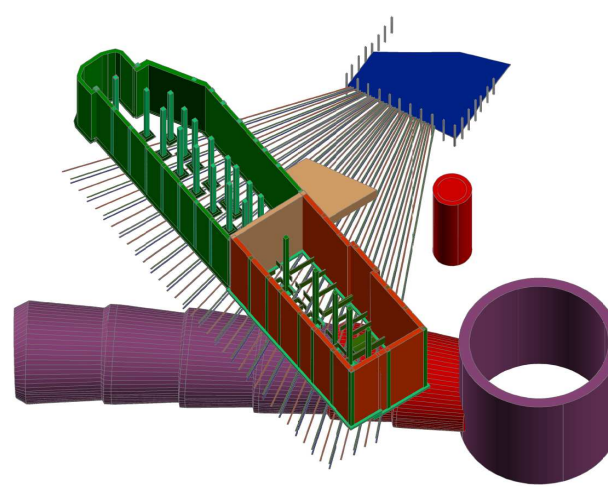




Tube sud du tunnel routier de Toulon : injection de compensation sous deux bâtiments de 8 étages

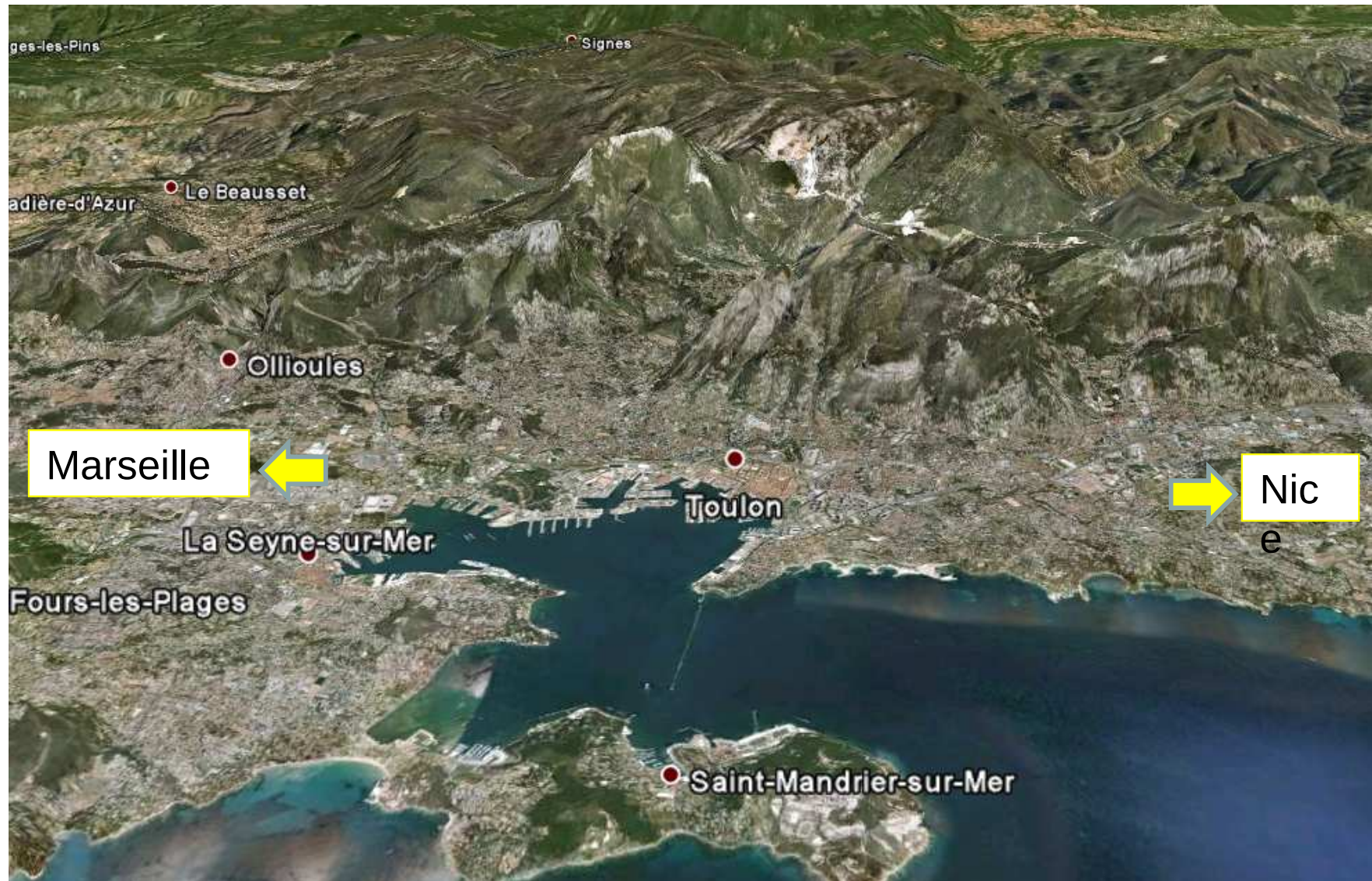
Toulon tunnel : Compensation grouting



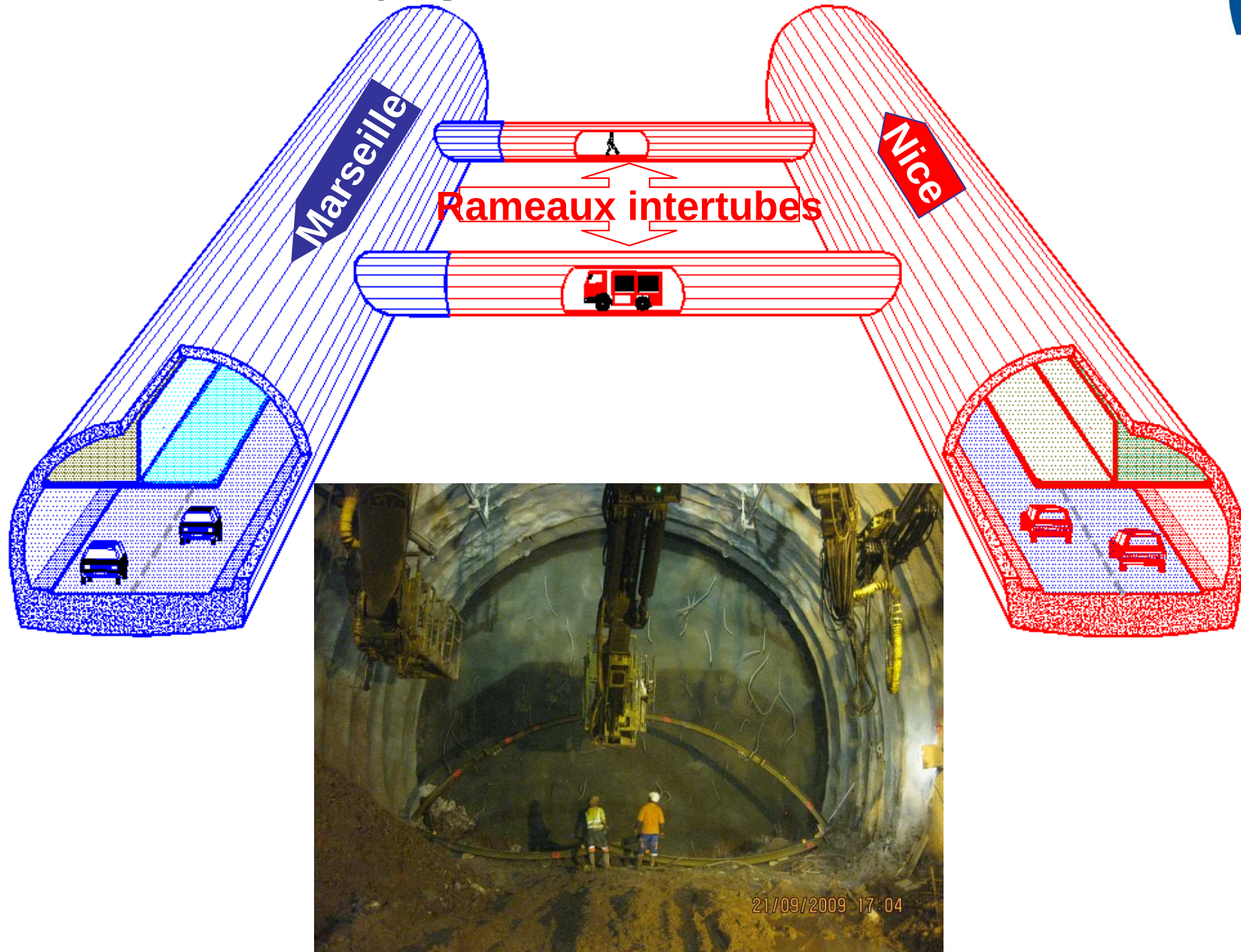
Hervé LE BISSONNAIS

Grands travaux et dimensionnement interactif - journée du 2 décembre 2011 - CFMS / BGA

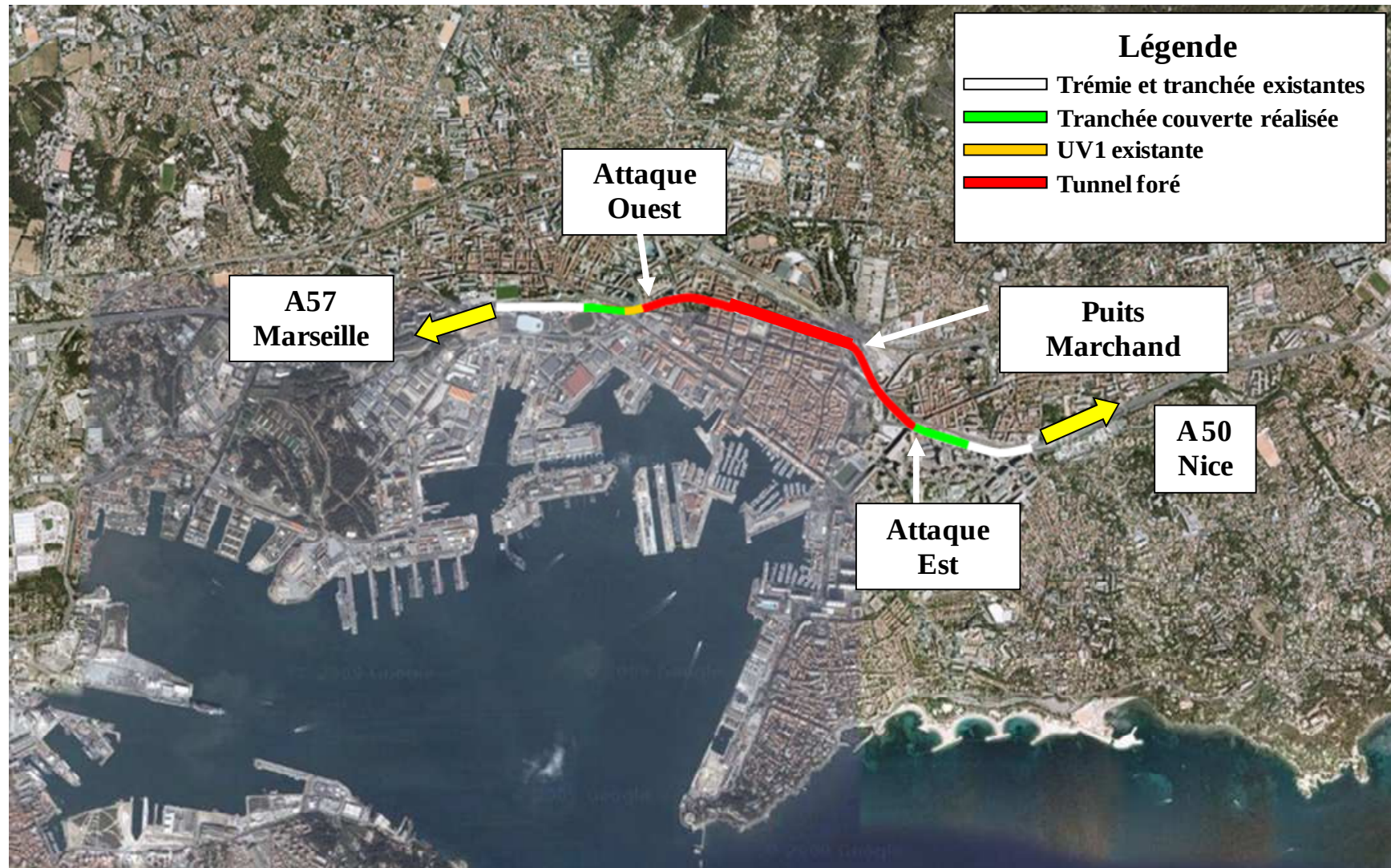
Présentation du projet : Jonction entre deux autoroutes de part et d'autre de la ville de Toulon



Présentation du projet : tunnel routier 2x2 voies



Présentation du projet – Vue en plan du Tube Sud



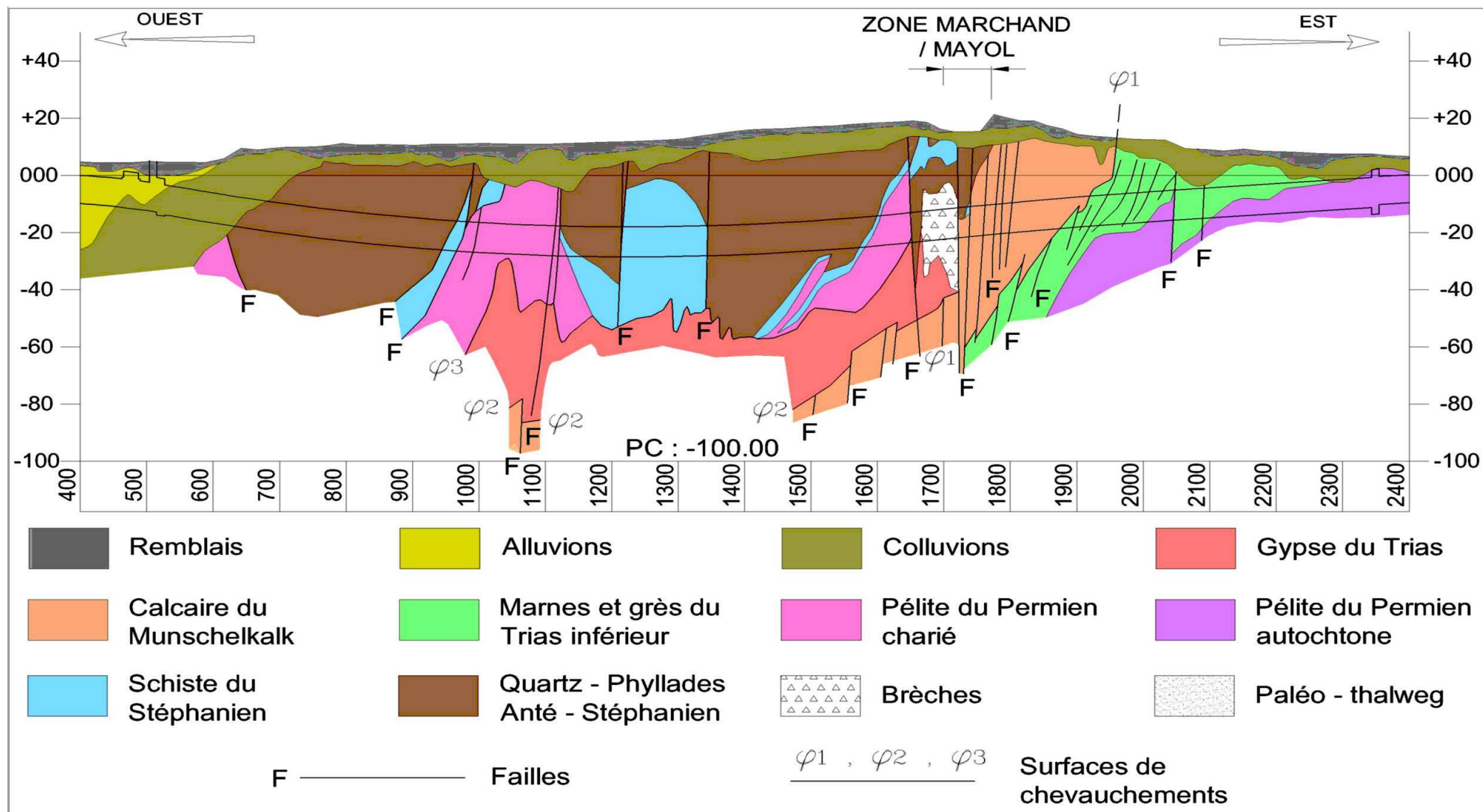
Principales difficultés du projet :

