

L'utilisation des éléments finis dans les projets géotechniques quelques exemples

**Dominique Batista – LRPC Aix
en Provence**

Journée CFMS du 16 mars 2011,
organisée par l'IFSTTAR



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir

SOMMAIRE

Pages

*Analyse du comportement de
la tranchée couverte de
St Paul*

3

*Comportement d'une grande
excavation dans un contexte
de glissement de terrain*

28

Plan de la présentation

Pages

I Contexte et problématique

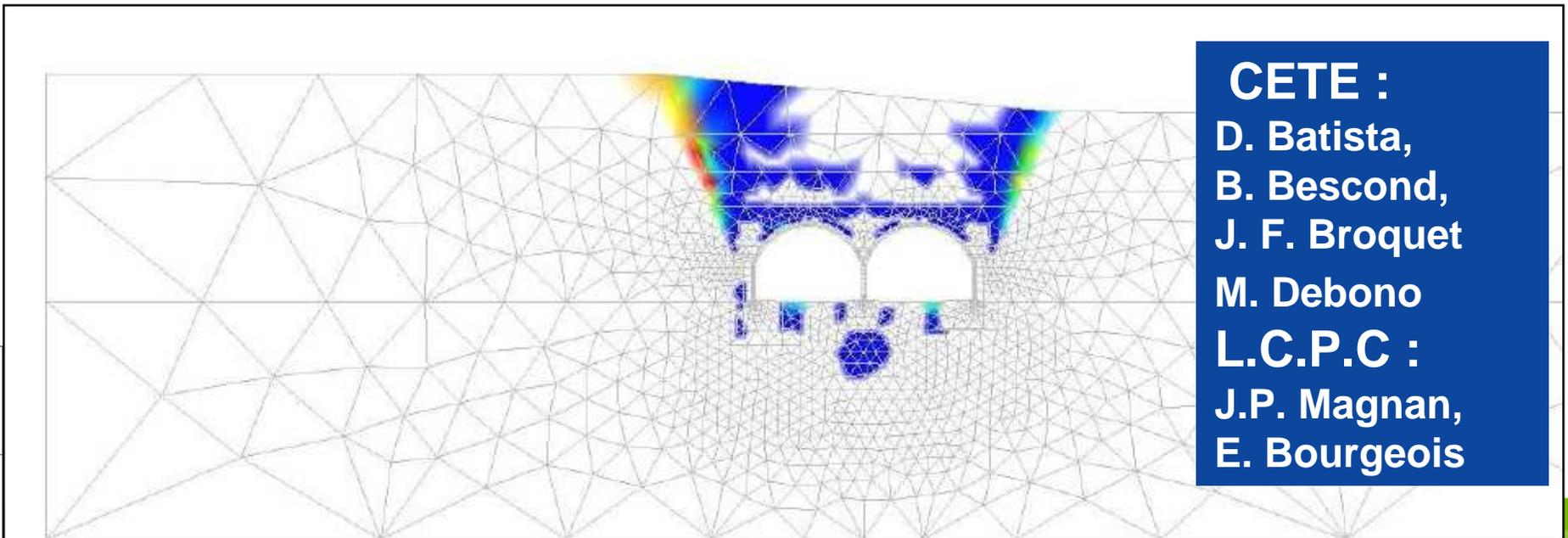
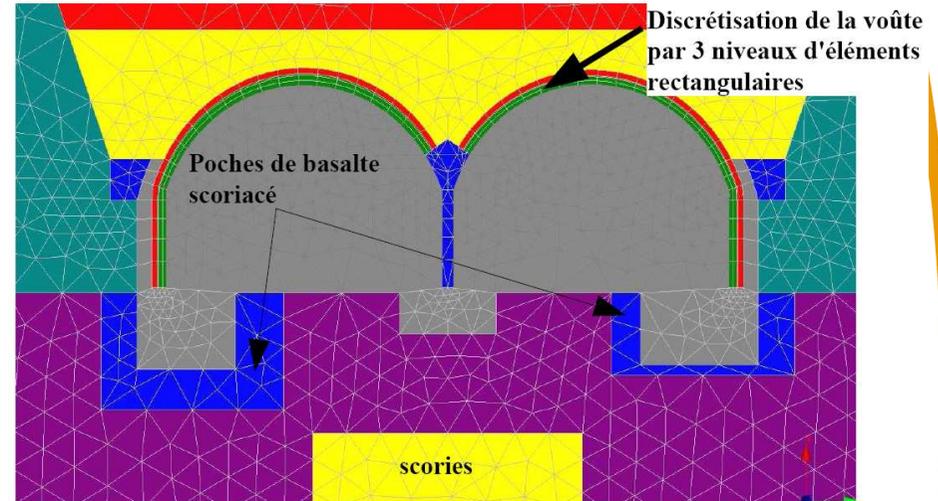
II Analyse des paramètres de modélisation

III Analyse des résultats d'un contre-calcul

IV Instrumentation et retour d'expérience

V Conclusion

I Évaluation du comportement des voûtes de la tranchée couverte de St Paul lors du remblaiement



CETE :
D. Batista,
B. Bescond,
J. F. Broquet
M. Debono
L.C.P.C :
J.P. Magnan,
E. Bourgeois

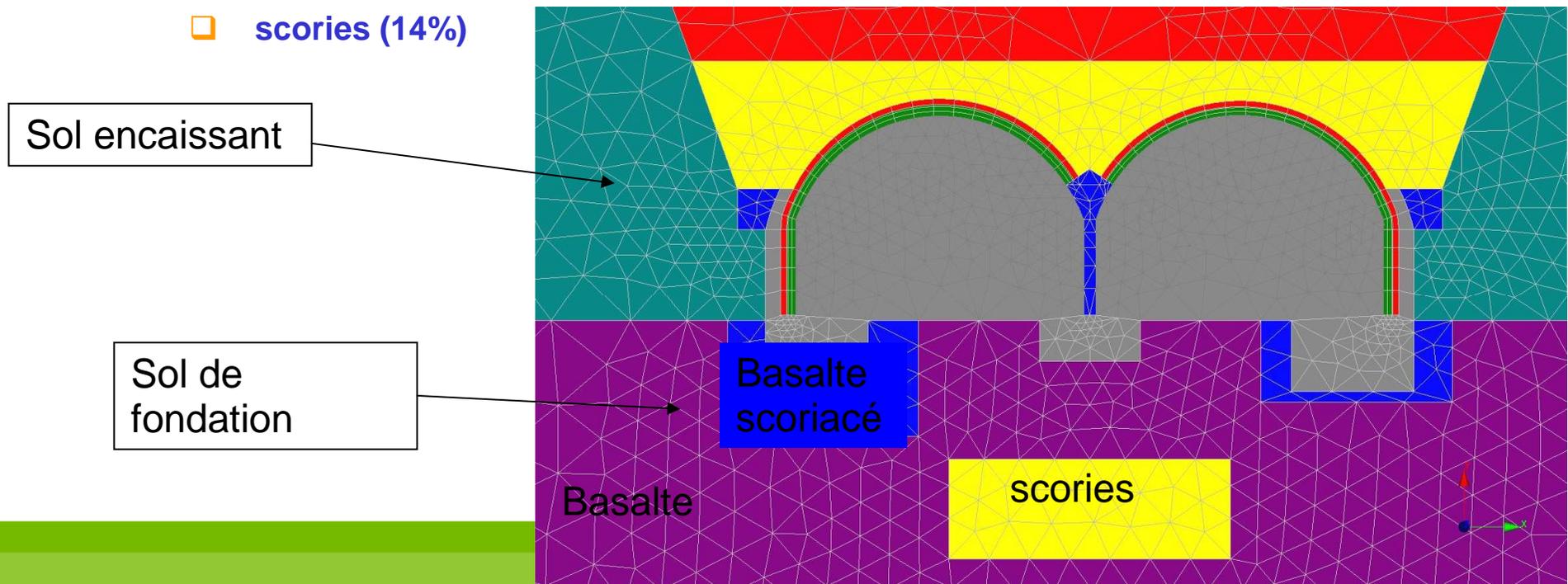
Contexte de la mission : AMO

- En phase projet, voûtes en BA de la TC justifiées à l'aide de calculs de type « barres + ressorts » (EFFEL) validés par la pratique,
- En phase travaux, le groupement réévalue l'impact du remblaiement de la TC sur la structure en béton à l'aide d'une MEF et **remet en cause la faisabilité du projet (moments excessifs)**.
- La MEF du groupement intègre des conditions d'interfaces particulières ainsi que certains comportements complexes de sol
- **Mission LRPC** : contre calcul sous CESAR-LCPC modélisant les travaux d'excavation et de remblaiement de la tranchée afin de statuer sur la faisabilité du projet.

contexte géotechnique

Contexte géotechnique de la TC de St Paul caractérisé par :

- ❑ Une forte variabilité des sols de fondation constitué d'un massif de basalte présentant de nombreuses poches de scories et basaltes scoriacés
- ❑ Une forte hétérogénéité du sol encaissant au droit des pénétrations de la voûte montrant un empilement aléatoire mais globalement homogène de
 - ❑ basalte (59%)
 - ❑ basalte scoriacés (27%)
 - ❑ scories (14%)



problématique

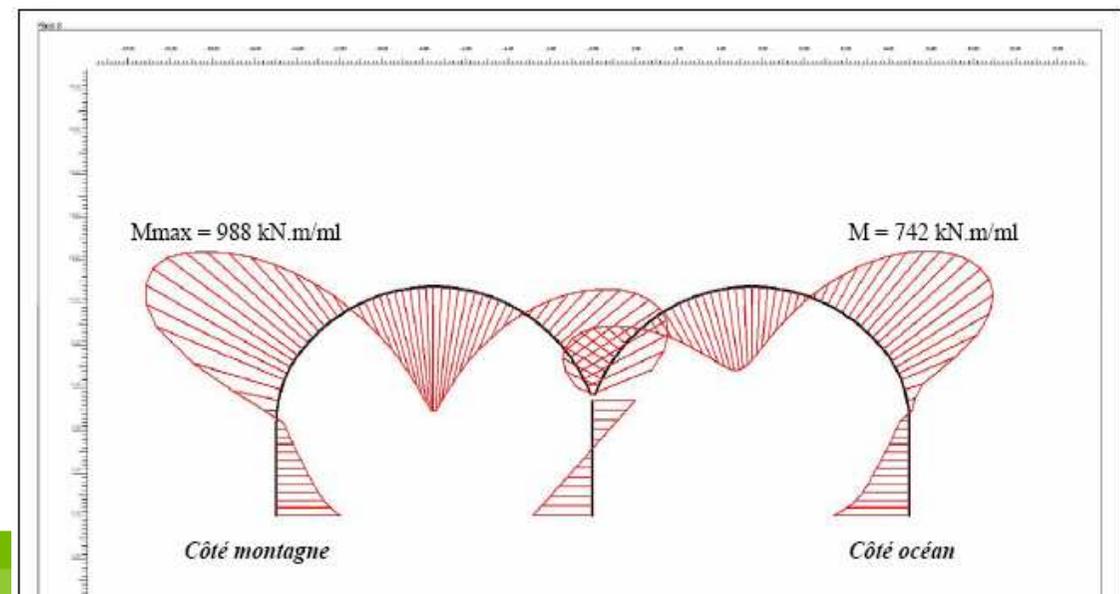
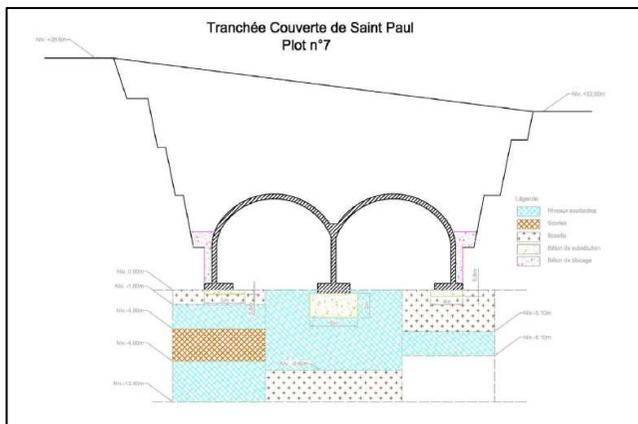
- ❑ **Le groupement s'interroge sur l'impact des hétérogénéités géotechniques sur la structure de la voûte lors du remblaiement (remblaiement de l'ordre de 19m/ clé de voûte)**
- ❑ **Le groupement constate que le modèle « barres + ressorts » (EFFEL) ne modélise pas le comportement complexe des sols**
 - ❑ **modules différenciés suivant les configurations de charge-décharge,**
 - ❑ **prise en compte de la plasticité des sols,**
 - ❑ **des conditions d'interface au droit de la voûte**

problématique

Dans le cadre de la G3, le groupement réalise une modélisation aux éléments finis sous PLAXIS

- ❑ utilisant la loi Hardening Soil Model (rapport de plus de 1000 pages)
- ❑ démontrant que la structure est très sensible
 - ❑ Forte redistribution des efforts sur la voûte via le compactage progressif des remblais
 - ❑ Sensibilité de la structure variations de raideur des appuis et de l'encaissant
- ❑ Démontrant que la structure ne peut résister au remblaiement

Dans la configuration d'un remblaiement total sur la Tranchée Couverte de Saint Paul tel que prévu au marché, il apparaît clairement que les sections d'acier mises en œuvre dans la structure sont très limites.



