

INTERACTION SOL-STRUCTURE D'UN BATIMENT R+14 AVEC 11 NIVEAUX DE SOUS-SOL

SOIL-STRUCTURE INTERACTION FOR A 14 STOREYS BUILDING WITH 11 GROUND FLOORS

Nihed BARÇA¹, Olivier HAYE¹

¹ Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France

RÉSUMÉ – Pour l'étude des soutènements de la Villa Lucia (Monaco), il a été nécessaire de modéliser l'interaction entre les travaux d'excavation et le pont Sainte Dévote dont la culée est à proximité immédiate de la paroi du projet. Deux aspects sont présentés : la modélisation 2D qui permis de réaliser une étude paramétrique et des optimisations de dimensionnement et la modélisation 3D qui a permis de déterminer les déplacements et efforts entre les deux ouvrages.

ABSTRACT – The study of the Villa Lucia (Monaco) retaining walls, required modeling the interaction between the excavation work and the Sainte Dévote bridge, the abutment of which is very close to the wall of the project. Two aspects are presented: 2D modeling that was used to carry out a parametric analysis and design optimizations and 3D modeling which made it possible to determine the displacements and forces between the two structures.

1 Introduction

Le projet « Villa Lucia » comprend la construction d'un bâtiment de type R+14 avec 11 niveaux de sous-sol. Le projet est adjacent à la gare SNCF souterraine de Monaco où se situe le pont Sainte Dévote, datant du début du 20^è siècle. Le pont est constitué d'un seul arc, lui-même formé de 3 caissons, et d'un tablier, le tout en béton armé. Le transfert de charges est réalisé par le biais de poteaux en béton armé sur les arcs. La culée Ouest (côté Nice) se situe à la limite de l'excavation du projet.



La culée est donc appuyée presque directement sur le système de soutènement, rendant la stabilité du pont dépendante notamment de la paroi micro-berlinoise et du système de butonnage adoptés à l'endroit de ce point singulier. Le dimensionnement est également conditionné par les effets de tassements des autres avoisinants du projet. Cette contrainte de dimensionnement fait qu'une collaboration étroite avec les équipes d'ingénierie structure a été nécessaire.

Des modélisations aux éléments finis d'interaction Sol-Structure en 2D et 3D ont été réalisées pour l'analyse exploratoire des structures du pont avec son environnement géotechnique. Ces modélisations visaient à mieux connaître le comportement des culées en fonction d'un certain nombre de variables :

- Les épaisseurs et profondeurs des couches de calcaire altéré ;

- Les caractéristiques de frottement et de cohésion du calcaire à l'interface avec les micropieux, particulièrement ceux côté pont ;
- Les raideurs horizontale et verticale du sol d'assise des culées ;
- Les limites d'intensité de la force de traction à appliquer dans les tirants de renforcement de pied d'arc en relation avec la raideur horizontale des sols d'assise et donc le mouvement des arcs ;
- Les limites d'intensité de l'effort à appliquer dans les butons de l'écran de soutènement, en fonction du point d'application de cet effort, du contact entre le profilé de soutènement et le chevêtre ;
- Les contraintes technologiques de la réalisation de forages et l'interaction entre les engins dans le contexte particulier du site qui est exigü.

L'objectif des modélisations réalisées était d'optimiser le dimensionnement de base fait en phase étude tout en assurant la stabilité du pont. Le modèle 2D, qui donne des résultats plus rapidement mais conservatifs, a permis de faire des calculs paramétriques sur la coupe de soutènement la plus critique et de s'assurer par la suite de la validité des résultats à l'aide du modèle 3D. Ce modèle 3D intègre alors la totalité du projet, une modélisation détaillée du pont et de ses tirants de renforcement, la gare SNCF et l'ensemble des avoisinants du projet, et prend ainsi en compte la distribution 3D des contraintes. Les déplacements et les efforts résultants du modèle 3D ont été par la suite utilisés par les équipes structure pour vérifier la stabilité du pont.

2 Contexte géologique

L'ensemble des campagnes de reconnaissance du sol réalisées pour le projet indique la présence d'une couche superficielle de remblai de faible épaisseur, surmontant un calcaire massif avec des degrés d'altération variables selon la profondeur. L'altération du calcaire n'étant pas homogène sur l'emprise du projet, la stratigraphie est très complexe.