- Géologie très hétérogène
- Couverture faible (min 15 m , max 40 m)
- Milieu urbain (problèmes des tassements)
- Grande section (120 m²)
- Excavation sous la nappe

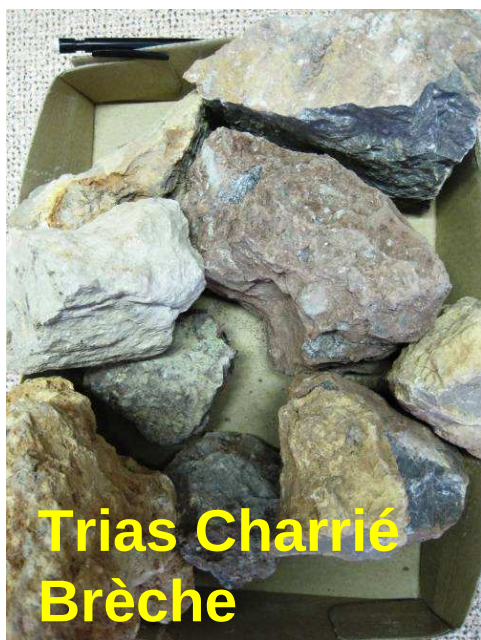
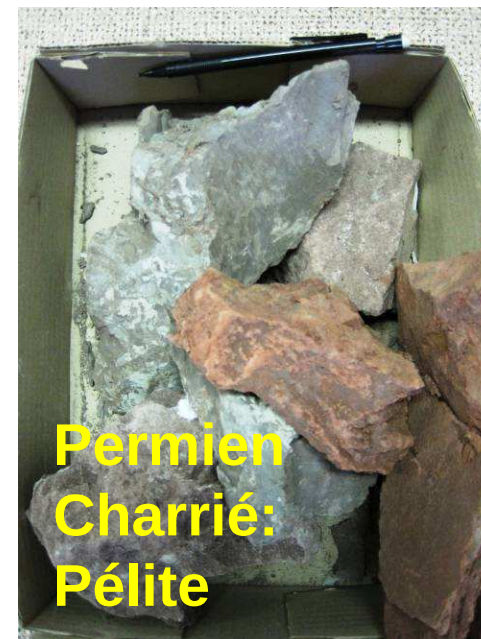
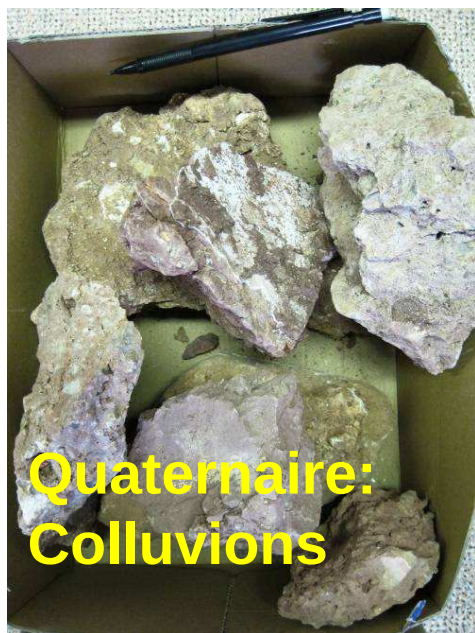


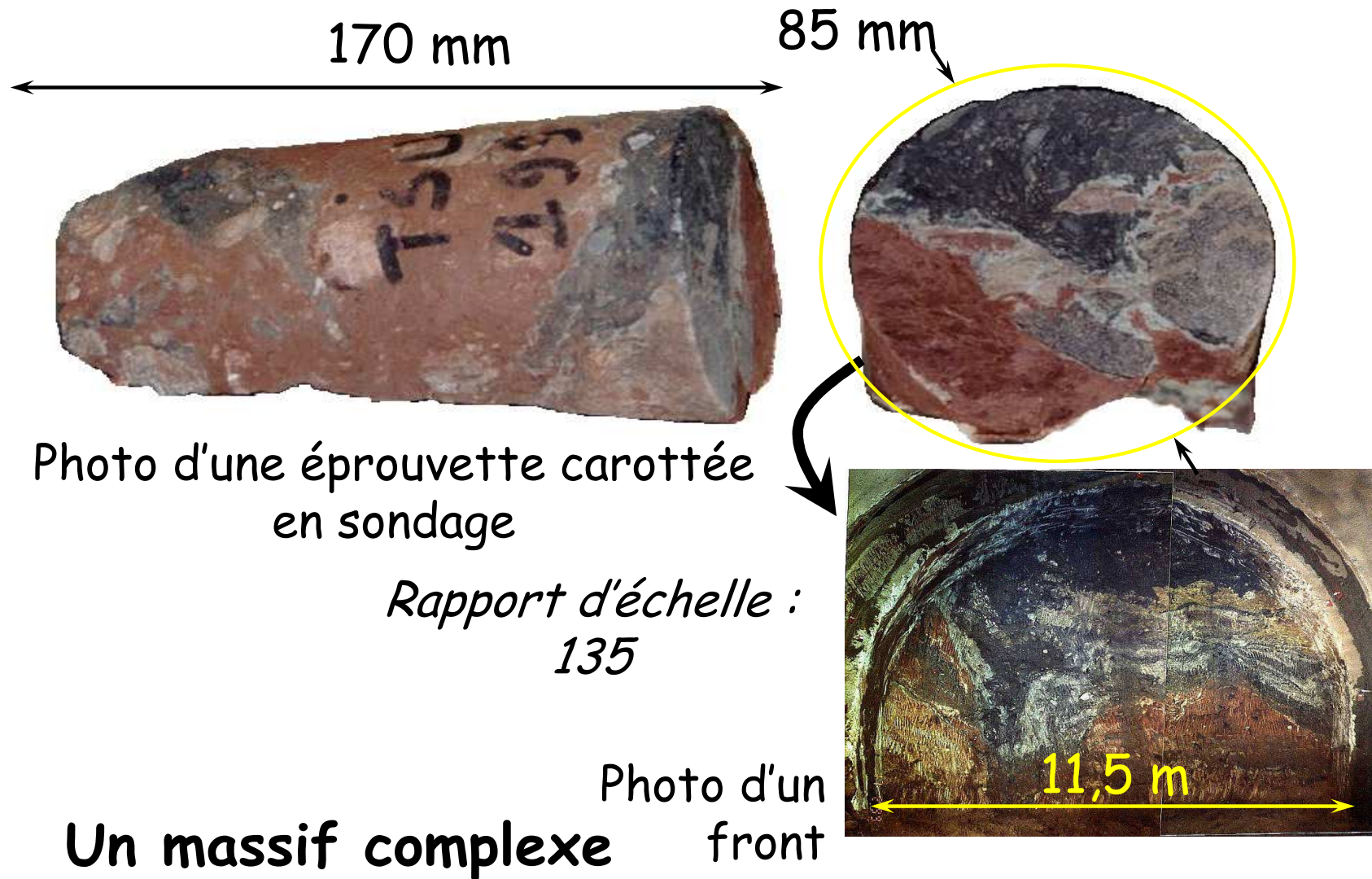
- ➔ Nécessité de prétraiter le massif (injections, Jet-grouting)
- ➔ Suivi régulier des déformations en tunnel et en surface
- ➔ Adaptation du présoutènement selon la géologie rencontrée et les déformations mesurées

Présentation du projet – géologie



Présentation du projet— géologie

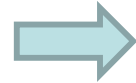




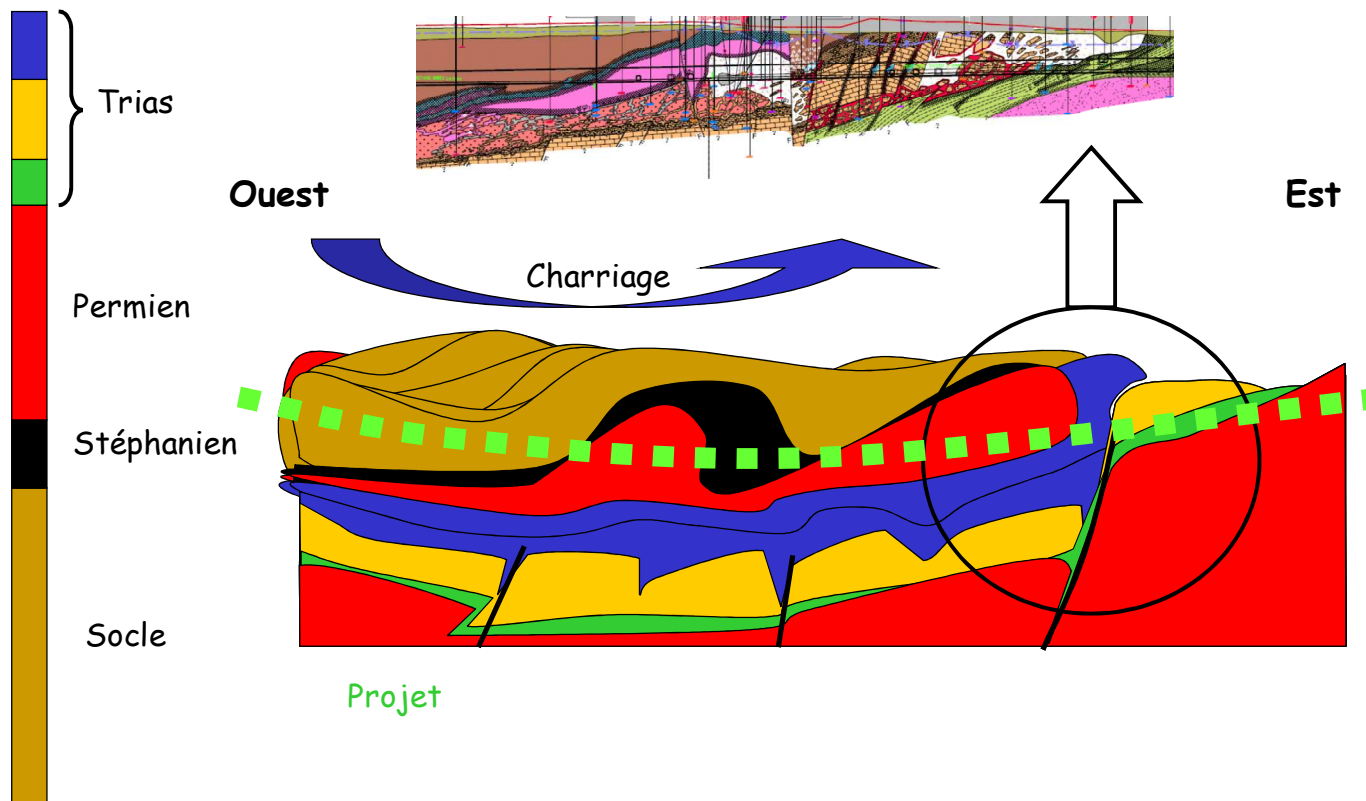
Présentation du projet– géologie

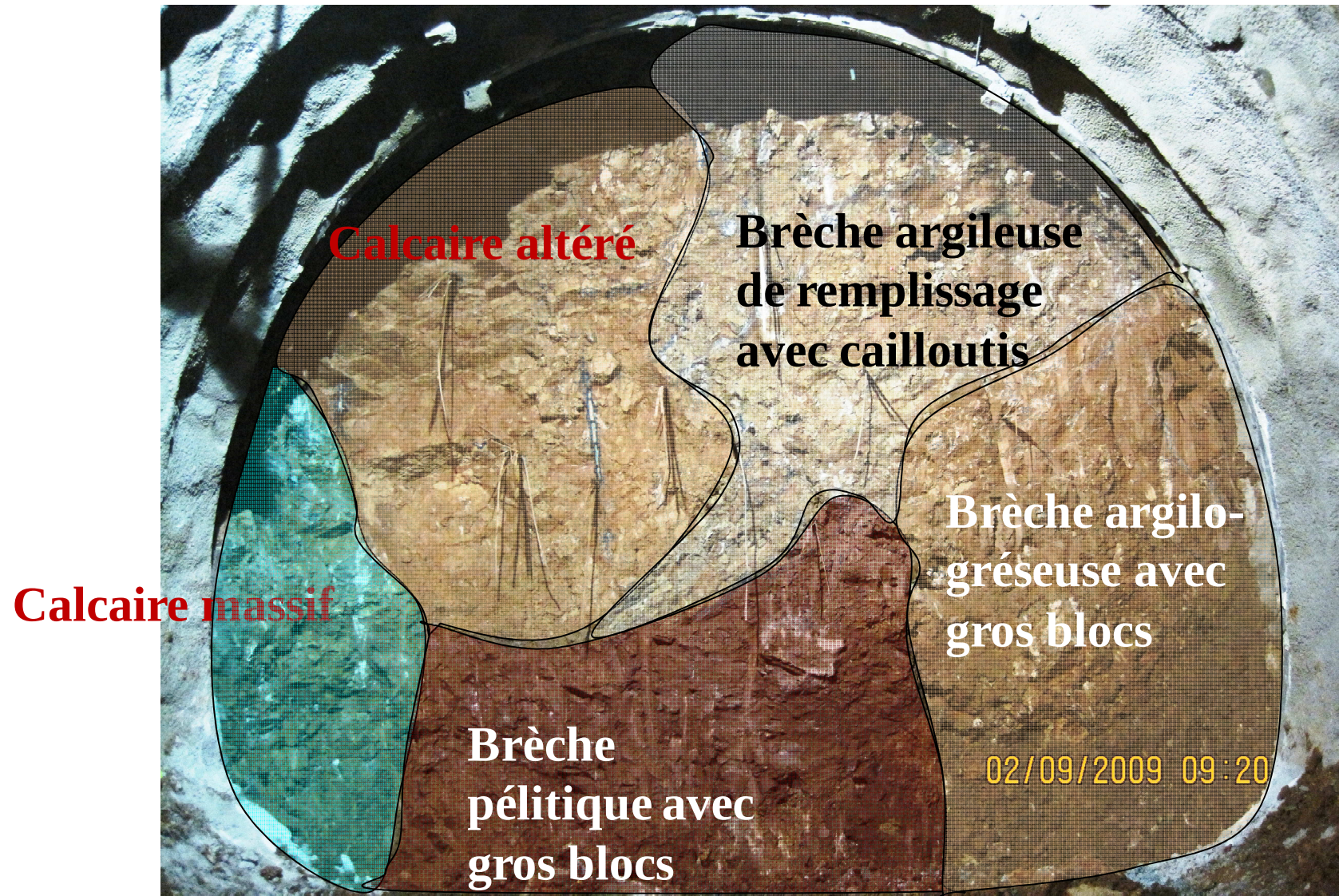


La complexité structurelle de la zone est due à une forte tectonique tangentielle au Tertiaire

