

La méthode des éléments finis dans les grands projets : Port 2000 – Le Havre

Ph. JOIGNANT – GPMH
A. BERNARDET – ARCADIS

Sommaire

- Le projet
- L'instrumentation mise en place
- Le cadre de la mission d'Arcadis
- Les modélisations
 - La coupe géotechnique
 - Choix des paramètres géotechniques
 - Présentation du modèle
 - Le phasage de calcul
 - Les premières comparaisons avec les mesures inclinométriques
 - Adaptations du modèle et études paramétriques
- Conclusions

Le projet

Port 2000 consiste à réaliser un port en eau profonde à l'extérieur du port ancien en bordure d'estuaire permettant de recevoir les PC de 14.000 evp - 16.00m de tirant d'eau à toute heure de marée.

Il est constitué de 3 phases de construction:

- phase 1: 4 postes de 350m – achevé,
- phase 2: 6 postes de 350m – achevé,
- phase 3: 2 postes de 350m – à réaliser.

Les postes Ph2-3 présentent une cote de calcul de (-19.00) soit une hauteur libre de 29m pour une hauteur totale de soutènement de 40m.

Le marché phase 2 prévoyait:

- Le calcul de l'ouvrage par la méthode aux modules de réaction,
- La validation du comportement par des calculs aux EF 2D.

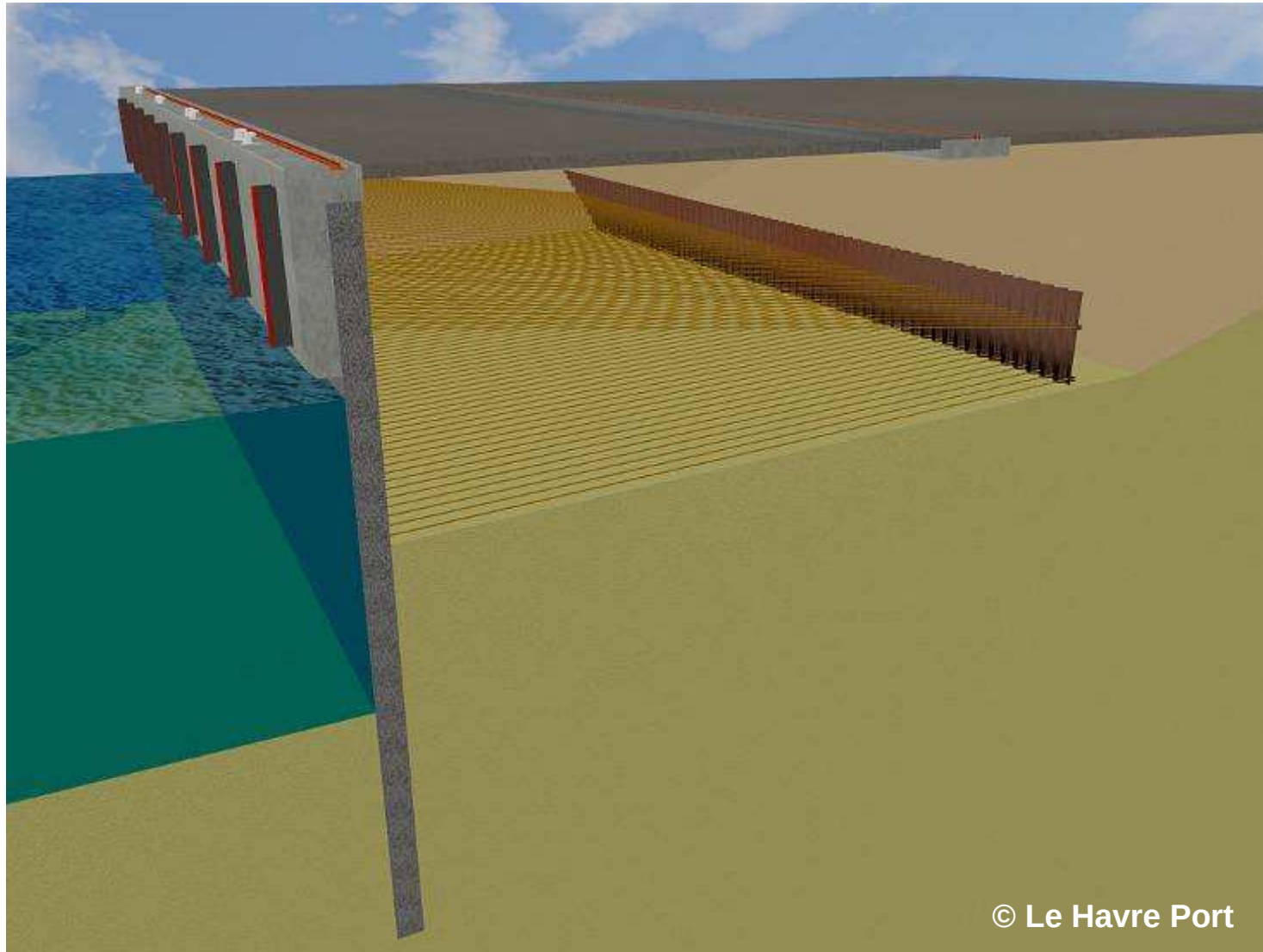
Le projet - Vue du site



Le projet - Vue du site



Le projet – Principe de l'ouvrage



L'instrumentation - Moyens

- Mesures topographiques:
 - altimétrie Leica DNA03 (tol. 2 mm sur 3 km),
 - planimétrie Leica TS30 (tol. 1 mm + 1 ppm).
- Mesures de niveau de nappe:
 - 1 groupe de 3 piézomètres crépinés dans les remblais, sables gris vert et graves tous les 350 m – cellule de pression Orphéus mini
- Mesure extensométrique sur tirants:
 - Double couple de jauges à corde vibrante sur 4 tirants,
 - Mesure manuelle puis par centrale d'acquisition.
- Mesure inclinométrique:
 - 37 panneaux instrumentés (1/10),
 - Ancrage à 20 m puis 30 m sous le pied de paroi.

L'instrumentation - Constatations

- Topographie: Nécessité de valider les points de référence (3 stations à 600 m + 6 à 100 m de la magistrale vérifiées tous les 6 mois).
- Extensométrie:
 - Nécessité d'avoir une certaine tension pour effectuer l'état 0,
 - Tensions absolues difficilement interprétables,
 - Perte des capteurs,
 - *Cycle d'effort en phase avec la marée.*
- Inclinométrie:
 - Ancrage parfois insuffisant,
 - Prolongement des tubes au travers du couronnement difficile,
 - Mesures devant être faites à marée basse,
 - *Effet retard dû à la fouille 3D,*
 - *Visualisation du déplacement du pied de paroi.*

Le cadre de la mission d'Arcadis :

- Mission d'assistance à la maîtrise d'œuvre dans le cadre d'un marché à bons de commande pour des prestations ponctuelles

Elle a consisté à :

- Faire une analyse critique des documents de l'entreprise qui lui ont été soumis;
- Mener des contre-calculs suivant sa propre approche

Dans le cadre des calculs de validation du comportement des structures par des calculs aux éléments finis 2D :

- Proposer des paramètres pour la loi de comportement retenue ;
- Elaborer un modèle éléments finis 2D ;
- Comparer les résultats du modèle à ceux issus de l'auscultation ;
- Adapter le phasage pour correspondre aux conditions réelles et analyser l'influence de certains paramètres.

Les modélisations

- Elles ont été menées à l'aide du logiciel PLAXIS.
- La loi de comportement retenue pour les sols est la loi « hardening soil » de Plaxis;
- Elles ont porté sur deux coupes de calcul :
 - au droit de l'inclinomètre PA 045 sur le poste 6 ;
 - au droit de l'inclinomètre PA 259 sur le poste 10.
- Dans les deux cas, la paroi est réalisée suivant la solution de base
⇒ même géométrie (paroi moulée, parois aux coulis, niveaux de terrassement, position des tirants, ...)
- Les différences portent sur :
 - la stratigraphie ;
 - certains paramètres géotechniques.
 - le comportement observé de la paroi

La coupe géotechnique

La succession des terrains est la suivante :

- des remblais mis en place par voie hydraulique puis terrestre
- des dépôts récents
- des sables gris verts divisés en
 - des sables gris-vert supérieurs
 - des sables gris-vert inférieurs
- un niveau de silts inférieurs (présents à l'est , ils sont absents à l'ouest du projet)
- une couche de graves
- le substratum marno-calcaire représenté par l'Argile de Villerville

Choix des paramètres géotechniques

- Les paramètres de la loi « hardening soil » de PLAXIS peuvent se répartir en trois groupes :

- des paramètres d'état initial
 γ , K_0 , OCR
- des paramètres de résistance
 c' , ϕ'

reconduction des valeurs de
ces paramètres retenues
pour les calculs aux
coefficients de réaction

- des paramètres de déformabilité
 E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} , m , R_f , v_{ur} , ψ

calage sur pressiomètres,
essais CD ou
pénétrromètres

Choix des paramètres - Calage sur les essais CD

- Simulation en deux phases de l'essai triaxial sur modèle axisymétrique :
 - consolidation sous contrainte isotrope
 - augmentation du déviateur
- Traitement individualisé par éprouvette
- Les paramètres de résistance sont déterminés à partir du déviateur à la rupture de l'éprouvette

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' + 2c \cos \varphi'$$

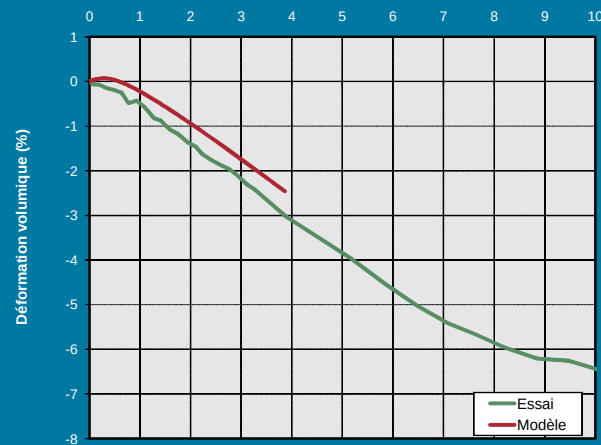
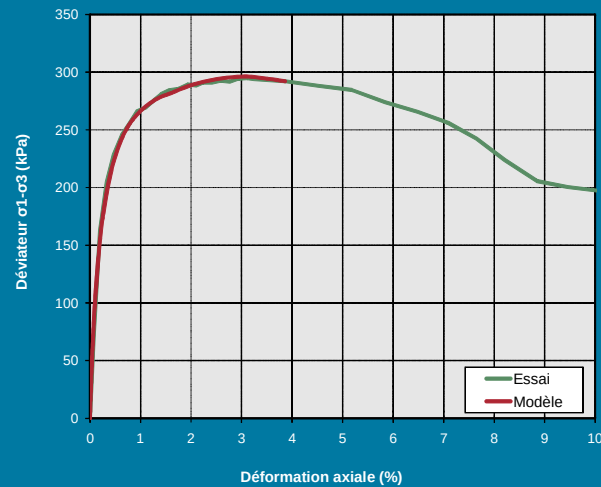
- Ajustement par tâtonnement des paramètres de déformabilité pour retrouver les courbes effort/déformation : $E_{50}^{ref} - E_{oed}^{ref} - \psi - m - R_f$
- Les paramètres (v_{ur} et E_{ur}^{ref}) sont pris à leur valeur par défaut (0,2 et $3 \cdot E_{50}^{ref}$)

Quelques exemples de calage sur les essais CD

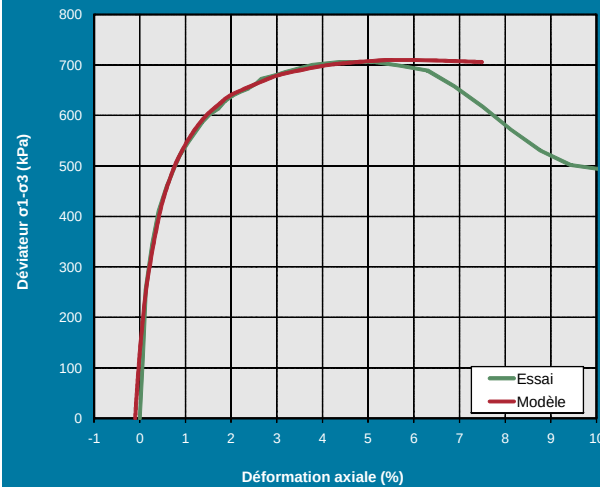
SONDAGE n°: Sca 2302 - Echantillon EIGT2 - Profondeur de 7.50 m à 8.50 m

Description : Sable gris vert à gris bleu moyen quartzueux

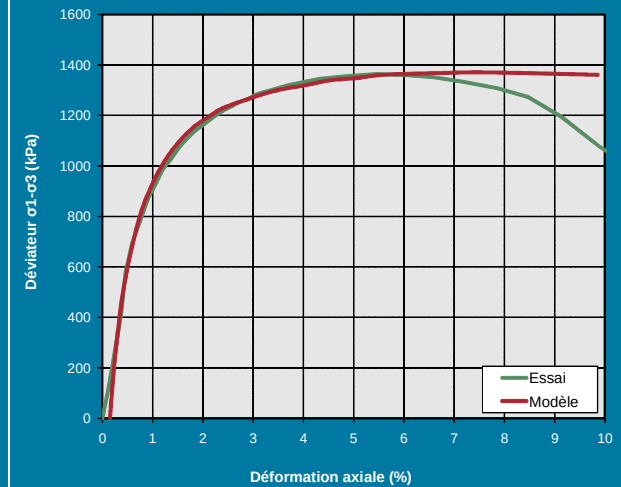
Paramètres du calage
EPROUVETTE n°1 : $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$
E50ref = 112 MPa $c' = 0 \text{ kPa}$
Eoedref = 106.2 MPa $\phi' = 48^\circ$
Eurref = 336 MPa $\psi = 17^\circ$
m = 0.5 Rf = 0.95



Paramètres du calage
EPROUVETTE n°2 : $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$
E50ref = 70 MPa $c' = 0 \text{ kPa}$
Eoedref = 79.01 MPa $\phi' = 44.4^\circ$
Eurref = 210 MPa $\psi = 15^\circ$
m = 0.5 Rf = 0.93



Paramètres du calage
EPROUVETTE n°3 : $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$
E50ref = 90 MPa $c' = 0 \text{ kPa}$
Eoedref = 94.64 MPa $\phi' = 43.8^\circ$
Eurref = 270 MPa $\psi = 15^\circ$
m = 0.5 Rf = 0.94



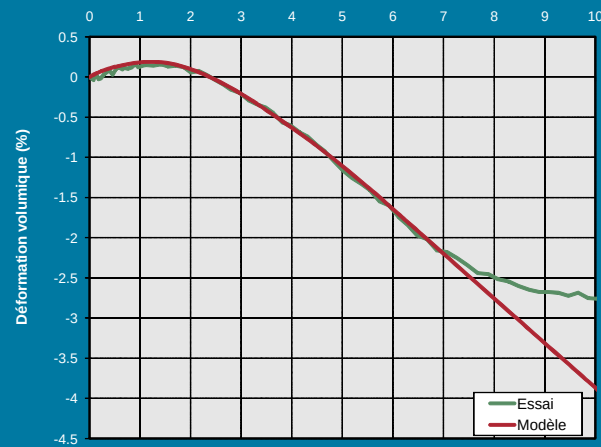
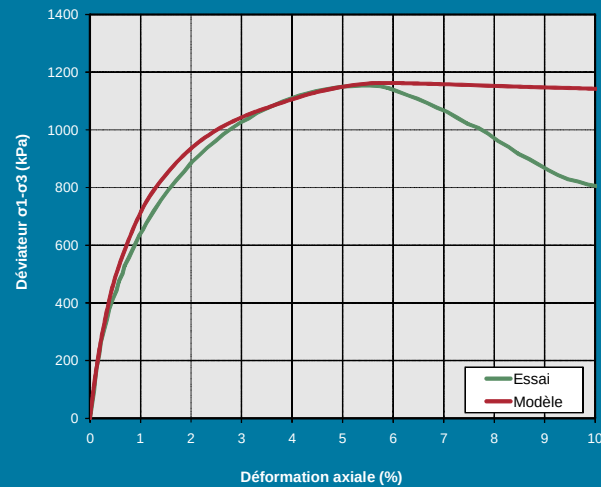
Quelques exemples de calage sur les essais CD

SONDAGE n°: Sca 2300 - Echantillon EIGT6 - Profondeur de 30.50 m à 31.15 m

Description : Sable fin quartzeux

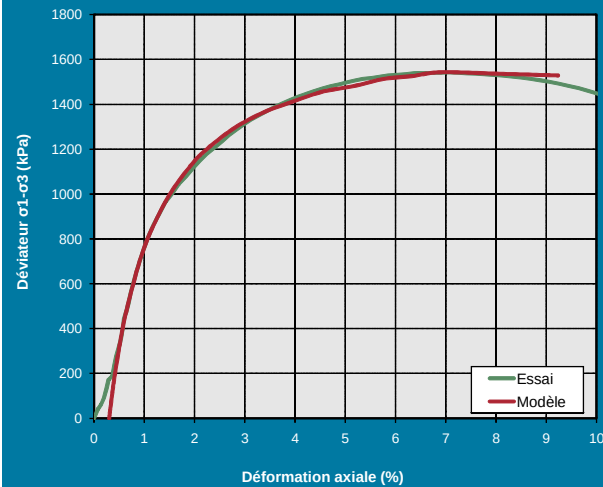
EPROUVETTE n°1 :
 $\sigma_3 = 300$ kPa

Paramètres du calage
E50ref = 45 MPa $c' = 0$ kPa
Eoedref = 66 MPa $\phi' = 41^\circ$
Eurref = 135 MPa $\psi = 12.5^\circ$
m = 0.6 Rf = 0.88



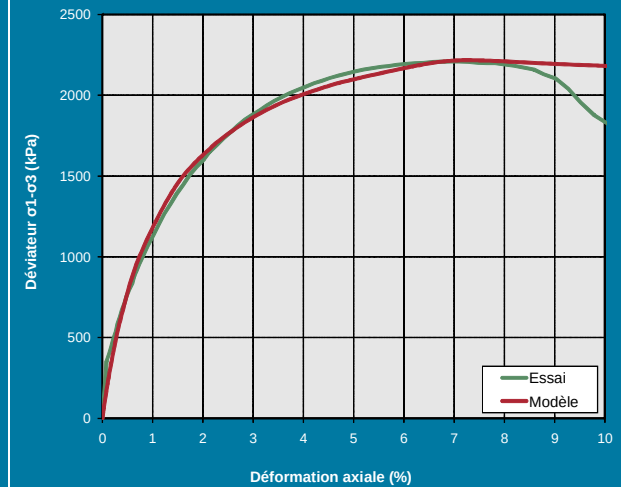
EPROUVETTE n°2 :
 $\sigma_3 = 520$ kPa

Paramètres du calage
E50ref = 40 MPa $c' = 0$ kPa
Eoedref = 49.9 MPa $\phi' = 36.5^\circ$
Eurref = 120 MPa $\psi = 13.5^\circ$
m = 0.6 Rf = 0.9



