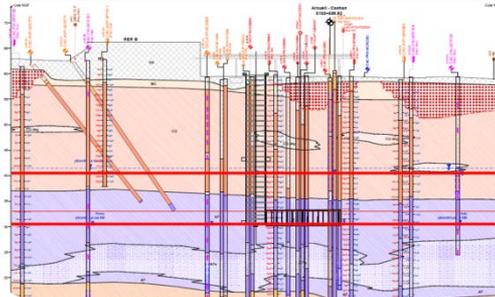


# Métro Grand Paris Express ligne 15 sud-ouest tronçon Pont de Sèvres - Villejuif. Les contraintes géotechniques et les premiers résultats du puits d'essais à Arcueil Cachan



## JOURNEE TECHNIQUE: CHANTIERS LINEAIRES SOUTERRAINS EN SITE URBAIN

Influence de la géologie / géotechnique sur la conception et la réalisation des  
ouvrages

Hervé LE BISSONNAIS  
TERRASOL

Christophe JASSIONNESSE  
GEOS

26 mars 2015

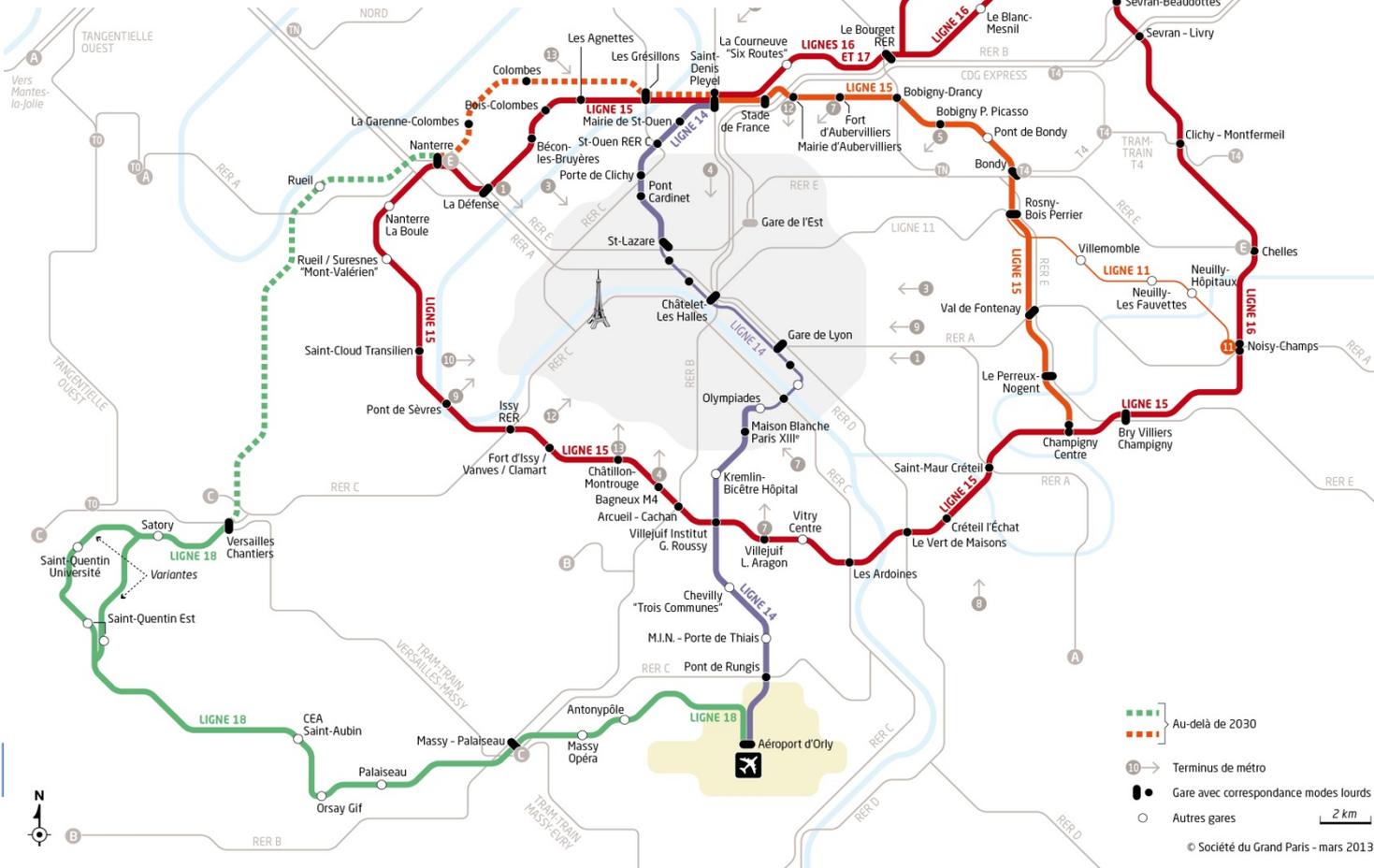


Vincente FLUTEAUX  
Société du Grand Paris

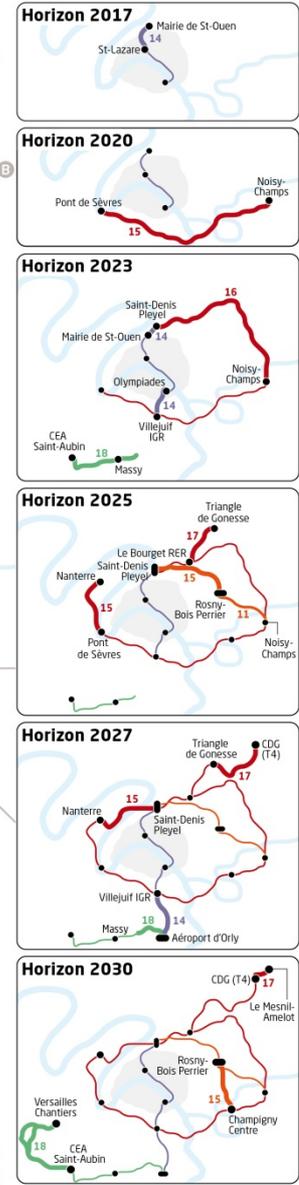


200 kilomètres, 72 gares :

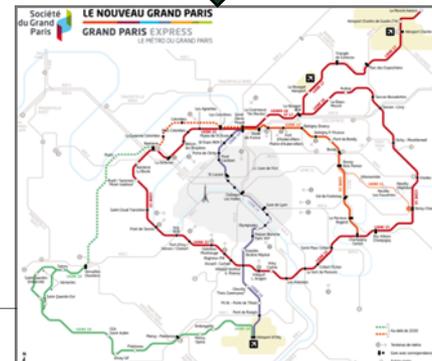
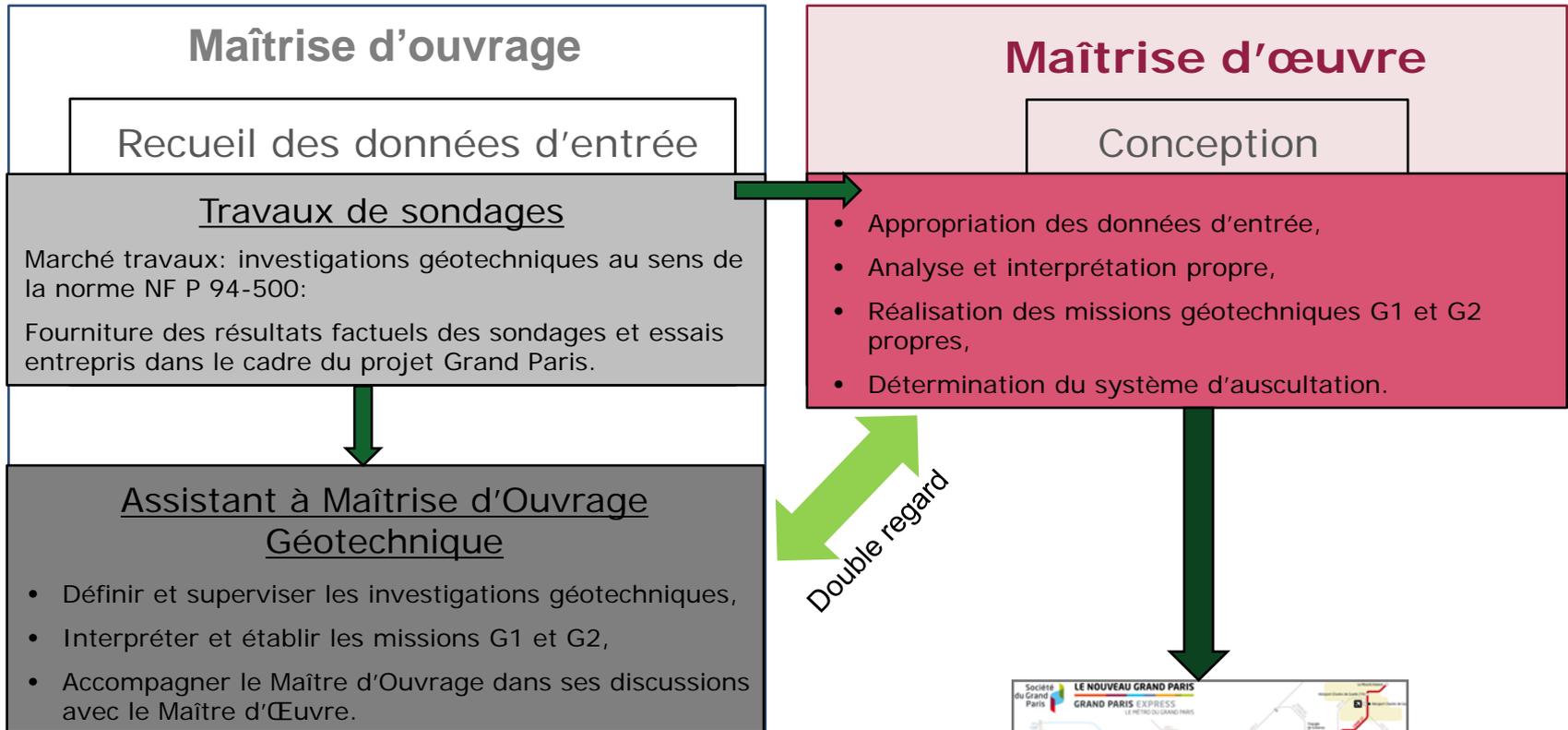
- Des correspondances avec les lignes existantes (tram, métro, transilien, RER),
- Connexion avec les aéroports,
- Connexion avec les gares TGV.



**Objectifs de mises en service**



# Les grands axes de conception: géologie, hydrogéologie et géotechnique



## Les principaux enjeux géotechniques du Grand Paris

# Les grands axes de conception: géologie, hydrogéologie et géotechnique

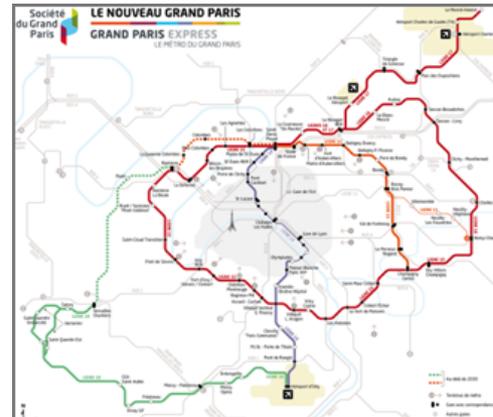
## Maîtrise d'ouvrage

- Experts internes,
- Conducteur d'opération
- AMO spécialisé (géotechnique).



