

Demi-journée scientifique et technique
« Recommandations relatives à l'instrumentation des ouvrages géotechniques »

Soutènements en parois moulées

FONTY, Maxime

Sommaire

Instrumentation des soutènements en parois moulées

➤ Exemple d'instrumentation d'un soutènement en paroi moulée dans le cadre d'un projet de métro

- Présentation de l'ouvrage Glarner sur la ligne 14 Nord
- Instrumentation et suivi géotechnique mise en œuvre
- Résultats du suivi géotechnique

➤ Enseignements sur l'importance d'une bonne instrumentation et du suivi (cas des écrans) :

- Maîtriser le dimensionnement
- Maîtriser l'exécution
- Optimiser l'ouvrage et ceux à venir





Exemple d'un chantier de métro

Ligne 14 Nord
Ouvrage Glarner

INSTRUMENTATION DES SOUTÈNEMENTS EN PAROI MOULÉE

½ JST DU 11 SEPTEMBRE 2025

Exemple de l'instrumentation d'un ouvrage - Glarner

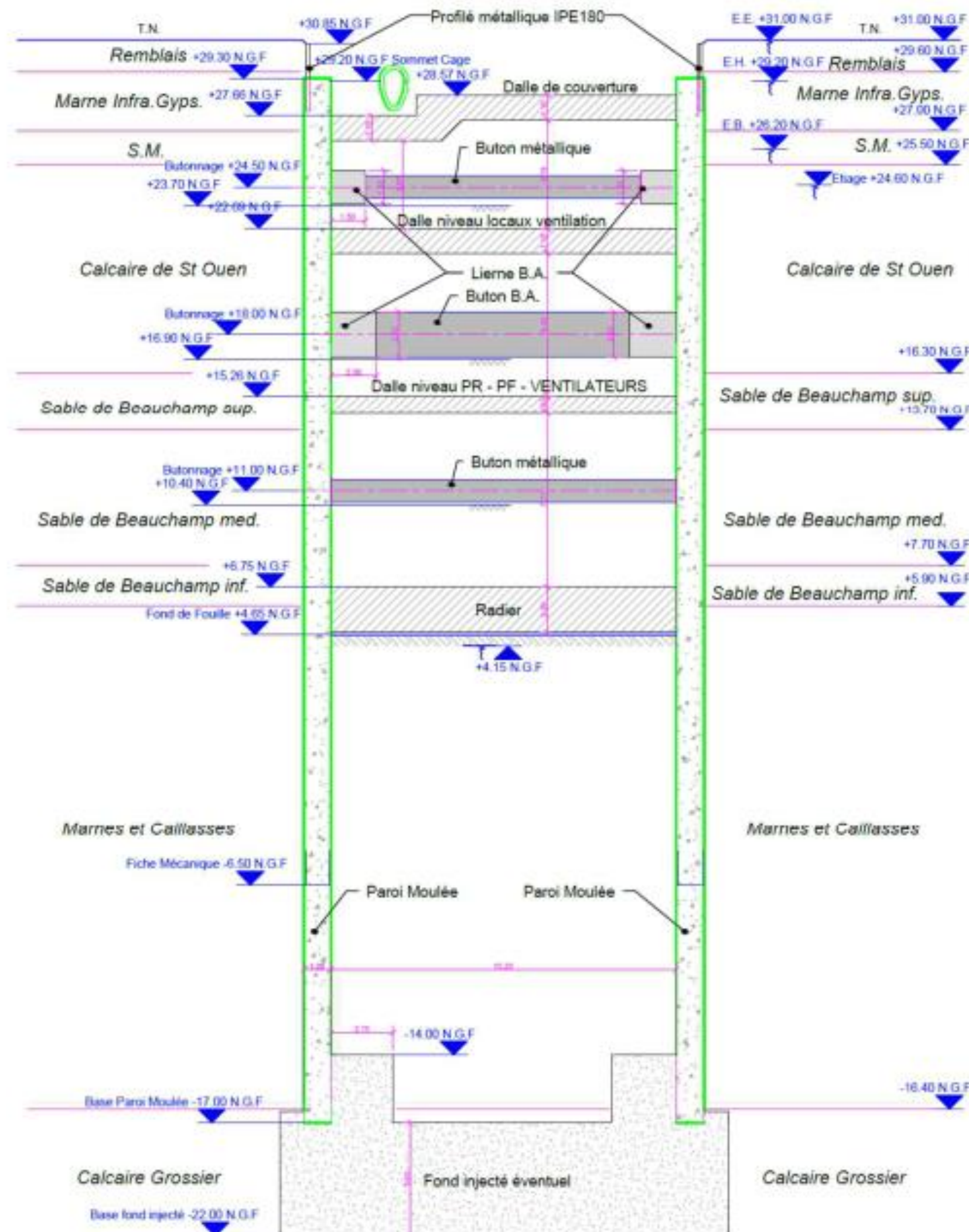
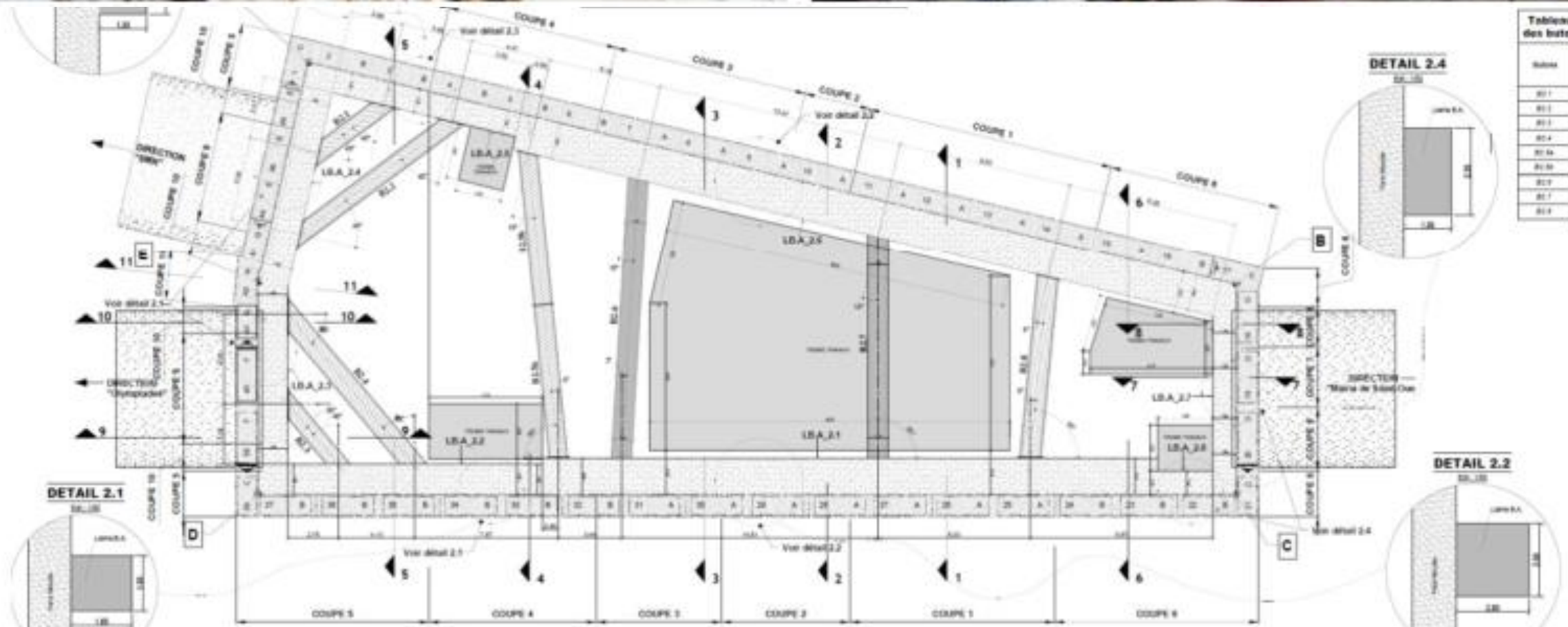


Figure 1 : Coupe représentative de l'ouvrage Glarner



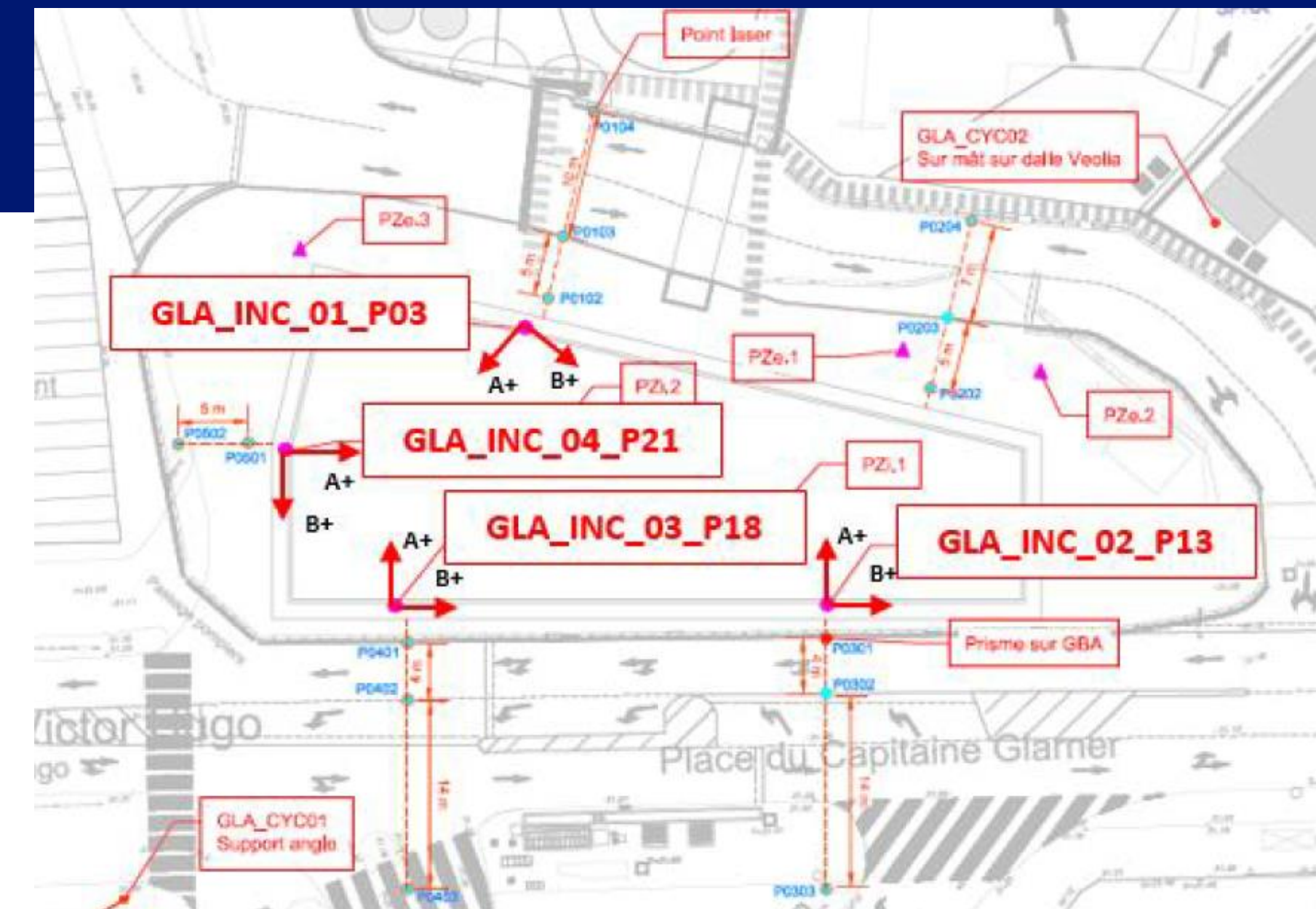
Exemple de l'instrumentation d'un ouvrage - Glarner

Instrumentation de la paroi mise en place :

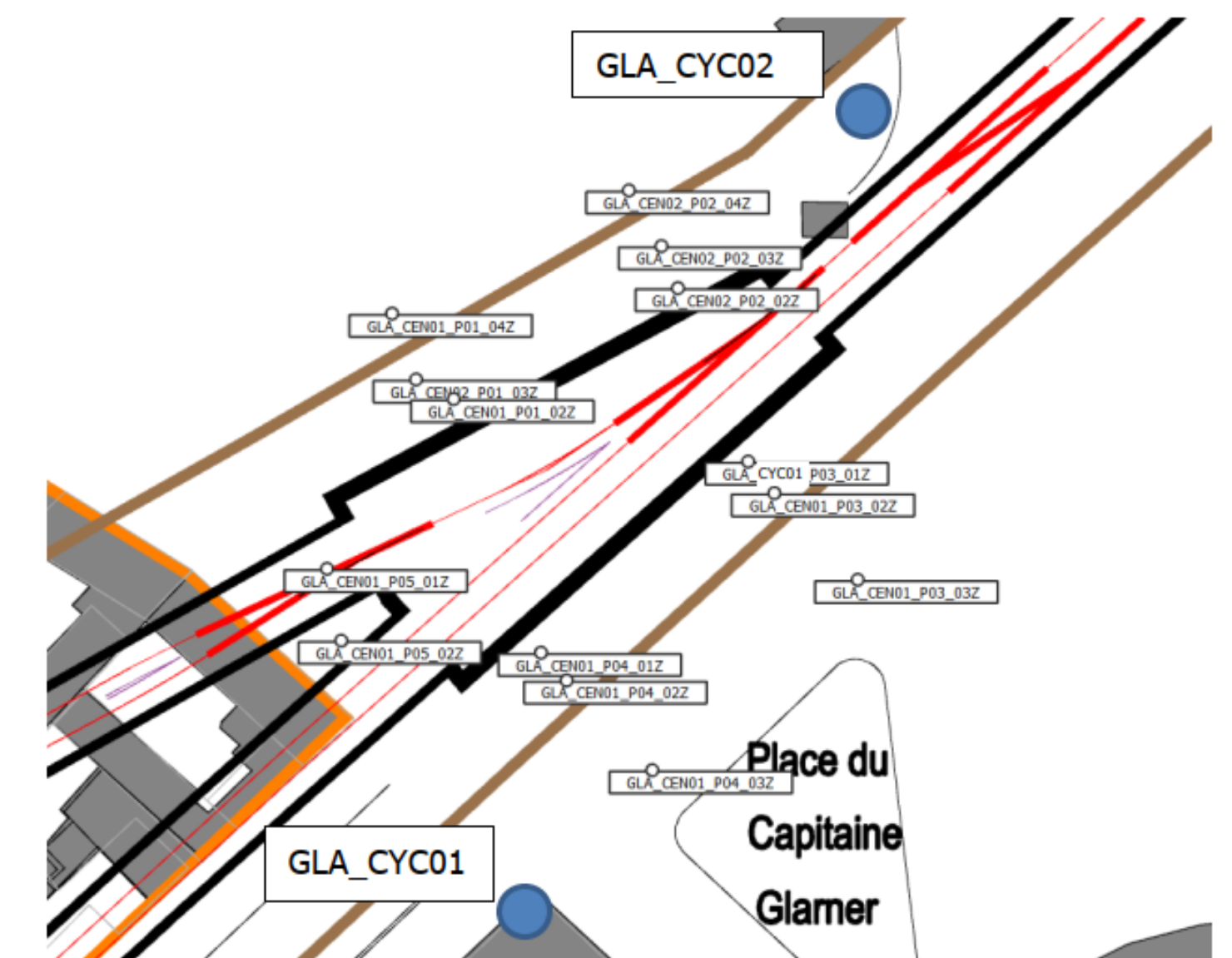
- Mesures de nivellement sur les avoisinants et de la tête de paroi
- Inclinomètres (4 unités)
- Jauges de déformation (bouton métallique)

