

OPTIMISATION DES BARRETTES BUTONNANTES DE LA GARE SAINT-DENIS PLEYEL - LIGNE 16 DU GRAND PARIS EXPRESS

BARRETTES'S OPTIMIZATION AT SAINT-DENIS PLEYEL STATION - LINE 16 OF THE GRAND PARIS EXPRESS PROJECT

Alexandre GIROUX¹, Alberto FRAU², Christophe VIARDIN³

¹ et ³ EGIS, Montreuil-sous-Bois, France

² EIFFAGE INFRASTRUCTURES, Velizy-Villacoublay, France

RÉSUMÉ – La réalisation de la fouille de la gare souterraine de Saint-Denis Pleyel a nécessité une disposition constructive particulière pour soutenir localement des parois moulées alors que les solutions classiques étaient impossibles à mettre en œuvre. En phase d'exécution, le principe imaginé lors des études PRO a été adapté selon les méthodes de l'entreprise travaux et a même été optimisé.

ABSTRACT – The excavation of the Saint-Denis Pleyel metro station required a particular constructive arrangement to locally support diaphragm walls while conventional solutions were impossible to implement. During execution studies, the principle imagined during the design studies was adapted according to the methods of the construction company and was even optimized.

1. Introduction

Le projet du métro du Grand Paris express s'est concrétisé au début du XXI^{ème} siècle à la suite de prévisions de l'évolution démographique de la région parisienne (+ 17 à +30% d'ici 2050). Ses principaux objectifs sont de proposer un mode de transport alternatif à la voiture, à l'aube de la décarbonation de nos modes de vie, tout en soutenant le développement économique de la métropole, en reliant les principaux pôles d'activité et en désenclavant des zones urbaines non desservies jusqu'alors par le métro. Il s'agit ainsi de créer 4 lignes nouvelles, soit 200 km d'infrastructure en grande majorité souterraine. Les premières lignes ont été réalisées conformément à la loi MOP : le Maître d'Ouvrage confie la conception d'un projet et le pilotage de son exécution à un Maître d'œuvre. La réalisation du projet est donc de la responsabilité d'une tierce partie : un entrepreneur. Il arrive parfois que pour des raisons de méthode, à la suite d'évolution de projet imprévue, voire du comportement de l'ouvrage au cours de son exécution, la conception évolue... Cette communication propose d'illustrer sur un exemple comment un ouvrage né dans l'imaginaire du concepteur est concrètement réalisé, puis optimisé au cours des travaux. Dans une première partie, l'article présentera les principales caractéristiques de la future gare de Saint-Denis Pleyel et des contraintes qui influencent sa conception. La partie suivante, s'intéressera plus particulièrement au design d'une disposition constructive provisoire originale prévue au marché de travaux. Ensuite, la communication présentera le point de vue de l'entrepreneur et les différentes adaptations du design à la suite des études d'exécution. Enfin, la dernière partie, expliquera les raisons qui ont conduit à l'optimisation en cours de travaux de cette disposition constructive.

2. La ligne 16 du Grand Paris Express et la gare de Saint-Denis Pleyel

Le projet du grand Paris Express prévoit la création d'un métro automatique en périphérie de Paris, sous la direction de la Société des Grands Projets (Maître d'Ouvrage). Il s'agit de créer 4 nouvelles lignes (15, 16, 17 et 18), reliées au réseau actuel par le prolongement

au Nord et au Sud de la ligne 14. Au total, 68 nouvelles gares vont voir le jour. Parmi elles, la gare emblématique de Saint-Denis Pleyel (SDP) sera la plus importante (Viardin, 2020). La maîtrise d'œuvre est confiée au groupement Egis-Tractebel et la réalisation de génie-civil à Eiffage GC. Composée de 3 rectangles imbriqués les uns dans les autres, les dimensions de cette gare de 33 m de profondeur sont hors norme (figure 1).