Double regard

## Maîtrise d'œuvre



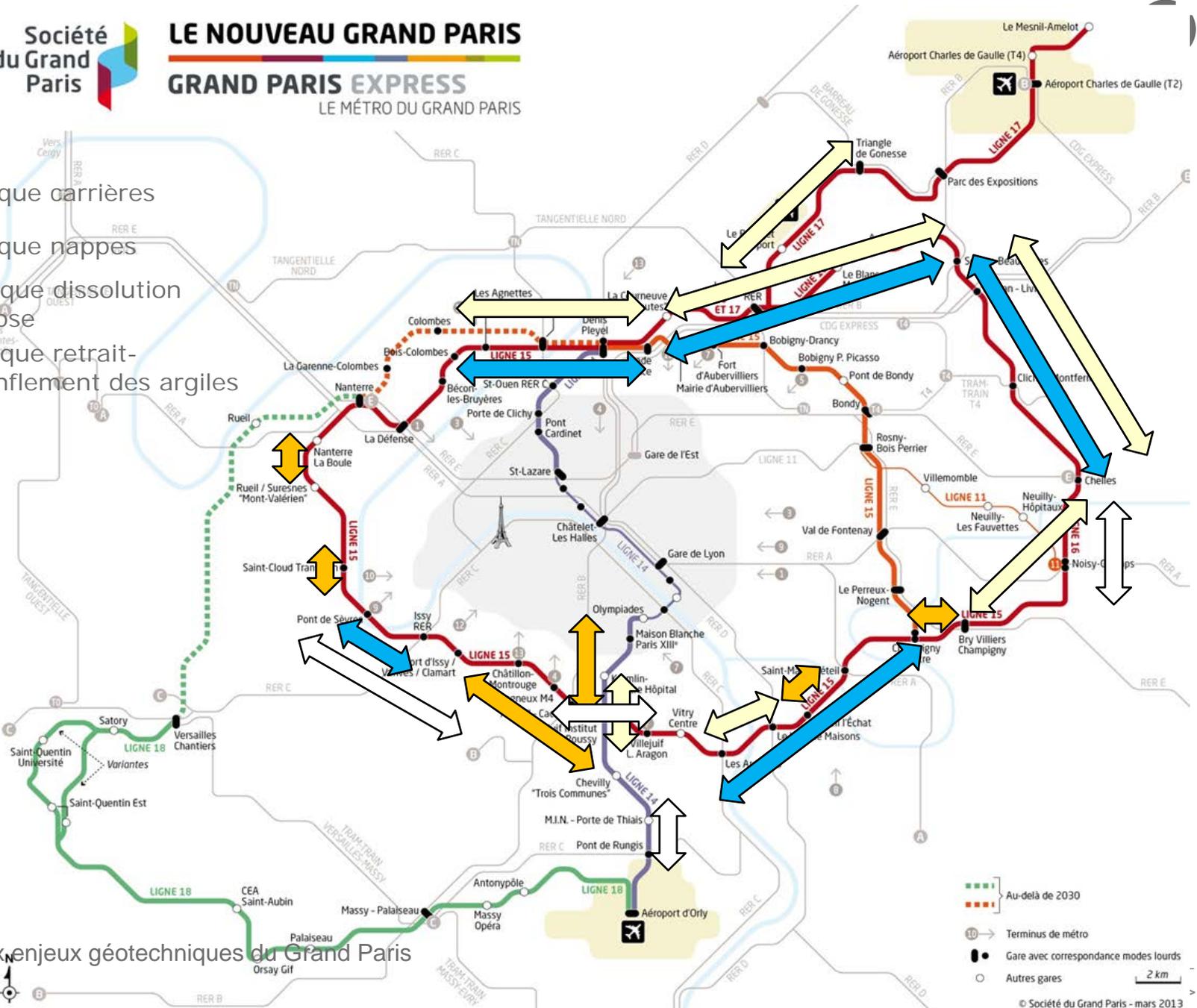
Expertise



COMITE DE MAITRISE DES  
RISQUES INDEPENDANT

Les principaux enjeux géotechniques du Grand Paris

-  Risque carrières
-  Risque nappes
-  Risque dissolution gypse
-  Risque retrait-gonflement des argiles

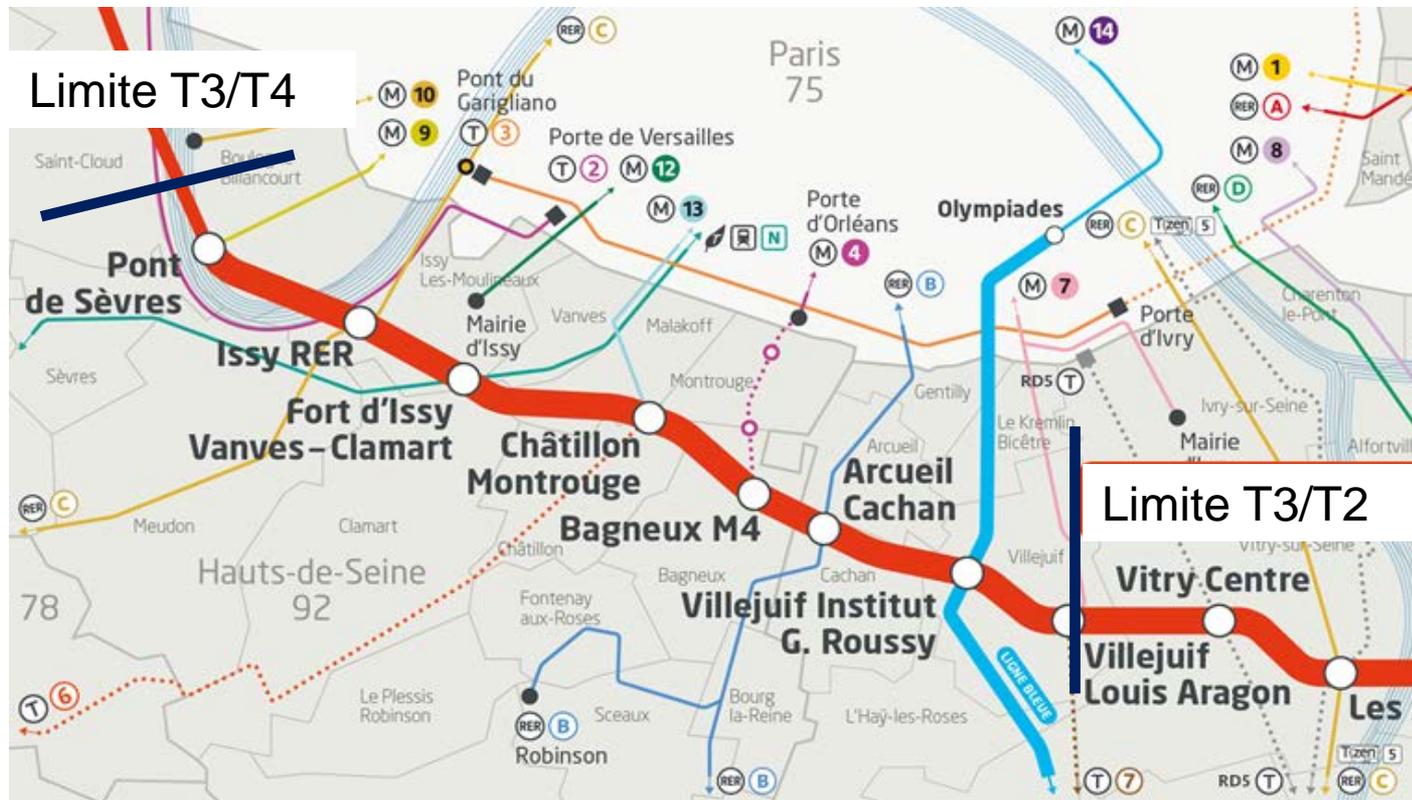


Les principaux enjeux géotechniques du Grand Paris

# Tronçon T3 (Ligne 15 Sud Ouest)

## Pont de Sèvres – Villejuif Louis Aragon

- 8 gares
- 12,5 km de tunnel



Présentation du tronçon T3

# Tronçon T3 Pont de Sèvres – Villejuif Louis Aragon

## Les intervenants :

- Maitrise d’Ouvrage :
- Maitrise d’Œuvre : groupement
- Maitrise d’Œuvre Géotechnique :
- AMO Géotechnique AVP : Arcadis
- AMO Géotechnique PRO / Travaux :
- AMO Général :



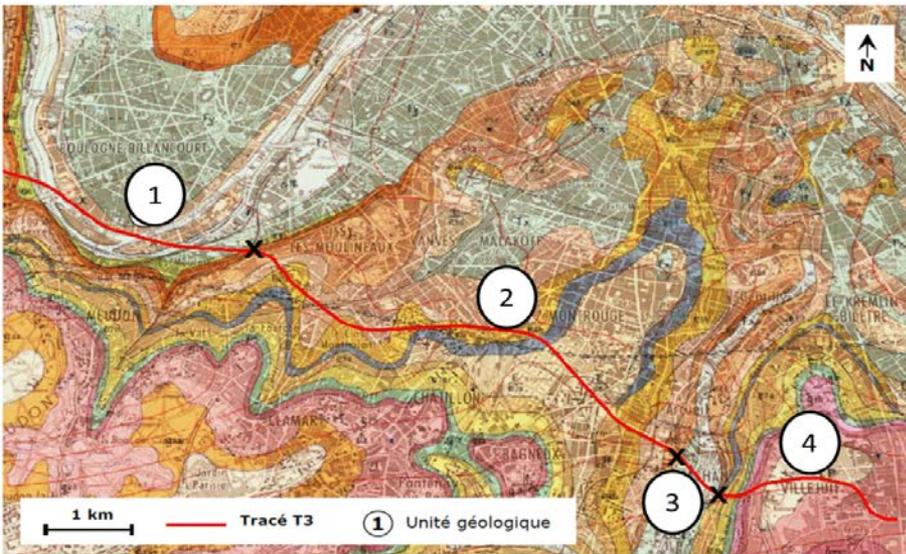
setec



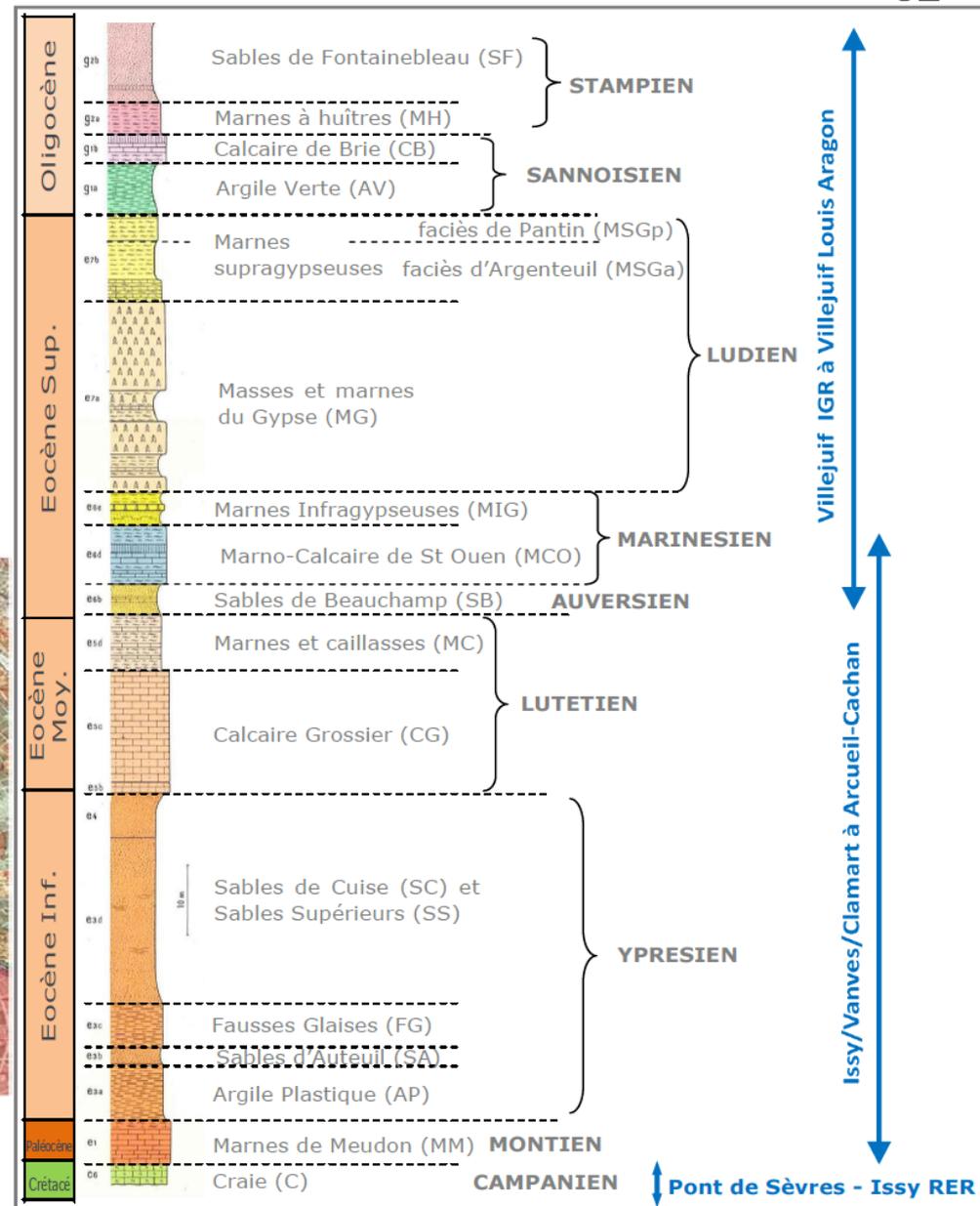


## 4 unités géologiques :

1. Vallée de la Seine (3,2 km)
2. Plateau de Vanves / Clamart / Arcueil (6,4 km)
3. Vallée de la Bièvre (0,4 km)
4. Plateau de Villejuif (2,5 km)



