



Journée technique du CFMS du 5 décembre 2017

***« Pratique de l'interaction sol-structure sous sollicitations
statiques et sismiques »***

**Apport de l'ISS dans le cas d'une excavation
profonde en milieu urbain**

Présentateurs : Florent Da Costa / Martin Cahn GEOS INGENIEURS CONSEILS

SOMMAIRE

1- Présentation du projet

2- Contexte géologique et hydrogéologique

3- Cas de la gare Pont de Sèvres :

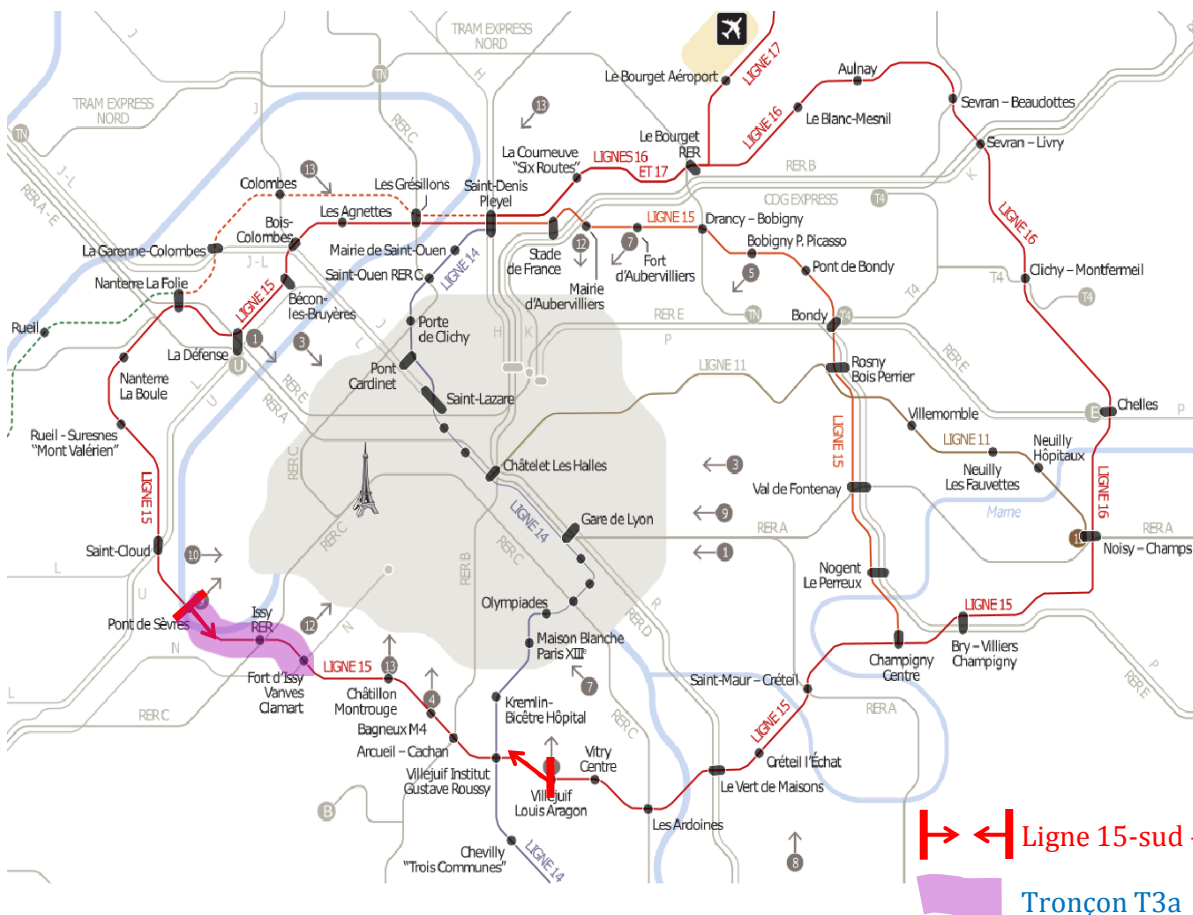
- Contexte spécifique;
- Historique des solutions étudiées;
- Solution refends.

4- Cas de la correspondance d'Issy RER

- Contexte spécifique;
- Modélisation des appuis du viaduc.

5- Conclusions

1- Présentation du projet



Ligne 15-sud – Tronçon T3a :

MOA : Société du Grand Paris

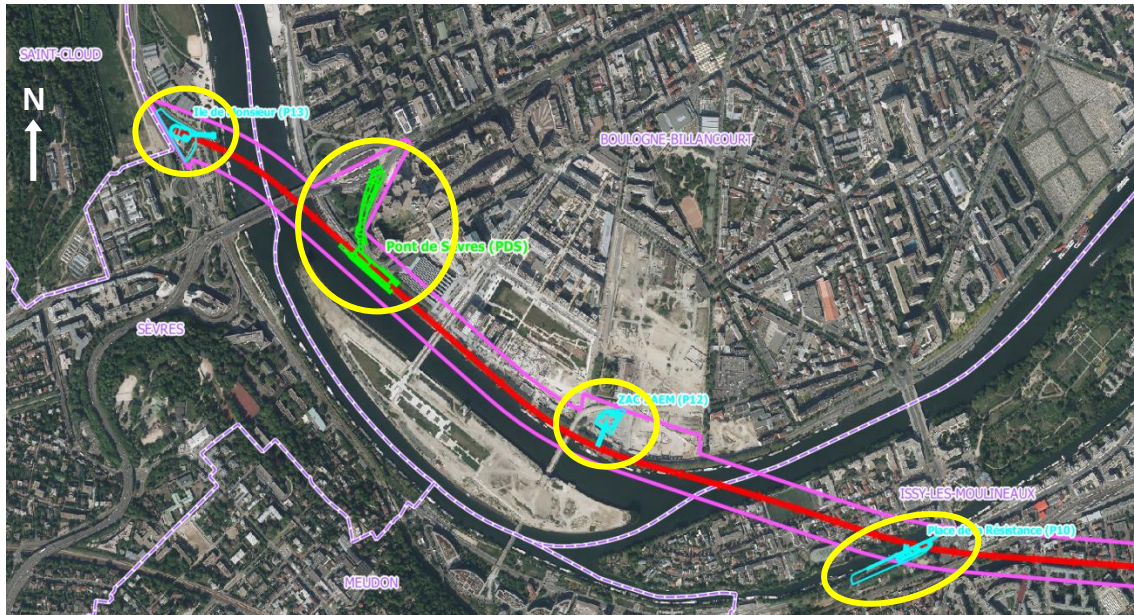
MOE-infra: SETEC (Mandataire du T3), INGEROP-GEOS

ENT : Groupement HORIZON (Bouygues TP (mandataire), Soletanche Bachy France, Soletanche Bachy Tunnels, Bessac, Sade



1- Présentation du projet

Tronçon T3a



- Tunnel de 4km, $\varnothing_{int} = 8.8m$, creusement au tunnelier, 3 passages sous la Seine,
- 1 puits d'entrée du tunnelier en trilobe,
- 3 puits de ventilation et de secours,
- **2 gares** : Pont de Sèvres (PDS) et Issy RER (ISS), 36m et 28m de profondeur, 110m de long, tranchée couverte en parois moulées.

2- Contexte géologique et hydrogéologique général

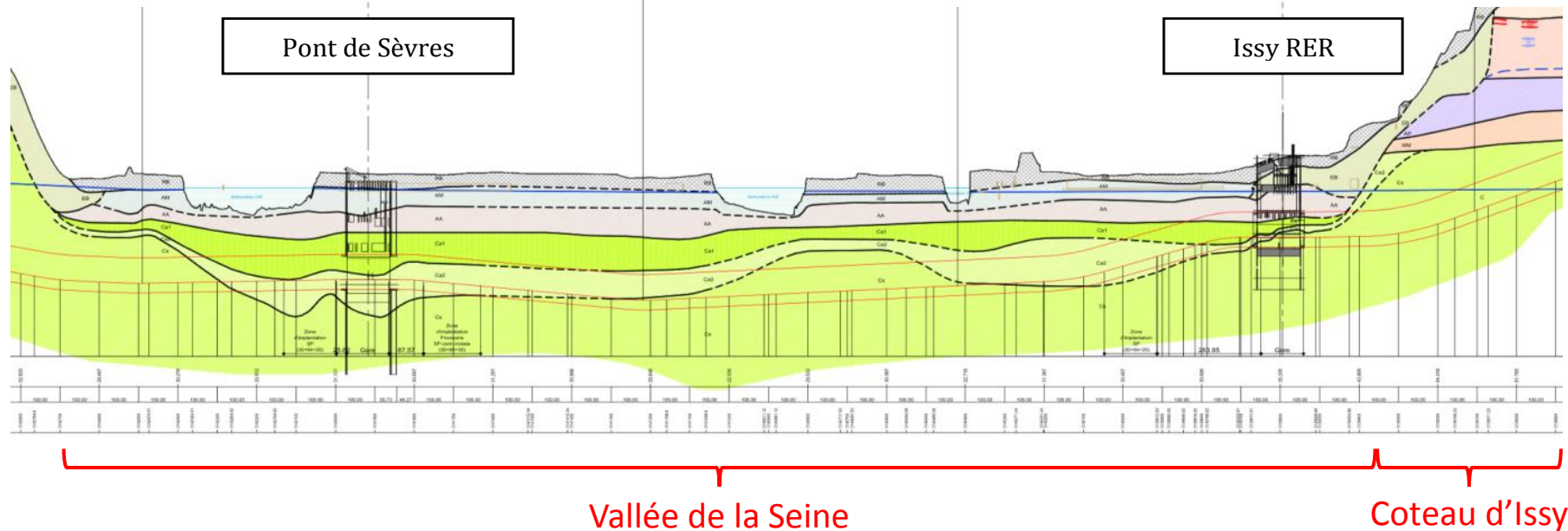


Puits de l'Île de Monsieur
Entrée du tunnelier

OA ZAC SAEM

OA Place de la
Résistance

OA Parc Henri
Barbusse



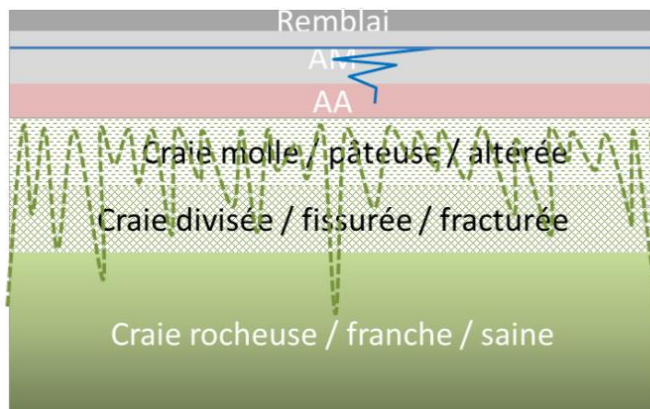
Vallée de la Seine : Substratum crayeux (Campanien) affleurant sous faible couverture alluvionnaire

Coteau d'Issy : Versant ouest du plateau d'Issy marqué par la présence d'éboulis recouvrant le Calcaire grossier, l'Argile plastique, les Marnes de Meudon et la Craie

Figure 1 displays the relationship between pressure and perfusion across different experimental conditions. The figure is organized into a 3x2 grid of plots. The top row (Em, pl*) shows perfusion (ml/min/100g) versus module pressure (MPa) and perfusion limit (MPa). The middle row (Ca1, Ca2) shows perfusion (ml/min/100g) versus perfusion limit (MPa). The bottom row (Cs) shows perfusion (ml/min/100g) versus perfusion limit (MPa). The plots show a general trend of decreasing perfusion with increasing pressure, with some variability in the data points.