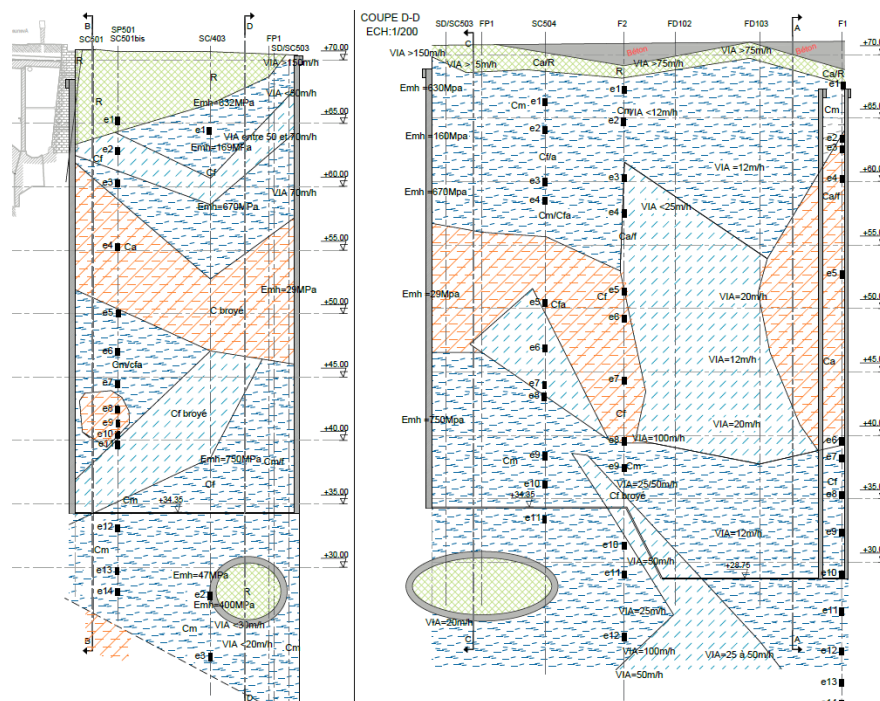


Figure 1 : Coupe stratigraphique du projet

Les paramètres géotechniques retenus pour les calculs sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Modèle géotechnique

Sol	Formation	Loi	γ [kN/m ³]	E_{50} [MPa]	E_{ur} [MPa]	E_M [MPa]	α	c' [kPa]	ϕ' [°]	K_0
Sol 1	Remblais & horizons meubles	HSM	20	42	126	7	0.33	10	32	0.470
Sol 2A	Calcaire massif F&M	HSM	26	5600	16800	700	0.50	170	45	0.293
Sol 2B	Calcaire fracturé	HSM	26	1080	3240	120	0.33	125	40	0.357
Sol 3	Calcaire altéré	HSM	24.5	360	1080	40	0.33	50	35	0.426

3 Modélisation aux éléments finis 2D

La coupe étudiée en modélisation 2D est située au droit du pont Sainte Devote tel qu'on peut le voir sur la vue en plan ci-dessous.

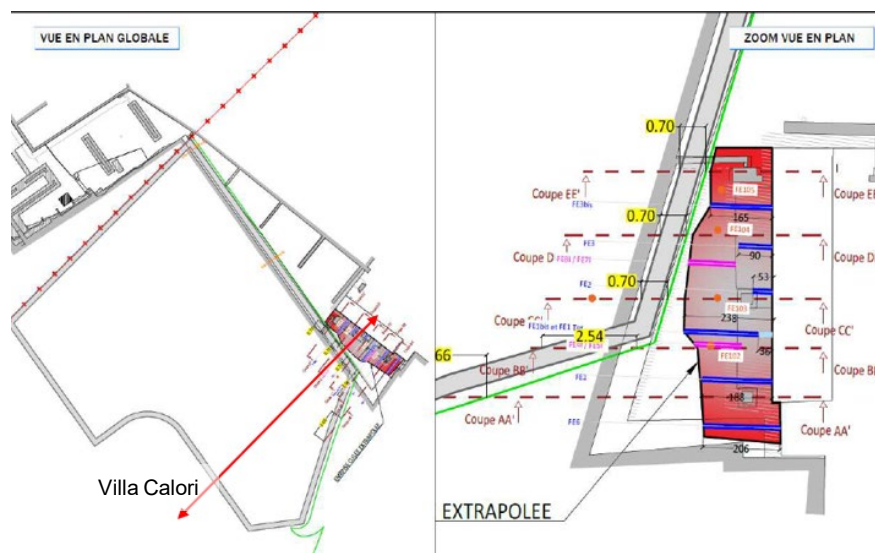


Figure 2 : Limite d'excavation du projet et coupe 2D étudiée

3.1 Hypothèses de modélisation

Pour les besoins de l'étude paramétrique, le modèle 2D a été réalisé en considérant les hypothèses suivantes :