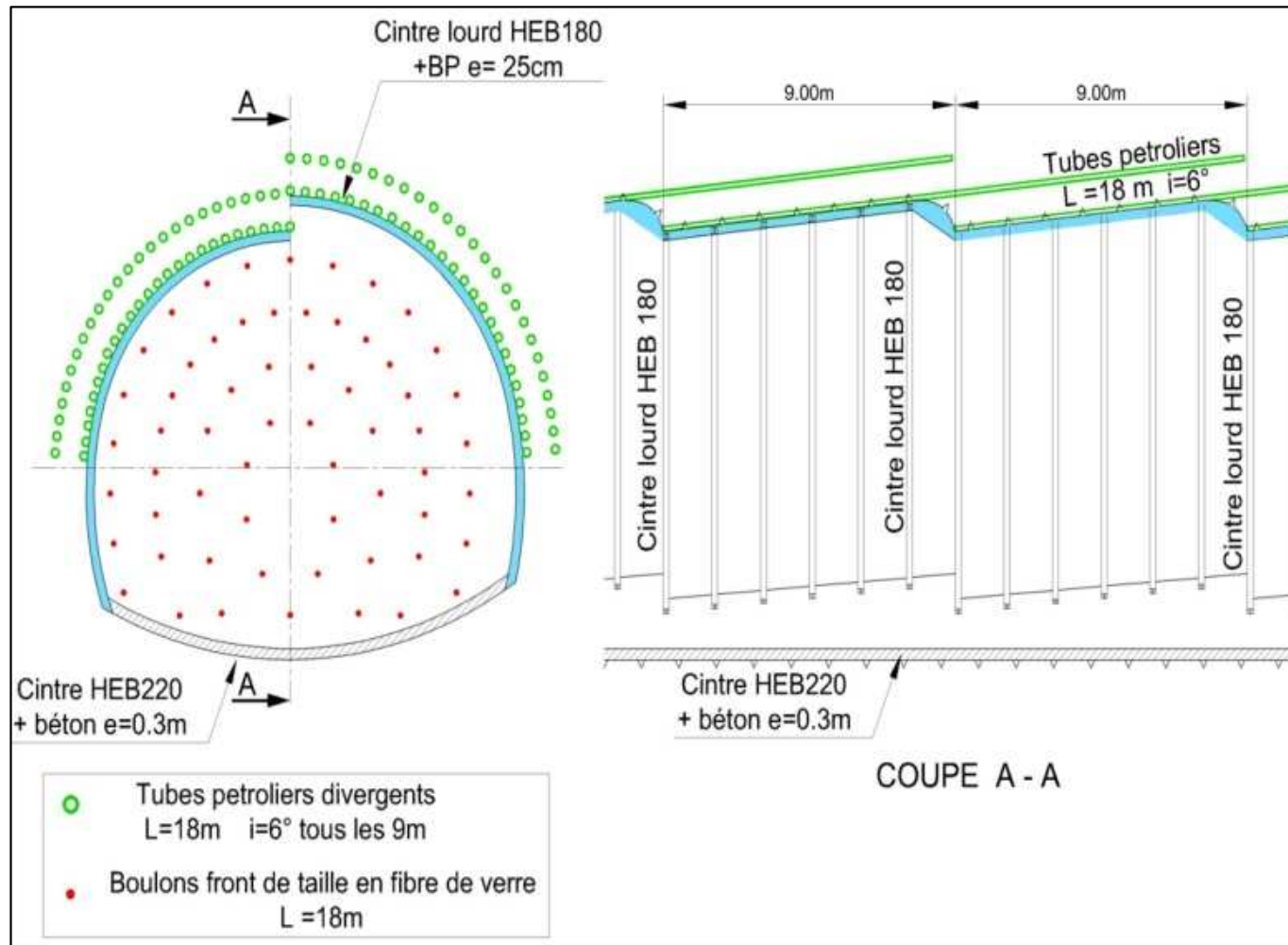


Charriage d'unités géologiques: création de contacts anormaux, morcellement et cisaillement des terrains, forte hétérogénéité au niveau du front



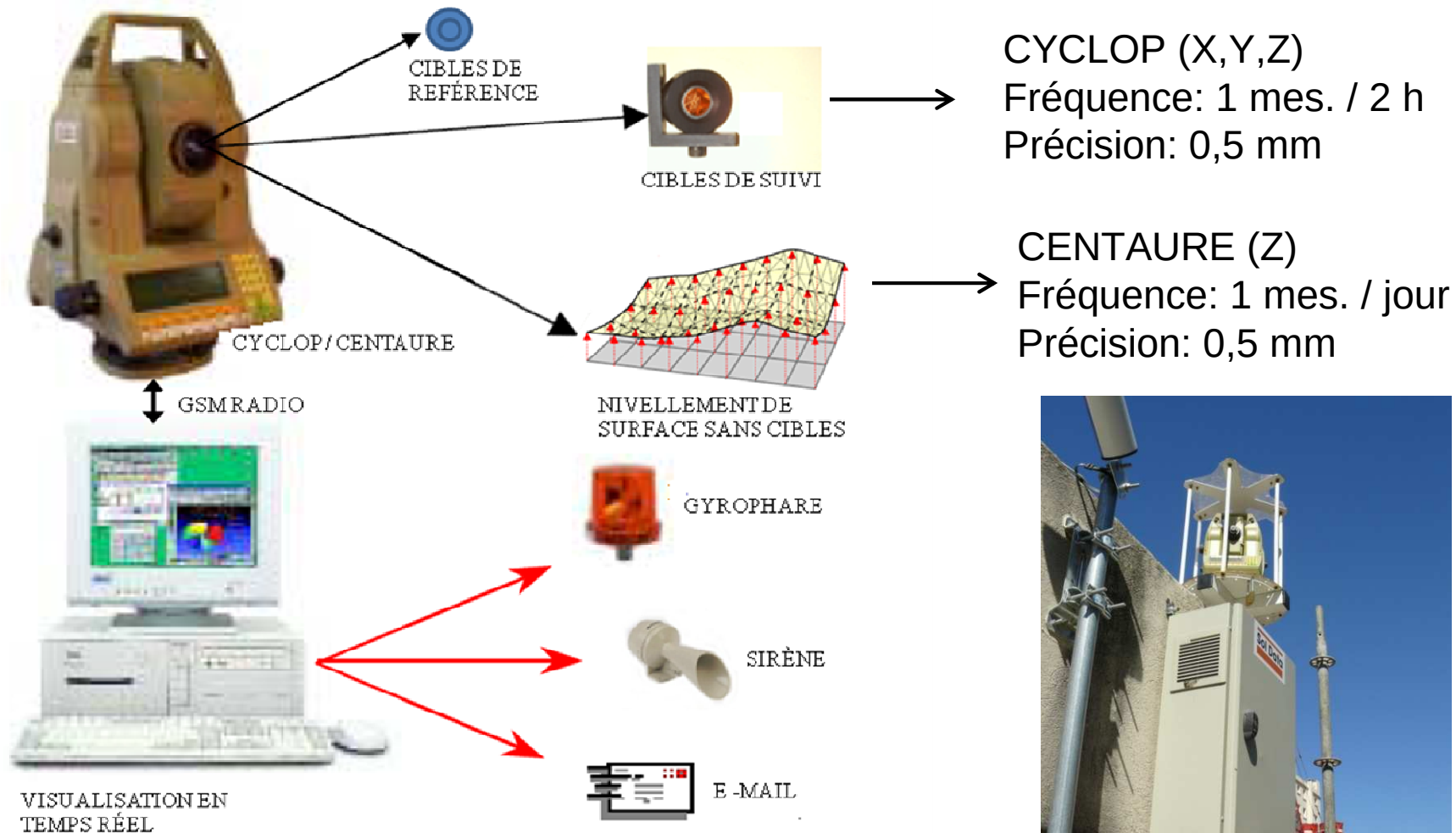


Présentation du projet – Soutènements

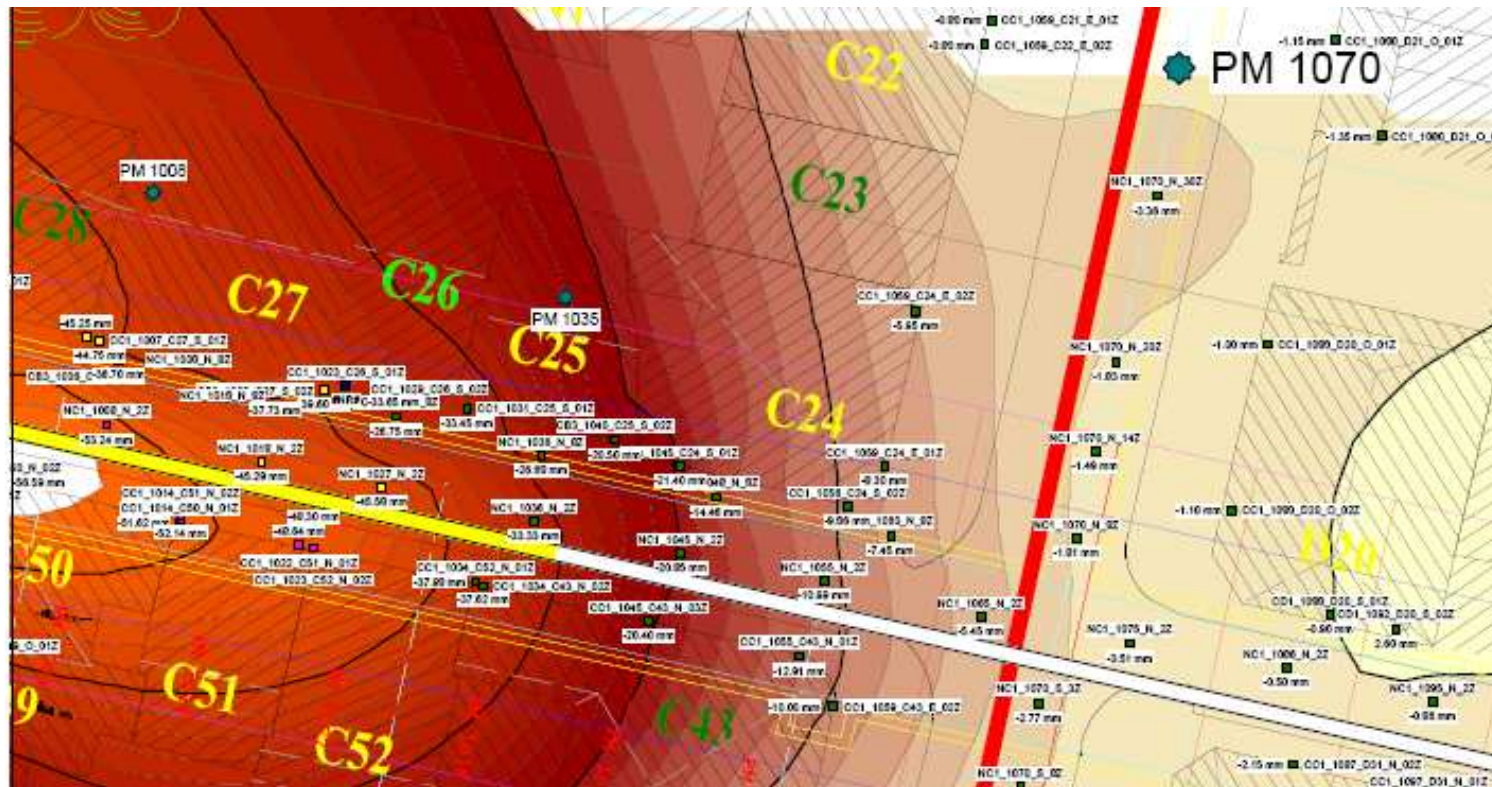


- ✓ présoutènement par voûte parapluie (L=18m, inclinés à 6°, renouvelés tous les 9m)
- ✓ préconfinement du front par boulons de fibre de verre ou autoforeurs (L=18m ; subhorizontaux)
- ✓ soutènement par cintre HEB (esp 1.5m) et béton projeté
- ✓ Avec contre-radier (dans la grande majorité des cas)

Présentation du projet – Auscultation



Présentation du projet – auscultation



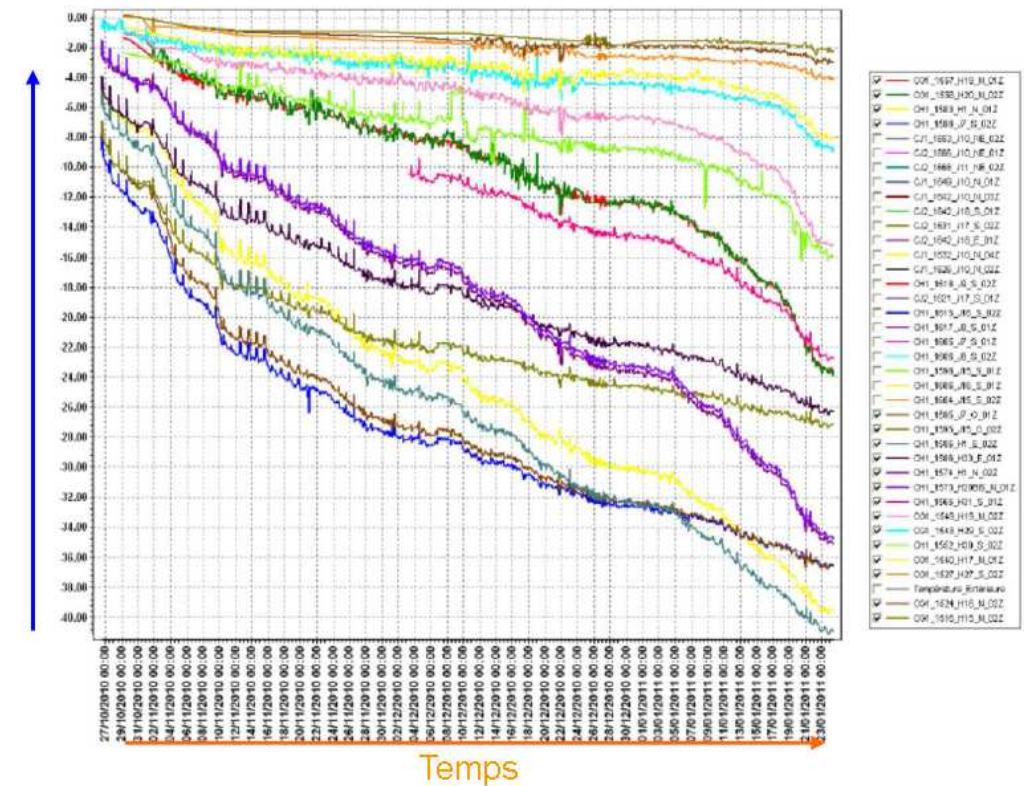
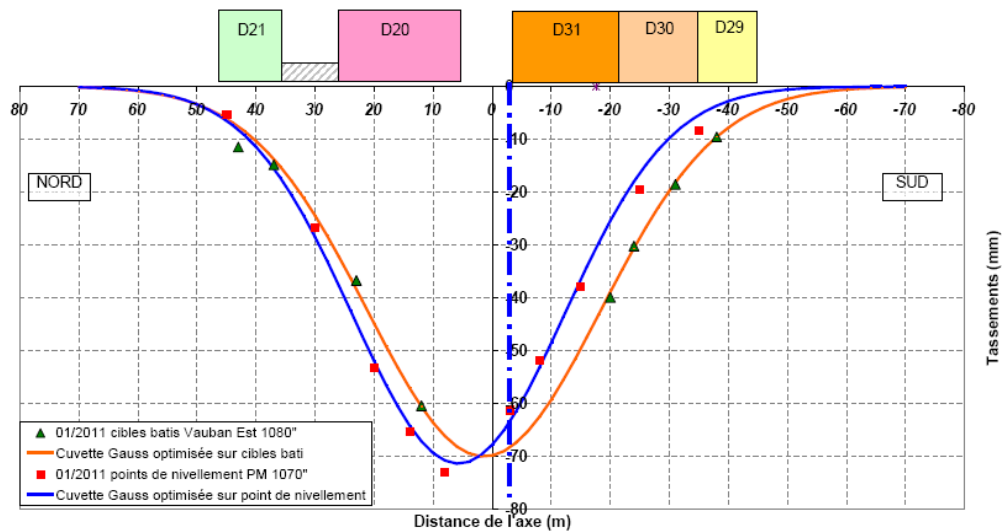
- Tassements de surface: sections de 5 points de mesure espacés de 9 m
- Les numéros du suivi:
 - 36 positions de théodolites
 - 1800 points de nivellement CENTAURE
 - 2700 cibles « bâti » CYCLOP

Présentation du projet – auscultation

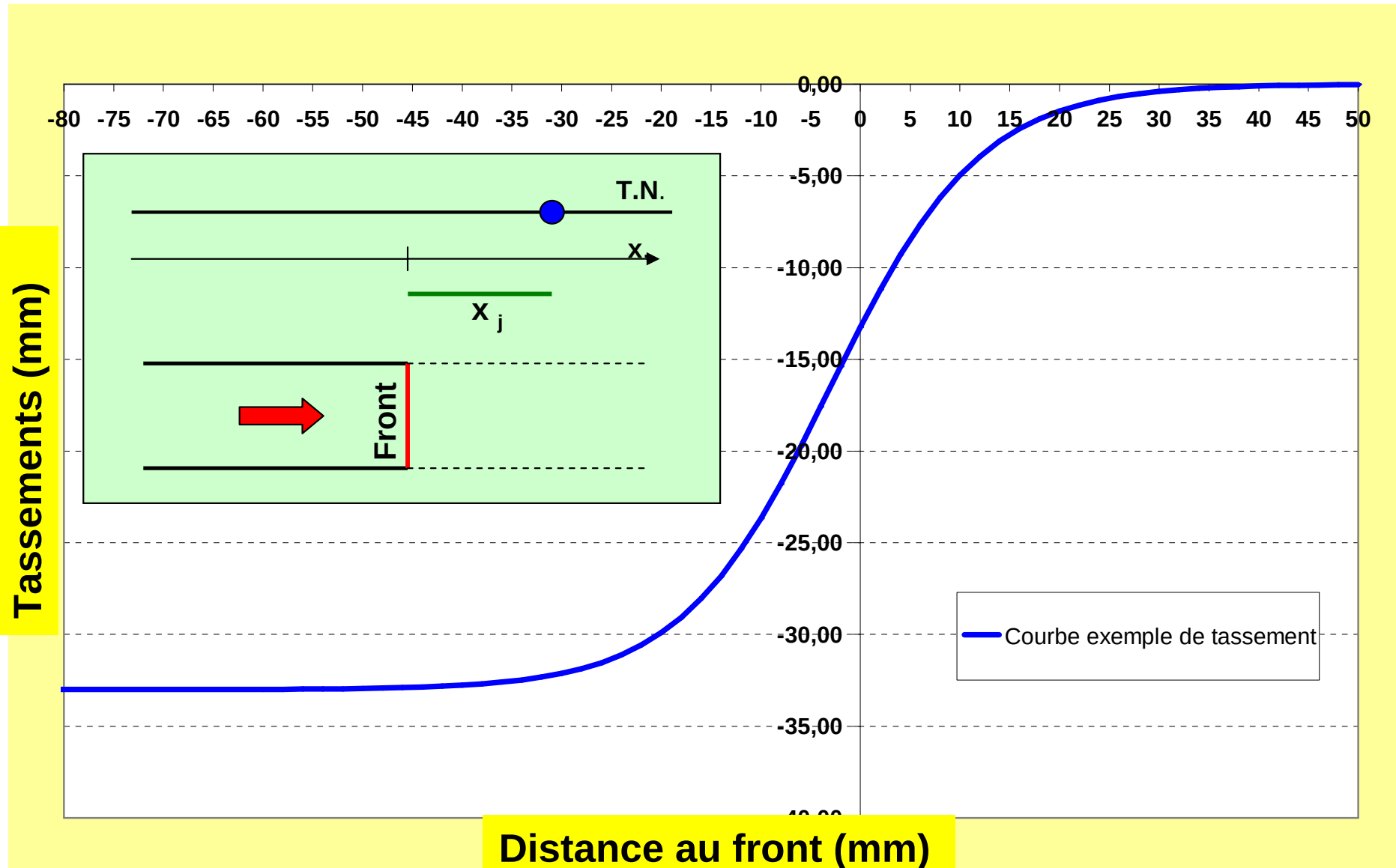


Analyse des mesures d'auscultations (convergences, déformation du front, déformations de surface, ...)