Instrumentation pour la mise hors d'eau :

- Piézométrie intérieure (FdF + base paroi)
- Piézométrie extérieure (1/ aquifère)
- Débitmètres par puits + compteur vol.



■ Mesures de nivellement automatiques sur voirie et emprise chantier



Représentation des points d'auscultation autour du puits Glarner (Visualisation Geoscope)

Exemple de l'instrumentation d'un ouvrage - Glarner

Enseignement de l'essai de pompage et suivi de la mise hors d'eau

- Le fond injecté prévu au marché n'est finalement pas utile
- Rétro analyse sur l'anisotropie et les perméabilités du calcaire grossier
→ utile aux futurs projets

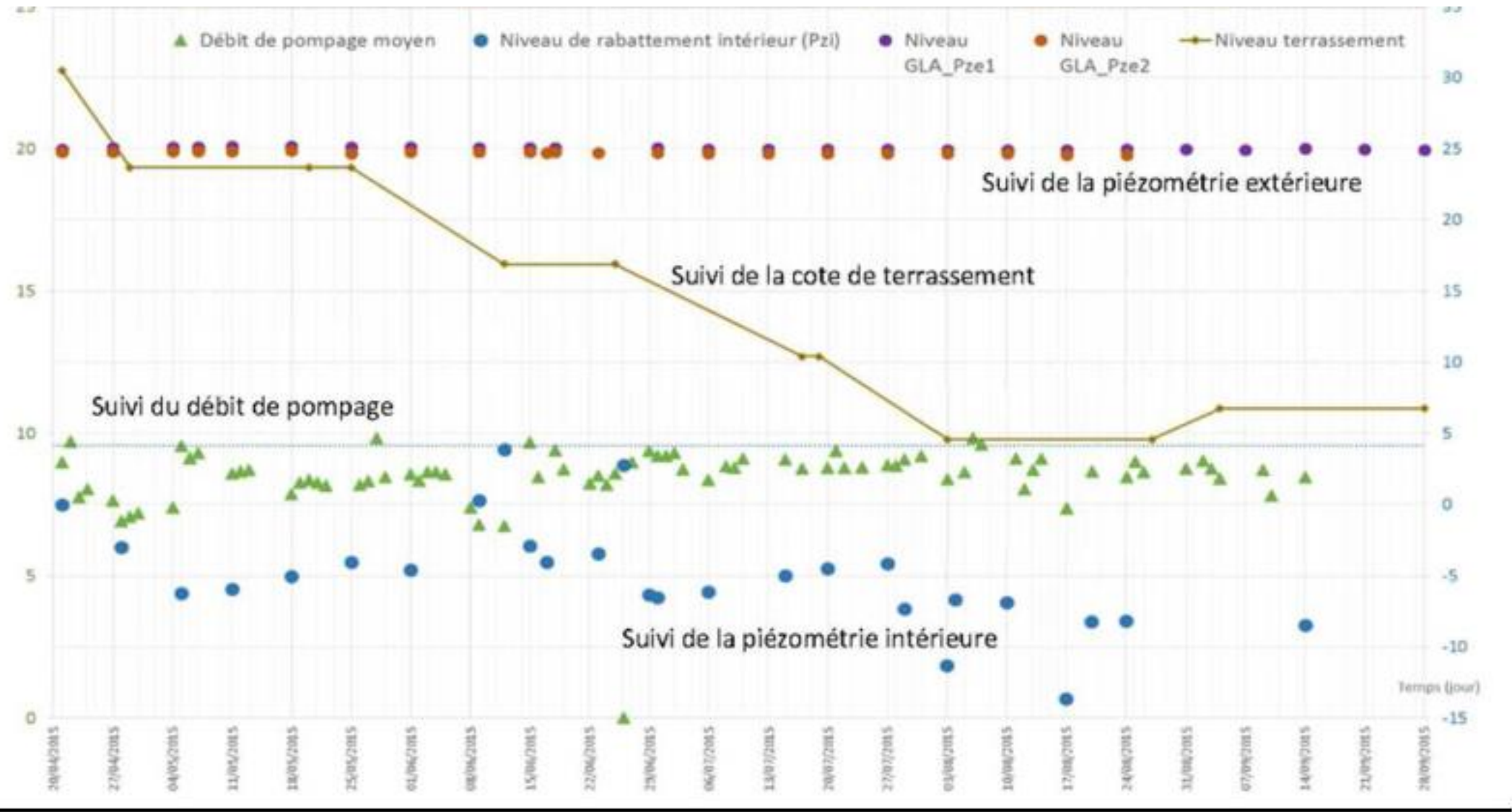
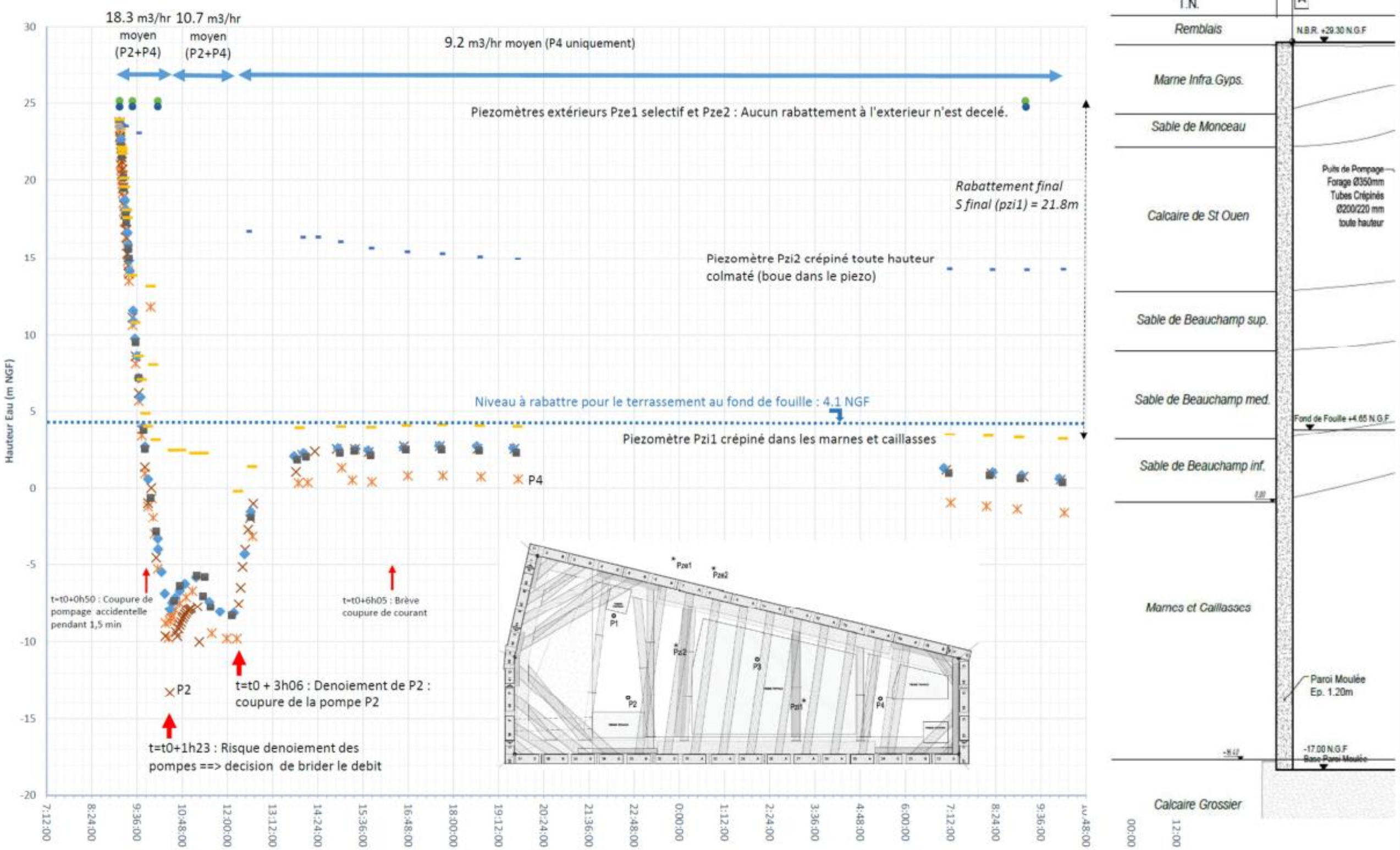