- Le pont Sainte Devote n'a pas été modélisé avec sa géométrie réelle. Sa raideur horizontale a été prise en compte à l'aide d'un élément « Node To Node Anchor » modélisé au niveau de l'intersection des arcs avec les culées. La descente de charge du pont a été appliquée au point d'intersection de cet élément avec la culée.
- Les deux culées du pont, les chevêtres et les semelles sont modélisées à l'aide des éléments surfaciques avec un module de 20 GPa.
- Le phasage adopté dans le modèle 2D, reflète l'historique de construction vis-à-vis du viaduc Ste Devote, tenant compte de la présence du vallon à l'étape initiale, précédant la construction de la gare souterraine SNCF.
- Les planchers et le soutènement de la gare existante sont modélisés à l'aide des éléments « beam » avec un module de 20 GPa. Les planchers font 11cm d'épaisseur et ils sont renforcés par un système des poutres. L'épaisseur équivalente prise en compte dans les calculs 2D est 18cm.

- L'écran de soutènement est modélisé à l'aide d'une poutre équivalente avec une raideur du tube métallique + béton à l'intérieur et extérieur du tube. Les propriétés de l'écran de soutènement des deux côtés de la fouille ainsi que des micropieux au droit de la culée sont présentés ci-dessous :

Tableau 2 : Caractéristiques des écrans de soutènement

Élément structurel	Béton			Tube Métallique		
	Diamètre des pieux [mm]	Espacement [m]	Ey [GPa]	Diamètre [mm]	Épaisseur [mm]	Ey [GPa]
Ecran de soutènement côté pont	350	0.35	20	275.0	40	210
Ecran de soutènement côté villa Calori (Partie sup.)	300	0.5	20	177.8	12.5	210
Ecran de soutènement côté villa Calori (Partie inf.)	300	1	20	177.8	12.5	210

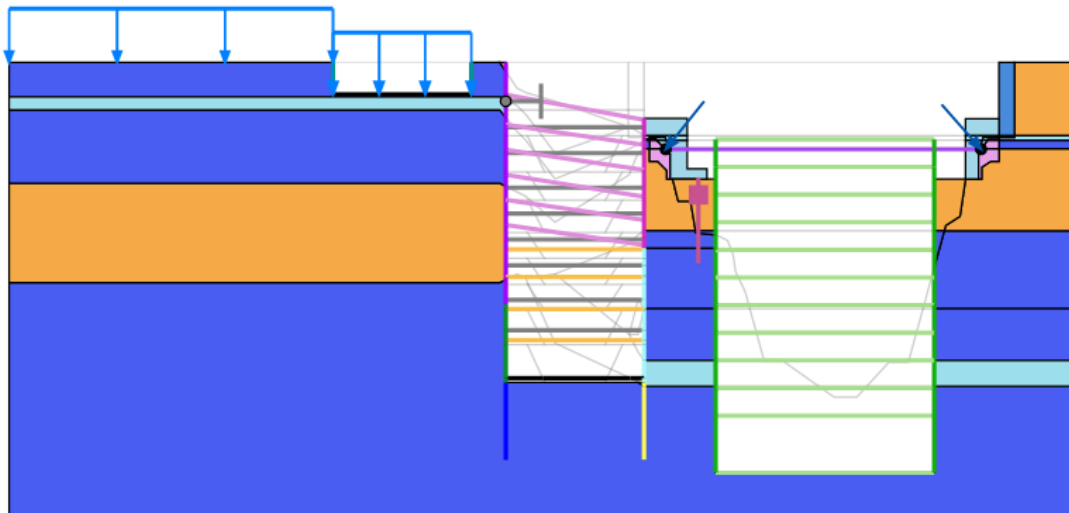


Figure 3 : Phase définitive du modèle 2D

3.2 Paramètres d'interface

Des éléments d'interface sont modélisés aux faces verticales de l'écran de soutènement.

