

# Puits de démarrage du tunnelier de l'Ile de Monsieur, tronçon T3A de la ligne 15 sud du Grand Paris Express: conception, exécution et rétro-analyse

*TBM launching shaft of the Ile de Monsieur, section T3A of line 15 south of Grand Paris Express: design, execution and retro-analysis*

Martin Cahn, Moe Géotechnique T3;  
Thomas Berbet, Geos Ingénieurs Conseils;  
Maxime Fonty, Soletanche Bachy;  
Pierre Benoit Passot, Soletanche Bachy;  
Léonard Dupuis, Soletanche Bachy.

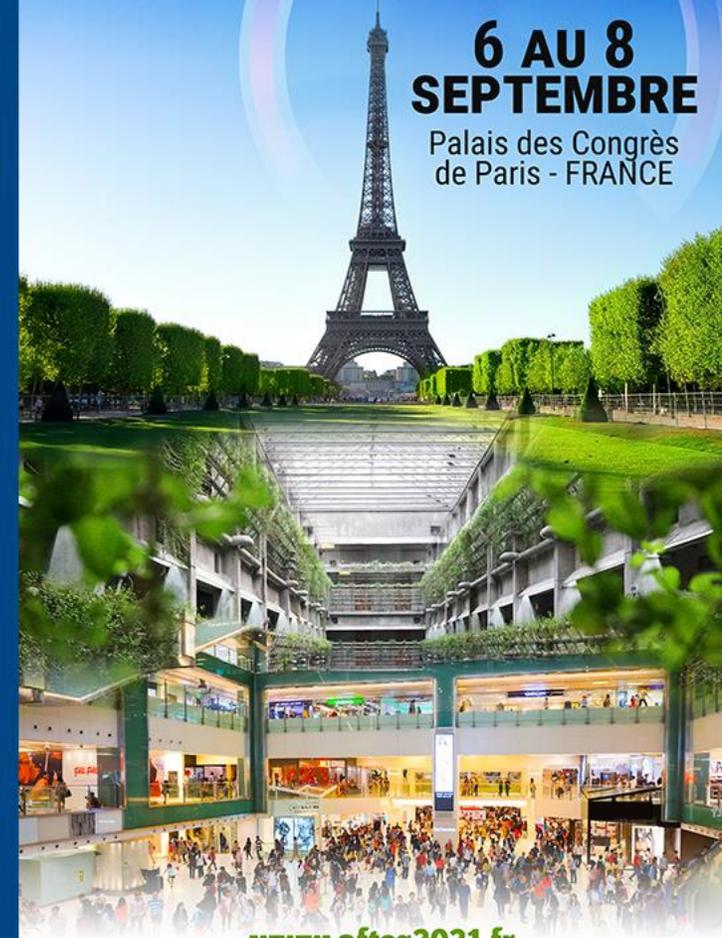
XVI<sup>ÈME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

AFTES  
2021

Le souterrain,  
espace  
d'innovations

6 AU 8  
SEPTEMBRE

Palais des Congrès  
de Paris - FRANCE



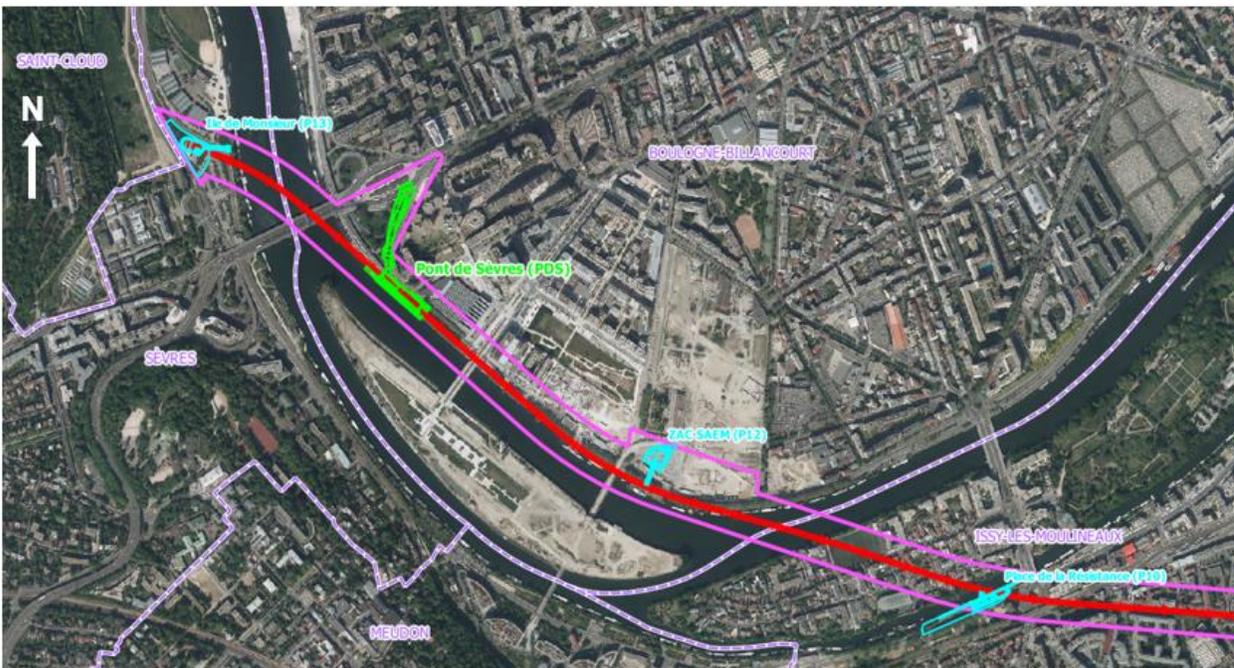
[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

AFTES  
42 rue Boissière,  
75116 PARIS  
[www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr)



# Tronçon T3a de la ligne 15 Sud

## • Présentation du projet



- Tunnel de 3900 m,  $\varnothing_{\text{int}} = 8,8$  m - Creusement au tunnelier à pression de terre – Trois passages sous la Seine
- 1 puits d'entrée du tunnelier forme trilobe
- 3 puits de ventilation et de secours
- 2 gares : Pont de Sèvres (PDS) et Issy RER (ISS), 36 m et 28 m de profondeur, 110 m de long, en parois moulées.