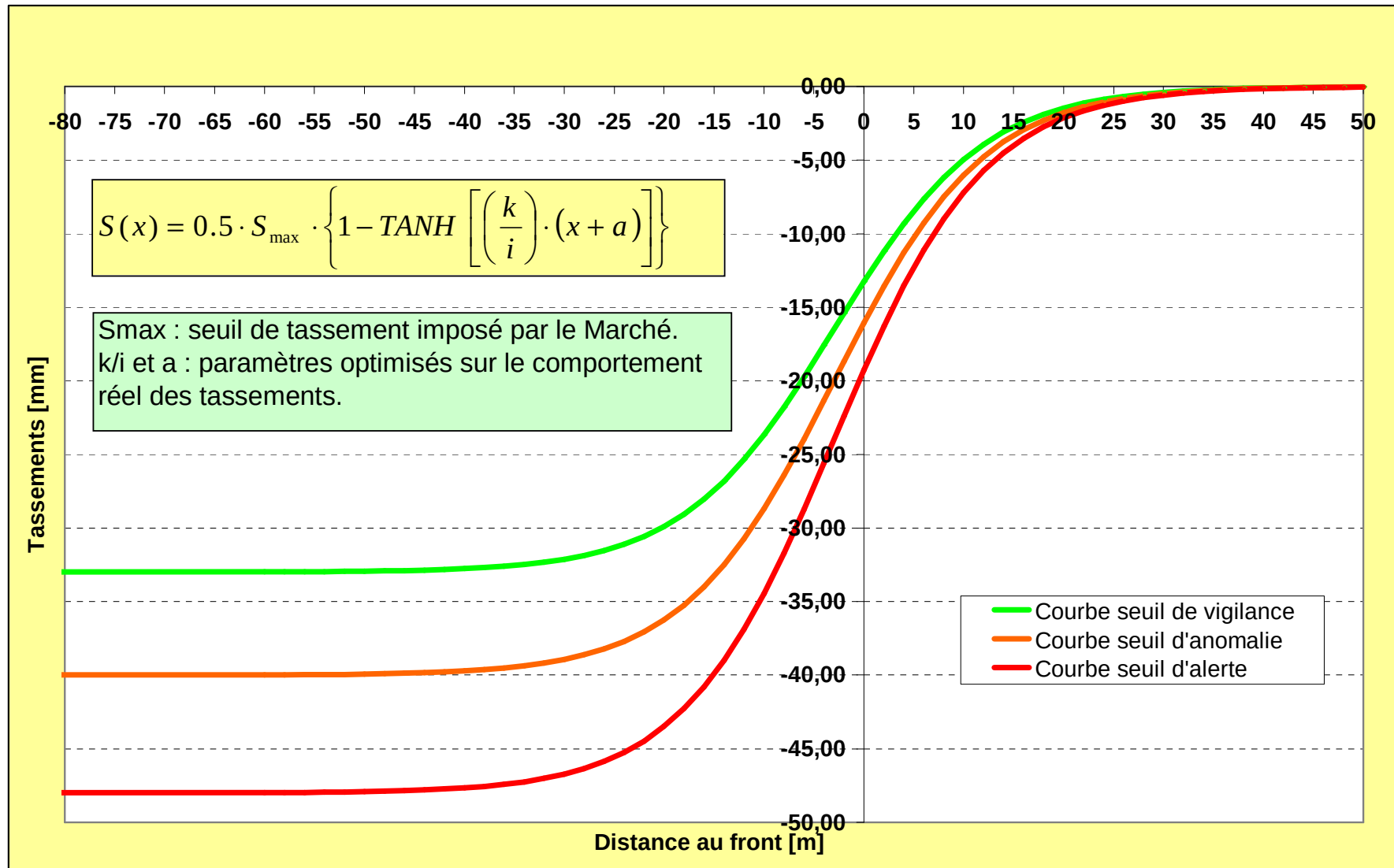
Cuvette transversale rue Vauban Bati est et terrain PM 1070 - 1080, Janvier 2011



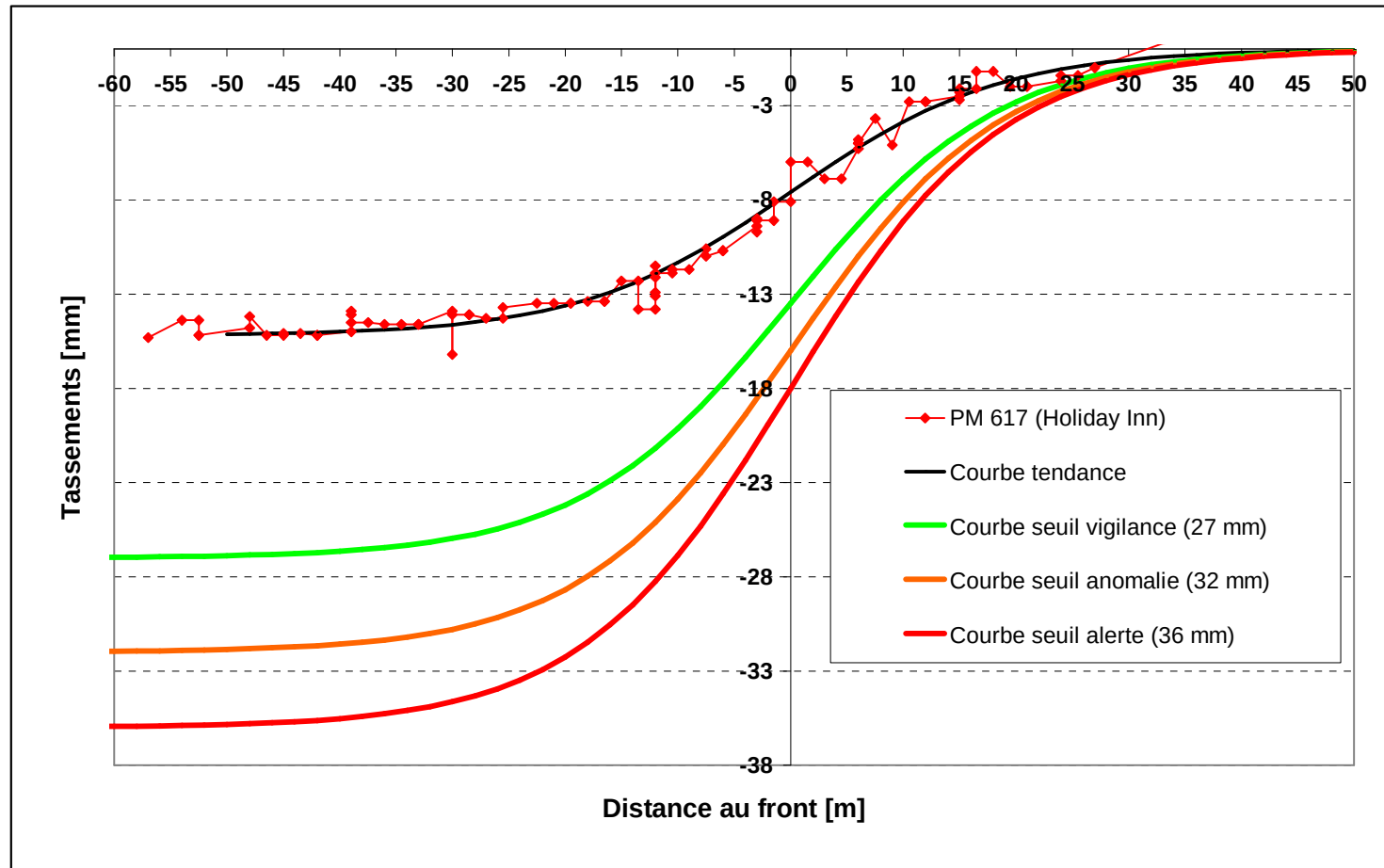
Présentation du projet – auscultation



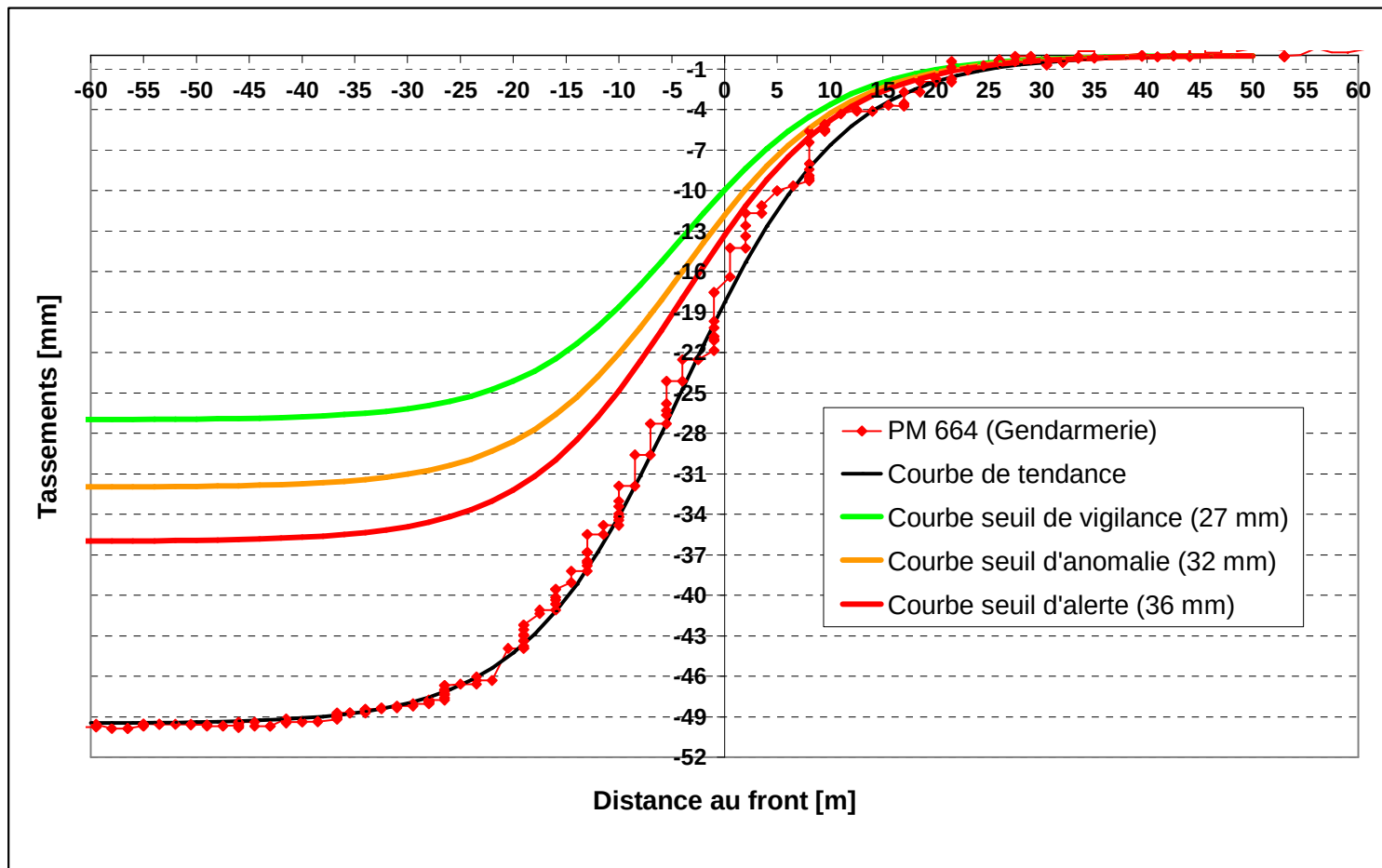
Adaptation du projet de soutènement aux déformations



Afin d'optimiser les travaux du point de vue économique et, en même temps, d'éviter des dégâts aux bâtis, le (pré)soutènement du tunnel devait être continuellement adapté en calant les évolutions de tassement de surface sur la **courbe d'anomalie**



Si les prévisions de tassement sont plus faibles que la courbe de vigilance, un allègement du soutènement et/ou présoutènement doit être pris en compte.