La modélisation de l'interface qui représente le contact entre la culée du pont et le rocher de la manière suivante :

- Entre 65 et 50 NGM, les micropieux étant espacés de 0.35m pour un diamètre de 0.35m, il n'y a pas de contact entre le béton projeté et le calcaire, la cohésion est considérée nulle à cette interface et l'angle de frottement est pris à 2/3 des caractéristiques du rocher.
- En dessous de 50 NGM, les micropieux étant espacés de 0.7m pour un diamètre de 0.35m, il y a un contact entre le béton projeté et le calcaire, la cohésion et l'angle de frottement sont pris à 2/3 des caractéristiques du rocher.

La modélisation de l'interface qui représente le contact entre la paroi côté Villa Calori et le rocher de la manière suivante :

- Entre 57.5 et 46 NGM le calcaire est altéré, la cohésion est de ce fait considérée nulle à cette interface et l'angle de frottement est pris à 2/3 des caractéristiques du rocher.

3.3 Modélisation et phasage

Phase	Désignation
0	Initialisation des contraintes

1	Creusement du vallon + Application des surcharges des avoisinants
2	Construction du pont St Devote
3	Construction de la gare de Monaco
4	Réalisation de la paroi côté Villa Calori
Réinitialisation des déplacements	
5	Excavation jusqu'à la côte +66m NGM
6	Béton projeté jusqu'à la côte +66m NGM + Installation du buton à la côte +67m NGM + Réalisation de la paroi St Devote
7	Excavation en risberme entre les côtes +63m & +58.8m NGM
8	Construction des chevêtre de renfort sur les deux culées du pont + Application de la précharge au niveau des tirants de renforts entre les deux culées + Installation des micropieux de renfort de la culée rive droite
9	Béton projeté jusqu'à la côte +63m NGM + Installation du buton à la côte +64m NGM
10	Excavation en risberme entre les côtes +58.8m & +55.8m NGM
11	Béton projeté jusqu'à la côte +58.8m NGM + Installation du buton à la côte +61m NGM
12	Excavation en risberme entre les côtes +55.8m & 51.8m NGM
13	Béton projeté jusqu'à la côte +55.8m NGM + Installation du buton à la côte +57m NGM
14	Excavation en risberme entre les côtes +51.8m & 48.8m NGM
15	Béton projeté jusqu'à la côte +51.8m NGM + Installation du buton à la côte +54m NGM
16	Excavation en risberme entre les côtes +48.8m & 45.8m NGM
17	Béton projeté jusqu'à la côte +48.8m NGM + Installation du buton à la côte +51m NGM
18	Excavation en risberme entre les côtes +45.8m & 42.8m NGM
19	Béton projeté jusqu'à la côte +45.8m NGM + Installation du buton à la côte +48m NGM
20	Excavation en risberme entre les côtes +42.8m & 38.8m NGM
21	Béton projeté jusqu'à la côte +42.8m NGM + Installation du buton à la côte +44
22	Excavation en risberme entre les côtes +38.8m & 34.45m NGM
23	Excavation jusqu'à la côte +34.45m NGM
24	Béton projeté jusqu'à la côte +35.45m NGM
25	Construction du radier + Construction de la dalle au niveau +39m NGM + Désinstallation du buton à la côte +40.5m NGM
26	Construction de la dalle au niveau +42.95m NGM + Désinstallation du buton à la côte +44m NGM
27	Construction de la dalle au niveau +46.65m NGM + Désinstallation du buton à la côte +48m NGM
28	Construction de la dalle au niveau +49.85m NGM + Désinstallation du buton à la côte +51m NGM
29	Construction de la dalle au niveau +52.8m NGM + Désinstallation du buton à la côte +54m NGM
30	Construction de la dalle au niveau +55.7m NGM + Désinstallation du buton à la côte +57m NGM
31	Construction de la dalle au niveau +58.6m NGM + Désinstallation du buton à la côte +61m NGM
32	Construction de la dalle au niveau +61.5m NGM + Désinstallation du buton à la côte +64m NGM
33	Construction de la dalle au niveau +64.4m NGM + Désinstallation du buton à la côte +67m NGM

3.4 Optimisations

L'étude paramétrique sur le modèle 2D a consisté principalement à l'optimisation du butonnage de la fouille. Le Tableau 3 présente le dimensionnement de base des butons, suivi par les résultats de l'optimisation proposée.