Tronçon T3a



XVI<sup>EME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

AFTES  
2021 | Le souterrain,  
espace  
d'innovations

6 AU 8  
SEPTEMBRE

Palais des Congrès  
de Paris - FRANCE

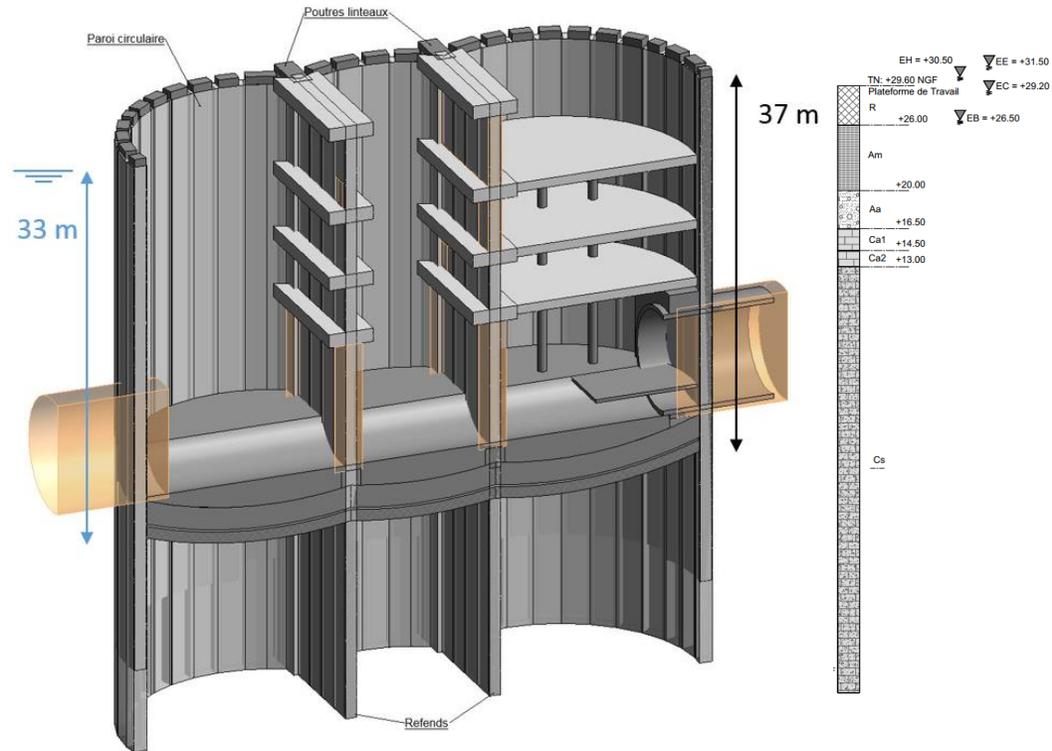


[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

AFTES  
42 rue Boissière  
75116 PARIS  
[www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr)



# Localisation et géométrie de l'ouvrage



© HORIZON

## Puits de la forme d'un trilobe

Longueur de 50 m, largeur maximale de 24 m entre nus de parois moulées ;

## Soutènement en parois moulées

55 m de profondeur pour une épaisseur variant entre 1,2 m pour les parties circulaires, 1,0 m pour les refends transversaux et 1,8 m pour les quatre panneaux linteau ;

XVI<sup>EME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

**AFTES 2021** | Le souterrain, espace d'innovations

**6 AU 8 SEPTEMBRE**  
Palais des Congrès de Paris - FRANCE

[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

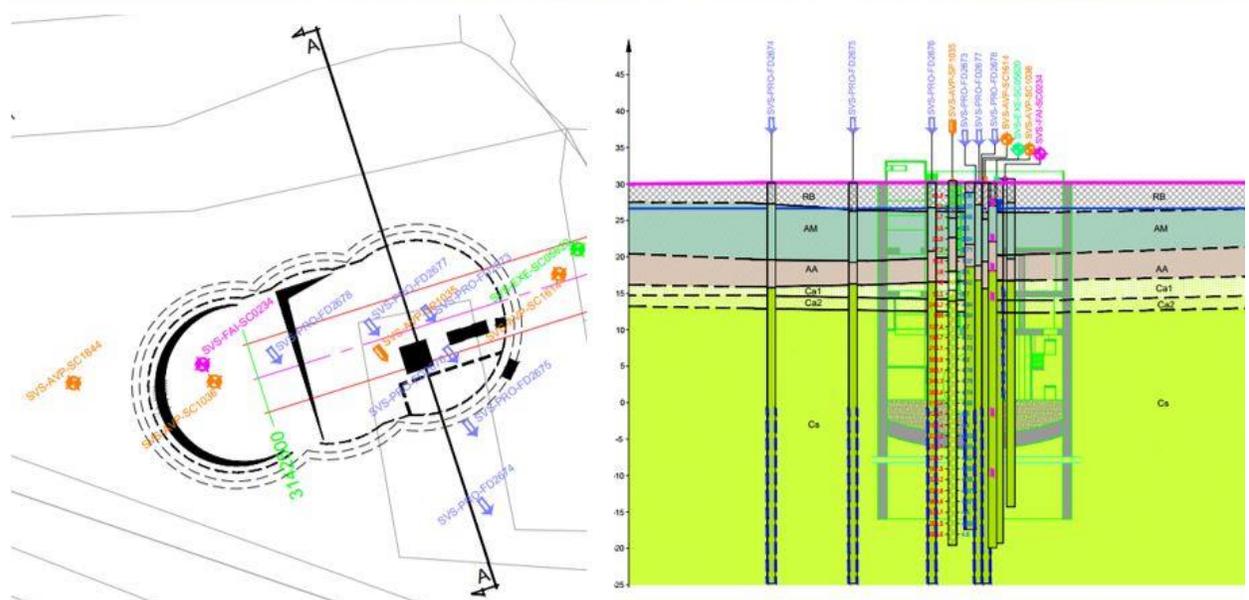
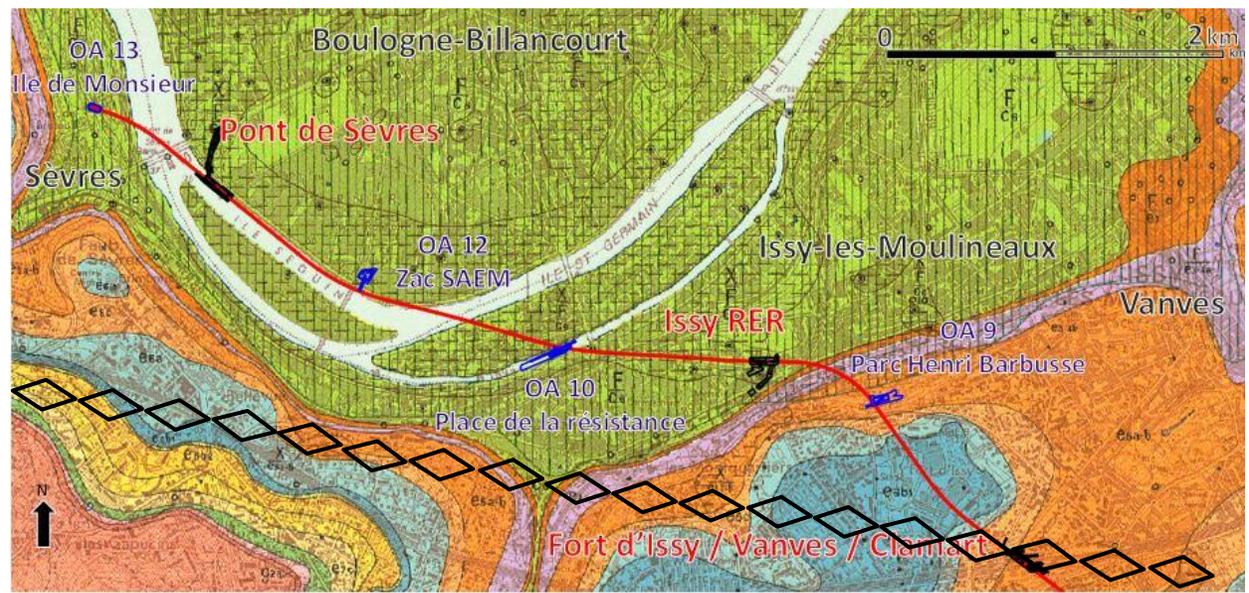
# Contexte géotechnique