Figure 8 : Suivi de pompage lors des terrassements

Tableau 6 : Perméabilité horizontale du Calcaire Grossier au droit de l'ouvrage

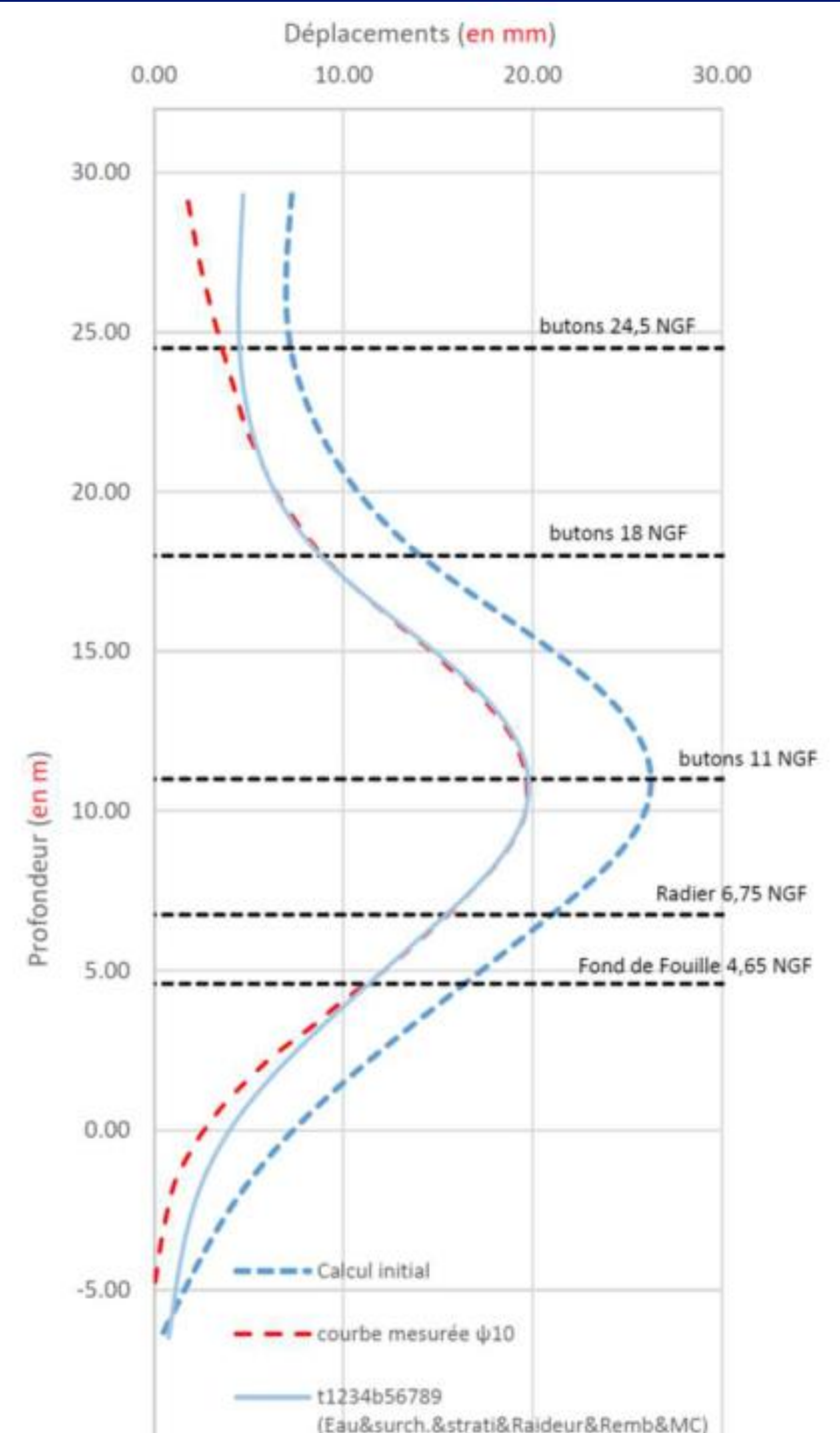
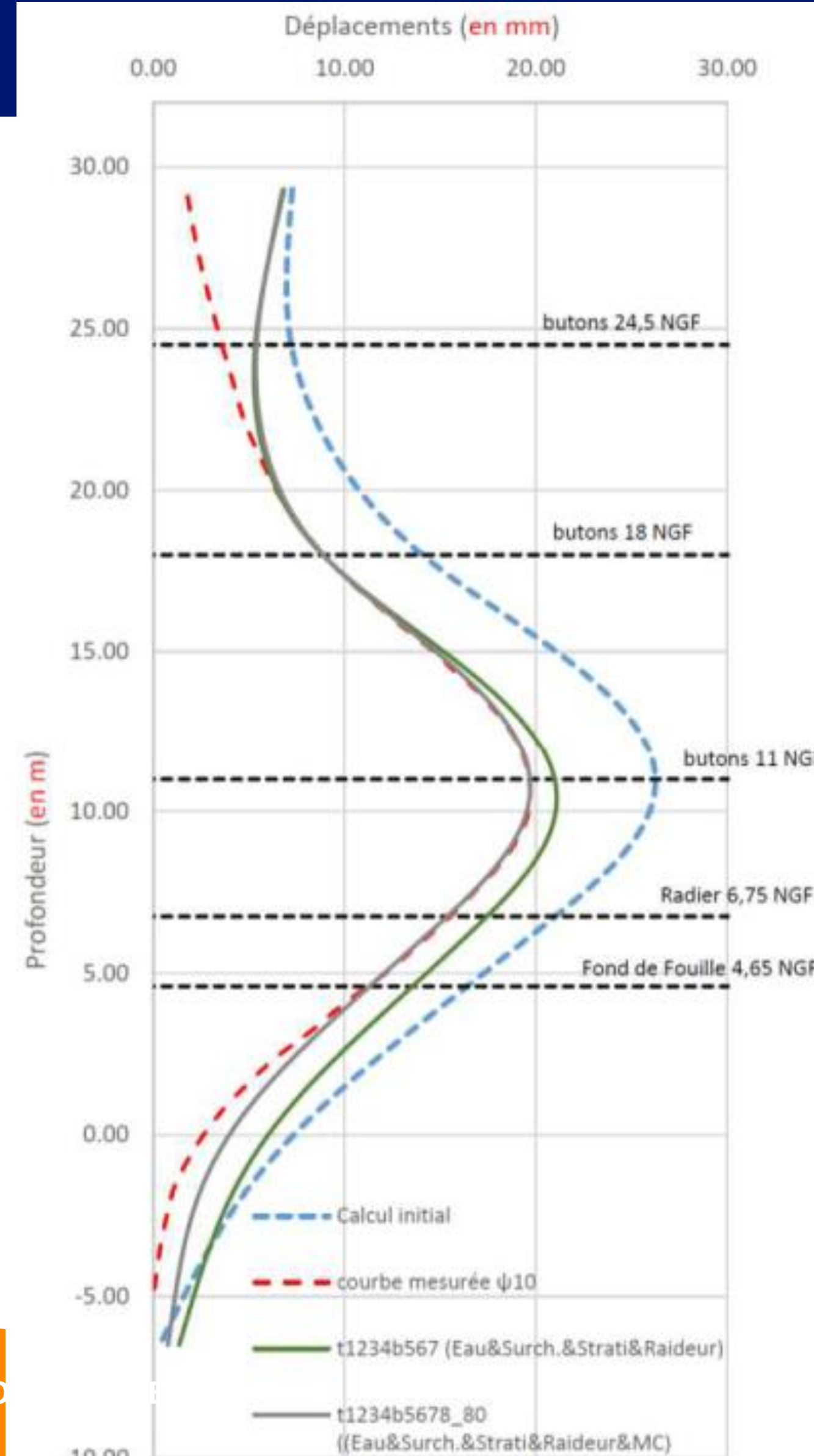
Anisotropie = K_h / K_v	K_h [m/s]
1	7.10^{-7}
10	3.10^{-6}
20	5.10^{-6}



Exemple de l'instrumentation d'un ouvrage - Glarner

Enseignement du suivi des déplacements

- Bon comportement de l'écran lors de l'excavation
- **Rétro-analyse** permettant de confirmer dans ce cas l'adéquation des calculs par un modèle aux coefficients de réaction avec les mesures - Après recalage de :
 - Des pressions interstitielles
 - Des surcharges
 - Des raideurs d'appui aux droits des inclinomètres
- Du module pressiométrique des M&C
- C' & ϕ' remblai



(Barinaga, Fonty, Sear, 2017, AFTES)

Suivi géotechnique & dimensionnement des soutènements

INSTRUMENTATION DES SOUTÈNEMENTS EN PAROI MOULÉE

½ JST DU 11 SEPTEMBRE 2025

Suivi géotechnique et dimensionnement

► Eurocode 7 : « il convient de mesurer le comportement réel des ouvrages pour établir des **banques de données d'expériences comparables** » ; « il convient de vérifier les résultats des calculs par rapport à des expériences comparables » ; « une estimation prudente [...] du déplacement des ouvrages [...] doit toujours être faite à partir d'expérience comparables »

► Rôle important de l'instrumentation dans le développement des méthodes de calcul
Liste non exhaustive : Delattre et Marten (2005), Ballay, Masrouri (1991), Kastner (2018), Emeriault, Monnet (1994), Simon (1995), Schmitt (1995, 1998, 2009), ... et plus récemment thèses (SGP) Nejjar (2019), Daktera (2020) etc...

Par exemple pour le modèle aux coefficients de réaction :

- Mise en exergue de la pertinence, dans le cas courant, du modèle simple MISS-K,
- **Calage des données d'entrée** - coefficients de réaction
- **Précision sur les domaines d'applications de la méthode et limitations** (temporelles, stabilité d'ensemble en jeu, effets voute...)

Suivi géotechnique et dimensionnement

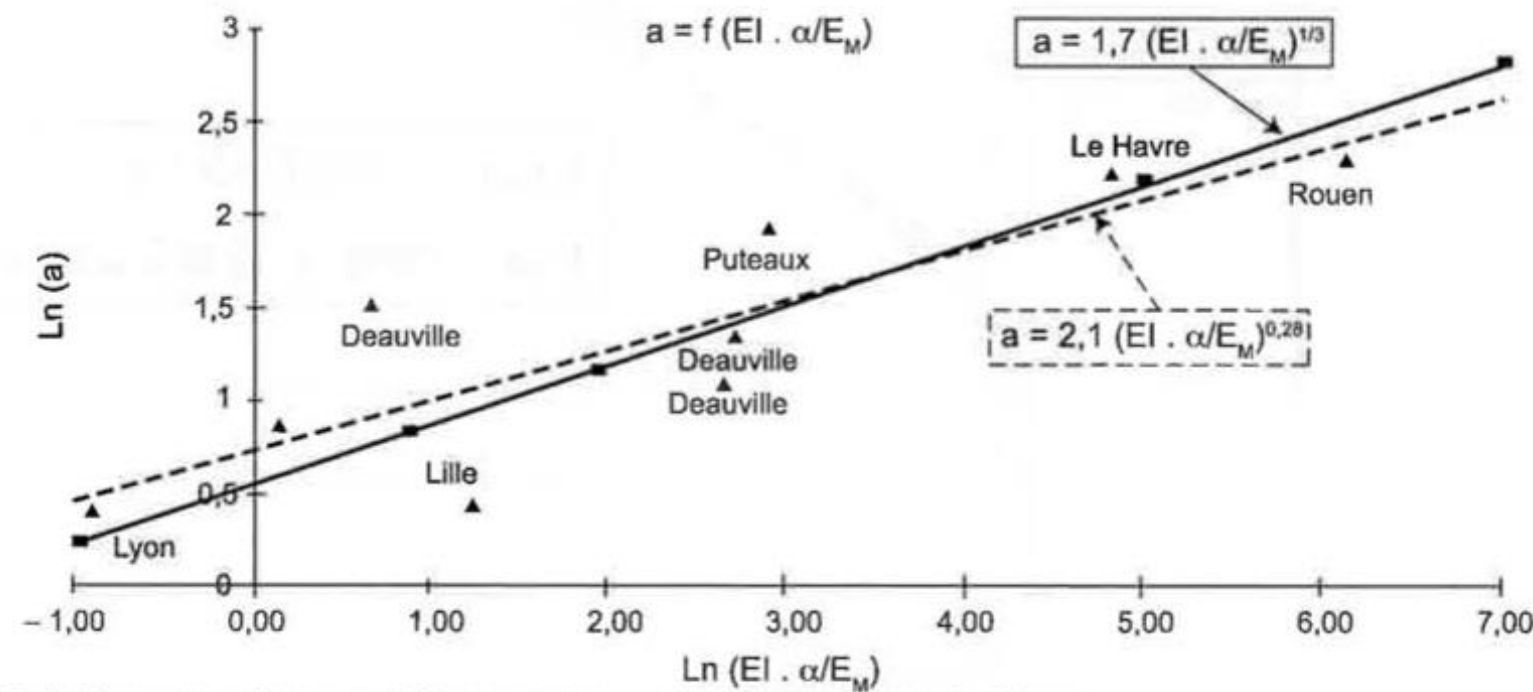


FIG. 4 Relation entre hauteur d'interaction et inertie relative de l'écran.
Interaction height versus relative wall inertia.

De l'importance du suivi
pour maîtriser
le dimensionnement
des ouvrages géotechniques¹

P. SCHMITT

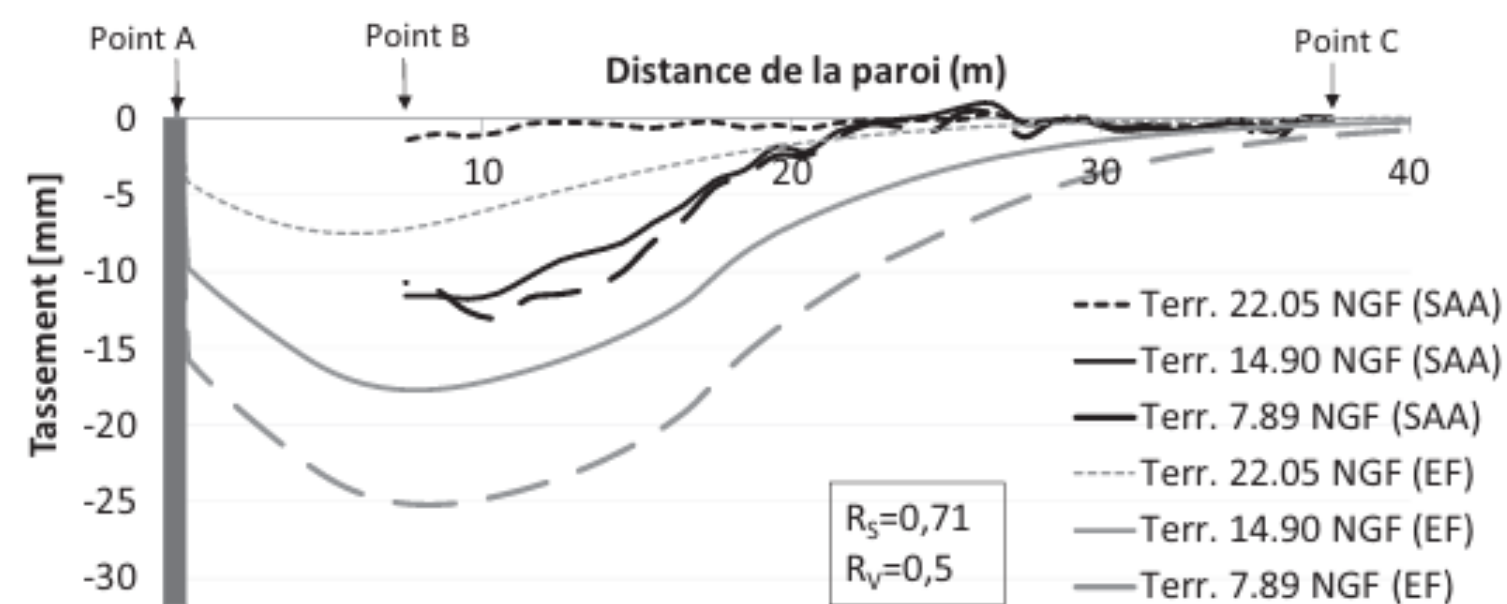


Fig. 10. Comparison between calculated (SAA) and measured (EF) settlements, after Daktera et al. (2020).

Fig. 10. Comparaison entre cuvettes de tassements mesurées (SAA) et calculés (EF), d'après Daktera et al. (2020).