Tableau 3 : Caractéristiques des butons

Lit	Niveau [m NGM]	Dimensionnement d'origine		Optimisation	
		Section (Diamètre x épaisseur) [mm ²]	Précharge [kN/m]	Section (Diamètre x épaisseur) [mm ²]	Précharge [kN/m]
1	64.0	914 x 16.0	150	914 x 16.0	150
2	61.0	914 x 16.0	200	914 x 16.0	200
3	57.0	914 x 16.0	450	406 x 12.5	-
4	54.0	914 x 16.0	600	660 x 12.0	250
5	51.0	914 x 16.0	750	660 x 12.0	400
6	48.0	914 x 16.0	900	660 x 12.0	550
7	44.0	914 x 16.0	950	406 x 12.5	-
8	40.5	914 x 16.0	1100	406 x 12.5	-

A noter que les valeurs ci-dessus ne sont pas nécessairement celles adoptées au final, en particulier pour des raisons de rationalisation (par exemple niveaux 3, 7 et 8 finalement choisis également en 660 x 12). Cette étude a néanmoins permis de réduire la section du butonnage et la précharge nécessaire tout en assurant que les déplacements des parois et le tassement des avoisinants restent dans les limites de l'admissible.

Le dimensionnement des butons des lits 64 et 61 NGM, se trouvant sur la hauteur du chevêtre, n'est pas concerné par cette étude d'optimisation car ces butons ont été dimensionnés pour reprendre la totalité des efforts du pont. Leur dimensionnement est donc indépendant des résultats du modèle.

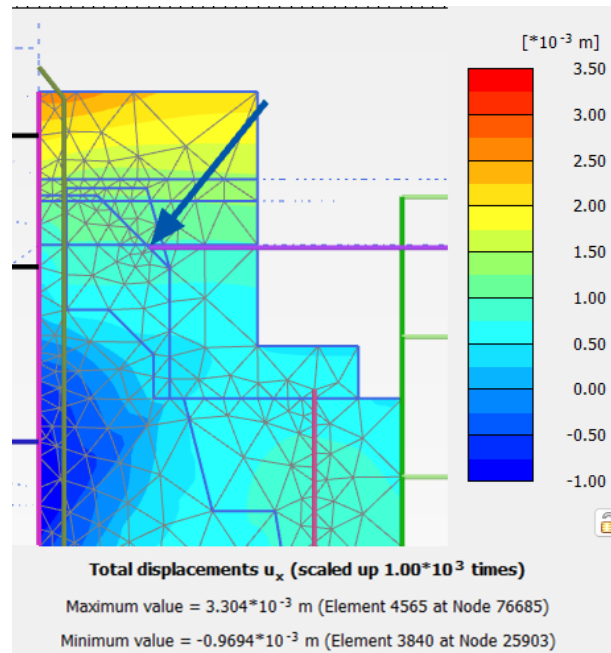


Figure 4 : Déplacements horizontaux en phase de fin des terrassements du modèle 2D

4 Modélisation aux éléments finis 3D

4.1 Hypothèse de modélisation

Le modèle 3D a été réalisé en assumant les hypothèses :

- Le pont Sainte Devote a été modélisé avec sa géométrie réelle. La structure a été prise en compte à l'aide d'éléments volumiques avec un module de 20GPa et un poids propre. La descente de charge de service du pont a été appliquée sur le tablier.
- Le phasage adopté dans le modèle 3D, reflète l'historique de construction vis-à-vis du viaduc Ste Devote, tenant compte de la présence du vallon à l'étape initiale, précédant la construction de la gare souterraine SNCF.
- L'écran de soutènement est modélisé à l'aide d'éléments « Embedded beams » pour les micropieux et d'éléments volumique pour le béton projeté qui a été activé en construction par passes d'excavation.
- Tous les sondages ont été modélisés pour former une stratigraphie aussi proche de l'état réel que possible.
- Le vallon et la gare existante sont modélisés à l'aide des éléments volumiques avec poids et raideurs équivalents.
- Pour des soucis de maillage, les risbermes d'excavation n'ont pas été modélisées.