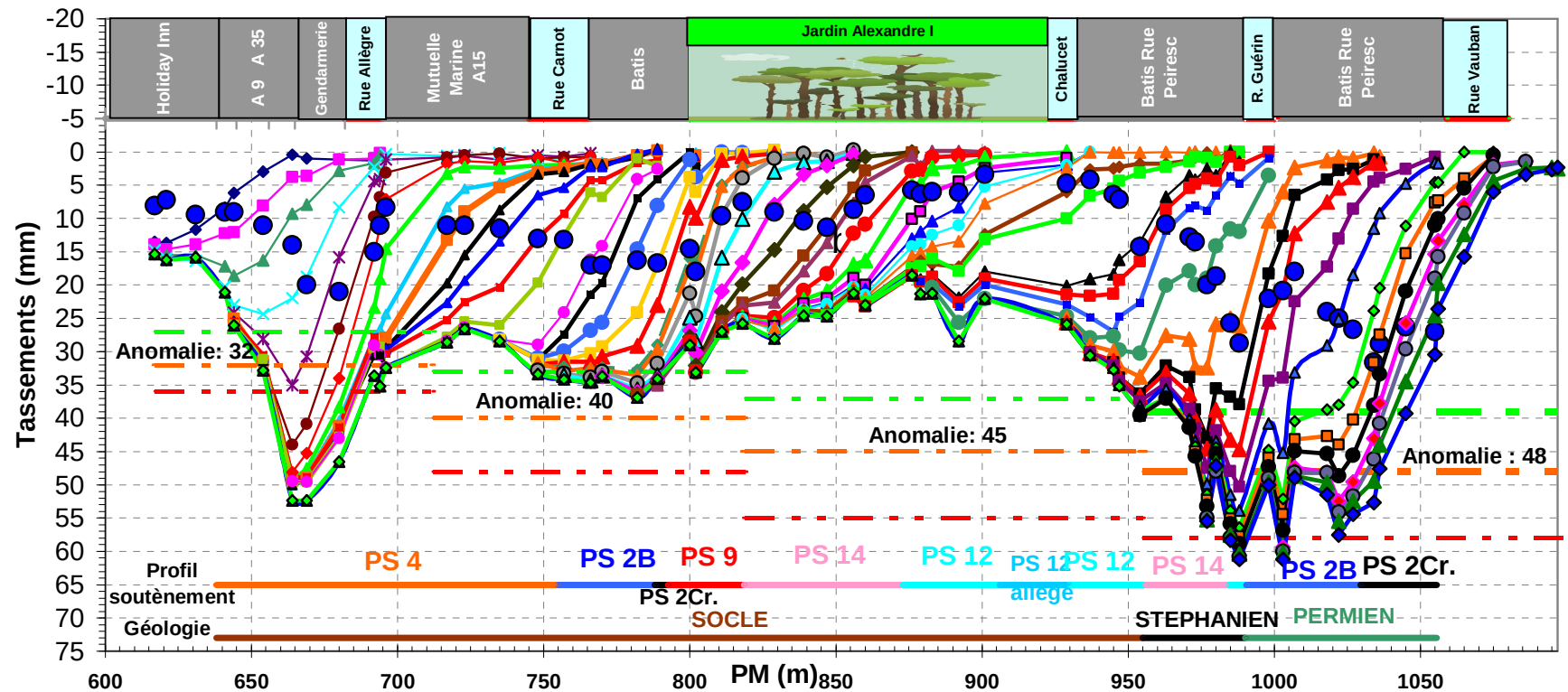
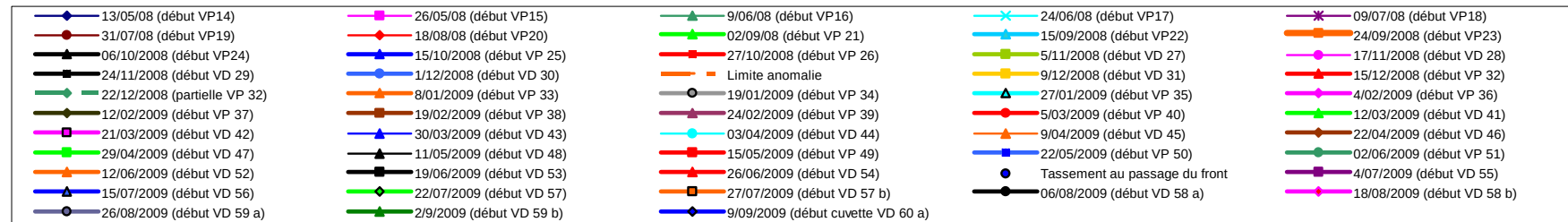


Si les prévisions allaient au-delà de la courbe d'alerte, le creusement devait être interrompu et des dispositions devaient être mises en œuvre pour le redémarrage de l'excavation.

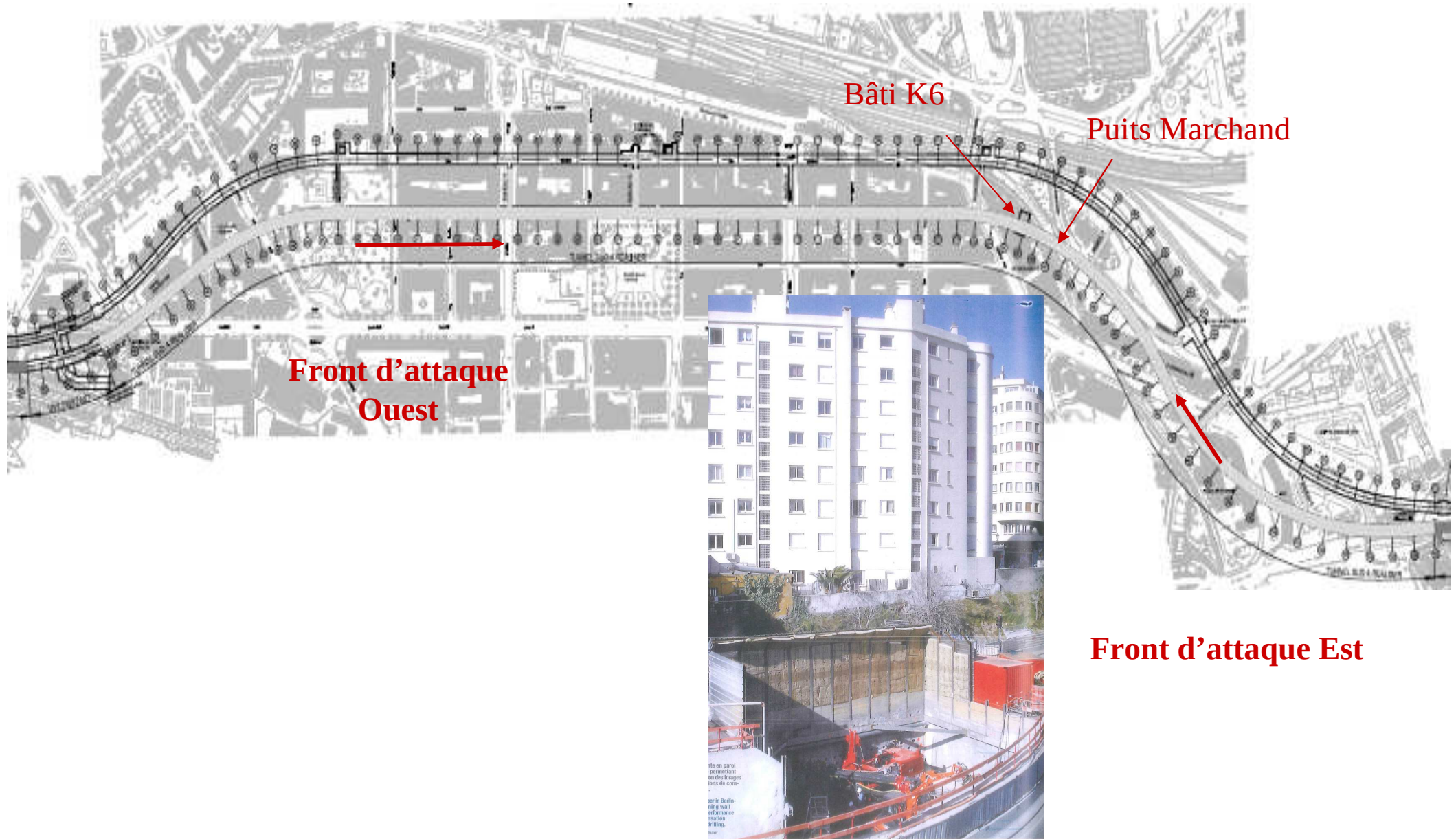
Adaptation du projet de soutènement aux déformations



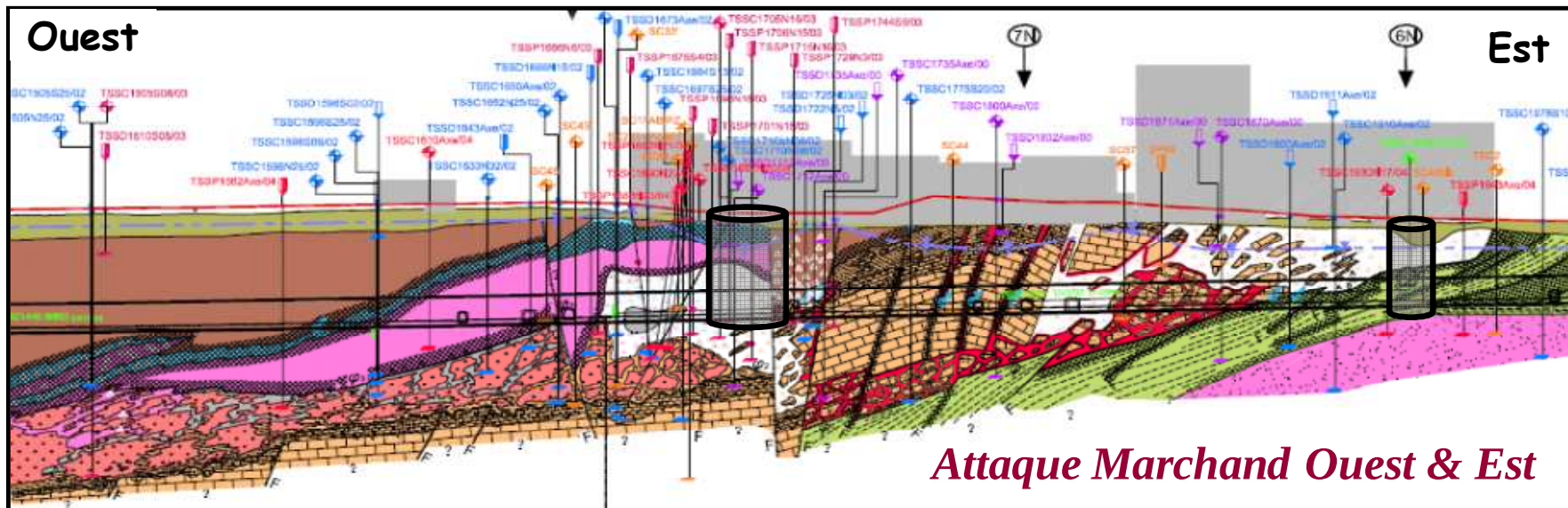
Profil en long Attaque OUEST

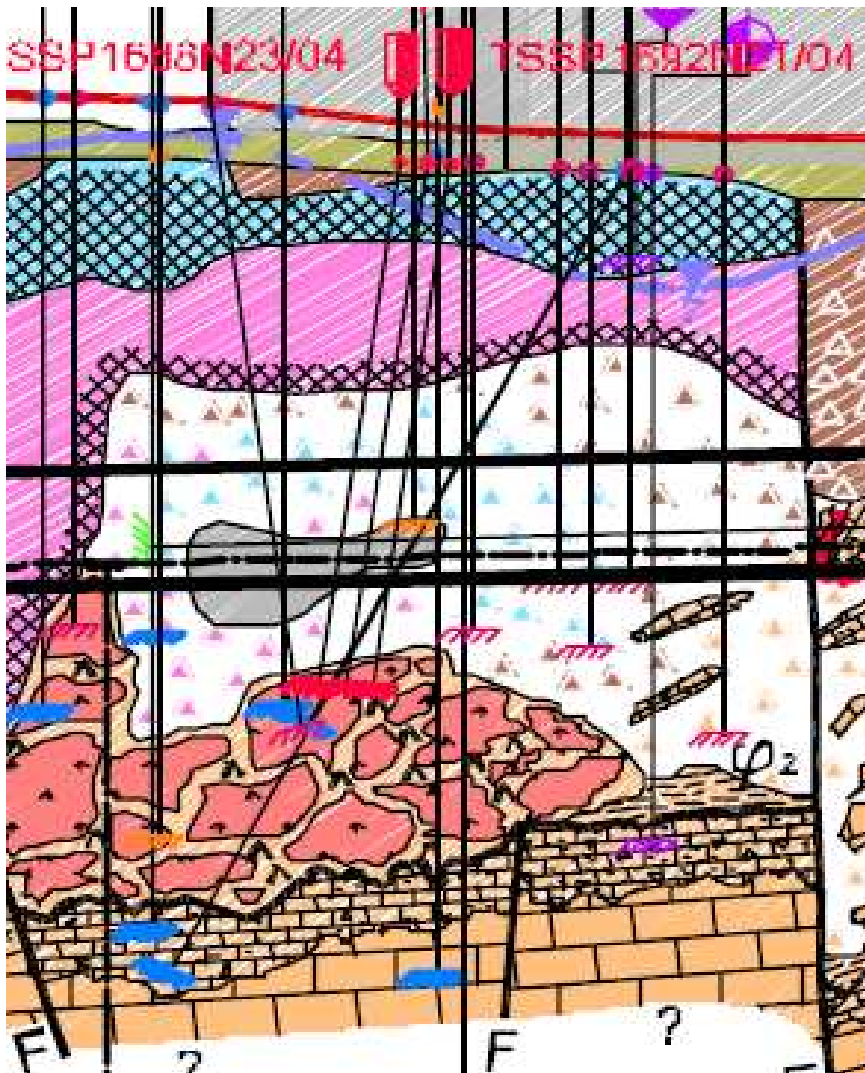


Zone Marchand : localisation du secteur K6/K7

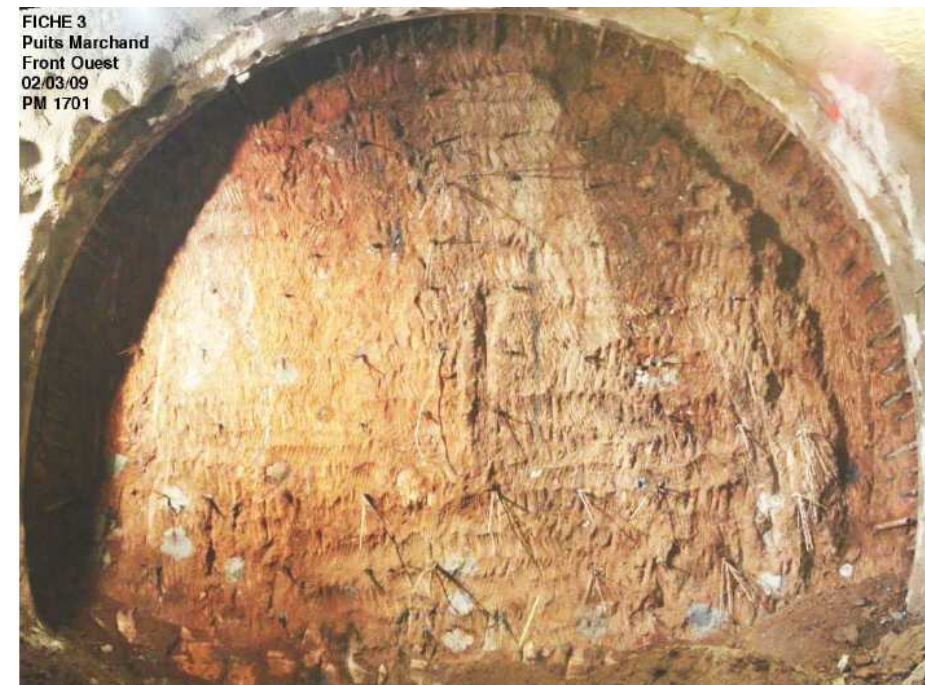


injection de compensation – géologie du secteur K6-K7



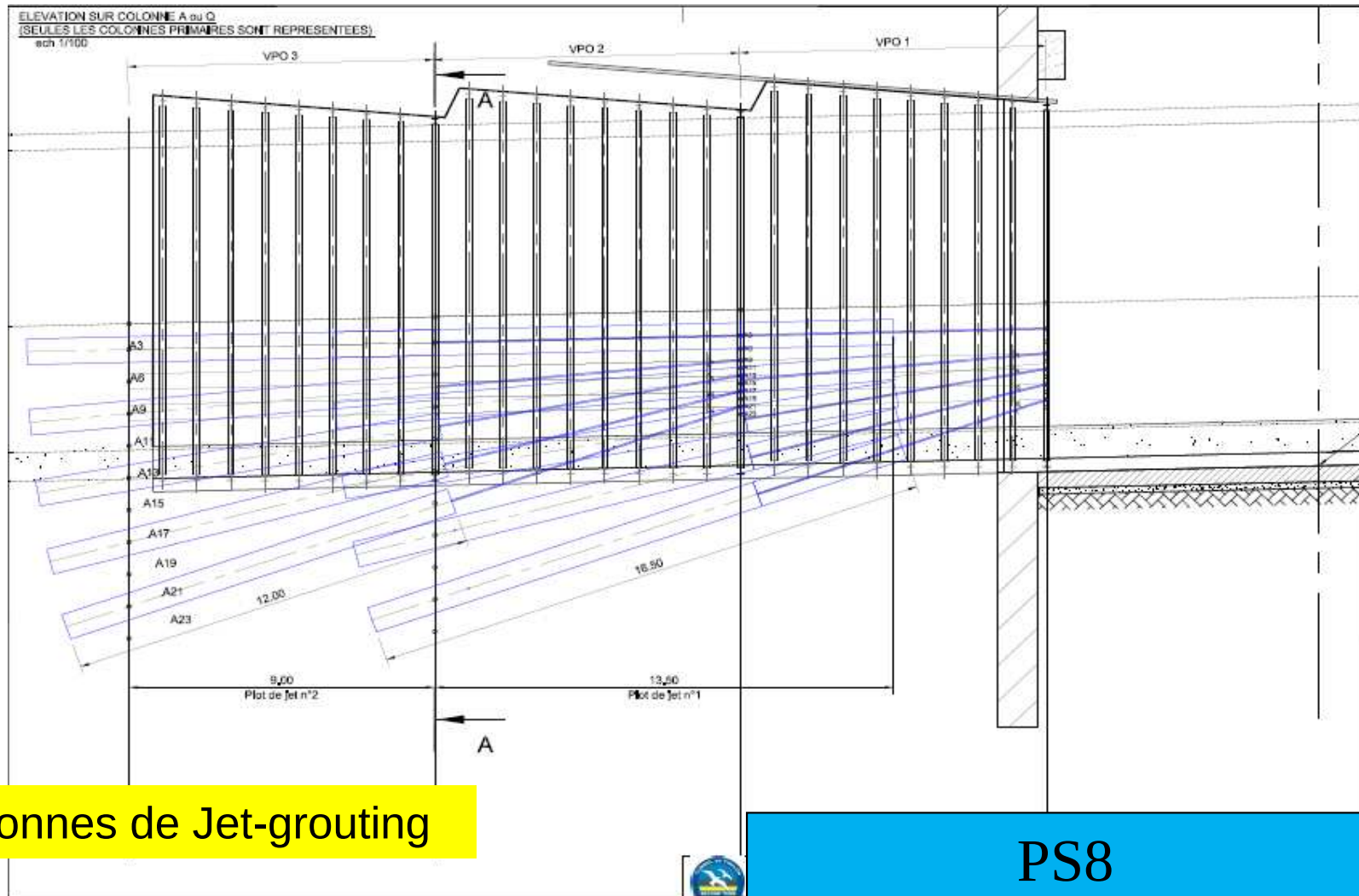


- terrain de qualité particulièrement médiocre (brèches, poches d'argile molle issue de la dissolution du gypse).