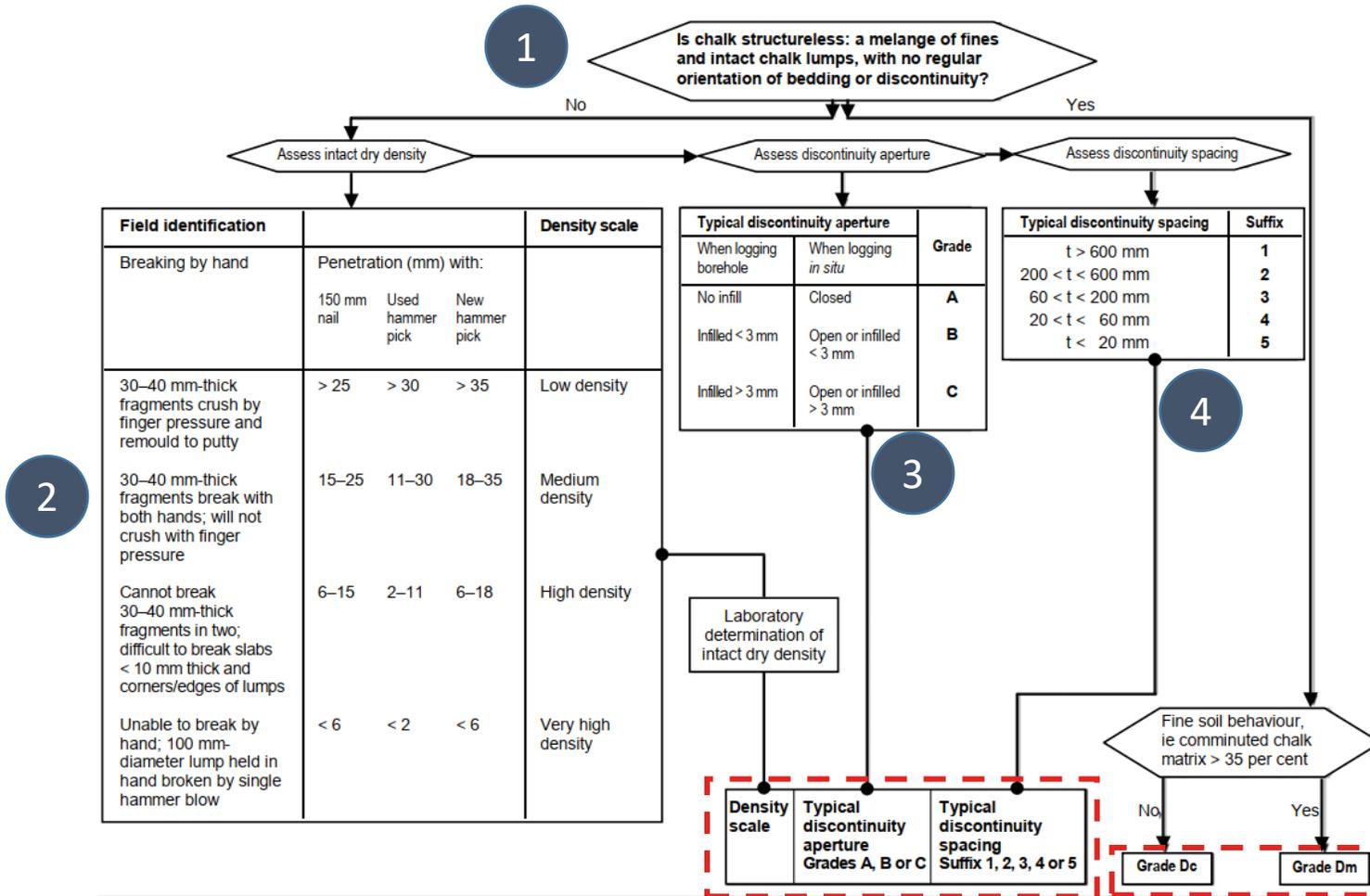
- Contexte géologique local marqué par l'affleurement de la Craie Campanienne sous faible couverture alluvionnaire ;
- Craie principale formation rencontrée par le tunnel 80% et couche d'ancrage des parois moulées de tous les ouvrages ;
- Améliorations des caractéristiques mécaniques de la craie avec la profondeur ;
- Altération plus importante en rive droite qu'en rive gauche ;

Distinction de 3 faciès d'altération :

- Ca1 : Craie très altérée, molle**  
 $pl^* < 1,5 \text{ MPa}$   
 $Em < 20 \text{ MPa}$
- Ca2 : Craie intermédiaire, très fracturée**  
 $1,5 \text{ MPa} < pl^* < 4 \text{ MPa}$   
 $20 \text{ MPa} < Em < 100 \text{ MPa}$
- Cs : Craie saine, franche, compacte**  
 $pl^* > 4,5 \text{ MPa}$   
 $Em > 100 \text{ MPa}$