Des hypothèses de sol pessimistes

Analyse des hypothèses de sol prises en compte par le groupement :

- ❑ caractéristiques géotechniques de l'encaissant semblent faibles.
- ❑ Étant constitué de 59% de basalte, 27% de niveaux scoriacés et de 14% de scories, nous avons pu réévaluer ces caractéristiques sur la base des hypothèses admises:
 - ❑ $C_{\text{encaissant}} = 0,59 C_{\text{Basalte}} + 0,27 C_{\text{basalte scoriacé}} + 0,14 C_{\text{scories}} = 336 \text{ kPa} \neq 150 \text{ kPa}$ considérés par le groupement.
 - ❑ $E_{\text{encaissant}} = 0,59 E_{\text{Basalte}} + 0,27 E_{\text{basalte scoriacé}} + 0,14 E_{\text{scories}} = 215 \text{ MPa}$ 4 fois supérieurs aux 50 MPa considérés par le groupement.
 - ❑ L'angle de frottement de l'encaissant peut être évalué de la même manière à 38° au lieu de 35°
- ❑ L'angle de frottement des remblais techniques et scories nous paraît également sous évalué et nous proposons un angle de frottement de 37° au lieu de 33°

des lois de comportement complexes

La loi HSM :

- ❑ une loi élastoplastique avec écrouissage appelée « Hardening Soil Model » adaptée « aux sables, aux graves, ainsi qu'à de sols plus mous comme argiles et limons ».
- ❑ Cette loi intègre un module de déchargement 3 fois plus élevé que le module de chargement. Les modules varient en fonction de l'état de contrainte et notamment varient selon le poids des terres proportionnellement à \sqrt{z} .
- ❑ Nous ne pensons pas qu'une roche comme le basalte ait un module qui varie à l'échelle d'un massif proportionnellement à \sqrt{z} . HSM n'est pas adapté au comportement des basaltes et du terrain encaissant et induit une sous estimation des modules à faible profondeur.
- ❑ Nous utiliserons donc pour l'ensemble de nos contre-calculs des lois élasto-plastiques simples avec critère de Mohr-Coulomb.

Des paramètres de calculs discutables

Des coefficients de Poisson ayant un impact sur l'initialisation des contraintes :

- ❑ Les coefficient de Poisson pris en compte pour les scories et les remblais ($\nu=0,2$) paraissent faibles
 - ❑ coefficient de pression des terres au repos $K_0 = \nu/(1-\nu)=0,25$ très éloigné du coefficient issu de la formule de Jacky $(1 - \sin(\Phi))$ voisin de 0,43
 - ❑ cela réduit le confinement de la voûte au droit des reins ce qui est défavorable
 - ❑ Le critère de plastification des scories :
 $\gamma.z.(|1-K_0|-(1+K_0) \sin(\Phi)) - 2 C.\cos(\Phi) \leq 0$,
 montre que les scories sont dans un état impossible au delà de 22m de profondeur.
- ❑ Nous prendrons un coefficient de Poisson $\nu=0,3$ calé à l'aide de la relation $K_0 = \nu/(1-\nu)=1-\sin(\Phi)$ issue de la formule de Jacky. Ce choix garantit que l'état de contrainte initial est compatible avec le critère de Coulomb :

$$\forall z, \quad \gamma.z.(|1-K_0|-(1+K_0) \sin(\Phi)) - 2 C.\cos(\Phi) \leq 0,$$

Des paramètres de calculs discutables

Un calage des modules discutables :

- ❑ Les modules de référence E_{50}^{ref} utilisés dans le modèle PLAXIS ont été obtenus par calage du modèle sur les résultats EFFEL. Cela a conduit à retenir $E_{50}^{\text{ref}} = 4 E_M$.
- ❑ calage inapproprié dans la mesure où la modélisation EFFEL ne permet pas de prendre en compte les phénomènes d'interaction sol structure et de plasticité des sols pris en charge par la MEF. Cela conduit à une forte sous estimation des modules du terrain encaissant et des remblais.
- ❑ Pour nos contre calculs nous avons choisi d'évaluation les modules de chargement en utilisant directement les valeurs pressiométriques disponibles:
 - ❑ $E_{50} = E_M / \alpha$, pour un chargement où α désigne le coefficient rhéologique du sol.
 - ❑ $E_{\text{ur}} = 4 E_M / \alpha$, pour un cycle de décharge puis recharge
- ❑ Pour les remblais, nous retenons un module pressiométrique de 15MPa. Cela conduit à un module E_{50} minimal de 45MPa neuf fois plus fort que la valeur minimale retenue dans les calculs du groupement.

Des paramètres de calculs discutables

Un calage des modules discutable :

- ❑ Le module pressiométrique moyen du terrain encaissant a pu être réévalué. Le module d'Young obtenu $E_{y, 50} = 215 \text{ MPa}$ est 4 X supérieur à celui considéré par le groupement.

Caractérisation de l'interface :

- ❑ Compte tenu de la présence d'un complexe drainant à l'interface béton de blocage/piédroit, il y a lieu de considérer une réduction significative du frottement sur cette interface. Le paramètre $R_{inter} = 0,7$ retenu dans le calcul PLAXIS correspond à un frottement de 24° à l'interface et surestime à notre avis le frottement réellement mobilisable.
- ❑ Nous choisissons un angle de frottement de 19° pour cette interface dans nos contre calculs sous CESAR.

Deux jeux de paramètres de calcul

	Basalte	Scories	Scories traitées	terrain encaissant	remblai normal	Remblai technique	Basalte scoriacé
rho	23	23	23	23	23	23	23
$E_{y,50}$ en Mpa	1360	36	320	50	5 à 35*	5 à 35*	75
$E_{y,ur}$	4080	108	960	150	15 à 105*	15 à 105*	300
ν	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
C en kPa	500	10	10	150	1	1	150
Φ en °	40	35	35	35,0	33	33	37
ψ	10	5	5	5,0	3	3	7
$1-\sin(\Phi)$		0,43	0,43		0,46	0,46	
$K_0 = \nu/(1-\nu)$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Paramètres de calcul proposés par le groupement

	Basalte	Scories	scories traitées	terrain encaissant	remblai normal	remblai technique	basalte scoriacé
rho	23	23	23	23	23	23	23
$E_{y,50}$ Mpa	340	36	240	215	45 à 60*	45 à 70*	75
$E_{y,ur}$	1360	144	960	860	180	180	300
ν	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,25
C en kPa	500	5	5	336	1	1	150
Φ en °	40	37	37	38,8	35	37	37
ψ	10	7	7	8,8	5	7	7
$1-\sin(\Phi)$		0,40	0,40		0,43	0,40	
$K_0 = \nu/(1-\nu)$	0,25	0,43	0,43	0,25	0,43	0,43	0,33
alpha	1	0,25	0,33	1,00	0,33	0,33	0,67
E_M en Mpa	340	9	80	215	15	15	50

Paramètres « moyens » proposés par le CETE et le LCPC pour les contre calculs sous CESAR

Extension du modèle et effets de bord

Un modèle trop étriqué :

- ❑ La hauteur H d'excavation atteint 30m, il faudrait disposer de $3H$ de chaque coté de la tranchée. Le modèle PLAXIS se contente de moins de 20 mètres ce qui peut induire des effets de bords .
- ❑ L'extension des zones plastiques est potentiellement fausse, les conditions aux limites perturbent vraisemblablement les calculs au droit des voûtes.
- ❑ nous ne disposons pas de $8B$ sous les semelles de l'ouvrage (où B = largeur de la semelle) pour une correcte évaluation des tassements.
- ❑ Les zones de plastification ou de traction visibles sur les contours du maillage tendent à prouver que le modèle est trop étriqué :

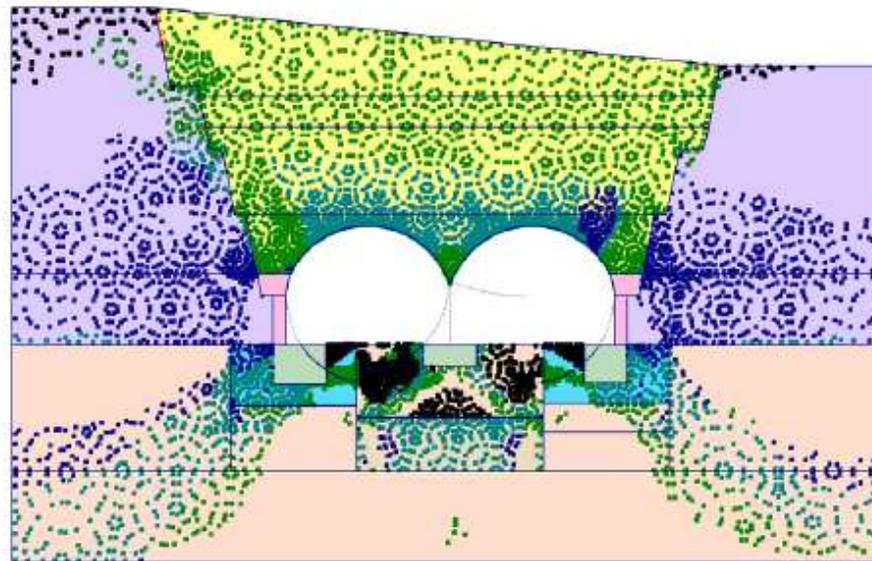
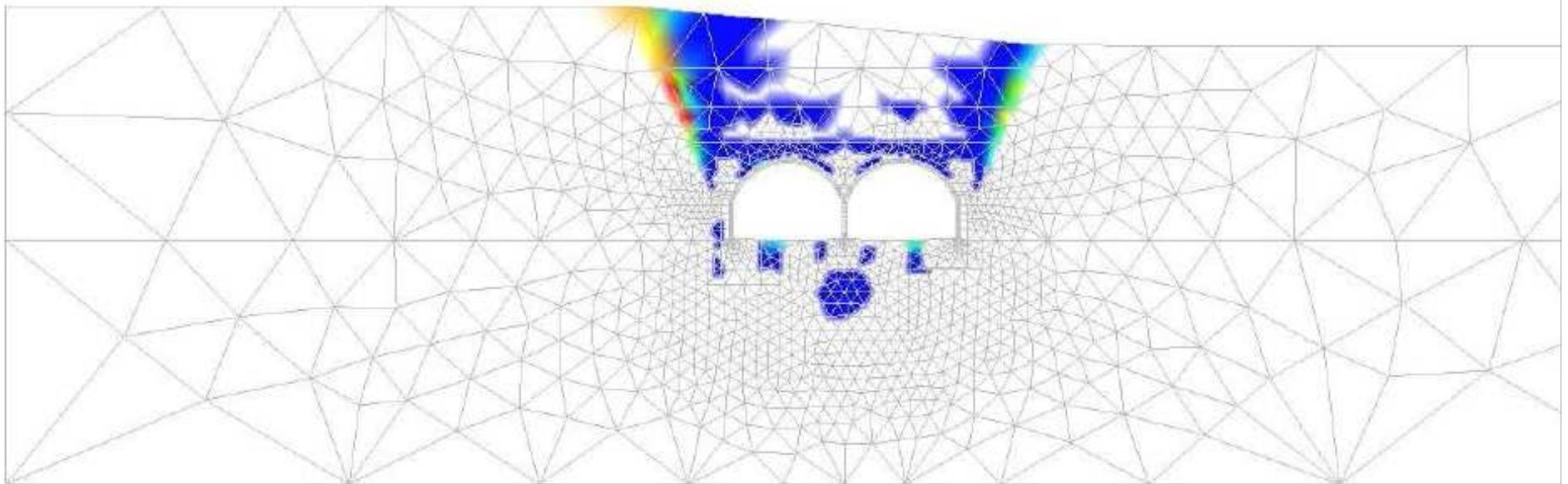


Fig. 23 Plot of plastic points
- Step no: 124 - (Phase: 10)

