

Grand Paris Express L15 Ouest – OS 3201P – Complémentarité des approches 2D et modélisations 3D dans le dimensionnement d'un ouvrage de soutènement en bilobe

Grand Paris Express L15 West – OS 3201P – Complementarity of 2D and 3D modeling approaches for the design of a bilobed retaining structure

Ulysse PASQUER¹, Loïc DUGELAS², Laure DELVA¹, Thomas LE COR^{1*}

1 NGE Fondations, Direction Technique, Rennes, France

2 NGE Fondations, Pôle R&I, Grenoble, France

**tlecor@ngefondations.fr*

RESUME : Dans le cadre du marché de conception-réalisation de la ligne 15 Ouest lot 2 du Grand Paris Express, l'ouvrage de service OS 3201P réalisé est constitué d'un bilobe réalisé en parois moulées de 29 m de diamètre par lobe et terrassé à 31 m de profondeur. L'objet de l'article est de présenter les résultats de l'étude des parois moulées, tant dans les zones courantes que dans les singularités propres à ce type d'ouvrage. Une première analyse a été menée par l'approche aux coefficients de réaction 2D (logiciel RIDO©), suffisante pour représenter les parties courantes des lobes. Pour affiner la compréhension du comportement global et étudier les zones complexes, des modèles tridimensionnels ont ensuite été développés : des modèles EF 3D non phasés sous ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS©, puis un modèle 3D phasé avec interaction sol-structure (ISS) sous PLAXIS© 3D. Ces modélisations permettent d'étudier des phénomènes non accessibles directement en 2D : répartition des contraintes à la jonction des lobes (poutre de jonction), influence des ouvertures de tunnel et efforts transmis au diaphragme central. Les résultats obtenus montrent que l'approche 2D constitue un outil pertinent et opérationnel pour l'étude des parties courantes, tandis que les modèles 3D se révèlent utiles pour fiabiliser l'évaluation des sollicitations dans les zones singulières. Le modèle phasé apporte en outre une représentation plus fidèle du comportement réel, car il prend en compte les interactions progressives sol-structure, permettant de capturer les effets non linéaires et l'historique des contraintes et déformations. Cette démarche, qui sera détaillée dans l'article, met en évidence les limites et la complémentarité entre les approches 2D et 3D pour l'analyse d'ouvrages bilobe profonds.

ABSTRACT: As part of the design-build contract for the Grand Paris Express Line 15 West lot 2, the constructed service structure OS 3201P consists of a bilobed shaft formed by diaphragm walls, each lobe having a diameter of 29 m and excavated to a depth of 31 m. The purpose of this paper is to present the results of the diaphragm wall design study, both in the standard areas of the lobes and in the specific singular zones inherent to this type of structure. First, an analysis was carried out using the 2D subgrade reaction approach (RIDO© software), which proved sufficient to represent the behavior of the regular sections of the lobes. To refine the understanding of the global behavior and to investigate the complex areas, three-dimensional models were then developed: non-staged 3D finite element models using ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS©, followed by a staged 3D model including soil-structure interaction (SSI) using PLAXIS© 3D. These models make it possible to study phenomena that cannot be directly captured in 2D: stress distribution at the junction between lobes (junction beam), influence of tunnel openings, and forces transmitted to the central diaphragm. The results show that the 2D approach is a relevant and efficient tool for the analysis of regular areas, while the 3D models are valuable for reliably evaluating the stresses in singular zones. Moreover, the staged model provides a more realistic representation of the actual behavior, as it accounts for progressive soil-structure interaction, enabling the capture of non-linear effects and the history of stresses and deformations. This methodology, detailed in the paper, highlights both the limitations and the complementarity of 2D and 3D approaches for the analysis of deep bilobed excavation structures.

Mots-clés: Grand Paris Express ; paroi moulée ; puits bilobe ; modélisation 3D ; interaction sol-structure

1 INTRODUCTION

L'ouvrage de service OS 3201P, réalisé dans le cadre du marché de conception-réalisation de la ligne 15 Ouest (M2 Ouest) du Grand Paris Express et implanté à Gennevilliers (92), est un puits bilobe profond en parois moulées. La géométrie particulière de cet ouvrage, associée à un terrassement de plus de 30 m, induit un comportement marqué par des effets tridimensionnels, notamment au niveau des jonctions entre lobes, du diaphragme central et des ouvertures de tunnel.

L'étude de dimensionnement a été engagée à l'aide d'une approche 2D aux coefficients de réaction (RIDO), adaptée aux zones courantes. Cependant, certaines singularités nécessitent une analyse plus détaillée. Pour cela, quatre modèles 3D non phasés ont été développés sous ROBOT Structural Analysis© afin de représenter les phases critiques, puis un modèle 3D phasé avec interaction sol-structure sous PLAXIS© 3D afin de reproduire l'historique réel des travaux.