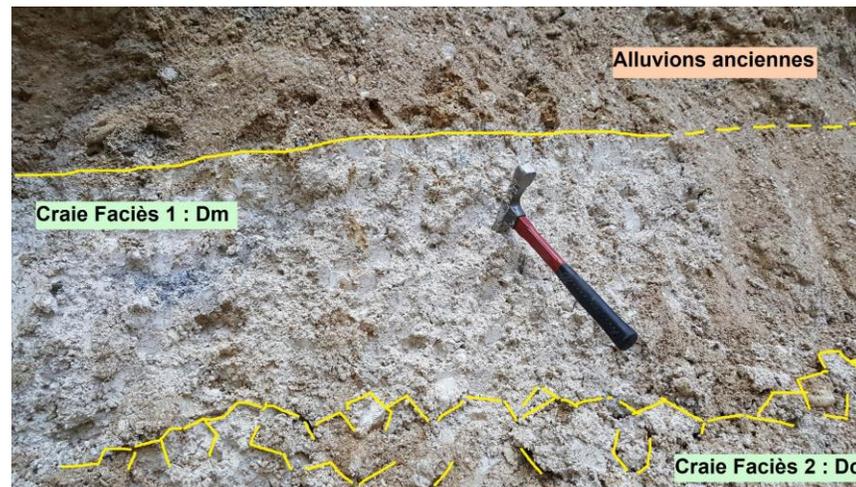
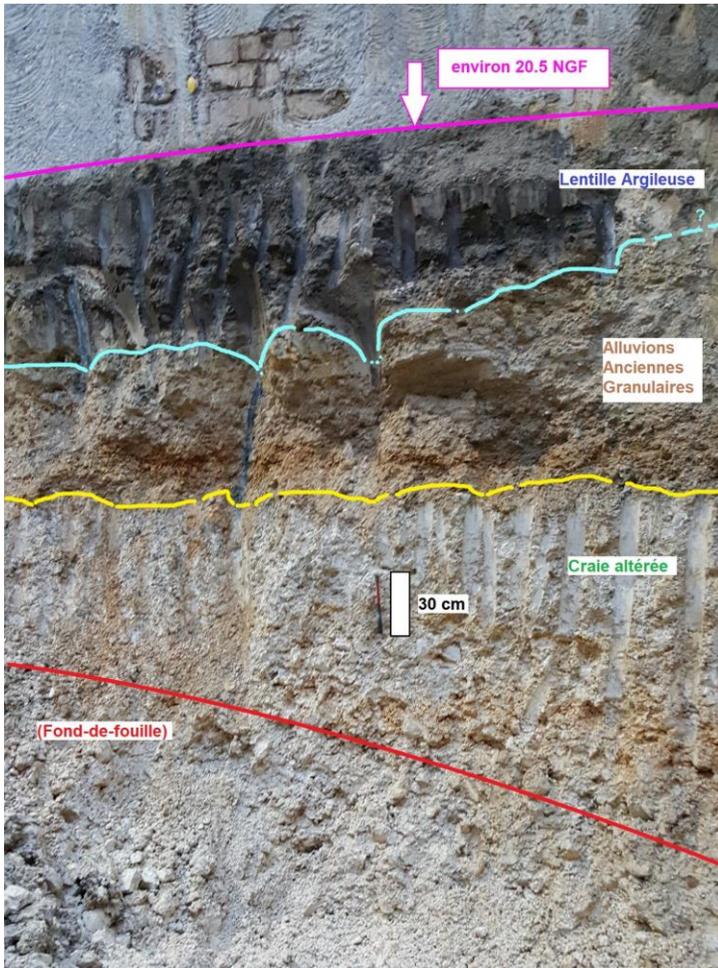
# Observation géologique



Utilisation du retour d'expérience anglais sur la craie : classification CIRIA

« Engineering in chalk », C574, J. A. Lord, C. R. I. Clayton, R. N. Mortimore, 2002, 350pp.

# Observation géologique



## Transition Alluvions/Craie altérée

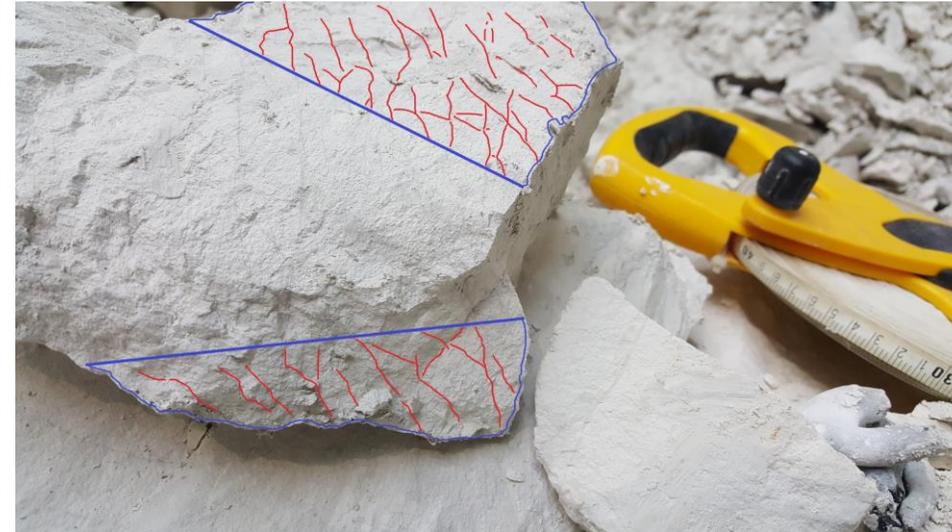
- Zones d'interpénétration entre alluvions et craie sur 50 cm à 1m;
- Fond de fouille: ensemble de blocs imbriqués entre eux entourés d'une sorte de gangue;
- Trace d'oxydation sur les blocs les plus gros.

## Épaisseur d'altération limitée

- 50 premiers cm à 1 m : ensemble de petits clastes de craie pris dans une matrice crayeuse tendre → **Craie Dm**;
- 1 m de craies à très forte proportion de clastes, de taille centimétrique à décimétrique → **Craie Dc**.