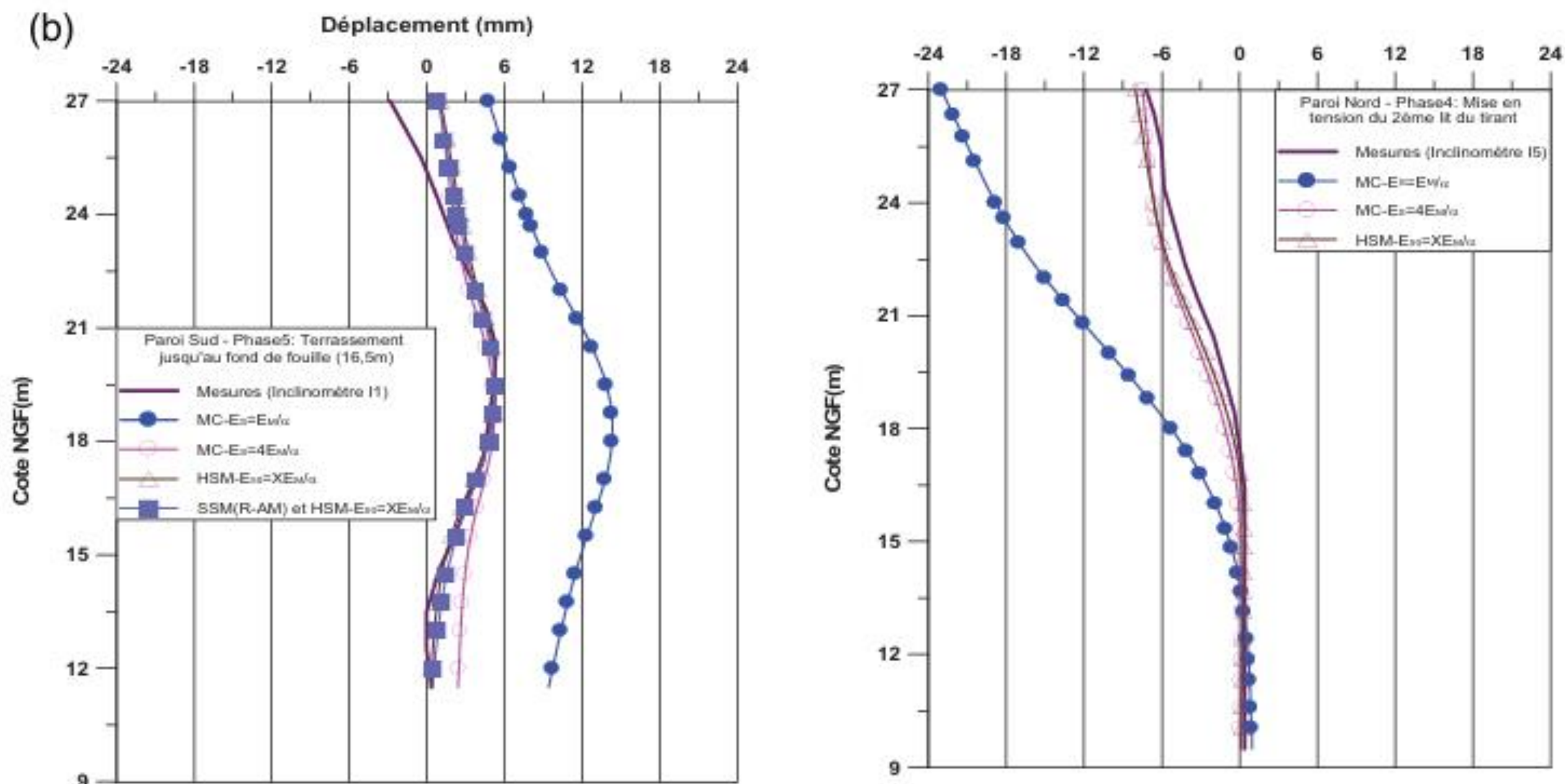
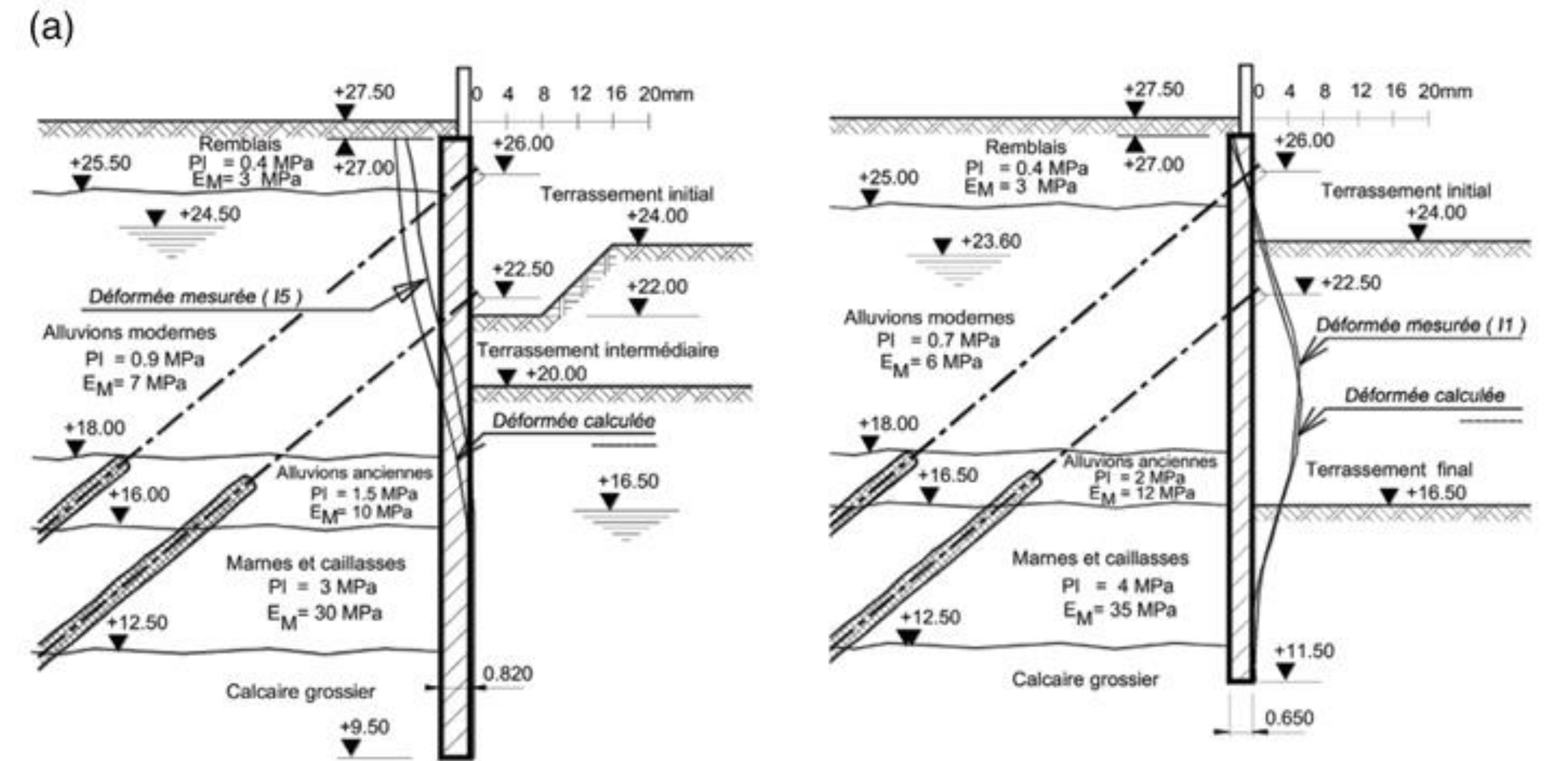


Fig. 11. Comparison between measured and calculated deflections using subgrade reaction (a) and numerical models (b), after Plumelle et al. (2005).

Suivi géotechnique & réalisation des excavations

INSTRUMENTATION DES SOUTÈNEMENTS EN PAROI MOULÉE

½ JST DU 11 SEPTEMBRE 2025

Suivi géotechnique au cours des travaux d'excavations

- Vérifier l'adéquation entre les hypothèses de calculs et les observations de terrain

EC7-1
Norme NF P 94-500

- Analyser l'écart entre le comportement observé et celui estimé (EC7-1 : « validité des prévisions »)

- « Etablir des banques de données d'expériences comparables » (EC7-1)

- Suivi visuel, géologique, suivi des déplacements (topo/inclino) et efforts (jauges, cale dynamo pour tirant)

- Suivi mise hors d'eau : Au cours des travaux d'excavation le suivi rabattement / débit est essentiel pour la détection d'instabilités hydrauliques

4.5 Instrumentation et suivi (surveillance de l'ouvrage)

(1)P L'instrumentation et le suivi doivent être mis en œuvre pour :

- vérifier la validité des prévisions de comportement effectuées au cours de l'élaboration du projet ;
- assurer que l'ouvrage continuera de fonctionner après sa réalisation conformément aux exigences fixées.

(2)P Le programme du suivi doit être effectué conformément au rapport de dimensionnement géotechnique (voir 2.8(3)).

(3) Il convient d'enregistrer le comportement réel des ouvrages pour établir des banques de données d'expériences comparables.



Suivi géotechnique au cours des travaux d'excavations

Exemple du chantier de Toulouse :

Mesure piezo, inclinomètres, topo, laser mètres et mesure des efforts dans les butons, mis en // du phasage et des valeurs de calculs

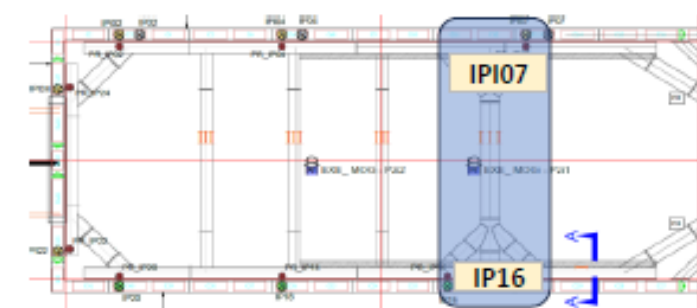
Importance d'un tableau de bord, mettant en évidence les évolutions et comportements

Importance d'une information redondante – mesure laser, topo, inclino etc...

