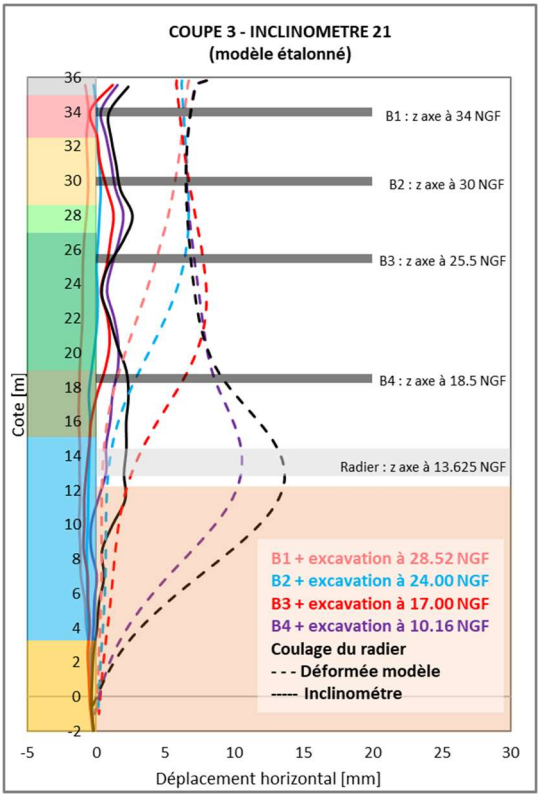
2. Il y a toujours une relation entre la position relative du point d'étude dans le tympan par rapport au développement du ventre de ce point. Le graphique ci-dessous présente cette relation qui permet de calculer le développement relatif du ventre, β. A partir de cette dernière valeur estimée, on peut donc calculer le déplacement réel du ventre dans le point étudié.



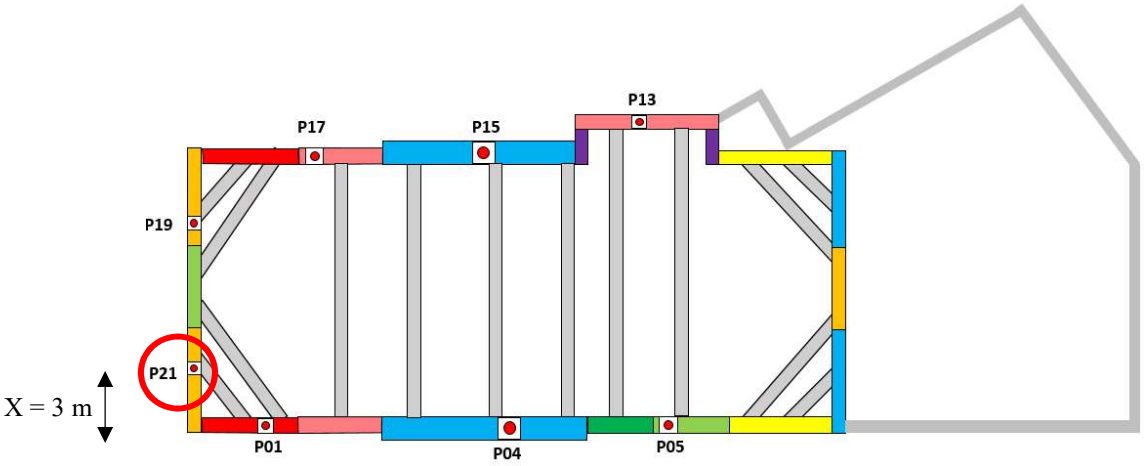
4. Exemple d'application de la méthode

On présente ci-dessous l'application de la méthode pour un cas spécifique.
On prend toujours la coupe 3 de la gare LCO comme exemple d'application.

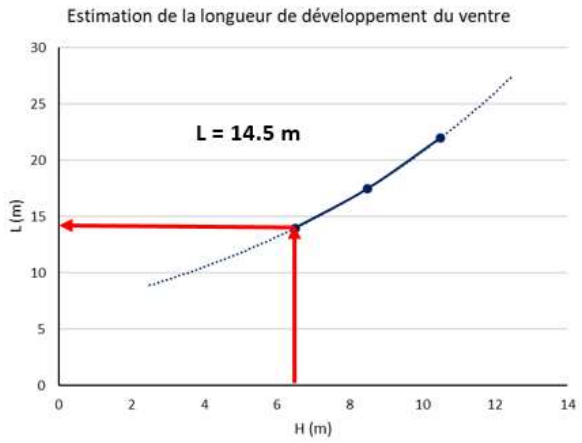
- GARE LA COURNEUVE : Coupe 3 – Inclinomètre 21



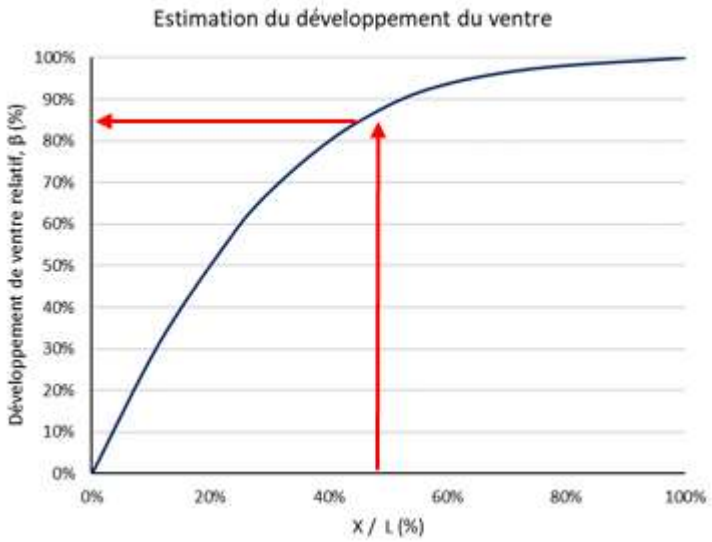
Etape 1 : localiser le point d'étude dans l'ouvrage et calculer la distance à la paroi transversale.



Etape 2 : calcul de la distance nécessaire pour le développement du ventre (L), à partir de la distance entre le dernier lit des butons et le fond de fouille, H = 6.3m



Etape 3 : Calcul de développement relatif du ventre à partir du rapport X / L ≈ 50%



Le développement du ventre correspond au 85% du ventre calculé par le modèle MISS-K. On calcule l'estimation du déplacement final :

$$\delta_{effet\ singulier} = \beta \cdot \delta_{étalonné}$$

$$\delta_{effet\ singulier} = 0.85 \cdot 13 = 11.05\ mm$$