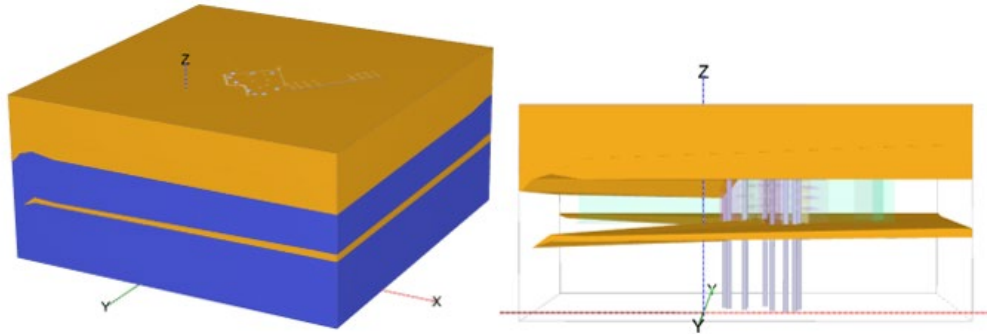


Figure 5 : Stratigraphie du modèle 3D avec zoom sur les zones de calcaire altéré

4.2 Paramètres d'interface

Les paramètres d'interface sont pris similairement à ceux du modèle 2D (Voir 3.2)

4.3 Modélisation et phasage

Le phasage est similaire à celui du modèle 2D (Voir 3.3)

4.4 Résultats

La convention de signe ainsi que les deux points de référence sont représentées dans la figure ci-contre :

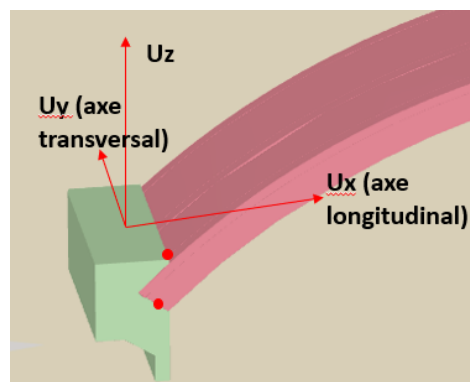
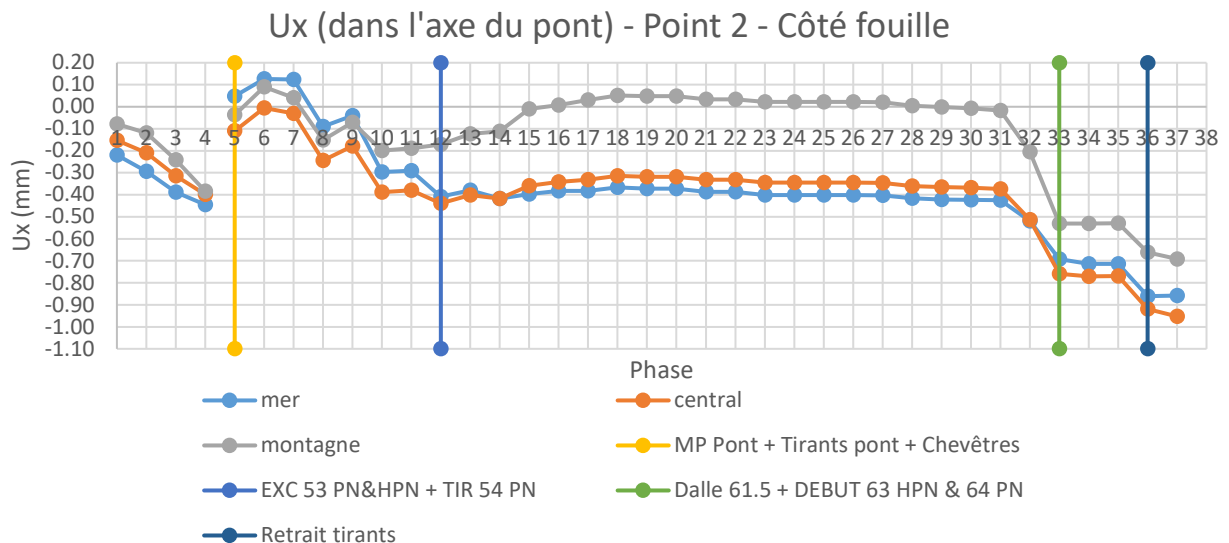
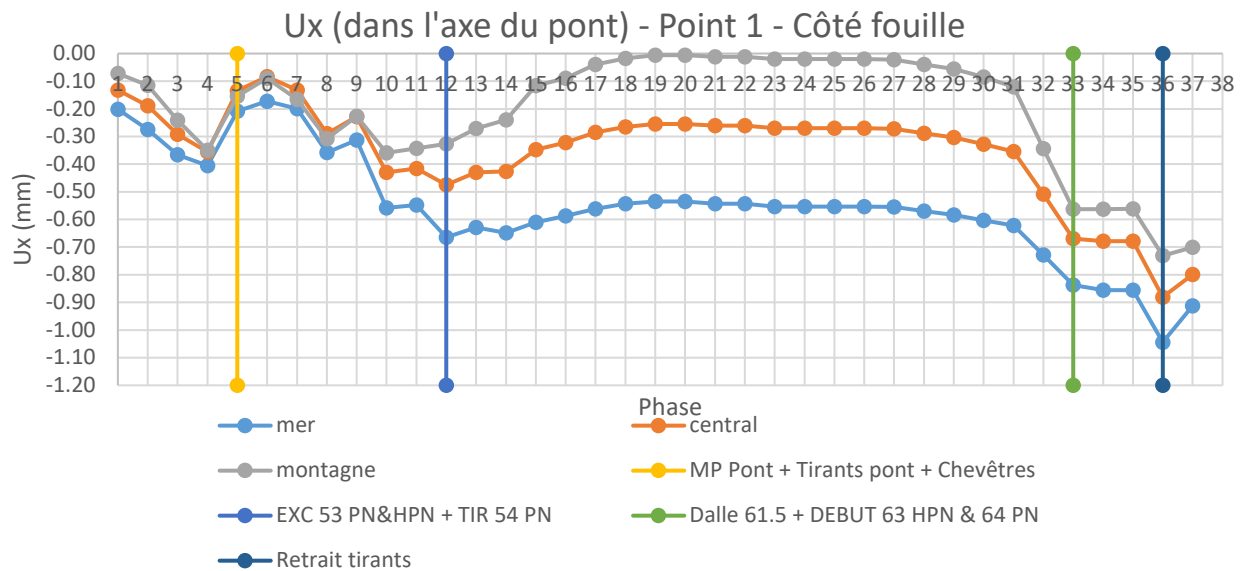