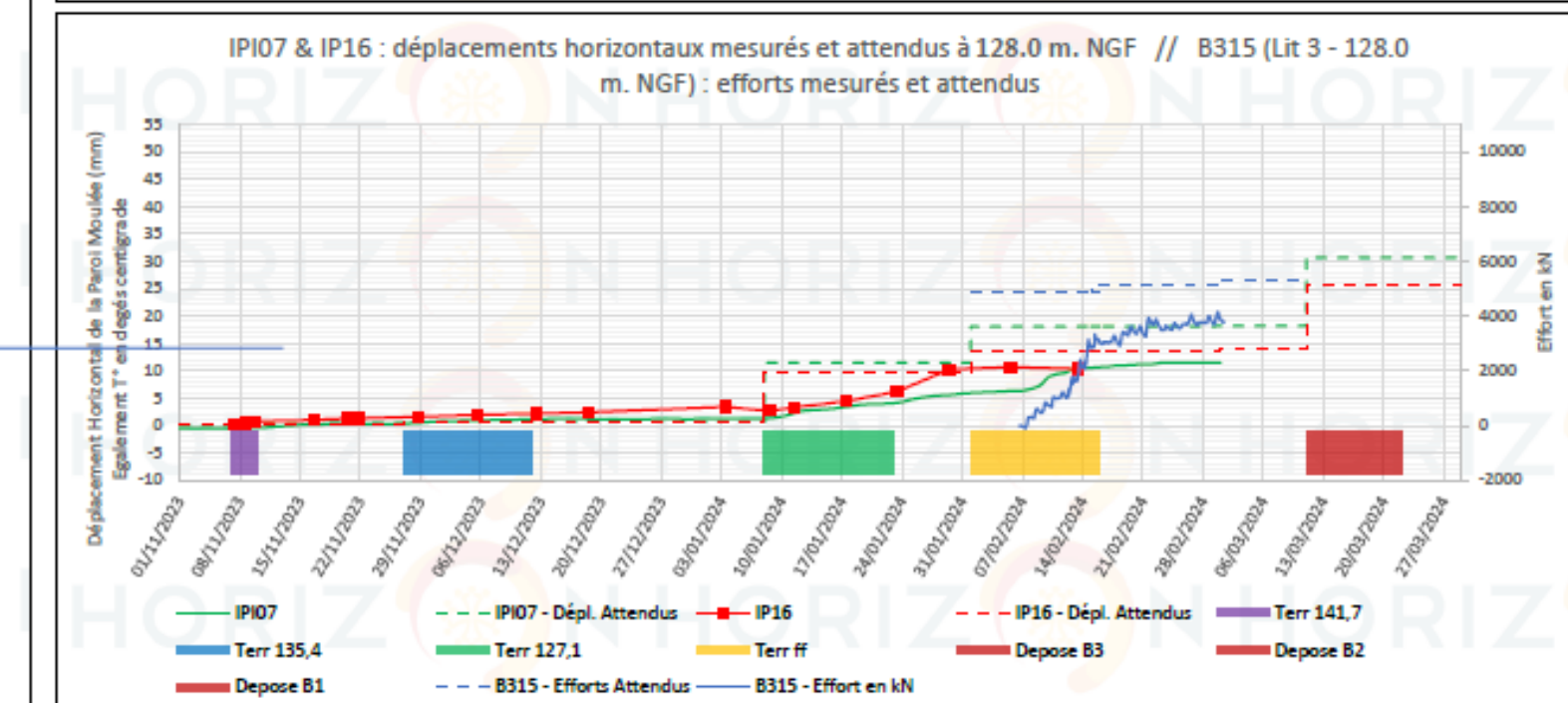
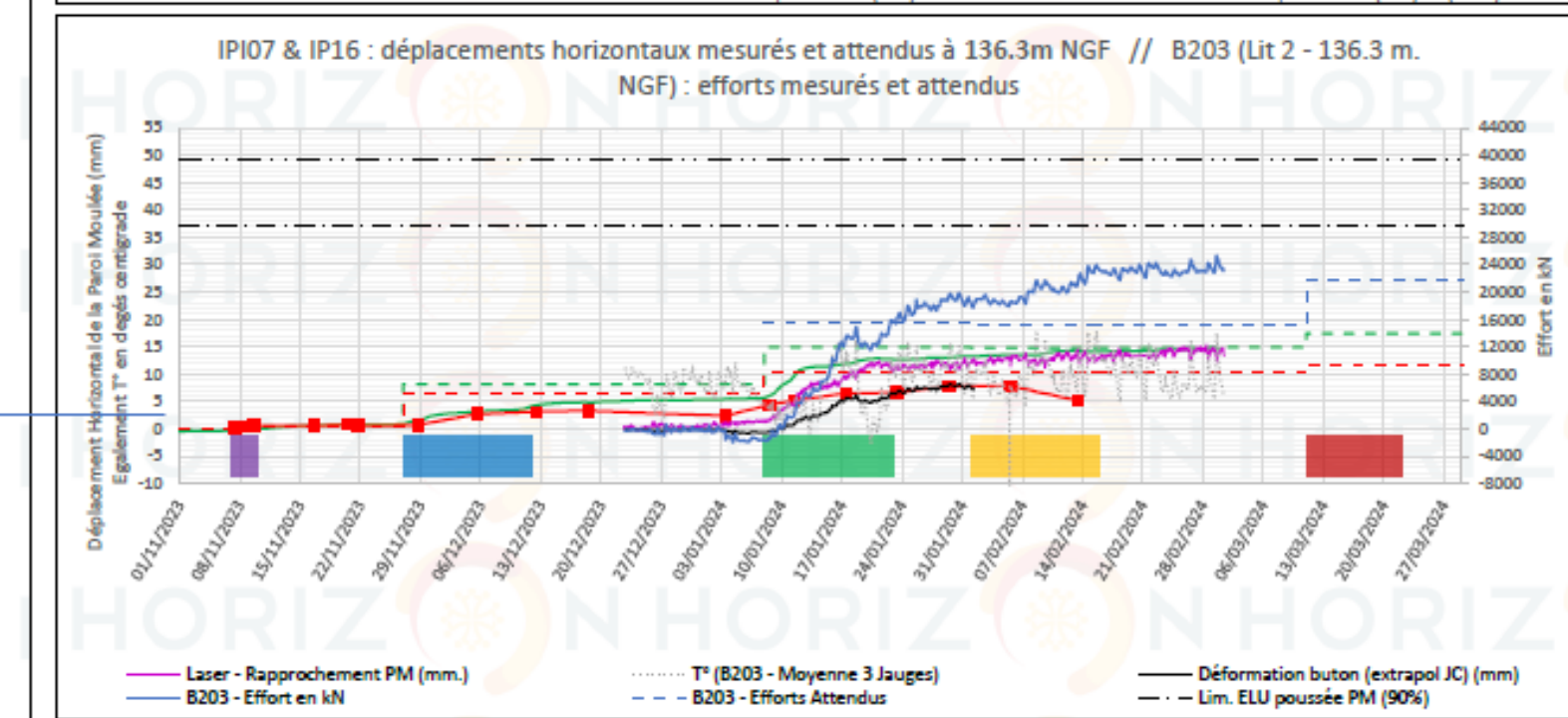
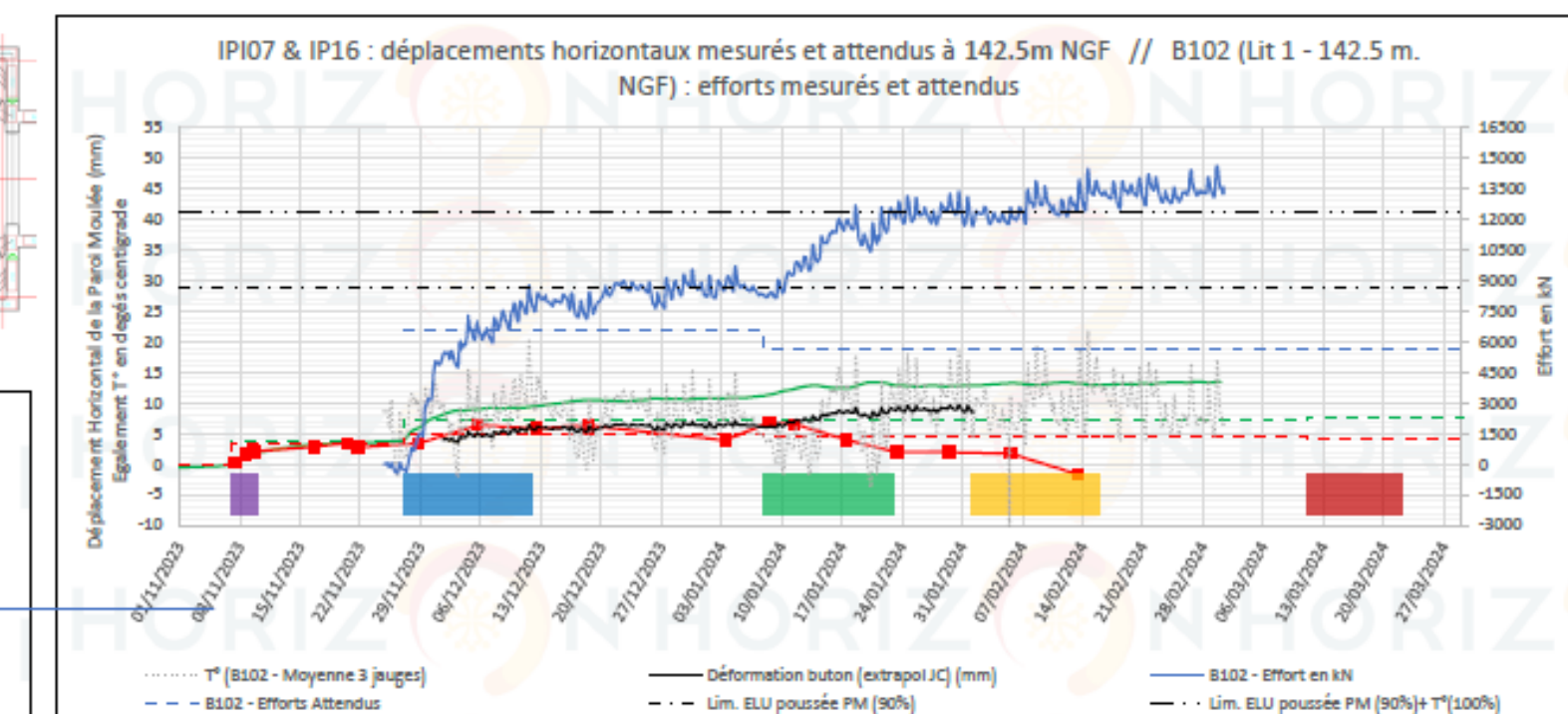
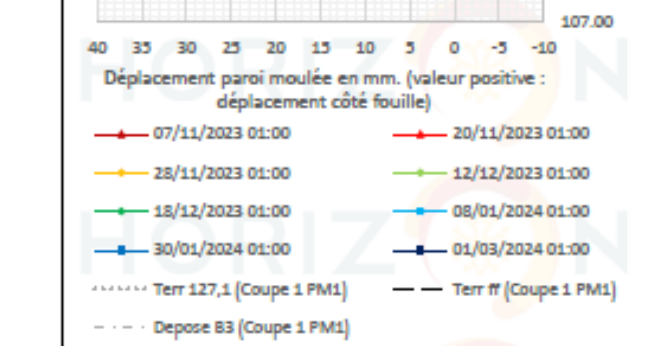
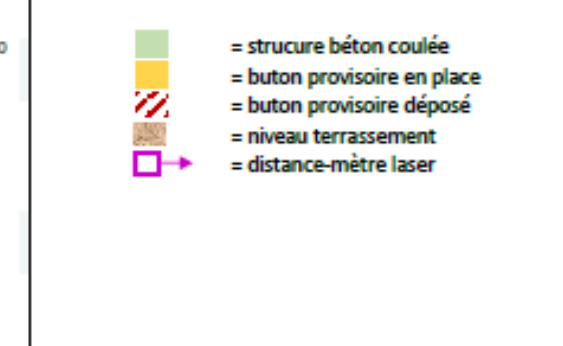
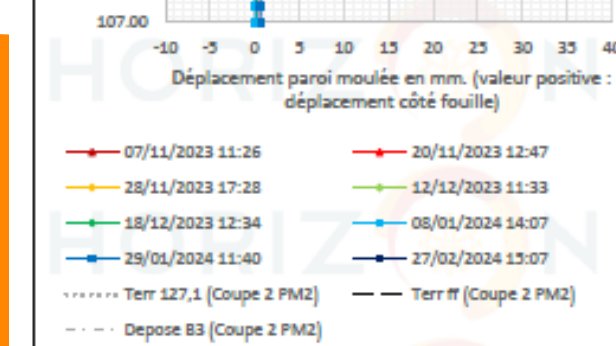
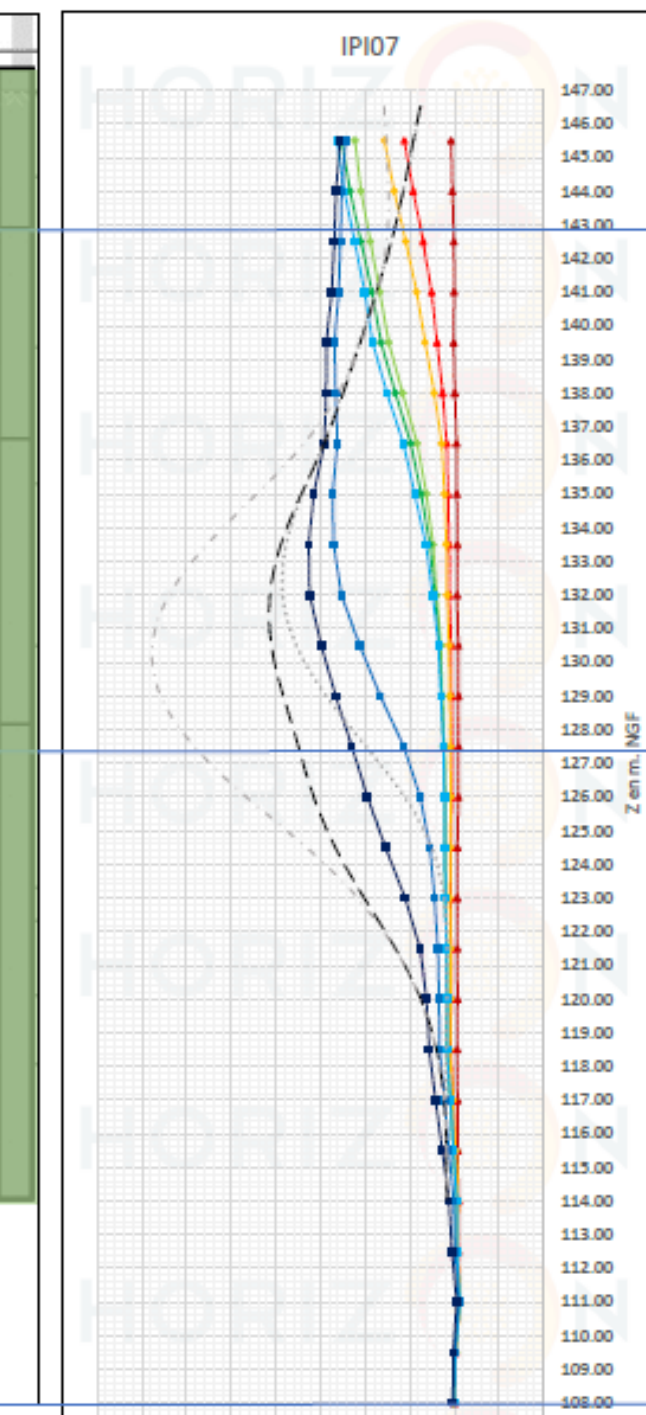
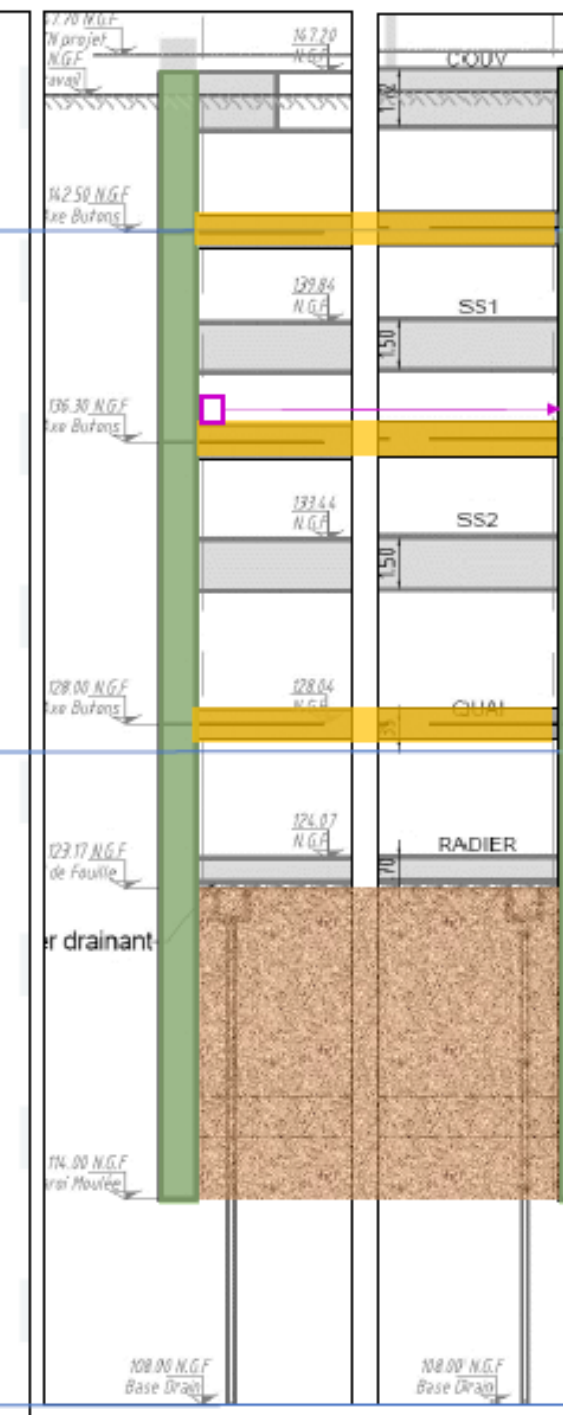
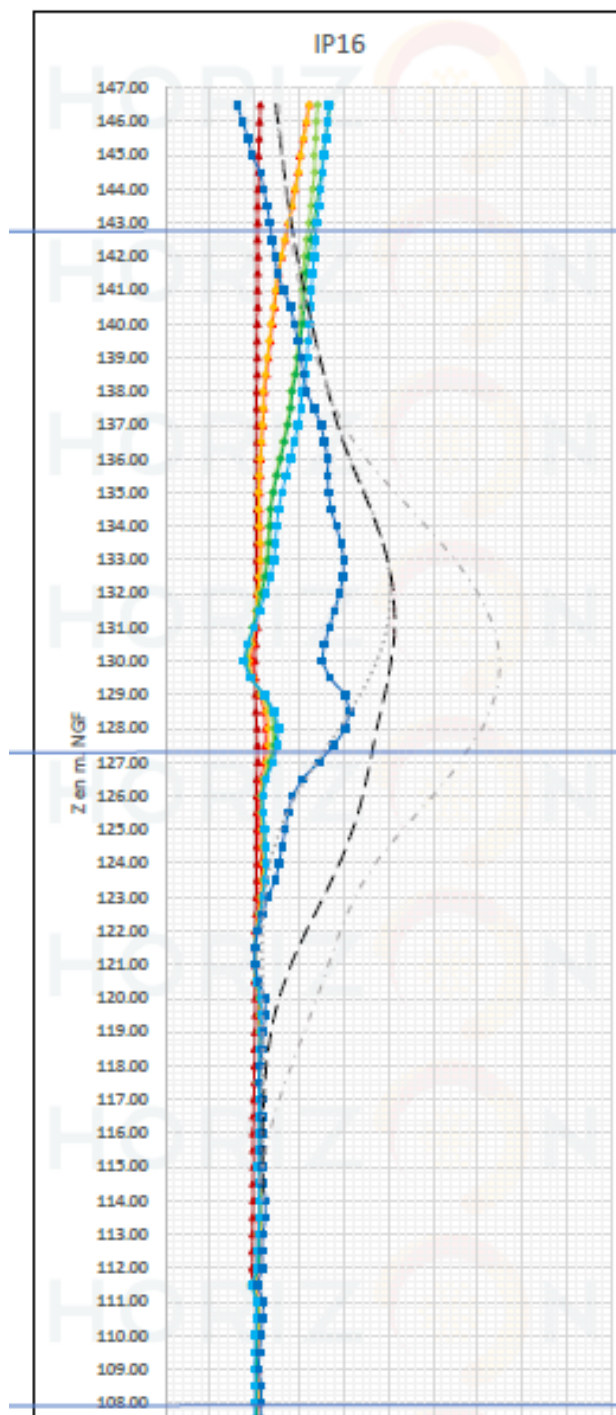
Une fois fiabilisée, la mesure constitue un outil précieux d'aide à la décision