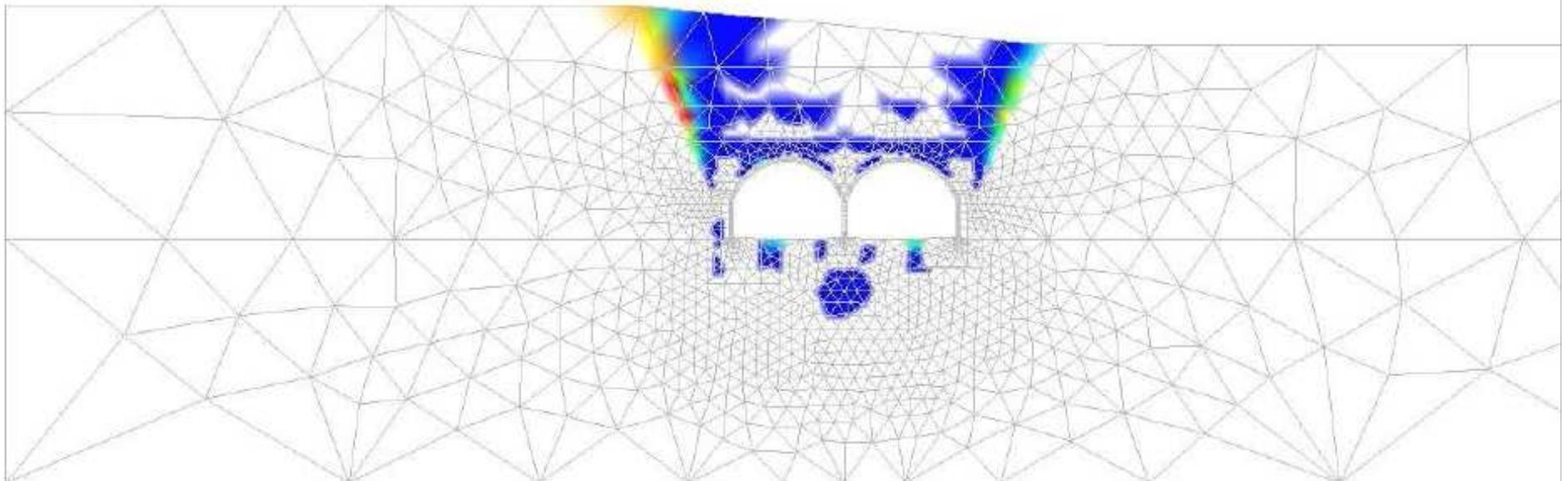
Extension du modèle et effets de bord

- Compte tenu de ces éléments, nous avons considéré pour nos contre calculs une géométrie de calcul plus large (intégrant 32m sous les semelles des péroits et 90m de part et d'autre des parois d'excavation).
- cartographie des déformations plastiques obtenues lors des contre calculs sous CESAR après remblaiement complet de la tranchée, (hypothèses moyennes et module de béton moyen $E_b=2,4 \cdot 10^{11}$ Pa)



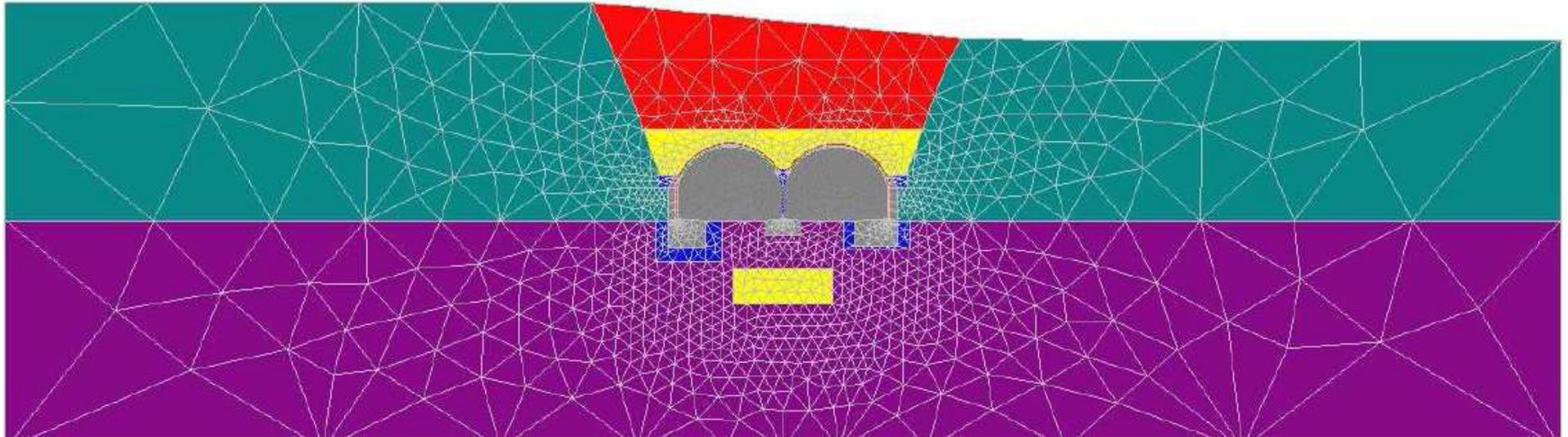
Extension du modèle et effets de bord

- ❑ avec le modèle CESAR, il n'apparaît aucun point plastique sur les bords du modèle.
- ❑ Les principales zones plastiques correspondent à des zones de glissement au niveau d'interfaces telles que les bords de l'excavation et la voûte béton.
- ❑ Ces zones plastiques s'avèrent physiques.



Modélisation géométrique des sols

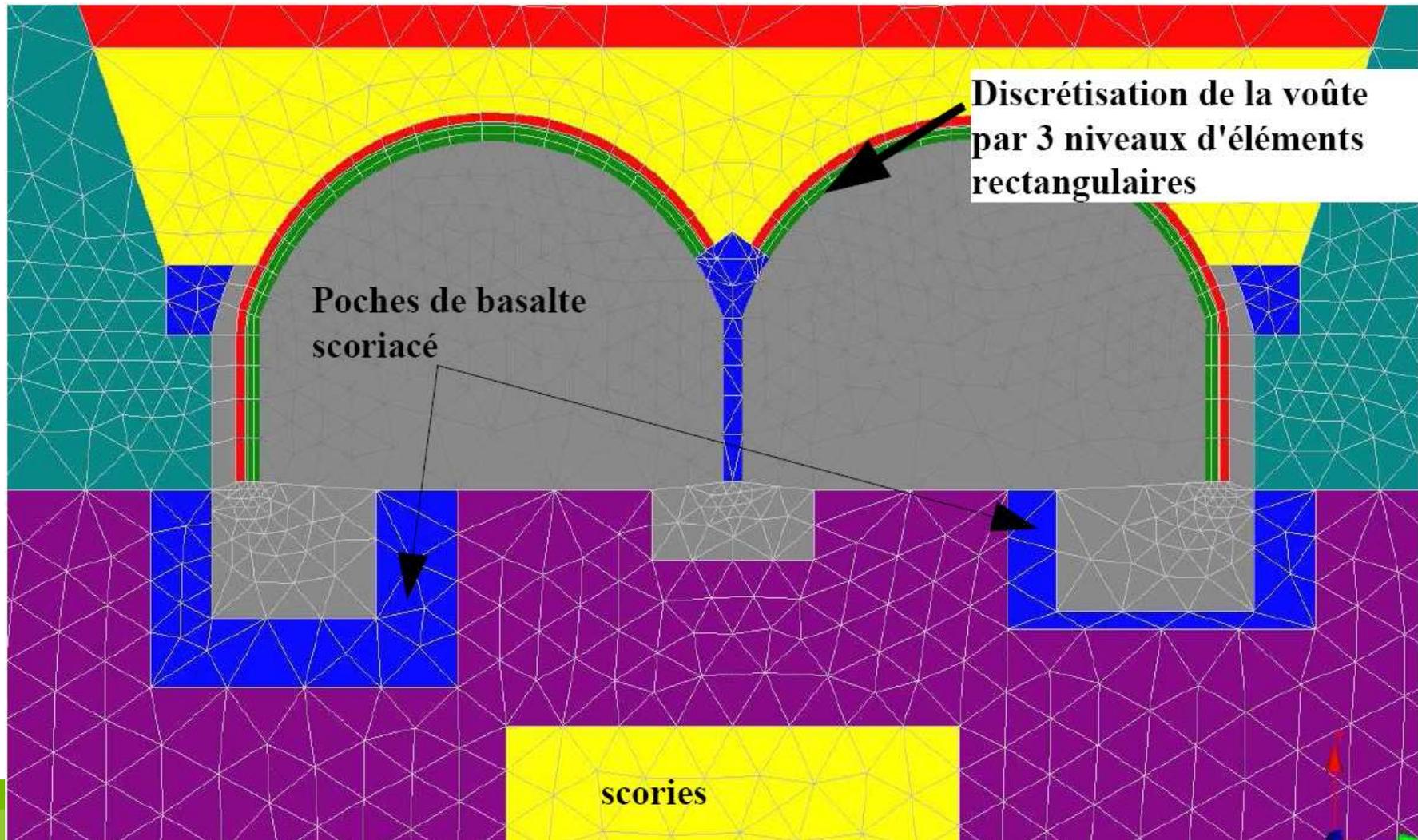
□ Nous donnons ci après le maillage complet utilisé pour discrétiser le plot 4 :



- La modélisation géométrique des couches de sols s'avère défavorable. Nous avons considéré 3 « boîtes » de sols « faibles » :
- une « boîte » de scories de 15m de large,
 - deux « boîtes » de basalte scoriacé de près de 10m de large.
 - Ces boîtes sont d'extension maximale en plan, et extrapolent largement des sondages pressiométriques ponctuels.

Modélisation géométrique des sols

- ❑ La modélisation 2D réalisée, suppose que ces défauts sont d'extension infinie dans la direction perpendiculaire au plan de modélisation. Cela s'avère défavorable. Nous avons cependant retenu cette modélisation géométrique par souci de sécurité (et pour éviter une approche 3D ...)



Analyse des résultats du contre calcul sous CESAR

Méthodologie :

- ❑ Nous avons réalisé deux types de contre calculs sous CESAR LCPC, en sélectionnant tour à tour un des deux jeux d'hypothèses :
 - ❑ hypothèses moyennes proposées par le CETE
 - ❑ hypothèses défavorables proposées par le groupement
- ❑ La loi de comportement considérée est de type élastoplastique avec critère de Mohr Coulomb, intégrant modules de chargement et déchargement différenciés.
- ❑ Les variations de contraintes obtenues sur une coupe perpendiculaire à la voûte sont calculées afin d'évaluer les moments.
- ❑ Nous obtenons ainsi les moments maximaux au droit des reins des voûtes, en fonction du module de béton E_b et des hypothèses de sol:

Moments en kN.m/m	$E_b = 24 \text{ GPa}$	$E_b = 11 \text{ GPa}$
Hypothèses défavorables	767 kN.m	615 kN.m
Hypothèses moyennes	494 kN.m	370 kN.m

Analyse des résultats du contre calcul sous CESAR

Résultats du contre calculs

- ❑ le jeu d'hypothèses défavorables conduit à une surestimation des moments de plus de 50% (/ jeu d'hypothèses moyennes).
- ❑ Les \neq de raideurs des sols, se répercutent naturellement sur les efforts dans la structure.
- ❑ Les moments obtenus s'avèrent acceptables pour la structure. Pour le jeu de données défavorables, ils sont 1,5 fois plus faibles que ceux issus de la modélisation du groupement.
- ❑ Il est utile de rappeler que
 - ❑ les calculs du groupement utilisent un modèle géométrique de dimensions trop limitées (effets de bords)
 - ❑ l'utilisation faite de la loi de comportement HSM induit une forte sous-estimation des modules des sols à faible profondeur (ils sont proportionnels à \sqrt{z})

Instrumentation des voûtes

Méthode observationnelle :

Suite à notre contre calcul la Région Réunion :

- ❑ a choisi de poursuivre le remblaiement de la voûte
- ❑ nous a permis de mettre en oeuvre une instrumentation de la voûte permettant
 - ❑ de vérifier la pertinence des modèles de calcul
 - ❑ d'adapter le remblaiement si nécessaire (remblais allégés)
 - ❑ de sécuriser le projet

L'instrumentation a consisté en :

- ❑ Mise en oeuvre de plots de convergence permettant de mesurer la déformation des voûtes
- ❑ Mise en oeuvre d'extensomètres à corde vibrante permettant de mesurer les déformations et d'évaluer les efforts en clé de voûte ainsi qu'au niveau des reins
- ❑ Un suivi topométrique de la base des pénédroits et du remblaiement
- ❑ Une campagne de mesure des modules du béton