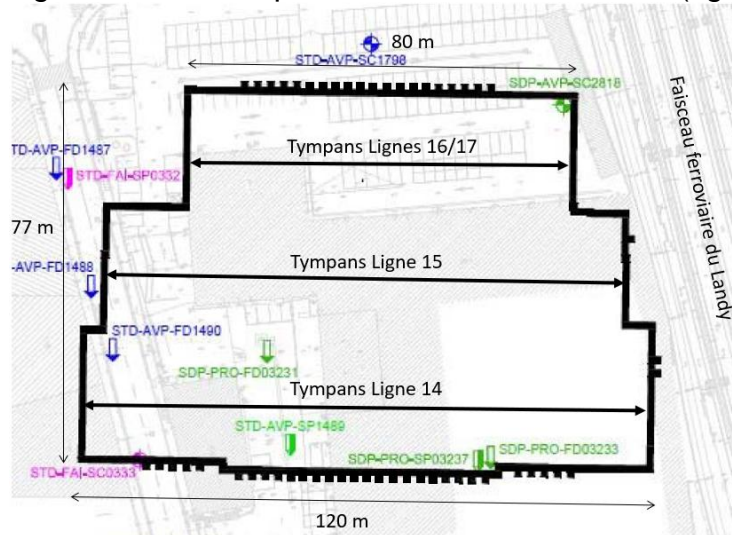


Figure 1 : Vue en plan des parois moulées périphériques de la gare de SDP

Implantée en Seine Saint-Denis, ses principales caractéristiques sont :

- l'interconnexion souterraine entre 4 lignes de métro (14, 15 et 16/17) avec le réseau de transport en commun de surface : RER D, la ligne 13 et les bus ;
- Une fréquentation de 250 000 voyageurs par jour ;
- Une emprise au sol de près de 1 hectare.

Le contexte géologique est celui de la Plaine de France, composé par des roches marno-calcaire tendres, des sables plus ou moins limoneux (figure 2). Le contexte hydrogéologique, dépendant des nappes superficielles et du Bartonien/Lutétien, est influencé par les crues de la Seine, s'écoulant à un peu plus de 1 km à l'Ouest. Les contraintes associées ont fait l'objet d'une publication (Giroux, 2023).

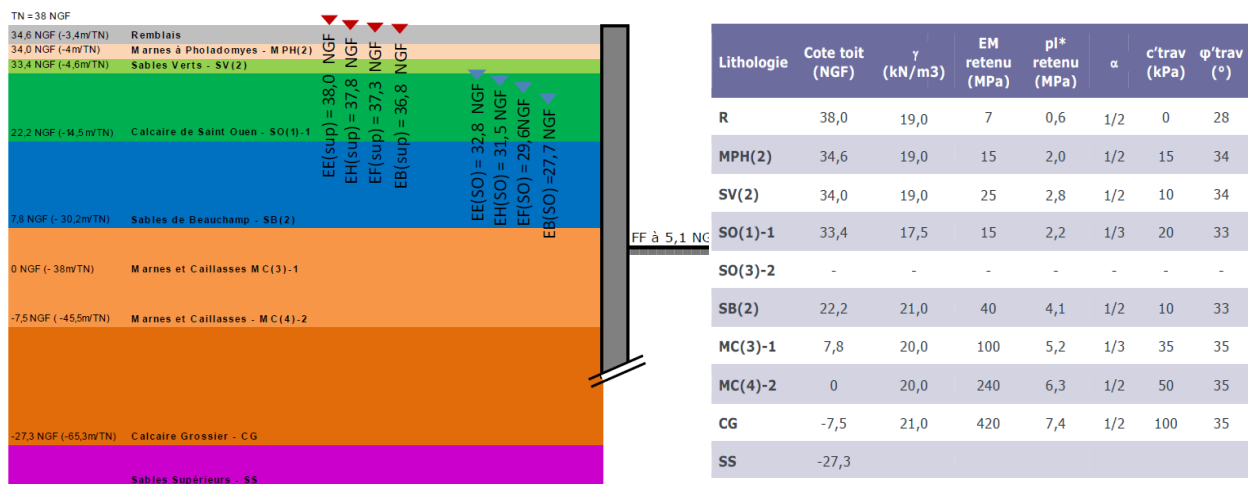


Figure 2 : Contexte géotechnique de la gare de SDP (ligne 16 du GPE)

La gare est implantée à proximité d'avoisnants sensibles : à l'Est, le faisceau ferroviaire du Landy, 250 m de large (le plus grand d'Europe), dont l'exploitation doit être maintenue, et au Nord le FUP, Franchissement Urbain Pleyel, avec sa rampe en terre

construite pendant les travaux de la gare, de 3 à 6 m de haut, pour accéder à un viaduc qui enjambera le faisceau du Landy.