EPROUVETTE n°3 :
 $\sigma_3 = 690$ kPa

Paramètres du calage
E50ref = 40 MPa $c' = 0$ kPa
Eoedref = 40 MPa $\phi' = 37.8^\circ$
Eurref = 120 MPa $\psi = 9.5^\circ$
m = 0.6 Rf = 0.88

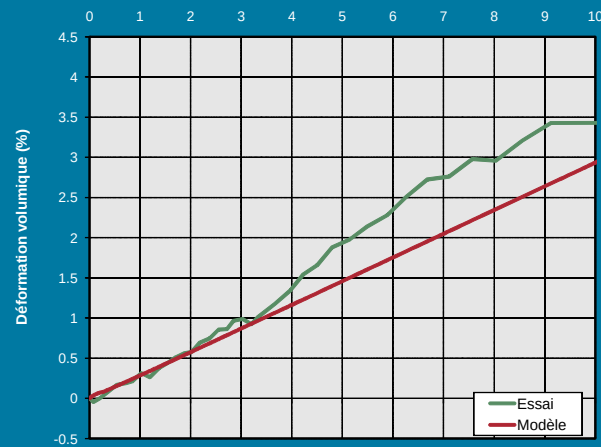
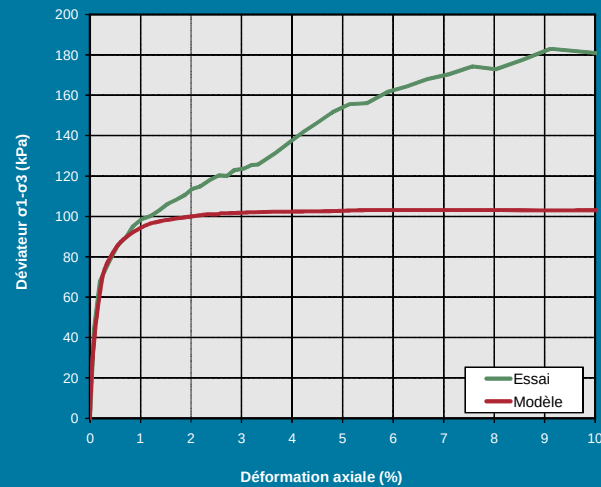


Quelques exemples de calage sur les essais CD

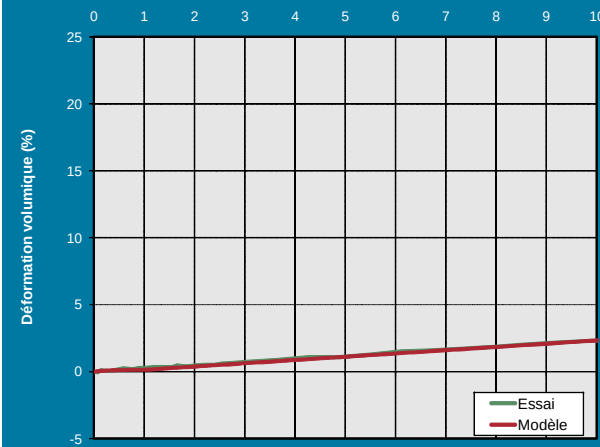
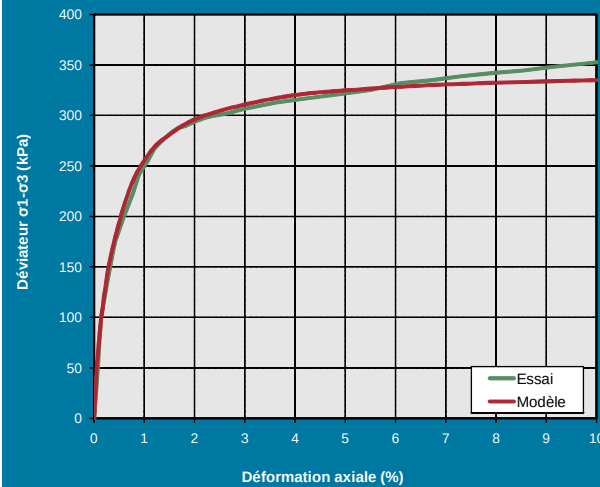
SONDAGE n°: Sca 2301 - Echantillon EIGT4 - Profondeur de 11.10 m à 11.75 m

Description : Sable fin à moyen gris vert à gris bleu siliceux

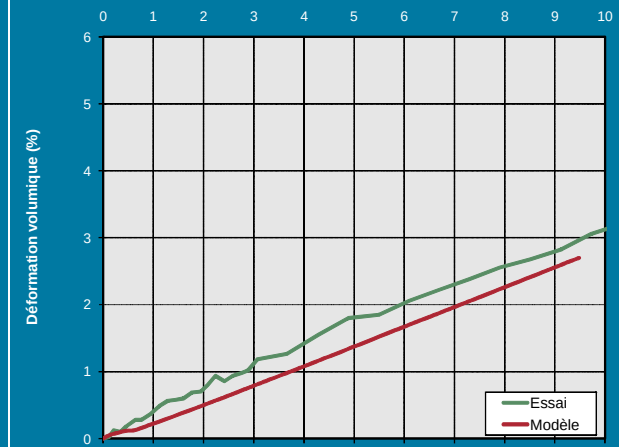
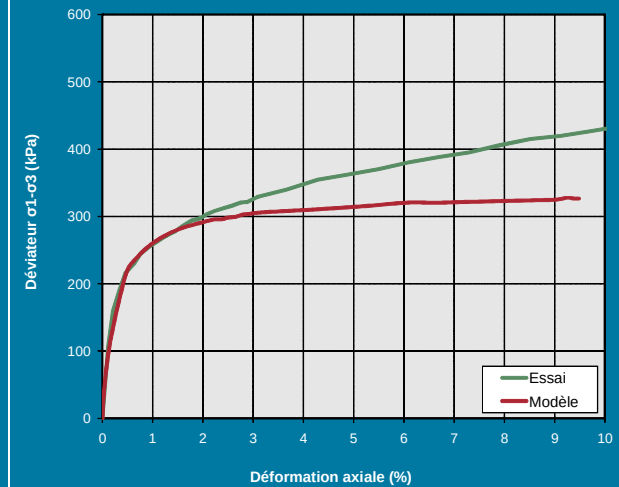
Paramètres du calage
EPROUVETTE n°1 : $\sigma_3 = 160$ kPa
E50ref = 27 MPa $c' = 10$ kPa
Eoedref = 35 MPa $\phi' = 11.5^\circ$
Eurref = 81 MPa $\psi = -10^\circ$
m = 0.9 Rf = 0.99



Paramètres du calage
EPROUVETTE n°2 : $\sigma_3 = 325$ kPa
E50ref = 20 MPa $c' = 10$ kPa
Eoedref = 27 MPa $\phi' = 19^\circ$
Eurref = 60 MPa $\psi = -8^\circ$
m = 0.9 Rf = 0.99



Paramètres du calage
EPROUVETTE n°3 : $\sigma_3 = 540$ kPa
E50ref = 15 MPa $c' = 10$ kPa
Eoedref = 22 MPa $\phi' = 12.5^\circ$
Eurref = 45 MPa $\psi = -10^\circ$
m = 0.9 Rf = 0.99



Choix des paramètres - Calage sur les pénétromètres

- Basé sur une corrélation proposée par Lunne et Christoffersen entre la résistance de pointe q_c et le module oedométrique M_o :
 - $0 < q_c < 10 \text{ MPa}$ $M_o = 4 q_c$
 - $10 < q_c < 50 \text{ MPa}$ $M_o = 20 + 2 q_c$
 - $q_c > 50 \text{ MPa}$ $M_o = 120 \text{ MPa}$

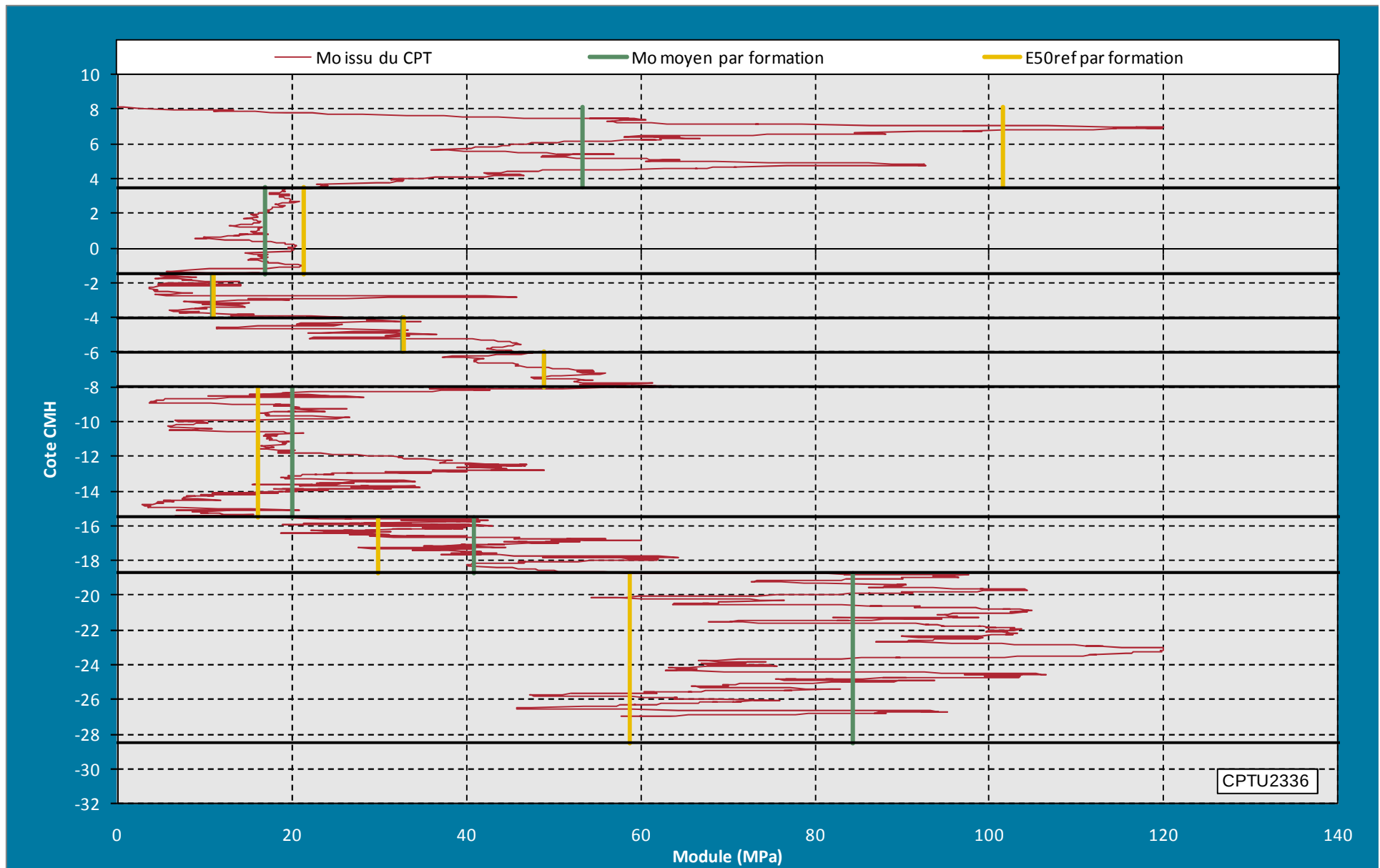
- Le module E_{50} est estimé en utilisant la relation de l'élasticité linéaire :

$$E_{50} = M_o \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

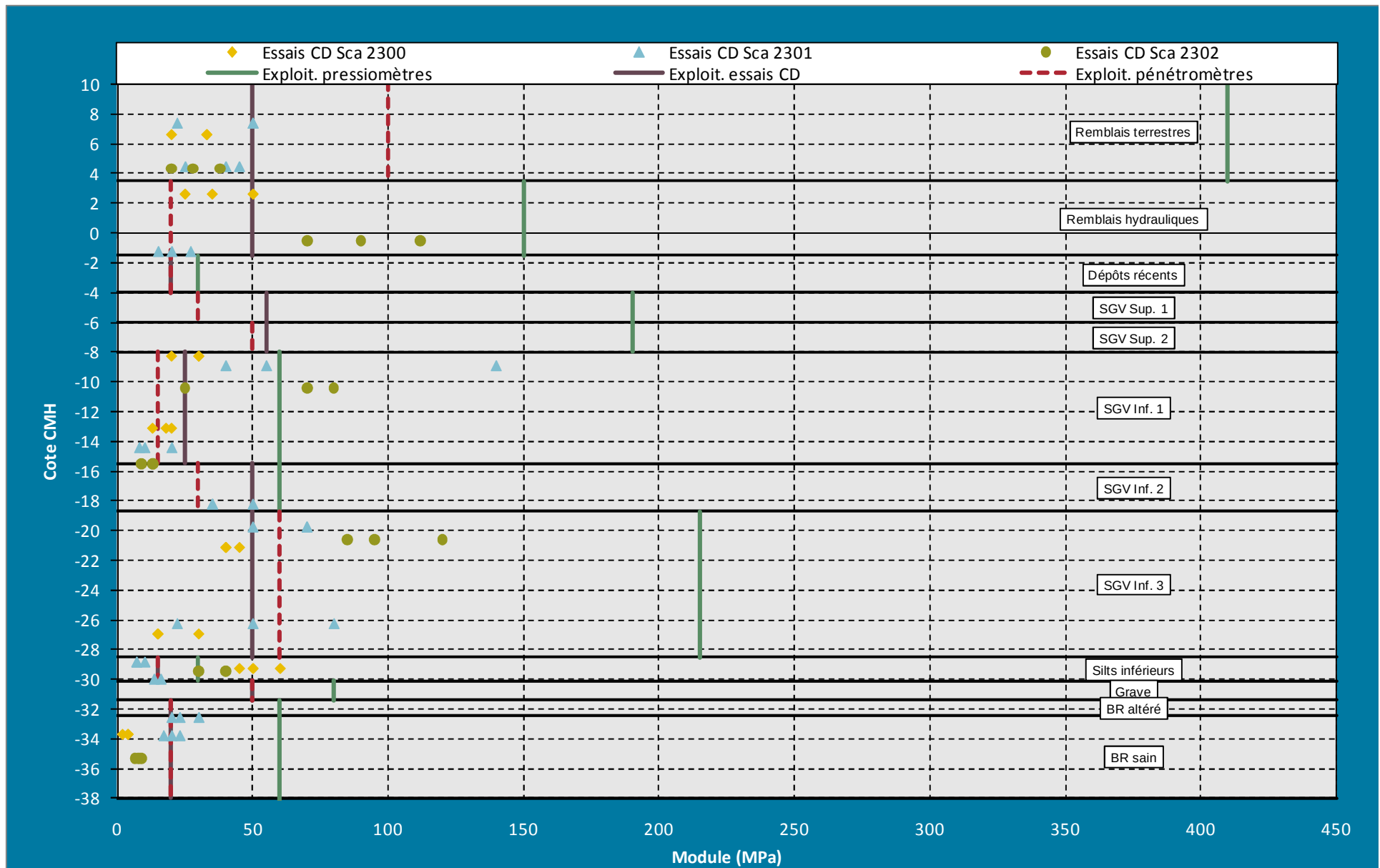
- et le module E_{50}^{ref} en utilisant la loi de dépendance du module E_{50} avec la contrainte σ'_3 issue du manuel PLAXIS :

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cdot \cos \varphi' - \sigma'_3 \cdot \sin \varphi'}{c \cdot \cos \varphi' + p^{\text{ref}} \cdot \sin \varphi'} \right)^m$$

Exemple de calage sur un pénétromètre

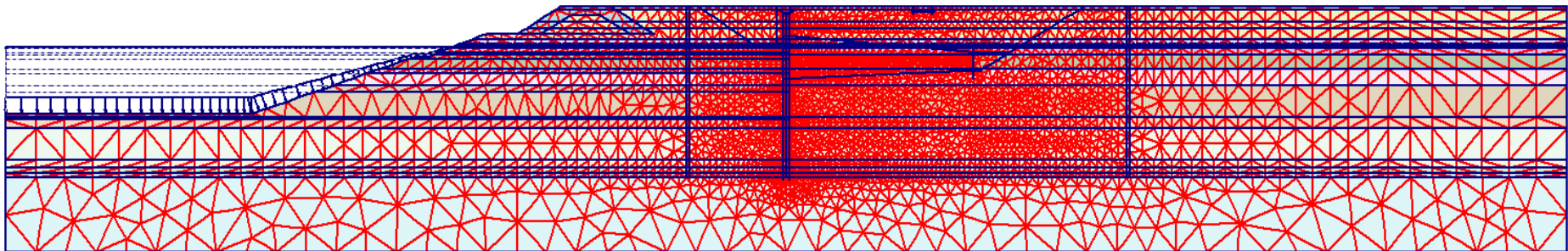


Synthèse des calages du module E_{50}^{ref} (poste 6)