Tranchée couverte de Saint-Paul

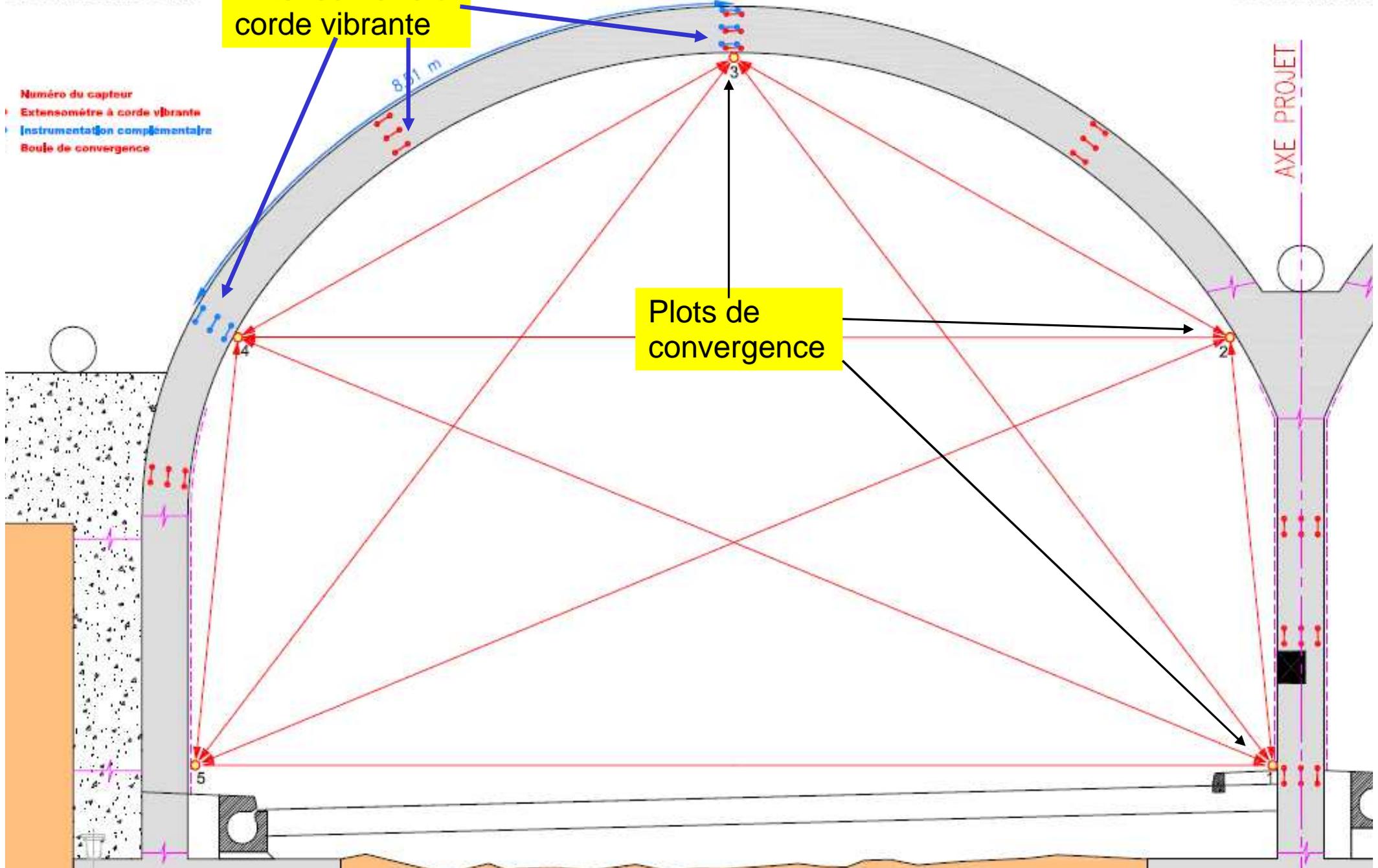
Profil type des convergences - TC5 - TC7 - TC13

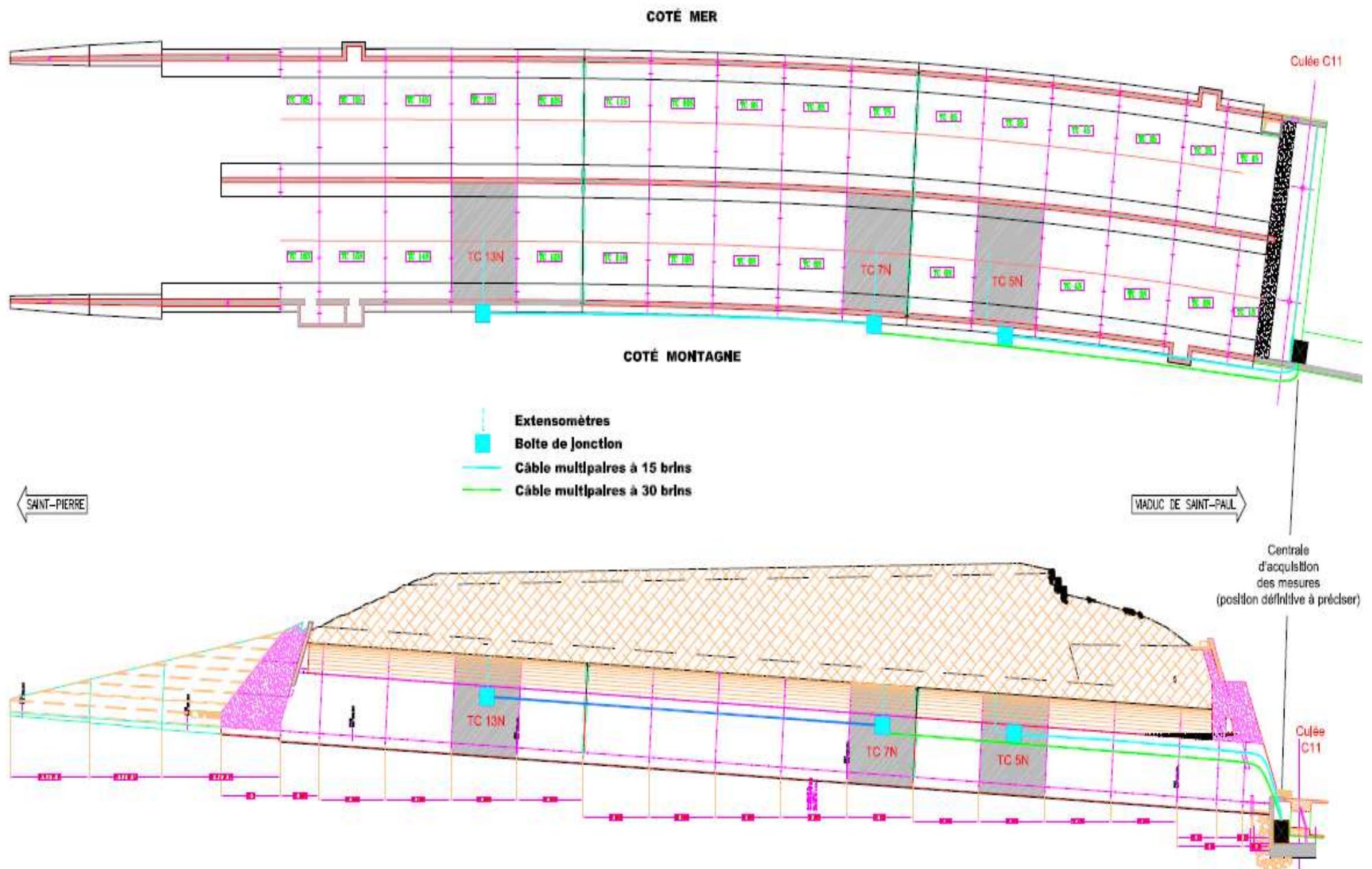
COTE MONTAGNE

COTE MER

Extensomètre à corde vibrante

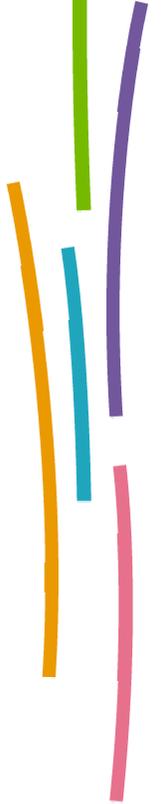
Plots de convergence





ÎLE DE LA RÉUNION
INSTRUMENTATION DE LA TRANCÉE COUVERTE DE SAINT-PAUL

Instrumentation des voûtes par cordes vibrantes

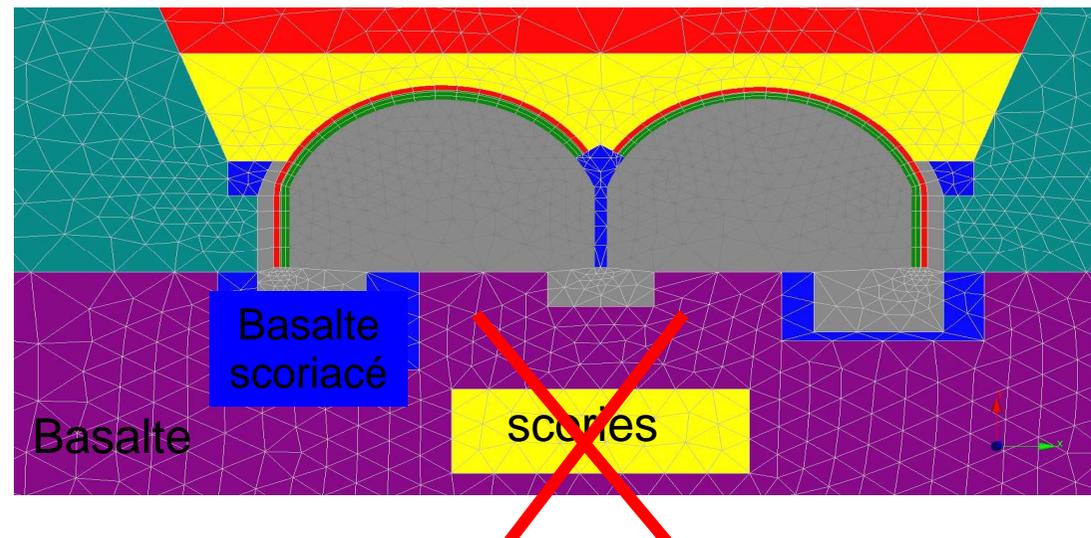


adéquation du modèle avec les résultats de l'instrumentation

□ Les conclusions sont les suivantes :

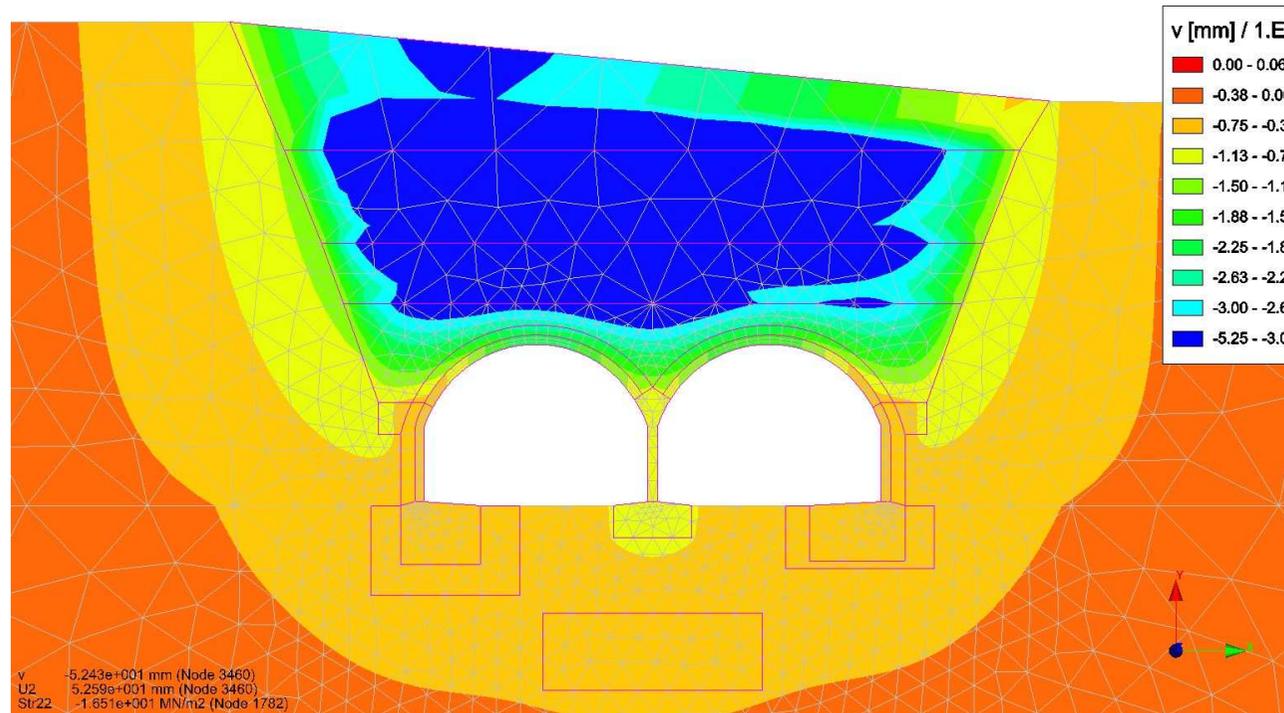
□ L'instrumentation mise en œuvre a permis de valider les prévisions de notre MEF

- les mesures topo montrent des tassements inférieurs et plus homogènes que ceux prédits par notre contre-calcul au droit des piédroits. Pour finaliser notre rétroanalyse, nous avons dû supprimer la poche de scories située en contrebas du piédroit central. L'extension de cette poche n'est donc pas significative et le sol présente un comportement relativement homogène.



