

Challenge de modélisation numérique

2^{ème} session

Restitution – 10 février 2026

L.Pavel, F.Emeriault



- **Les challenges de modélisation sont associés à la publication en 2023 des recommandations CFMS sur la modélisation numérique des ouvrages géotechniques**
 - Disponibles sur www.cfms-sols.org/recommandations
- **La première édition en 2024 portait sur des ouvrages géotechniques classiques:**
 - Fondations superficielles
 - Fondations profondes
 - Remblai sur sol compressible
- **Le challenge de modélisation proposé en 2025 porte sur une problématique de soutènement avec plusieurs niveaux de support**

- **L'objectif principal est une analyse de la pratique de modélisation dans une configuration habituelle d'ingénierie :**
 - L'ouvrage est complètement décrit avec son phasage de réalisation et des données géotechniques interprétées sont fournies
 - Sa modélisation est une mise en œuvre des principes énoncés dans les Recommandations en matière de conception du modèle numérique et de choix des ingrédients adaptés
 - Une attention particulière doit être portée à la justification des valeurs de paramètres utilisés (notamment pour les sols à partir des données géotechniques disponibles)

PLAN DU WEBINAIRE

- **Rappel du sujet**
- **Analyse de la méthodologie de modélisation utilisée par les répondants**
- **Analyse des principaux résultats et confrontation à d'autres approches**
- **Rappels des principes de modélisation des Recommandations 2023**
- **Focus sur des points particuliers**
- **Conclusion**