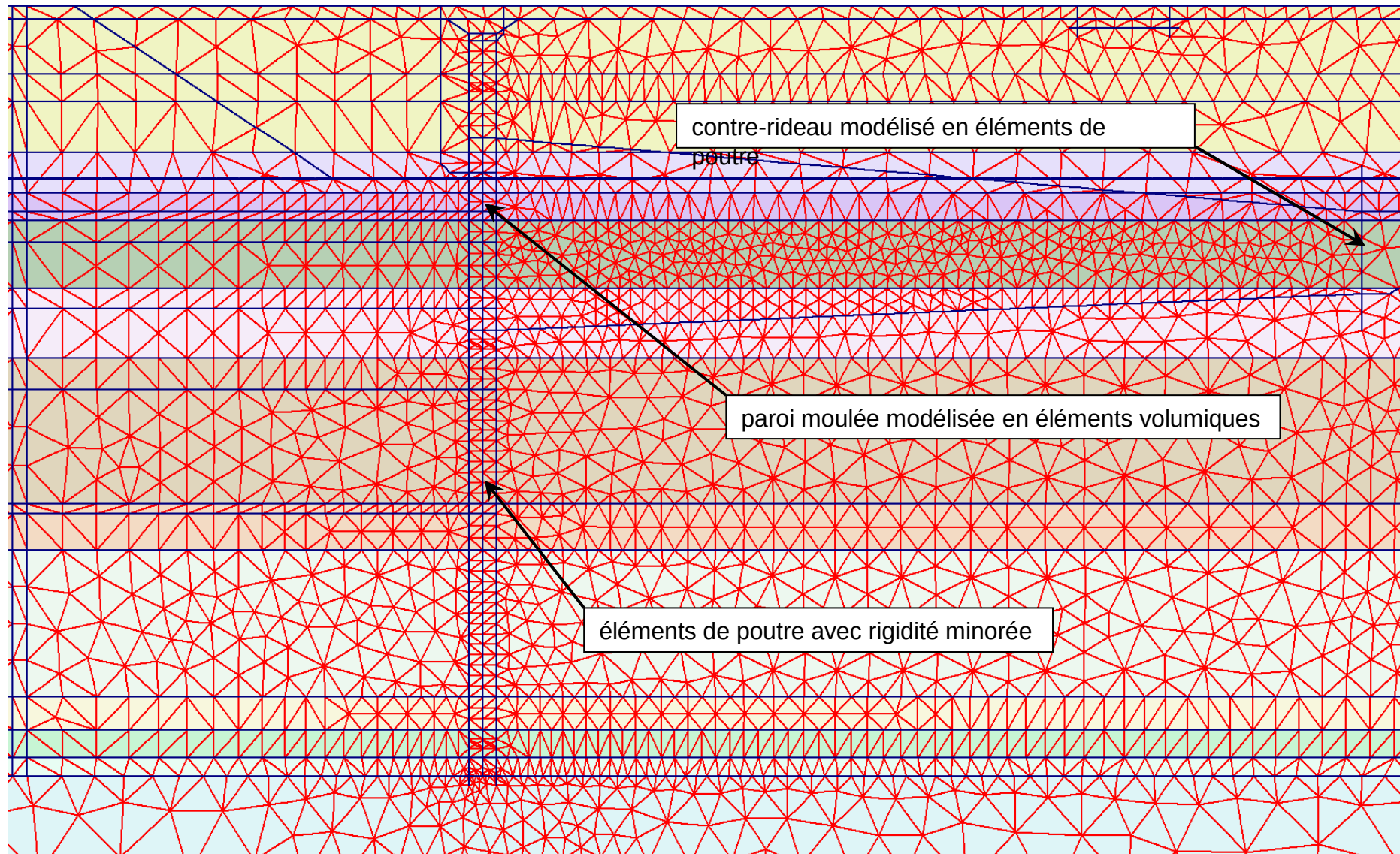
Le modèle - Vue générale

- Extensions horizontales : 200 m de part et d'autre de la paroi
- Extension verticale limitée au TN vers le haut et à 20 m environ sous le toit du substratum vers le bas
- Éléments quadratiques (triangles à 6 nœuds)
- Éléments d'interface entre le sol et la paroi, ainsi qu'entre le sol et le contre-rideau arrière



- Les conditions aux limites sont les conditions standard :
 - déplacement horizontal nul sur les bords latéraux
 - déplacement total nul sur la base du modèle

Le modèle – Détail au droit de la paroi



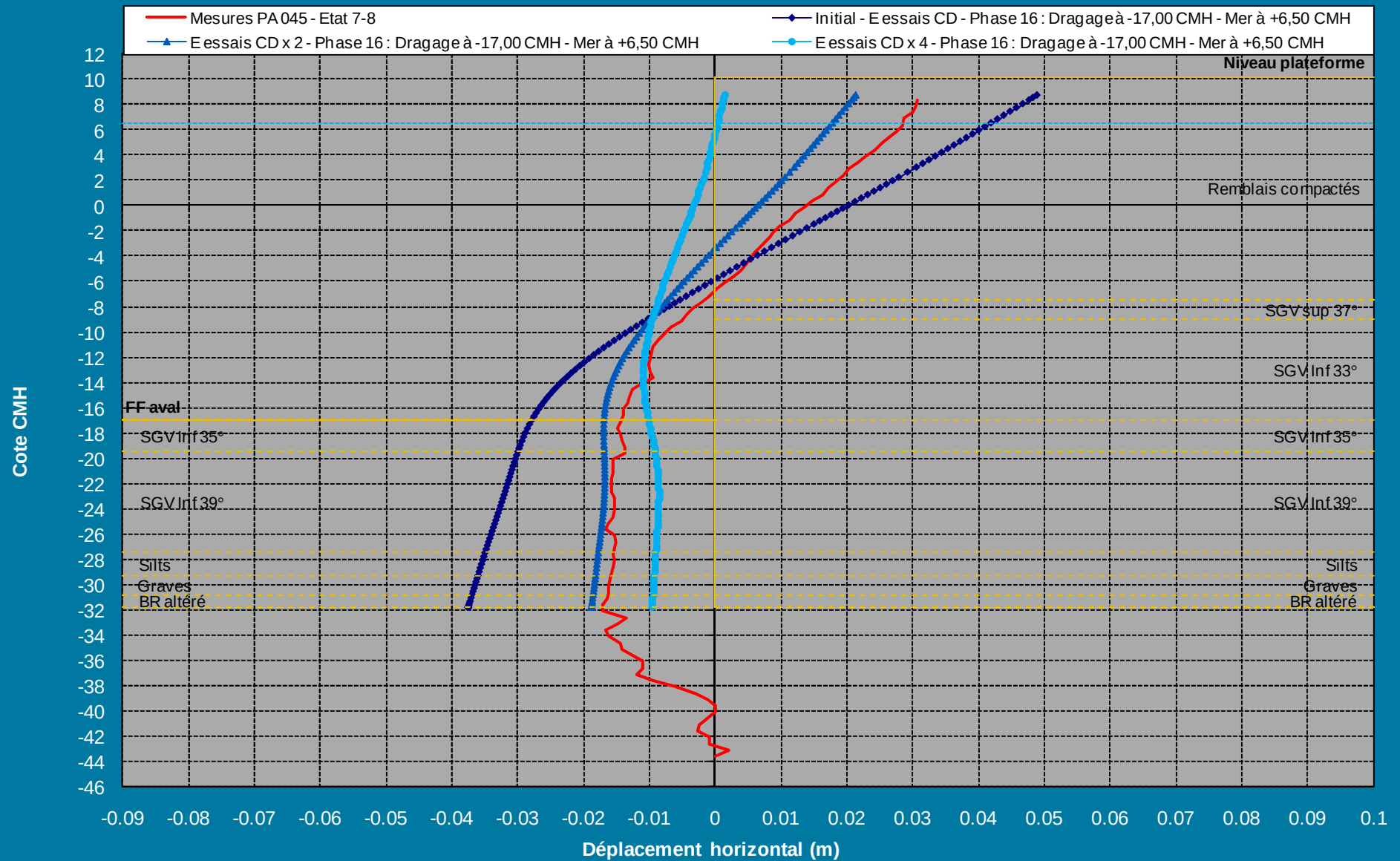
Le phasage de calcul

- Les grandes étapes de construction sont les suivantes :
 - Pré-terrassement ($\approx +9,00$ CMH)
 - Réalisation de la paroi moulée et des parois au coulis
 - Pompages d'épuisement de la nappe
 - Terrassement à l'avant de la paroi côté mer ($0,00$ CMH)
 - Bétonnage du masque
 - Terrassement à l'arrière de la paroi côté terre ($-7,50$ CMH)
 - Pose du premier lit de tirants
 - Remblaiement côté terre ($+3,00$ CMH)
 - Pose du deuxième lit de tirants
 - Fin du remblaiement côté terre ($+10,20$ CMH) et fin des pompages
 - Dragage côté mer ($-17,00$ ou $-17,50$ CMH)

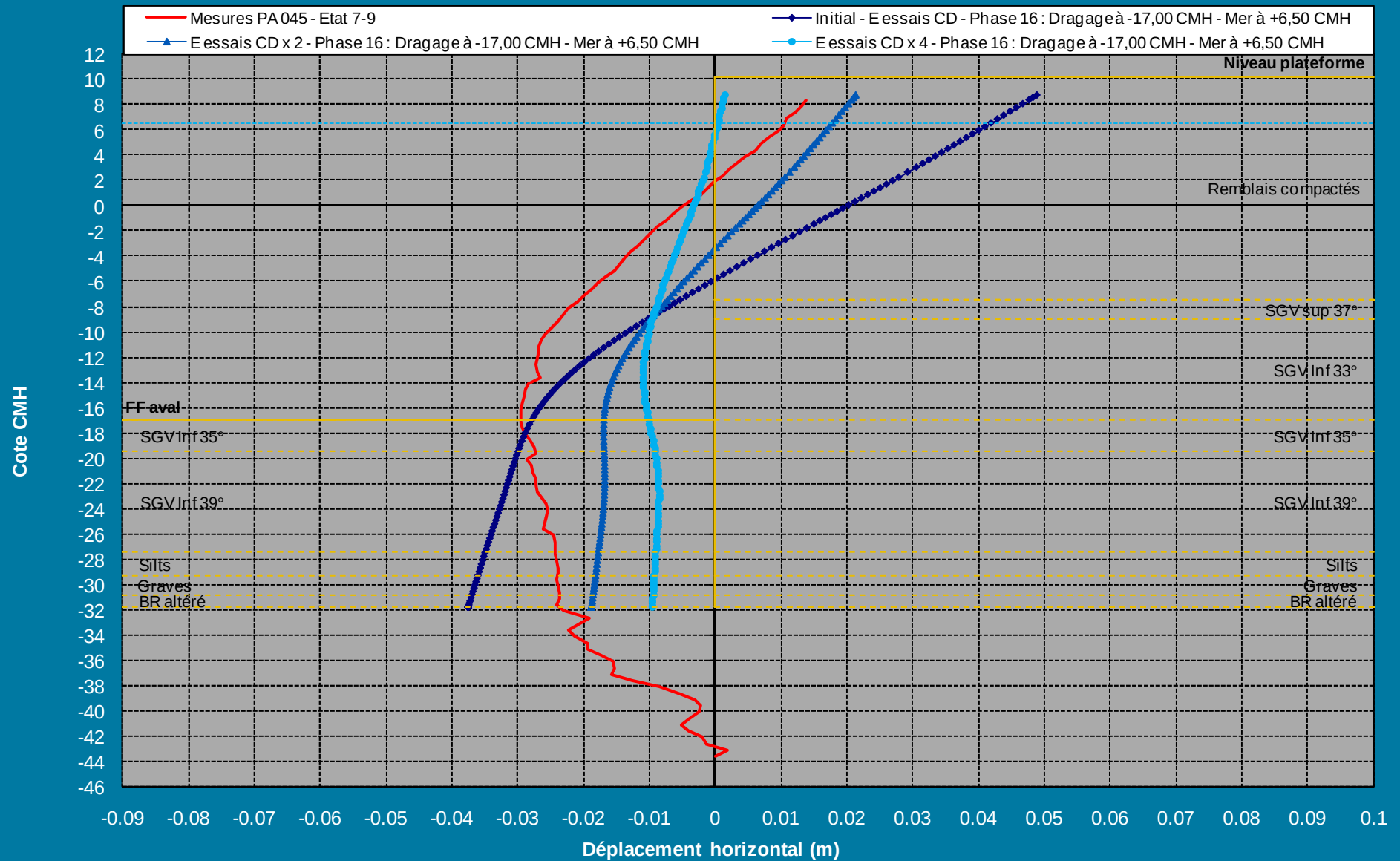
Premières approches et premières comparaisons

- Le phasage de calcul est presque entièrement mené en considérant pour la marée un niveau moyen (y compris à l'état initial)
- Comportement drainé pour les formations sableuses
- Comportement non drainé à court terme pour les formations fines (dépôts récents, silt inférieurs, argiles de Villerville)
- Dans l'optique des comparaisons avec les mesures, les hypothèses « réalistes » sont privilégiées :
 - le niveau de dragage pris en compte est le niveau réel
 - il n'est pas pris en compte de réduction des paramètres d'interface ($R_{\text{inter}} = 1$)
- Etude paramétrique sur l'ordre de grandeur des modules
- Les premières comparaisons avec les mesures inclinométriques ont mis l'accent sur les différences entre les conditions réelles au moment des mesures et celles prises en compte dans les calculs

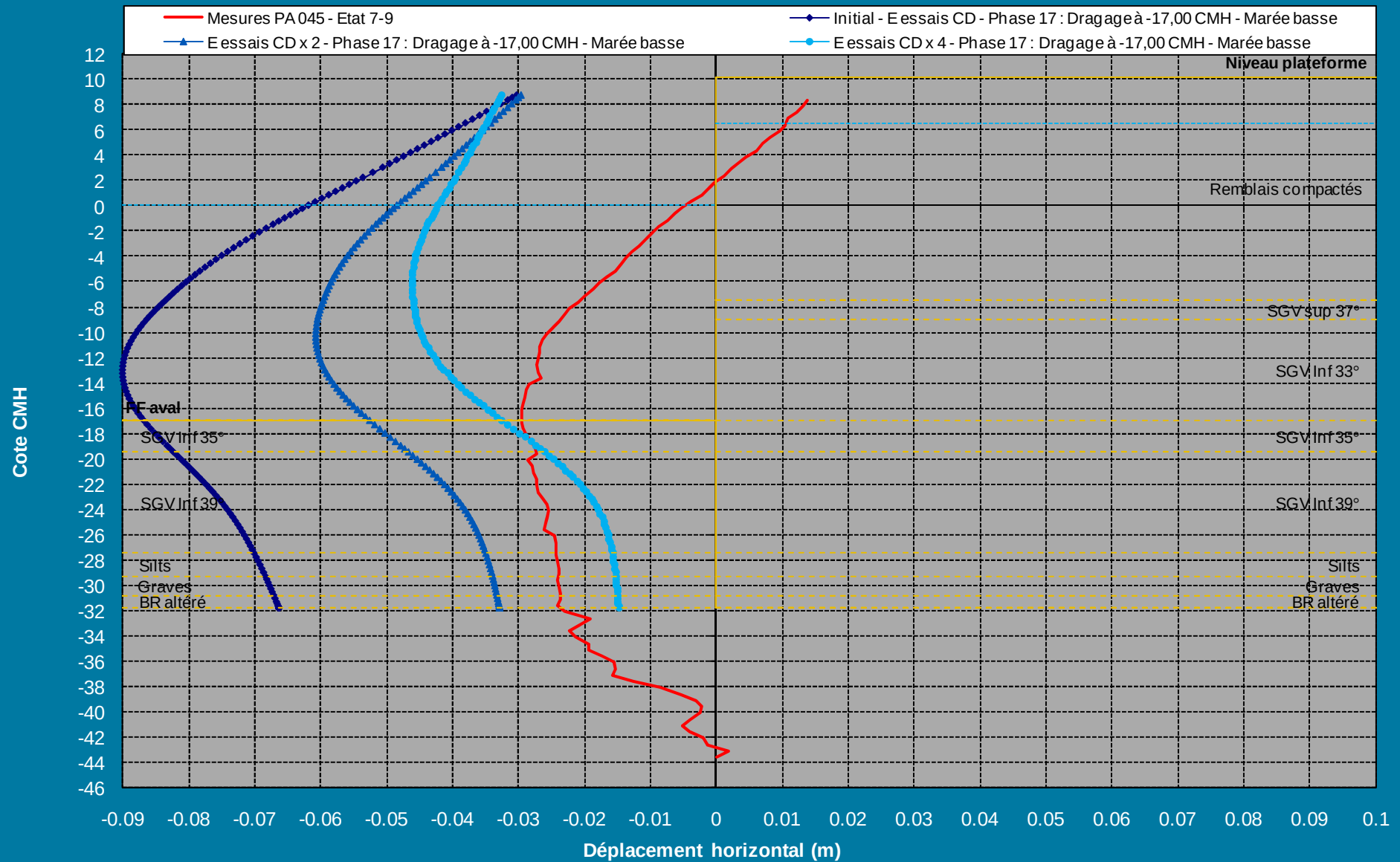
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



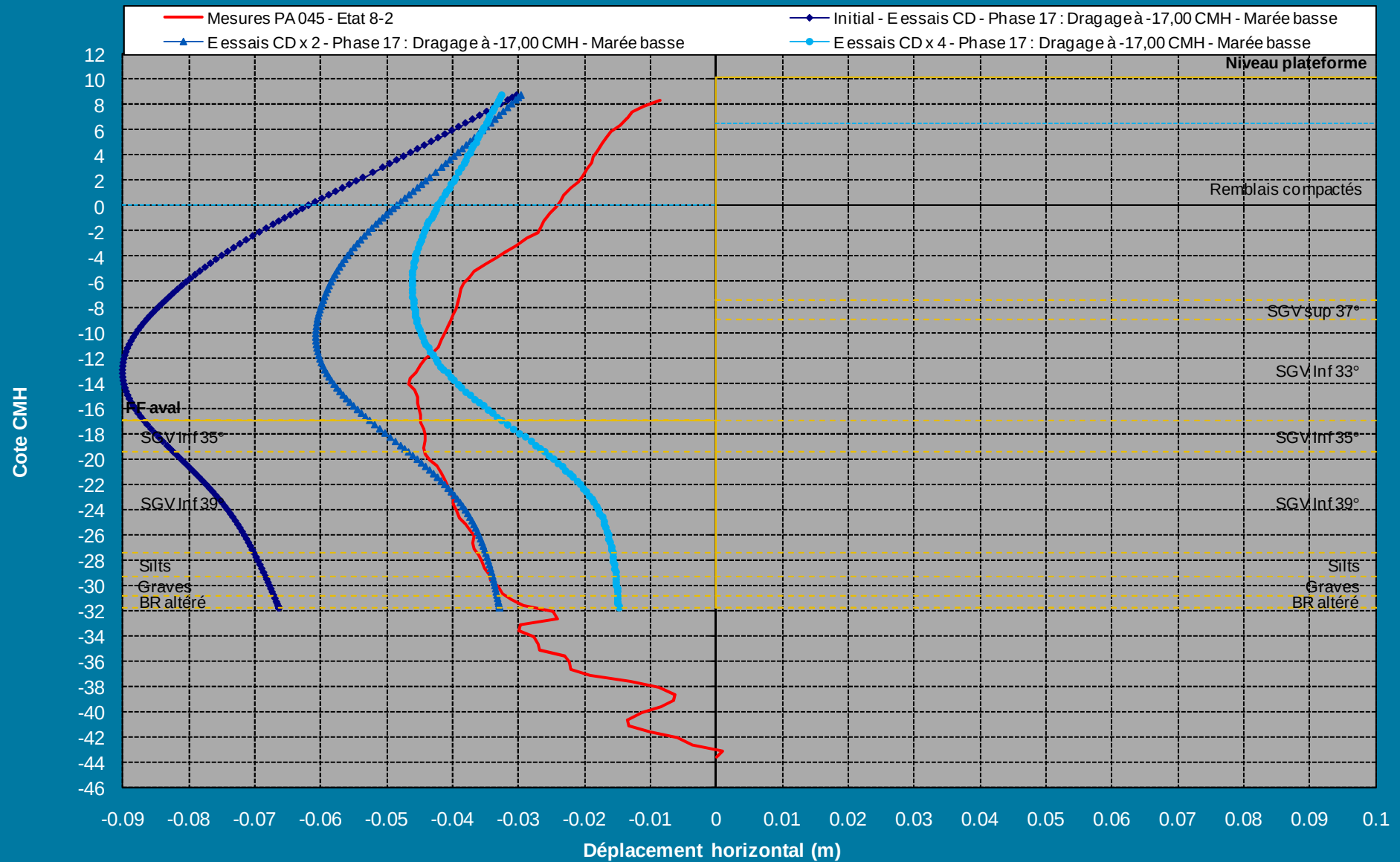
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