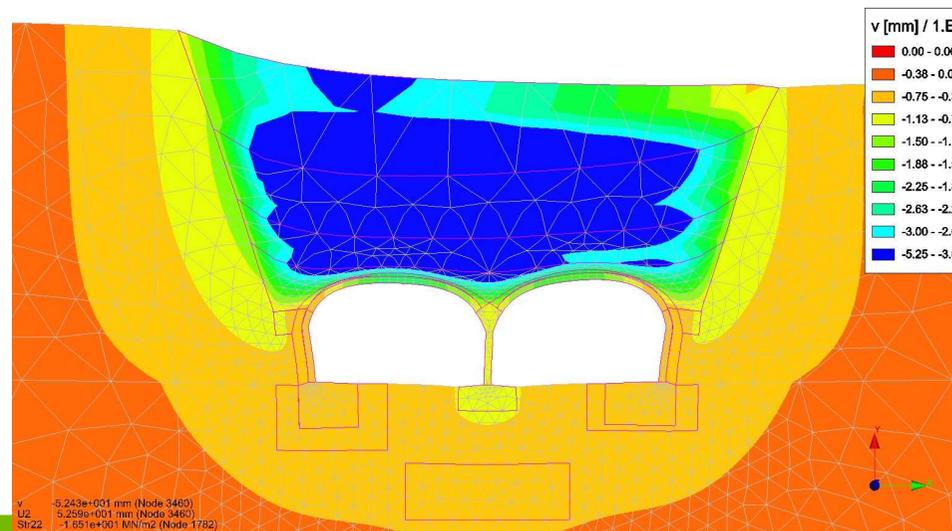
adéquation du modèle avec les résultats de l'instrumentation

- ❑ Sur la base de ce modèle simplifié, le tassement maximal calculé en clef de voûte est de 18mm. Le tassement calculé à la base des piliers est de 5,7mm coté montagne, 8mm sur le piliers central et 5,4mm sur le piliers coté mer.
- ❑ Ces résultats théoriques sont en adéquation avec les résultats expérimentaux qui font état :
 - ❑ d'un tassement maximal en clef de voûte de 23mm
 - ❑ des tassements absolus de l'ordre de 5mm sur les piliers coté mer et montagne et à 7-8mm sur le piliers central.



adéquation du modèle avec les résultats de l'instrumentation

- L'instrumentation mise en œuvre a permis de valider les prévisions de notre MEF
 - Les calculs prédictifs aux éléments finis menés jusqu'à remblaiement total de la tranchée montrent que les efforts dans la voûte restent acceptables. L'absence de tractions significatives et l'ordre de grandeur des compressions maximales ont été validées par les mesures de corde vibrante.
- La topo ainsi que les mesures de convergence montrent qu'il existe un rapport entre le tassement en clé de voûte et le décalage des reins vers l'encaissant : ce rapport de l'ordre de 2,5 traduit la rigidité de l'encaissant et garantit le bon fonctionnement de la voûte en flexion. Ce rapport expérimental de 2,5 valide le ratio de 3 obtenu par modélisation.



II: Excavation en site urbain dans un contexte de glissement de terrain



CETE :
D. Batista,
B. Bescond,
J. L. Perez
L.C.P.C :
J.P. Magnan,
E. Bourgeois

Plan de la présentation

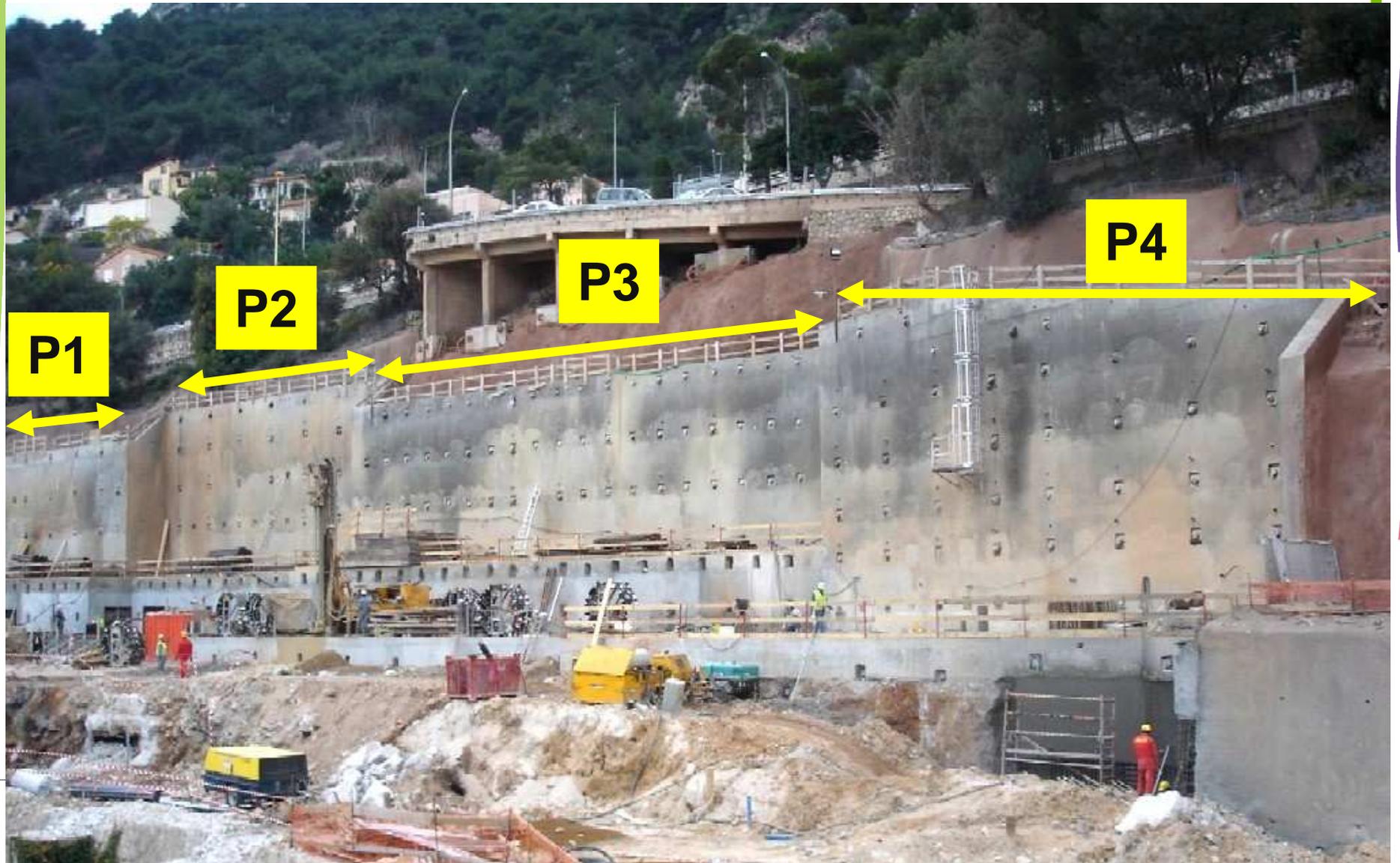
I Contexte du chantier

II Des déplacements non contrôlés

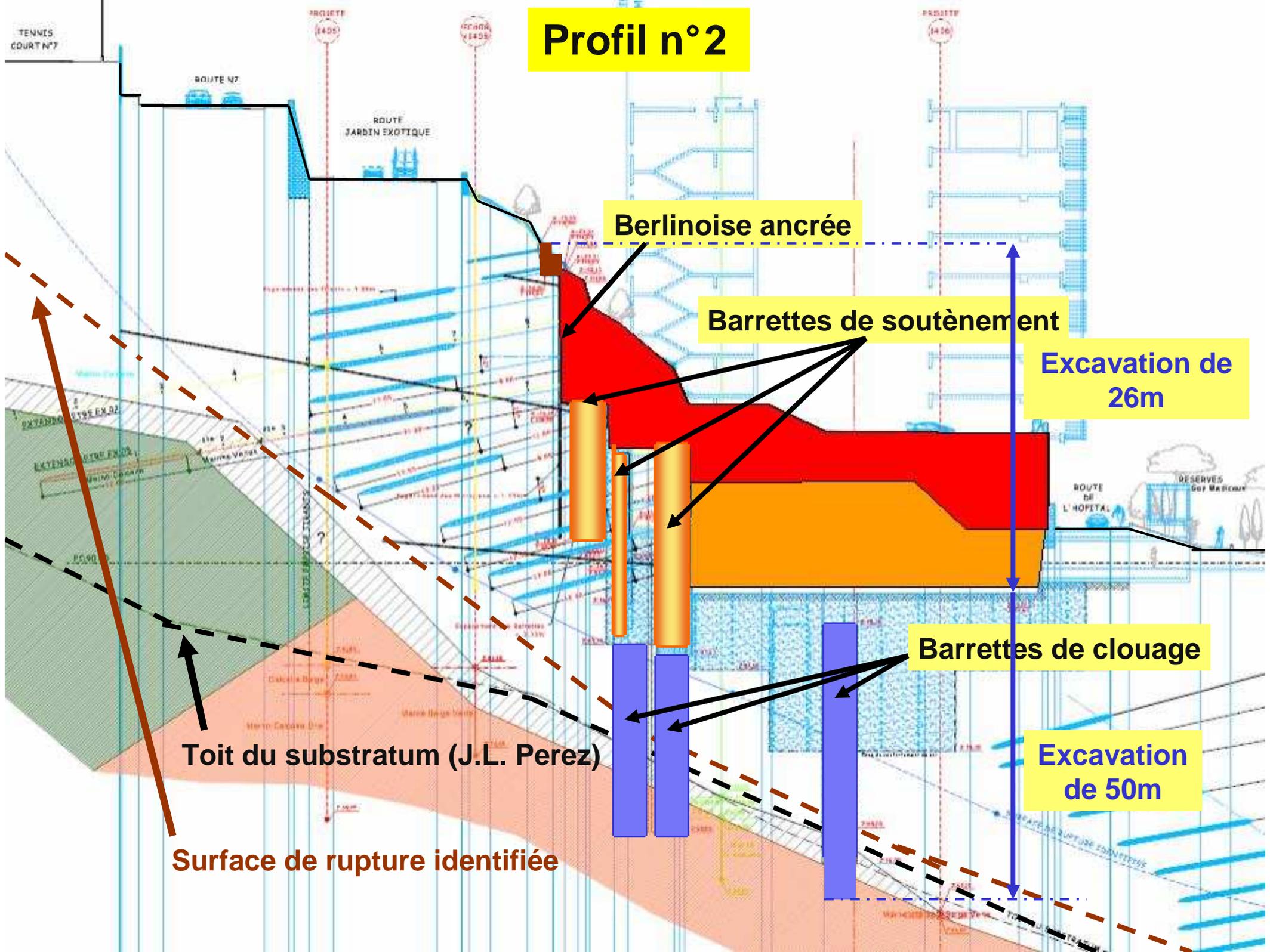
III Analyse des mouvements :

IV Modélisation aux éléments finis :