3. Conception de la gare et disposition constructive particulière

Le phasage est lié aux contraintes de calendrier et en particulier à la mise en service prioritaire de la ligne 14 pour les Jeux olympiques d'été de Paris 2024 et des lignes 16/17. Ainsi, les deux tunneliers de ces lignes traverseront la gare en boîte pleine, avant même que le terrassement à fond de fouille soit terminé. En revanche, le tunnelier de la ligne 15 traversera la gare plus tard, une fois le radier et la structure interne terminés. Le plancher du troisième sous-sol étant partiellement réalisé pour laisser la place au tunnelier de la ligne 15 pour traverser la gare. Afin de maîtriser les impacts du chantier sur ces avoisinants, la gare est :

- à l'abri de paroi moulées de 1,8 m d'épaisseur (Launay, 2017) ;
- Terrassée en top and down : la structure interne de la gare est effectuée, au fur et à mesure de l'excavation et portée par 36 poteaux profondés (Zhang, 2024).

Toutefois, ce phasage présente un inconvénient : le plancher du 3ème sous-sol dont l'altitude est sous la clef de voute du tunnel de la ligne 15, ne pourra pas butonner les tympans. La hauteur étant trop grande et la configuration en plan empêchant un report des efforts sur les parois périphériques, des appuis intermédiaires permettant de maîtriser des déformées en surface sont nécessaires au niveau de la sortie et l'entrée en terre du TBM. Parmi les configurations étudiées, le butonnage du tympan sur une barrette provisoire sollicitée transversalement par 3 lits de butons a été retenue (figure 4). Prédimensionnée par des méthodes d'interactions sols-structures aux coefficients de réaction, les calculs tiennent compte des évolutions de la raideur de la barrette sollicitée transversalement et des butons en fonction du phasage. Un calcul itératif sous la forme d'un bi rideau a donc été effectué avec pas moins de 125 itérations. La solution retenue comprend 3 lits de butons provisoires s'appuyant d'une part sur la paroi grâce à une lierne et d'autre part sur deux barrettes de 7,50 m et 1,5 m d'épaisseur, reliées entre elles par un tirant (figure 3).