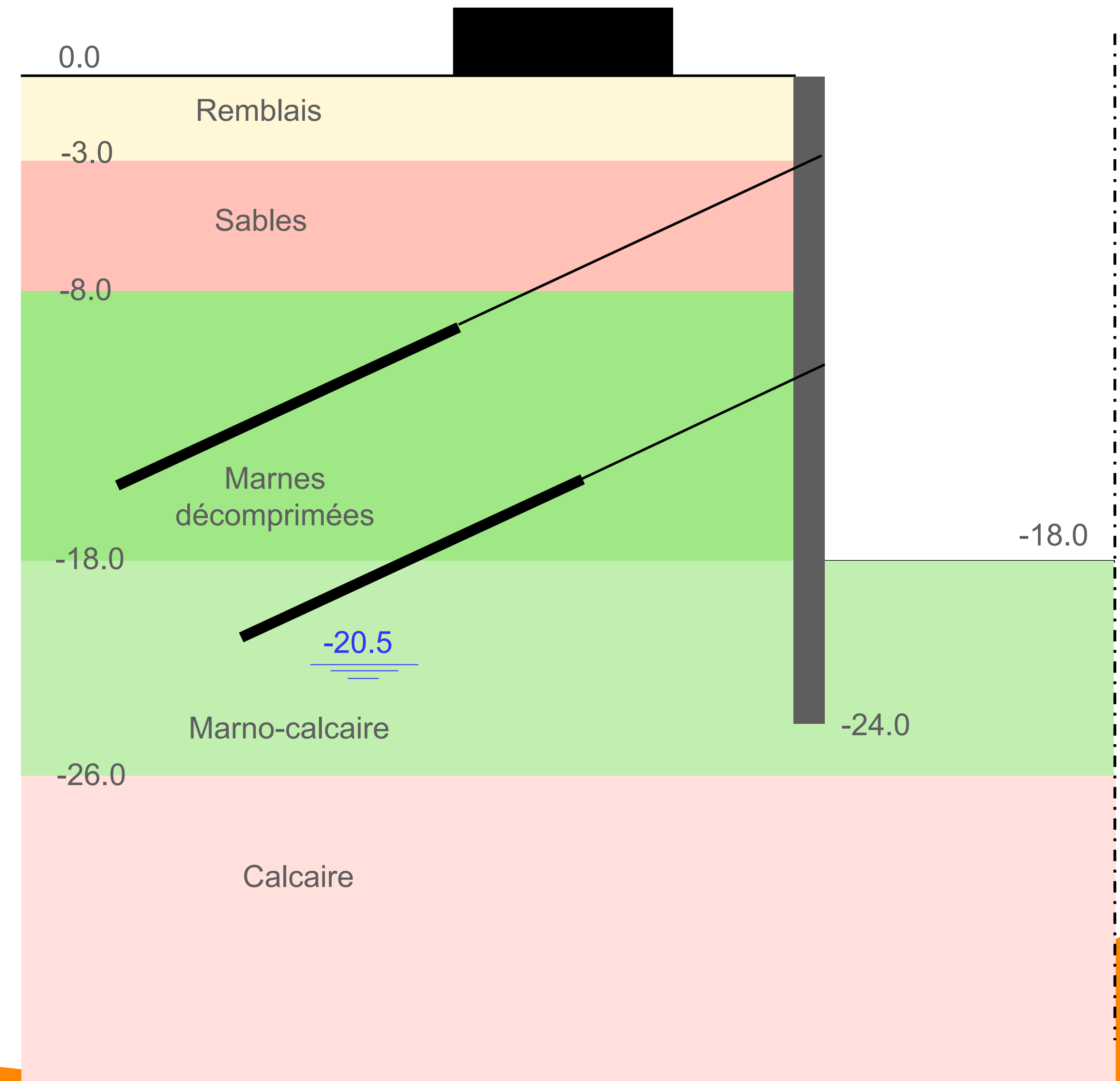
ENONCÉ = OUVRAGE DE SOUTÈNEMENT AVEC 2 NIVEAUX D'APPUI

Exercice de modélisation comprenant

- Une paroi de soutènement de type paroi moulée (0.8m d'épaisseur)
- 4 types de sols traversés
- Une fouille de 20 m de largeur et 18 m de profondeur
- 2 niveaux de tirants définitifs
- Une nappe à 20.5 m de profondeur
- Bâtiment existant de type R+2 (30 kPa) situé à 5 m de distance de la paroi