L'objectif de cet article est de présenter cette démarche, d'exposer les apports respectifs des approches 2D et 3D dans l'analyse du comportement du puits bilobe, et d'en tirer les conséquences pour le dimensionnement des panneaux courants et de jonction.

2 PRESENTATION DE L'OUVRAGE ET CONTEXTE

2.1 Fonction et caractéristiques générales

L'ouvrage OS 3201P est un puits bilobe profond destiné, en phase provisoire, au lancement des tunneliers et à la descente des rails dans le cadre du chantier de la ligne 15 Ouest. En phase définitive, il assure des fonctions d'exploitation telles que l'accès de secours, la ventilation et l'évacuation. L'ouvrage est constitué de deux lobes circulaires reliés par des panneaux de jonction et réalisés en parois moulées de grande profondeur, assurant à la fois le soutènement temporaire du creusement et la résistance structurelle en service.

2.2 Géométrie du bilobe

L'ouvrage est constitué de deux lobes circulaires de diamètre utile 27 m, réalisés en parois moulées d'environ 50 m de profondeur. Les panneaux présentent une épaisseur de 1,0 m dans les zones courantes et de 1,2 m au niveau des jonctions et du diaphragme central. Le terrassement atteint un fond de fouille d'environ 31 m. La Figure 1 présente une vue

3D de l'ouvrage, illustrant la géométrie générale du puits.

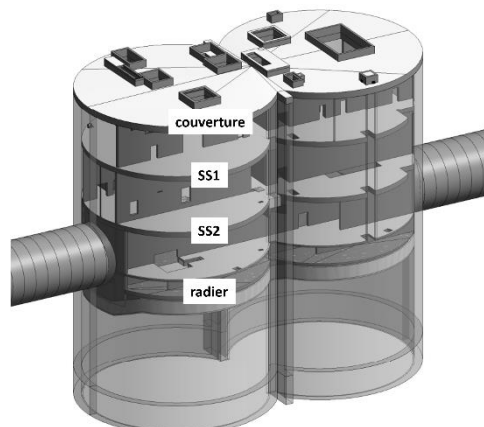


Figure 1 : Vue 3D de l'ouvrage OS 3201P

2.3 Singularités structurelles

L'ouvrage présente plusieurs zones singulières influençant son comportement : les panneaux de jonction reliant les deux lobes, le diaphragme central démoli par étapes au cours du chantier, ainsi que les ouvertures de tunnel venant perturber localement la continuité des parois moulées. Ces singularités génèrent des concentrations d'efforts et des effets tridimensionnels qui ne peuvent être appréhendés de manière précise en 2D. La Figure 2 illustre la localisation de ces zones particulières au sein du bilobe.

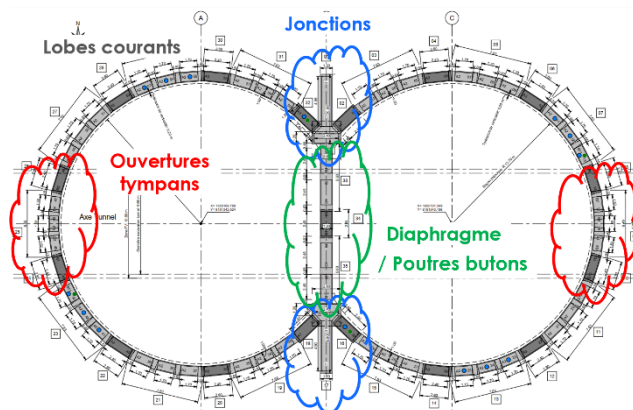


Figure 2 : Localisation des singularités structurelles

2.4 Rôle des panneaux de jonction

Les panneaux de jonction assurent la continuité structurelle entre les deux lobes et jouent un rôle essentiel dans la transmission des efforts annulaires. Ils reprennent l'interaction horizontale entre lobes, reportent les sollicitations vers les poutres butons et le diaphragme central, et concentrent une part significative des moments fléchissants lors des phases critiques de terrassement et de démolition du

diaphragme. Leur comportement est donc central pour la compréhension globale du bilobe et nécessite des analyses tridimensionnelles spécifiques.

2.5 Contexte géotechnique

Le site présente une stratigraphie typique du secteur de Gennevilliers, composée de remblais superficiels, d'Alluvions Récentes, des Sables de Beauchamp puis des Marnes et Caillasses reposant sur le Calcaire Grossier, utilisé comme substratum porteur. Les propriétés mécaniques retenues pour les calculs proviennent des investigations géotechniques du marché et ont été intégrées selon les besoins des approches 2D et 3D. Le niveau d'eau, situé à proximité du terrain naturel, impose une prise en compte systématique des pressions hydrostatiques.