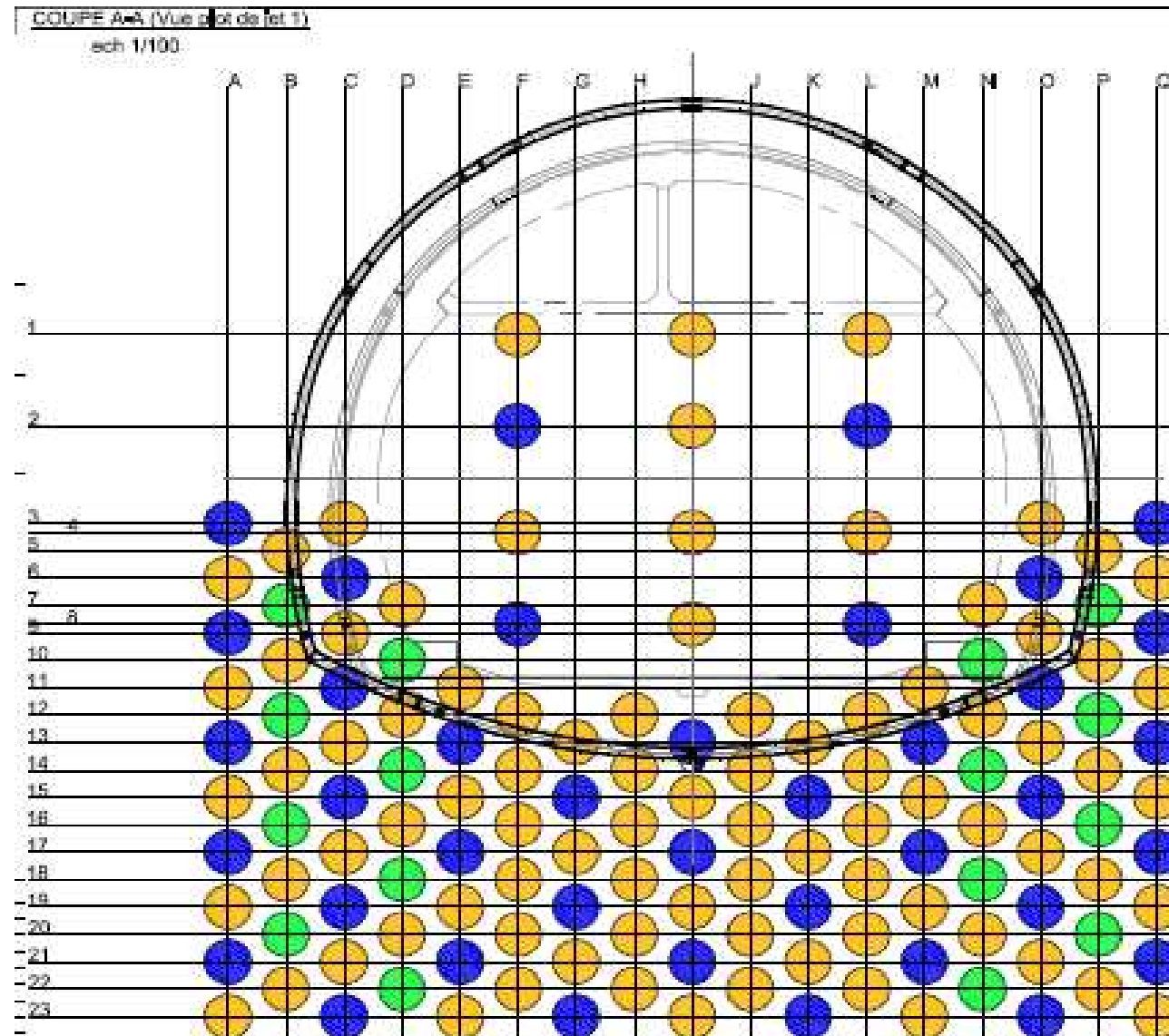


FICHE 3
Puits Marchand
Front Ouest
02/03/09
PM 1701

injection de compensation – soutènement prévu



injection de compensation – soutènement prévu



injection de compensation – **soutènement prévu**



**Réalisation des colonnes de Jet-grouting
et des boulons au front de taille**



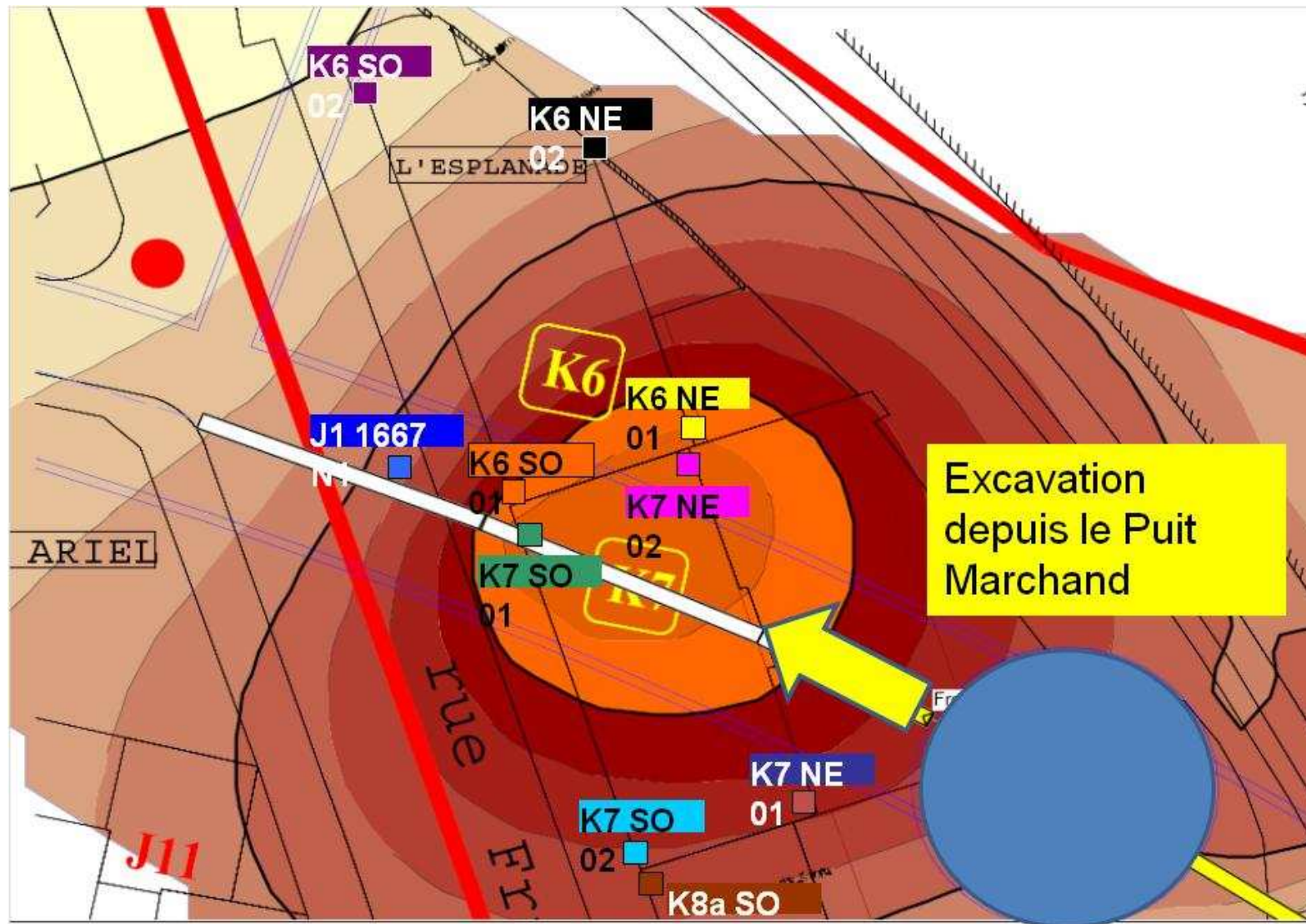
- L'excavation de l'attaque Ouest Marchand démarre le 23/02/09 au PM 1703
- Dès le début de l'excavation, le bâti K6, R+7, subit des désordres importants sur le second œuvre malgré des tassements mesurés relativement faibles (15 mm).



Déformations en avant du front à plus de 25 m :

- après 9 m d'excavation plusieurs millimètres de tassement avec des vitesses de l'ordre de 0,5 mm/j (façade Ouest des bâtiments K6 et K7).
- Une cuvette centrée à la jonction des deux bâtiments commençait à se former, dans une zone que le traitement par colonnes de jet grouting n'avait pas encore pu atteindre.

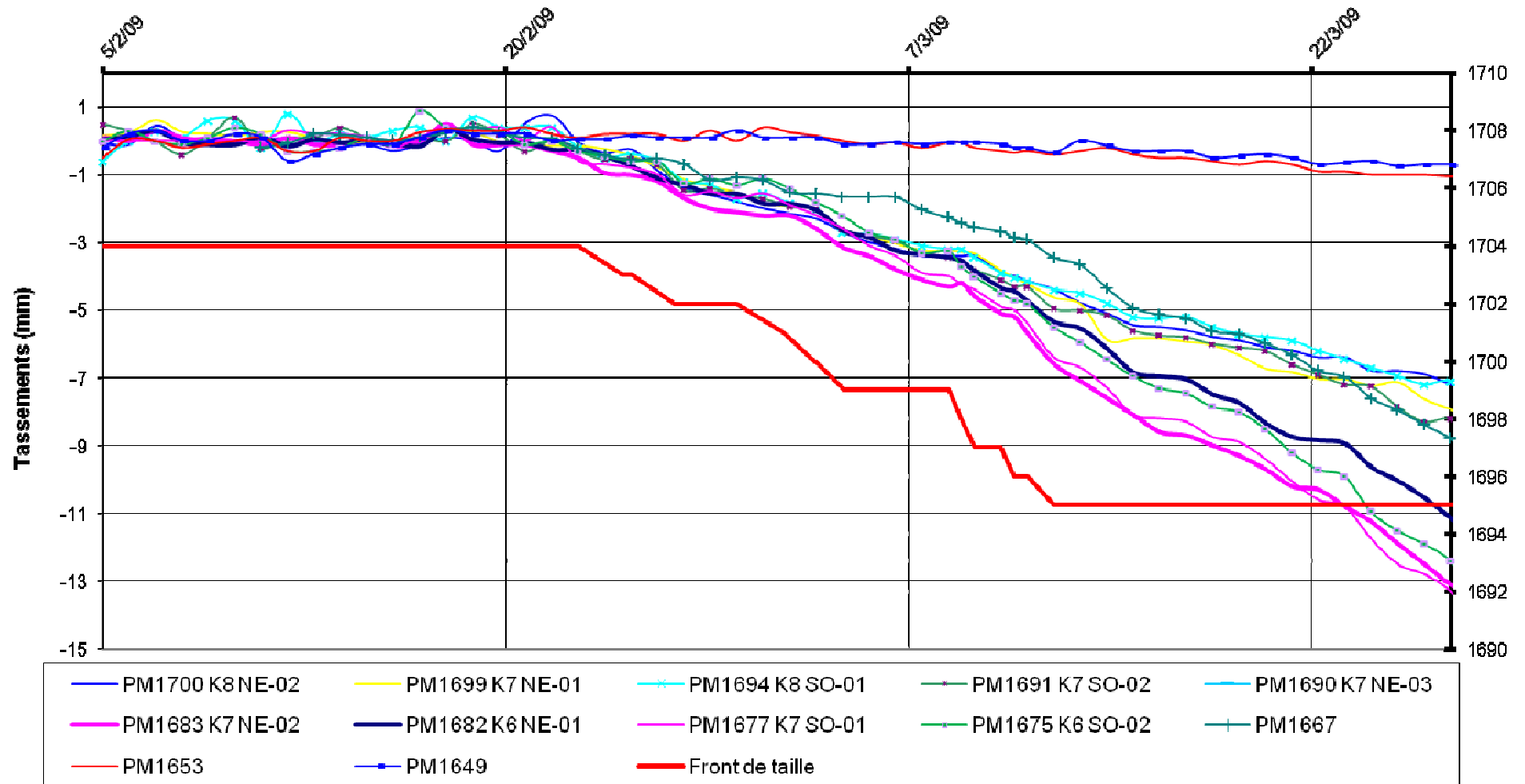
injection de compensation - historique



injection de compensation - historique



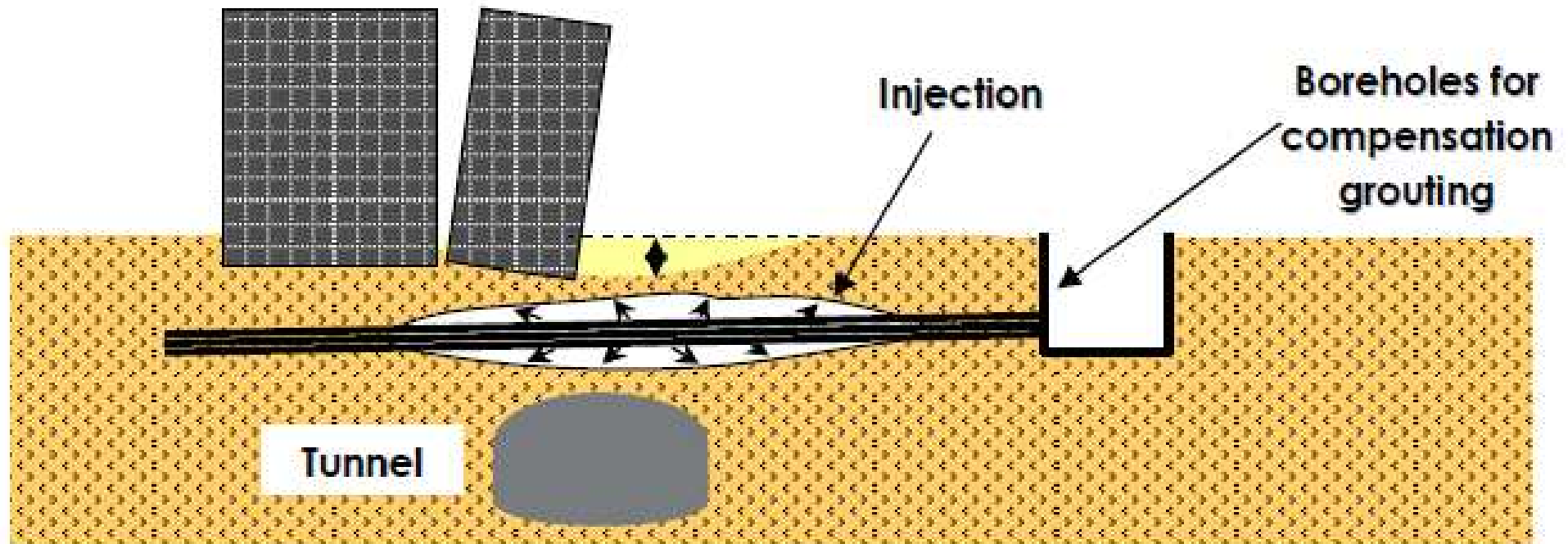
Suivi tassements surface Attaque Est Secteur Esplanade





- le Bureau Veritas estime que, si les déformations se poursuivent, il existe un risque de créer des désordres structurels importants sur le bâti K6.
- L'excavation est stoppée en Juillet 2009
- Sur le conseil du MOe, il est décidé de mettre en place un dispositif d'injection de compensation pour poursuivre le creusement.