Adaptations du modèle de calcul

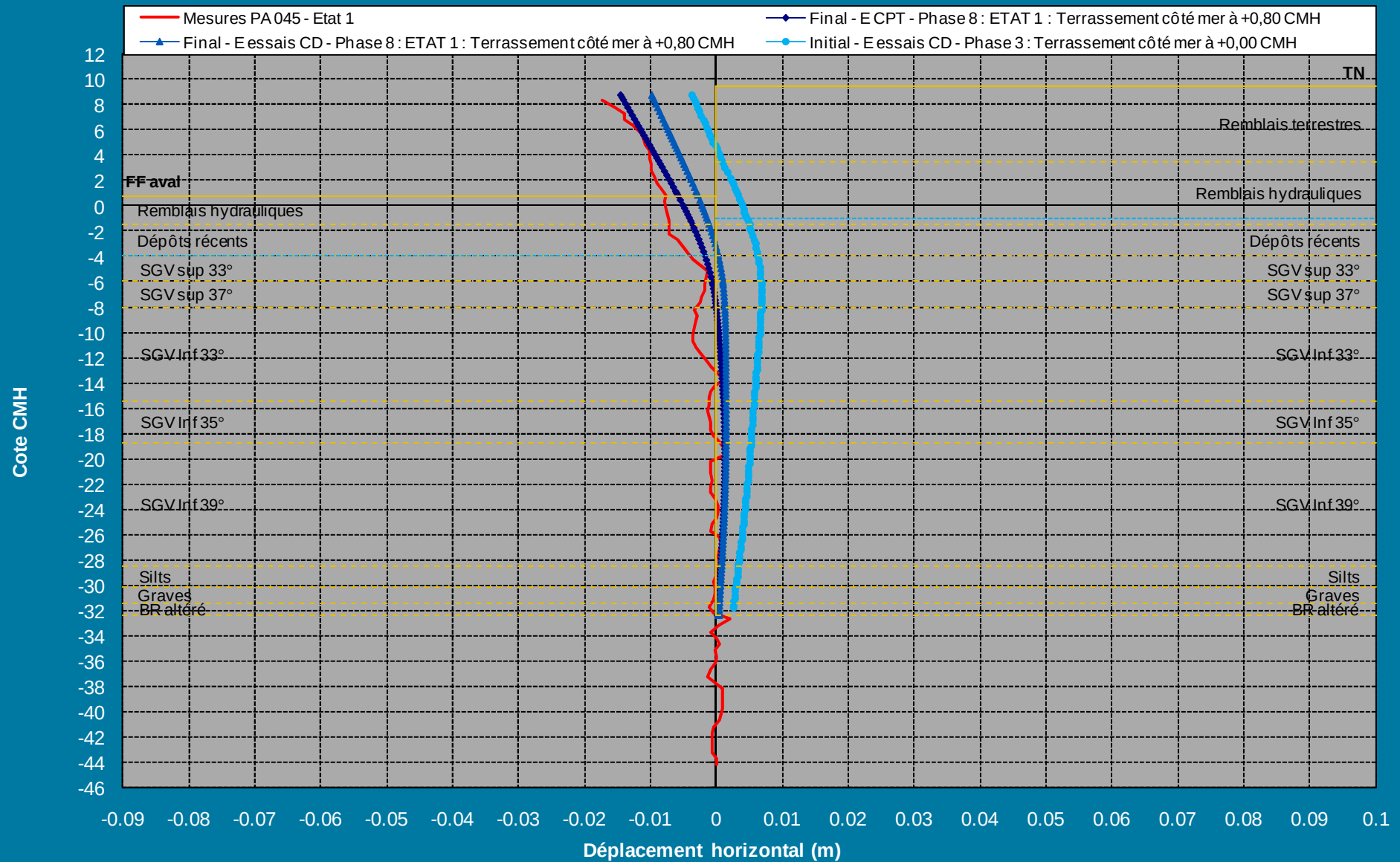
Compte tenu des premières comparaisons avec les mesures, on a cherché à améliorer le « réalisme » du modèle :

- La stratigraphie a été recalée sur les données des sondages les plus proches des sections de calcul
- Les adaptations du phasage ont porté sur :
 - la prise en compte des niveaux réels de terrassement ou de dragage ainsi que des niveaux réels de rabattement ou de marée au moment des mesures
 - les niveaux de marée : tout le phasage de construction est mené à marée basse (y compris à l'état initial)
 - des cycles marée haute / marée basse sont insérés dans le phasage

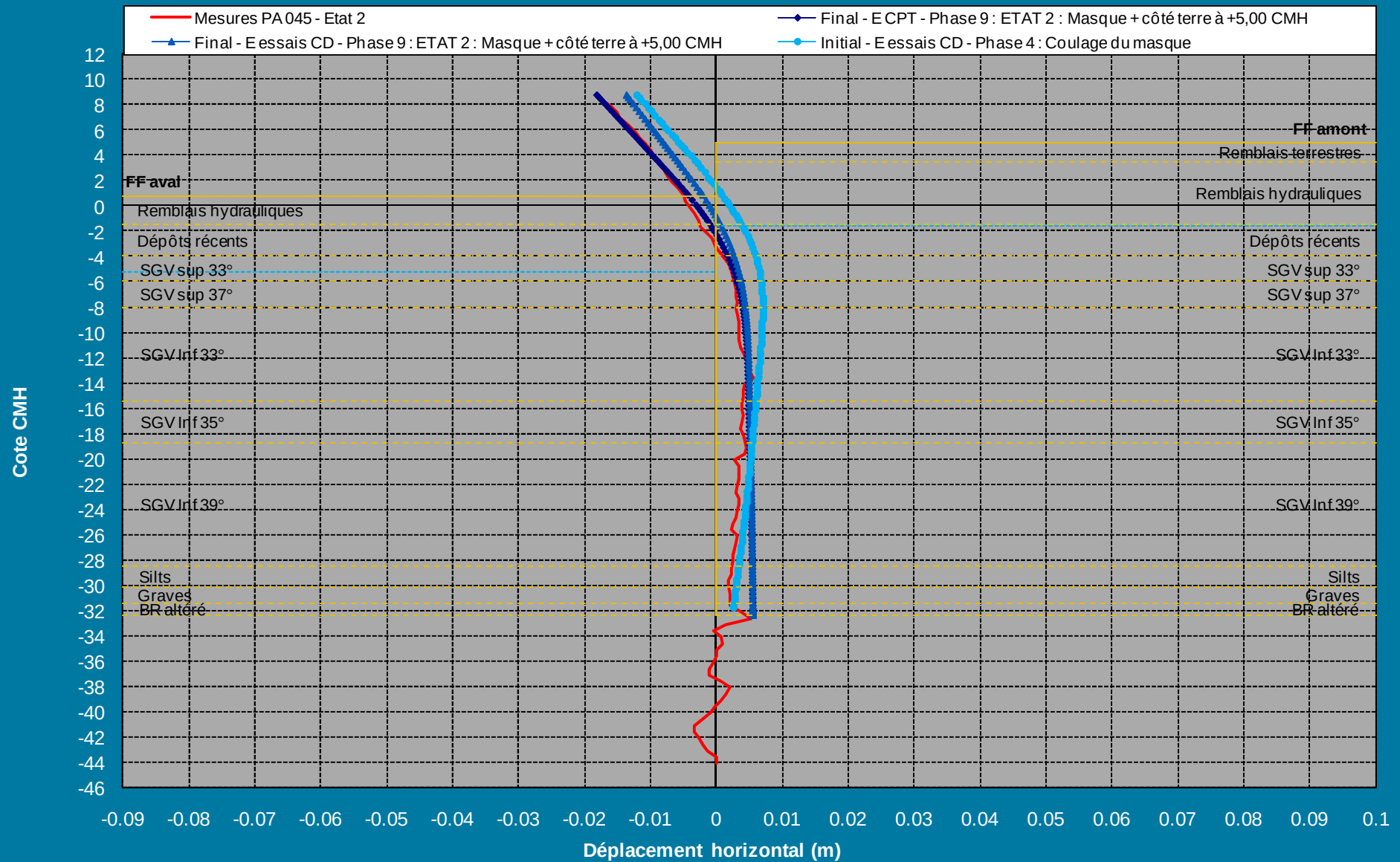
Les études paramétriques – Poste 6

- Les adaptations du modèle ont été appliquées par étapes :
 - l'adaptation du phasage aux conditions réelles
 - l'adaptation de la stratigraphie
- Analyse de l'influence des paramètres suivants :
 - prise en compte d'un frottement entre le sol et les tirants
⇒ modèle 2D non adapté
 - influence du ratio $E_{ur}^{ref}/E_{50}^{ref}$: de 3 initialement, il est majoré à 6, dans un premier temps, sur l'ensemble des formations puis, dans un deuxième temps, seulement aux formations sableuses
 - calage des modules sur le pénétromètre disponible le plus proche

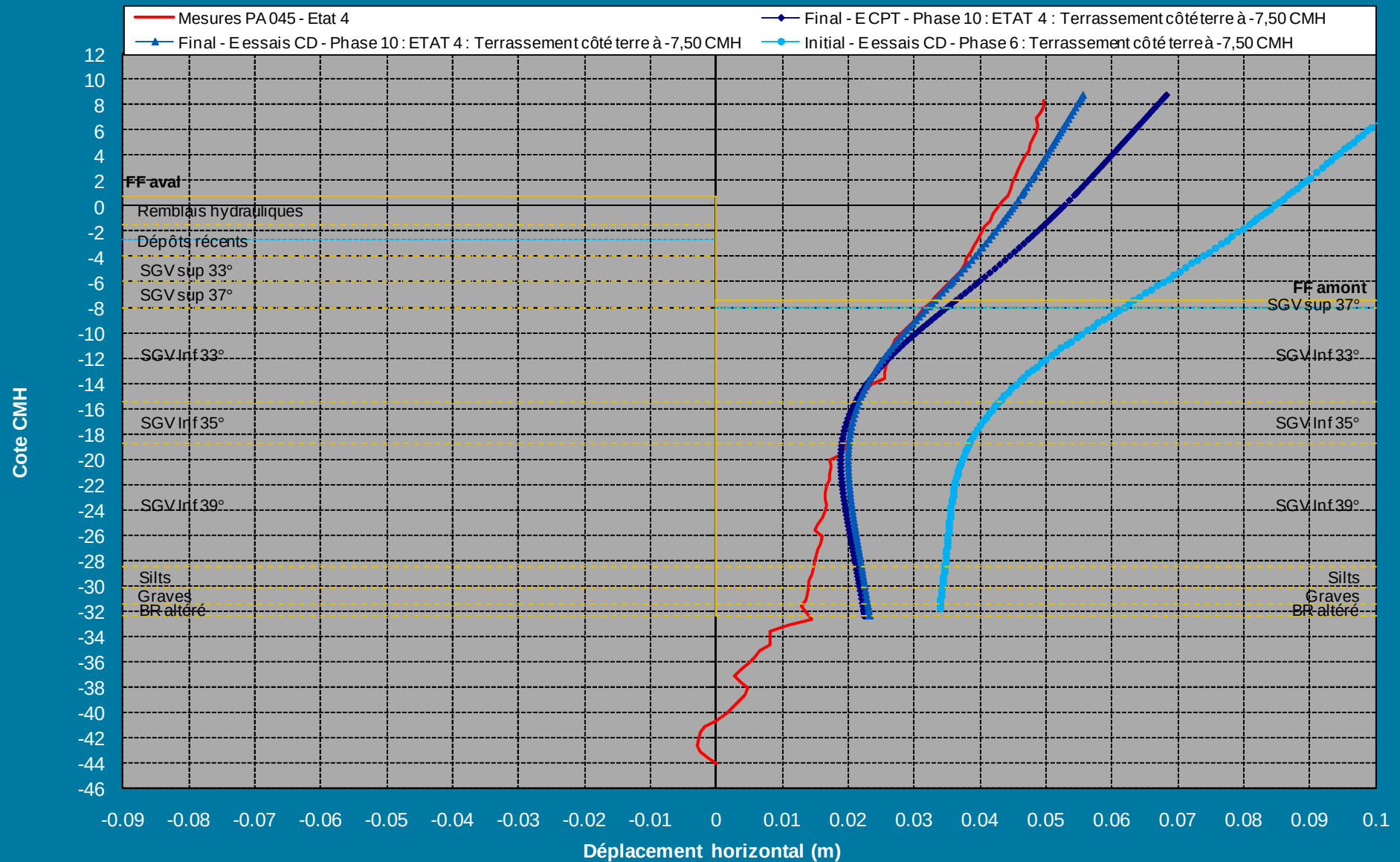
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



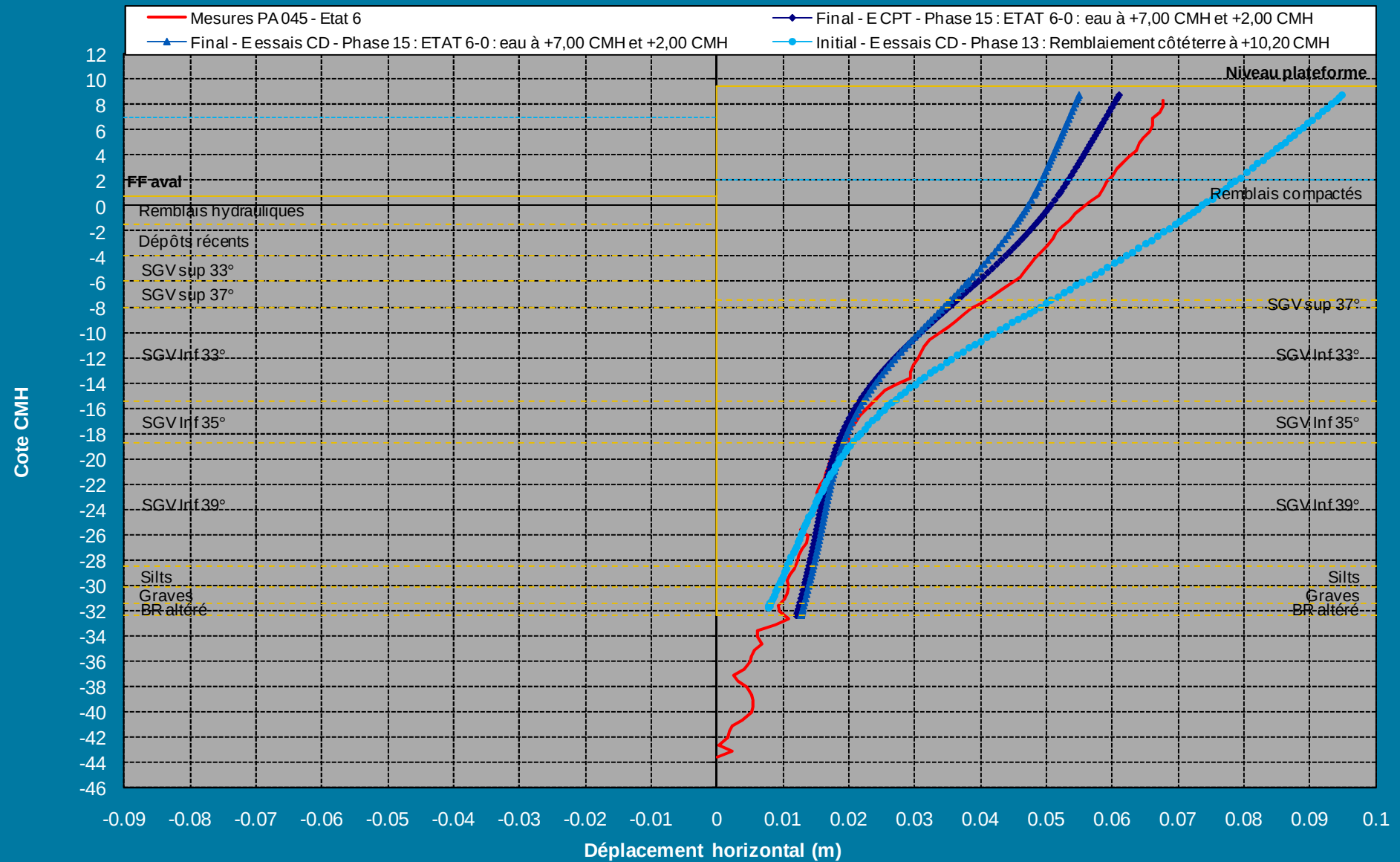
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



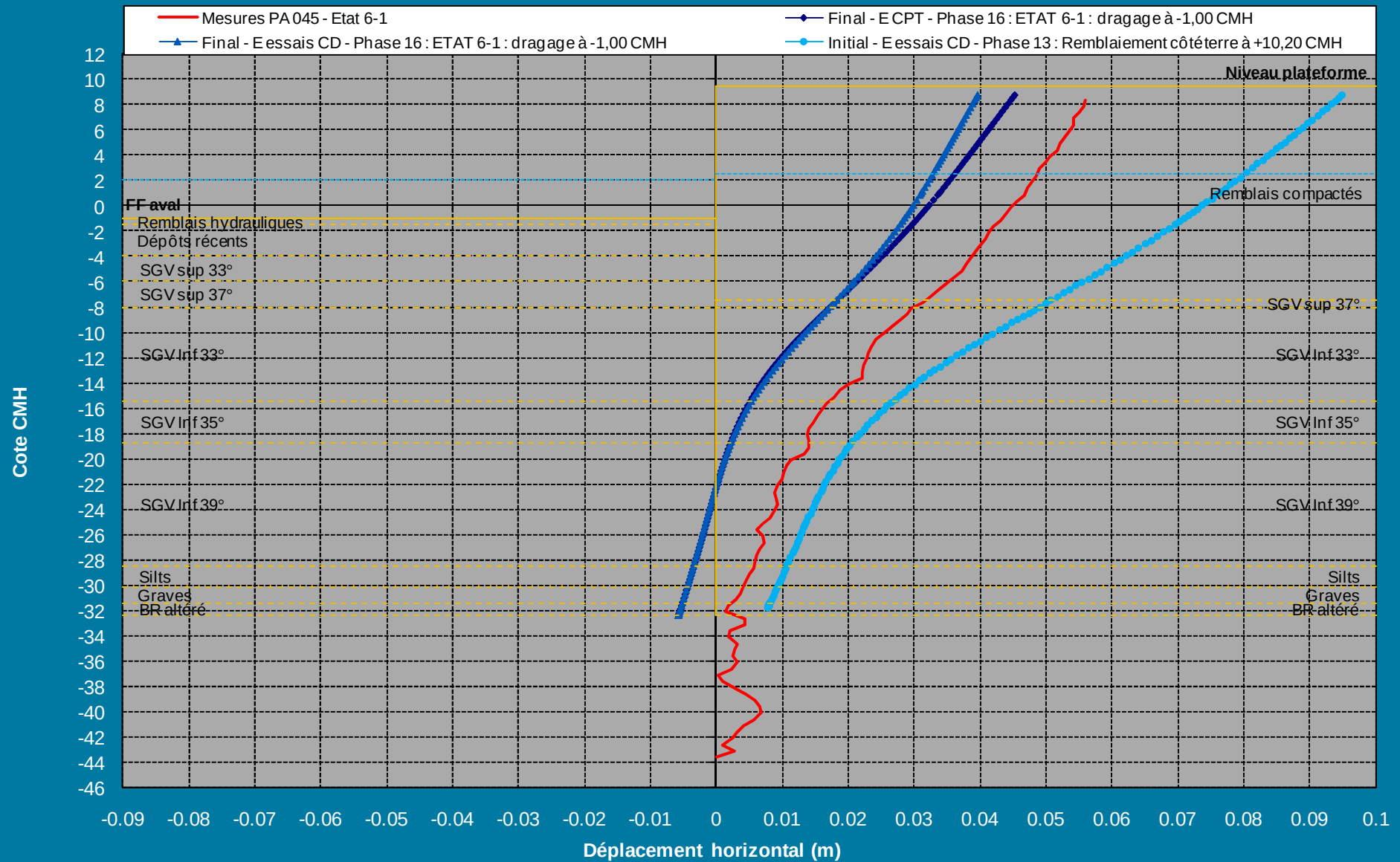
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