2.6 Phasage des travaux

Le phasage de réalisation influe directement sur la redistribution des efforts dans le bilobe. Il comprend notamment :

1. l'exécution des parois moulées puis de la poutre de couronnement ;
2. un premier terrassement à ciel ouvert sous la poutre buton SS2, avec rabattement de la nappe ;
3. la démolition partielle du diaphragme central et la réalisation de la poutre SS2 au centre de l'ouvrage ;
4. la poursuite du terrassement jusqu'au fond de fouille ;
5. la réalisation des radiers dans chacun des lobes ;
6. la démolition du diaphragme sous SS2 puis le clavage du radier assurant la continuité entre lobes et permettant l'arrêt du pompage ;
7. la remontée du génie civil, incluant la démolition progressive des parties restantes du diaphragme et la mise en place successive des poutres SS1 puis de couverture.

Ce séquençement, marqué par des évolutions successives de rigidité et de chemin de charge, peut justifier le recours à des modèles tridimensionnels capables de représenter l'historique structurel réel.

3 MODELISATION 2D AUX COEFFICIENTS DE REACTION

3.1 Objectifs de l'approche 2D

L'approche 2D aux coefficients de réaction (RIDO) vise à représenter rapidement et de manière fiable le comportement des parois moulées dans les zones courantes des lobes. Elle permet d'estimer les

enveloppes d'efforts internes et les déplacements horizontaux, en intégrant les conditions géotechniques représentatives du site. Cette modélisation constitue ainsi une base de dimensionnement opérationnelle pour les panneaux courants.

3.2 Hypothèses et paramètres

L'approche 2D repose sur la méthode MISS-K aux coefficients de réaction, mise en œuvre avec le logiciel RIDO. Chaque lobe est assimilé à un puits circulaire théorique de même diamètre avec prise en compte de sa rigidité cylindrique. Les coefficients de réaction horizontaux sont définis à partir des caractéristiques géotechniques du site et de l'inertie de la paroi moulée selon la formule de Schmitt (norme NF P94-282). Les sollicitations considérées incluent les poussées de terres et d'eau ainsi que les surcharges au terrain naturel. Les appuis présents selon les phases, tels que le radier ou les ouvrages intermédiaires, sont représentés par des raideurs équivalentes.

3.3 Résultats en zones courantes

Les résultats obtenus en 2D en zones courantes mettent en évidence un comportement conforme à celui attendu pour un soutènement fonctionnant en anneau. Dans cette configuration, la sollicitation est principalement annulaire, la rigidité cylindrique du lobe limitant fortement les effets de flexion.

Dans la phase de terrassement au fond de fouille, la déformée présente un déplacement horizontal maximal de 3 mm, caractéristique de ce mode de fonctionnement (voir résultats RIDO sur la Figure 3).

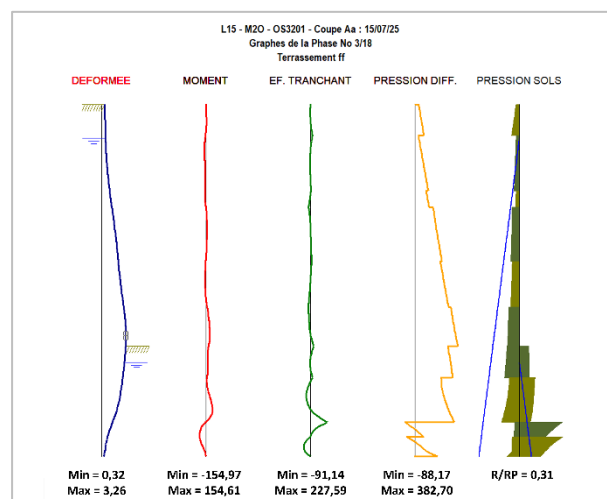


Figure 3 : Résultats RIDO courants - terrassement FF

La contrainte annulaire σ_θ est ensuite déduite du déplacement horizontal et de la rigidité du cylindre équivalent selon la relation suivante:

$$\sigma_\theta = k_{cyl} \cdot u_{max}$$

où k_{cyl} est la rigidité cylindrique calculée en fonction de la géométrie du lobe et u_{max} est le déplacement horizontal maximal du soutènement.

La contrainte annulaire obtenue aux ELS est de 5,30 MPa, inférieure à la contrainte moyenne admissible du béton C40/50 (9,23 MPa).