Contexte géologique



## 3 Phases :

- G11 avant lancement de l'AVP (programme AMO géotech)
- G12 en phase AVPa (AMO géotech + MOE)
- G2 en phases AVPb et PRO (programme MOE)

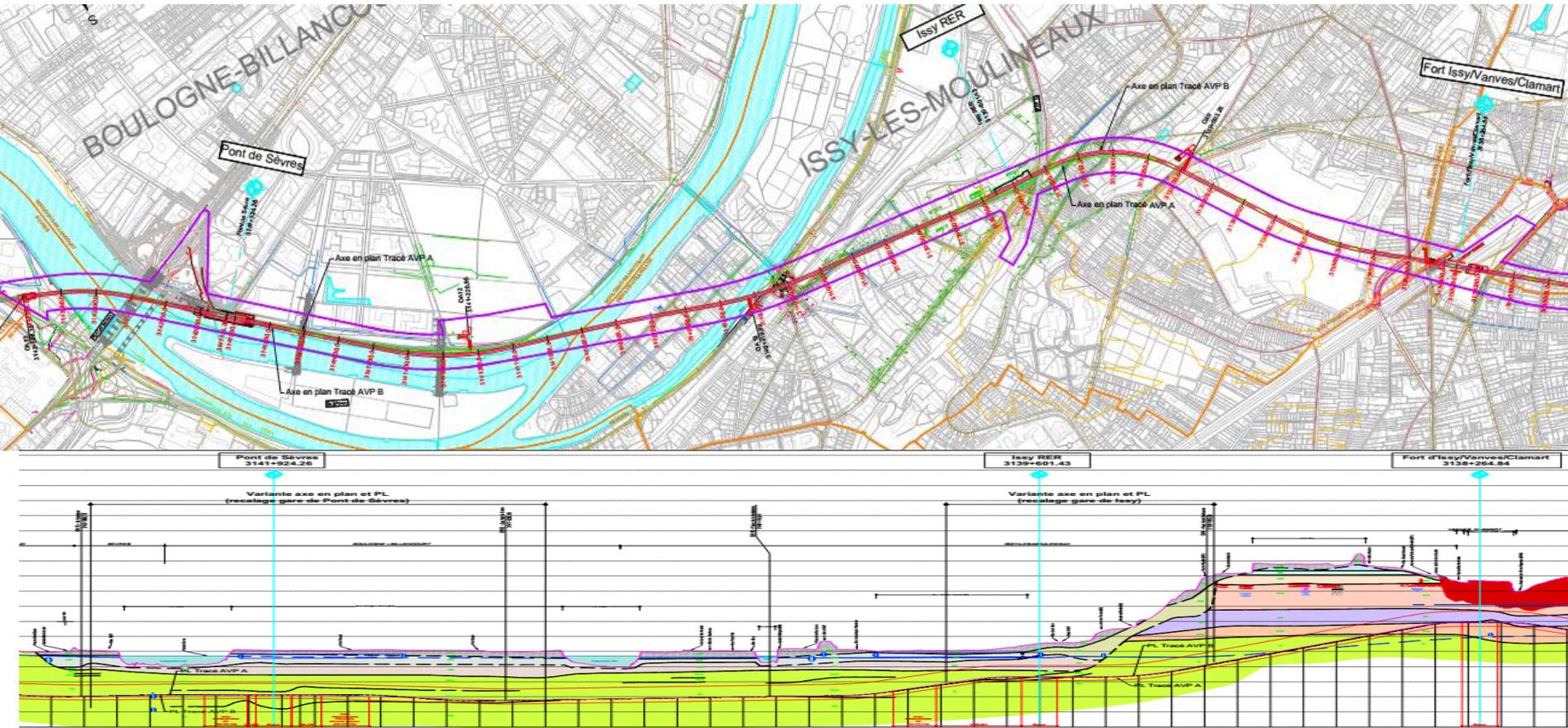
Type	G11	G12	G2	Total
SC	45	112	24	181
SP	32	88	36	156
FD	8	51	37	96
CP		14	4	18
<b>Total</b>	<b>85</b>	<b>265</b>	<b>101</b>	<b>451</b>

**Au total : 451 points de reconnaissance**

Les reconnaissances sur le tronçon T3

# Vallée de la Seine

- Vue en plan du tracé & profil en long géologique :

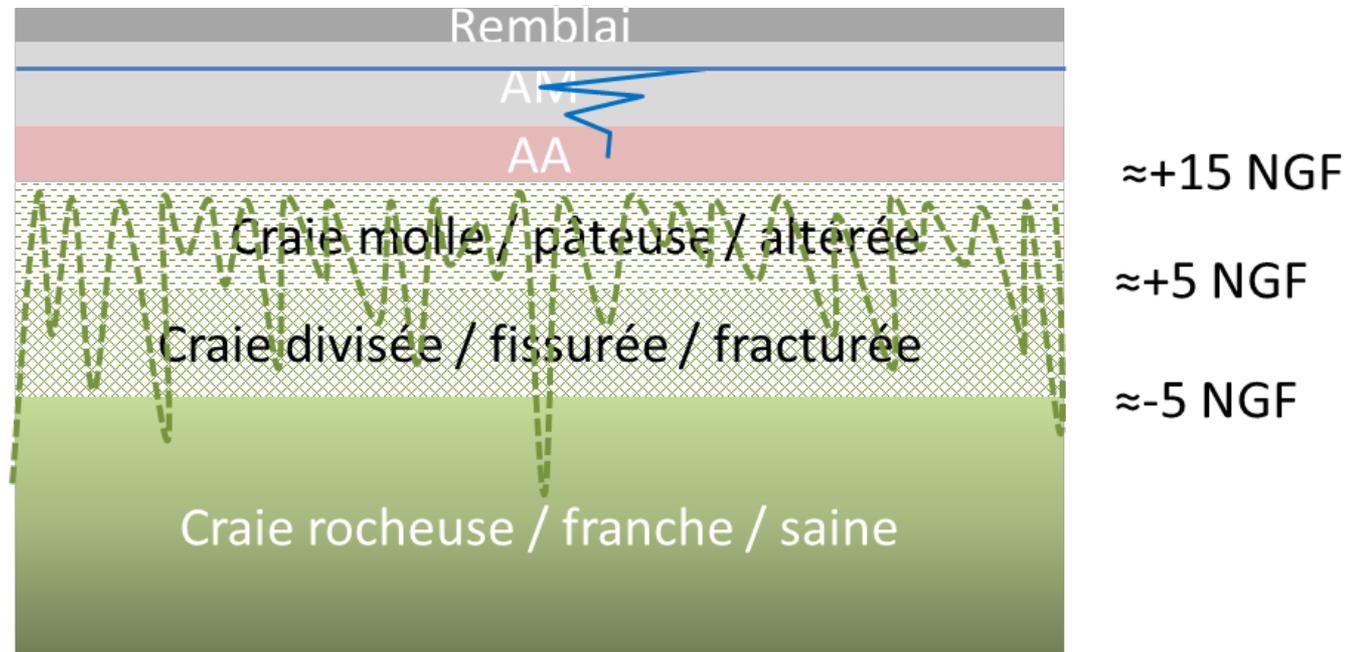


## Secteur Vallée de la Seine

# Vallée de la Seine

- Problématique majeure: caractérisation de la Craie Campanienne

**Frange d'altération**



Secteur Vallée de la Seine

# Vallée de la Seine

- Caractérisation de la Craie Campanienne : difficultés d'échantillonnage et d'identification



Secteur Vallée de la Seine

# Vallée de la Seine

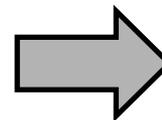
- Caractérisation de la Craie Campanienne

- **Les données exploitées :**
  - Pressiomètres / CPT / Paramètres de foration
  - Pompages et micro-moulinet
- **Le modèle retenu :**

	PL (Mpa)	Em (Mpa)	Cohésion C'(kPa)	Angle de frottement $\varphi'$ (°)	Perméabilité (m/s)
	Valeur caractéristique	Valeur caractéristique			
Craie déstructurée	1,0	13	1	27	$K = 3 \times 10^{-4}$
Craie divisée	2,2	31	5	35	$K_h = 3 \times 10^{-3}$ $K_v = 3 \times 10^{-4}$
Craie franche	>6,5	210	50	34	$K = 1 \times 10^{-5}$

- **Les incertitudes restantes :**

- Perméabilité en grand
- Présence de silex
- Caractéristiques de résistance et de cisaillement
- Efficacité des traitements de terrain