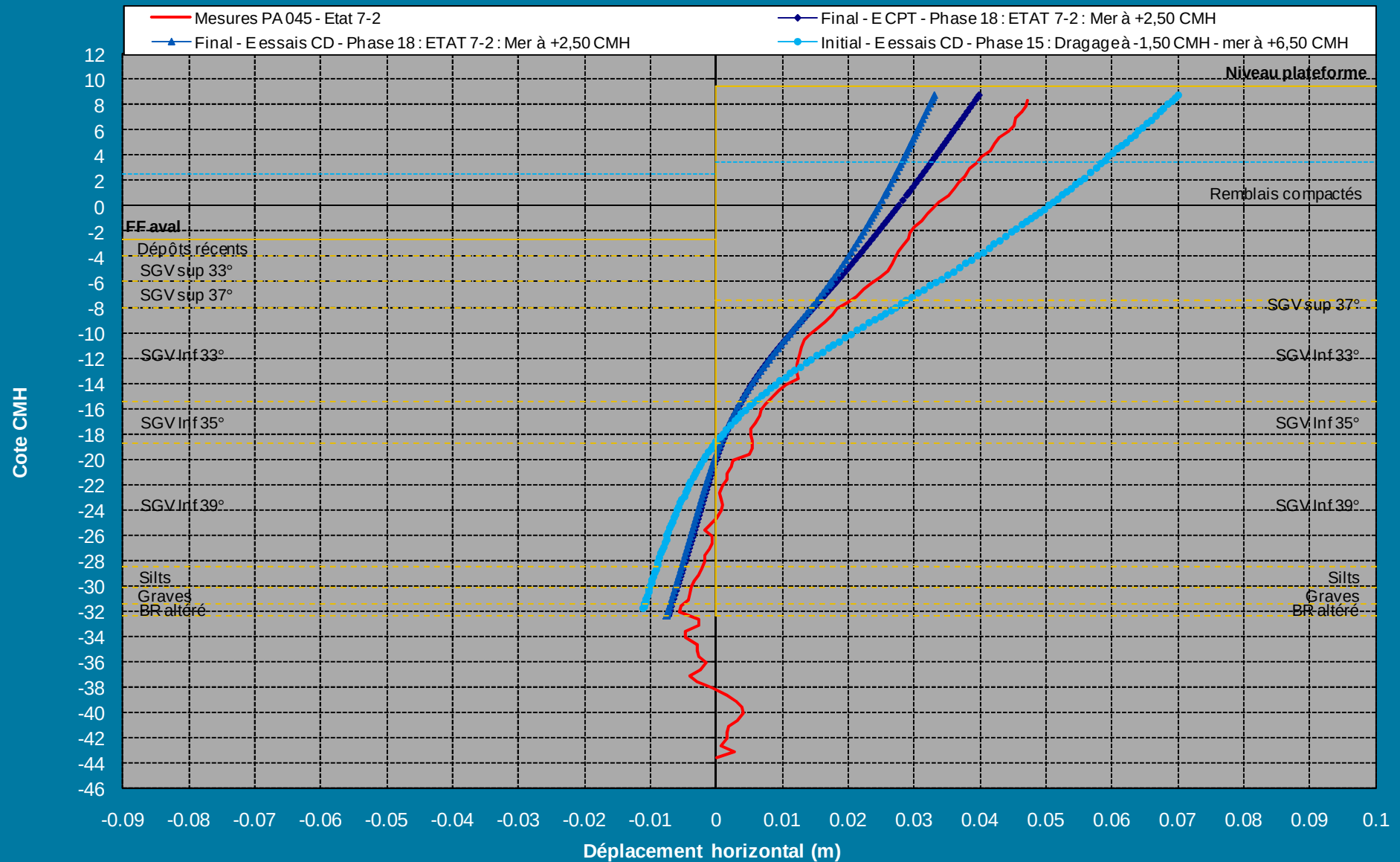
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



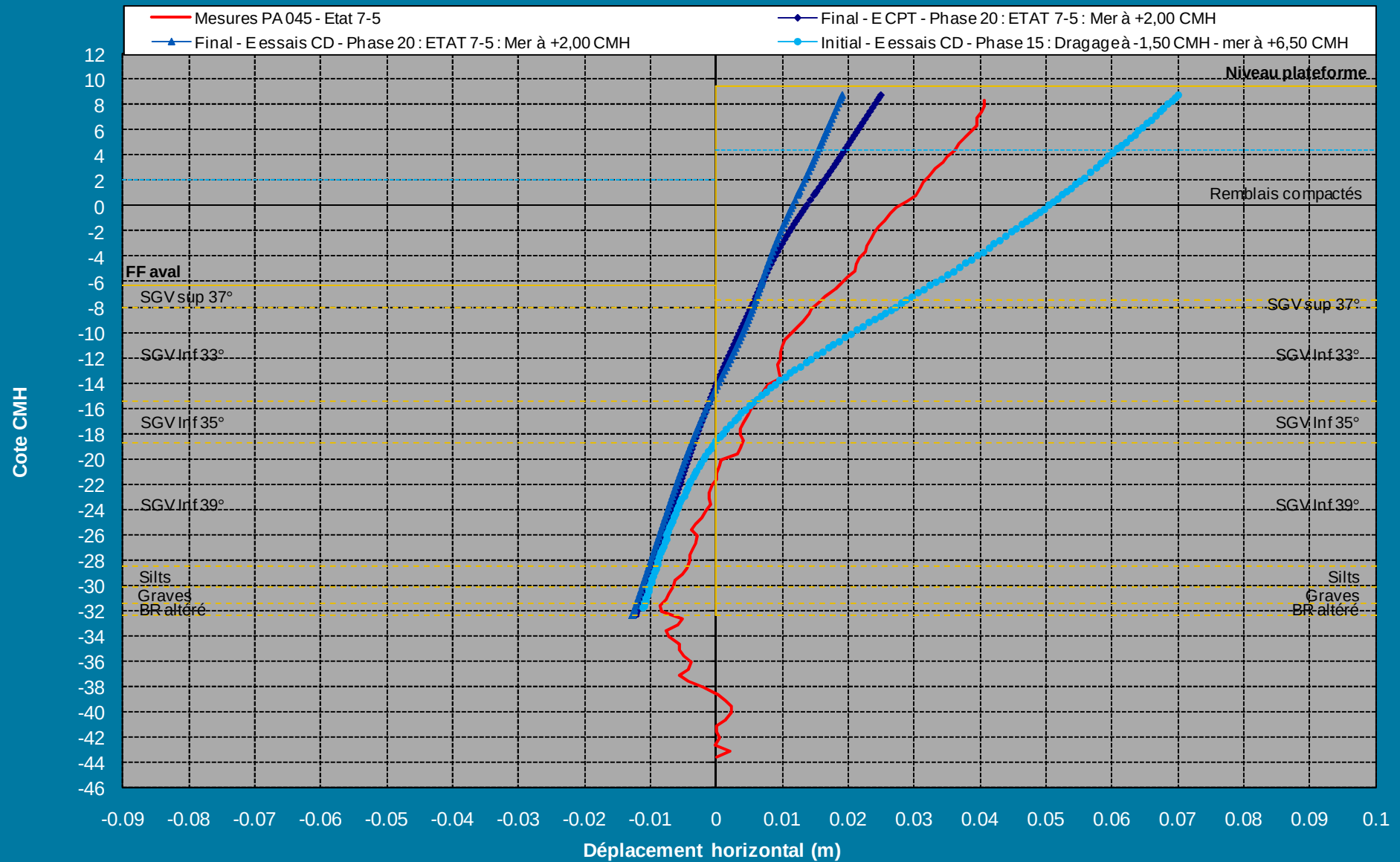
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



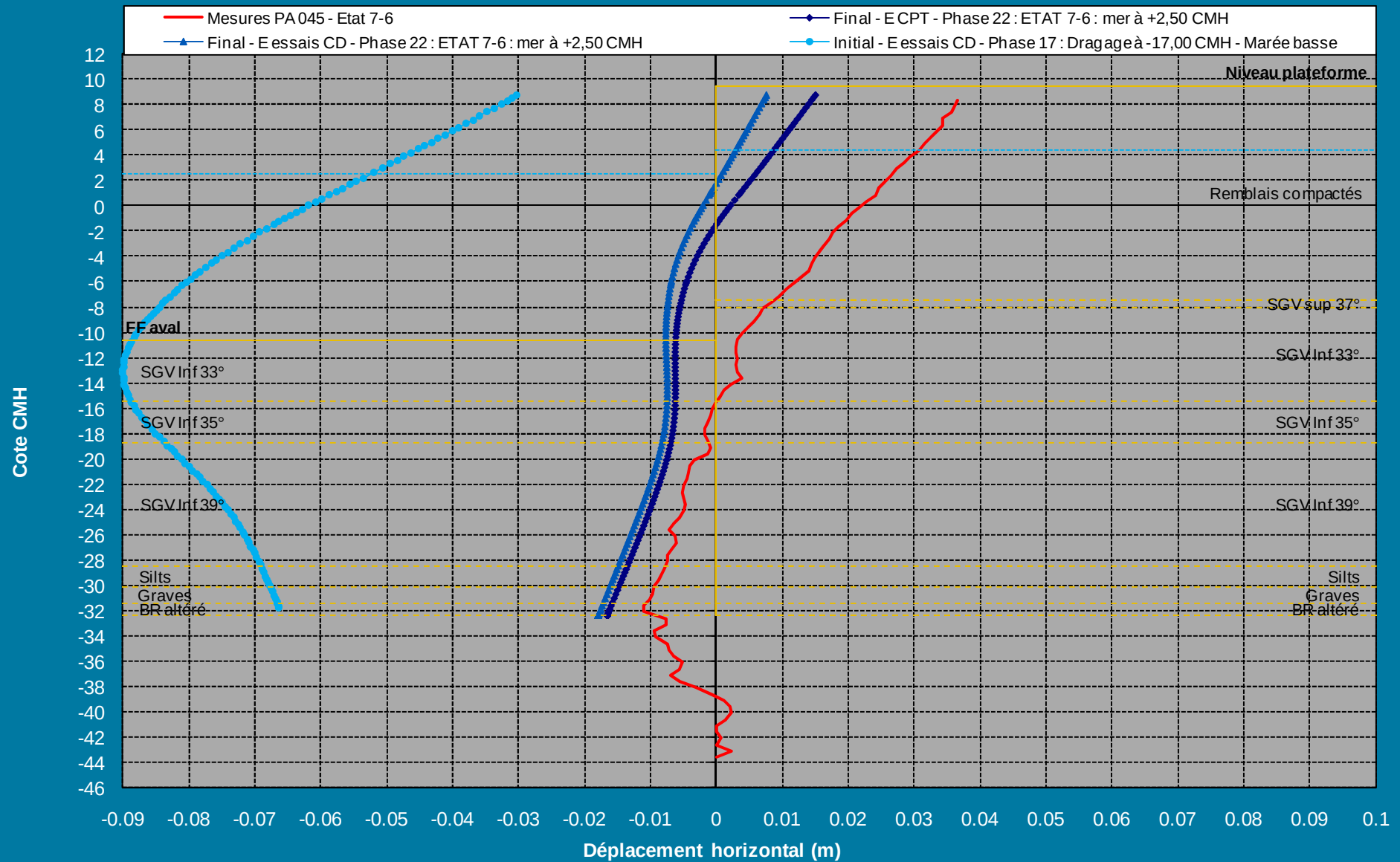
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



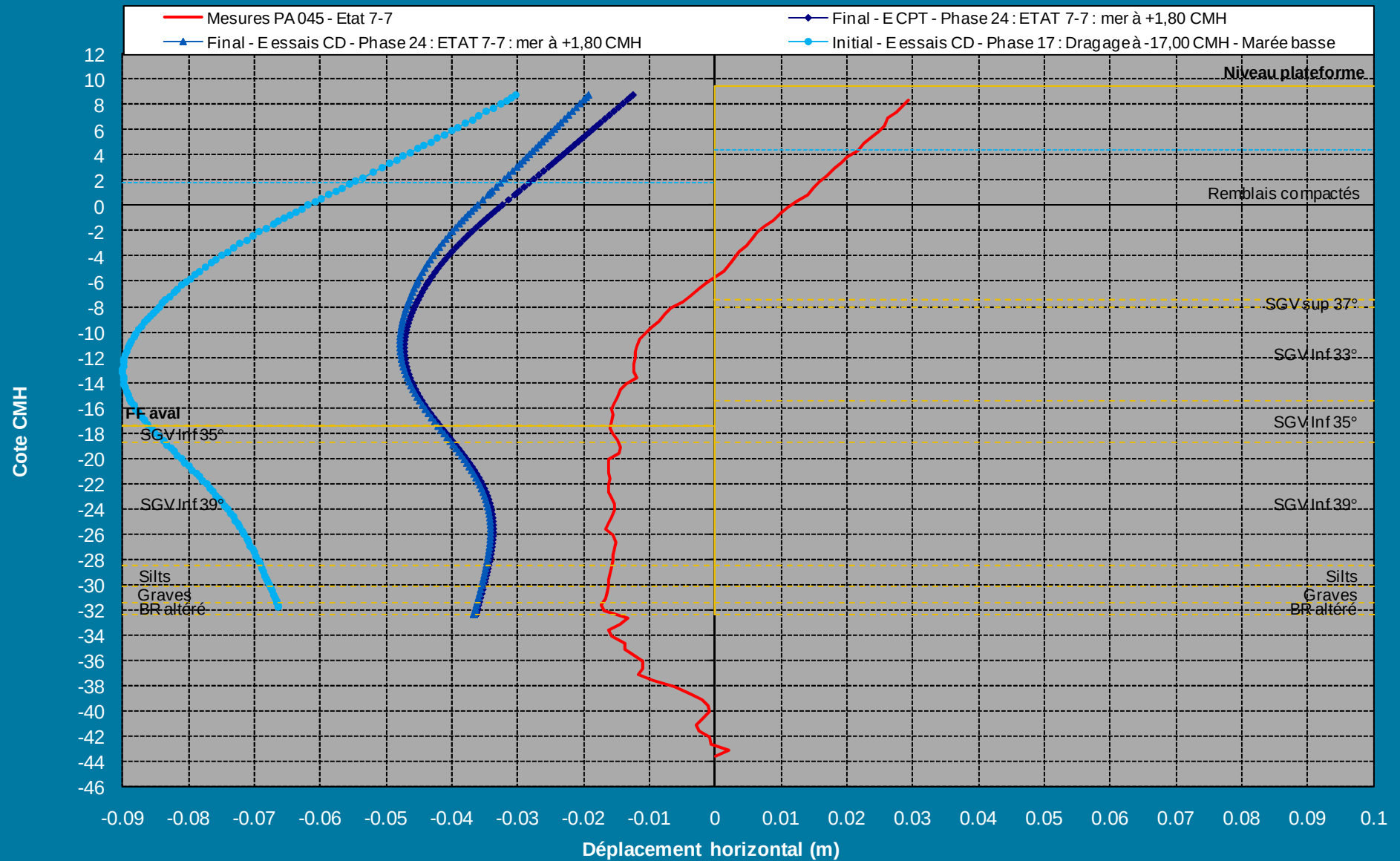
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



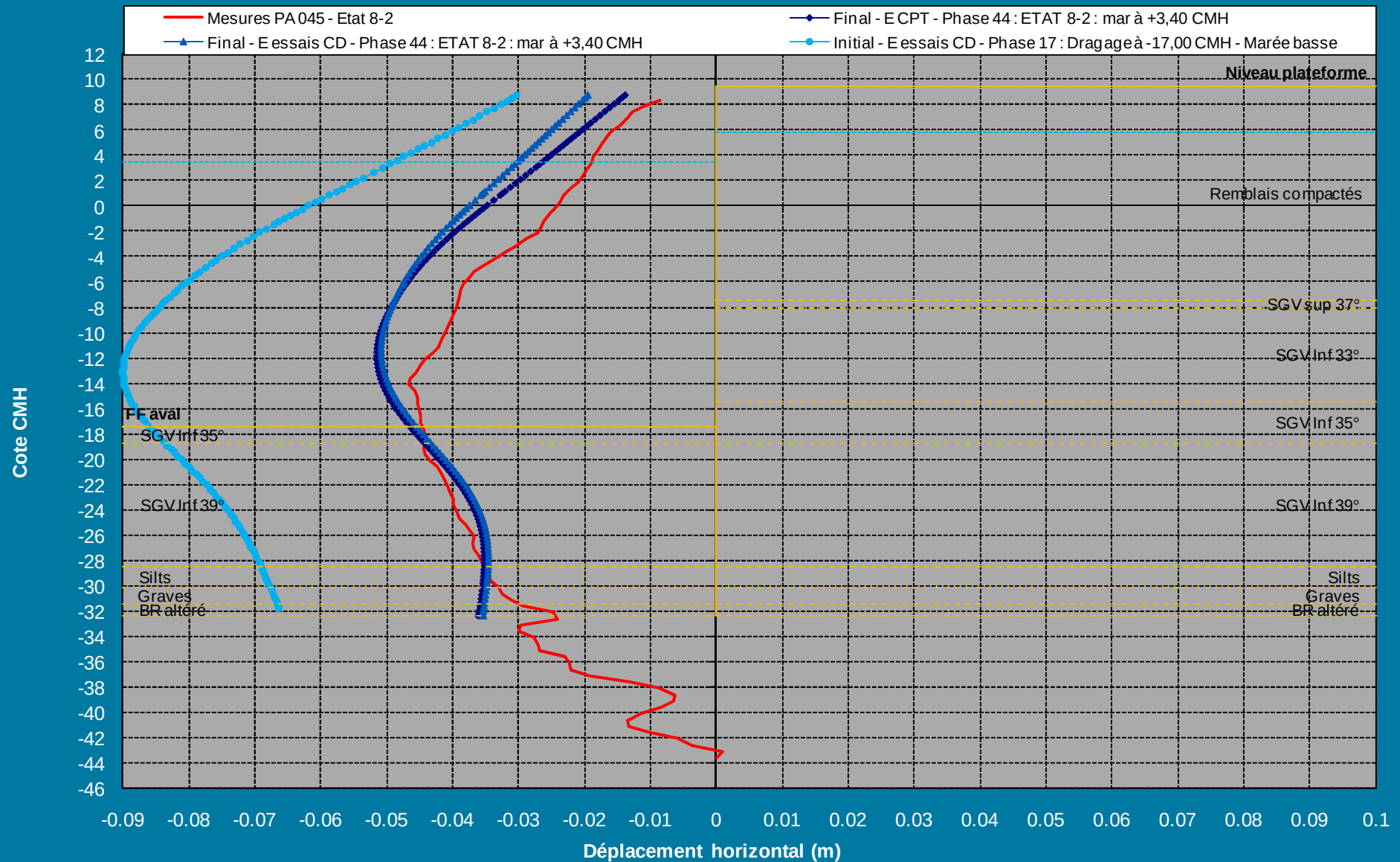
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