3.4 Limites de l'approche 2D

Si l'approche 2D peut permettre de représenter efficacement le comportement des panneaux courants, elle ne peut rendre compte des effets tridimensionnels associés à la géométrie en bilobe. Elle ne modélise ni l'interaction entre les deux lobes, ni l'évolution de la rigidité liée à la démolition progressive du diaphragme, ni l'influence locale des ouvertures de tunnel. De même, les redistributions d'efforts induites par le phasage réel des travaux, notamment au niveau des panneaux de jonction, ne peuvent être appréhendées de manière satisfaisante en déformée plane.

4 MODELISATIONS 3D

4.1 Objectifs du recours à la 3D

Les modélisations 3D complètent l'approche 2D en permettant de représenter les phénomènes suivants : interaction entre lobes, rôle du diaphragme central, influence des ouvertures de tunnel et redistribution globale des efforts au cours des phases successives du chantier. Elles permettent à la fois de confirmer l'étude des zones courantes et d'étudier les zones singulières (jonction et panneaux adjacents, diaphragme), où les effets 3D jouent un rôle déterminant sur les déplacements et sollicitations.

Deux types de modélisations 3D sont étudiés :

- ROBOT : structure seule ;
- PLAXIS : interaction sol-structure phasée.

4.2 Hypothèses communes de modélisation

Les modèles 3D réalisés sous ROBOT et PLAXIS s'appuient sur un ensemble d'hypothèses communes, destinées à garantir la cohérence des comparaisons entre approches. On s'assure ainsi que les écarts observés entre les modèles ROBOT et PLAXIS résultent uniquement de la différence de nature des modèles.

4.2.1 Géométrie et propriétés des éléments

L'ensemble des modélisations reprend la géométrie réelle de l'ouvrage : parois moulées, diaphragme central, radier et poutres butons lorsque présentes dans la phase considérée. Les épaisseurs des panneaux,

modélisés en éléments plaques, sont uniformisées dans tous les modèles, avec 0,94 m en zones courantes (épaisseur de l'anneau inscrit dans le panneautage à facettes) et 1,2 m au droit de la jonction et du diaphragme.

Les inerties, propriétés mécaniques et caractéristiques des éléments sont identiques dans ROBOT et PLAXIS, ce qui permet d'isoler strictement les différences liées au type de modélisation.

4.2.2 Modélisation de la poutre de jonction

La jonction entre les lobes est modélisée à partir d'une section en T, conformément à la géométrie de l'ouvrage. La section est décomposée en deux éléments complémentaires :

- une poutre en T, modélisée par un élément poutre de rigidité équivalente à la section réelle ;
- deux plaques internes de liaison, positionnées à l'intérieur du volume réel du T. Leurs propriétés sont ajustées pour assurer la transmission des efforts sans reprendre de moment fléchissant, ce qui permet de concentrer la flexion dans l'élément poutre, représentatif du fonctionnement réel de la section.

La section en T est connectée aux lobes courants par des panneaux de parois moulées d'épaisseur augmentée (1,2 m), conformément à la géométrie de l'ouvrage.

La Figure 4 illustre cette modélisation de la jonction.

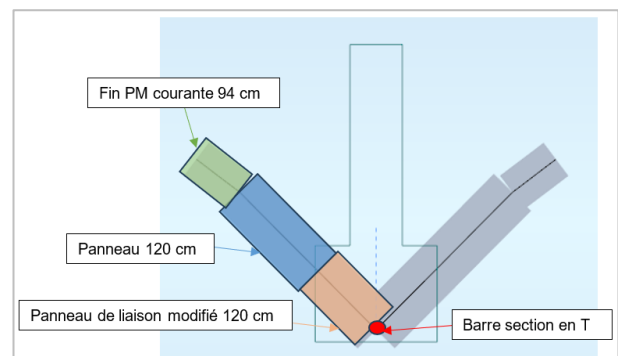


Figure 4 : Schéma de principe de modélisation de la poutre de jonction

4.2.3 Liaisons et connexions

Les connexions entre panneaux, diaphragme, radier et ouvrages internes sont définies de manière cohérente dans toutes les modélisations. En particulier, deux hypothèses sont retenues pour la connexion entre la jonction des lobes et le diaphragme : liaison glissante ou rigide.

4.3 Modèles 3D non phasés sous ROBOT

4.3.1 Phases représentées et objectifs

Quatre modèles 3D ont été élaborés sous ROBOT pour représenter les phases critiques du chantier :

1. terrassement au fond de fouille,
2. démolition partielle du diaphragme sous SS2 (phase dimensionnante pour la jonction),
3. poutres butons réalisées (2 variantes).

4.3.2 Hypothèses de modélisation

La modélisation comprend les panneaux de paroi moulée, le diaphragme central, les poutres SS2/SS1 selon les phases, ainsi que la poutre de jonction en Té représentée conformément aux hypothèses communes.

Les actions du terrain sont appliquées sous forme de pressions équivalentes issues de RIDO, assurant une cohérence directe avec l'approche 2D.