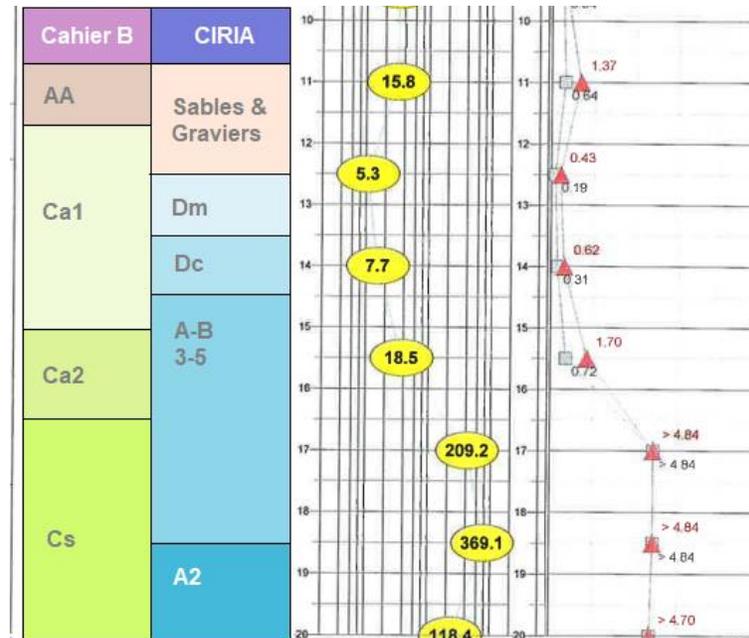


# Observation géologique



## Craie Saine:

- Craie rocheuse avec degré de fracturation décroissant avec la profondeur ;
- Épontes nettes et propres → **Craie A** ;
- En tête de craie rocheuse espacement de fissure de l'ordre du centimètre, localement colmaté par une re-cimentation de calcite → **Craie A5** ;
- Espacement de fissure de l'ordre de 50 à 60 cm retrouvé jusqu'au fond de fouille → **Craie A2** ;
- Bonne cohérence entre « découpage pressiométrique » et classification CIRIA.



XVI<sup>ème</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

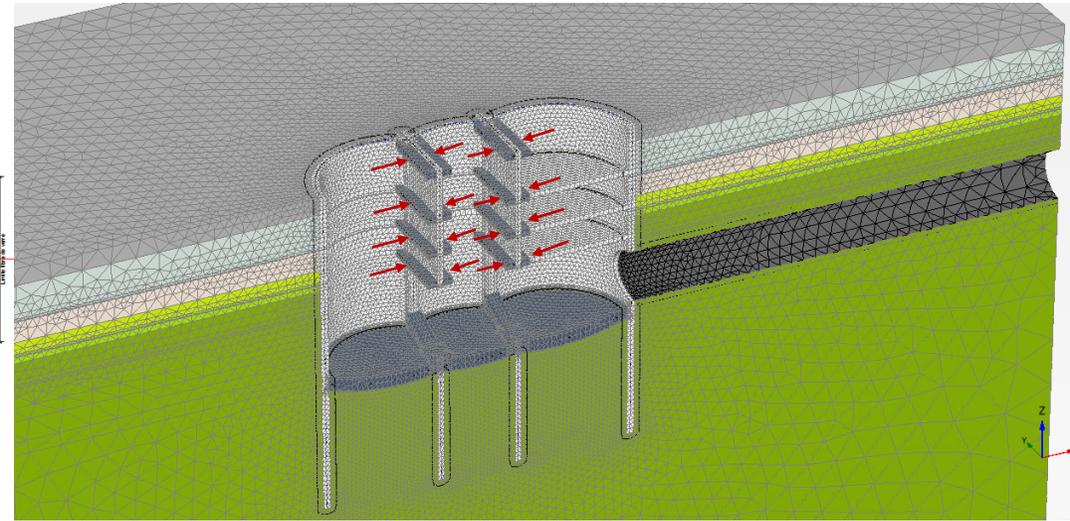
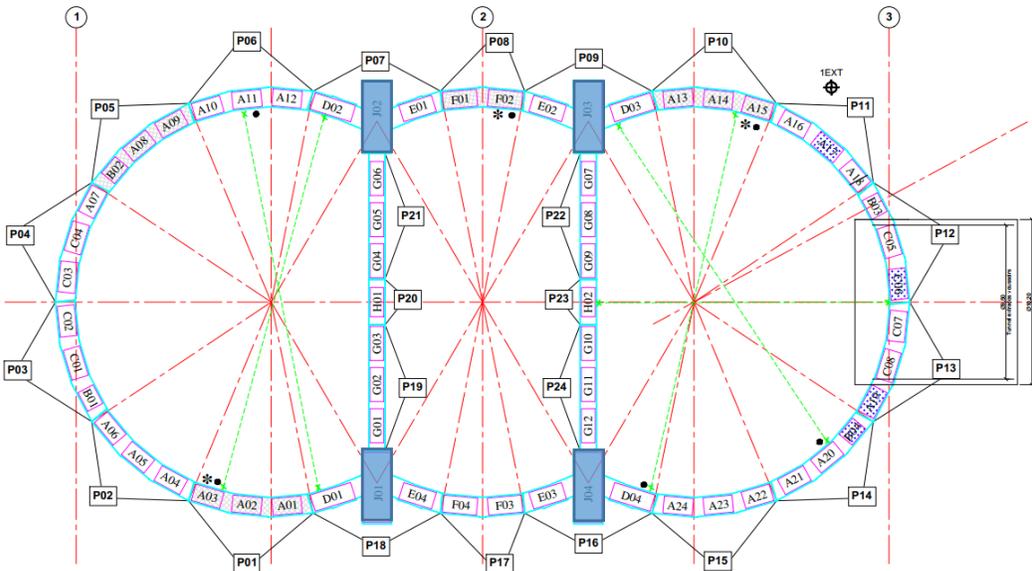
**AFTES 2021** | Le souterrain, espace d'innovations