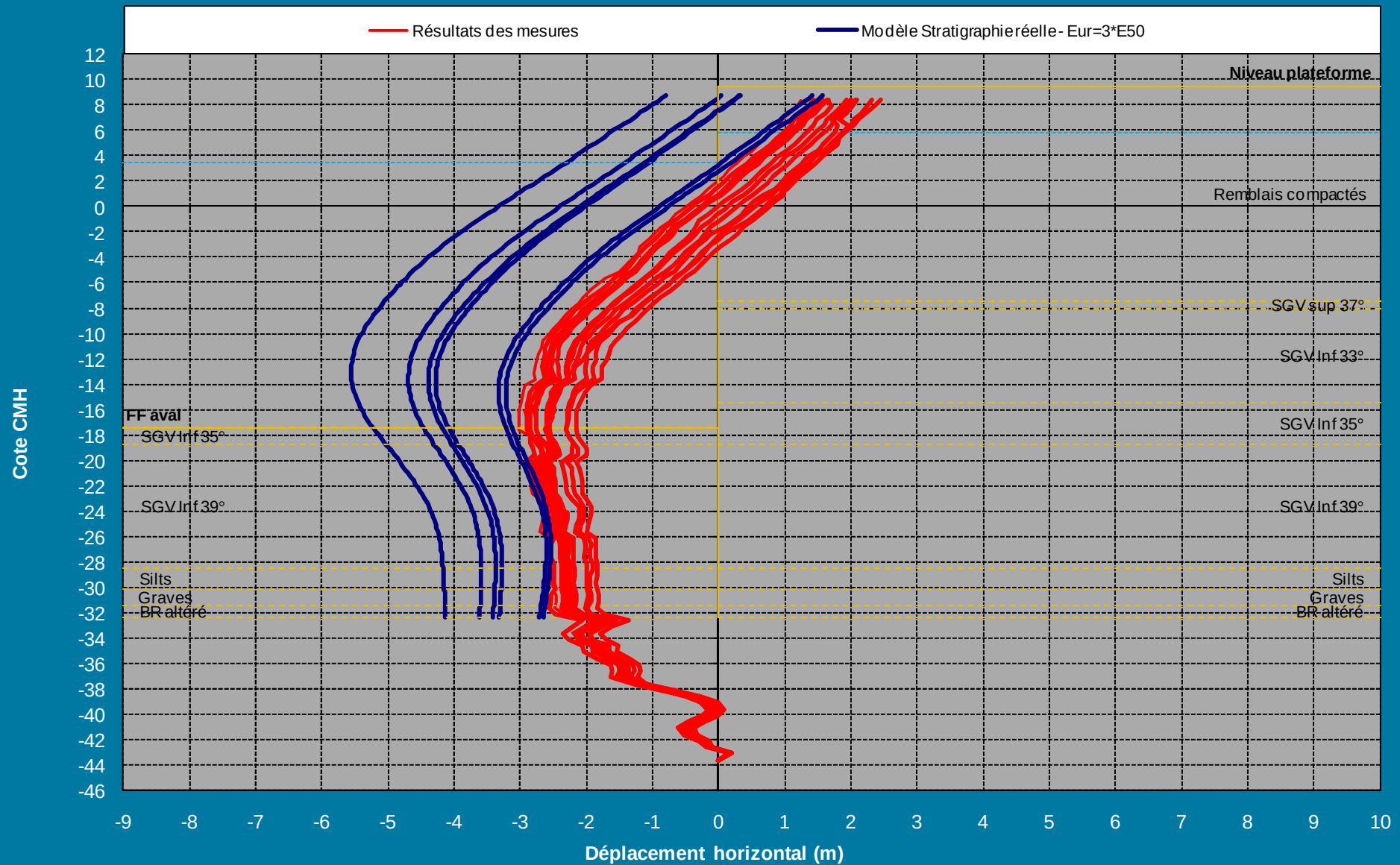
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



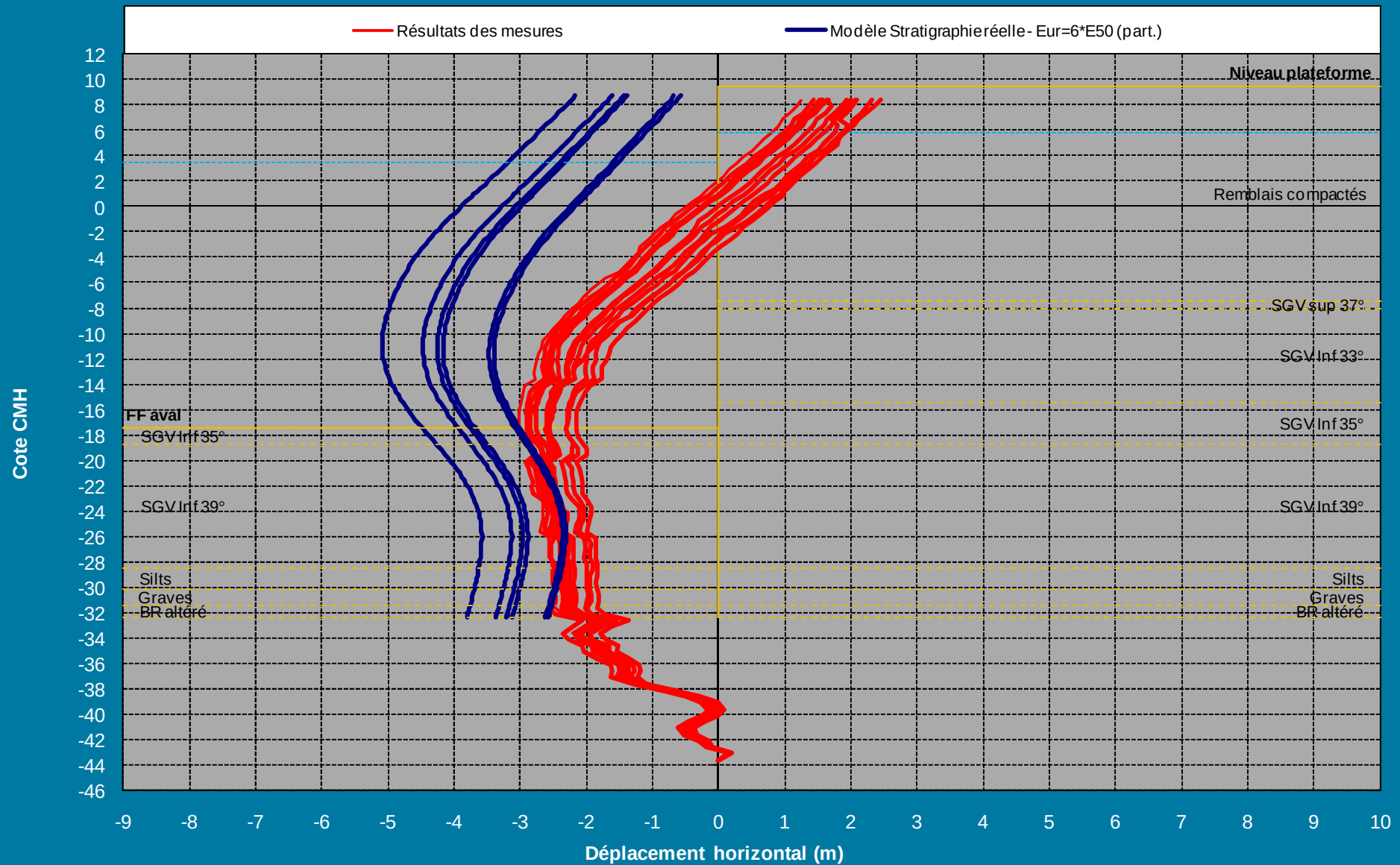
Résultats en déplacements du rideau - Poste 6



Résultats en déplacements - Poste 6 – Suivi sur un cycle de marée



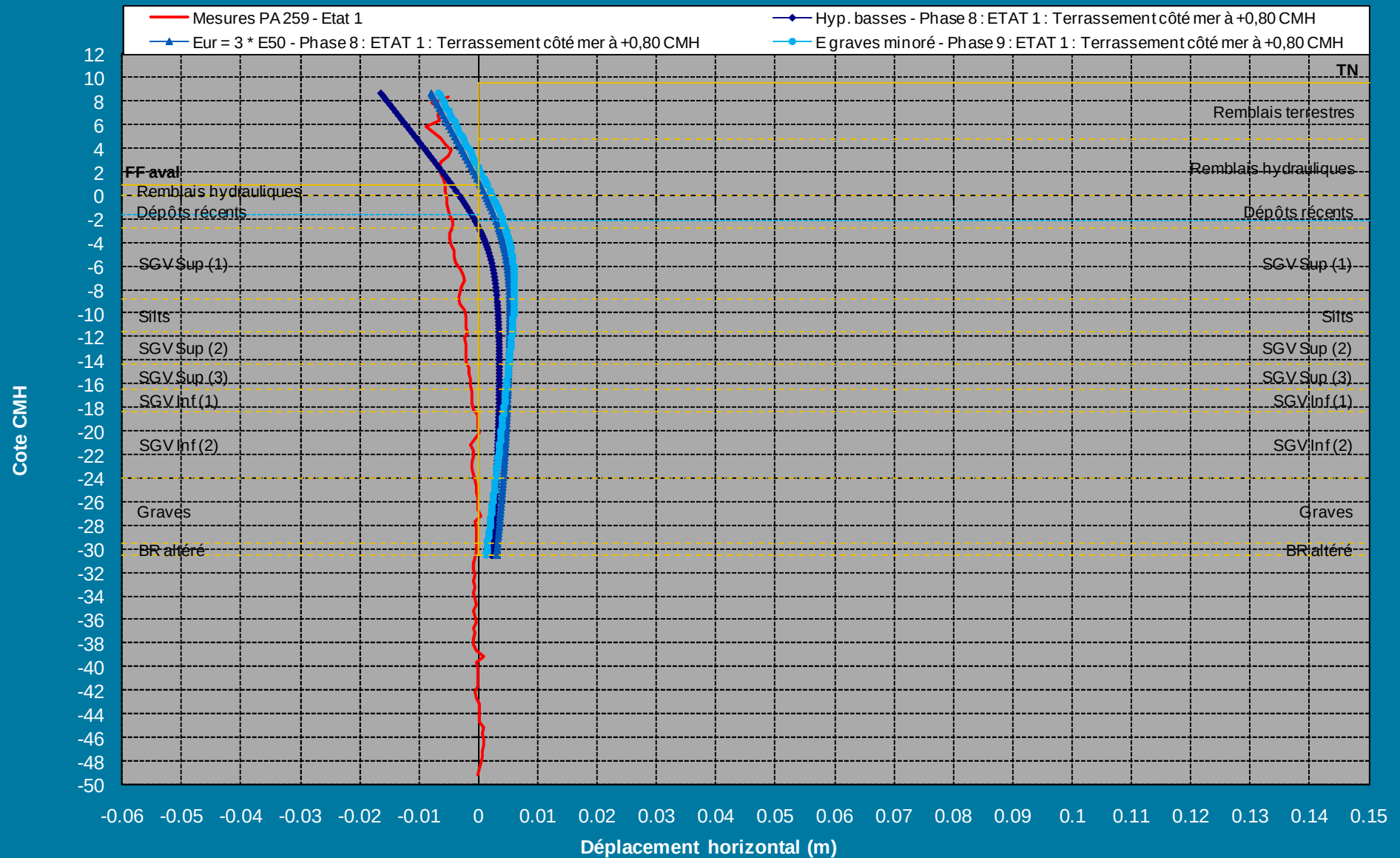
Résultats en déplacements - Poste 6 – Suivi sur un cycle de marée



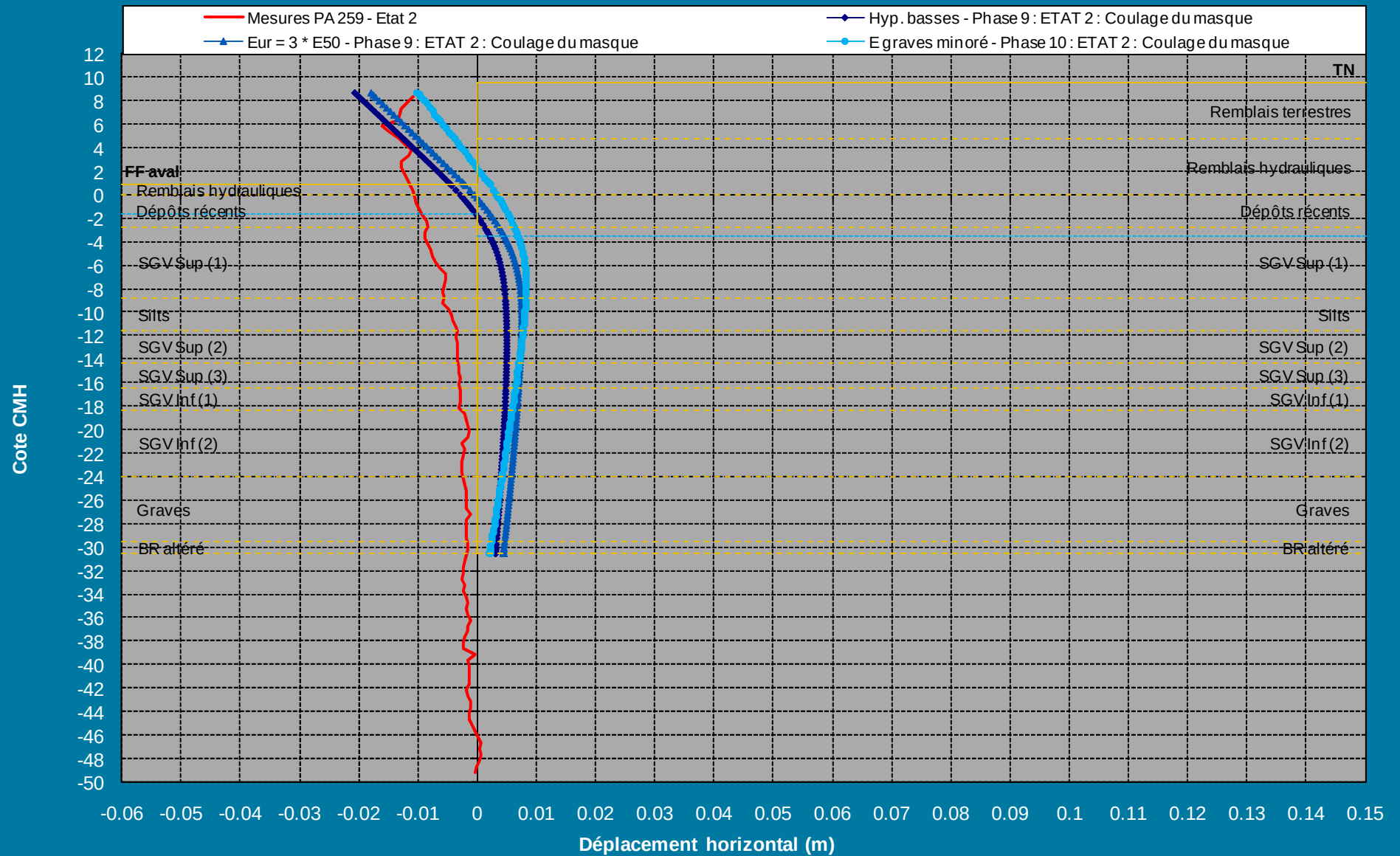
Les études paramétriques – Poste 10

- Le calcul initial a été mené en mettant à profit les résultats de l'étude sur le poste 6 :
 - le phasage de calcul est mené à marée basse (y compris l'état initial ;
 - le ratio $E_{ur}^{ref}/E_{50}^{ref}$ est pris égal à 6 dans les formations sableuses (3 dans les autres)
 - les modules E_{50}^{ref} sont calés sur les pénétromètres les plus proches
- Analyse de l'influence des paramètres suivants :
 - jeu de paramètres optimiste ou pessimiste suivant le pénétromètre retenu pour le calage
 - retour à la valeur 3 sur l'ensemble des formations pour le ratio $E_{ur}^{ref}/E_{50}^{ref}$
 - division par 2 du module E_{50}^{ref} des graves et des sables inférieurs