V Conclusion



Profil n°2



Berlinoise ancrée

Barrettes de soutènement

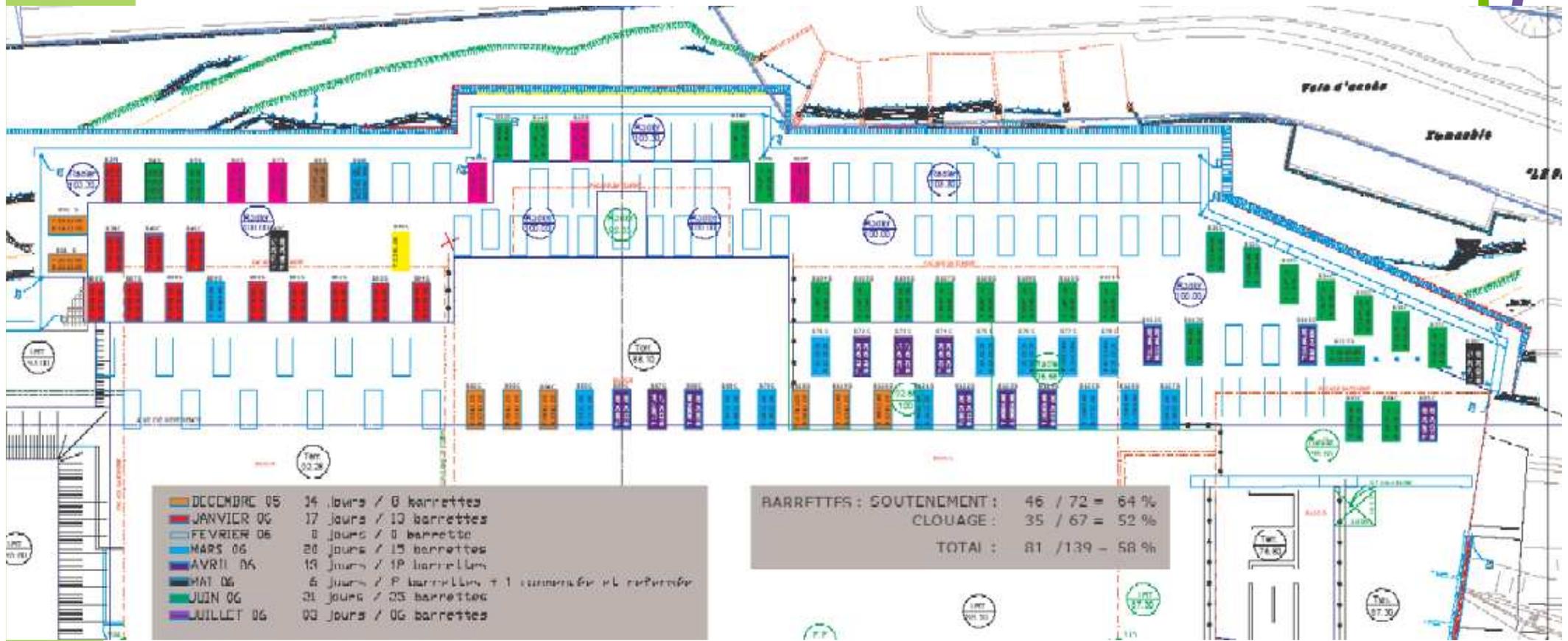
Excavation de 26m

Barrettes de clouage

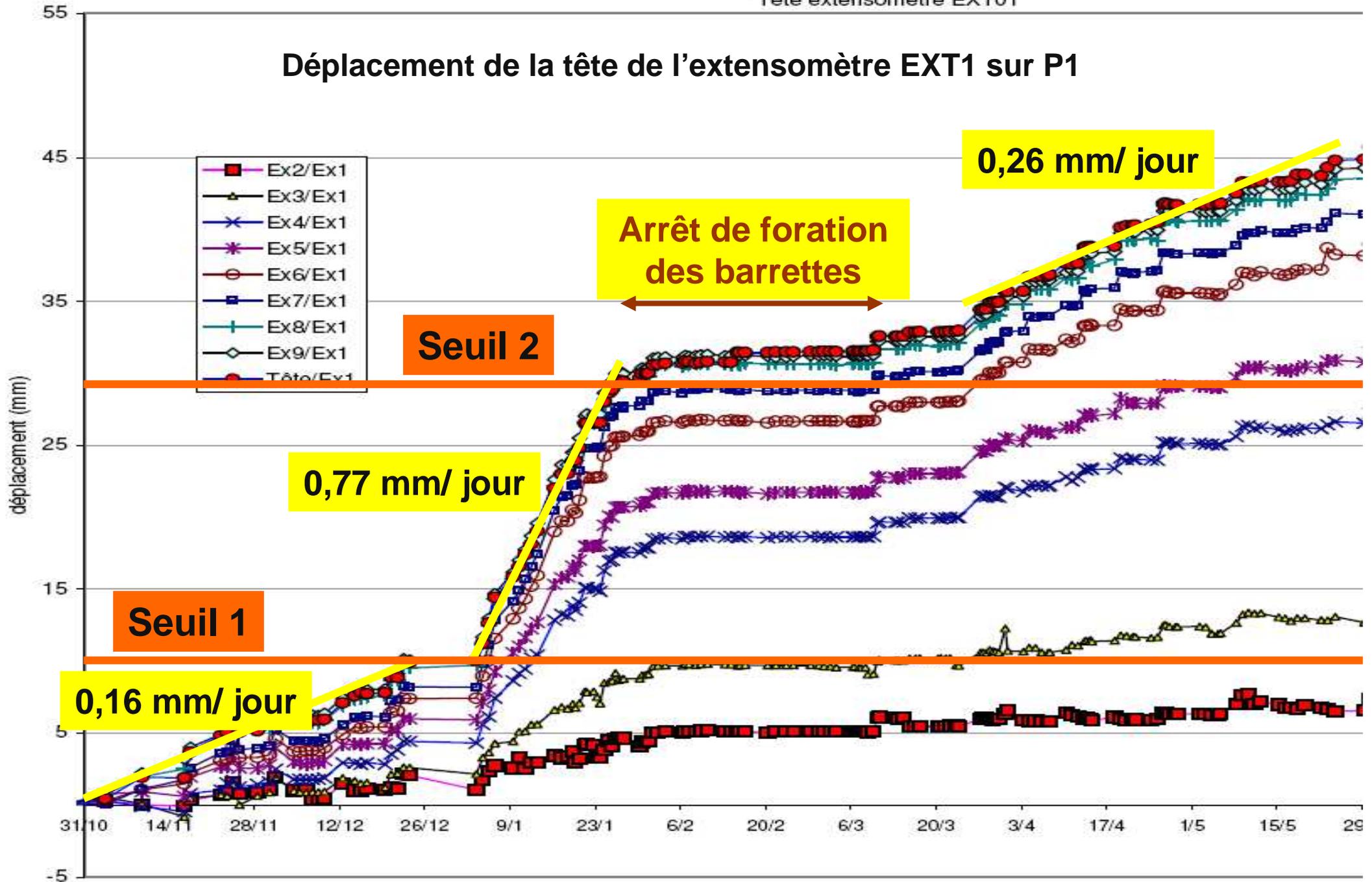
Excavation de 50m

Toit du substratum (J.L. Perez)

Surface de rupture identifiée



Déplacement de la tête de l'extensomètre EXT1 sur P1



Les déformations constatées sont compatibles avec le mouvement d'un bloc rigide (berlinoise+tirants) glissant à sa base

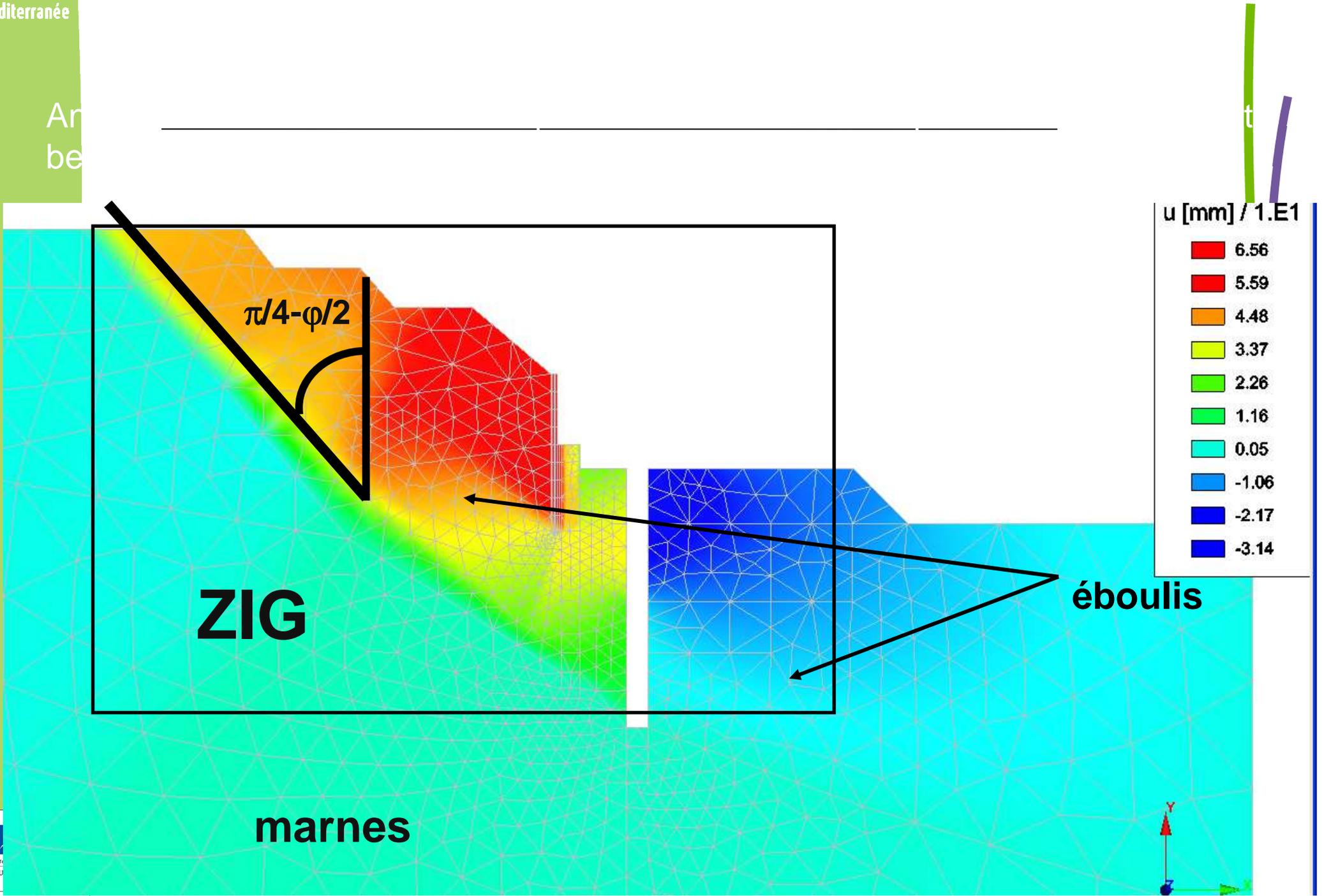
L'extension maximale des déplacements est ainsi évaluée

Limite des tirants

Limite d'influence des travaux

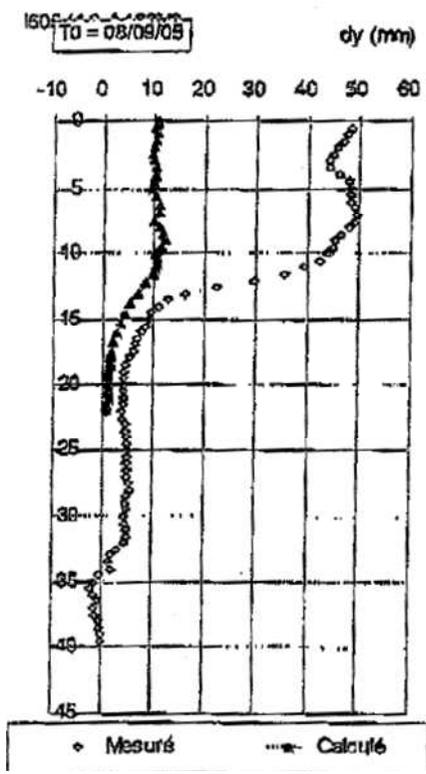
Trace de la berlinoise





Un recalage géotechnique hasardeux

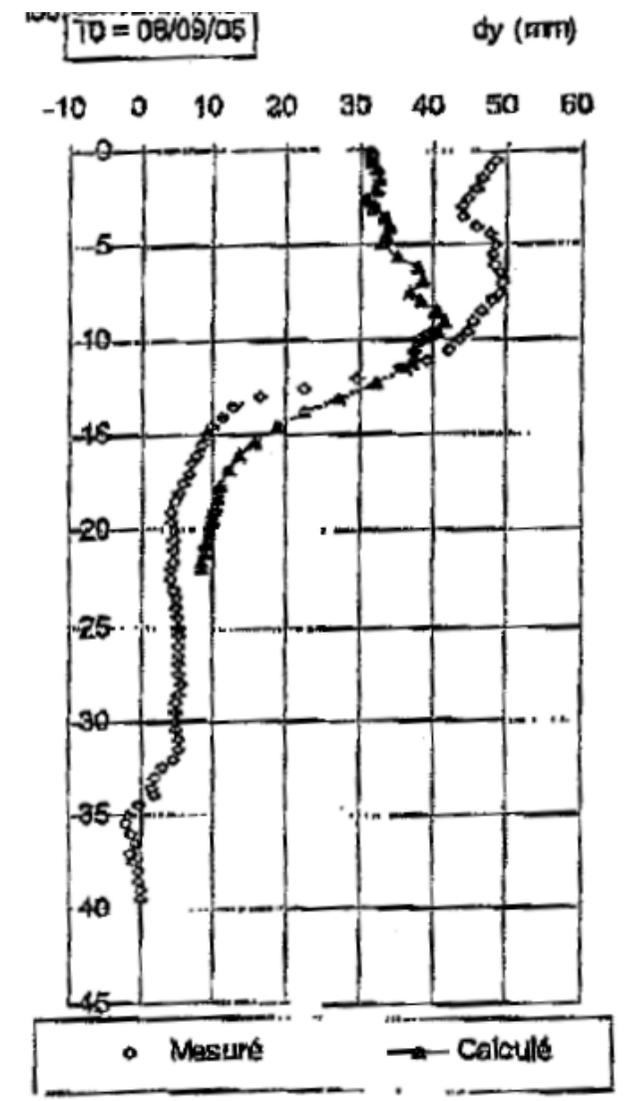
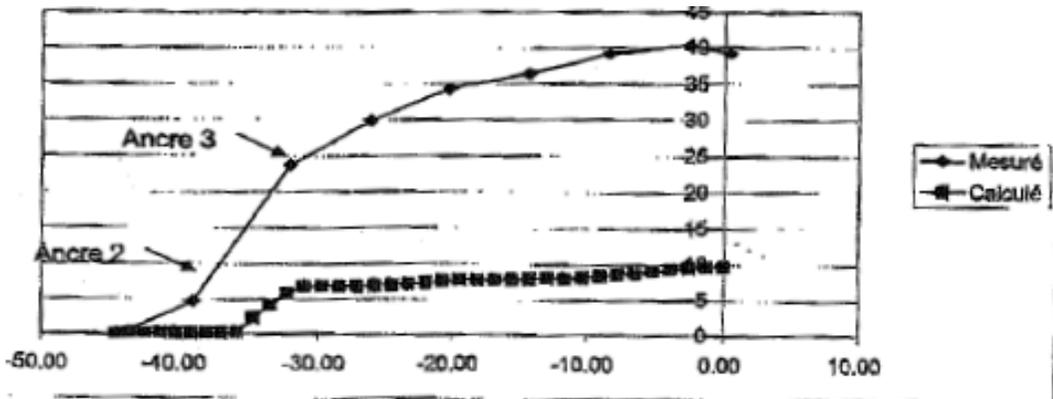
Rétro-analyse sous Plaxis : inclino I605