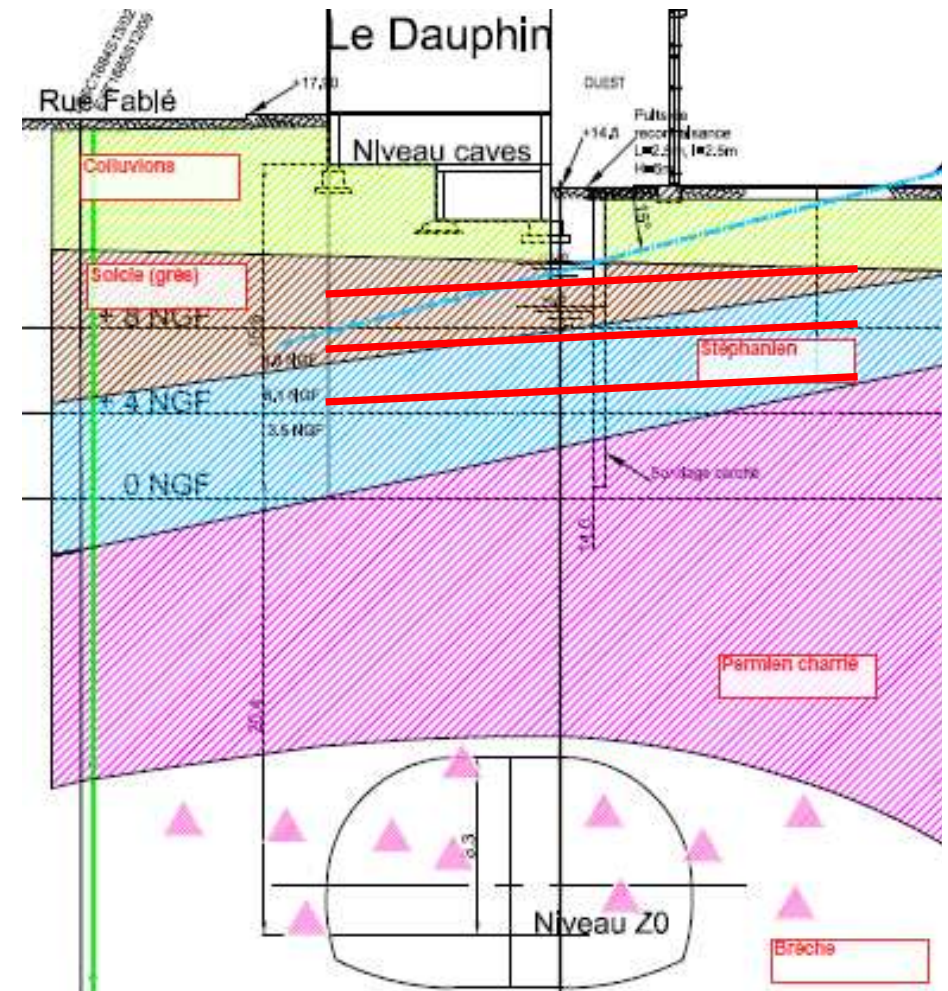
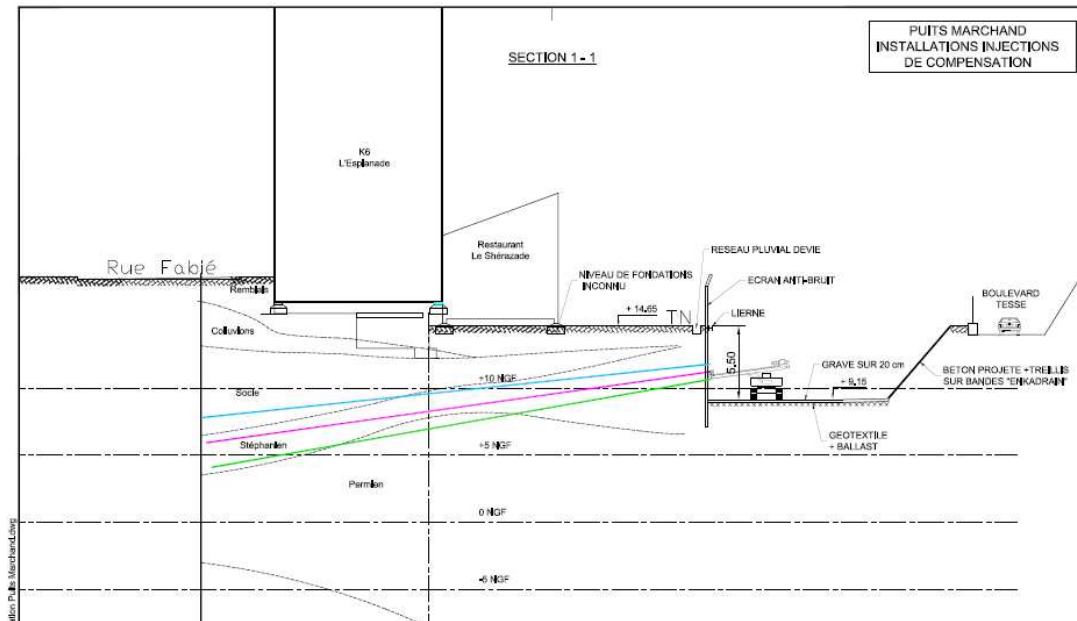
injection de compensation - principe de la méthode



Principe de la méthode:

Injection de coulis de ciment sous le bâti pour créer des soulèvements permettant de compenser les tassements engendrés par l'excavation

injection de compensation - principe de la méthode



Principe de la méthode:

Injection de coulis de ciment sous le bâti pour créer des soulèvements permettant de compenser les tassements engendrés par l'excavation

Trois phases principales :

- **Phase 1** : Réalisation d'un matelas de répartition entre le tunnel et le bâti par injection de coulis à partir de forages subhorizontaux

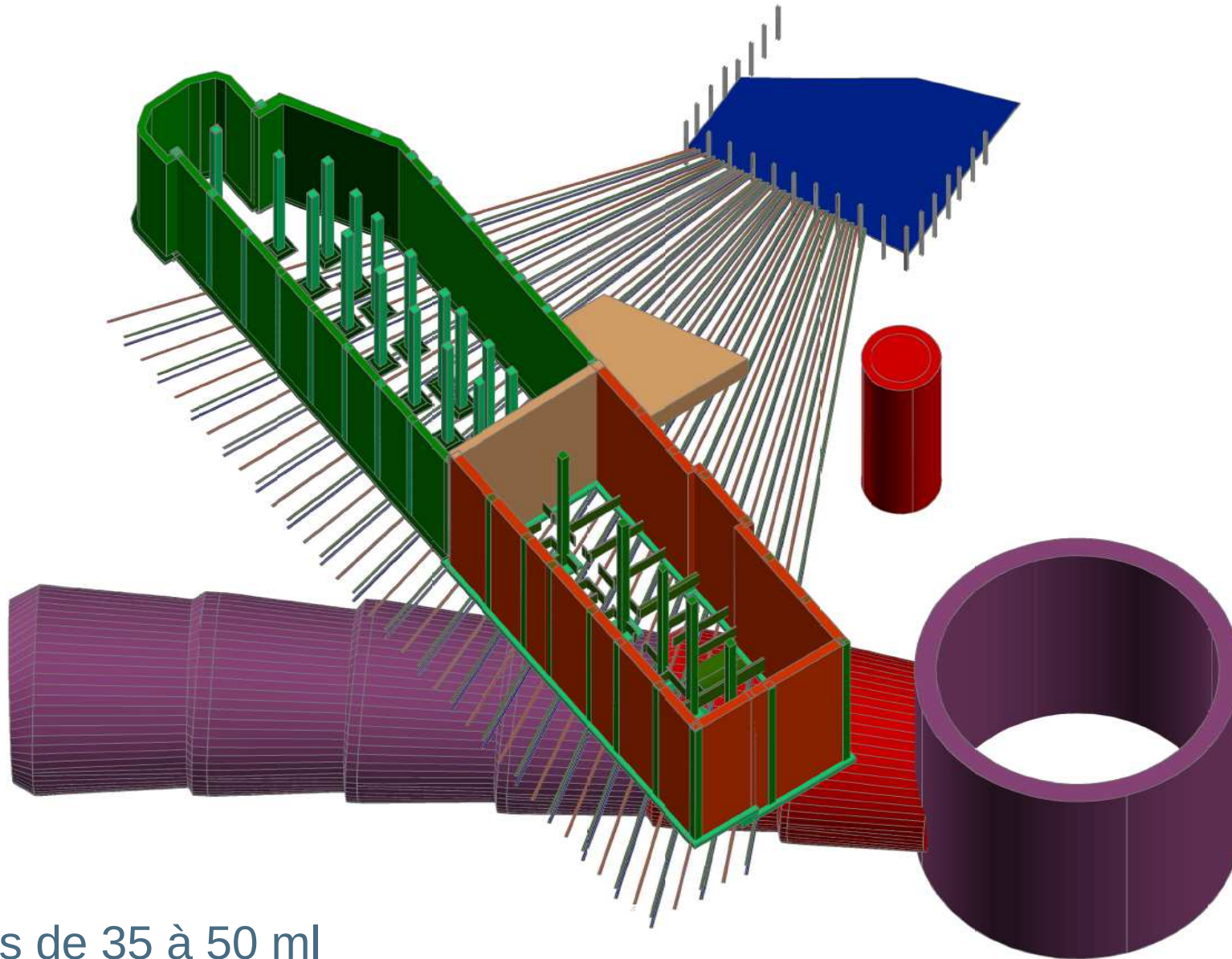


Forages avec une machine « Sonic drilling » (vibration à très haute fréquence d'un tube de 140mm équipé d'une couronne creuse détruisant le terrain par résonance).

Trois phases principales :

- **Phase 2** : Phase de conditionnement servant à étalonner le dispositif, complétée pour ce chantier par un pré-soulèvement,
- **Phase 3** : Phase de compensation pendant l'excavation du tunnel sous les bâtis.

injection de compensation - principe de la méthode



57 forages de 35 à 50 ml

Répartition sur 3 lits

1 manchette d'injection tout les 33 cm

2 décembre 2011

Grands travaux et dimensionnement interactif
CFMS / BGA

-36-

- Les seuils définis par Veritas sont faibles:
 - Augmentation des différentiels longitudinaux limitée à $0,5\text{‰}$
 - Augmentation des différentiels transversaux limitée à 1.2‰
- Le bâti présente une structure souple mal contreventée avec deux files de poteaux centrales pouvant réagir de manière différente
- Nécessité d'une instrumentation très précise comprenant:
 - Une maille serrée
 - Une haute fréquence de suivi

injection de compensation - **Suivi des déformations**



- Suivi topographique extérieur comprenant près de 40 cibles suivies par 7 théodolites automatisés
- Fréquence de suivi comprise entre 1 mesure/ 8 minutes et 1 mesure/ 2 heures



injection de compensation - **Suivi des déformations**

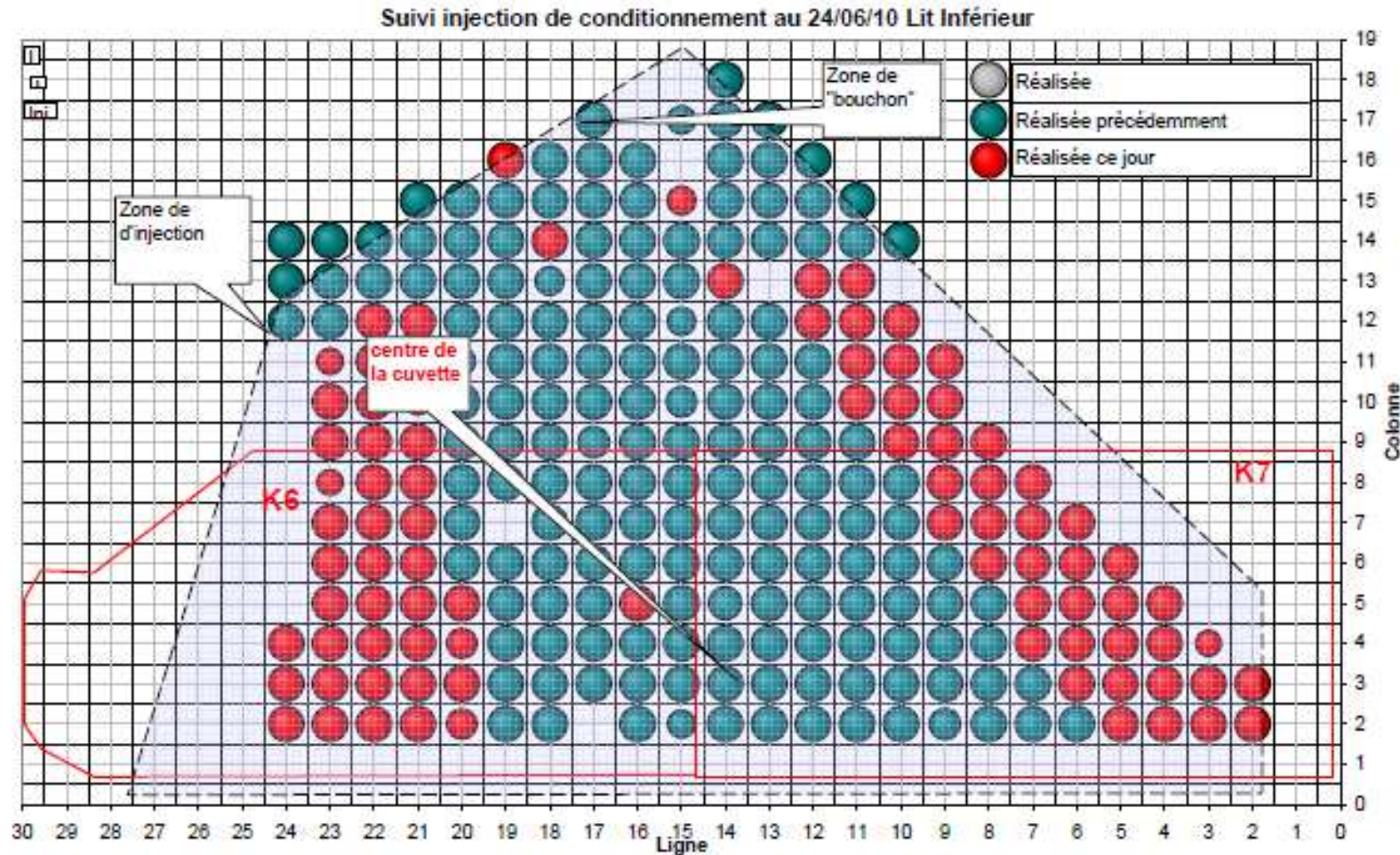
- Suivi intérieur par 36 électro nivelles reliant façades et poteaux intérieurs
- Fréquence de suivi de 1 mesure/ 4 minutes



Pente mesurée avec une précision de l'ordre de 0.01mm / m



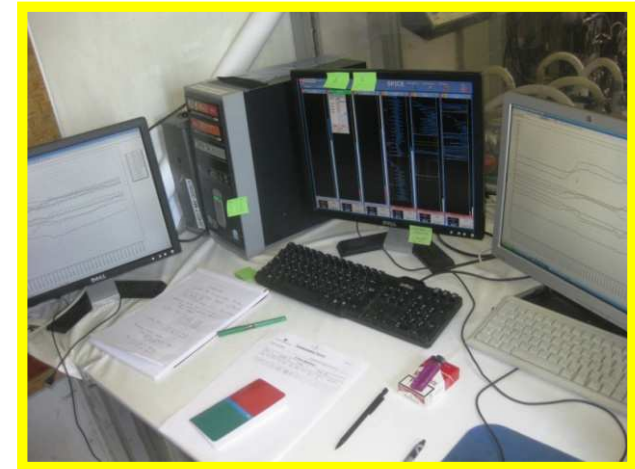
injection de compensation - programme d'injection