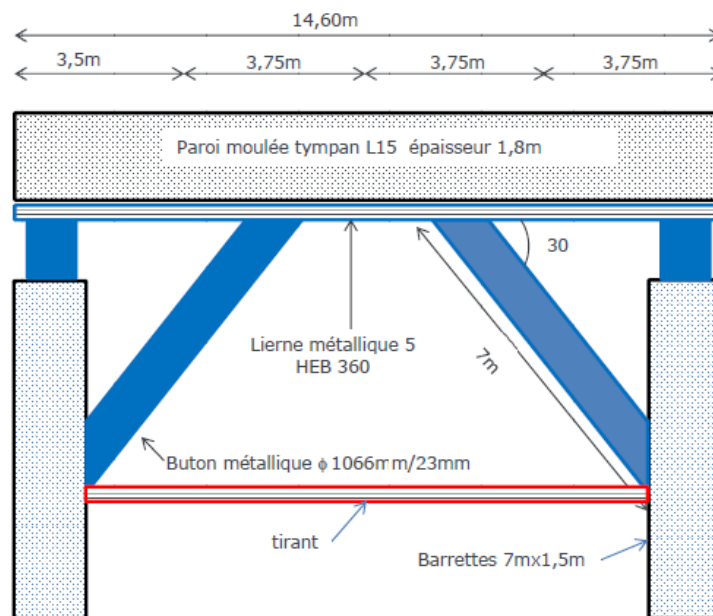


Figure 3 : Principe de l'appui provisoire du tympan Ligne 15 Est – gare SDP

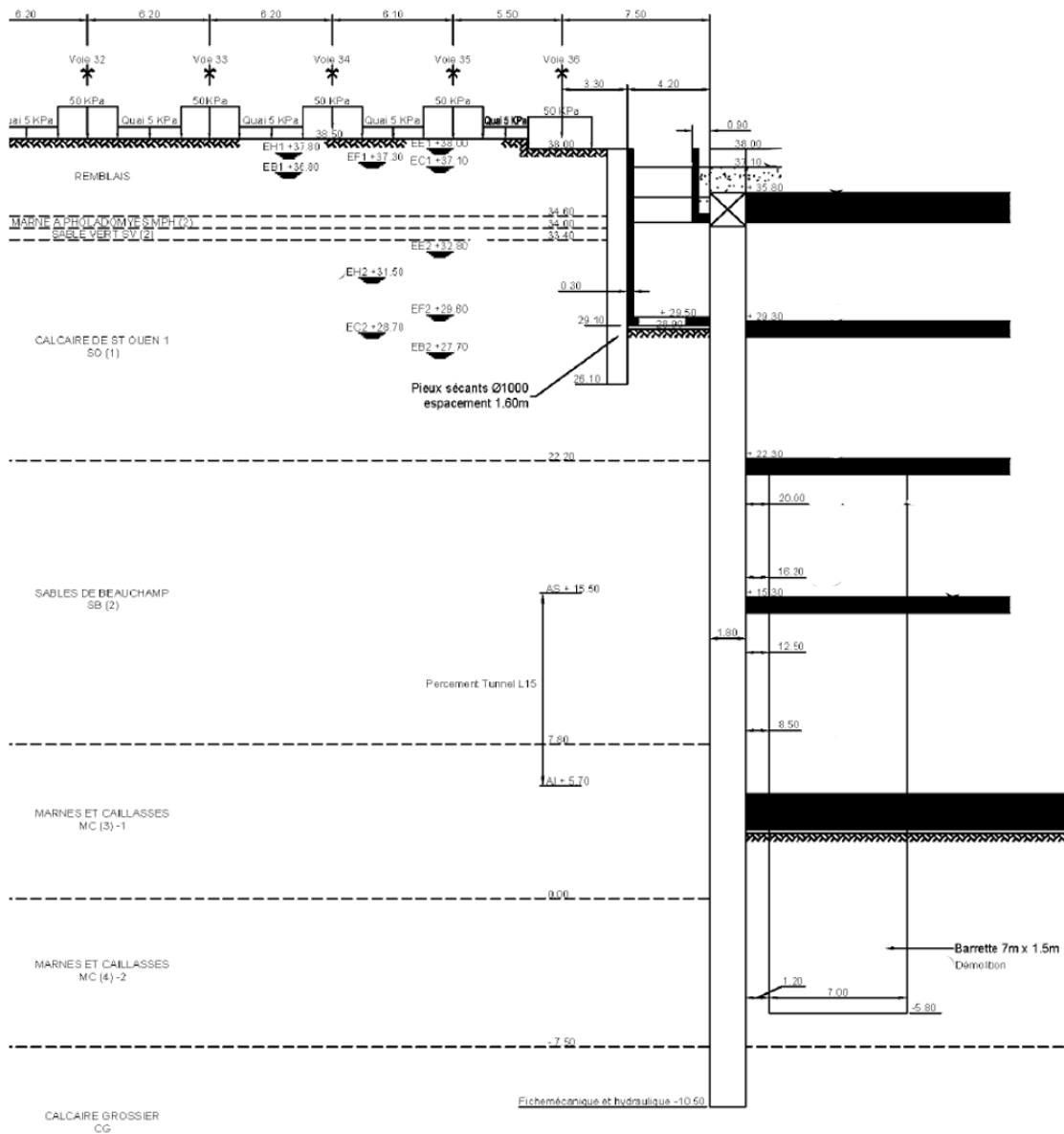


Figure 4 : Coupe de calcul au droit du tympan EST Ligne 15 – gare SDP

4. Adaptation lors des études d'exécution

En phase EXE, le titulaire a adapté ce dispositif selon ses méthodes et le phasage retenu pour assurer le gabarit du TBM lors de son passage en gare, faciliter la démolition des barrettes butonnantes, simplifier la réalisation de la dalle S3 et la dépose des butons provisoires. Pour cela, les modifications suivantes ont été apportées.