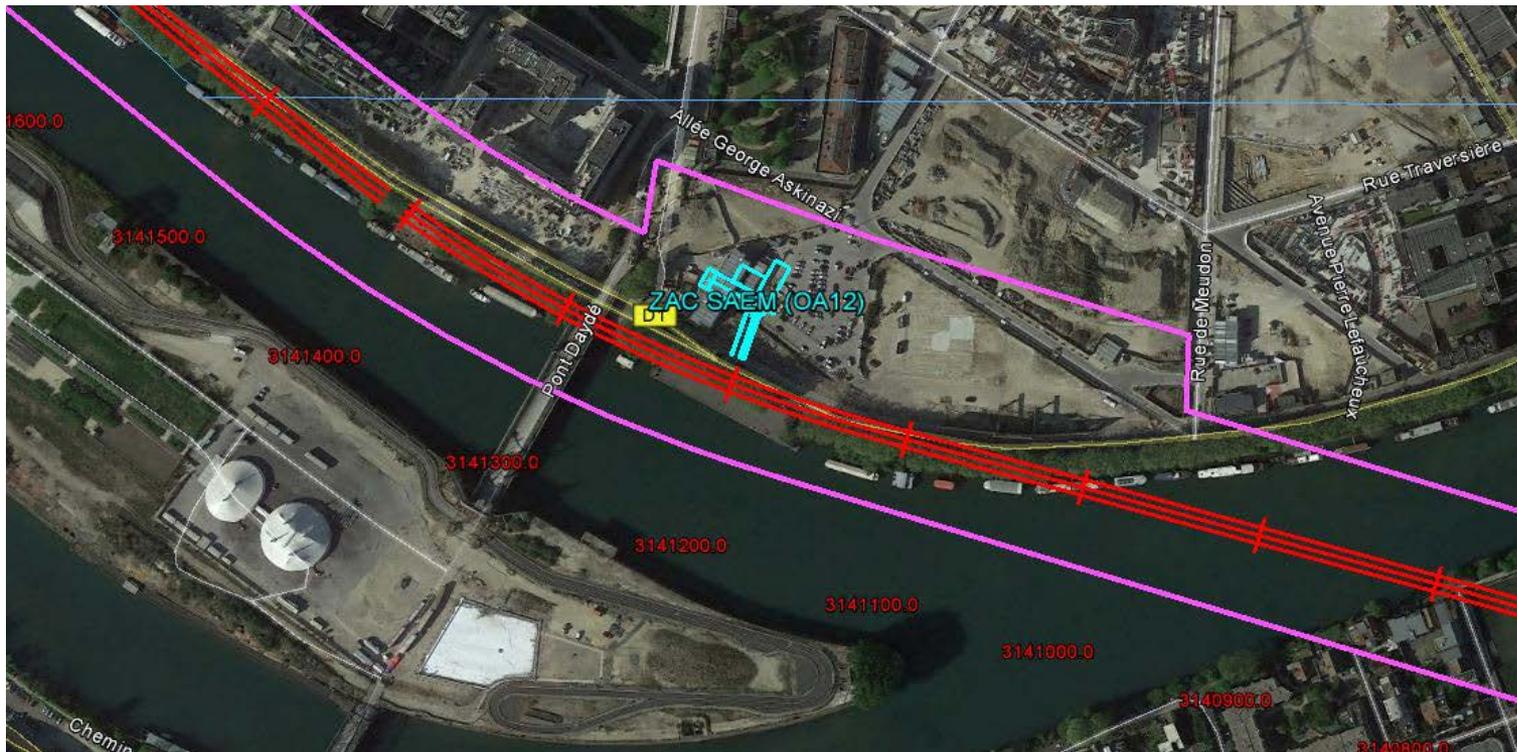


Puits de reconnaissance de Boulogne

# Puits d'essai de Boulogne :

=> Futur ouvrage annexe de la ligne 15

=> Démarrage des travaux à l'été 2015

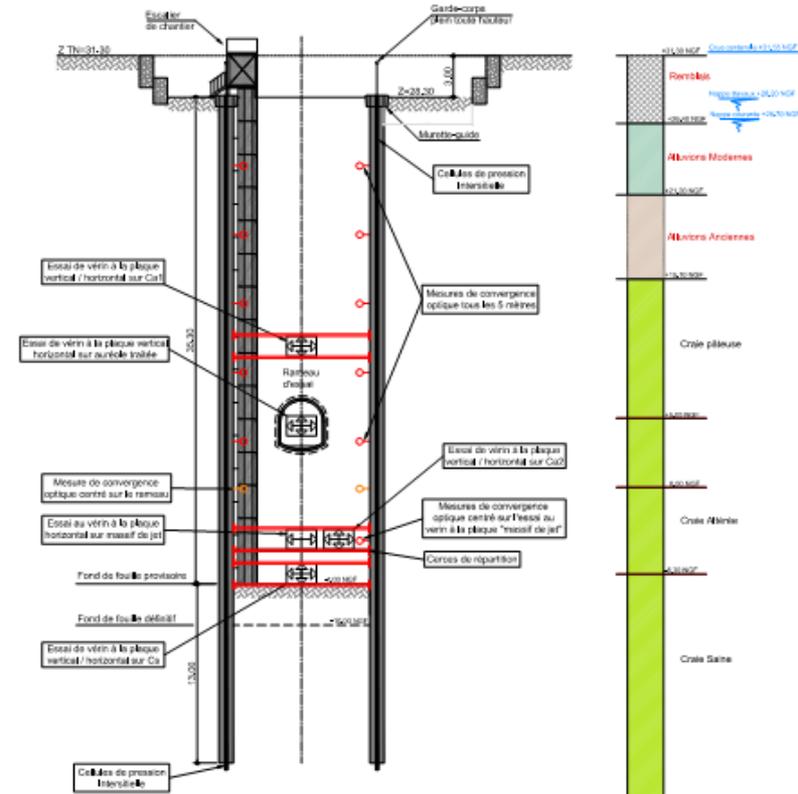
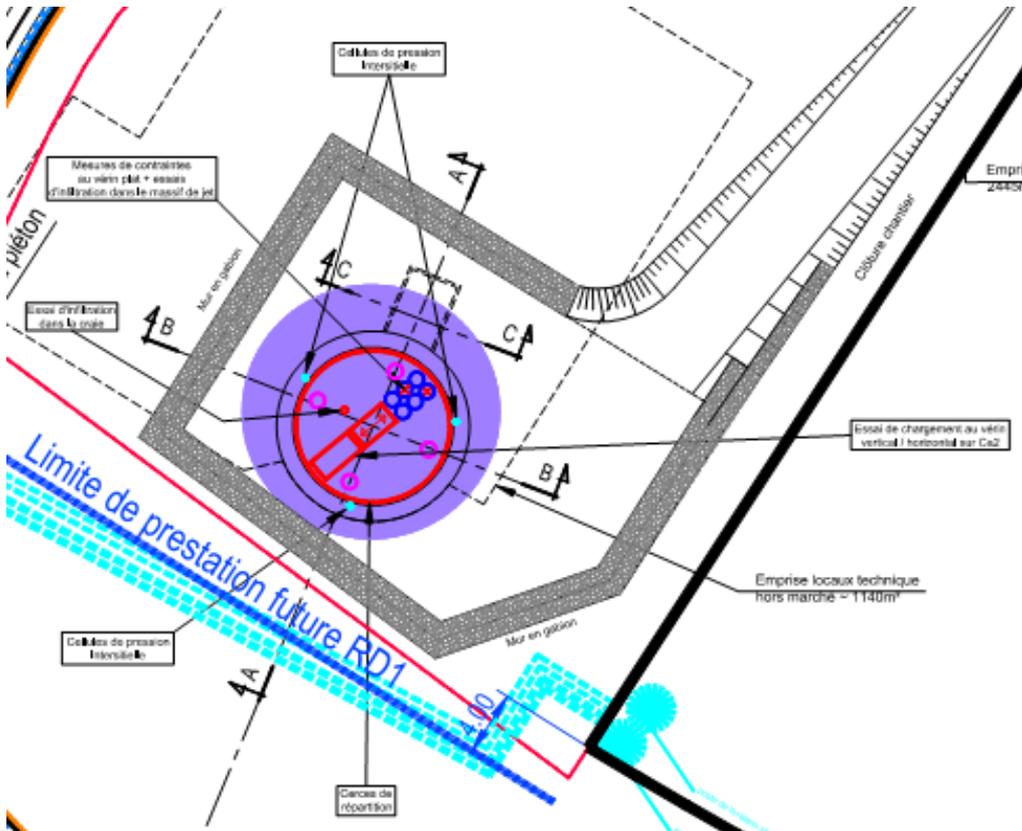


Puits de Boulogne

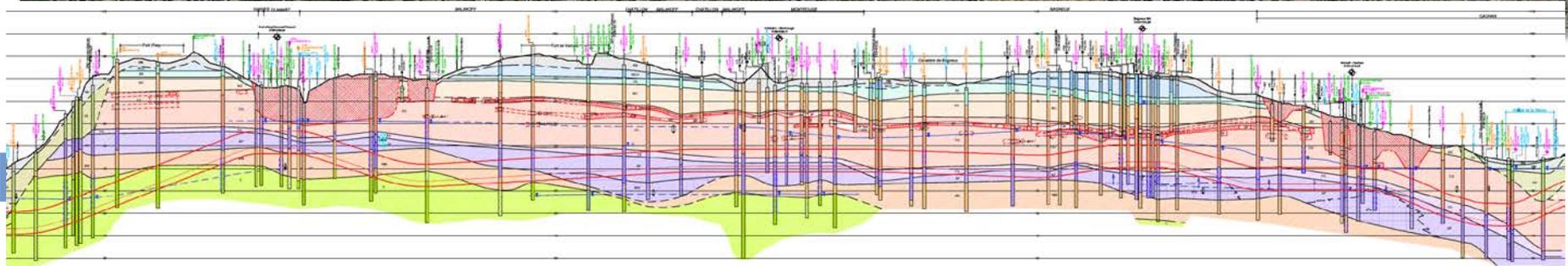
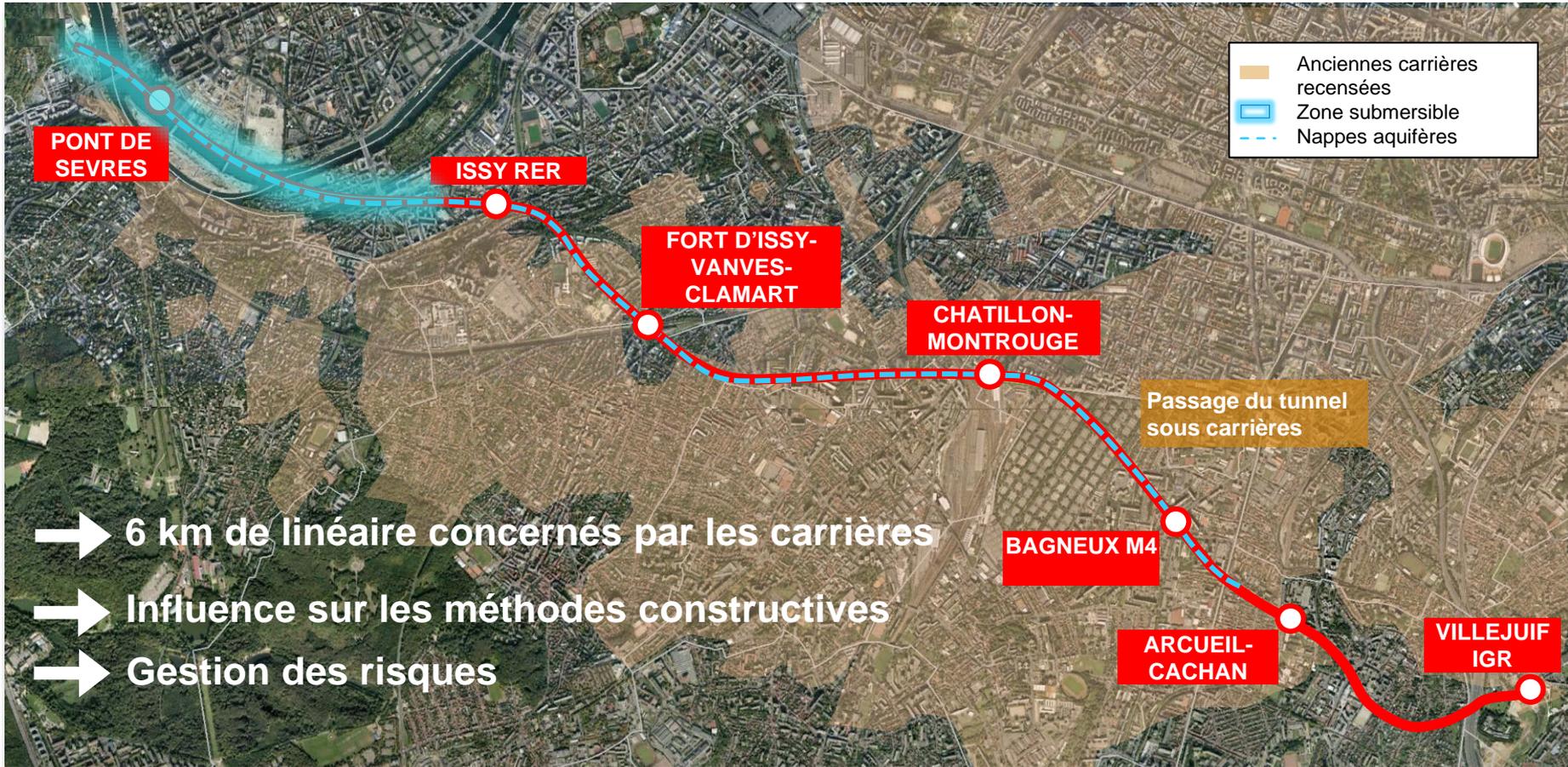
# Puits d'essai de Boulogne :

⇒ Essais de traitement de la Craie (jet-grouting & injection)