Les conditions limites exploitent la symétrie longitudinale de l'ouvrage et intègrent la réaction du sol au moyen d'un appui élastique latéral représentatif. Le pied de paroi est bloqué en déplacement vertical, tandis que le radier est modélisé en appui simple surfacique sur l'ensemble de son emprise.

4.3.3 Apports et limites

Les modèles ROBOT permettent d'analyser la répartition 3D des efforts au sein de la structure et d'identifier les zones fortement sollicitées lors des phases critiques pour le dimensionnement de l'ouvrage, notamment la jonction et les panneaux adjacents.

En revanche, l'absence d'interaction sol-structure et de phasage conduit à une représentation ponctuelle du comportement, sans redistribution progressive des efforts.

La Figure 5 présente une vue d'ensemble de l'un des modèles ROBOT réalisés.

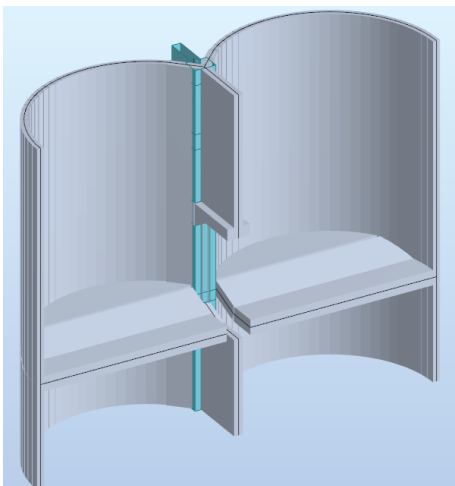


Figure 5 : Aperçu du modèle 3D ROBOT n°2

4.4 Modèle ISS phasé sous PLAXIS 3D

4.4.1 Principes généraux

Un modèle 3D phasé a été développé sous PLAXIS 3D afin de représenter l'historique réel des travaux et l'évolution progressive des sollicitations dans l'ouvrage. Ce modèle reprend le phasage détaillé au §2.6.

Contrairement aux modèles structurels ROBOT, l'approche PLAXIS intègre explicitement le sol, les interfaces sol-structure et les conditions hydrauliques, permettant de suivre l'accumulation des déformations au cours du chantier.

4.4.2 Hypothèses de modélisation

Le comportement du sol est représenté par le modèle Hardening Soil, apte à décrire la non-linéarité et la dépendance de la rigidité au niveau de contrainte. Les interfaces sol-structure permettent de reproduire les transferts de contraintes et le glissement éventuel entre le sol et les parois.

Les éléments structuraux (parois moulées, diaphragme, radier, poutres butons) sont intégrés dans le modèle et suivent les mêmes caractéristiques géométriques que dans les modèles ROBOT.

Les conditions hydrauliques prennent en compte la nappe et son rabattement temporaire, conformément aux étapes du chantier.

4.4.3 Apports de la modélisation phasée

Le modèle PLAXIS restitue :

- les déplacements cumulatifs associés au déroulement réel du chantier ;
- les mécanismes 3D, notamment l'influence de la démolition progressive du diaphragme et l'effet de voûte des lobes ;
- une redistribution plus réaliste des sollicitations, généralement moins conservatrice que dans un modèle structurel ponctuel.

Une vue du modèle PLAXIS est présentée sur la Figure 6.

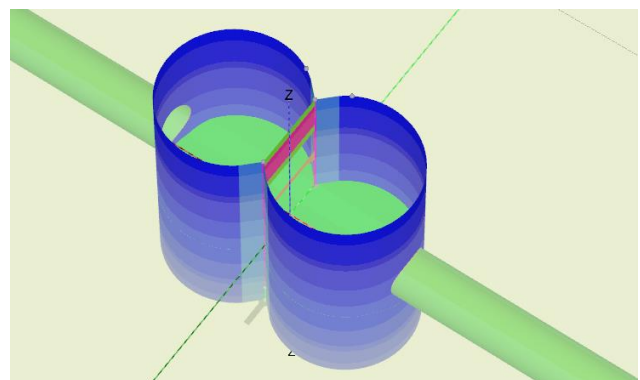


Figure 6 : Aperçu du modèle PLAXIS 3D

5 COMPARAISONS ENTRE APPROCHES 2D ET 3D

La comparaison entre les approches 2D et 3D vise d'une part à vérifier, en zone courante, la cohérence du comportement global modélisé (déplacements et contraintes annulaires), et d'autre part à analyser les singularités du bilobe, qui mettent en évidence les apports spécifiques des modèles 3D.