**6 AU 8 SEPTEMBRE**  
Palais des Congrès de Paris - FRANCE



[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

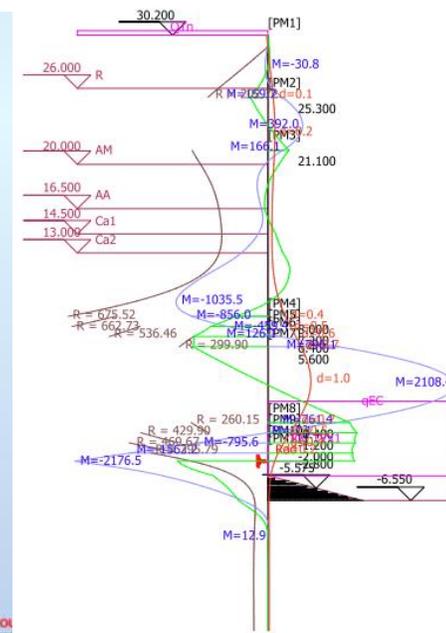
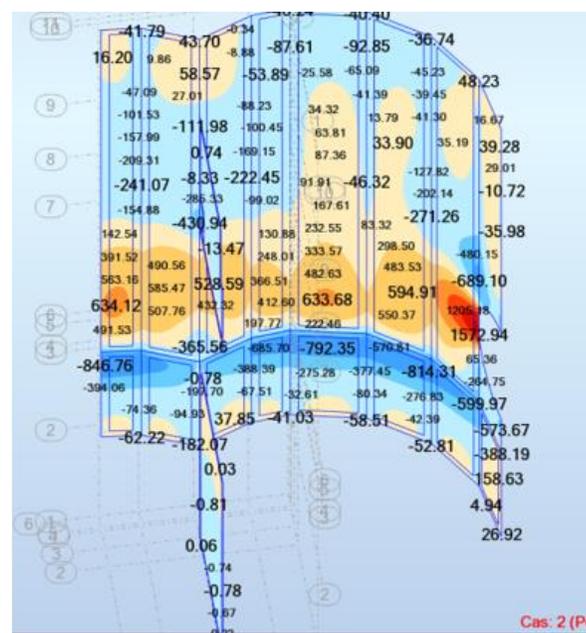
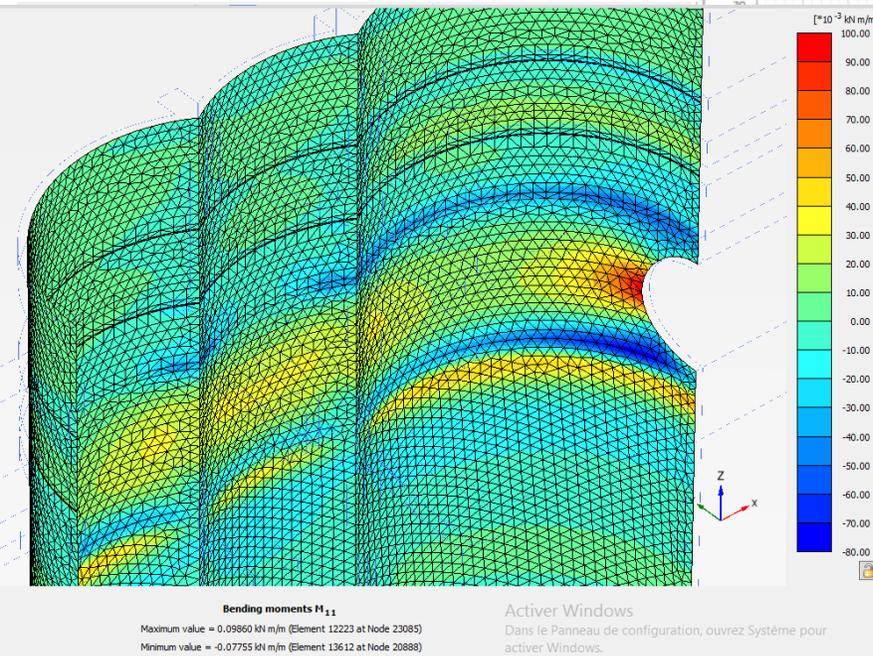
# Dimensionnement: principes



## Fonctionnement structural:

- **3 lobes sécants** au droit de **4 poutres linéaires**;
- **Paroi moulée circulaire est auto-stable**: la poussée des terres et de l'eau est reprise par effet de voûte et la paroi fonctionne principalement en compression orthoradiale;
- **Intersection des lobes**: les linéaires sont chargés par la résultante de la réaction annulaire des deux lobes adjacents;
- **Poutres linéaires** : fonctionnent principalement en flexion verticale, appuyées sur les refends renforcés par 8 butons. Portée maximale de 9,4 m entre le radier et le buton inférieur;
- **Modélisations**: coefficients de réaction, modélisation éléments finis «structure » avec chargements imposés; modélisations aux éléments finis 3D sol-structure.

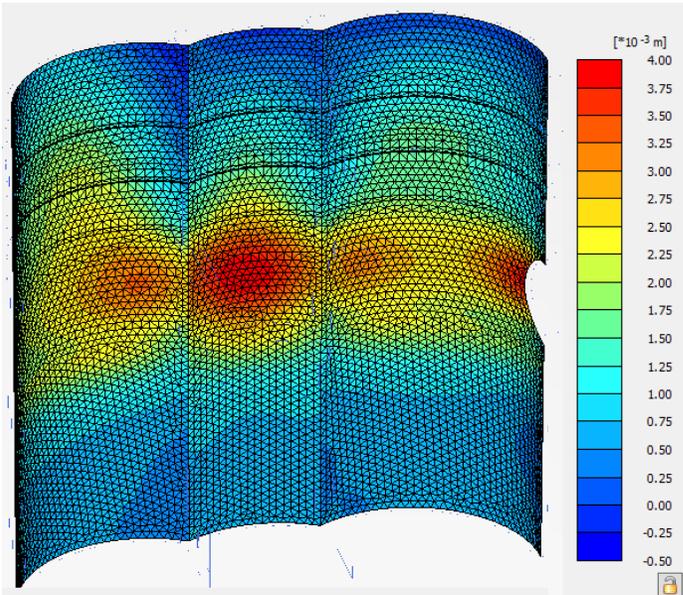
# Dimensionnement: prise en compte du percement



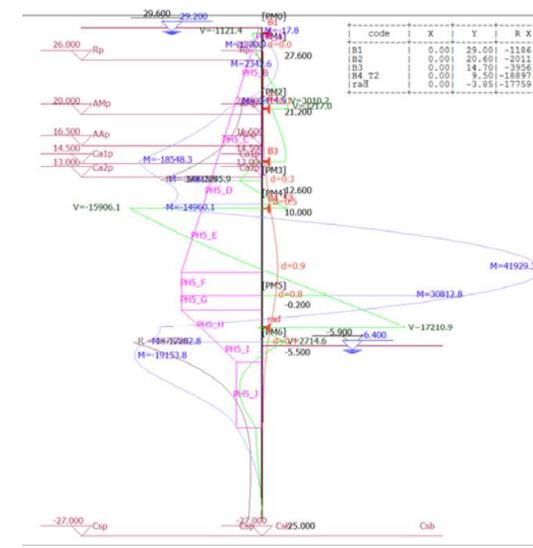
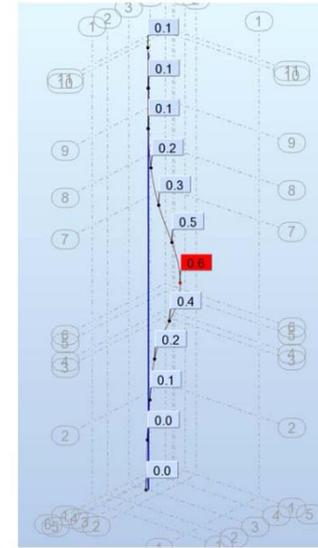
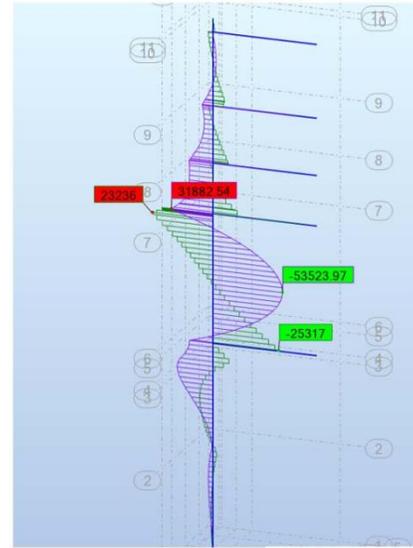
- **Modélisation éléments finis 3D:** modèle EF\_structure  $M=1,6 \text{ MN.m/m}$  MISS-F Plaxis  $M=1 \text{ MN.m/m}$  et déplacement max de l'ordre de **0,5 cm** ;
- **Calcul MISS-K PARIS :** annulation de la rigidité cylindrique sur la hauteur de l'ouverture  $M=2,1 \text{ MN.m/m}$  à l'ELS et déplacement max de **1 cm**;
- **Diminution de la rigidité cylindrique:** supposée sur **tout le puits** dans les modèles MISS\_K, limitée à environ **1 rayon** du tunnel avec le modèle MISS\_F Plaxis et **1,5 rayon** avec le modèle EF\_structure;