Figure 6 : Convention de signe et points de référence

Les résultats des déplacements dans les figures suivantes sont donnés au point d'intersection des arcs avec la culée (point 1) et au sommet de la culée (point 2).





Après l'excavation au fond de fouille on observe un rapprochement progressif des deux culées. Ce phénomène peut être expliqué par le comportement des écrans après cette phase. Si on regarde la déformée de soutènement on observe qu'en raison des excavations et de la précharge des butons, il y a une transmission des charges vers le pont. Tous les déplacements observés restent dans la limite des 2 mm imposée par le projet, les courbes ont été transmises aux équipes structure, accompagnées par les raideurs du soutènement et du calcaire pour vérifier la stabilité structurelle du pont. Ces itérations ont permis de valider l'optimisation du butonnage réalisée par l'étude du modèle 2D.

5 Conclusions

Cette étude a permis entre autres d'optimiser les paramètres d'interfaces adoptés dans la zone d'influence du sol d'assise de la culée, ainsi que les sections des butons et leur mise en précharge, en assurant évidemment la stabilité du pont et en respectant les limites de tassements des avoisinants. Elle a également permis de déterminer les effets sur l'ouvrage dans le cas où les limites d'intensité de la force de traction des tirants de renforcement du pont et de précharge des butons seraient atteintes.

Le projet a fait l'objet de multiples instrumentations en termes de mouvements et de mesures de contraintes. Aujourd'hui, alors que l'excavation a atteint le fond de fouille, les déplacements mesurés constatés sur site sont proches de ceux obtenus par le modèle 3D. Ces instrumentations et la comparaison des mesures tout au long de l'excavation avec les estimations des modèles ont également permis une approche observationnelle et d'autres optimisations sur le phasage de débutonnage en particulier.