4.1. Déplacement des barrettes butonnantes

Ces barrettes ont été écartées afin d'assurer le gabarit du passage du TBM et d'être centrées sur les trémies du niveau S3 (figure 5).

4.2. Modification des liernes

Les liernes des tympan des deux premiers niveaux ont été modifiées en béton armé. Elles soutiennent les parois moulées en phase provisoire et en phase service, en s'appuyant sur la dalle S3 (figure 6); de plus, en phase provisoire, leur forme doit permettre l'installation du dispositif pour le TBM de sortie en terre (cloche) et d'entrée en terre (virole).

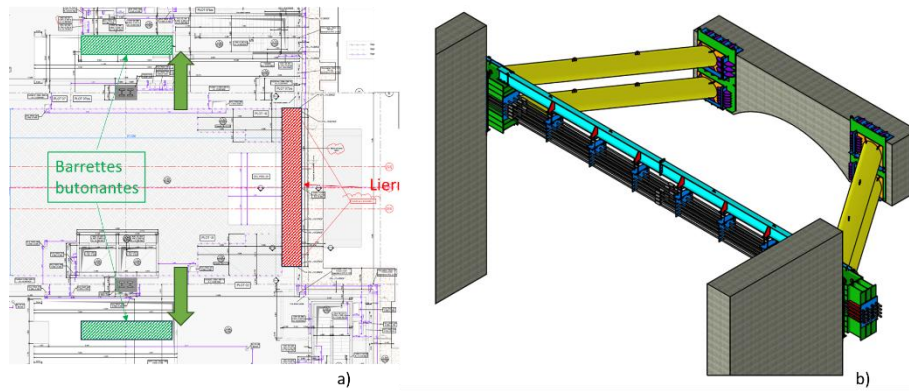


Figure 5 : Vue en plan a) et 3D b) des barrettes butonantes et de la lierne BA

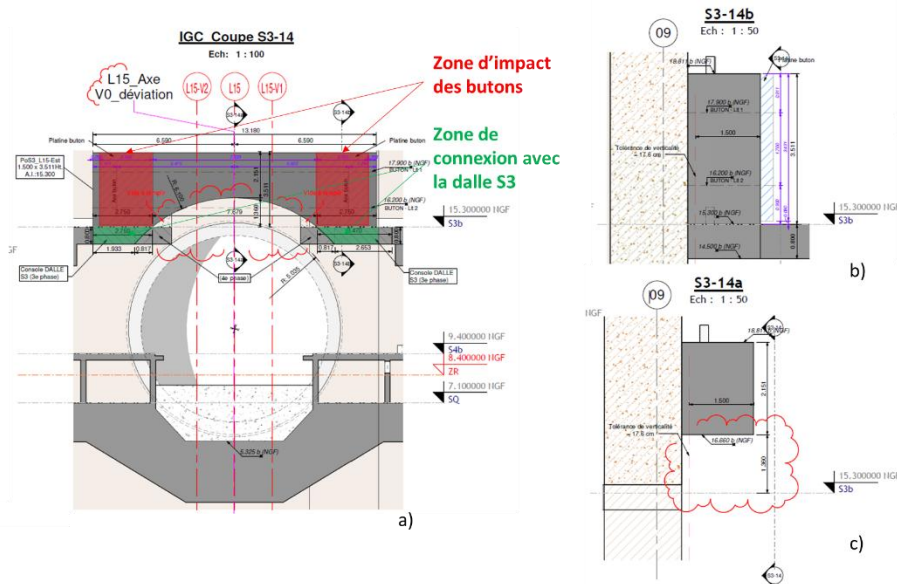


Figure 6 : Coffrage des liernes pour le tympan L15.