⇒ Essais mécaniques in situ sur les différents faciès



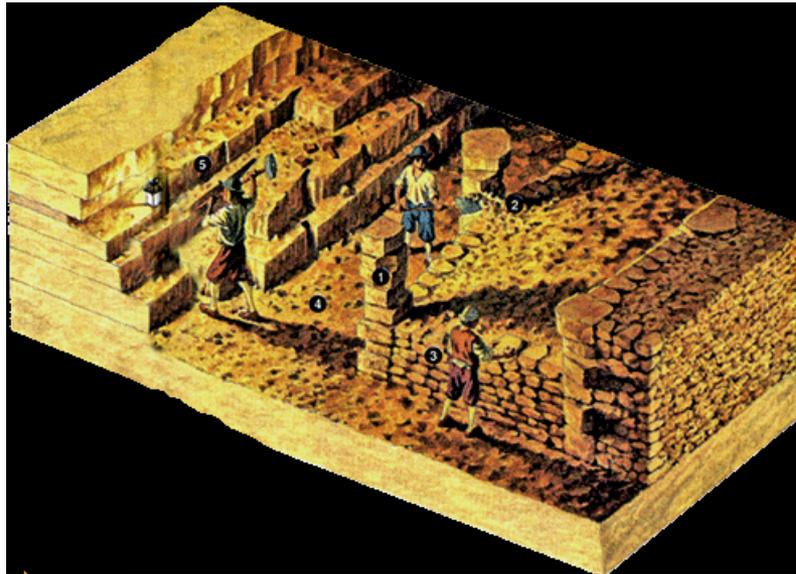
Puits de Boulogne



## Types d'exploitation

- À ciel ouvert : ces carrières sont aujourd'hui remblayées
- En souterrain, exploitation par « hagues et bourrages » : carrières remblayées au fur et à mesure de l'exploitation ; des galeries sont néanmoins conservées pour l'accès au front de taille et l'évacuation du CG

**Carrières souterraines exploitées par « hagues et bourrages »**

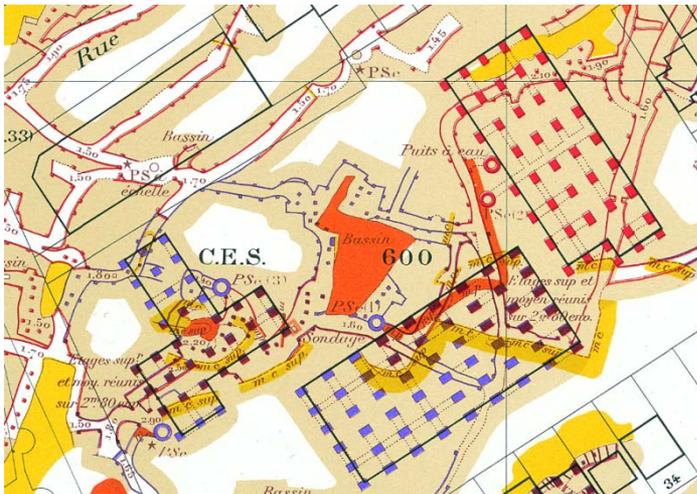


Les carrières

## Confortement des carrières souterraines

- Confortements à pied d'œuvre par édification de piliers maçonnés : méthode « historique », principalement mise en œuvre au droit des bâtis construits en zone de carrières souterraines

### Piliers maçonnés sur une carte de l'IGC et en galerie



- Comblement des carrières par injection depuis la surface : méthode plus récente qui est privilégiée aujourd'hui pour la mise en sécurité des cavités souterraines

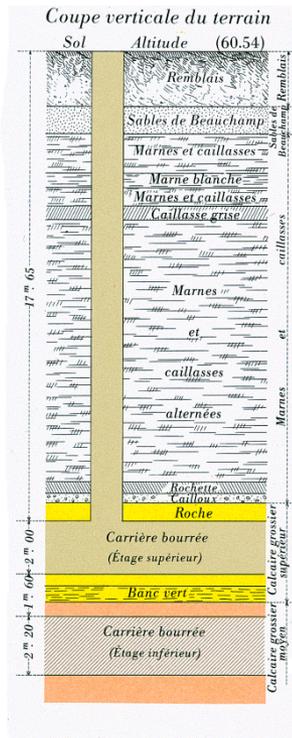
# Plateau Vanves Clamart : Les carrières

## Constat :

- Difficulté d'interprétation des logs de sondages
- Mise en évidence de carrières dans des « zones blanches »

## Démarche d'analyse :

- Etudes détaillées des cartes de l'IGC
- Prise en compte de tous les PS\* (profondeur et hauteur de la carrière) et PS\*\* (avec coupe détaillée)
  - Prise en compte de tous les fontis (f, fr, f, fr)
- Echanges avec l'IGC
- Réinterprétation des sondages carottés et destructifs
  - Discussion autour des traitements proposés
  - Validation des galeries à conserver / renforcer / des accès à reconstruire



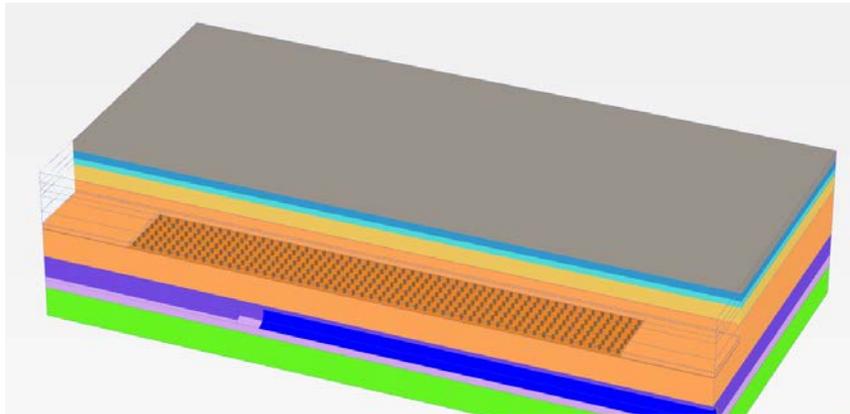
PS comblé (1) ..	{	Ét. sup! ..	18 <sup>m</sup> 70 - 2 <sup>m</sup> 05
		Ét. inf! ..	22 <sup>m</sup> 50 - 2 <sup>m</sup> 20
PS comblé (2) ..		Ét. sup! ..	19 <sup>m</sup> 15 - 2 <sup>m</sup> 55
PS comblé (3) ..			19 <sup>m</sup> 20 - 2 <sup>m</sup> 20
PS comblé (4) ..			18 <sup>m</sup> 30 - 1 <sup>m</sup> 70
devant le n° 5			
PS ..			16 <sup>m</sup> 95 - 2 <sup>m</sup> 40



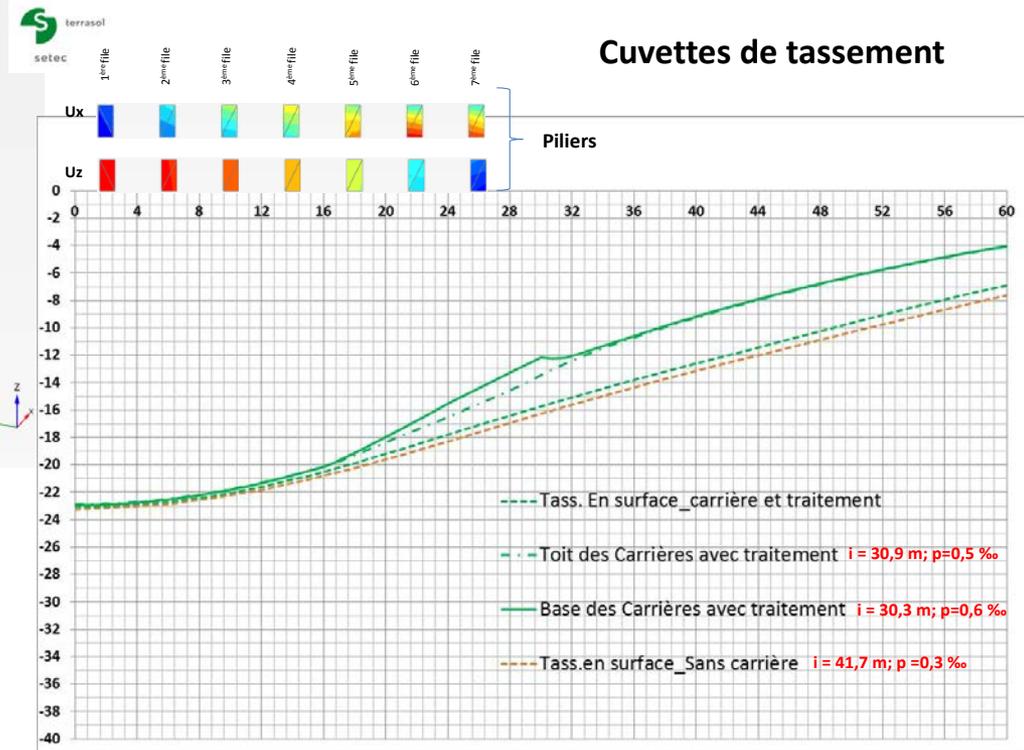
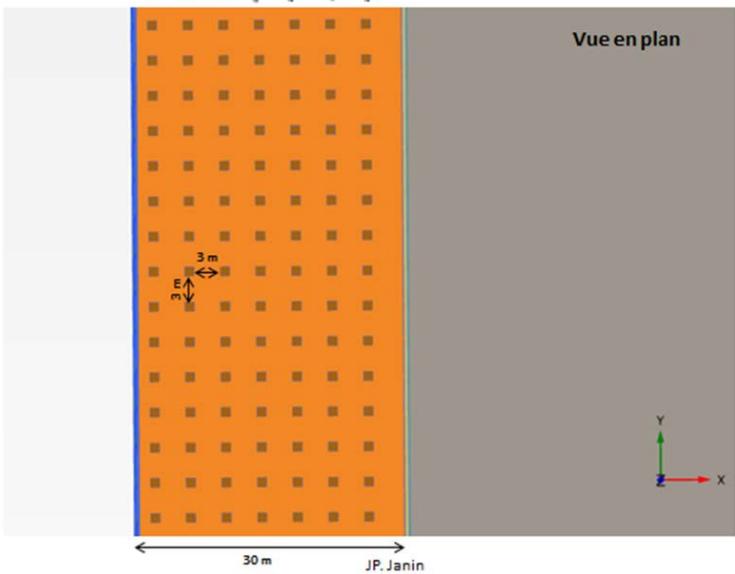
Les carrières



# Calculs 3D pour évaluer l'incidence du creusement du tunnel sur les carrières et l'effet des traitements



Réseau régulier de piliers de section 1m\*1m, espacés de 4 m (à l'axe)



Linéaire important de tunnel excavé dans les Argiles Plastiques  
(essentiellement en front mixte avec Calcaire Grossier en voûte)

## Caractéristiques mécaniques :

$E_m = 45 \text{ à } 80 \text{ MPa}$  (60 MPa moyen)

$PI = 1,5 \text{ à } 3 \text{ MPa}$  (2,3 MPa moyen)