sur une largeur de 10 m. Ce bâtiment n'est présent que sur un côté de la fouille.

Données géotechniques:

- Poids volumique, cohésion, angle de frottement
- Pression limite et module pressiométrique



ENONCÉ = OUVRAGE DE SOUTÈNEMENT AVEC 2 NIVEAUX D'APPUI

Données structures:

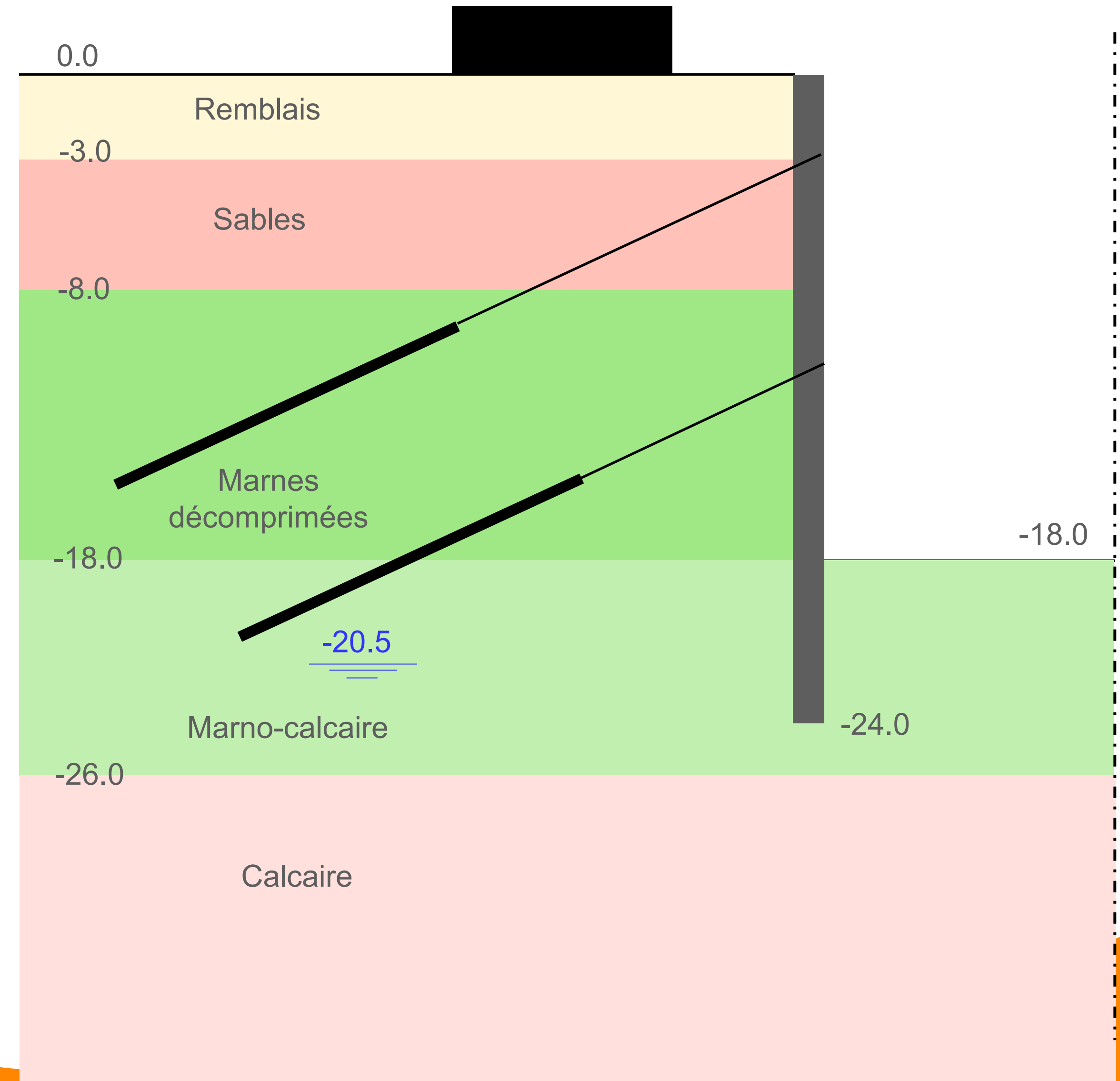
- Paroi moulée: épaisseur et moment admissible ELU
- Tirants: LL, LS, précontrainte et frottement limite