TAE - LIGNE C - METRO DE TOULOUSE
Marché M3 2022 15018 M
Lot N°4 - Travaux de Génie Civil des tunnels, stations et ouvrages annexes entre l'ouvrage annexe Saint Sauveur et Montaudran



Montaudran Gare
Auscultation et Pilotage - Rapport de suivi au 01/03/2024 10h00

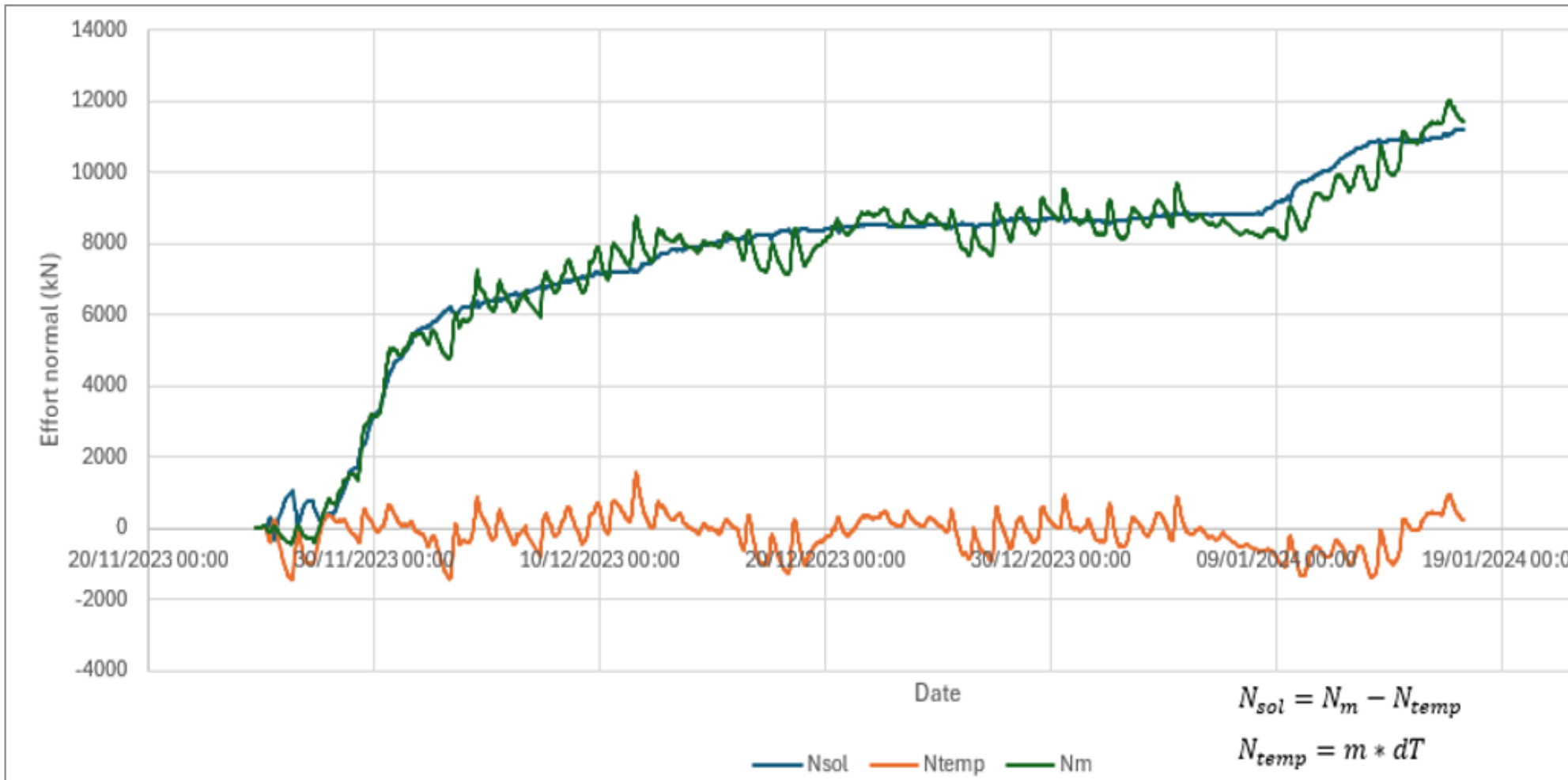
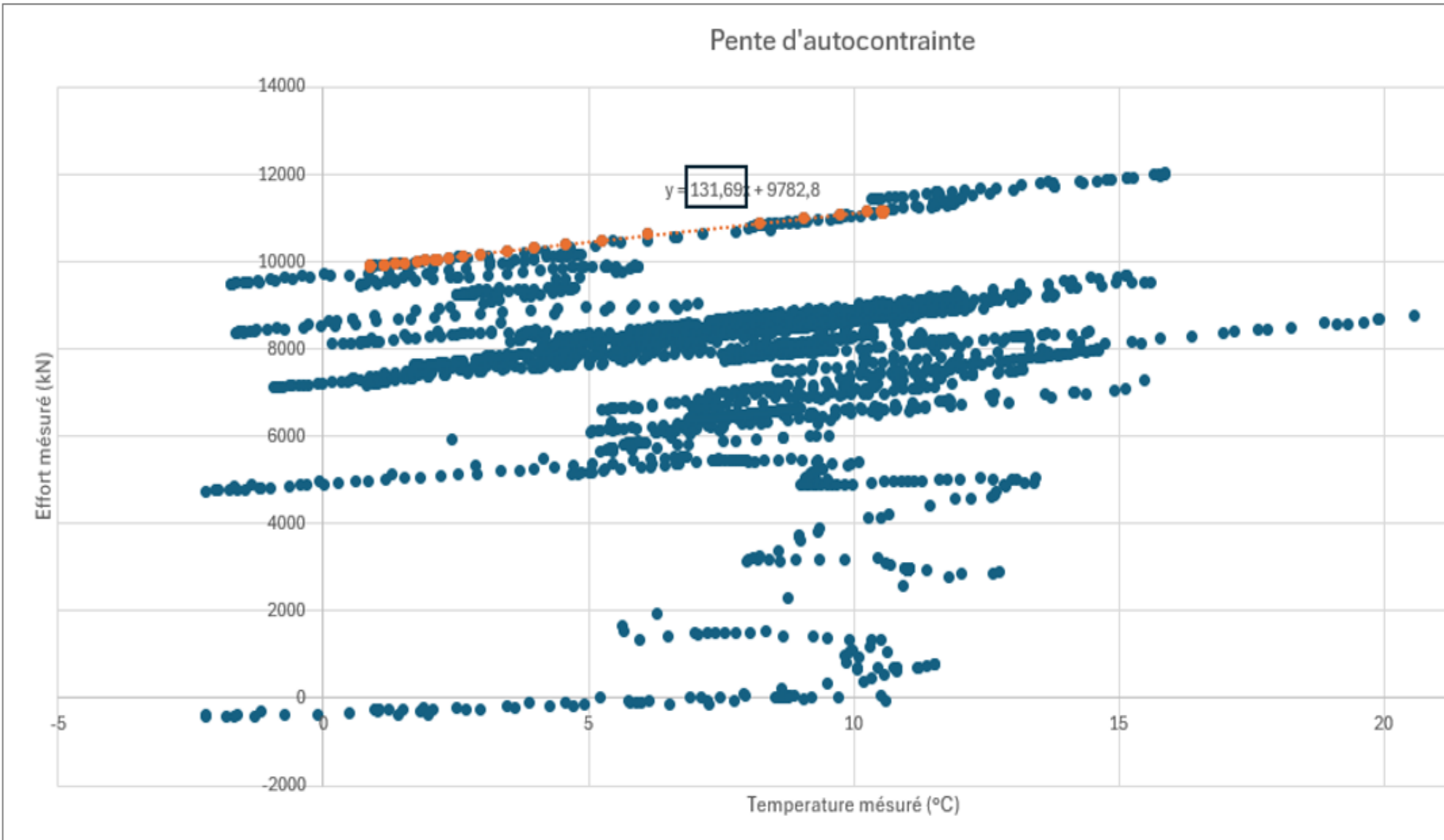
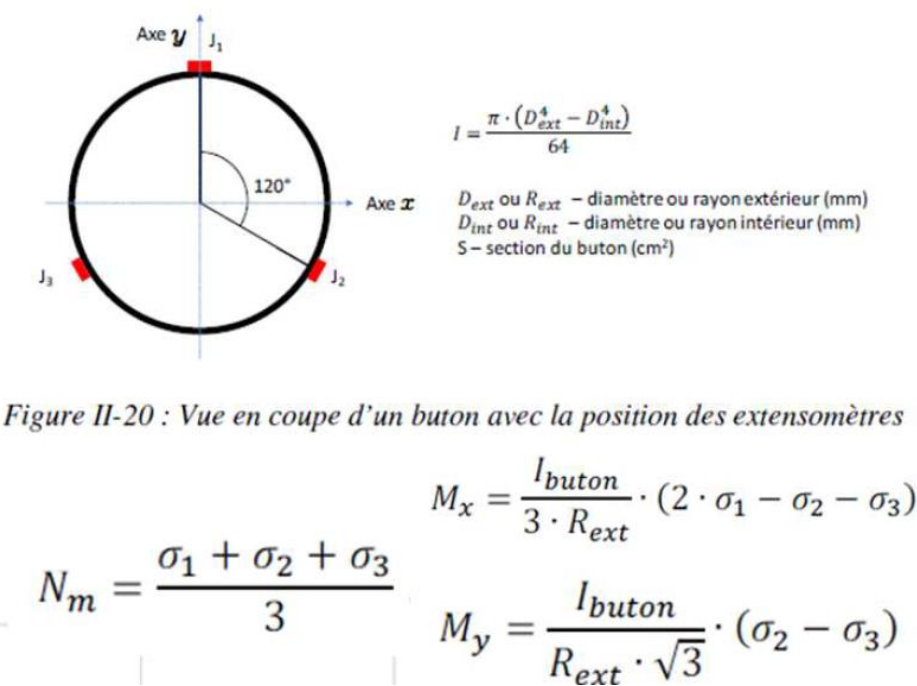


Suivi géotechnique au cours des travaux d'excavations

Exemple sur Toulouse - Analyse

Que disent les données sur les jauges de déformation posées sur les boutons ? Et sont-elles fiables?