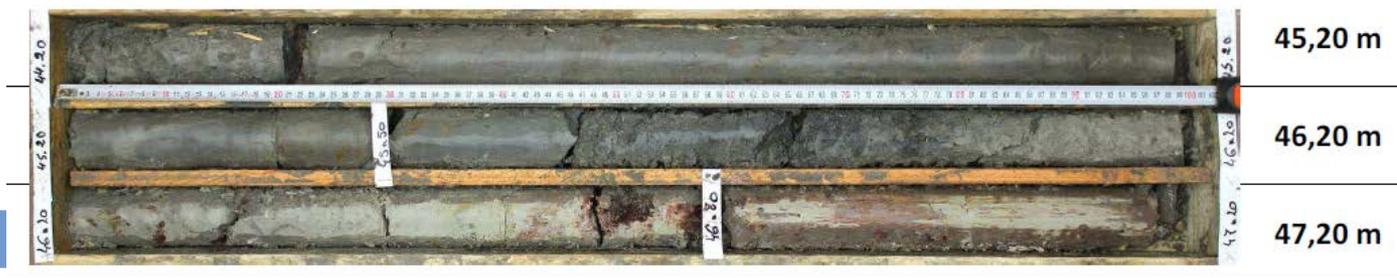
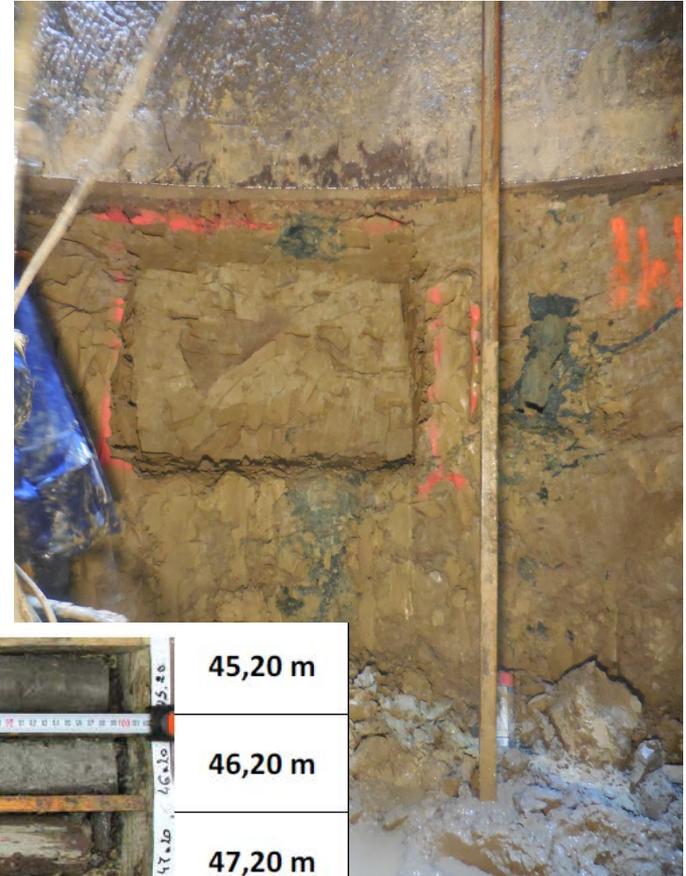
$C_u = 80 \text{ à } 150 \text{ kPa}$

$IP = 24 \text{ à } 50$

$WI = 70 \%$

Teneur en eau : 27 %

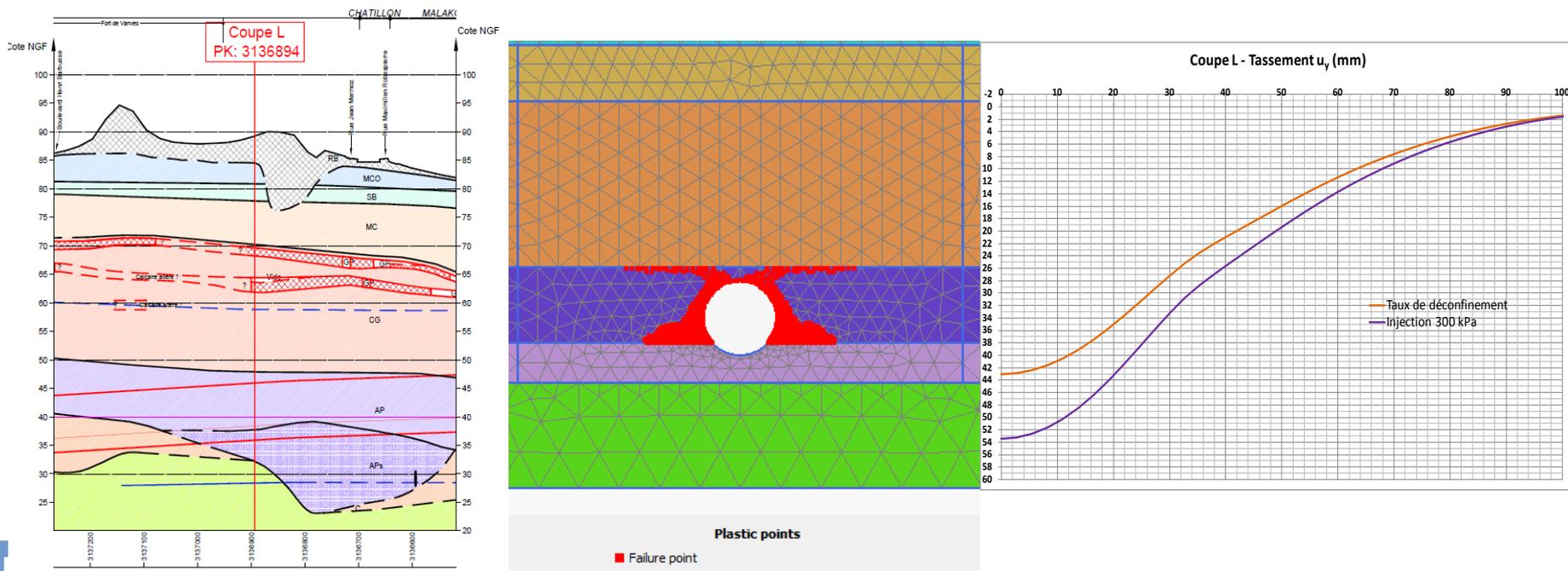
Argile très Plastique



Comportement des Argiles Plastiques

# Evaluation des déformations (pleine section en AP)

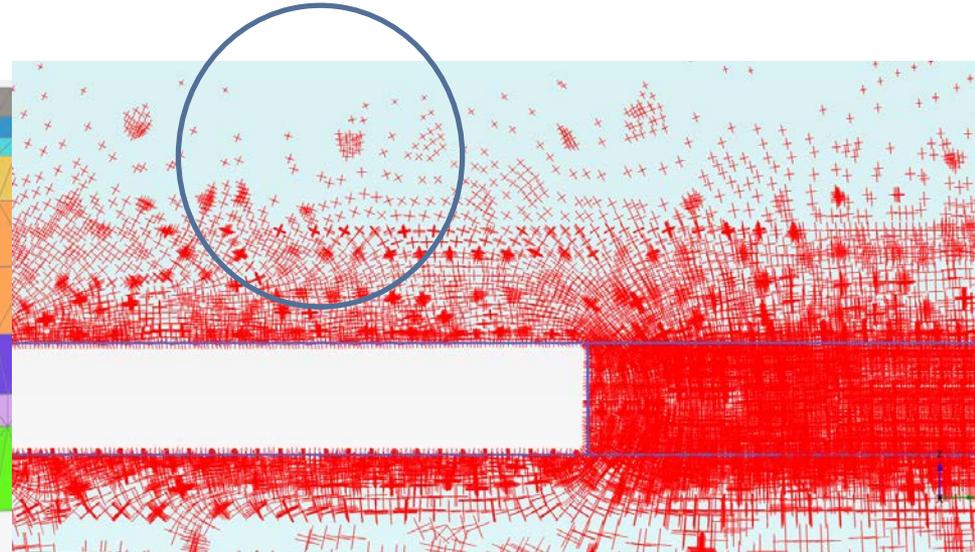
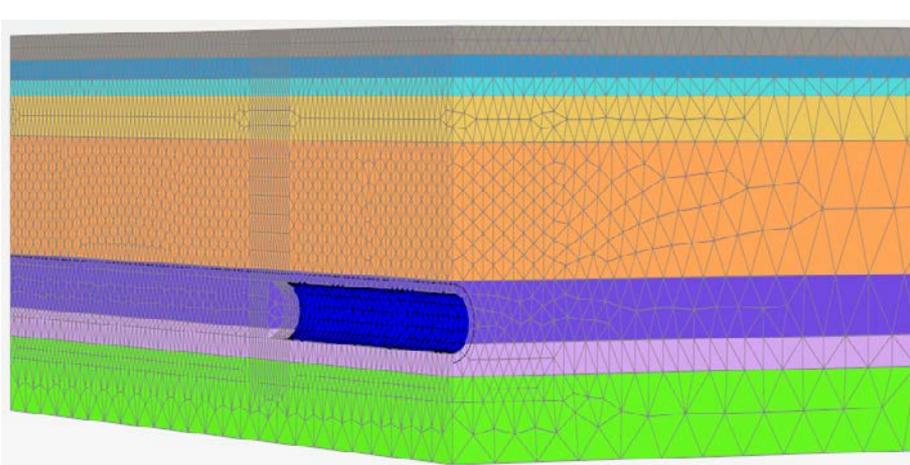
- Première approche (analytique, calcul EF 2D ) : forte déformation, en tunnel et en surface, plastification (jusqu'à 10 cm avec valeur basse de cohésion)
- Influence importante de la pression de confinement du tunnelier



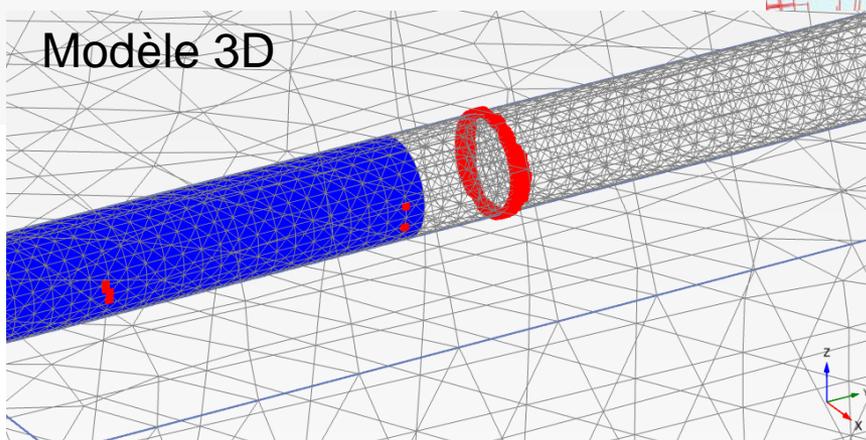
## Comportement des Argiles Plastiques

# Evaluation des déformations

- Nécessité de calcul en 3D ( $N_s > 6$ , en dehors des applications usuelles des abaques et méthodes de détermination du taux de déconfinement)



Modèle 3D

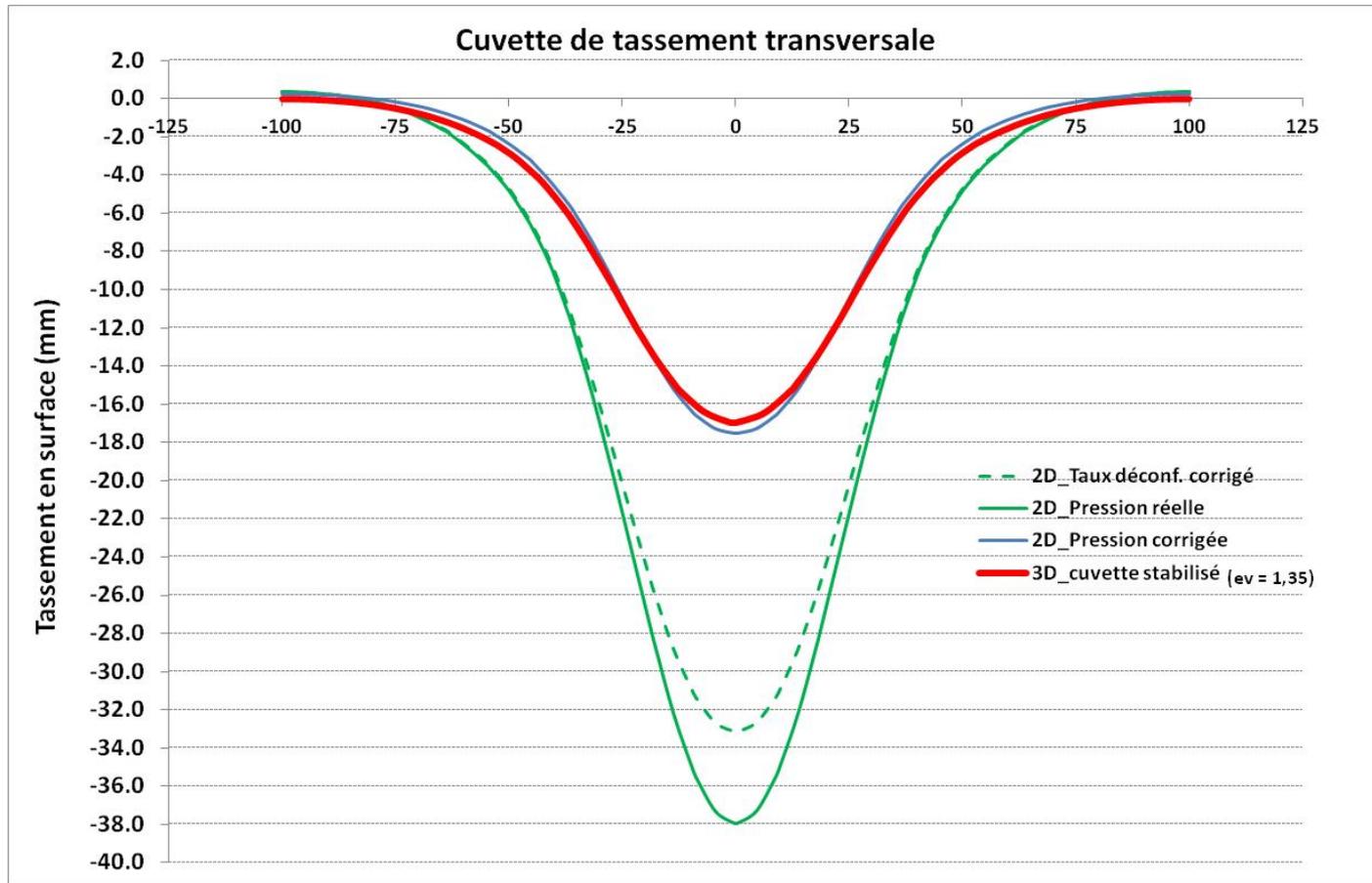


Contraintes principales - Profil en long : effet de voute

Comportement des Argiles Plastiques

# Evaluation des déformations

- Correction de la pression dans modèle 2D pour prendre en compte les effets de voûtes longitudinales, qui sont négligés en 2D