Pour le dimensionnement le principe suivant a été appliqué :

- Les parois moulées sont calculées avec la raideur du système butonnant lierne + butons + barrettes. Pour la déterminer, un modèle Foxta© prend en compte la réponse non-linéaire des barrettes grâce à un calcul itératif ;
- Les armatures des parois moulées sont dimensionnées sur la base des sollicitations issues du modèle Foxta pour l'axe fort de la barrette. Compte tenu de l'azimut des butons, la composante tangentielle est reprise par un tirant (figure 7).

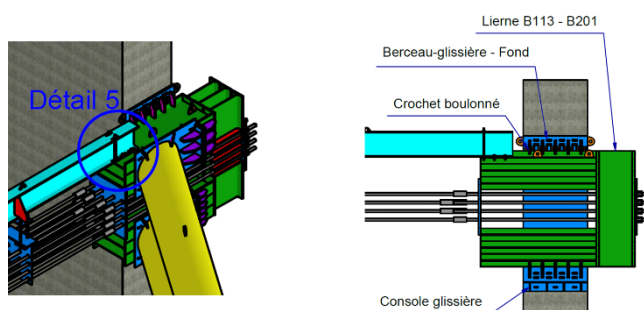


Figure 7 : Détail de l'assemblage mécanique du système butonnant au droit de la barrette.

5. Optimisation en cours du travaux de terrassement

Les parois moulées et les dispositifs butonnants ont été exécutés suivant le Tableau 1..

Tableau 1 : Phasage de l'excavation finale sur la hauteur des barrettes butonnantes

Phase	action	Phase	action
1	Réalisation des liernes à 14.35 NGF	6	Réalisation du radier
2	Pose des butons Lits 1 et 2	7	Dépose du buton Lit 3
3	Excavation 6.90 NGF	8	Passage TBM
4	Pose du buton Lit 3	9	Réalisation de la dalle SS3 – Zone L15
5	Excavation à fond de fouille	10	Dépose butons et démolition barrettes

Afin de livrer la ligne 14 pour les Jeux Olympiques, le titulaire a étudié la possibilité de déposer les butons provisoires avant la sortie de terre du TBM. Cette optimisation n'étant possible qu'à condition que les liernes puissent s'appuyer sur la structure. Des consoles au niveau de la dalle S3 ont donc été réalisées pour donner un appuis au liernes en béton armé (Figure 8) respectant le gabarit de passage du TBM.

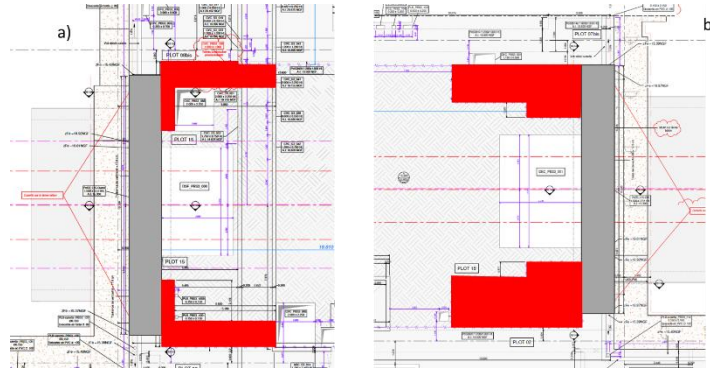


Figure 8 : Vue en plan des consoles des liernes - a) zone Ouest - b) zone Est

Au moment de cette modification, les parois moulées et les liernes étant déjà réalisées, des vérifications structurales complémentaires étaient nécessaires :

5.1. Réponse mécanique de la paroi moulée

L'évolution du phasage et des rigidités n'a impacté que les déformées des parois moulées (tableau 2), les sollicitations variant très légèrement :

Tableau 2. Synthèse des déformées de l'écran des tympans Est et Ouest

Déplacement paroi moulée en mm – Tympan Est	Phase travaux	
	Phasage initiale	Phasage Accélééré
En tête	7	7
En ventre	36	47
Déplacement paroi moulée en mm – Tympan Ouest	Phase travaux	
	Phasage initiale	Phasage Accélééré
En tête	5	5
En ventre	40	43