2- Contexte géologique et hydrogéologique général

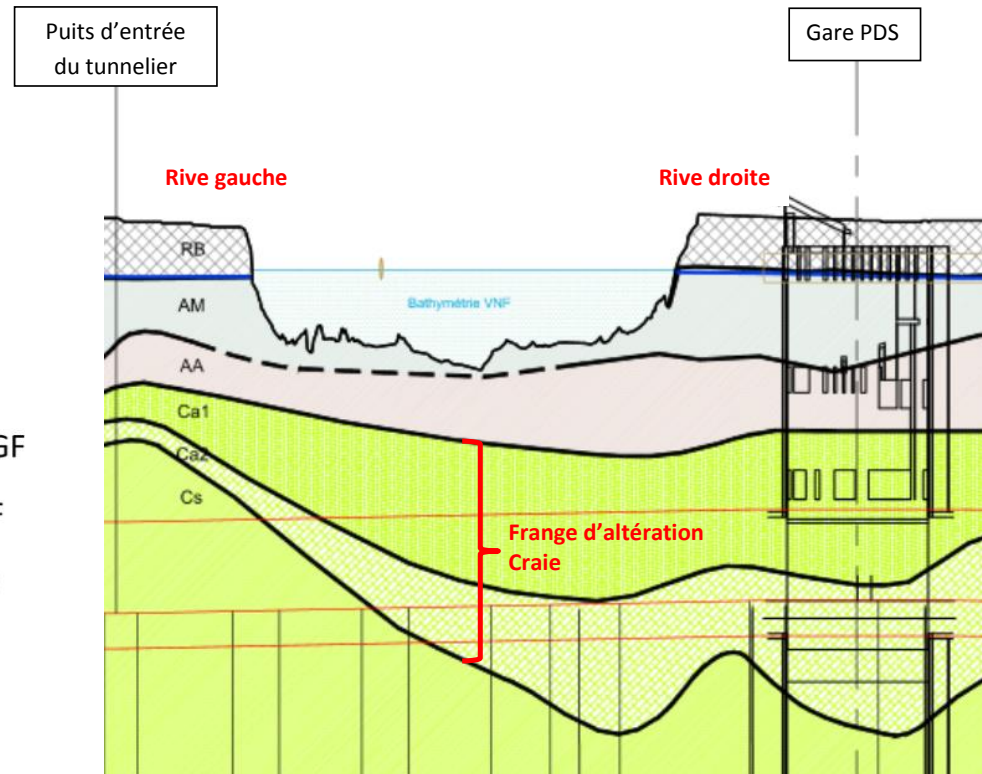
Frange d'altération de la Craie très développée, **particulièrement en rive droite de la Seine** (épaisseur > 20m).



≈+15 NGF

≈+5 NGF

≈-5 NGF



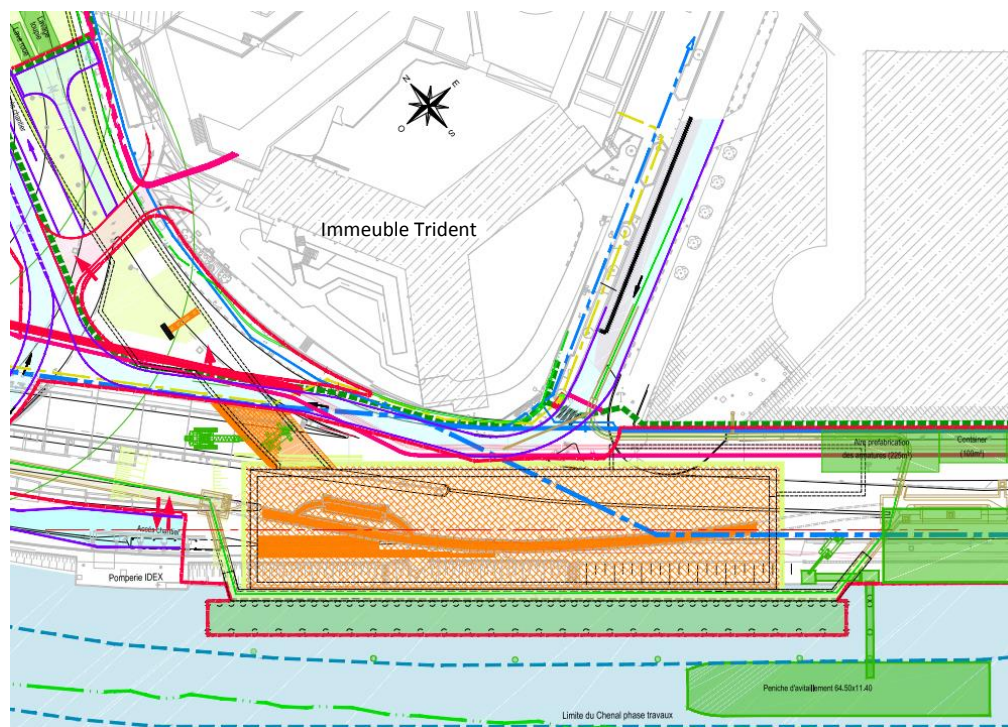
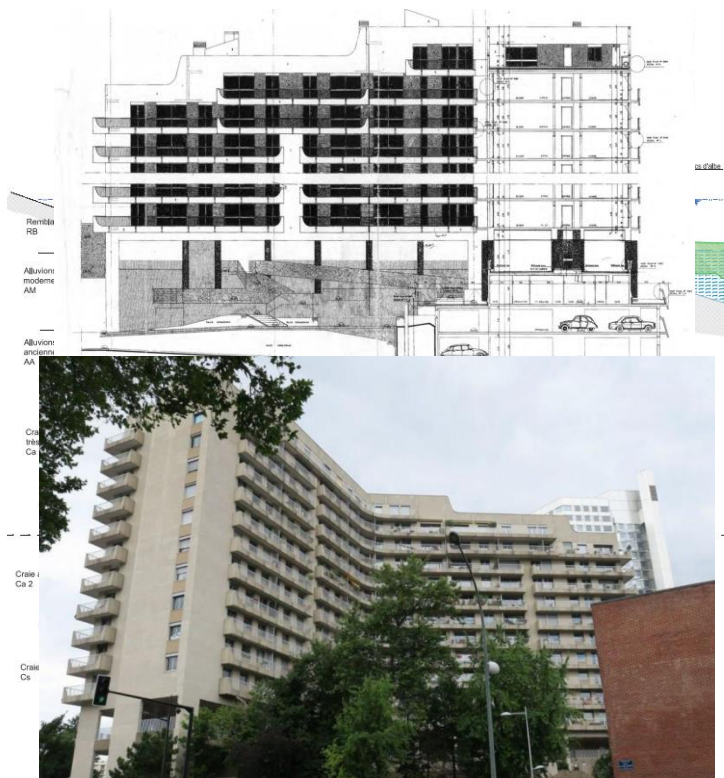
Contexte hydrogéologique :

- Nappe alluviale et nappe de la Craie en communication hydraulique,
- Niveau piézo ≈ +26 à +26,5 NGF

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

- Contexte spécifique

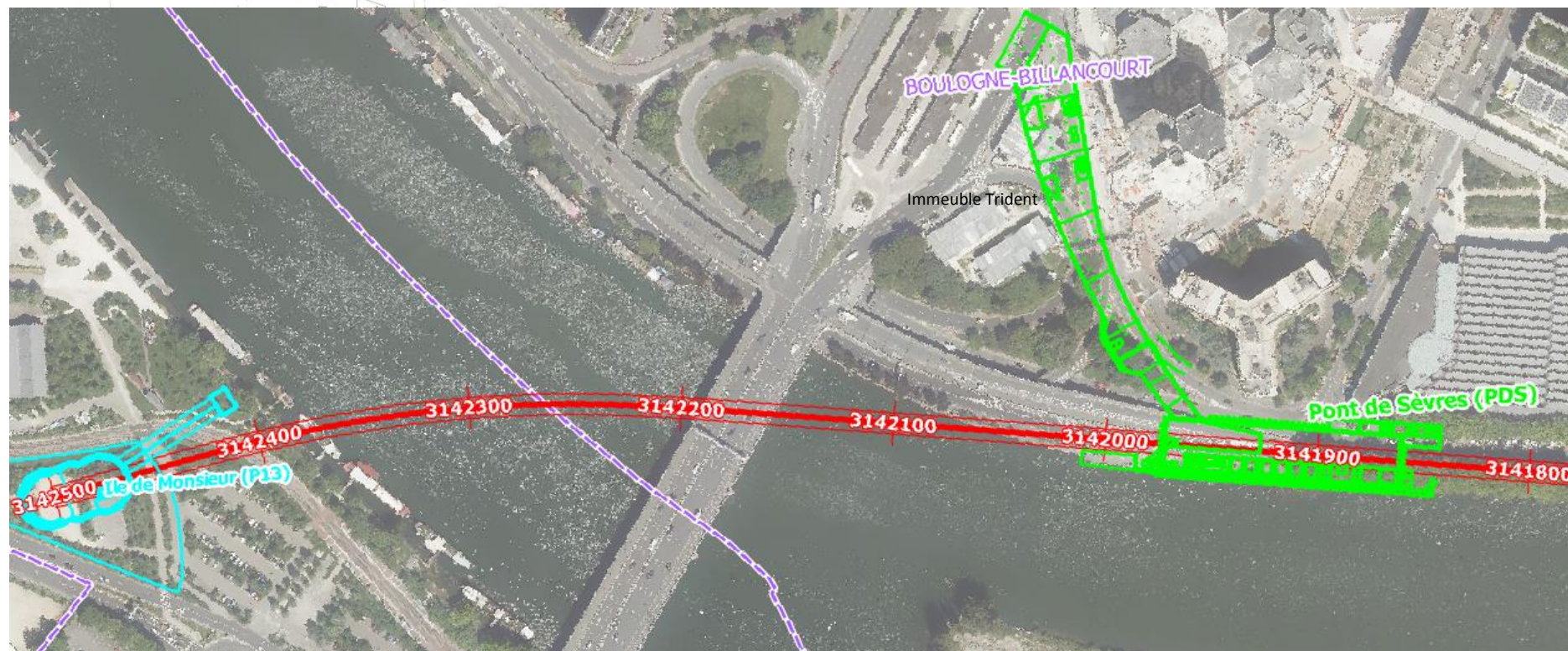
- 1) Dissymétrie du terrain naturel,
- 2) Urbanisation forte,