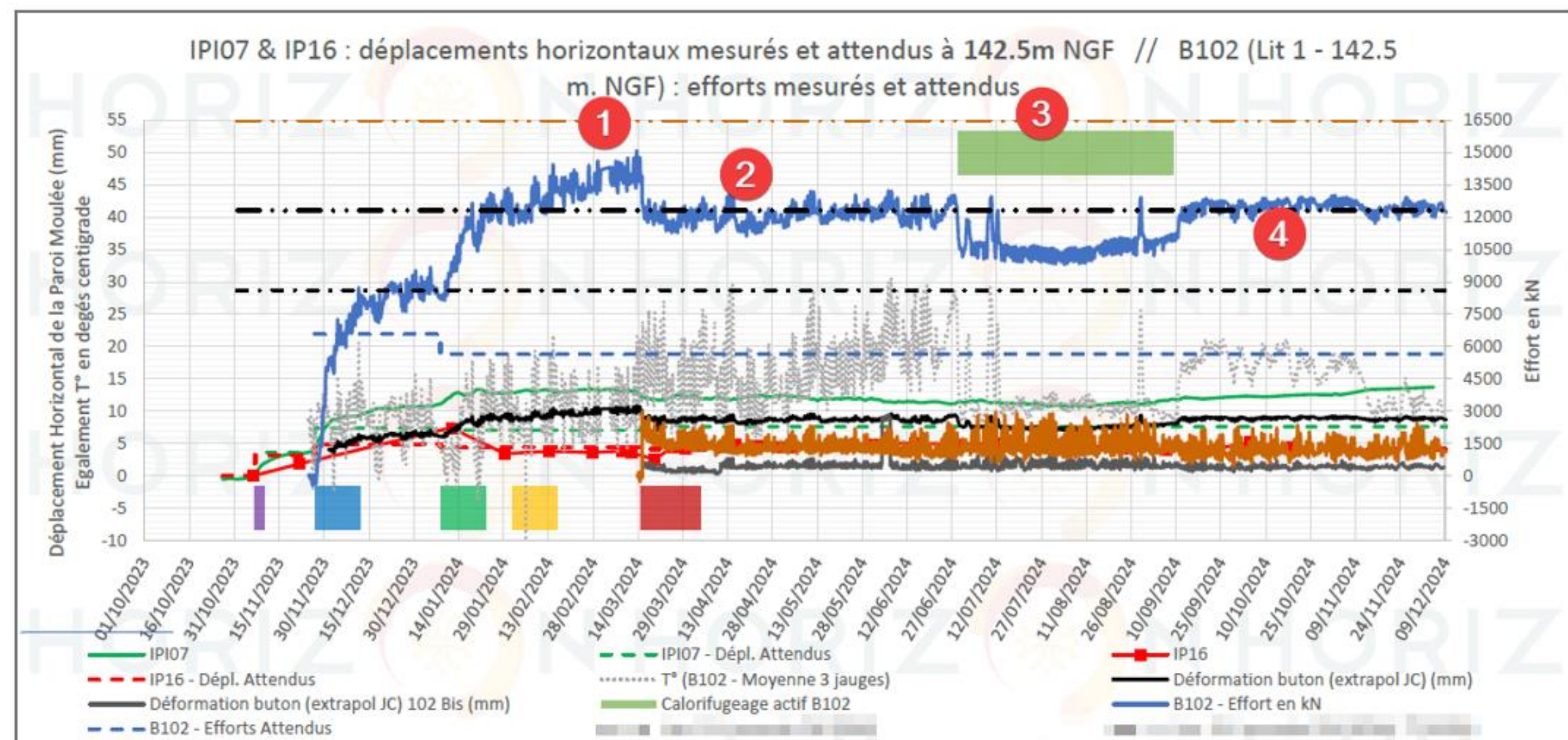
- Analyse des mesures brutes de microdéformations et déduction de l'effort dans le bouton
- Détermination d'un coefficient d'autocontrainte pour distinguer l'effet du soutènement de celui de la température (Daktera 2020)
- Confirmation de l'ordre de grandeur par une instrumentation redondante : Analyse des convergences parois (inclinomètres / laser-mètres)



Suivi géotechnique au cours des travaux d'excavations

Exemple sur Toulouse - Actions :

1. Détection de l'effort
2. Mise en œuvre de boutons additionnels précontraints
3. Calorifugeage avec refroidissement actif
4. Arrêt du refroidissement



T. Jussaume AFTES 2025

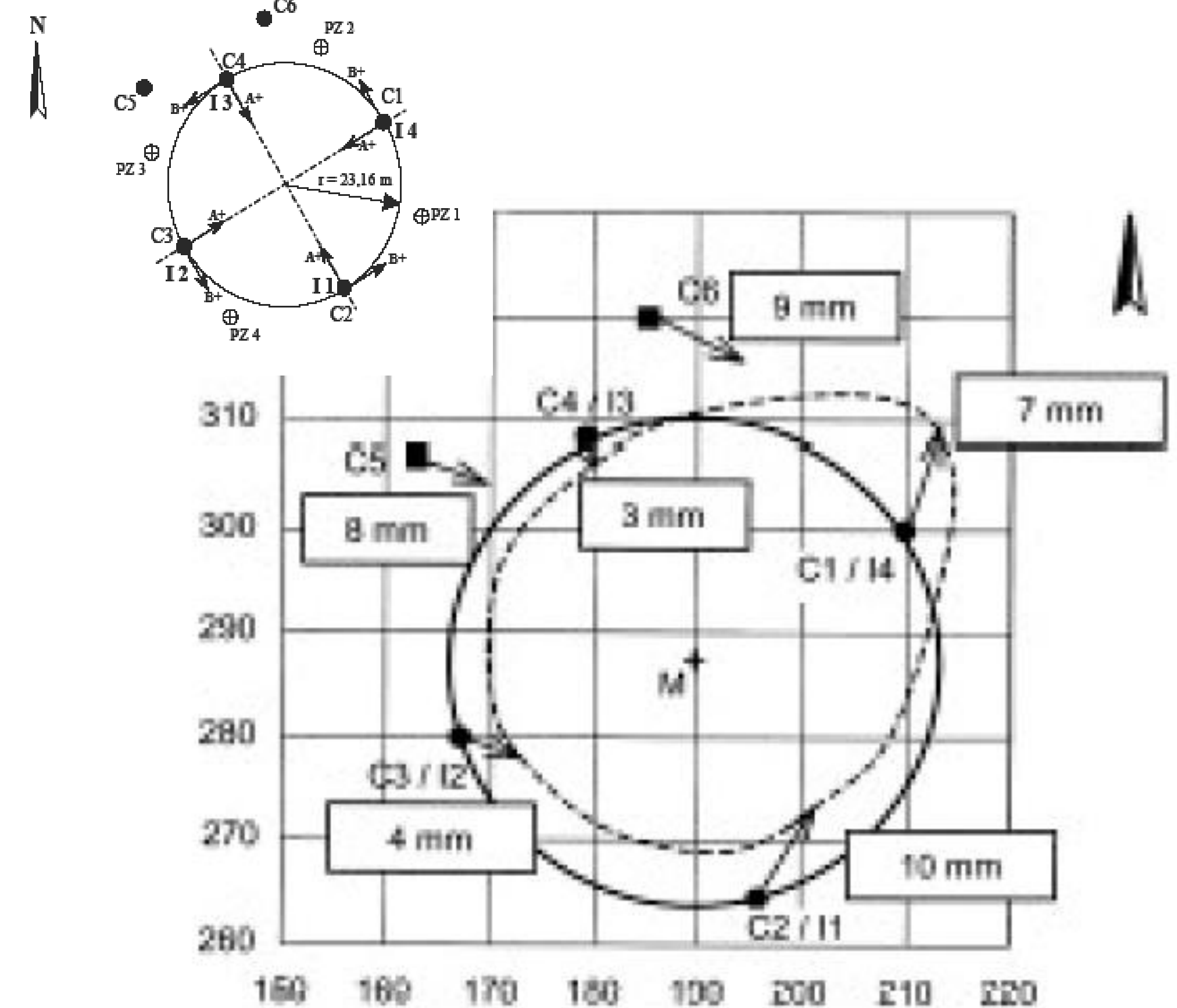
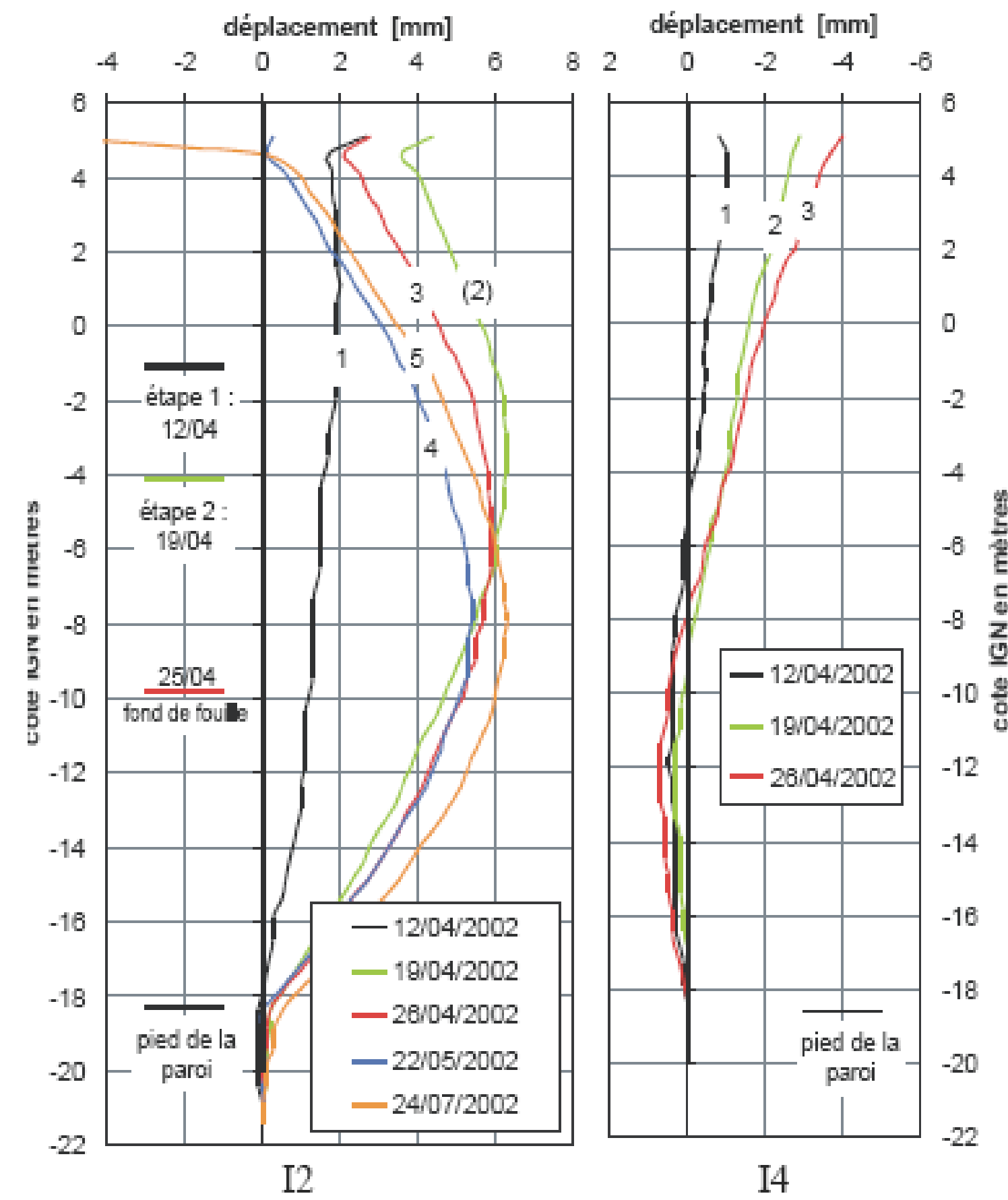
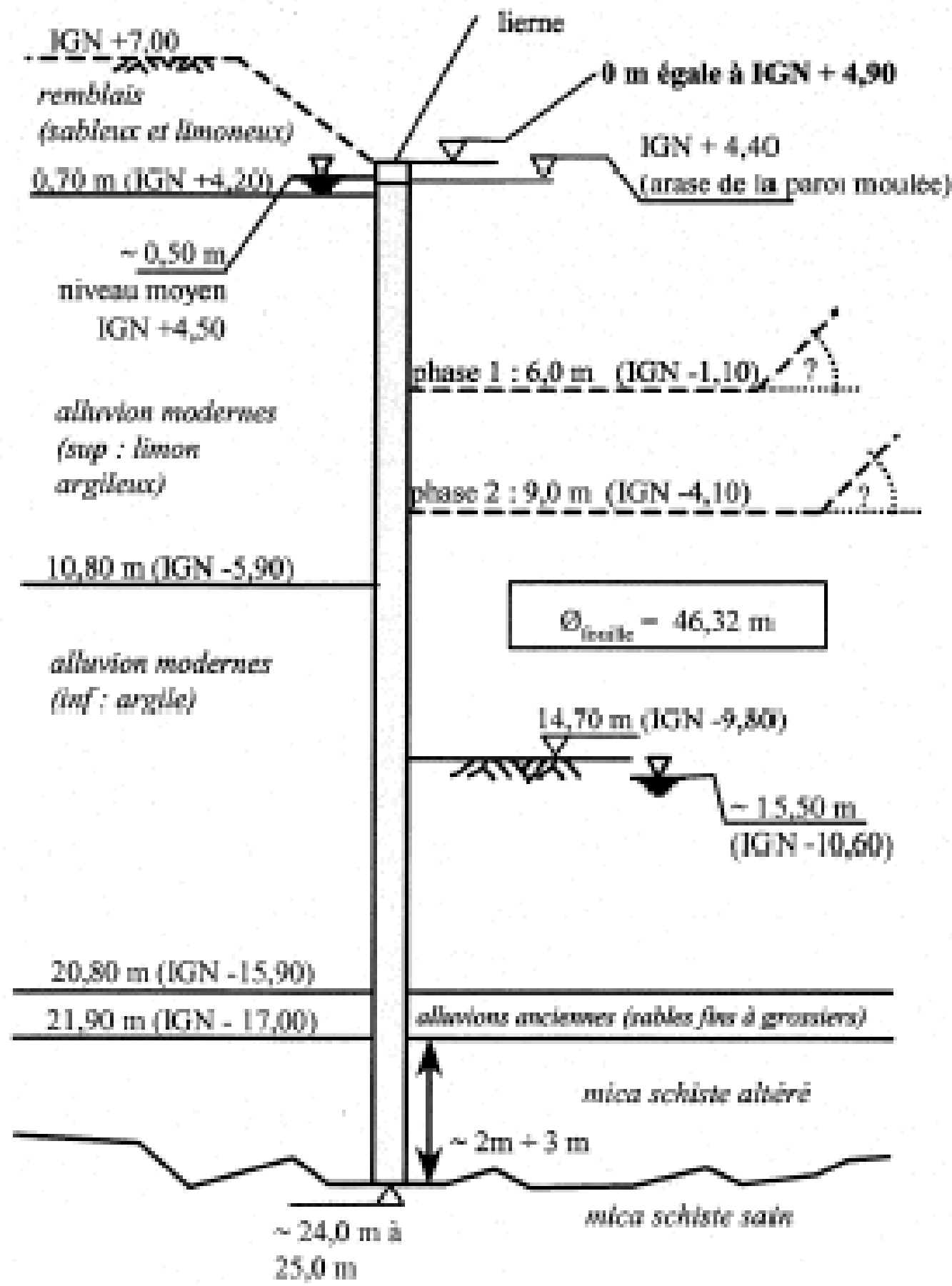