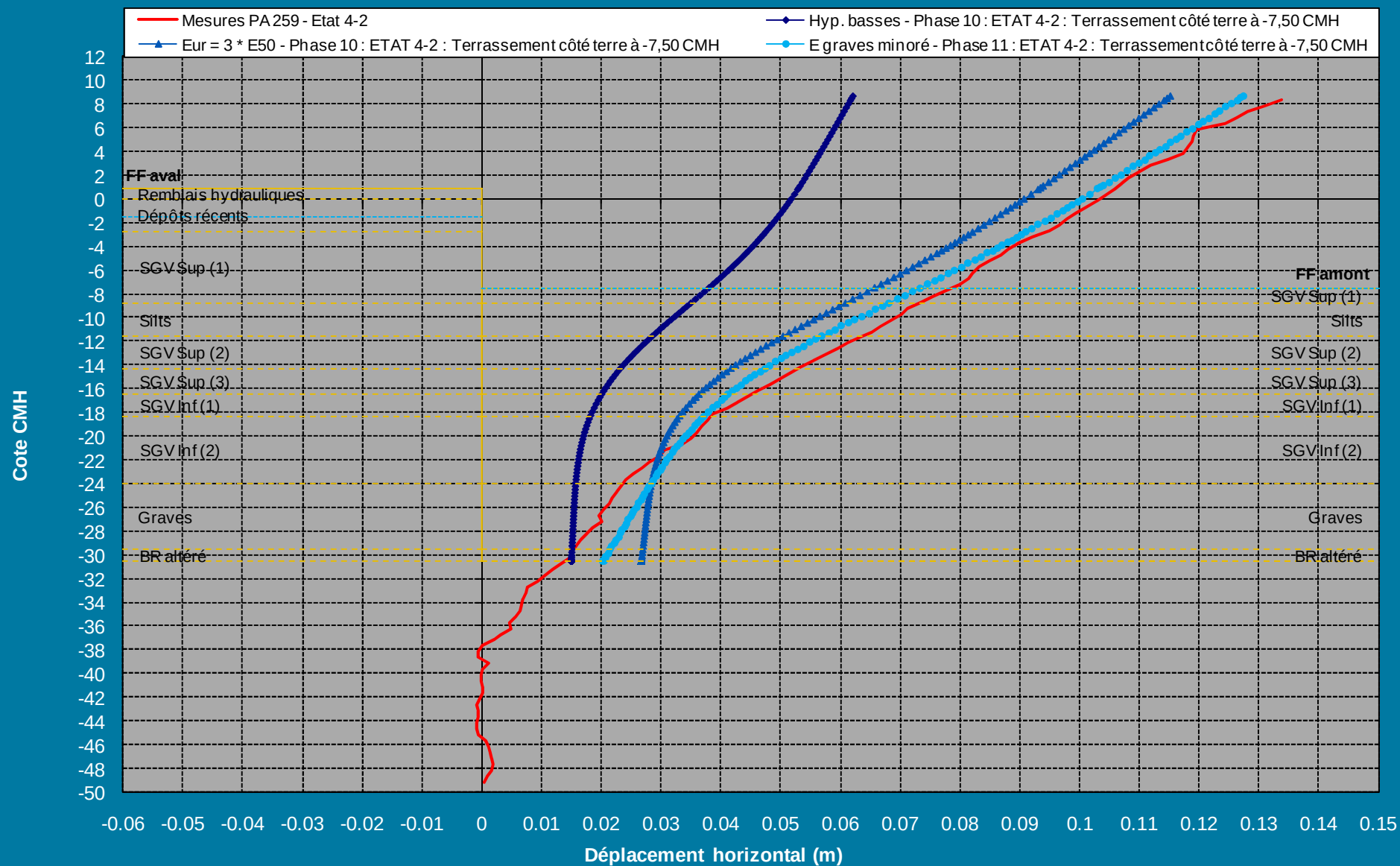
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



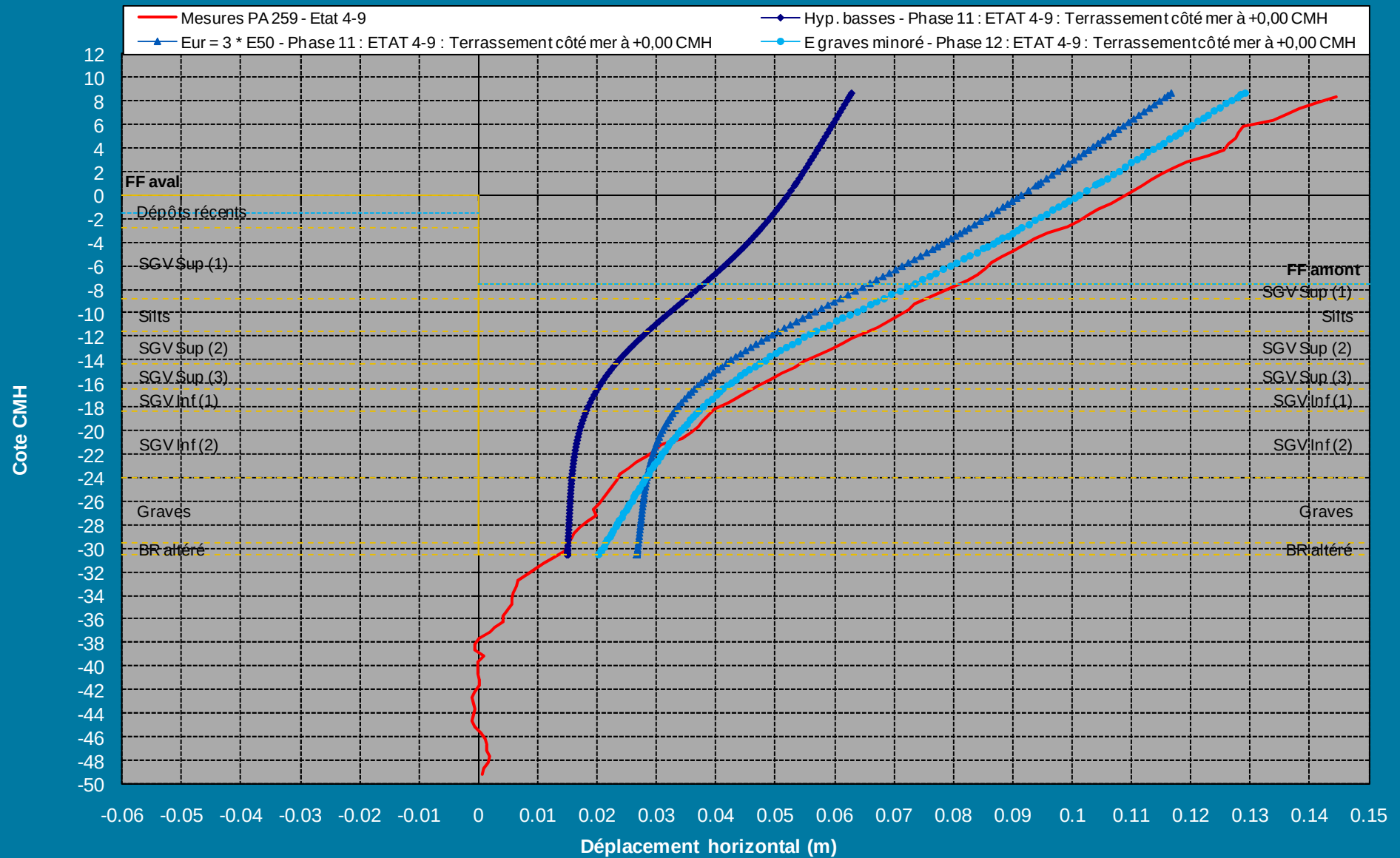
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



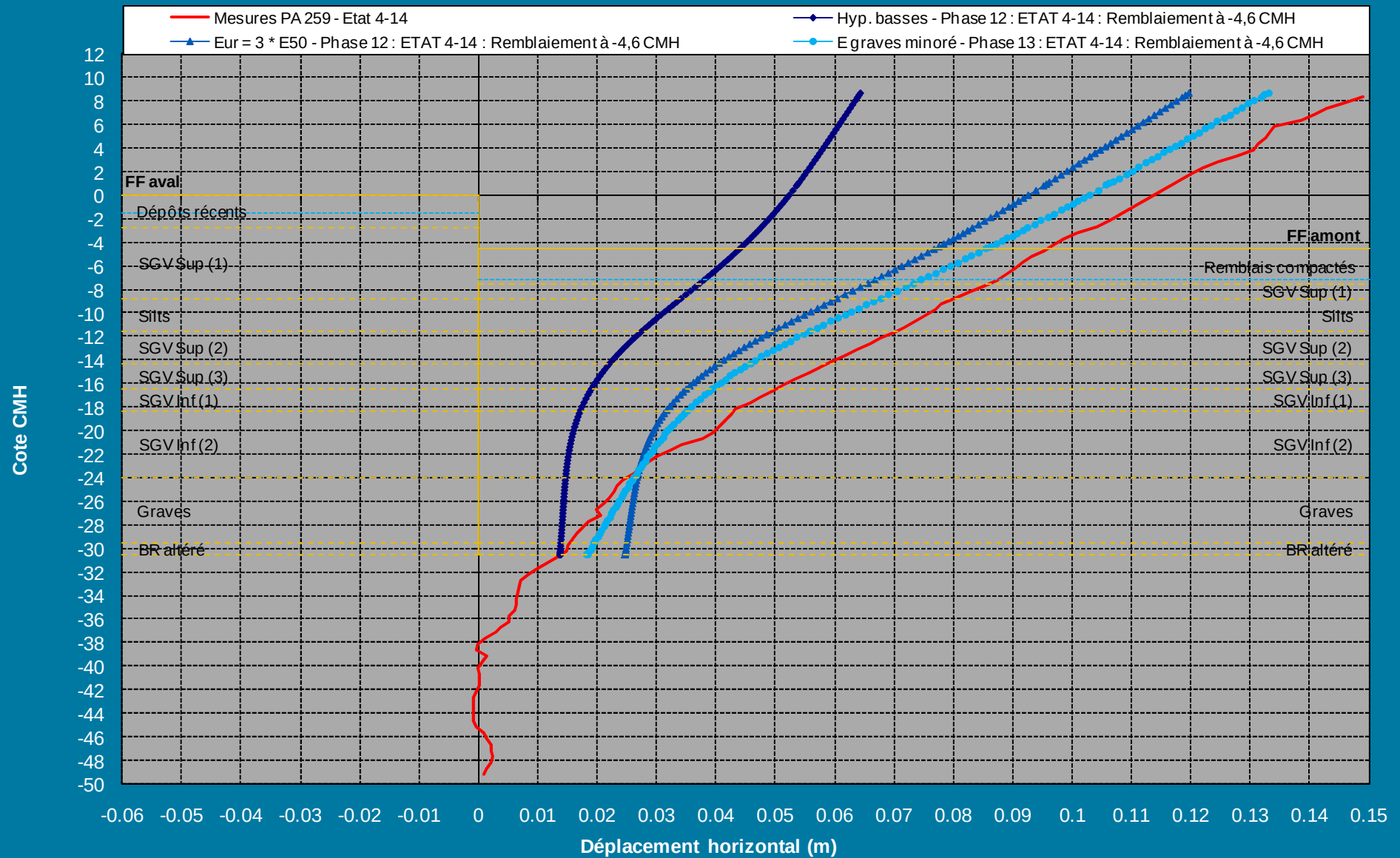
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



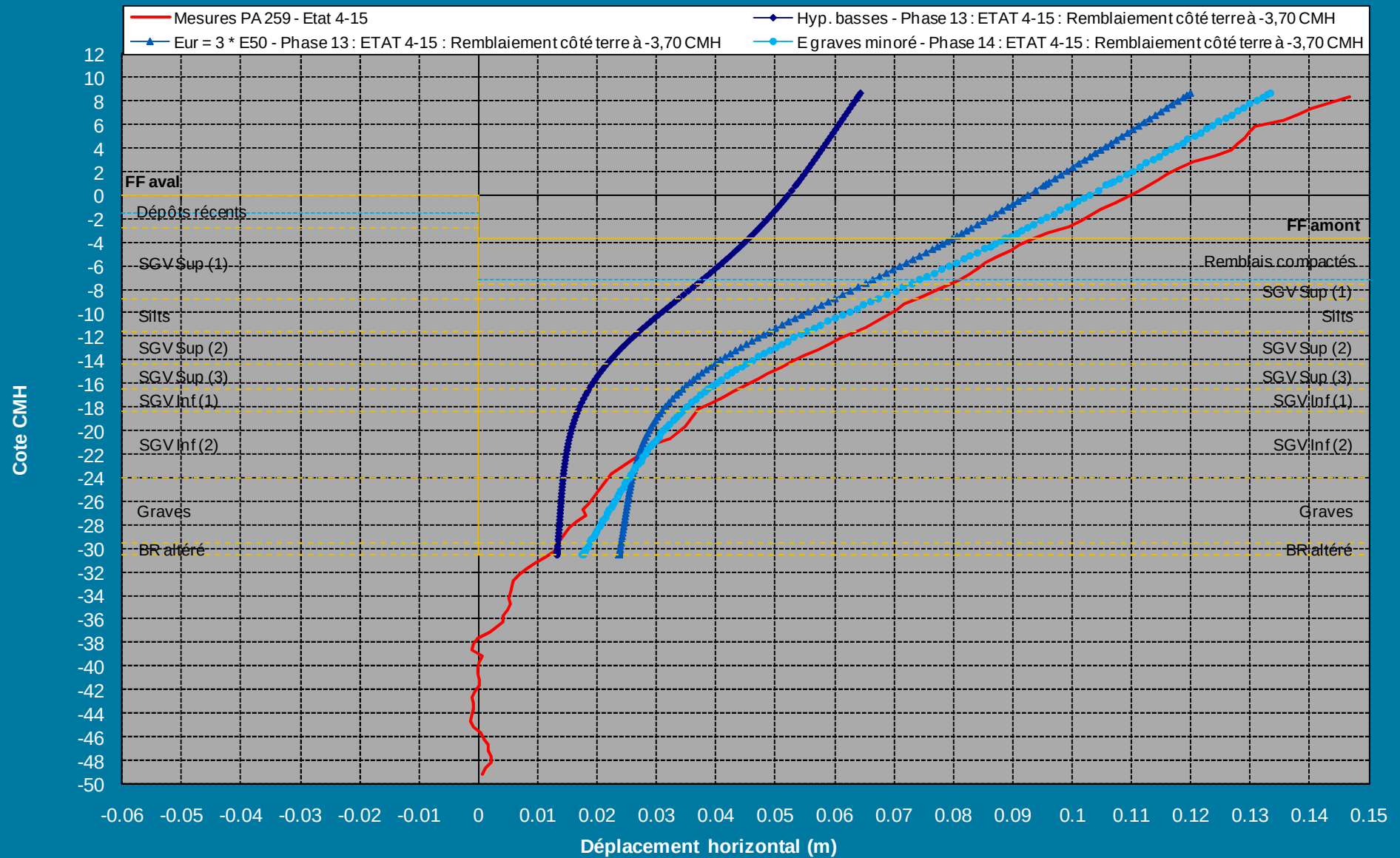
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



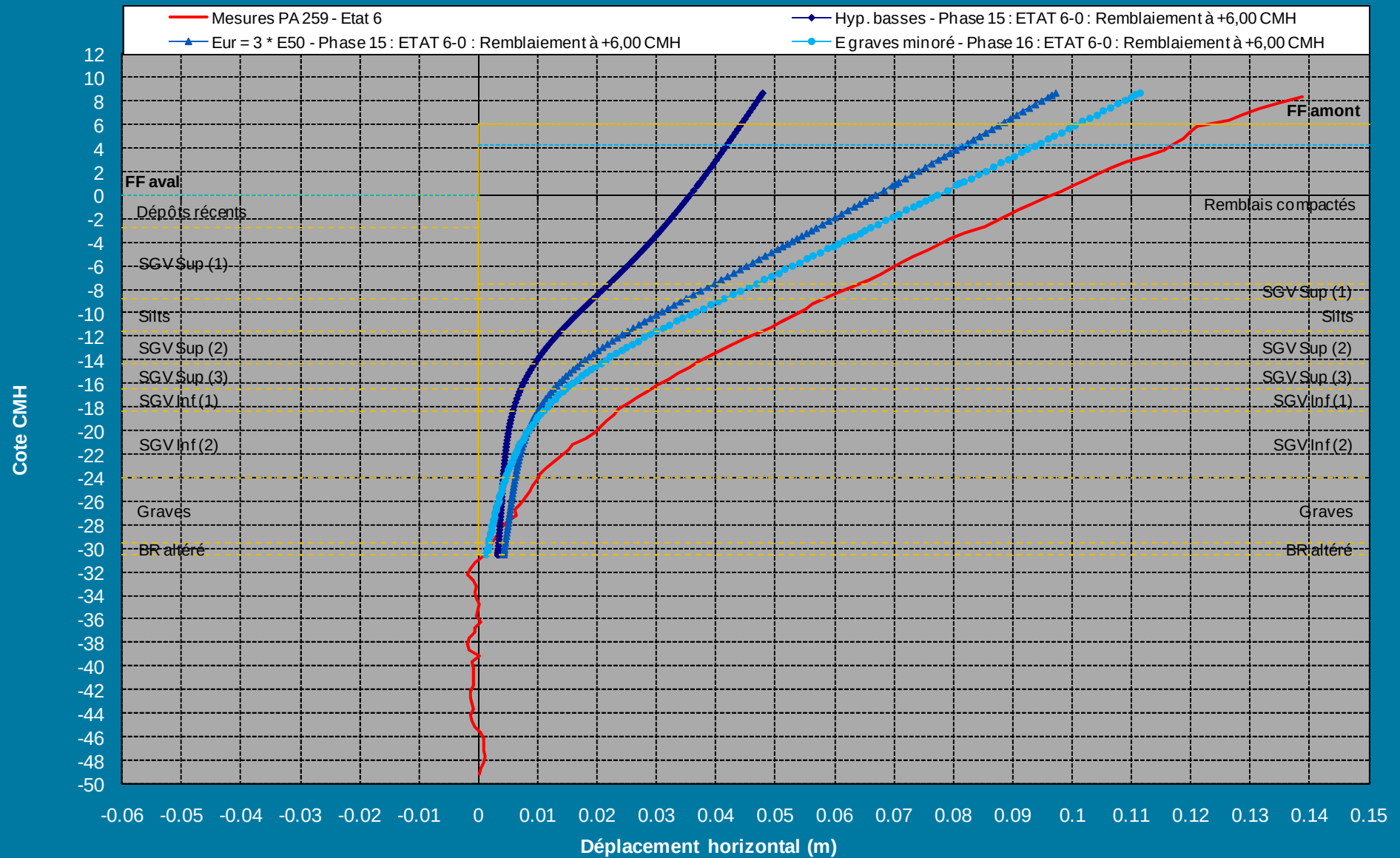
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