3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

- Contexte spécifique

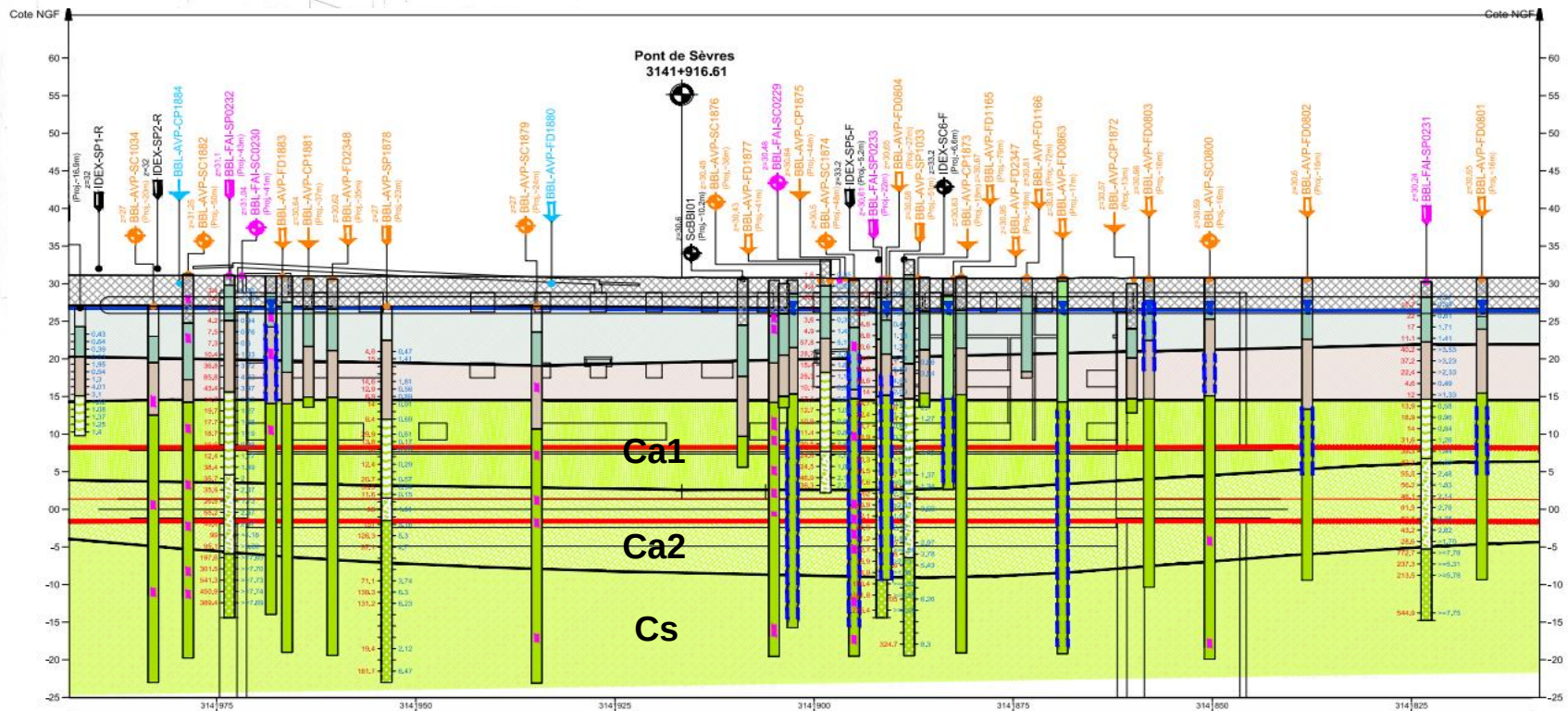
- 1) Dissymétrie du terrain naturel,
- 2) Urbanisation forte,
- 3) Proximité du puits de départ du tunnelier,



3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

• Contexte spécifique

- 1) Dissymétrie du terrain naturel,
- 2) Urbanisation forte,
- 3) Proximité du puits de départ du tunnelier,
- 4) Forte altération de la Craie,
- 5) Forte charge d'eau.



3- Cas de la gare de Pont de Sèvres



• Historique des solutions étudiées

Processus des études pour la boîte gare :

1) Phase AVP : études de plusieurs solutions pour le choix des soutènements :

➔ D'abord calculs aux coefficients de réaction (RIDO) puis passage aux éléments finis (PLAXIS 2D) sur la solution retenue,

2) Phase PRO : Calculs éléments finis précis sur solution finale.

4 solutions principales étudiées :

N°	Enceinte en PM	Terrassement	Autre
1 (base)	Epaisseur 1,5m	Ciel ouvert	-
2	Epaisseur 1,5m	Semi-taupe	Traitement Craie altérée par Jet-Grouting
3	PM à contreforts	Ciel ouvert	Butons en Jet-Grouting
4 (retenue)	Epaisseur 1,5m	Taupe	Refends transversaux en PM

3- Cas de la gare de Pont de Sèvres



• Historique des solutions étudiées

Solution 1 – PM épaisseur 1,5m / Terrassement ciel ouvert

➔ Parois trop souples, butée insuffisante, appuis insuffisants (boutons métalliques provisoires)

➔ Déformations importantes en tête et en ventre et moments élevés dans la PM

Solution 2 – PM épaisseur 1,5m / Terrassement semi-taupe / Traitement par Jet-Grouting

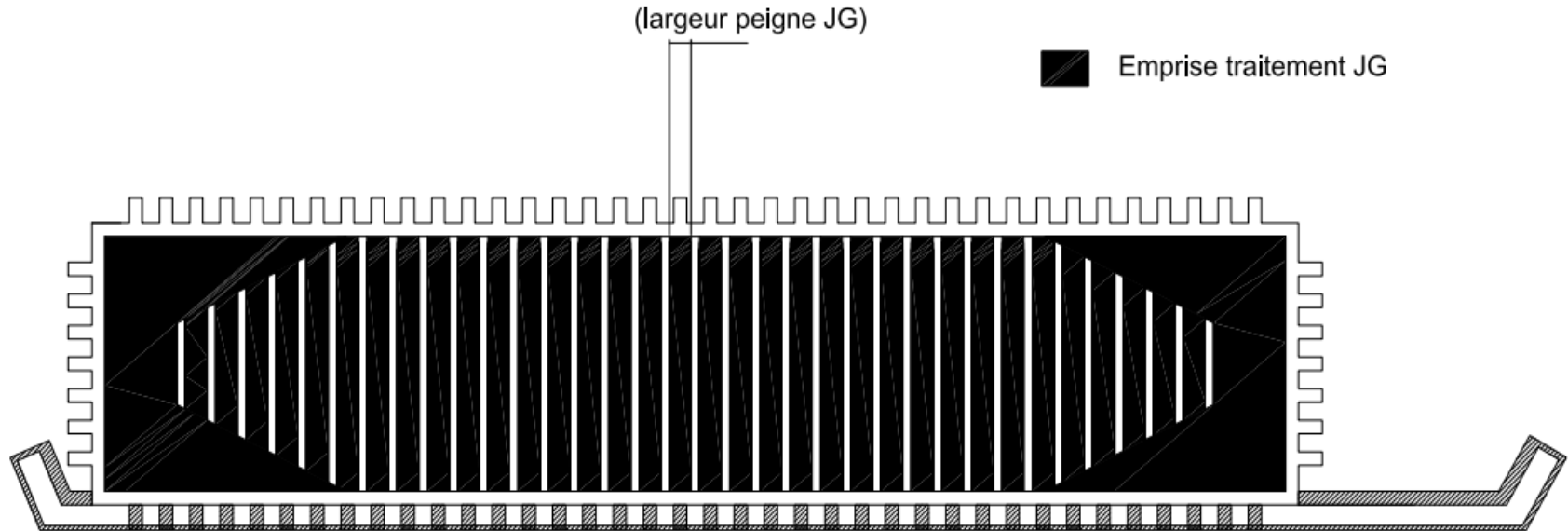
➔ Réalisation de poutres définitives en descendant au droit des futurs planchers

➔ Traitement Craie altérée par Jet-Grouting pour améliorer la butée avant terrassement

➔ Amélioration de la situation mais non suffisant et traitement lourd en Jet Grouting

3- Cas de la gare de Pont de Sèvres

- Historique des solutions étudiées



Solution 3) – PM à contreforts / Terrassement ciel ouvert / Butons en Jet Grouting

- ➔ Rigidification de la paroi : diminution des déplacements et augmentation acceptable des efforts
- ➔ Peignes de Jet-Grouting sous le fond de fouille pour réduction de l'effort tranchant
- ➔ **Solution valide mais emprise trop restreinte pour la réalisation des contreforts + possibilité de faire passer le tunnelier avant excavation de la gare**

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres



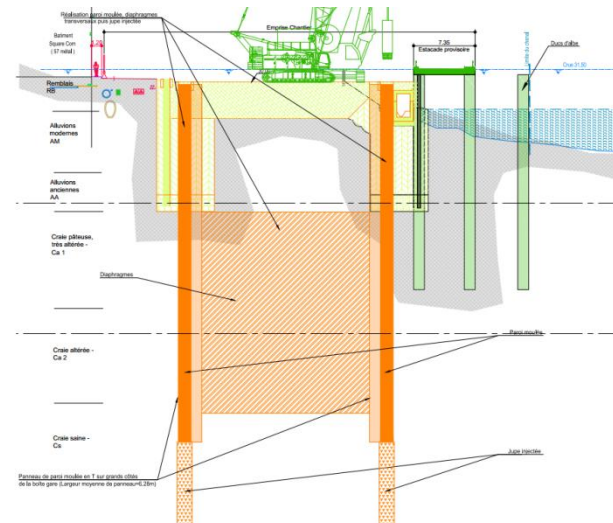
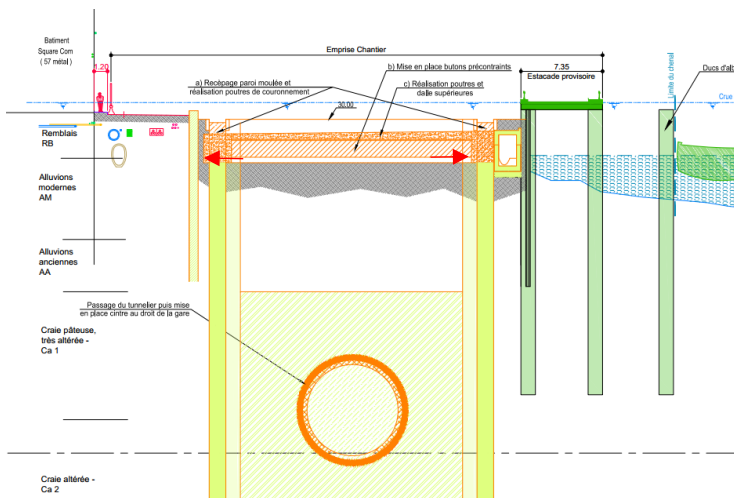
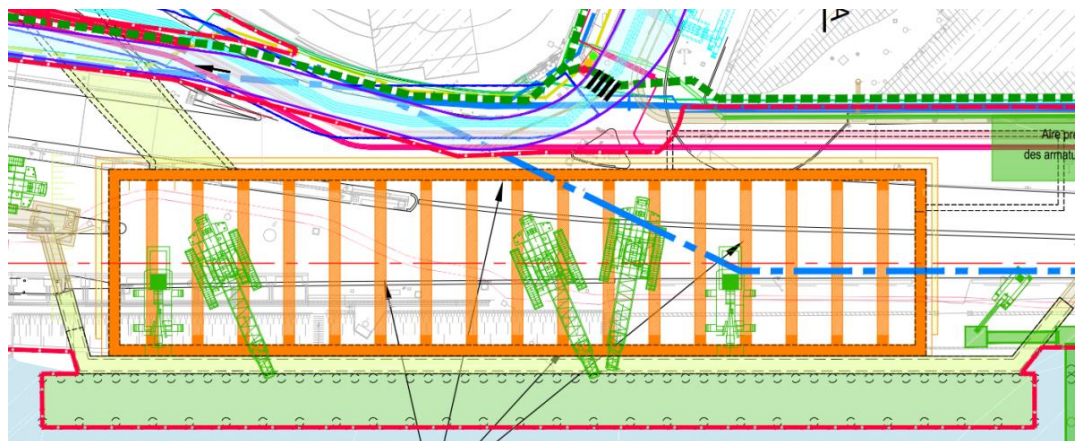
- Historique des solutions étudiées

Solution 4 (retenue) – PM épaisseur 1,5m / Terrassement taupe / Refends transversaux

- ➔ Plus de contraintes sur la mise à disposition du radier → phasage en taupe repris pour une stabilité optimale
- ➔ Terrassement en taupe permet rétablissement RD1 plus rapidement
- ➔ Parois moulées diaphragmes intérieurs et abandon du traitement par Jet Grouting