Ainsi, le déplacement horizontal a subi une augmentation d'environ 30% pour la coupe à l'Est et d'environ 8 % pour la coupe à l'Ouest. A l'Est, la justification a été complétée avec les résultats d'un modèle 3D pour l'analyse des tassements sur l'avoisinant SNCF. Ce principe fut validé grâce aux suivis des inclinomètres dans les parois, jauges de

contraintes des butons et prismes sur les voies ferrées montrant des déformations inférieures aux prévisions.

5.2. Réponse mécanique des liernes

L'autre impact a concerné la poussée sur les liernes en béton armé en phase provisoire. Selon le phasage initial, les liernes étaient justifiées (après dépose des butons) selon un modèle simple de poutre isostatique, avec une charge maximale de 934 kN/ml (tympant Est). Dans le nouveau phasage, la charge liée à la poussée des terres augmente sensiblement (1466 kN/ml à l'Est - 968 kN/ml à l'Ouest). Par conséquent, un modèle plaque (figure 9) a été nécessaire pour optimiser les sollicitations:

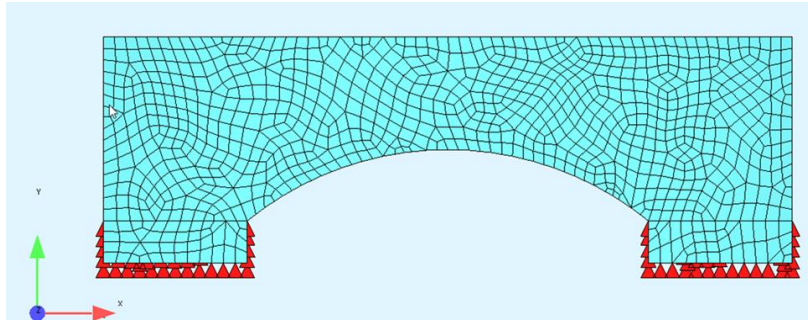


Figure 9 : Maillage aux éléments finis de la lierne

Une poussée surfacique équivalente de 567 kPa a été appliquée (zone Est). La zone d'appui sur les consoles est modélisée par des blocages en déplacement. Les efforts en flexion et en tranchant sont comparés avec les caractéristiques résistantes de la section (Tableau 3):

Tableau 3. Comparaison des efforts et résistances des liernes après dépose des butons lit 1 et 2

M_{Ed-ELS}	M_{Rd-ELS}	M_{Ed-ELU}	M_{Rd-ELU}	V_{Ed-ELU}	V_{Rd-ELU}
6621 kN.m	38000 kN.m	8939 kN.m	56090 kN.m	5516kN	13468 kN

5.3. Validation des déplacements de la PM et du tassement de l'avoisinant

Un modèle 3D Zsoil a permis de valider les déplacements des parois moulées et les tassements au droit des avoisinants SNCF. La modélisation des liernes a évolué (figure 10) selon le nouveau phasage, sans impacts significatifs sur les déformées (figure 11).