- Ordre de grandeurs de déplacements et de flexion bien retrouvés avec les modèles plus simples MISS-K;
- Sollicitations dans le modèle MISS\_K plus fortes dû à l'abattement de rigidité cylindrique plus important;
- Modèles éléments finis permettent une redistribution de contrainte dans les éléments butonnant plus fine;
- Modèle MISS\_F permet de réduire la poussée effective par rapport au chargement imposé dans le modèle EF\_structure;

# Dimensionnement: flexion des poutres linteaux



Local total displacements  $u_3$  (scaled up  $2.00 \cdot 10^3$  times)  
 Maximum value =  $3.941 \cdot 10^{-3}$  m (Element 11984 at Node 967988)  
 Minimum value =  $-0.2541 \cdot 10^{-3}$  m (Element 483 at Node 671)



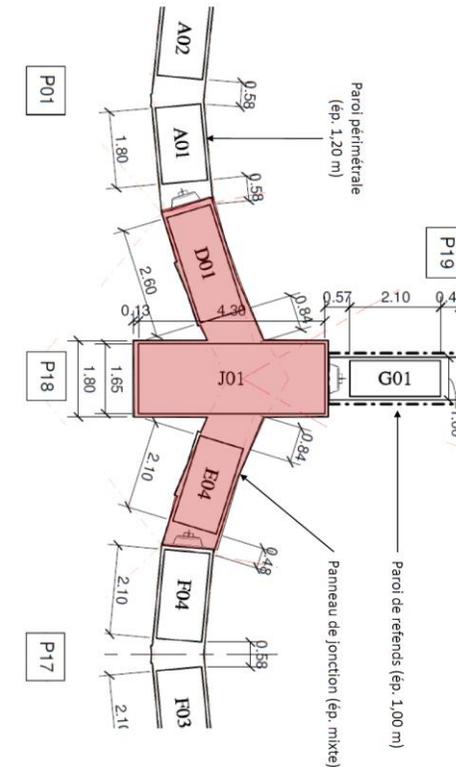
	Unité	Miss_K_lint	Miss_K_lint_mono	EF_stru	Miss_EF_vol
Déformée max	cm	1,0	0,9	0,6	0,4
Moment de flexion max	MN.m/m	74	75	53	35

- **Modélisation éléments finis** montrent des moments de flexion plus faibles que les modèles aux coefficients de réaction (1,5 à 2 fois moindre);
- **Modèles 3D** permettent de mieux apprécier la redistribution des efforts vers les éléments butonnants tandis que les portées sont réduites;
- **Modélisation 3D MISS\_F** montre un fonctionnement en plaque avec une voute de décharge dans la structure mieux traduite qu'avec le modèle EF\_Stru dans lequel le linteau est modélisé en poutre;
- **Dimension des structures** non optimisable, taille linteau dimensionnée à l'aide des modèles MISS-K reste nécessaire pour limiter la compression au niveau des appuis et assurer l'équilibre vertical de l'ouvrage;



[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

# Exécution: Parois moulées



- **Réalisation des parois moulées** : 2 ateliers bennes hydraulique instrumentées « KS » de 3 épaisseurs ;
- **Joints CWS toute hauteur** : maîtrise de la verticalité essentielle pour assurer le décoffrage → (0.12 % en moyenne soit 7 cm à 55 m ). Cales biaise en polystyrène utilisées dans les parties circulaires ;
- **Panneaux de jonction**: « hybride » → 1 linteau (4,5×1,8 m) + 2 amorces de parois de lobes de (3,4×1,2 m). Ferrailage conséquent pour la cage centrale (190 kg/m<sup>3</sup>) pour un poids de total de 80 T. Volume de béton de 1 100 m<sup>3</sup> réalisé de nuit avec 4 tubes plongeurs ;