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

- Solution refends, précontrainte en tête et passage en pleine terre

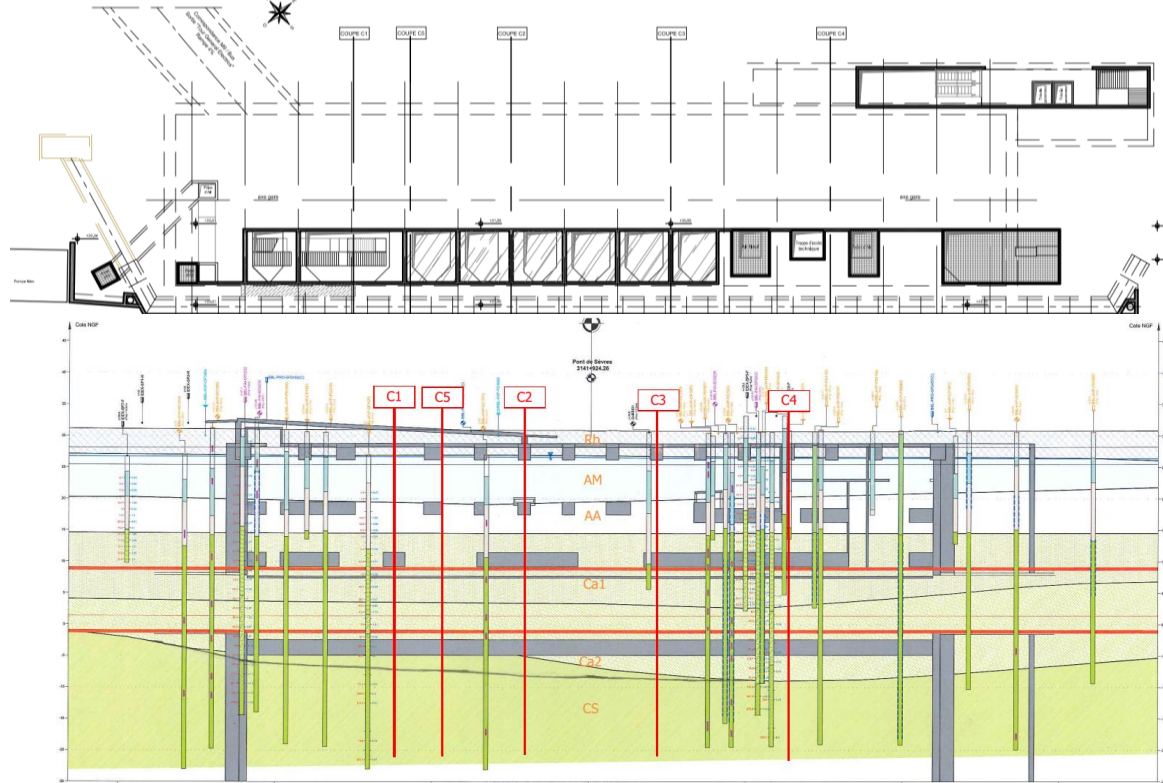


Définition des méthodes constructives et dimensionnement des structures partagé avec ingénieurs structures d'INGEROP au sein d'une cellule intégrée

- Chacun des panneaux de paroi moulée de l'enceinte périphérique est tenu en son centre par un mur refend
- Amélioration de la butée à toute les phases l'image de butons continus préfondés.
- Butonnage actif permet de corriger et d'empêcher le basculement de la paroi nord, du côté bâti, vers la Seine tout en limitant la hauteur de refends à la craie altérée et fracturée.
- Passage en pleine terre: la gare n'est plus sur le chemin critique du tunnel.
- La réduction de la contrainte verticale et les efforts de butés dans le sol et dans les refends ovalisent le tunnel

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

- Modélisation éléments finis PLAXIS 2D

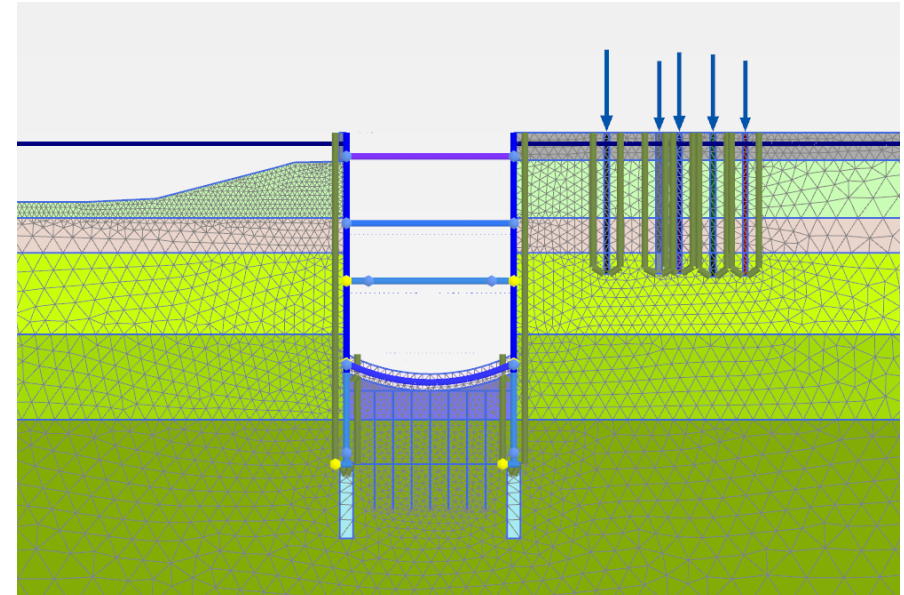
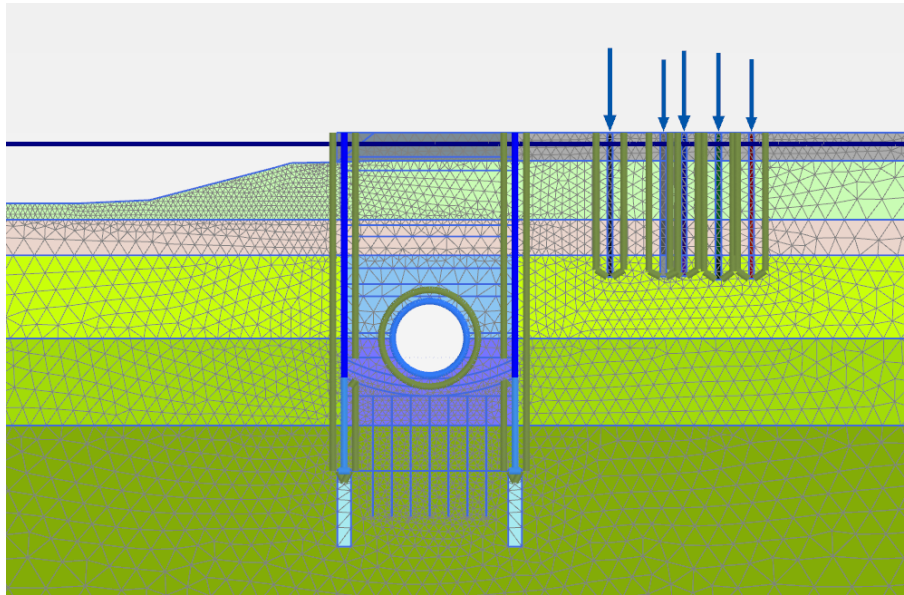


- Parois moulées, tunnel et butons en éléments structure plaque;
- Radier, refends et pieux du bâtiment Trident en éléments volumiques;
- Loi de comportement du sol: HSM simplifiée $m=0$;

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres



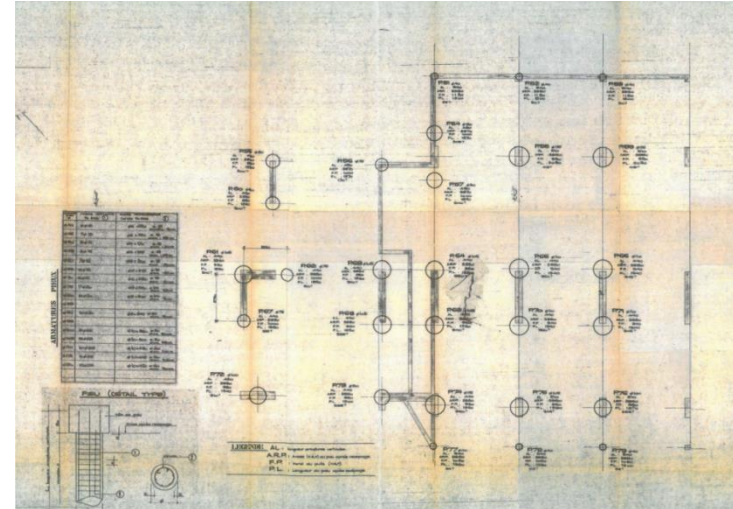
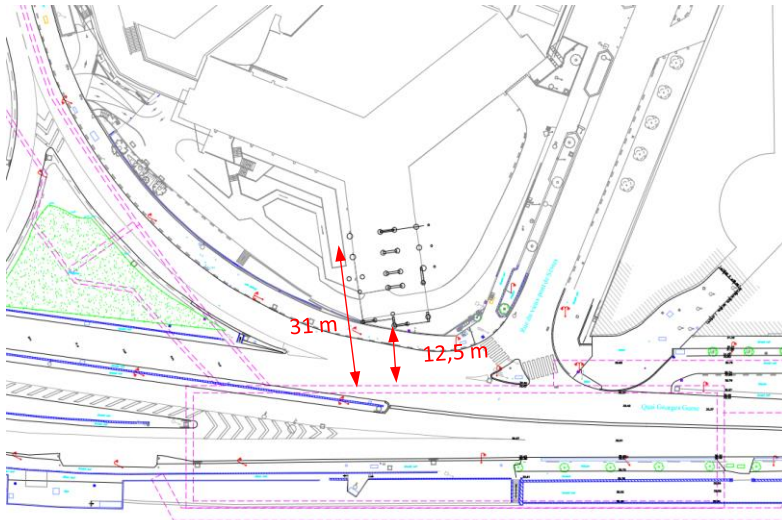
- Modélisation éléments finis PLAXIS 2D



- Parois moulées , tunnel et butons en éléments structure plaque;
- Radier, refends et pieux du bâtiment Trident en éléments volumiques;
- Loi de comportement du sol: HSM simplifiée $m=0$;

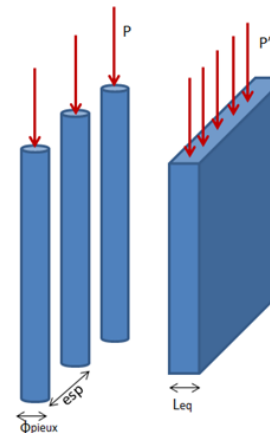
3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

- Modélisation éléments finis Bâtiment Trident



Modélisation des pieux en plaque équivalente

Hypothèse d'équivalence pour une barre cylindrique pleine	Caractéristiques de la plaque équivalente
Conservation des rigidités en traction et en flexion: $E_{eq}A_{eq} = E_{pieux}A_{pieux}$ $E_{eq}I_{eq} = E_{pieux}I_{pieux}$ Où A est la section et I est l'inertie	$L_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{2} \phi_{pieux} \frac{\pi \phi_{pieux}}{2\sqrt{3} esp}$ $E_{eq} = E_{pieux} \frac{\pi \phi_{pieux}}{2\sqrt{3} esp}$ Avec ϕ_{pieux} le diamètre du pieux et esp l'espacement
Egalité des efforts tangentiels en limite de glissement	Définition d'un sol à l'interface $\varphi = 0^\circ$ et $c_{eq} = \frac{\pi \phi_{pieux}}{2. esp} q_s$
Charge moyenne P (kN)	Charge ponctuelle $P' = P/esp$ (kN/m)



Emploi des éléments finis en génie civil Ouvrage en interaction P. Mestat & M. Prat

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

• Modélisation éléments finis Refends

Les refends, d'1,5 m d'épaisseurs, espacés tous les 6,4 m sont modélisés par l'intermédiaire d'un sol élastique linéaire équivalent :

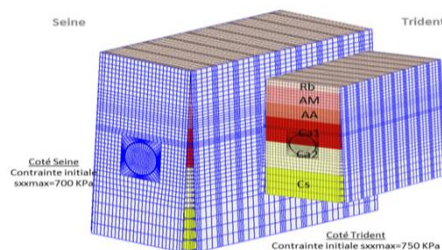
$$E, \text{équivalent} = \frac{E, \text{ref} \times ep + E, \text{sol} \times (\text{espacement} - ep)}{\text{espacement}}$$

$$\gamma, \text{équivalent} = \frac{\gamma, \text{refend} \times ep + \gamma, \text{sol} \times (\text{espacement} - ep)}{\text{espacement}}$$

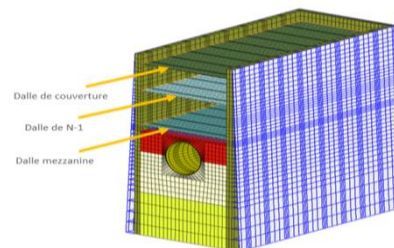
3D finite element analysis of deep excavations with cross-walls S. Rampello & S. Salvatori

→ Principe d'homogénéisation qui est retrouvé dans la littérature comparé à des calculs éléments finis 3D Z-Soil.