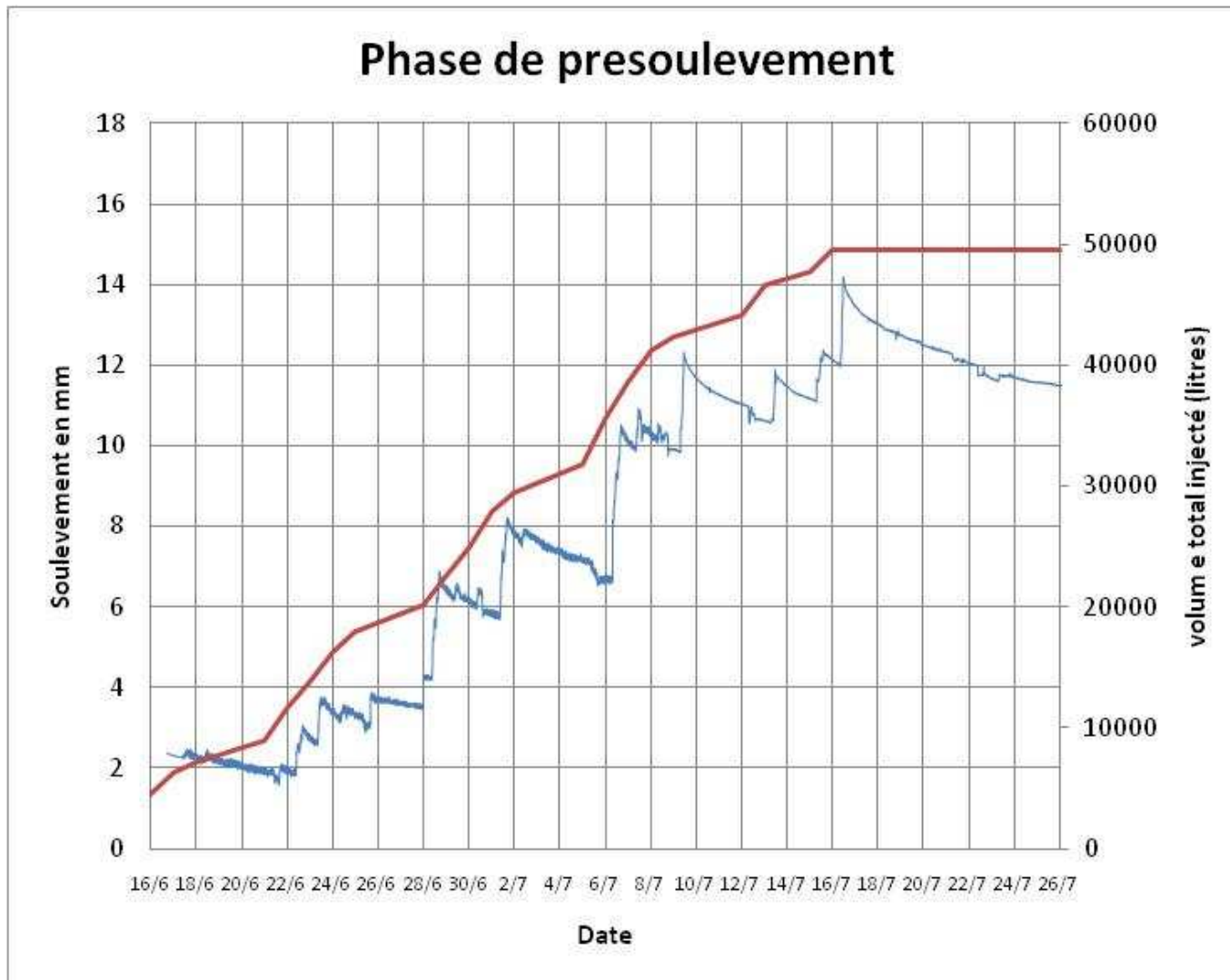
Exemple: Programme d'injection appliqué le 24/06 (phase de presoulevement)

réseau de 297 cellules d'une surface de 2mx2m. Chaque cellule disposait d'environ 10 points d'injections répartis sur les 3 lits.

injection de compensation - principe de la méthode

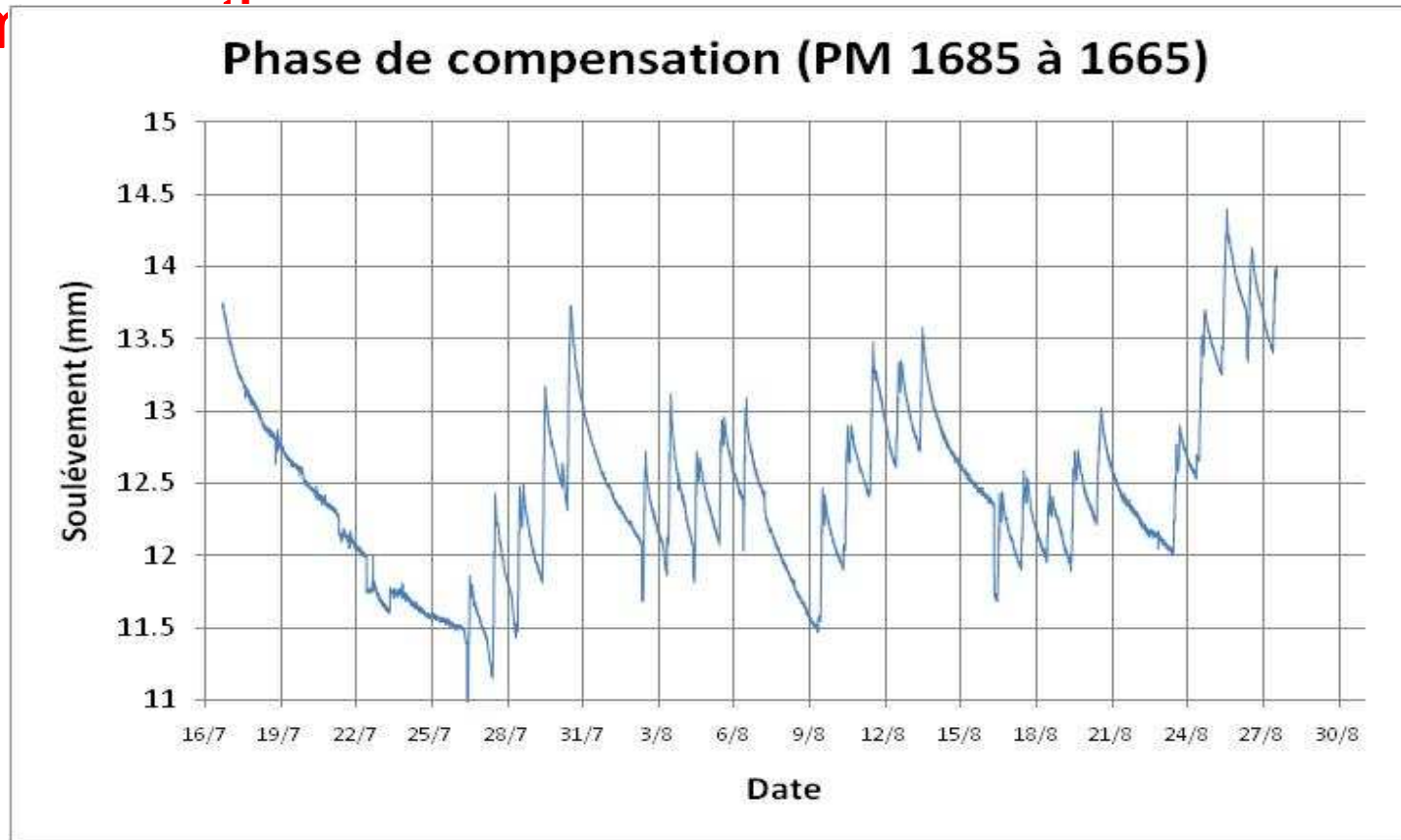


injection de compensation - présoulevement



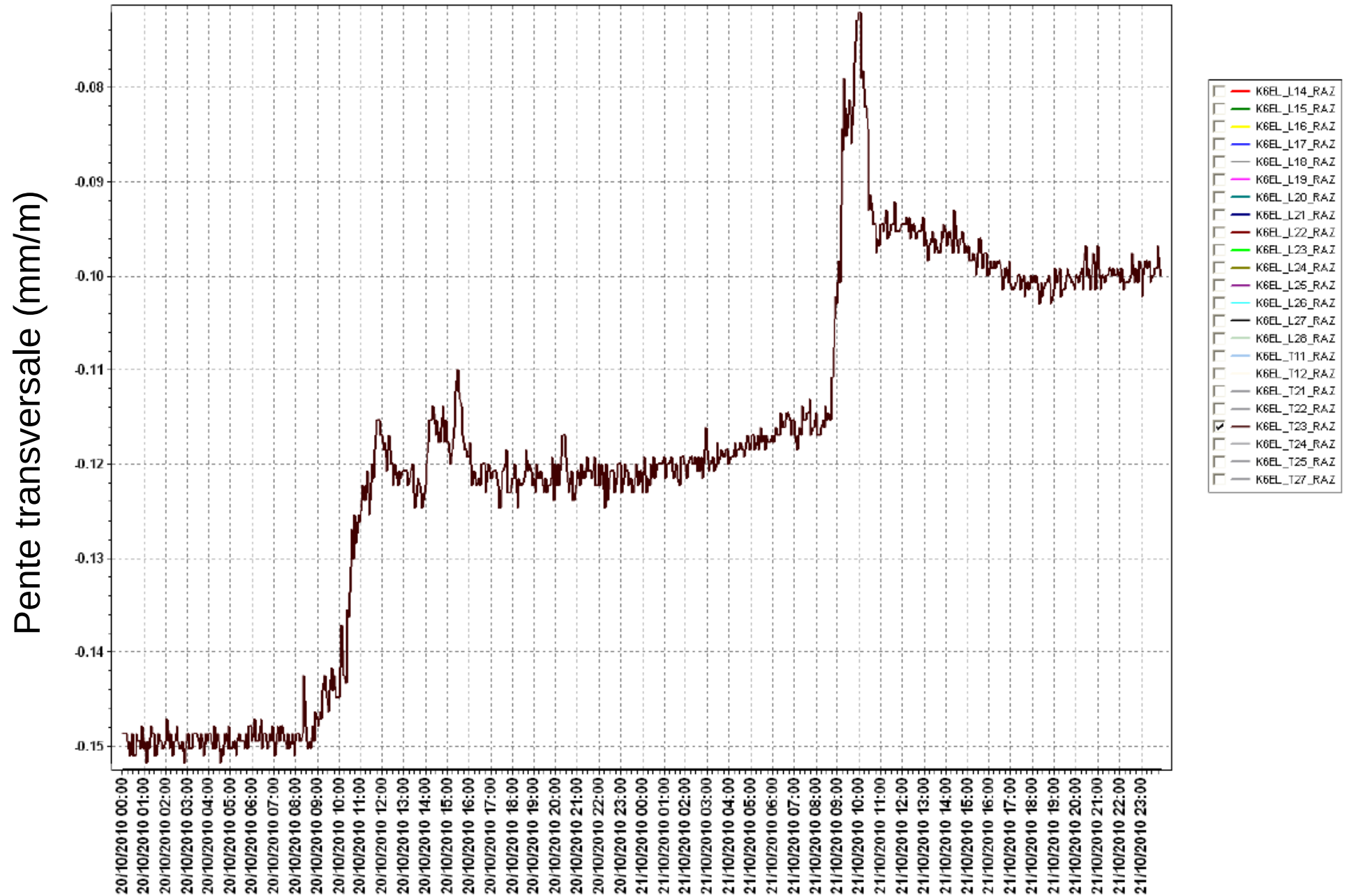
- Jusqu'à 3900 litres injectés par jour sur 130 manchettes
- relaxation (jusqu'à 50%)
- 10 à 12mm de soulèvement

injection de compensation - phase de compensation

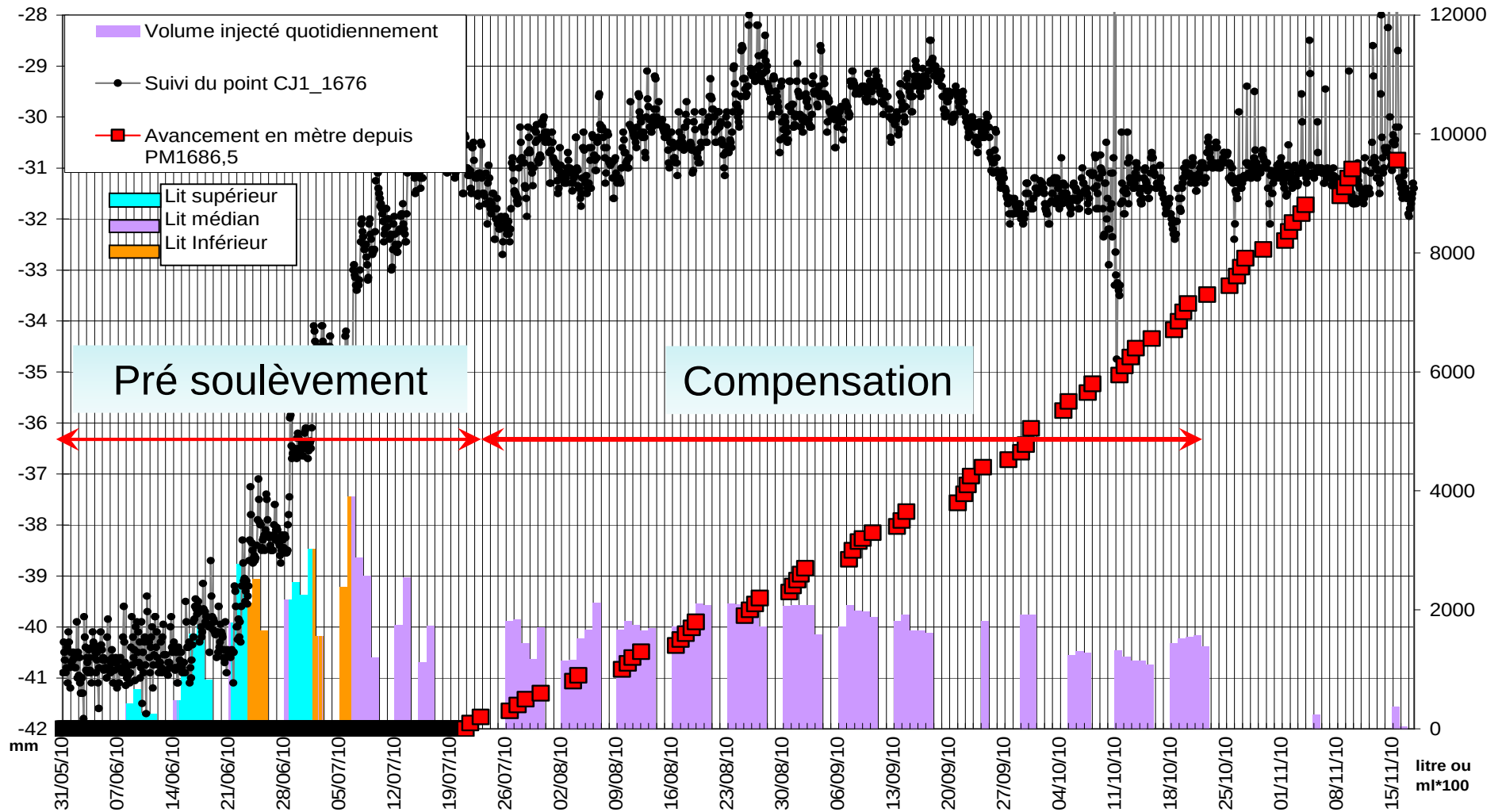


- ✓ 40 et 70 manchettes injectées par jour.
- ✓ environ 1,2 mm de soulèvement mesurés la journée avec un avancement de 1m/j
- ✓ relaxation sur 12 h de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm.
- ✓ réactivité quasi immédiate du bâti vis-à-vis des sollicitations du coulis
- ✓ Maintien du bâti à +/- 1 mm

injection de compensation - principe de la méthode



injection de compensation - Suivi des déformations





Première application de la méthode en France

• Nombreux enseignements, en particulier :

- intérêt de la méthode de forage « sonic Drilling » (précision, limitation des tassements)
- fiabilité de la méthode malgré un contexte difficile (sensibilité du bâti, hétérogénéité géologique)
- possibilité de respecter des critères particulièrement stricts avec une instrumentation précise (évolution des tassements différentiels inférieure à 0,4/mille)

Les désordres observés dans le bâti ont très peu évolués durant l'opération