Phasage chantier :

- Réalisation de la paroi moulée
- Terrassement à -3.0 m
- Réalisation du 1^{er} lit de tirants à -2.0 m
- Terrassement à -12.0 m
- Réalisation du 2^{ème} lit de tirants à -11.0 m
- Terrassement à -18.0 m

Phase définitive :

- Fluage du béton de la paroi moulée



ENONCÉ = OUVRAGE DE SOUTÈNEMENT AVEC 2 NIVEAUX D'APPUI

Résultats attendus

- Description et justification du modèle : taille, maillage, état initial, modèle de comportement, ISS, phasage, etc.
- Justification des paramètres de calcul : sols, parois, tirants
- Phase de terrassement FF et phase définitive :
 - Déformée de la paroi
 - Cuvette de tassements en surface
 - Moments fléchissant, efforts tranchant et efforts axiaux dans la paroi
 - Profil de contrainte en poussée et en butée
 - Efforts dans les tirants
 - Coefficient de sécurité vis à vis du mécanisme d'instabilité générale
 - Coefficient de sécurité vis-à-vis de la stabilité en butée
 - Visualisation des mécanismes de rupture

ANALYSE DE LA MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION UTILISÉE

➤ Au total 11 réponses reçues

- Logiciels utilisés : Plaxis, César, Flac, DeepEx, Zsoil
- Analyse en 2D : modèle complet ou demi-modèle
- Taille du modèle : adaptée hormis 3 cas (frontière latérale trop proche et largeur demi-fouille)
- Finesse du maillage : peu de justification, satisfaisant à part 2 cas (maillage moyen proche de la paroi + maillage très fin consommateur en temps de calcul)
- Modèle de sol utilisé : HSM, HS-Small, Mohr-Coulomb
- Modèle paroi : majoritairement association d'éléments volumiques et de plaque
- Interface considérée dans tous les modèles
- Modèle tirant : association ancrage nœud à nœud et barre frottante (« embedded beam »)
- Phasage : satisfaisant mais 1 cas d'activation du bâtiment après l'installation de la paroi et 1 cas d'application d'une procédure KO avec bâtiment activé

ANALYSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONFRONTATION À D'AUTRES APPROCHES