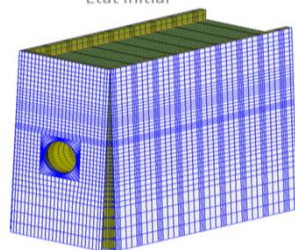
Déviations entre panneaux prise en compte par le biais d'une réduction de l'épaisseur de béton en compression pour une tolérance de 0,5% à mi épaisseur de couche.



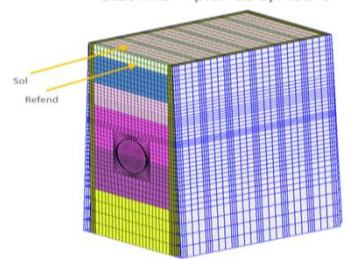
Etat initial



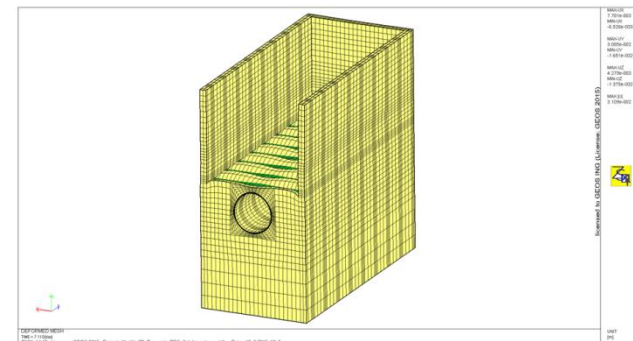
Etat final - plan de symétrie



Etat final - côté tympan



Coupe transversale au droit de refends



Concordance des résultats 2D / 3D

- Efforts voussoirs ;
- Efforts dalles;
- Contraintes dans les refends;

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

• Modélisation éléments finis Refends

Les refends, d'1,5 m d'épaisseurs, espacés tous les 6,4 m sont modélisés par l'intermédiaire d'un sol élastique linéaire équivalent doté des caractéristiques suivantes :

$$E, \text{équivalent} = \frac{E, \text{ref} \times ep + E, \text{sol} \times (\text{espacement} - ep)}{\text{espacement}}$$

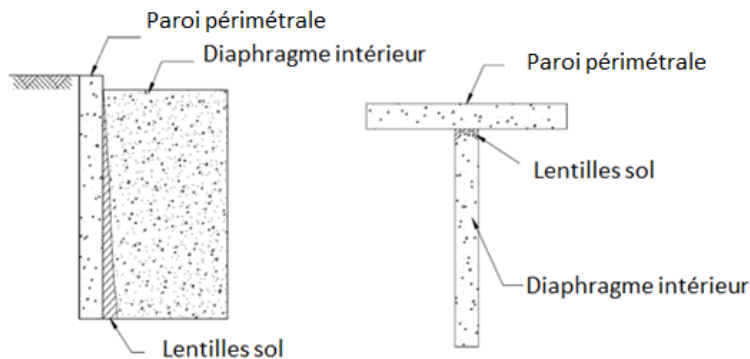
$$\gamma, \text{équivalent} = \frac{\gamma, \text{refend} \times ep + \gamma, \text{sol} \times (\text{espacement} - ep)}{\text{espacement}}$$

→ Principe d'homogénéisation qui est retrouvé dans la littérature *3D finite element analysis of deep excavations with cross-walls* S. Rampello & S. Salvatori comparé à des calculs éléments finis 3D Z-Soil.

Déviation entre panneaux prise en compte par le biais d'une réduction de l'épaisseur de béton en compression pour une tolérance de 0,5% à mi épaisseur de couche.

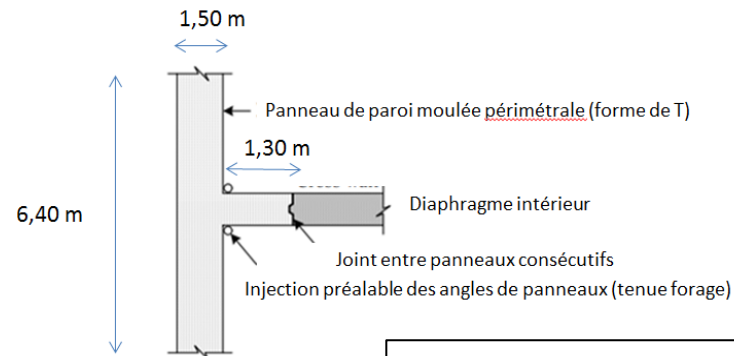


La qualité du contact entre le diaphragme et la paroi d'enceinte est essentielle à la maîtrise des déplacements de l'excavation



ELEVATION

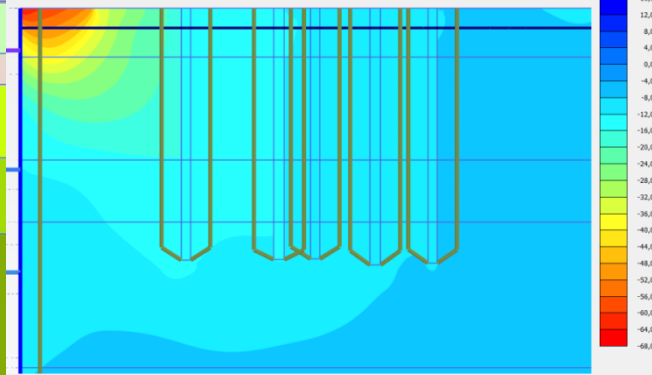
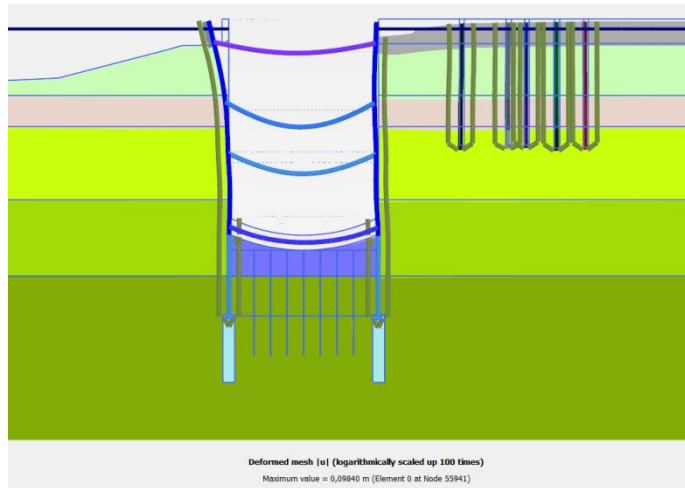
VUE EN PLAN



Effects of joint details on the behavior of cross walls
Hsiii-Sheng Hsieh et al.

3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

• Résultats des modélisations éléments finis

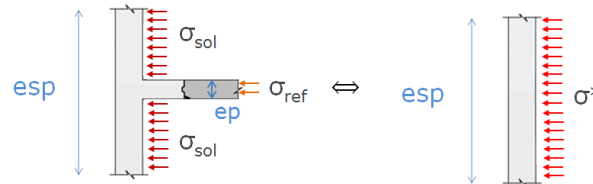


Déplacement vertical

Vérification structurelle des refends

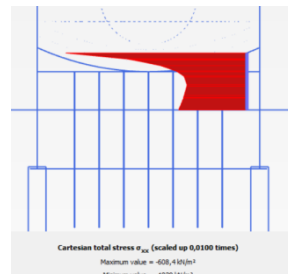
Hypothèse: déformation homogène entre le sol et les refends

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma^* \times esp}{\frac{E_{sol}}{E_{ref}} (esp - ep) + ep}$$

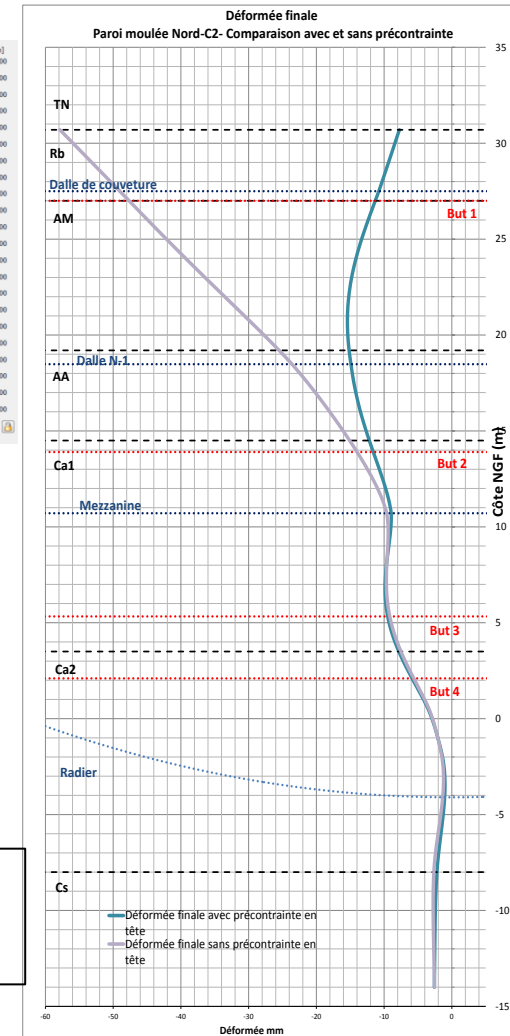


Avec :

- σ^* la contrainte dans le sol homogène ;
- σ_{ref} la contrainte dans le refend ;
- E_{sol} le module du sol à la profondeur considérée ;
- E_{ref} le module du refend ;
- esp l'espacement entre refend,
- ep l'épaisseur à la profondeur considérée