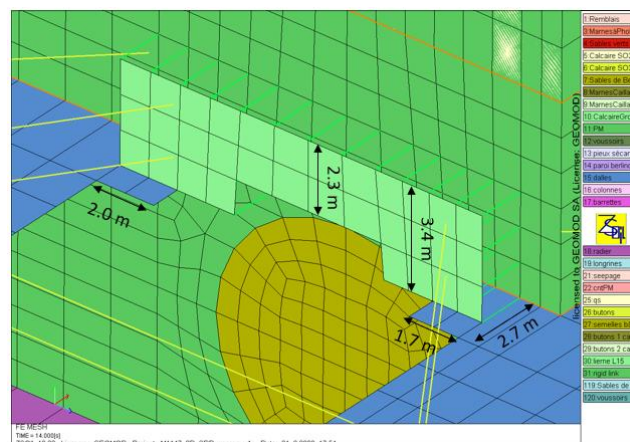


Figure 10 : Modélisation de la lierne Est dans le modèle Zsoil

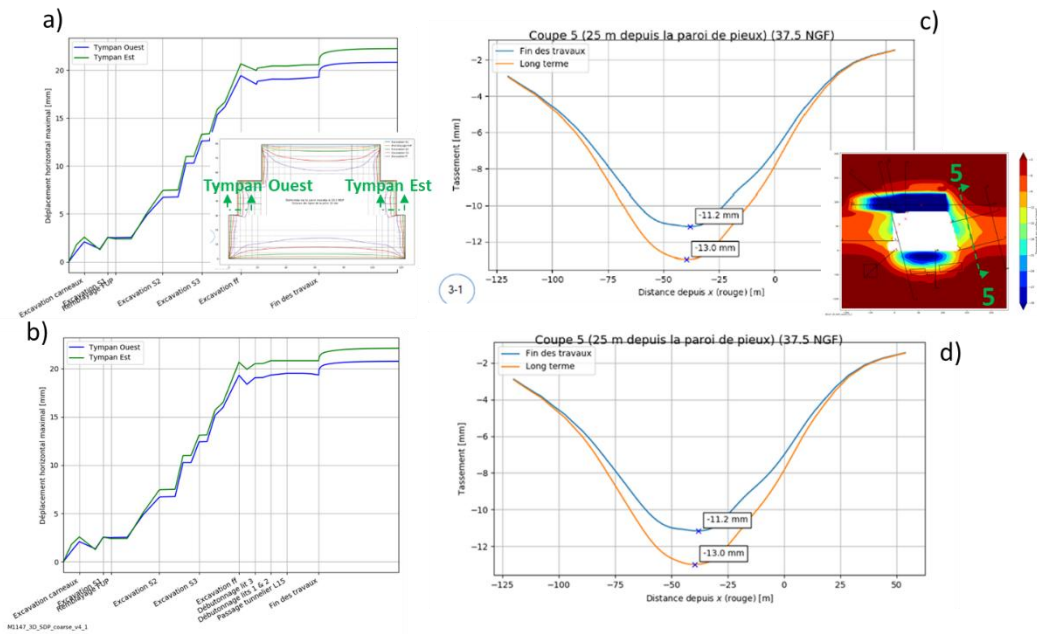


Figure 11 : Évolution du déplacement horizontal des tympanes et du tassement à l'arrière des parois moulées (a) (c) phasage original – (b) (d) nouveau phasage)

5.4. Dimensionnement des consoles

Les dimensions des consoles SS3 pour l'appui provisoire des liernes, après dépose des butons, ont été fortement impactées par les présences des réservations nécessaires pour l'exploitation de l'ouvrage et le gabarit du bâti de poussée du TBM. Pour cela, les consoles de la zone Ouest présentent des dimensions plus réduites (figure 5) à tel point qu'un modèle 3D a été nécessaire pour justifier les armatures.

6. Autorisation de publication

Les auteurs remercient la Société des Grands Projets pour autoriser cette communication.

7. Conclusions

Un des points singuliers de la conception de la gare souterraine Saint Denis-Pleyel était le soutènement des tympanes de la ligne 15 traversant la station en son centre. La configuration interdisant les solutions classiques, des dispositions constructives originales ont été imaginées dès les études PRO, adaptées par le titulaire selon ses méthodes, optimisées en cours de travaux, moyennant quelques adaptations structurelles.

8. Références bibliographiques

- Giroux A. et Frau A. (2023). Saint-Denis Pleyel, une gare du Grand Paris Express sous pression, congrès de l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain.
- Launay N. (2020). Saint-Denis Pleyel : Des fondations hors norme pour la plus grande gare du Grand Paris Express, Sols et fondations n° 958, pp. 90-97.
- Viardin C. et al. (2020). Saint-Denis Pleyel une gare emblématique à tous points de vue, congrès de l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain.
- Zhang Y. et al. (2024). Conception et construction de la gare emblématique de Saint-Denis Pleyel, Travaux