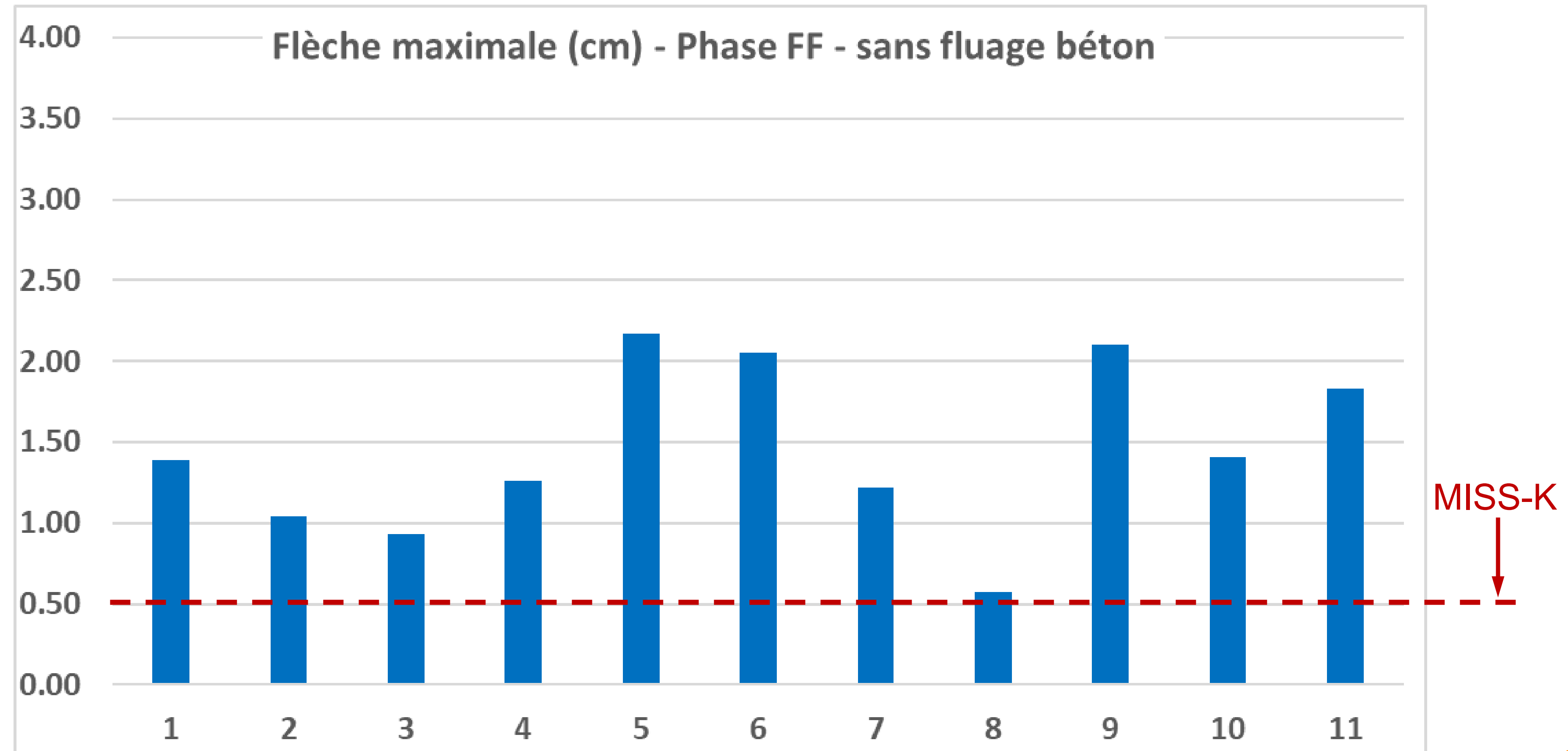
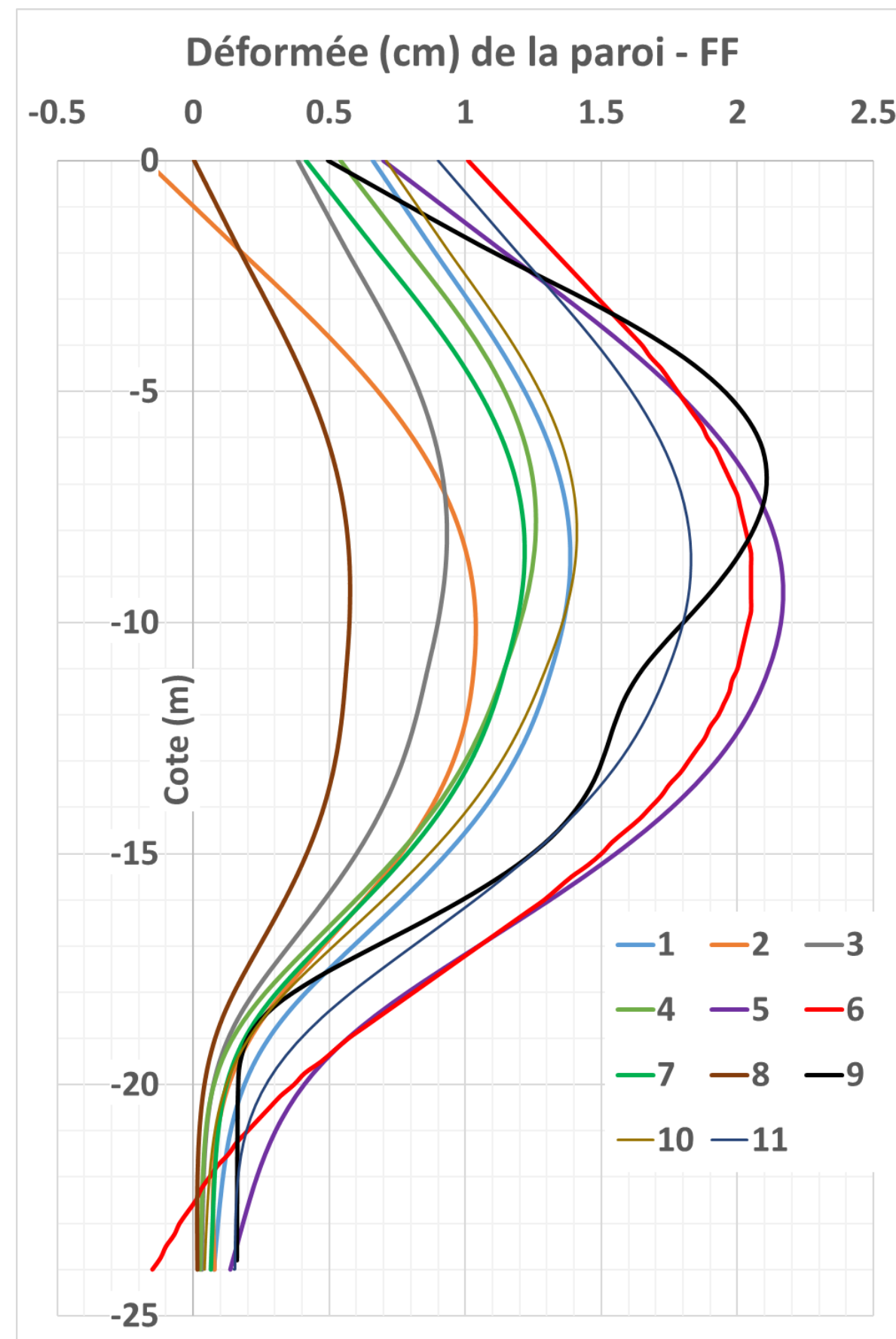
➤ Représentation des principaux résultats (exploitables)