$E_{\text{marnes}}/40$

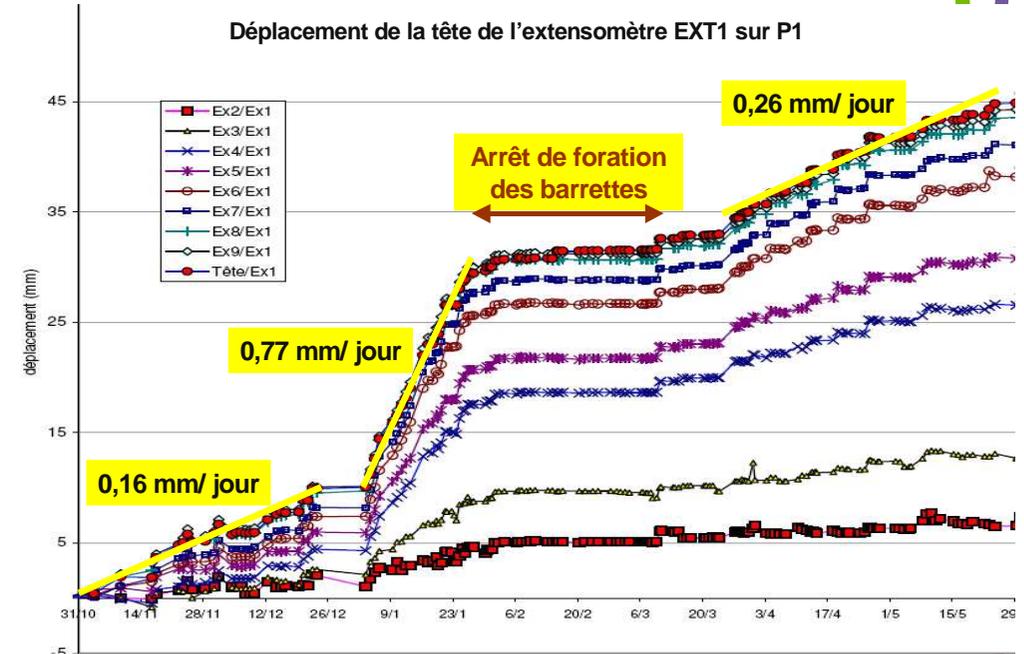
→

$E_{\text{éboulis}}/5$



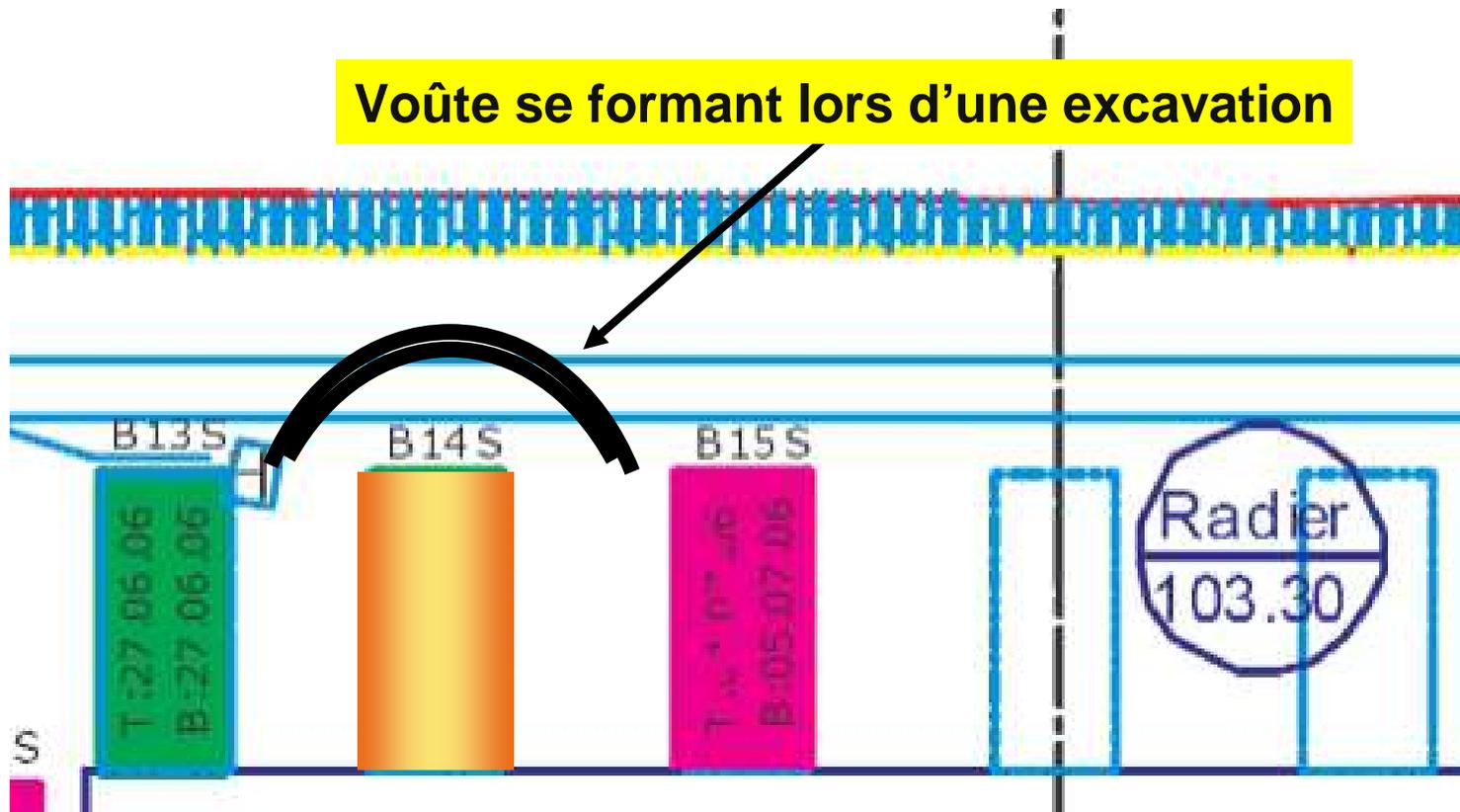
Origine possible des déplacements : la réalisation des barrettes ?

- Densifications des éboulis liés aux vibrations
- Déconfinement lié à l'excavations des barrettes

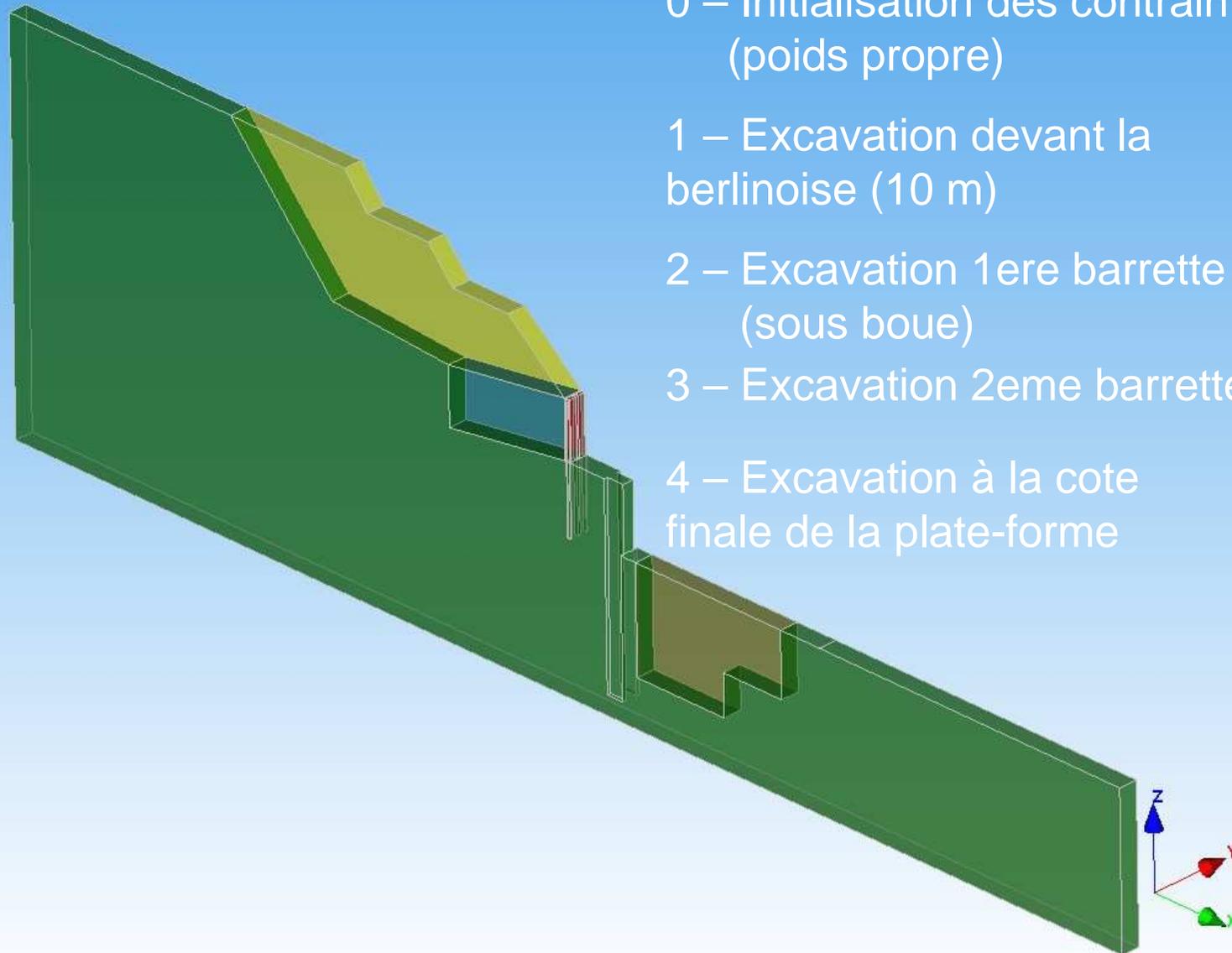


Les phases d'excavation des barrettes ne sont pas prises en compte dans le modèle

Voûte se formant lors d'une excavation



Phasage simplifié des travaux



0 – Initialisation des contraintes
(poids propre)

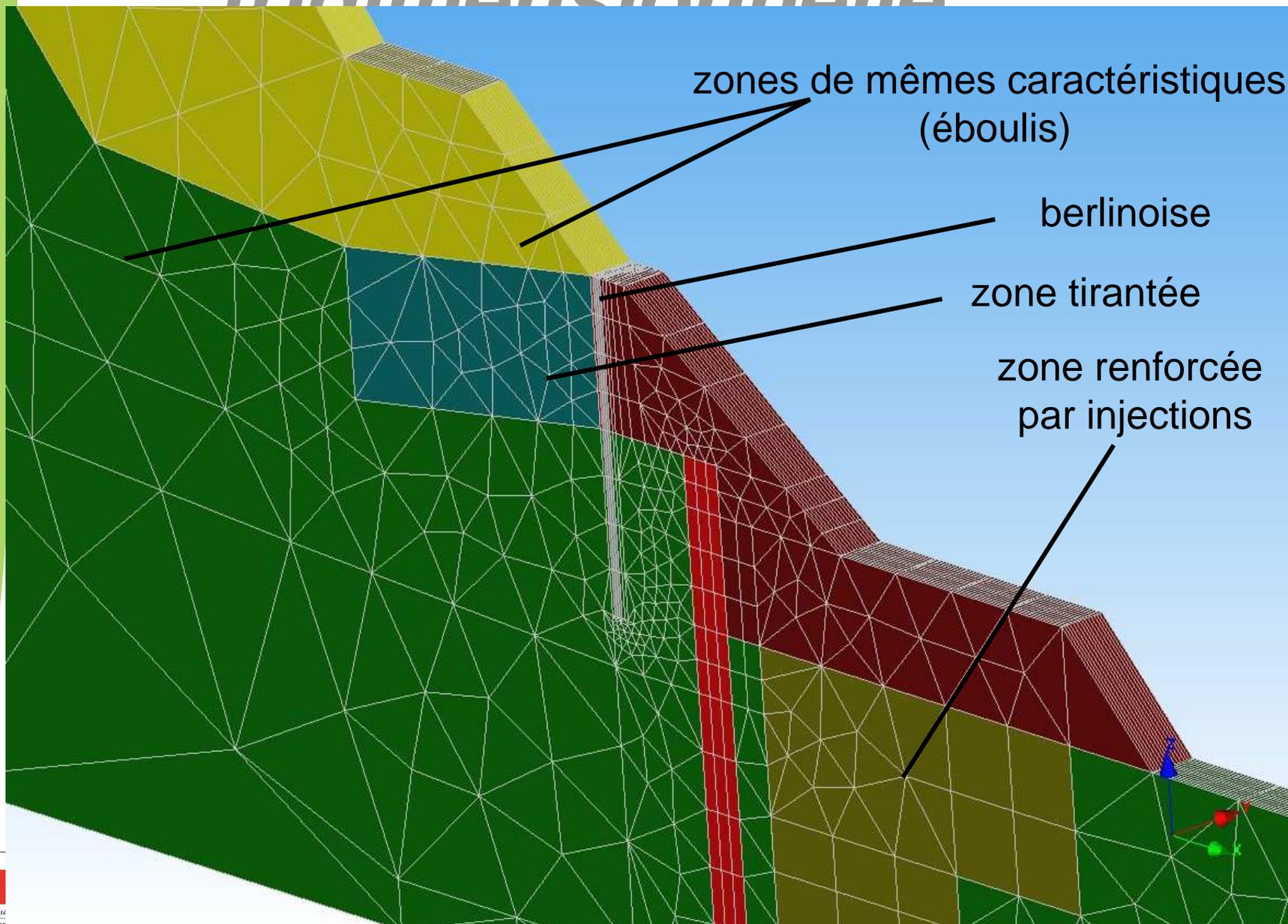
1 – Excavation devant la
berlinoise (10 m)

2 – Excavation 1ere barrette
(sous boue)