Comportement des Argiles Plastiques

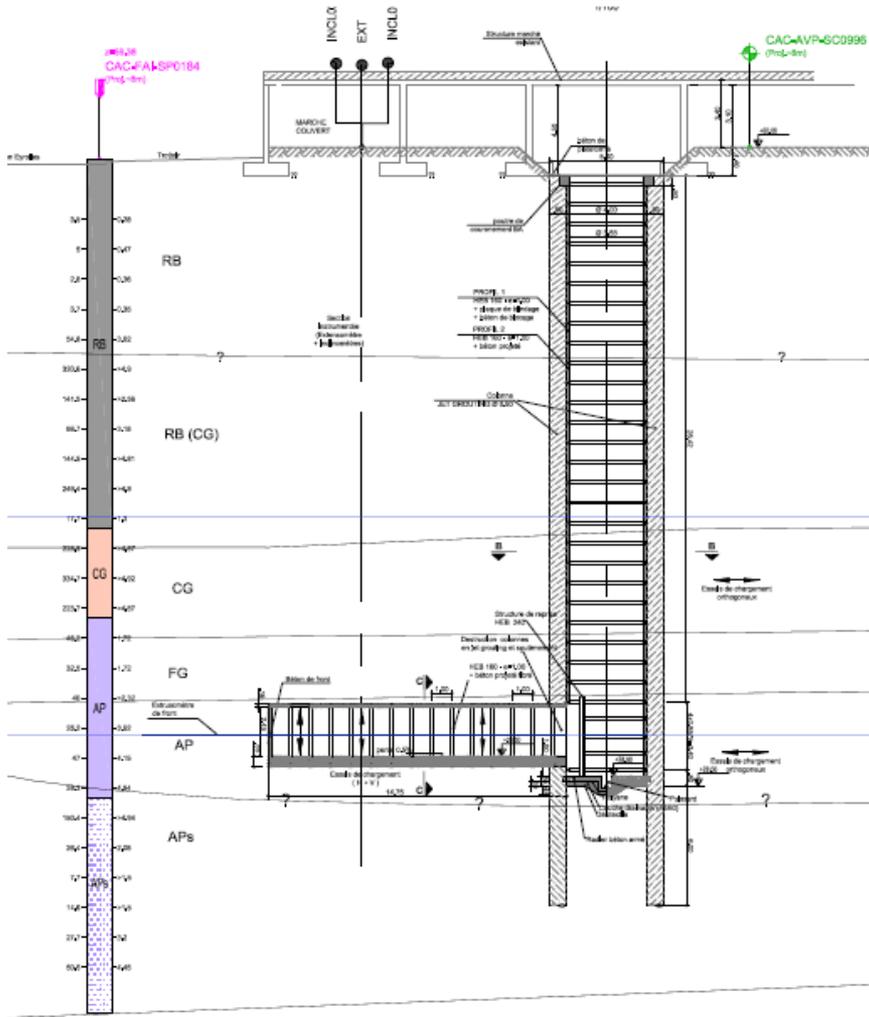
## Plateau Vanves Clamart : choix du tracé vis-à-vis des contraintes Argiles Plastiques et Carrières :

- Choix de ne pas traverser les carrières et de se placer systématiquement sous le dernier niveau de carrière à  $\frac{1}{2}$  diamètre minimum,
  - Deux alternatives :
    - Soit approfondissement du tracé : on s'éloigne du plancher des carrières mais section plus importante excavée dans les Argiles Plastiques avec contraintes géostatiques fortes : augmentation des déformations au niveau du tunnel, cuvette plus large
    - Ou remonter le tracé en se rapprochant des carrières : risque plus important de vibrations, tassement du même ordre de grandeur en pied de carrière mais cuvette plus étroite
  - A ce stade : compromis avec un front mixte AP/CG (voûte dans les CG)
- Prise en compte des contraintes géotechniques vis-à-vis du tracé

# Réalisation d'un puits et galerie d'essai au droit de la gare Arcueil Cachan

## Objectifs :

- Préciser la géologie au droit de la gare (présence de carrières souterraines et de carrières à ciel ouvert remblayées, qualité du calcaire en place)
- Faisabilité du jet grouting dans les Argiles Plastiques
- Comportement des Argiles Plastiques

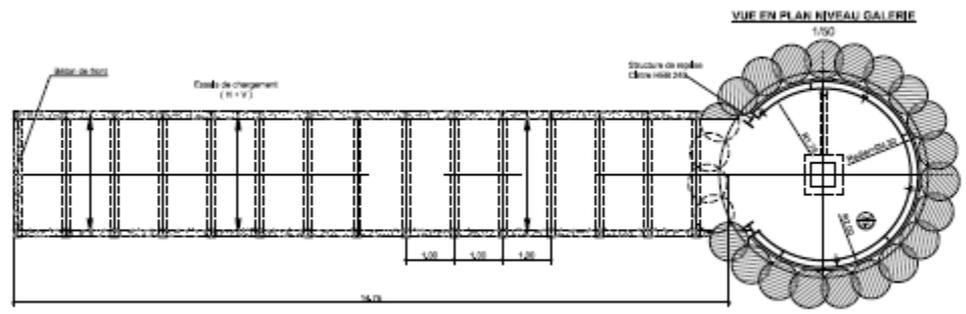


Puits de 30 m de profondeur, 4 m de diamètre avec colonnes de jet sécantes

Galerie de 15 ml

3 colonnes de jet de convenance (1 à l'axe du puits et 2 interceptant la galerie)

Sondages et auscultation

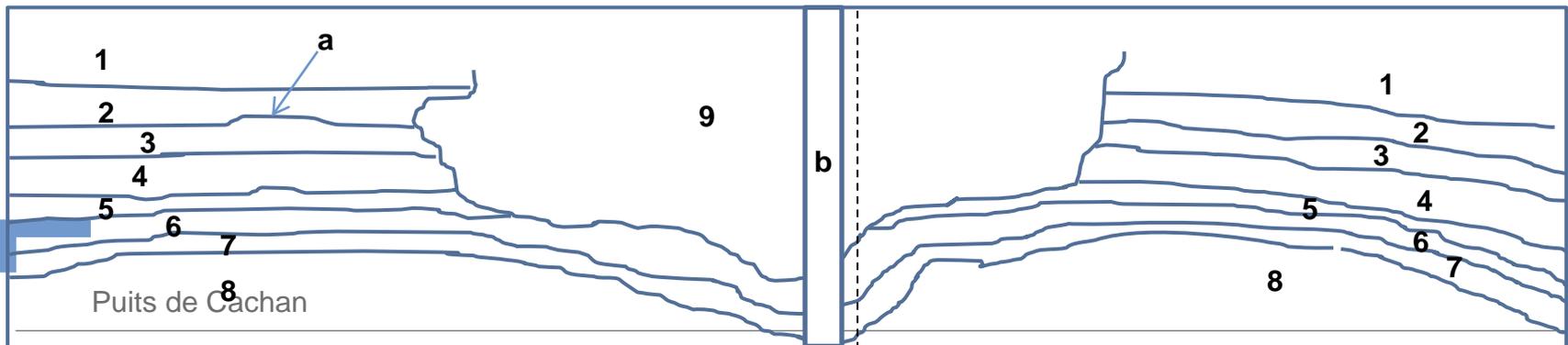
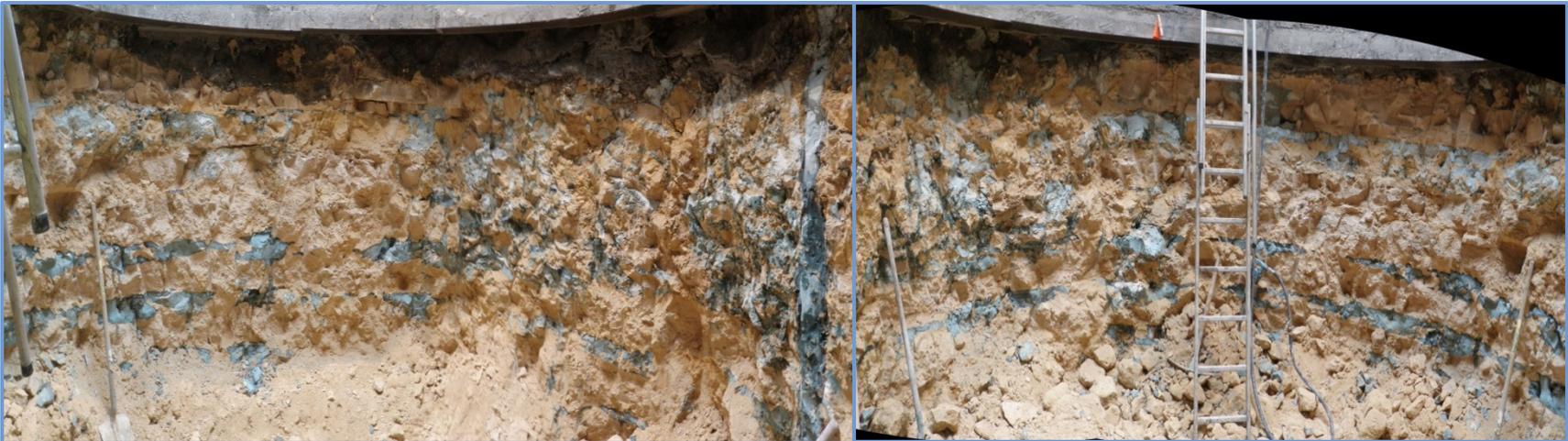