XVI<sup>EME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

**AFTES 2021** | Le souterrain, espace d'innovations

**6 AU 8 SEPTEMBRE**  
Palais des Congrès de Paris - FRANCE

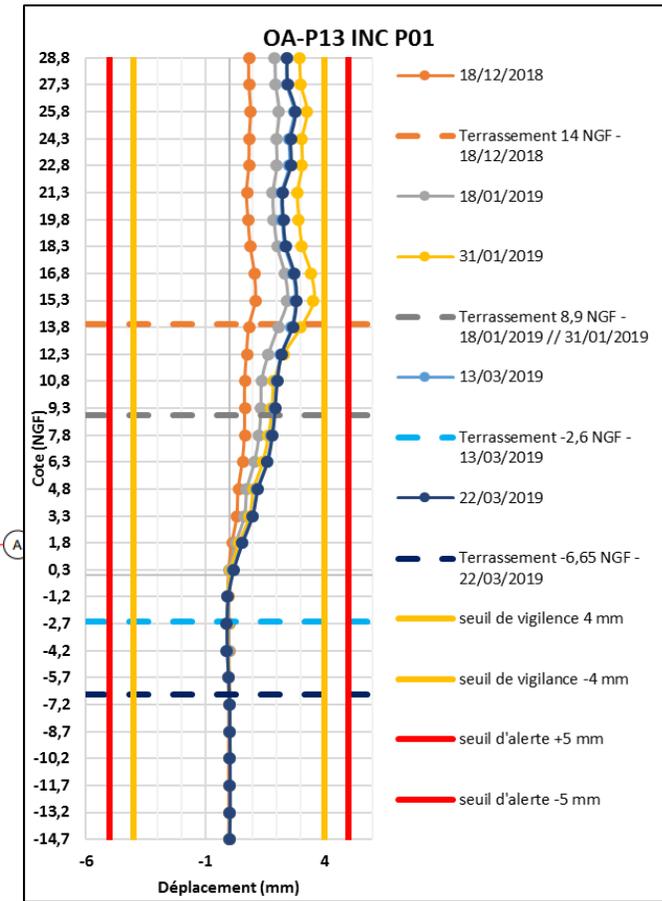
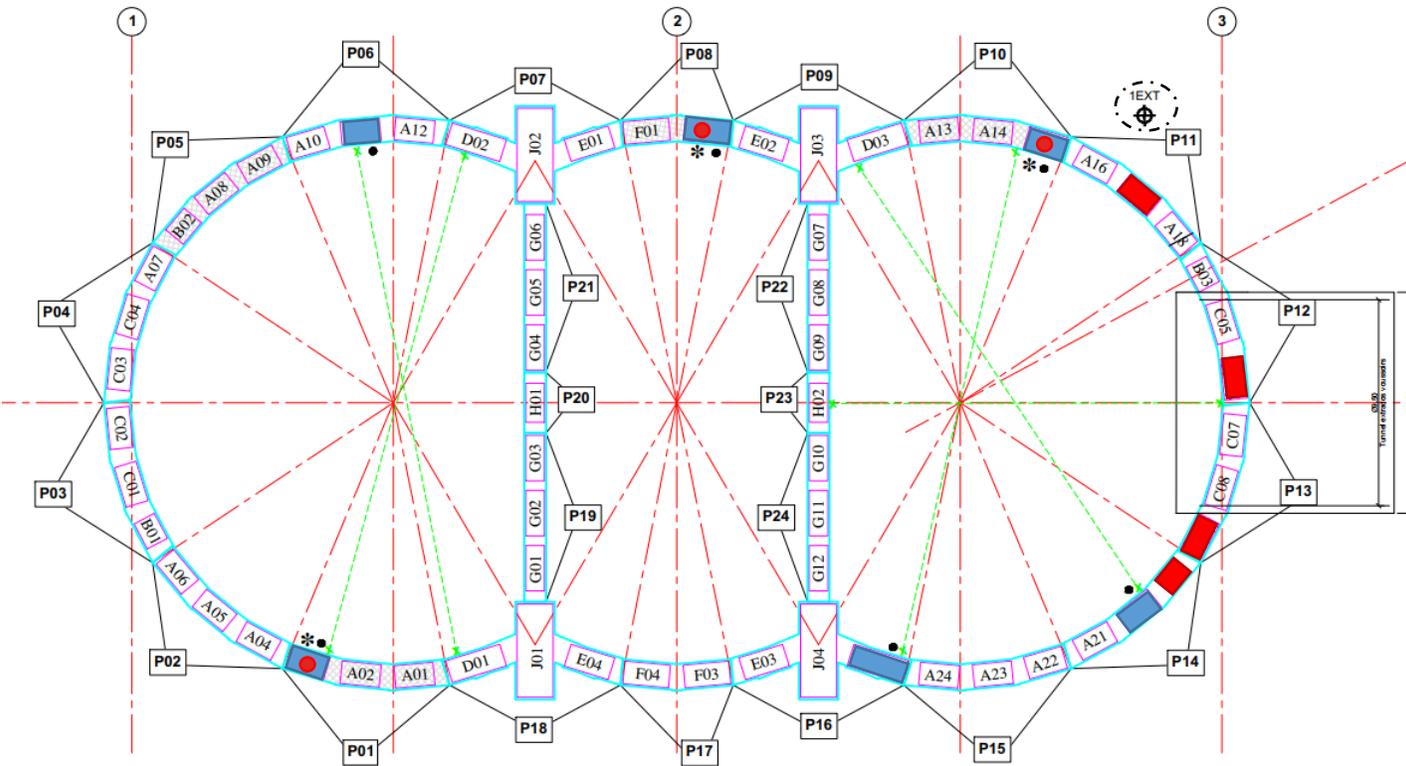
[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

# Exécution: Terrassement et génie civil



- **Mise hors d'eau:** 46 drains de décharges passifs forés à 55 m pour écrêter les pressions hydrostatiques et assurer la stabilité du bouchon de craie + 3 puits de pompage dans chaque lobe ;
- **Terrassement:** excavation des 3 lobes en parallèle en respectant une dissymétrie de 2 m entre chaque lobe au maximum (pelles retro sur chenilles, treillis, treuil & caméléon) ;
- **Génie civil à la descente:** butons, certains niveaux de planchers, amincissement de la PM au droit du percement du tunnelier, découpe partielle des refends pour les systèmes ;
- **Radier:** contre-vouté en forme de coupole inversée, 2m d'épaisseur (1650 m<sup>3</sup>).

# Comportement de l'ouvrage



- **1 Extensomètre:** 35 m de profondeur avec 4 ancres. Mis en place à 3,5 m du panneau préalablement à sa réalisation → Pas de déplacement significatif mesuré;
- **6 Inclinomètres:** très faible déplacement mesuré (max 4 mm ventre) confirmant le comportement attendu;
- **3 CPI:** reforés de 50 cm dans le terrain pour suivre la stabilité du bouchon de craie;
- **Fibres optiques:** déformation orthoradiale mesurée moins importante que celle considérée dans les modèles;
- **Suivi des débits :** 5 m<sup>3</sup>/h en pointe →  $K_h = K_v = 5 \cdot 10^{-7}$  m/s ou  $K_h = 2 \cdot 10^{-6}$  m/s et  $K_v = 2 \cdot 10^{-7}$  m/s;

# Conclusion

- Puits de l'OA 13 est un **ouvrage hors norme** ayant nécessité des moyens exceptionnels ;
- Observation de la Craie Campanienne en grand a permis de compléter les reconnaissances amont et a confirmé la **pertinence de l'utilisation de la classification du CIRIA** ;
- Confirmation de la **faible perméabilité de la Craie Saine** ( $10^{-6}$  à  $5.10^{-7}$  m/s) et de la nécessité de maîtrise des pressions au fond de fouille ;
- Dimensionnement à l'aide de modélisations **2D MISS-K approche robuste** et que les modélisations complémentaires **3D aux éléments finis** avec chargement imposés ou sol-structure pouvaient permettre d'**optimiser le ferrailage** mais **pas les épaisseurs des structures** ;
- **Auscultation** importante a permis de **confirmer et de suivre le comportement de l'ouvrage** et l'importance de la redondance entre les différents dispositifs.





Merci de votre attention!

XVI<sup>ÈME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

**AFTES**  
**2021** | Le souterrain,  
espace  
d'innovations

**6 AU 8**  
**SEPTEMBRE**

Palais des Congrès  
de Paris - FRANCE



[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

AFTES  
42 rue Boissière  
75116 PARIS  
[www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr)