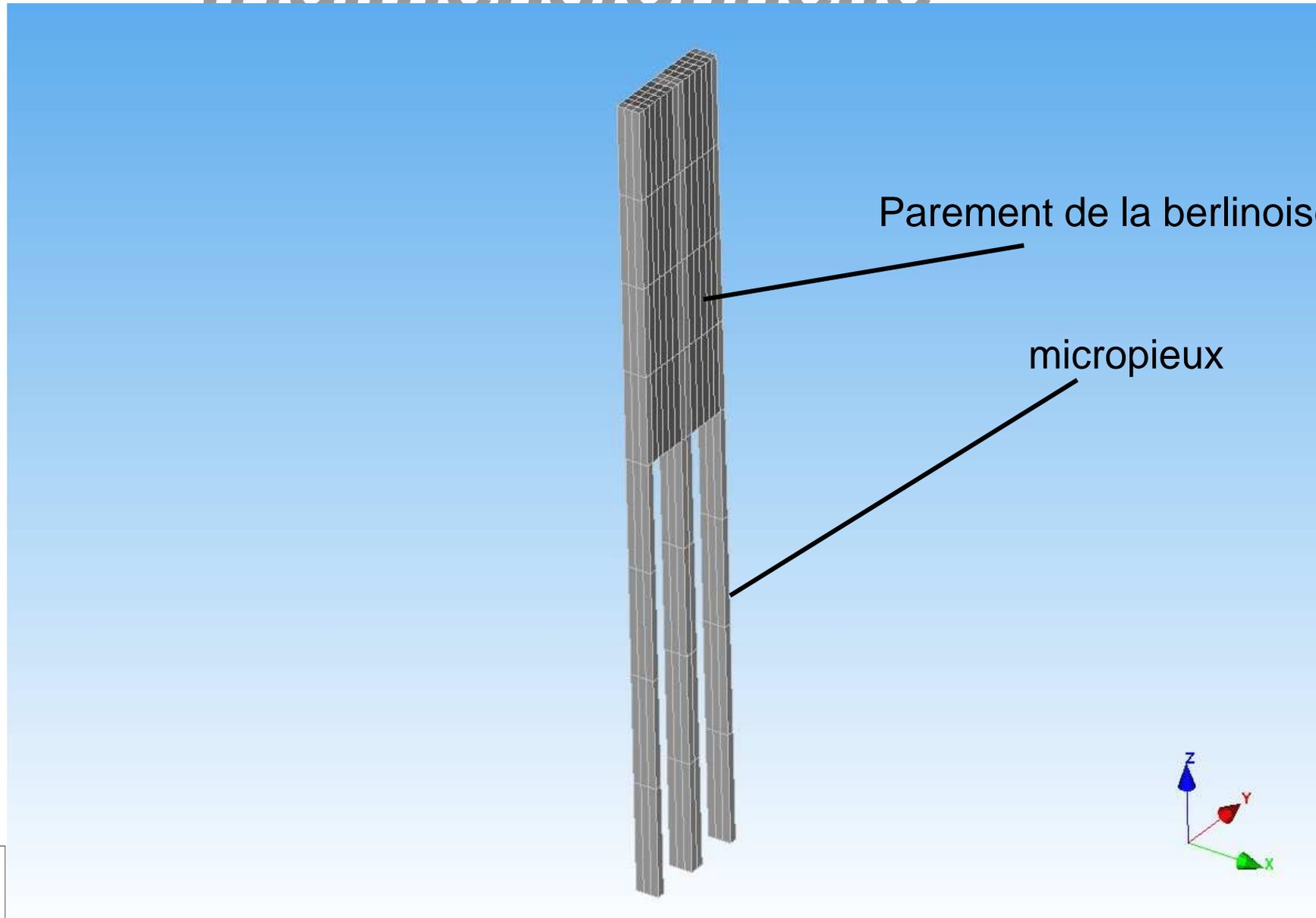
3 – Excavation 2eme barrette

4 – Excavation à la cote
finale de la plate-forme

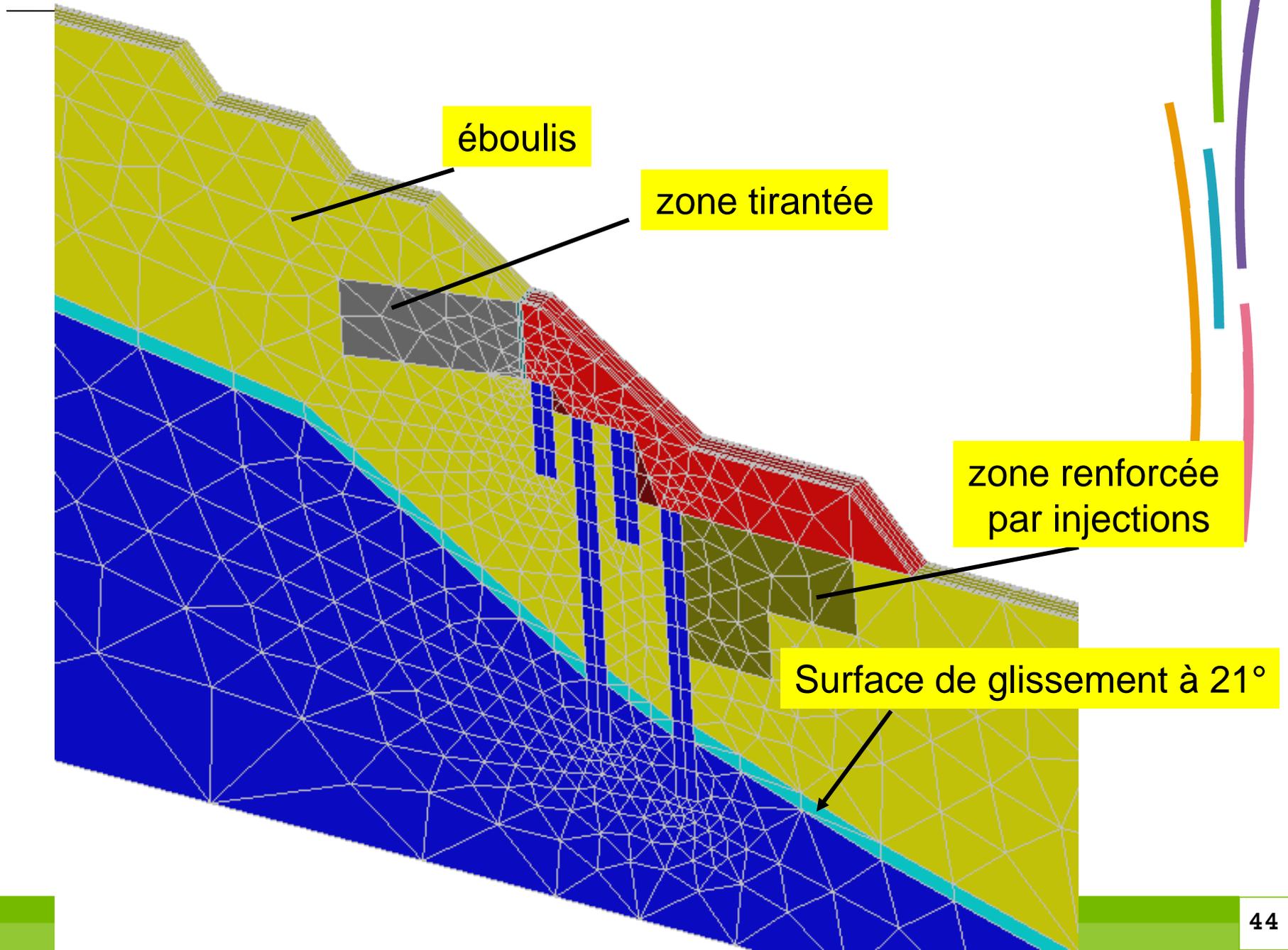
Modélisation tridimensionnelle



Modélisation tridimensionnelle



Prise en compte du glissement dans la modélisation 3D



Résultat de la simulation 3D avec surface de glissement à 21 degrés

Les déformations en fin d'excavation sont nettement plus conséquentes

En tête de paroi, déplacement horizontal de 56mm et tassement de 30mm

Tassement maximal de 37mm situé à 29,4m derrière la berlinoise
(déplacement horizontal de 29mm)

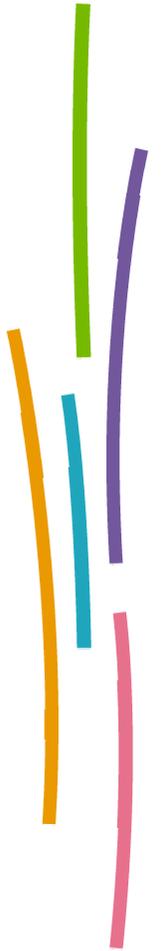
Évolution continue des déplacements lors des différentes phases de réalisation des barrettes et d'excavation

Résultat de la simulation 3D avec surface de glissement à 19 degrés

En fin d'excavation le déplacement horizontal
en tête de paroi atteint 107mm

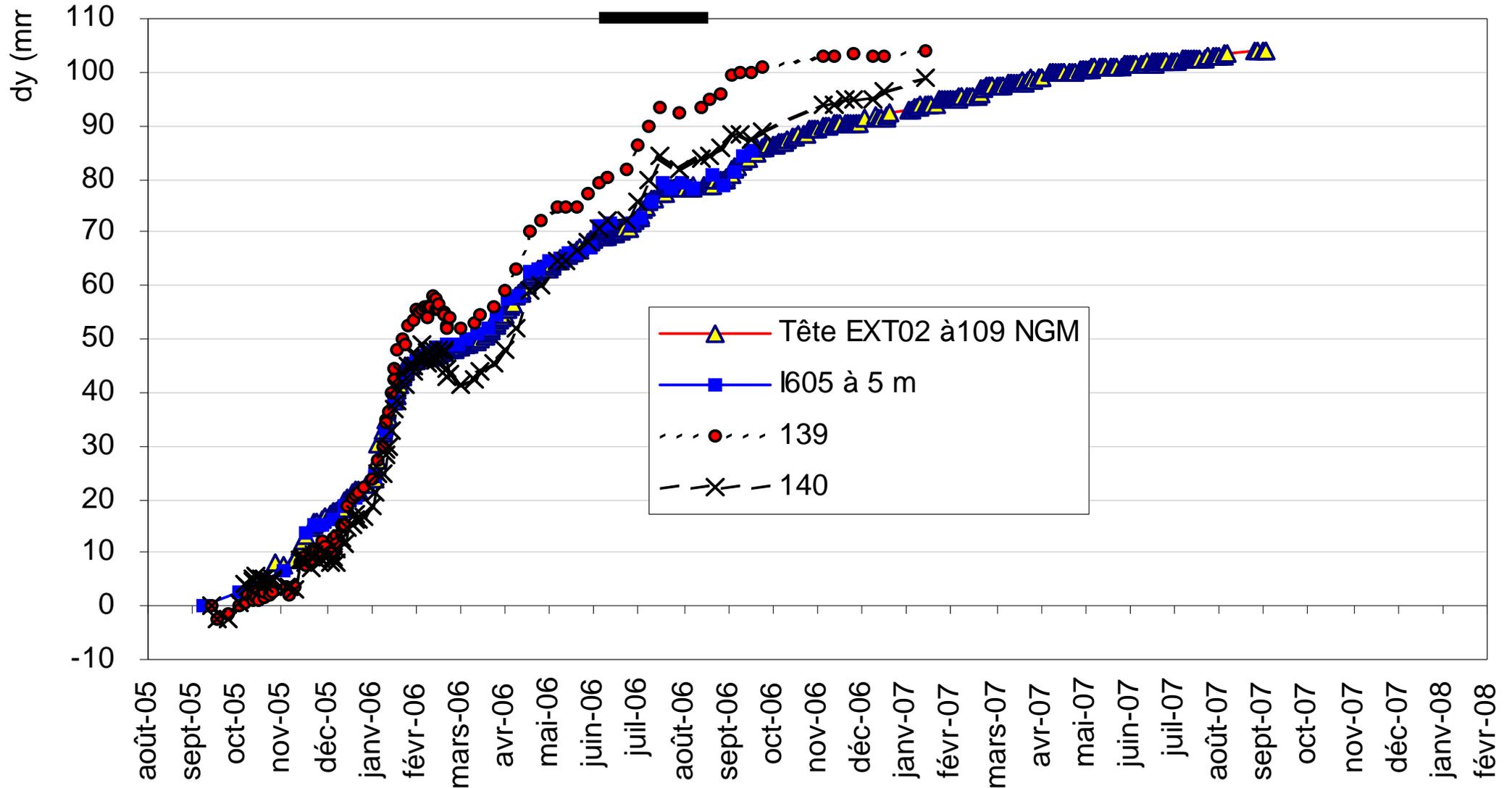
Cela correspond au niveau mesuré
actuellement en fin de travaux.

Étude de sensibilité des paramètres
mécaniques de la couche « savon » : module
et angle de frottement



Extensomètre EXT02

Déplacement de tête recalé / I605



Conclusion

La modélisation 3 D intégrant la surface de glissement historique permet d'expliquer l'ordre de grandeur des déplacements observés

Les mouvements sont principalement provoqués par l'excavation des barrettes dans un contexte de glissement de terrain

La stabilité du versant n'est pas en péril : on remplace du sol par du béton, donc on améliore la stabilité du site après l'avoir perturbée

Les travaux peuvent continuer ...