5.1 Comportement global des lobes

5.1.1 Déplacements horizontaux

Pour l'analyse du comportement global des lobes, les déplacements horizontaux en zone courante sont comparés entre les modèles RIDO, ROBOT et PLAXIS sur la Figure 7 (phase de démolition partielle du diaphragme sous SS2, critique pour le dimensionnement).

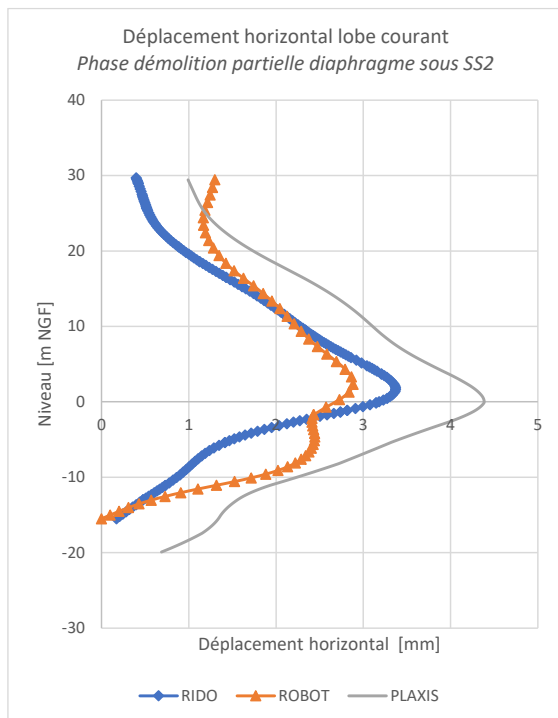


Figure 7 : Déplacements horiz. en zone courante

Les déformées obtenues avec les différents modèles présentent des profils similaires et des ordres de grandeur proches, de l'ordre de 3 à 4 mm. Ces faibles déplacements traduisent un fonctionnement global en anneau, la rigidité cylindrique limitant les flexions locales.

Dans PLAXIS, les déplacements sont légèrement plus élevés que dans ROBOT, du fait de la prise en compte du phasage, qui introduit un cumul progressif des déformations. Cet écart reste toutefois faible et n'affecte pas la conformité du comportement global entre les approches.

5.1.2 Contrainte annulaire

La comparaison des trois modèles montre une même tendance générale pour la contrainte annulaire avec des profils similaires et un maximum situé au droit du radier. Les valeurs maximales obtenues sont du même ordre de grandeur, autour de 5 à 6 MPa.

La comparaison des trois approches montre une cohérence globale sur les déplacements et les contraintes annulaires en zones courantes, confirmant le fonctionnement en anneau du lobe et la pertinence de l'approche 2D pour le dimensionnement des panneaux courants. Les écarts observés restent limités et proviennent essentiellement des différences de modélisation (déformée plane, structure seule, phasage, interaction sol-structure), tandis que les effets tridimensionnels significatifs se concentrent dans les zones singulières présentées ci-après.

5.2 Panneaux de jonction

L'analyse 2D des panneaux de jonction est conduite en représentant la poutre de jonction dans RIDO et en lui appliquant les efforts annulaires issus de chacun des lobes, assimilés à des chargements horizontaux.

Les comparaisons entre RIDO, ROBOT et PLAXIS sont réalisées sur la phase dimensionnante commune : démolition partielle du diaphragme sous la poutre SS2. Les Figure 8 et Figure 9 présentent respectivement les moments fléchissants et efforts tranchants ELU obtenus dans la poutre de jonction.

Les trois modèles présentent des formes de courbes similaires, ce qui confirme la cohérence globale de la représentation du comportement. En revanche, les amplitudes diffèrent nettement : les efforts les plus élevés sont obtenus sous RIDO, suivis de ROBOT, tandis que PLAXIS fournit les valeurs les plus faibles. Le Tableau 1 synthétise ces résultats.

Tableau 1 : Comparaison efforts internes poutre jonction

Effort	RIDO	ROBOT	PLAXIS
M [MN.m]	172,5	123,3	94,6
T [MN]	49,2	38,0	28,5

Ces écarts s'expliquent par les différences fondamentales entre les approches :

- RIDO ne modélise pas les effets de phasage 3D comme le blocage des parois par les plots de radier des lobes, ce qui conduit à des valeurs conservatrices ;
- ROBOT reproduit correctement la géométrie 3D et la poutre de jonction, mais sans interaction sol-structure ;
- PLAXIS intègre le phasage de construction et une interaction sol-structure plus réaliste, entraînant