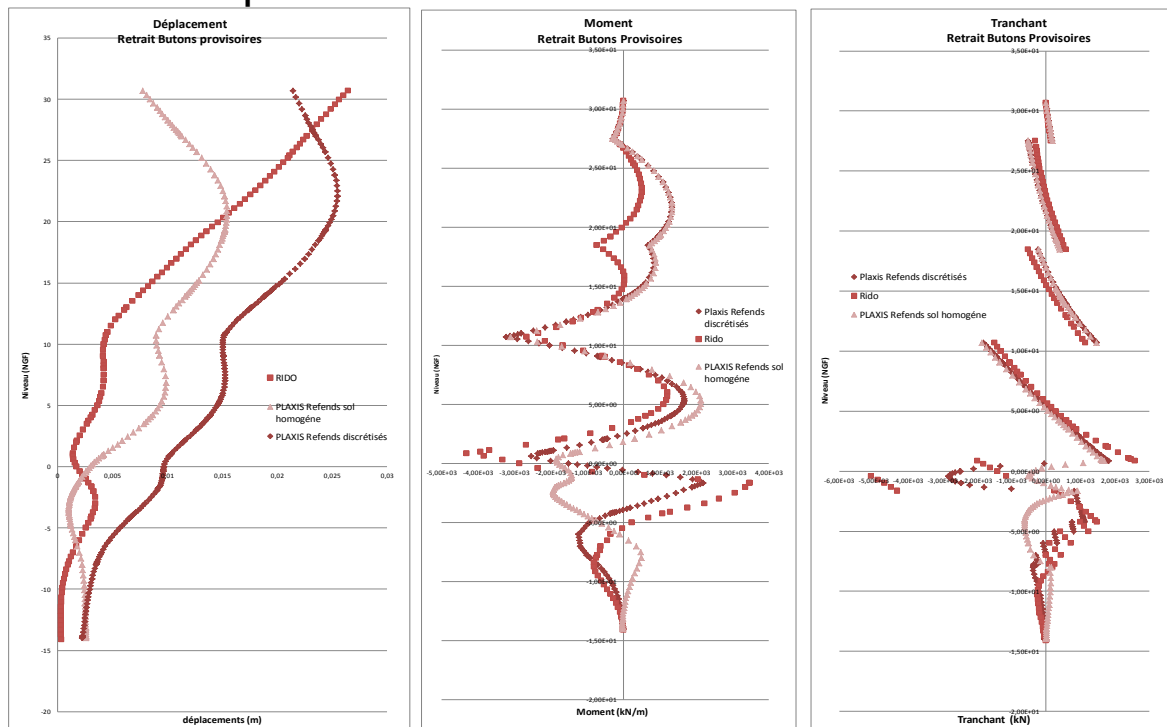
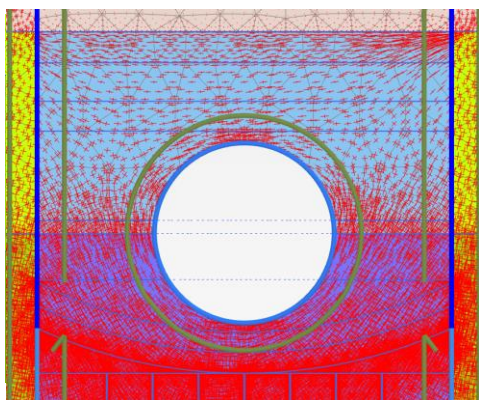
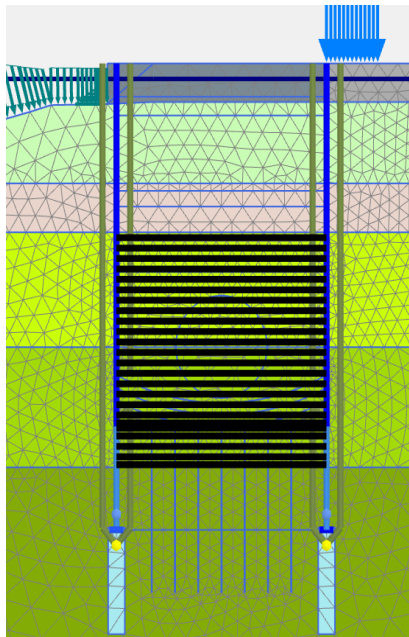


→ 1,8 Mpa en pic dans le sol homogène
→ 9,9 Mpa dans le refends



3 Cas de la gare de Pont de Sèvres

- Discrétisation des refends et comparaison éléments finis et coefficient de réaction

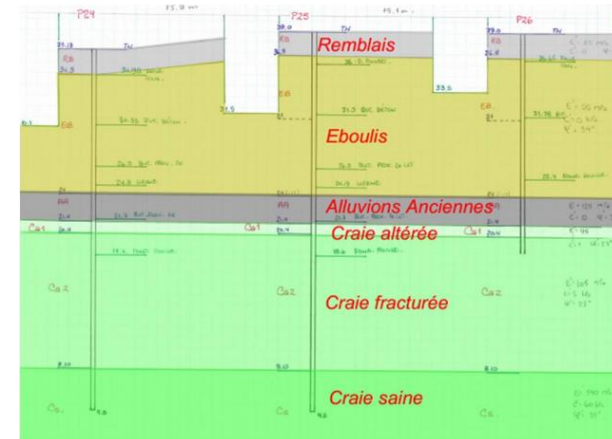


- Effet de la pression hydrostatique sur le radier qui transmet des efforts et des moments dans les parois est introduit dans le modèle RIDO à partir des résultats PLAXIS: effort horizontal et couple;
- Différence de comportement sous le fond de fouille;
- Basculement d'ensemble avec les modèles discrétisés;
- Refends en butons horizontaux ne traduisent pas l'orientation des efforts dans les refends inclinés ni les effets de voutes autour du tunnel ;

4- Cas de la correspondance d'Issy RER

- Contexte spécifique

Situation de la Correspondance : au pied du Coteau d'Issy

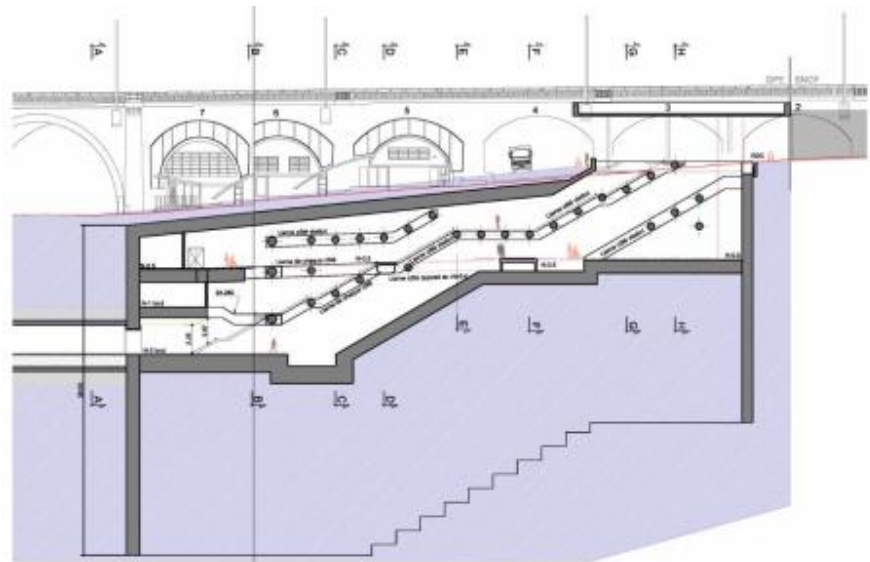
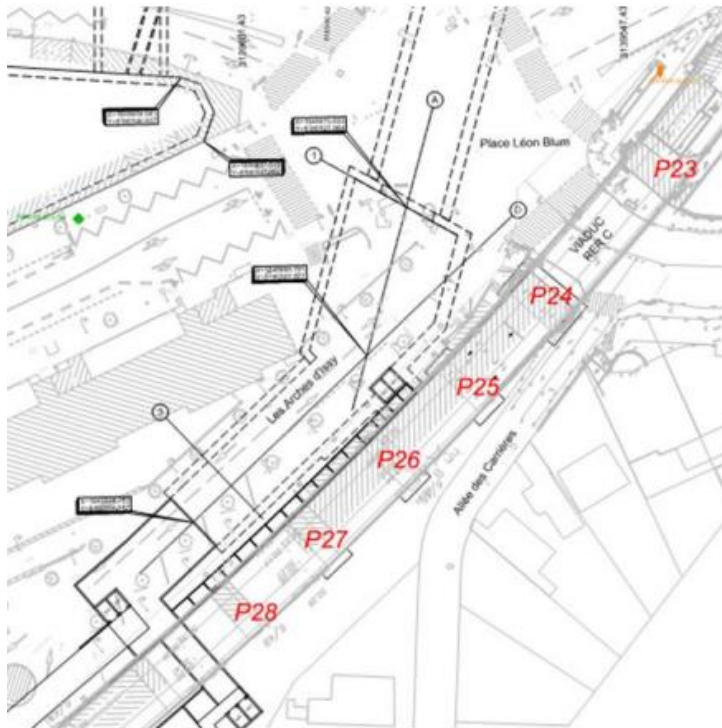


4- Cas de la correspondance d'Issy RER

- Contexte spécifique

Proximité viaduc SNCF

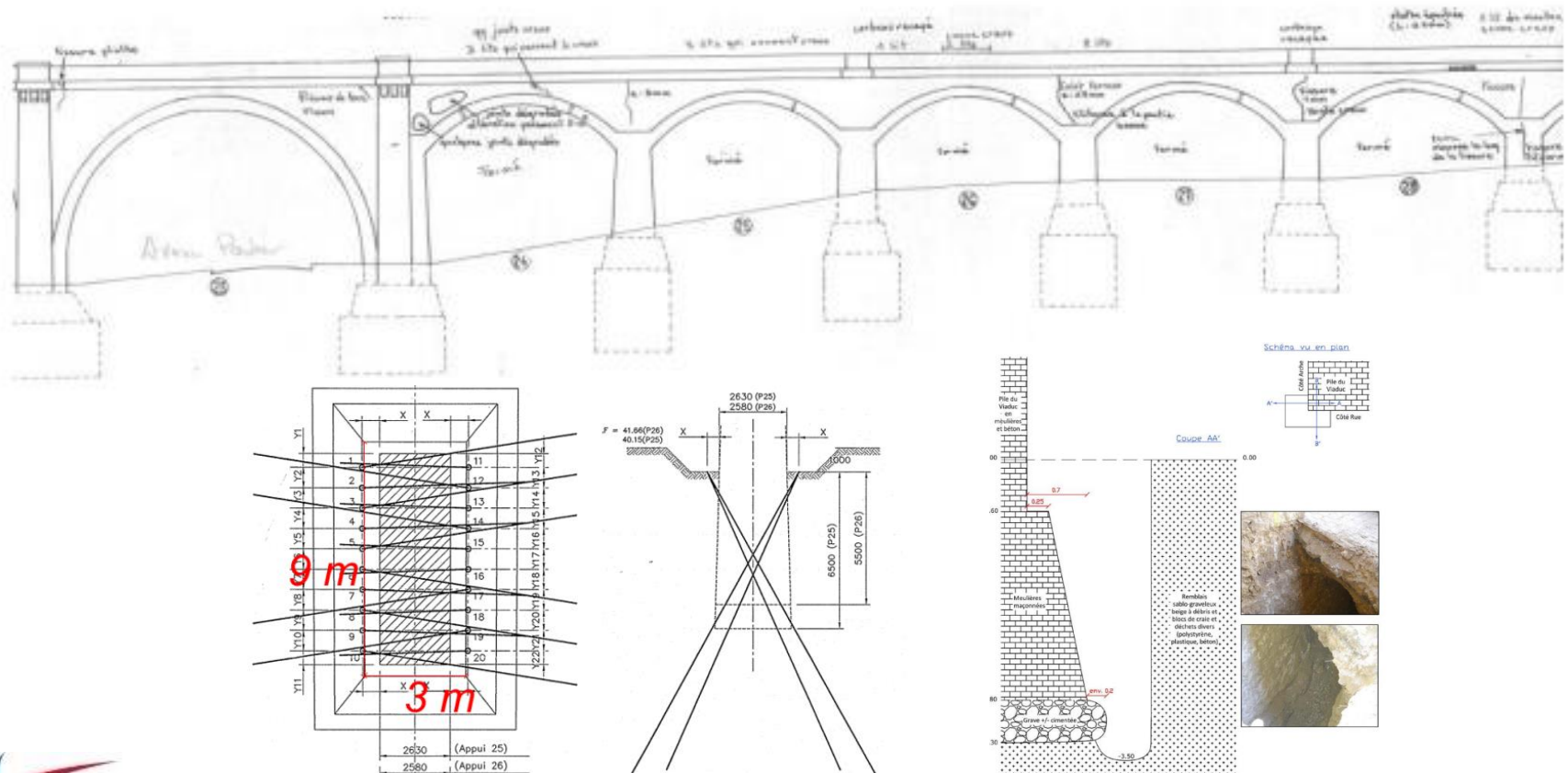
➔ Forte contrainte : seuil de tassement < 5mm