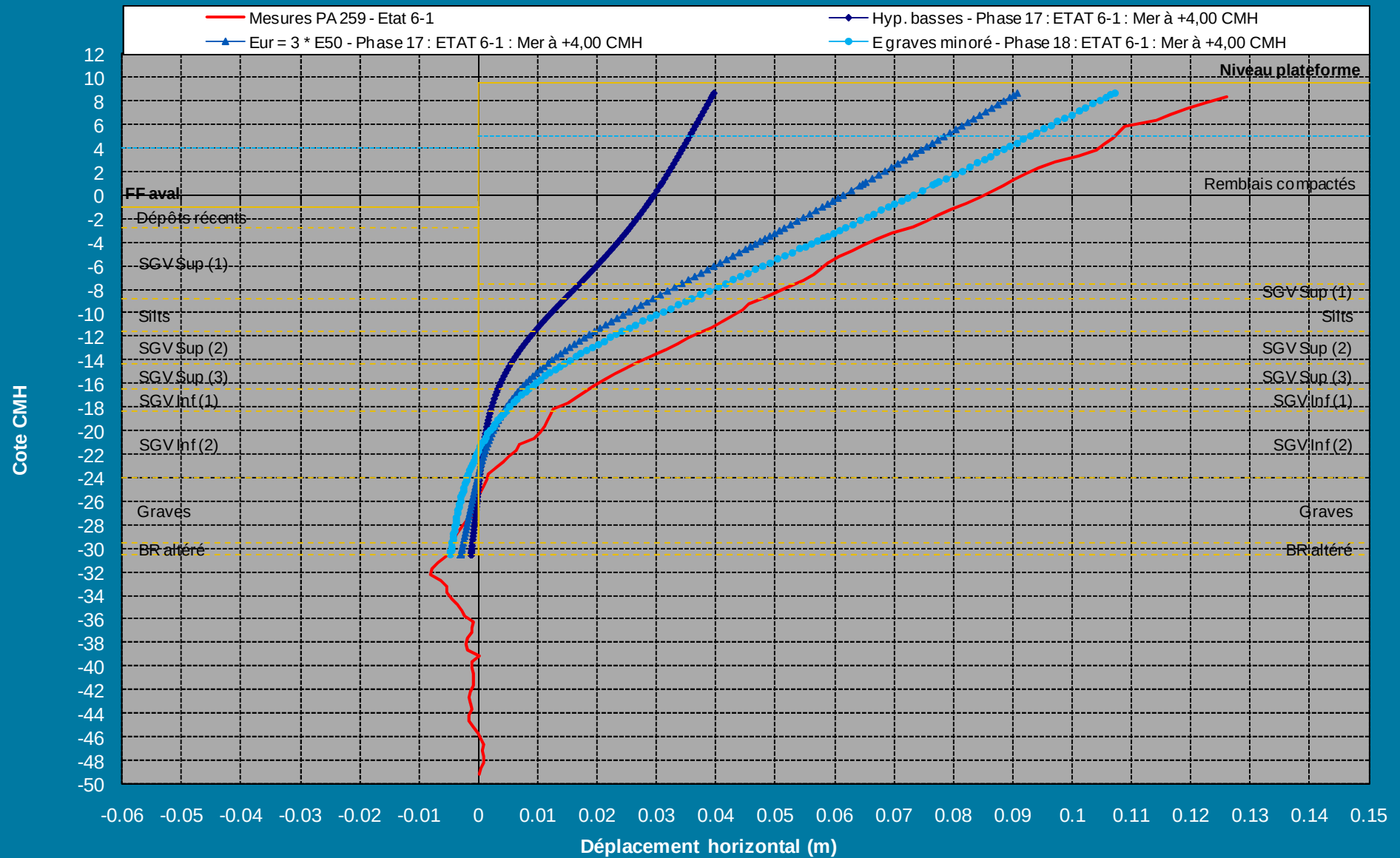
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



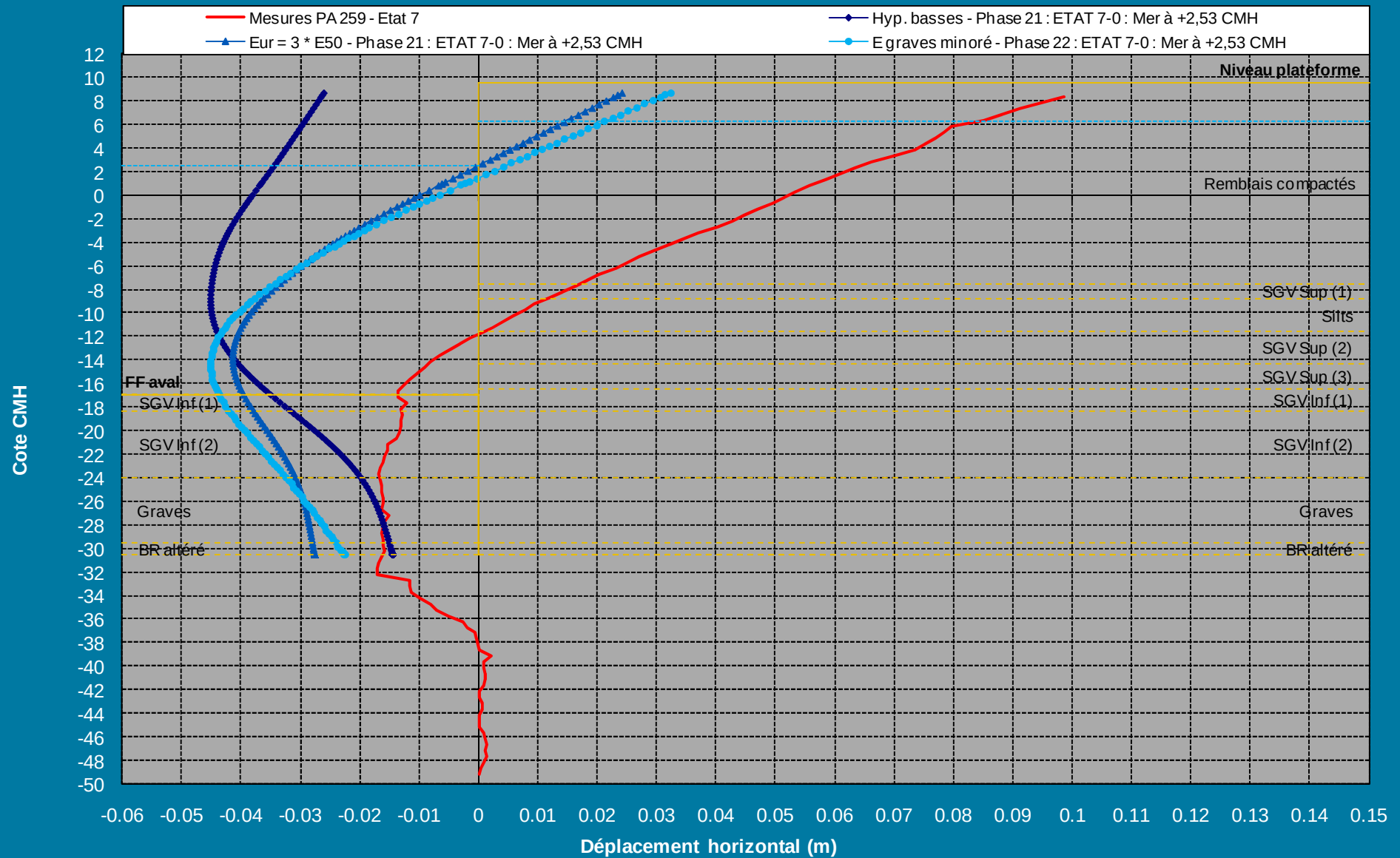
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



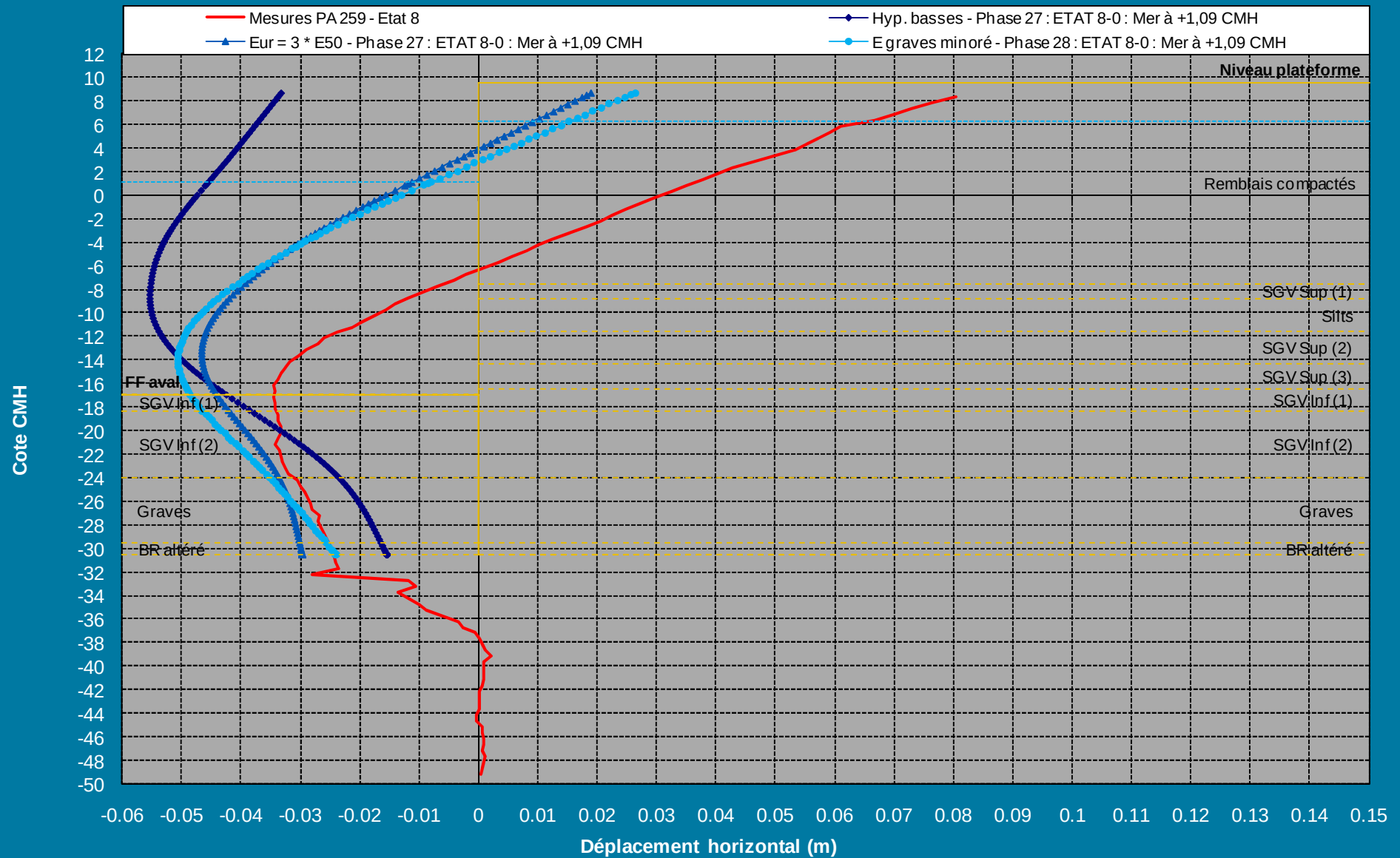
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



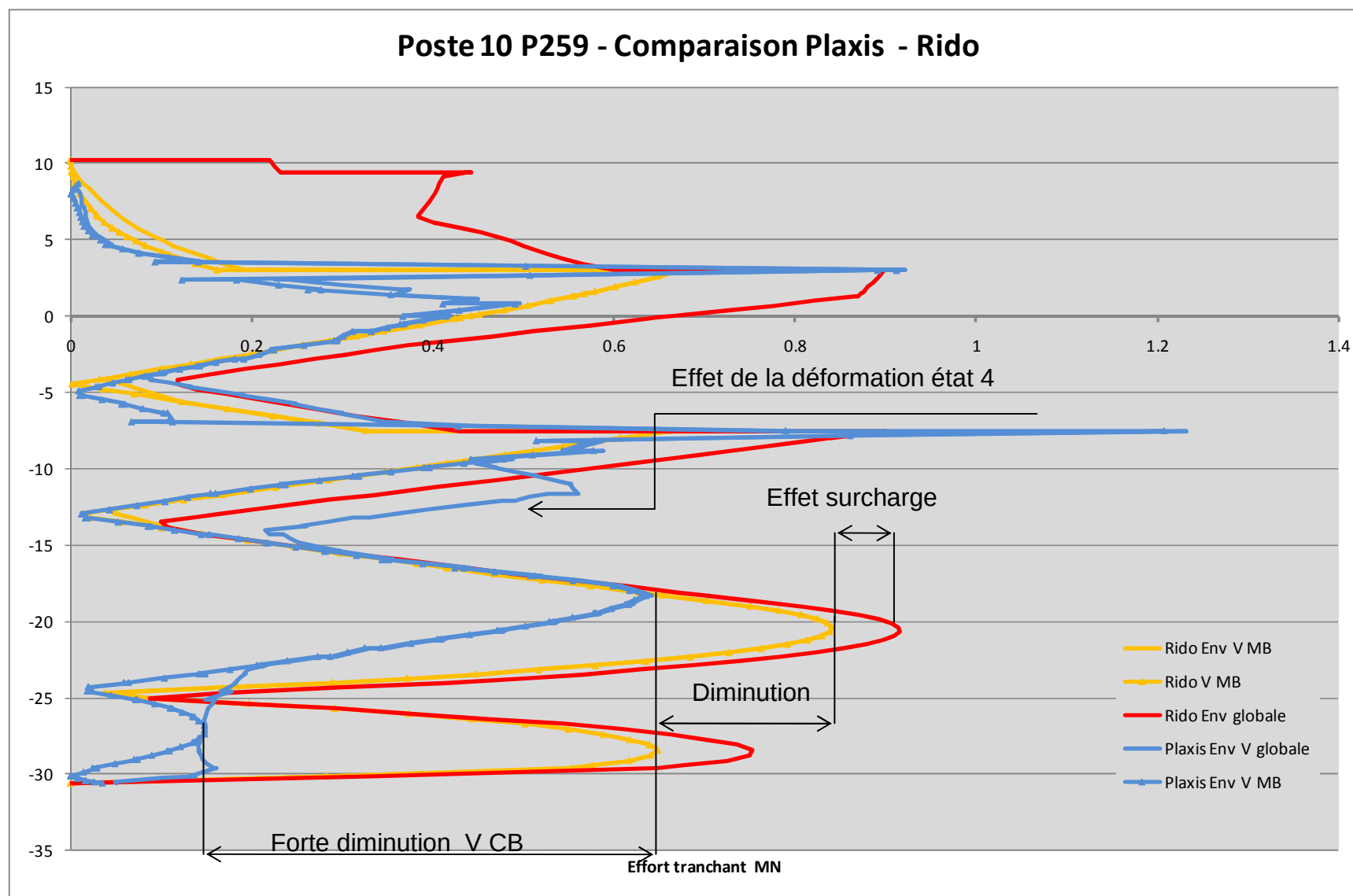
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



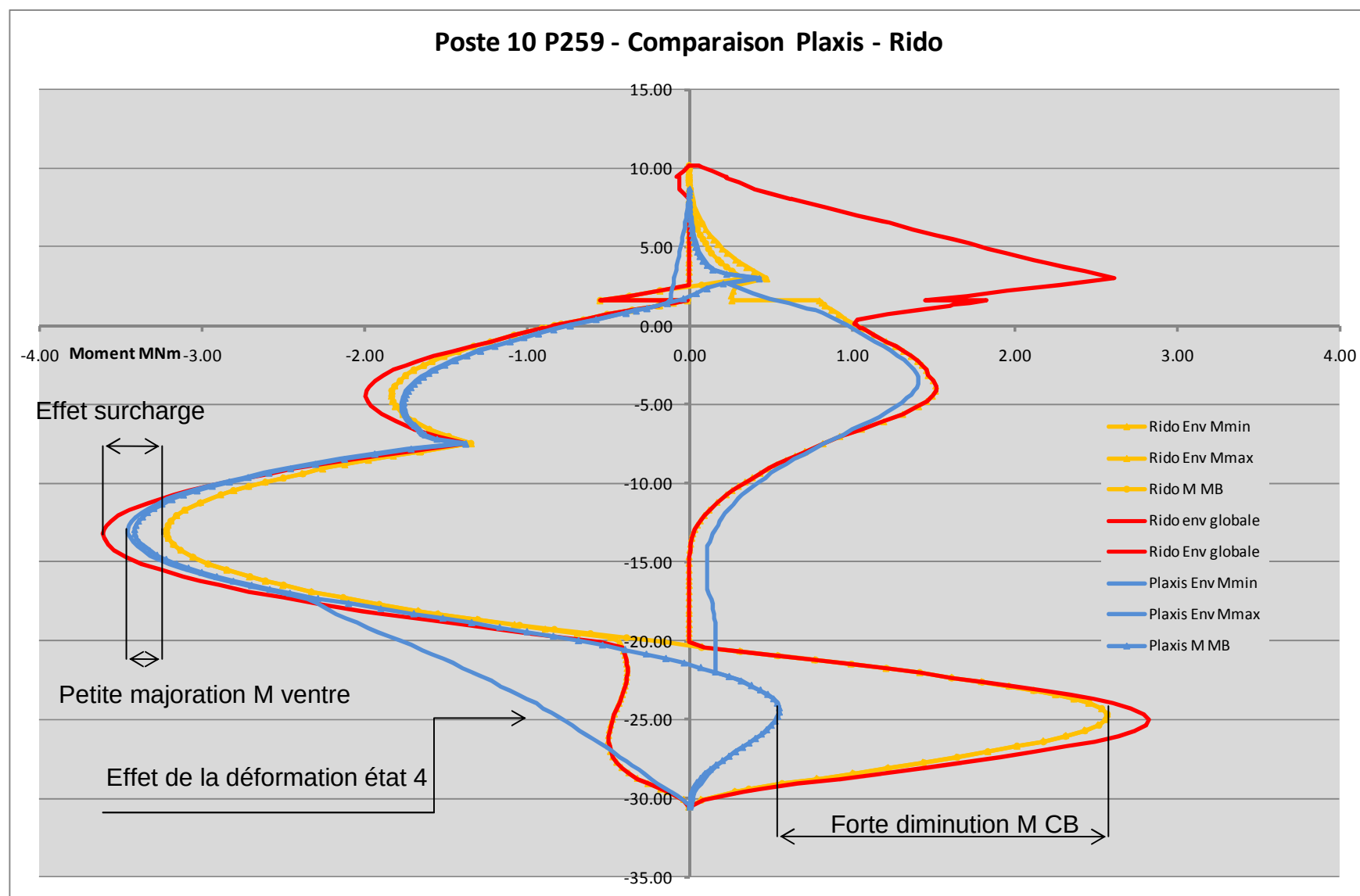
Résultats en déplacements du rideau - Poste 10



Les résultats en sollicitations - Poste 10



Les résultats en sollicitations - Poste 10



Conclusions

- Il convient de rester circonspect vis-à-vis des conclusions que l'on peut tirer d'une telle étude :
 - Elle n'est pas exhaustive : on s'est limité à l'influence de seulement quelques paramètres
 - L'influence du temps sur les déplacements de la paroi n'est pas prise en compte par le modèle
- On retiendra cependant que :
 - La prédiction a priori de la déformée de ce genre d'ouvrage est un exercice difficile
 - En utilisant la loi « hardening soil » de Plaxis il a été possible de faire tendre les résultats du modèle vers ceux des mesures sans changer notablement les hypothèses sur le module E_{50}