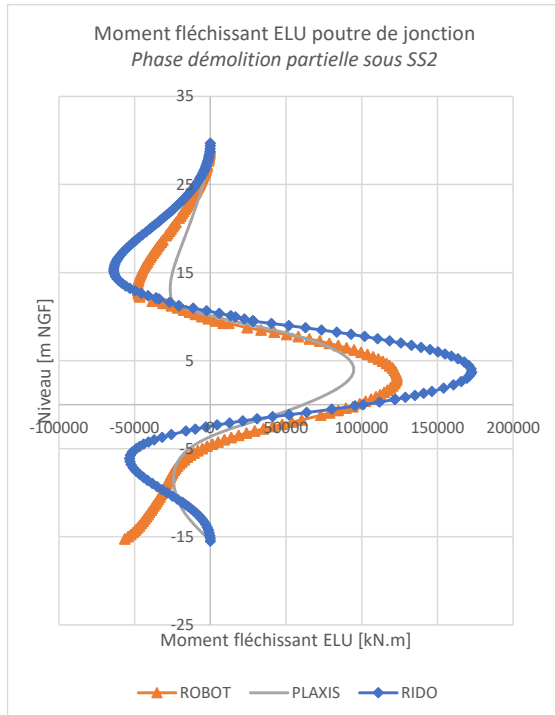


Figure 8 : Moment fléchissant ELU poutre de jonction

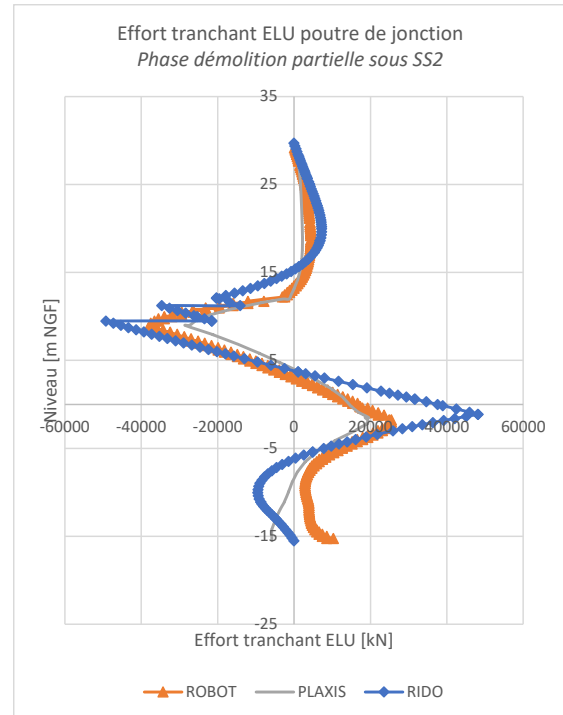


Figure 9 : Effort tranchant ELU poutre de jonction

une redistribution progressive des charges et donc des sollicitations plus faibles.

5.3 Influence des conditions de liaison de la jonction

Les modèles 3D montrent que les conditions de liaison entre les lobes et la poutre de jonction influencent directement les sollicitations de la poutre. Deux hypothèses ont été étudiées :

- une liaison glissante, qui limite le transfert d'effort normal et maximise la flexion dans la jonction ;
- une liaison rigide, qui réduit légèrement la flexion mais transmet un effort de traction sur toute la hauteur de la poutre, principalement en phases provisoires, lié au blocage des déformations des lobes. En fiche, cet effort s'additionne à l'effet de la sous-pression ramenée par le radier.

Ces résultats montrent que l'hypothèse de liaison lobes/jonction adoptée modifie la répartition des efforts internes dans la jonction, en particulier pour l'effort normal. Le choix du mode de liaison constitue ainsi un paramètre déterminant pour représenter correctement le comportement réel et pour établir un dimensionnement fiable du panneau de jonction.

5.4 Effets locaux sur les panneaux adjacents à la jonction

La géométrie en bilobe induit des concentrations locales d'efforts dans les panneaux de paroi moulée

adjacents au panneau de jonction. La cartographie des moments fléchissants du modèle PLAXIS (Figure 10) met en évidence une augmentation nette des sollicitations dans cette zone, liée aux déformations de la jonction et à l'interaction entre les deux lobes.

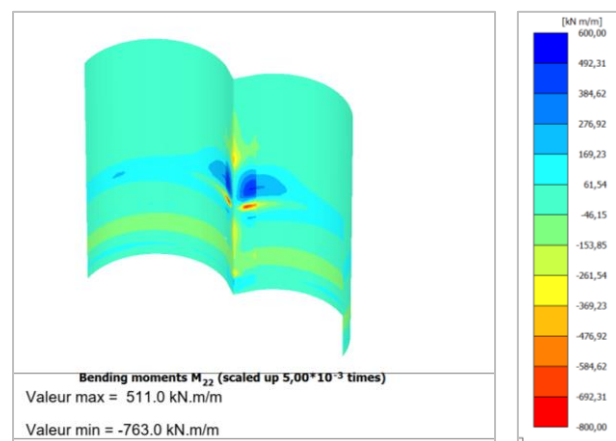


Figure 10 : Carto. moment fléchissant lobes PLAXIS

Ces effets locaux, qui peuvent être impactants pour le dimensionnement des armatures, ne peuvent être appréhendés de manière satisfaisante qu'à travers des modèles tridimensionnels, capables de représenter les déformations locales, l'interaction entre lobes et la redistribution des efforts liée au phasage.