4- Cas de la correspondance d'Issy RER

- Contexte spécifique

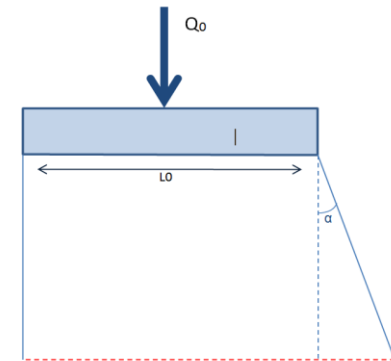
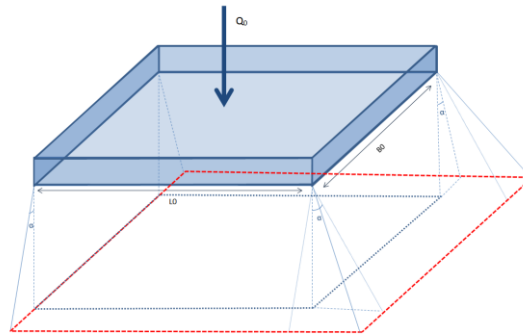
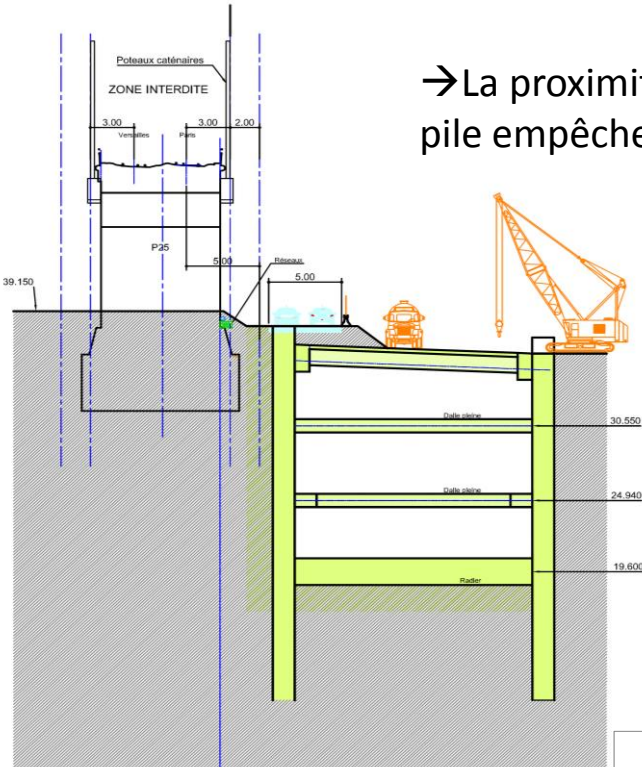
Proximité viaduc SNCF



4 Correspondance Issy RER

• Modélisation des appuis du viaduc du RER C

→ La proximité du soutènement en paroi moulée avec la pile empêche la diffusion de la charge coté fouille



$$s_{3D}(u) = \frac{S_0}{\left(1 + \frac{u}{2}\right) \left(1 + \frac{u}{n}\right)}$$

Avec

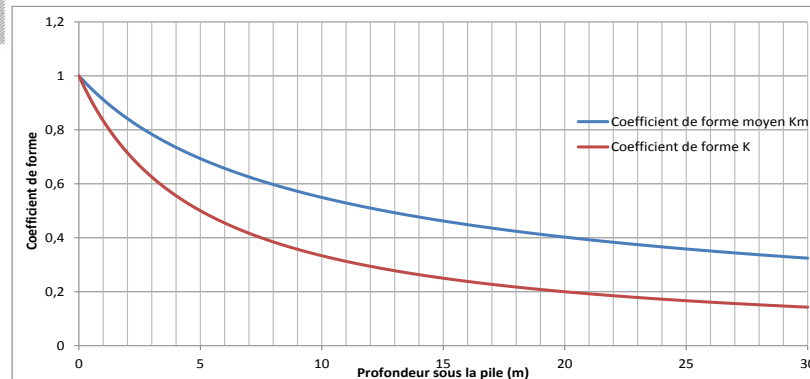
S_0 la contrainte sous la semelle, $u = z/L_0$ et $n = B_0/L_0$;

$$s_{2D}(u) = \frac{S_0}{\left(1 + \frac{u}{2}\right)}$$

Facteur de forme

$$k = \frac{S_{2D}}{S_{3D}} = \frac{1}{1 + \frac{u}{n}} = \frac{1}{1 + \frac{z}{B_0}}$$

$$k_m = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{1}{1 + \frac{z}{B_0}} dz = \frac{B_0}{H} \ln \left(1 + \frac{H}{B_0} \right)$$



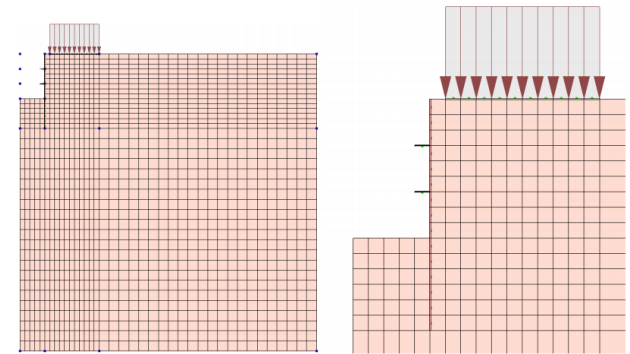
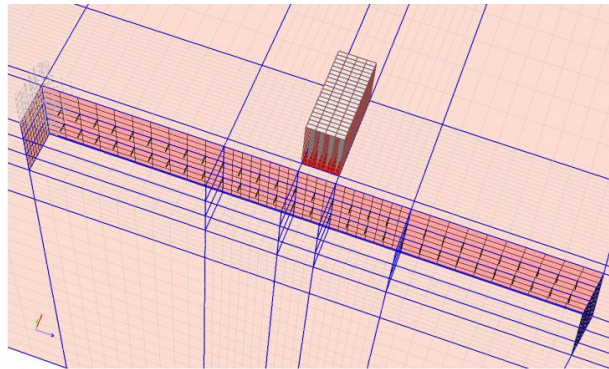
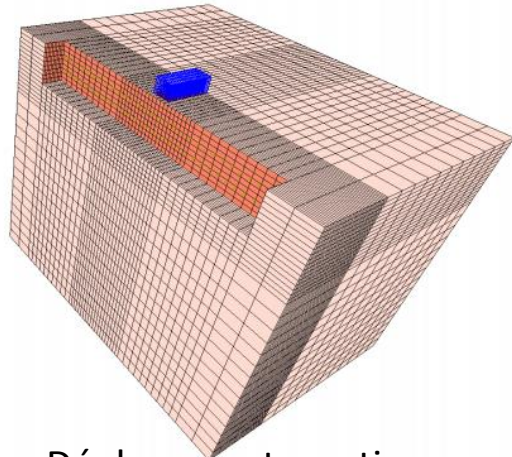
- 5 mètres sous la pile $k_m = 0,69$;
- 15 m sous la pile $k_m = 0,46$;
- 30 m sous la pile $k_m = 0,32$.

Retenir un coefficient de forme de 0,5 apparaît donc adapté.

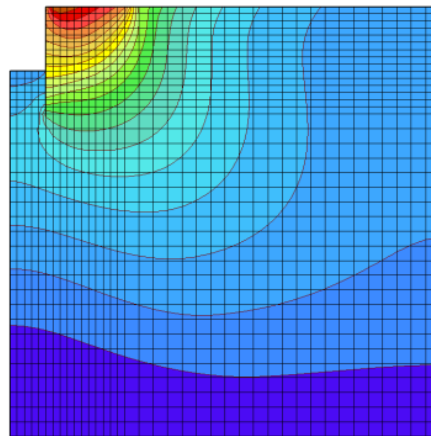
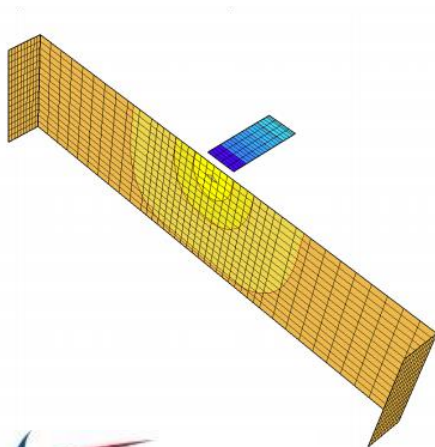
4 Correspondance Issy RER

- Modélisation des appuis du viaduc du RER C

Vérification du facteur de forme analytique par comparaison éléments finis 2D/3D Zsoil



Déplacements verticaux après construction de la pile et de la fouille



	Modèle 3D HSM 250 kPa Tassement (m)		Modèle 2D HSM 250 kPa Tassement (m)		Facteur de Forme K Tassements		
	Bord proche parois	Bord éloigné parois	Bord proche parois	Bord éloigné parois	Bord proche parois	Bord éloigné parois	Moyenne
Construction de la pile	3,91E-02	2,88E-02	1,32E-01	1,22E-01	2,96E-01	2,36E-01	2,66E-01
Final	5,05E-02	3,16E-02	1,53E-01	1,29E-01	-	-	-
Différence Chargement initial/tasse- ment final	0,011	0,003	0,021	0,006	0,540	0,440	0,490

Validation de la valeur de
coefficient de forme de 0,5

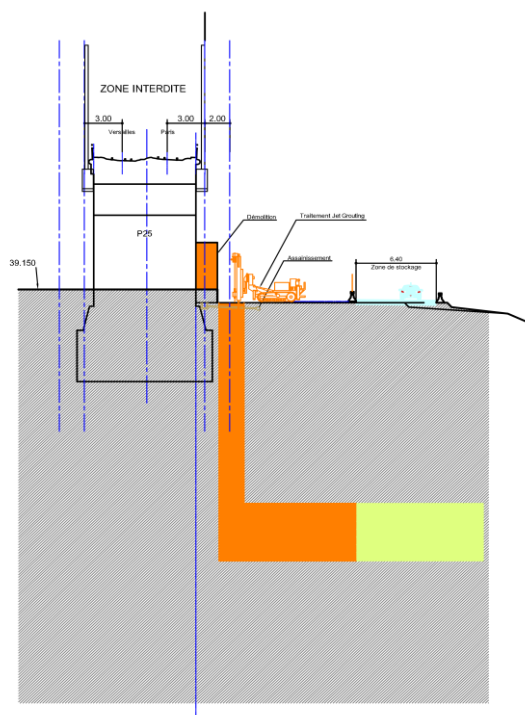
4 Correspondance Issy RER

- Méthodes constructives retenues en phase conception

Phase 1 :