- Déformée de la paroi
- Cuvette de tassements en surface
- Moments fléchissant dans la paroi
- Coefficient de sécurité vis à vis du mécanisme d'instabilité générale

- Point de repère : résultat d'un calcul avec la méthode au coefficient de réaction MISS-K

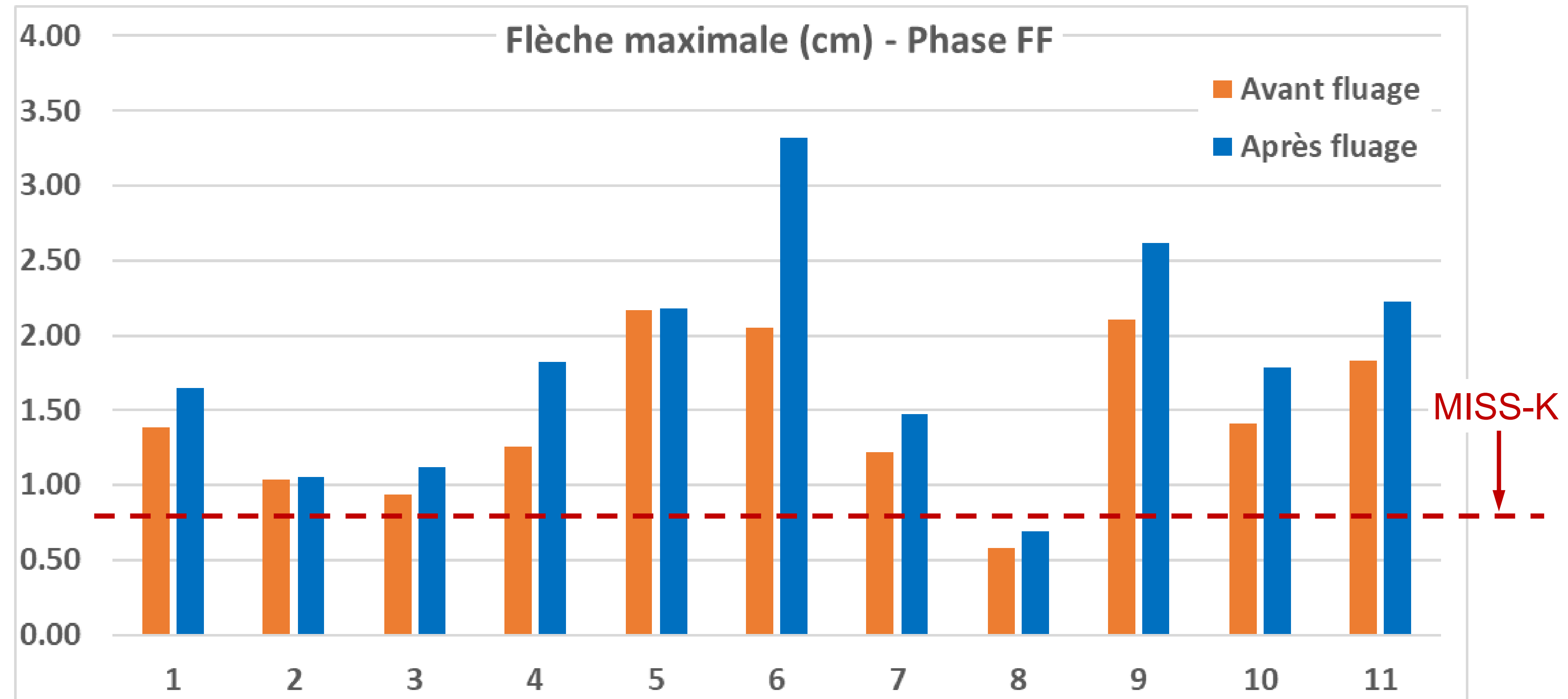
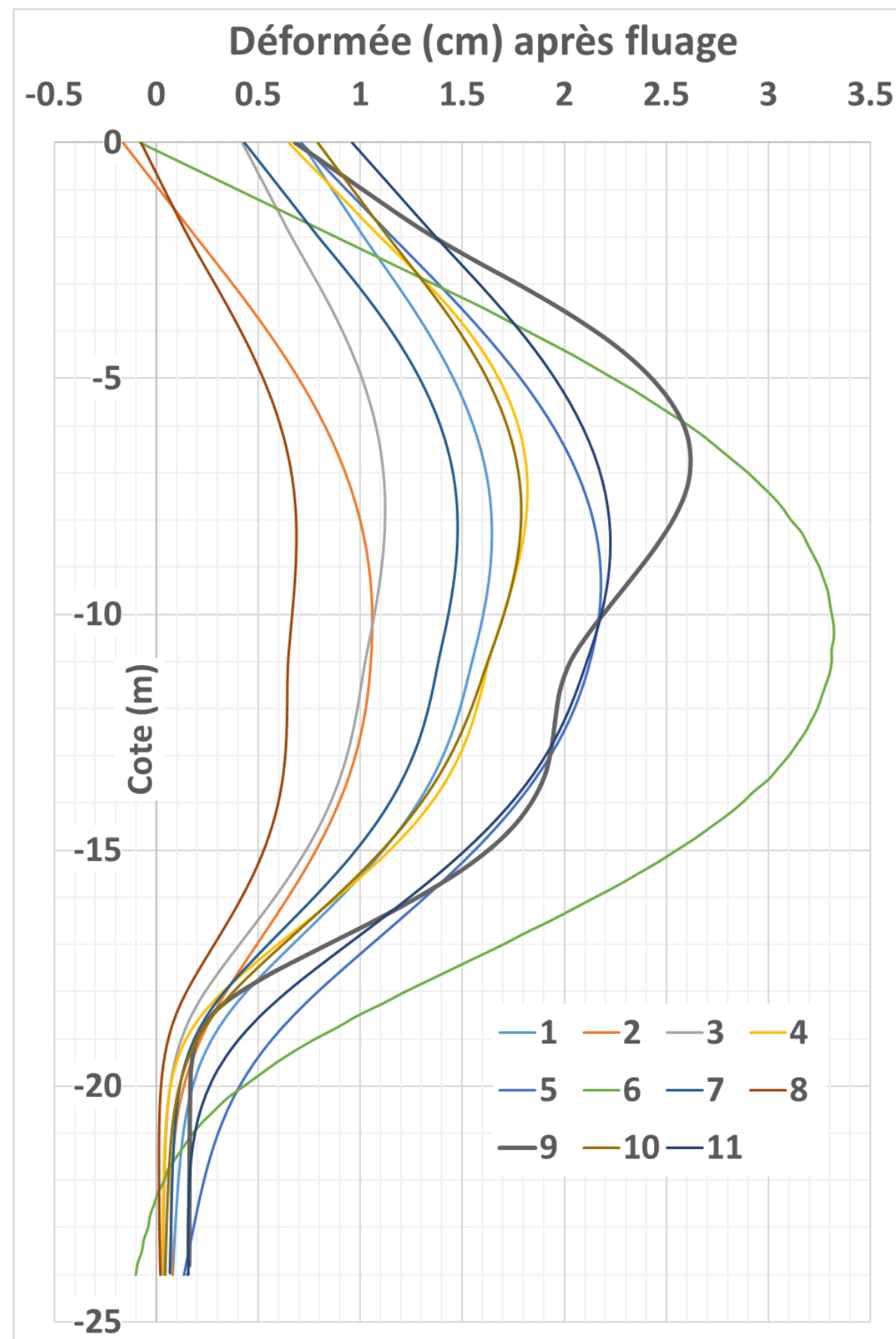
ANALYSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONFRONTATION À D'AUTRES APPROCHES