6 INCIDENCES SUR LE DIMENSIONNEMENT

6.1 Efforts retenus

Le dimensionnement des parois moulées repose sur une combinaison raisonnée des résultats 2D et 3D, en fonction du niveau de singularité des zones étudiées. Pour les panneaux courants, les sollicitations dominantes étant annulaires et bien capturées par la modélisation en déformée plane, les efforts RIDO sont retenus pour la justification des armatures. Ces résultats offrent une enveloppe représentative du comportement global en zone courante.

Pour les zones singulières difficilement représentables en 2D, les efforts retenus comme base de dimensionnement des armatures sont les enveloppes d'efforts des modèles ROBOT et PLAXIS. Les sollicitations de la poutre de jonction, des panneaux adjacents à la jonction et du diaphragme central montrent que :

- les efforts ROBOT sont généralement plus élevés, car la non prise en compte du phasage ne permet pas les redistributions progressives d'efforts ;
- les efforts PLAXIS sont plus faibles, en raison du caractère phasé du modèle et de la prise en compte fine de l'interaction sol-structure ;
- les efforts RIDO sont trop conservatifs pour la jonction et ne reflètent pas le comportement réel.

6.2 Conception des cages d'armatures de jonction

La cage d'armatures de jonction présente une section en T, dont la table côté fouille se situe à l'intersection des deux lobes. Son dimensionnement est mené en flexion composée, sur la base des enveloppes d'efforts des modèles 3D ROBOT et PLAXIS.

La hauteur importante de la cage conduit à la diviser en trois éléments verticaux, assemblés lors de la mise en place. En plan, la section ($6,52 \text{ m} \times 2,40 \text{ m}$) dépasse les gabarits habituels de transport ; chaque élément est donc scindé en deux demi-blocs, raccordés sur site par coupleurs de liaison (Figure 11).

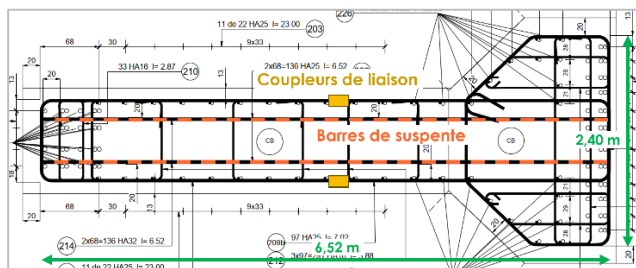


Figure 11 : Coupe de la cage d'armatures de jonction

Outre les aciers longitudinaux et transversaux nécessaires à la reprise de la flexion et de l'effort tranchant, la cage intègre des barres de suspente disposées dans la partie centrale. Ces barres reprennent en traction les efforts en provenance des lobes, permettant de mobiliser l'ensemble de la section en T. Les sollicitations élevées dans la jonction conduisent ainsi à un ferrailage global conséquent, dimensionné pour répondre aux niveaux d'efforts identifiés dans les modèles 3D.

7 CONCLUSIONS

L'étude croisée en 2D et 3D a permis d'identifier clairement le domaine de validité de chacune des approches pour l'étude d'ouvrages de type bilobe. Les modèles 2D se révèlent adaptés au dimensionnement des panneaux courants, pour lesquels le fonctionnement global en anneau est correctement restitué. Les modèles 3D apportent en revanche une compréhension utile des singularités : jonction entre lobes, démolition du diaphragme, effets locaux et influence du phasage. Ils permettent une évaluation plus réaliste des sollicitations.

Cette complémentarité a conduit à une démarche de dimensionnement robuste, combinant l'efficacité des modèles 2D pour les zones courantes et la précision des modèles 3D pour les zones critiques. La conception des cages d'armatures de jonction reflète cette approche intégrée, assurant la cohérence structurelle de l'ouvrage sur l'ensemble de ses phases de réalisation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la maîtrise d'œuvre intégrée du projet (groupement Ingé 15) pour les échanges techniques riches ayant permis d'aboutir à la rédaction de cet article.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CFMS (2023). *Recommandations pour la modélisation numérique des ouvrages géotechniques*. Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique. Disponible en ligne : https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/rapport_2023-06-13_rmn_cfms_complet_v5_hd.pdf
- AFNOR (2009). *NF P 94-282 – Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Écrans*. Association Française de Normalisation, Paris.