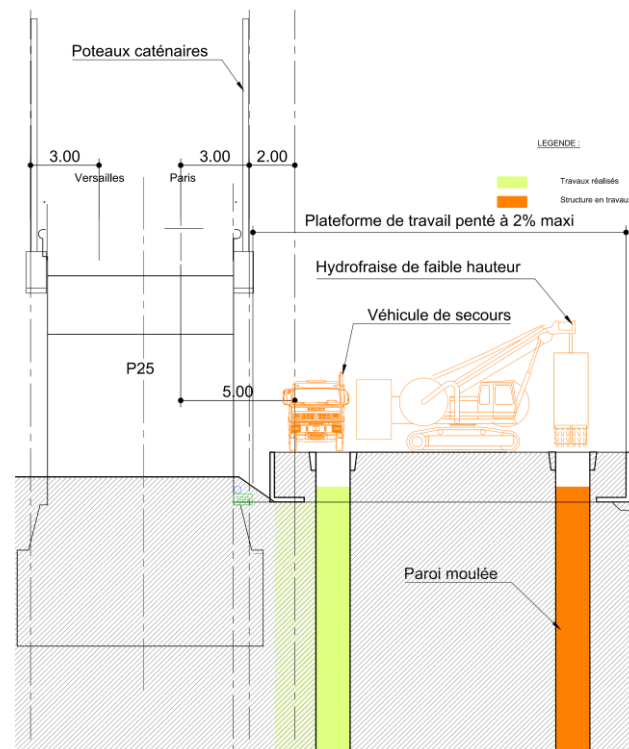
Traitement au jet grouting :

- d'un écran vertical le long du viaduc
- du fond de fouille côté Viaduc
- du fond de fouille côté opposé Viaduc



Phase 2 :

Construction des parois moulées épaisseur variant entre 1,2 et 1,5 m



4 Correspondance Issy RER

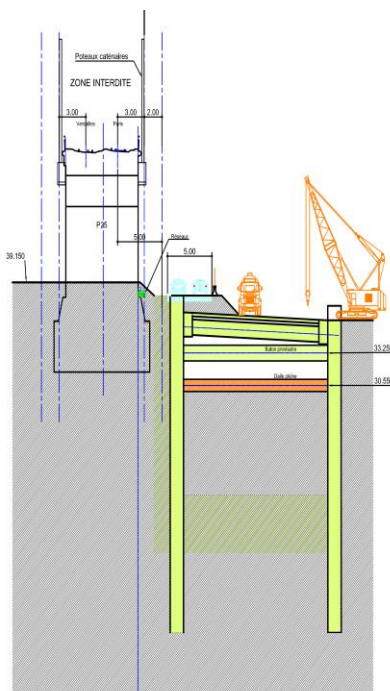
- Méthodes constructives retenues en phase conception

Phase 5 :

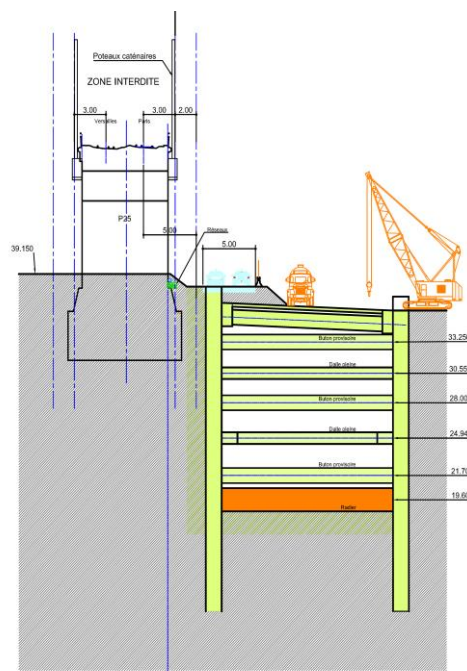
Réalisation de la dalle de couverture supérieure par moitié longitudinalement afin de permettre la circulation des secours.
Vérinage horizontal de la dalle de couverture.

Terrassement en Top Down avec réalisation des butons et dalles définitives et du radier, au fur et à mesure des terrassements.

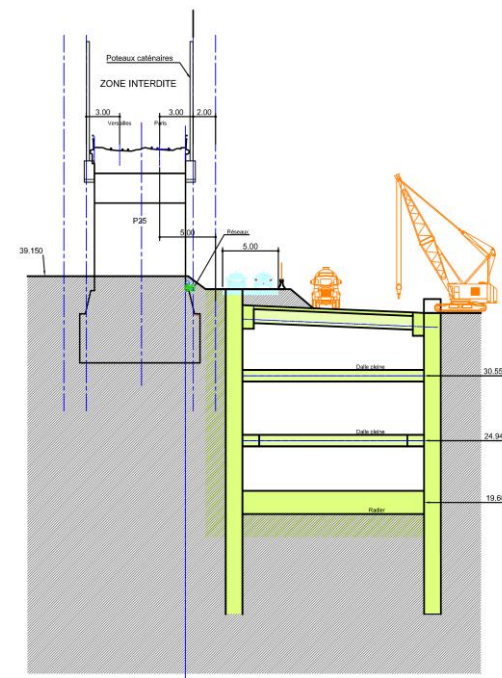
Construction du plancher N-1



Terrassement en taupe et construction radier

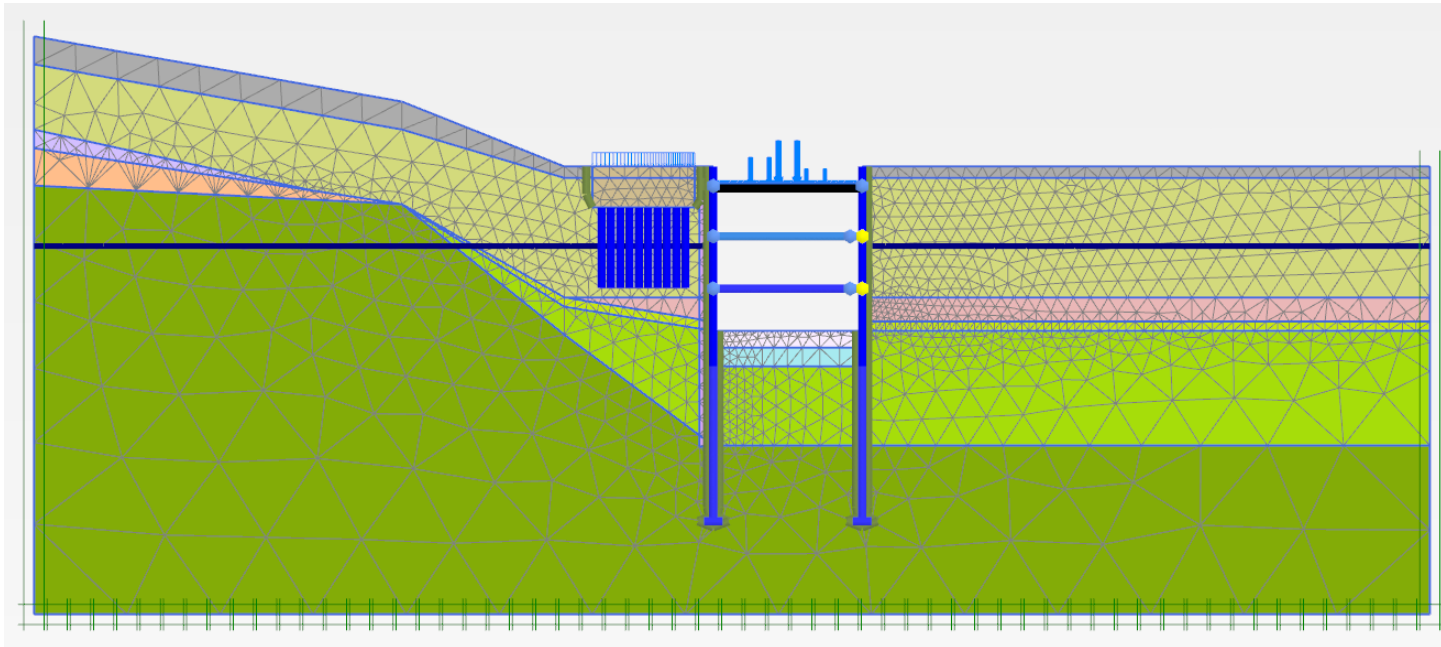


Dépose des butons provisoires



4 Correspondance Issy RER

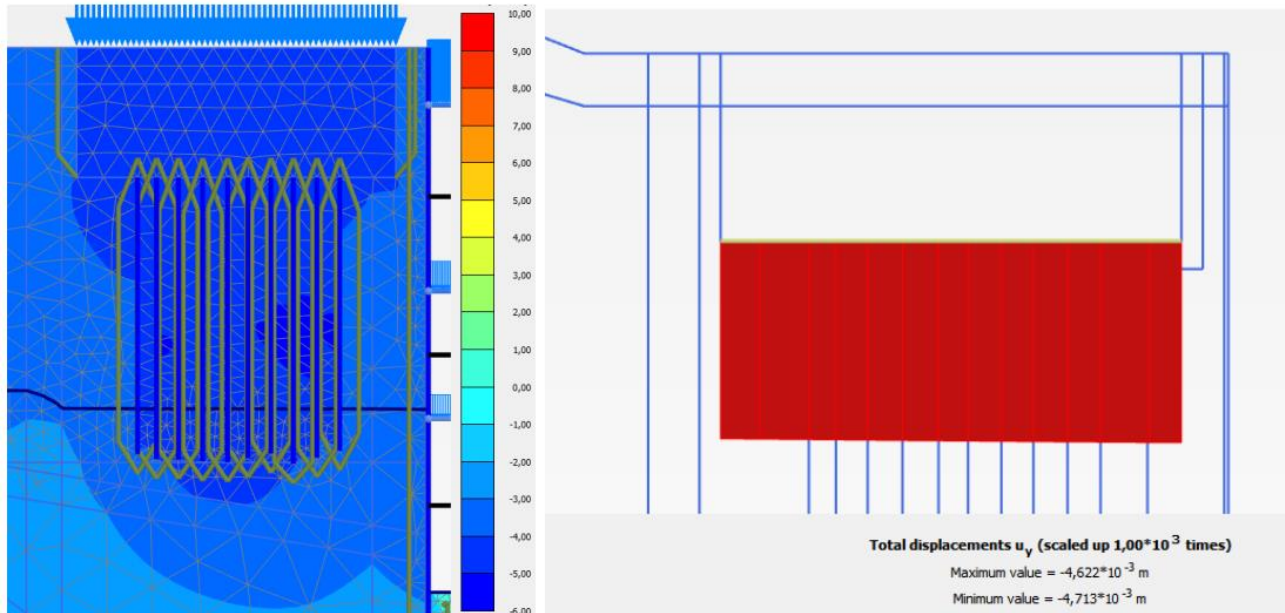
- Modélisation éléments finis Plaxis 2D



- Parois moulées, butons , plancher et micropieux en éléments structure plaque;
- Radier et pile en éléments volumiques;
- Loi de comportement du sol: HSM simplifiée $m=0$;
- + Prise en compte de la dysmétrie du terrain naturel

4 Correspondance Issy RER

- Modélisation éléments finis Plaxis 2D



- Parois moulées, boutons , plancher et micropieux en éléments structure plaque;
- Radier et pile en éléments volumiques;
- Loi de comportement du sol: HSM simplifiée $m=0$;
- + Prise en compte de la dysmétrie du terrain naturel

5 Conclusions

- Contexte géotechnique du projet du T3a complexe;
- Environnement urbain dense ;

→ Importance des reconnaissances sol et bâti

- Utilité des modèles aux coefficients de réaction pour identifier la sensibilité des paramètres constructifs;
- Précision et complexification progressive des modélisations lors des différentes phases d'études;
- Apport des éléments finis pour la définition des méthodes constructives vis-à-vis des impacts travaux sur les avoisinants.

→ Importance de la comparaison méthodes analytiques/ modélisations 2D /modélisations 3D pour définir des modèles exploitables, compréhensibles en phase de conception et utilisables en phase d'exécution.