Puits d'Arcueil Cachan

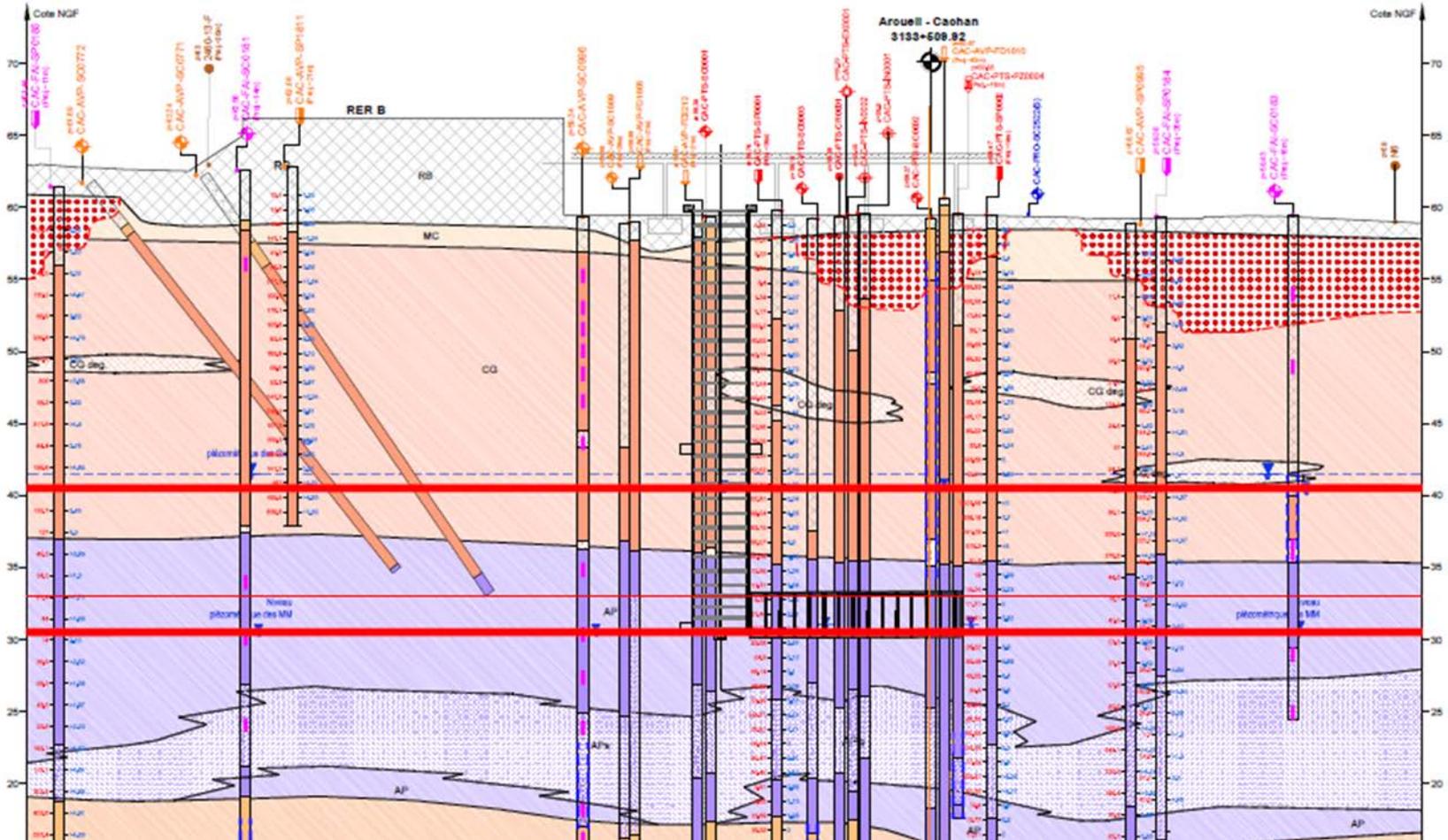
Plusieurs sondages indiquaient la présence de remblais de carrière

## Levés géologiques (exemple)

- Passe 6-7 (5.6 – 7.8) : C'est bien du calcaire (mais très dégradé) : continuité des bancs visibles



# Puits de Cachan : reprise du profil en long

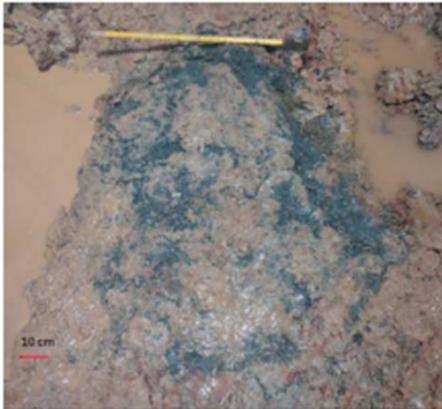


Puits d'Arcueil Cachan

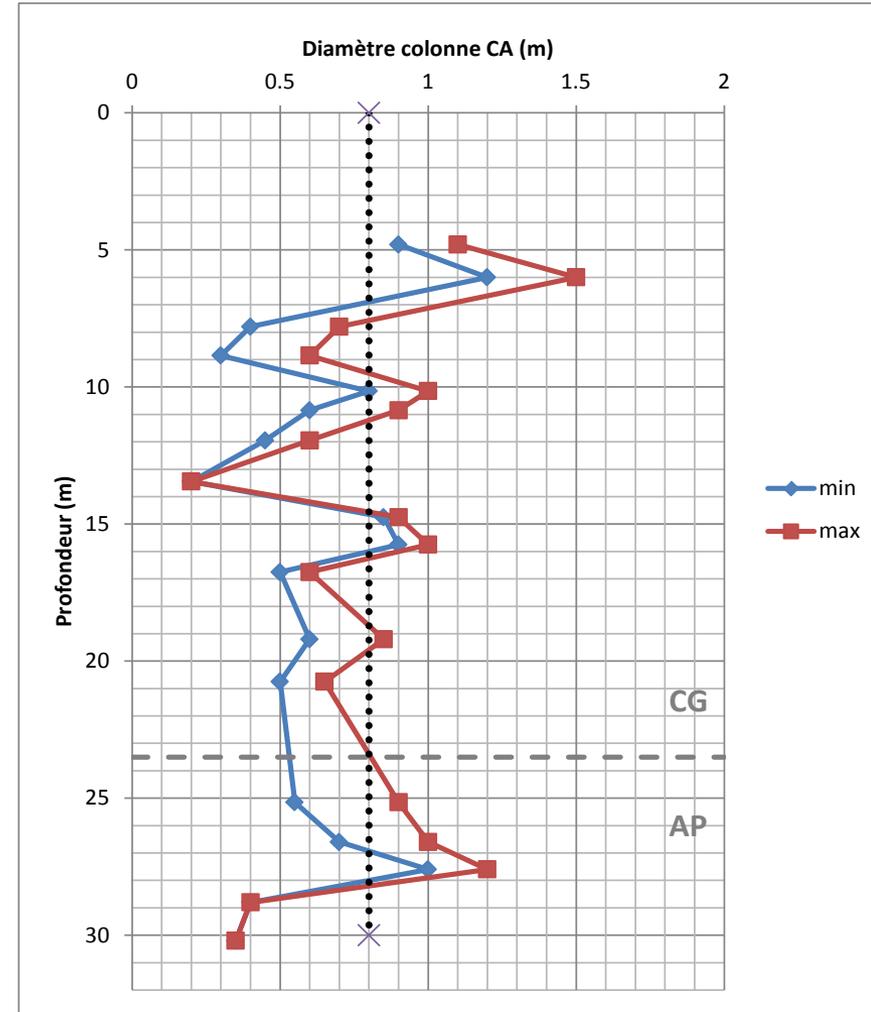
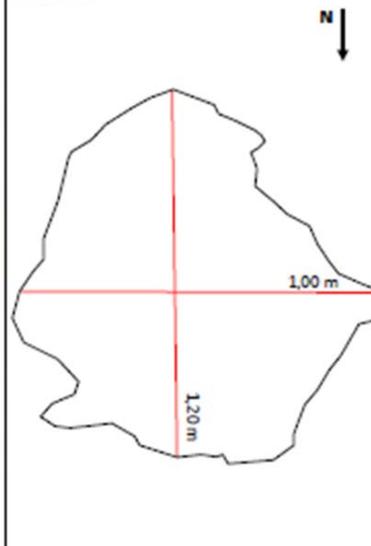
# Faisabilité du Jet grouting dans les Argiles

Diamètre de la colonne  
de convenance du puits (**objectif : 80 cm**)

Photographie



Schéma



Puits d'Arcueil Cachan

# Essais in Situ

## Premier essai de plaque



Puits d'Arcueil Cachan

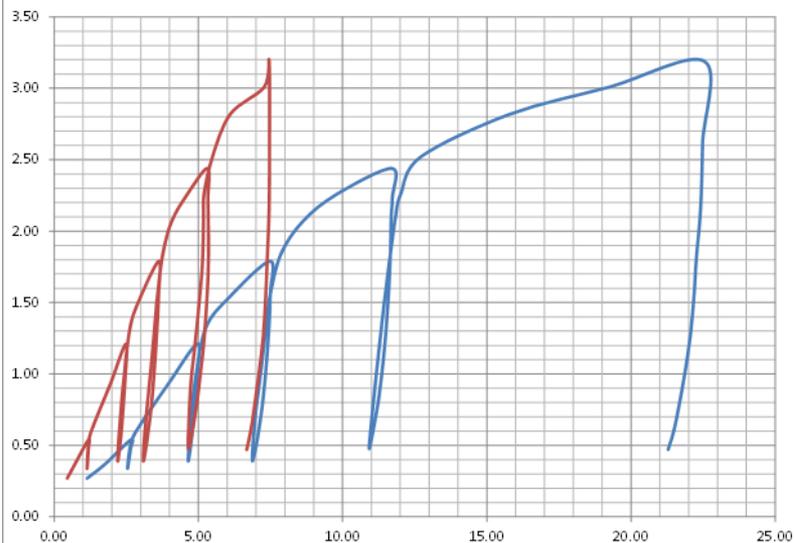
Passé 14 (16.5 – 17.5) → faciès sableux



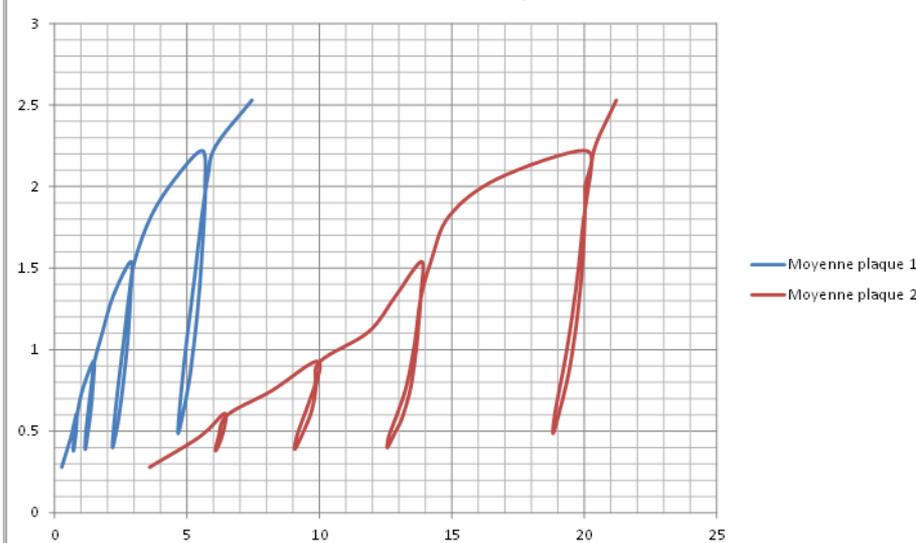
# Puits de Cachan

## Premier essai de plaque : résultats provisoires

Essai n°1 CG - Plaques 1 & 2



Essai n°2 CG - Plaques 1 & 2



essai 1	module élastique E (MPa)	module global G (MPa)
moyenne plaque 1	759	79
moyenne plaque 2	1082	177
moyenne 1+2	920	128

essai 2	module élastique E (MPa)	module global G (MPa)
moyenne plaque 1	637	175
moyenne plaque 2	328	52
moyenne 1+2	483	120

	Em	E'	Eur
CGd	100	375	750

Puits d'Arcueil Cachan

## Puits de Cachan

- Reste à réaliser : creusement d'une galerie sur 15 m de longueur dans les Argiles Plastiques
  - 2 colonnes de jet interceptant la galerie
  - Essais au vérins à plaques rigides dans les Argiles Plastiques
  - Mesures de déformations (convergences, extensomètre, extrusomètre) : retro-analyse pour recalibrer les paramètres

# Conclusion

- Tronçon Pont de Sèvres – Villejuif : tronçon complexe avec de véritables enjeux géotechniques (nappe, carrières, Argiles Plastiques) ayant un impact sur le choix du tracé
- Des campagnes de reconnaissances d'ampleur, adaptées au contexte et aux difficultés du projet
- Deux puits d'essais dont le premier est déjà riche d'enseignements
- Un planning d'étude très tendu nécessitant des approches fines dès l'AVP pour permettre de prendre les bonnes décisions de conception