Suivi géotechnique au cours des travaux d'excavations



Exemple Nantes :

- Schmitt P. , Schlosser F. The observational method : From geotechnical monitoring to interactive design

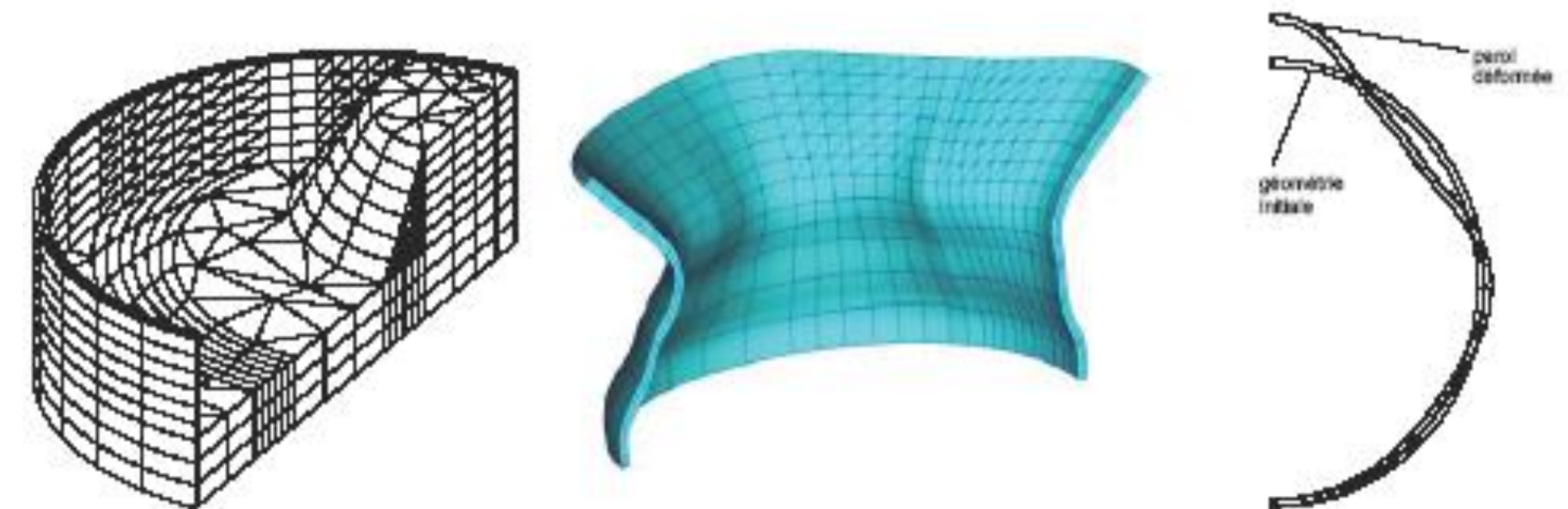


Suivi géotechnique au cours des travaux d'excavations

Exemple Nantes :

- Schmitt P. , Schlosser F. The observational method : From geotechnical monitoring to interactive design

Ovalisation d'un ouvrage circulaire
Dissymétrie de chargement



Suivi géotechnique & optimisations des ouvrages

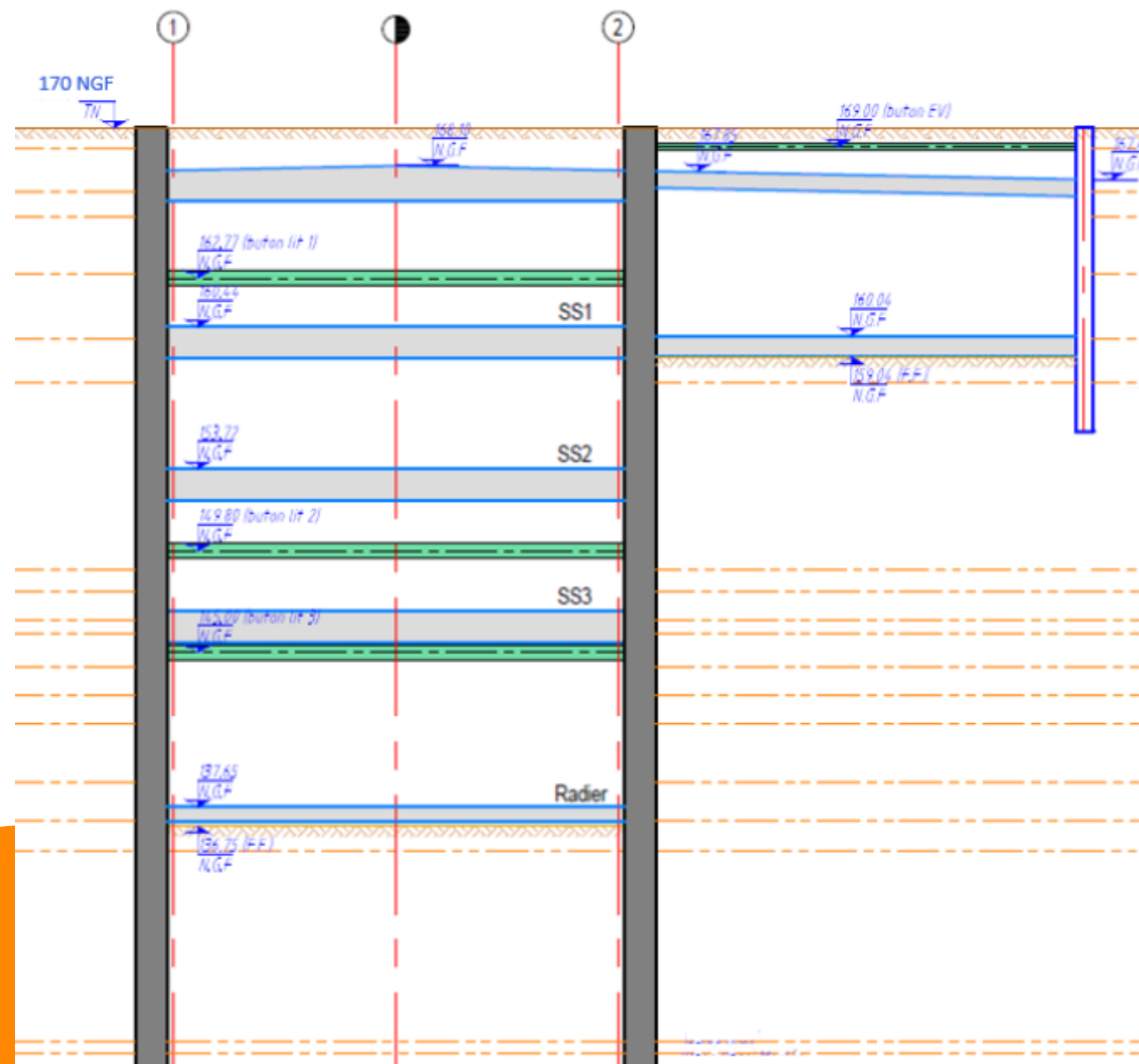
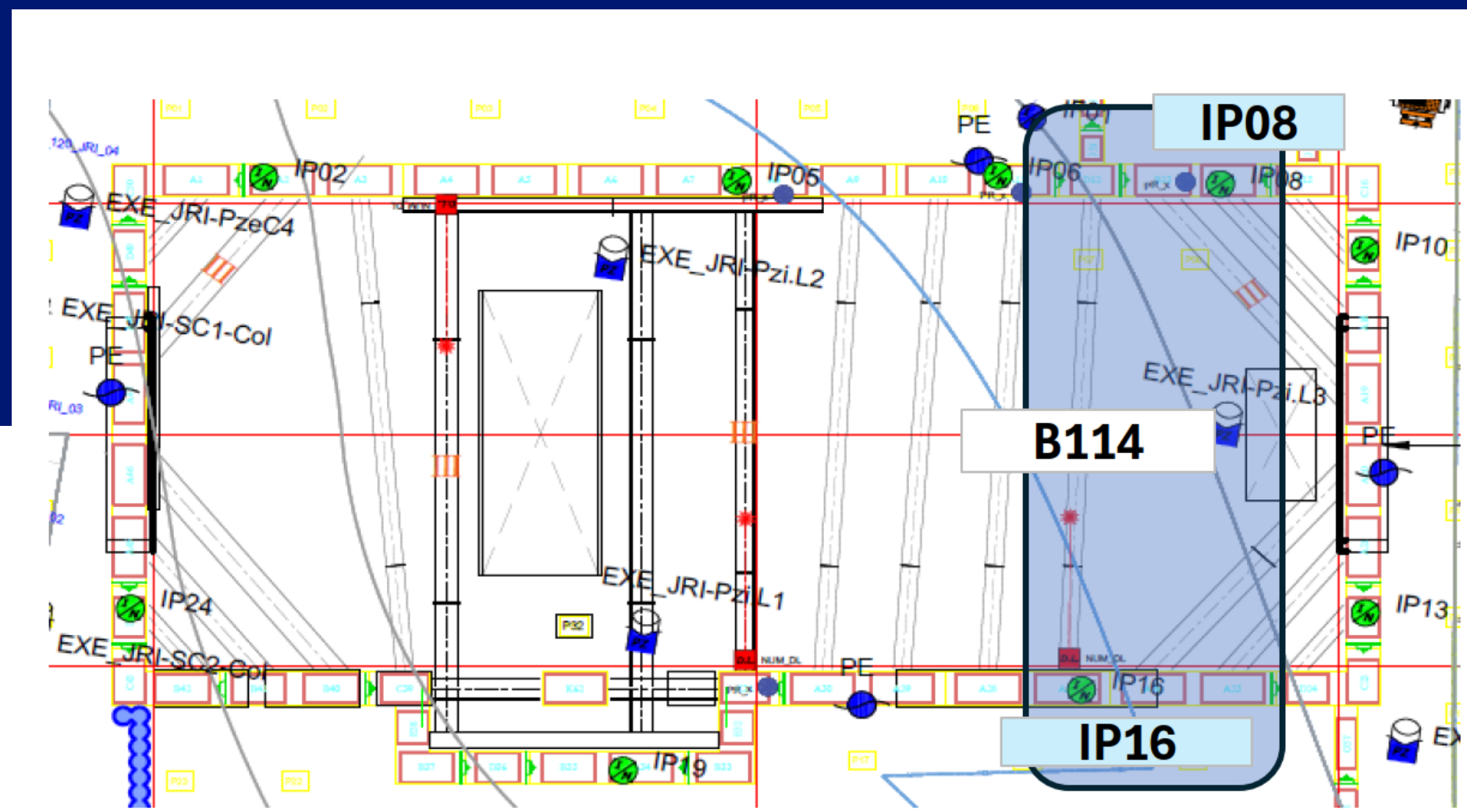
INSTRUMENTATION DES SOUTÈNEMENTS EN PAROI MOULÉE

½ JST DU 11 SEPTEMBRE 2025

Optimisation des ouvrages

➤ Exemple Toulouse JRI – Adaptation du dernier lit d'appui (modif. altimétrie + suppression de deux boutons) sur la base de :

- Comportement des ouvrages précédents
- Influence forte molasse sableuse / fine
- Investigation lithologique sup. (nature molasse)
- Vérification calculatoires complémentaires
- Ouvrage bien instrumenté et bon comportement



Optimisation des ouvrages

Application de la méthode observationnelle

- Allagnat D. 2005, « La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages » Guide technique, Presses de l'ENPC.
- **En matière de mise hors d'eau**, l'instrumentation mise en œuvre et l'essai de pompage permettent d'activer d'éventuels travaux complémentaires d'injection, ou au contraire de pouvoir en faire l'économie. ➔ Exemples de l'ouvrage Glarner
- **En matière de dispositif de confortement**, exemples pour les soutènements :
 - Schmitt P. , Schlosser F. The observational method : From geotechnical monitoring to interactive design
 - Robert J. & Moreau T., Lavis J. & Schmitt P. : Le dimensionnement interactif pour la réalisation d'une fouille profonde sur le flanc d'un versant fortement urbanisé à Monaco
 - S. Marten, Luc Delattre, JP Magnan, 2005 - Géotechnique et risques naturels, : Etude et méthodologie sur le comportement des écrans de soutènement, LCPC

Conclusions

➤ L'intérêt de l'instrumentation, en matière d'ouvrage de soutènement n'est plus à démontrer :

- Nécessité réglementaire
- **Amélioration constante des méthodes et des modèles de calcul**
- **Détection de situations imprévues et aide à la décision** (notion de vitesse d'évolution)
- **Optimisation des ouvrages** actuels et futurs

➤ Quelques éléments pour la mise en œuvre :

- Importance en travaux de rapport de qualité regroupant le **maximum d'informations concomitantes** (photo, surcharges, phasage, piézométrie, inclinométrie, nivellement, jauges de déformation...) pour enrichir les retro-analyses et la constitution de 'banques de données d'expériences comparables'
- Fiabilité à consolider de certains dispositifs, nécessité d'une **redondance** pour valider l'information acquise
- **Protection des dispositifs** à prévoir et sensibilisation des équipes travaux

➤ Peu d'exemples encore sur les comportements en service