➡ Déformée de la paroi – avant fluage de la paroi



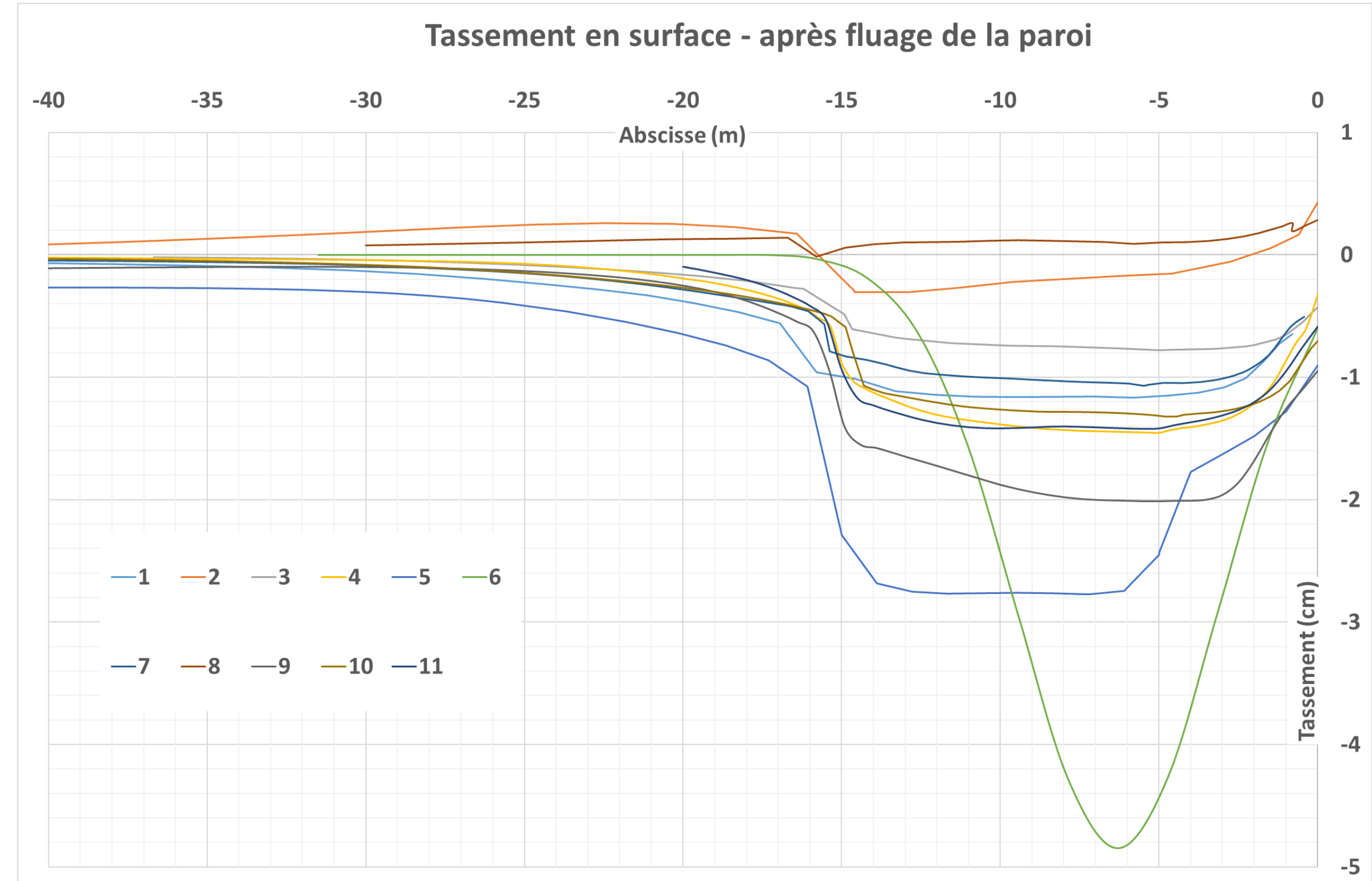
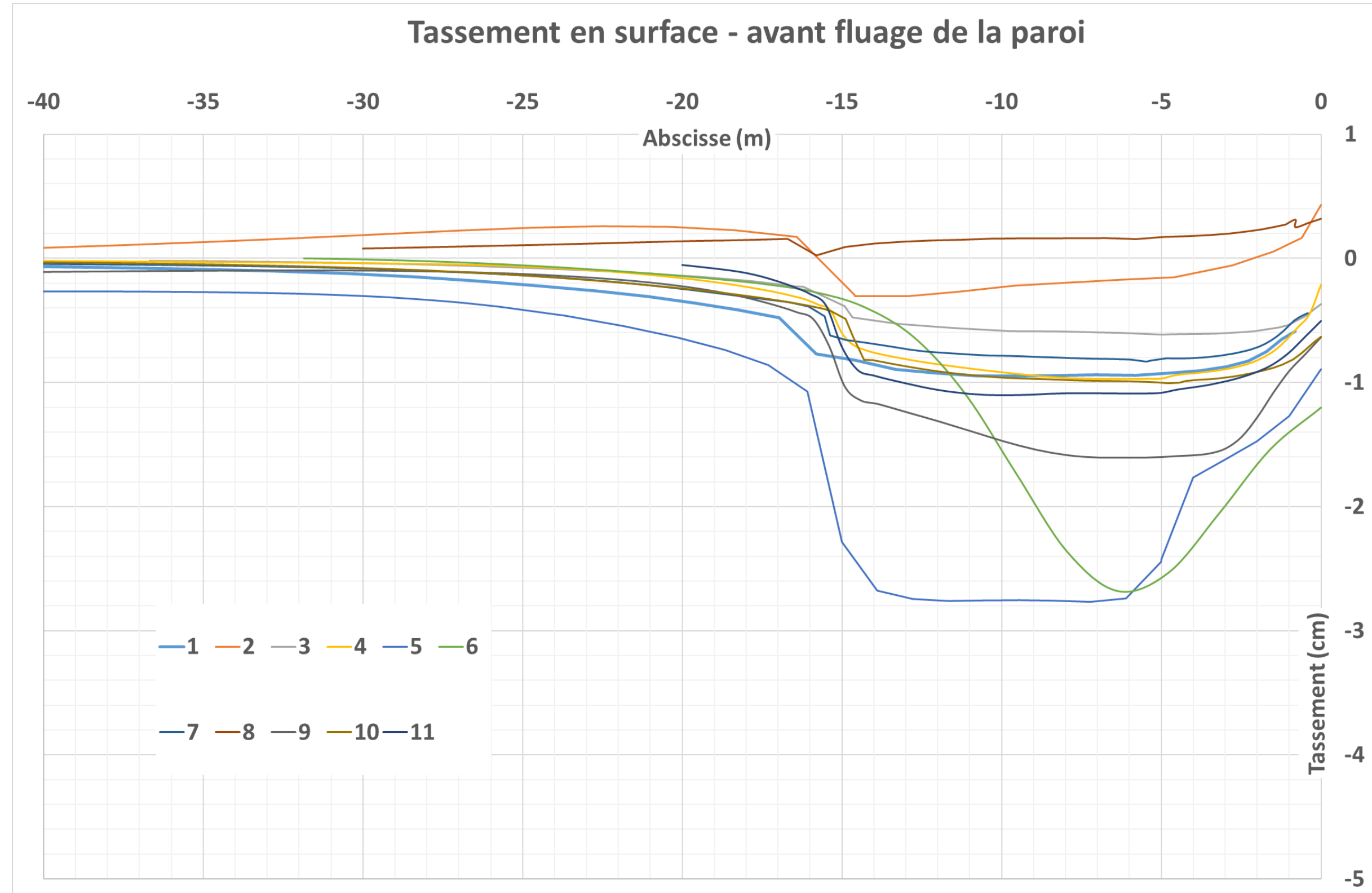
ANALYSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONFRONTATION À D'AUTRES APPROCHES

➡ Déformée de la paroi – après fluage de la paroi



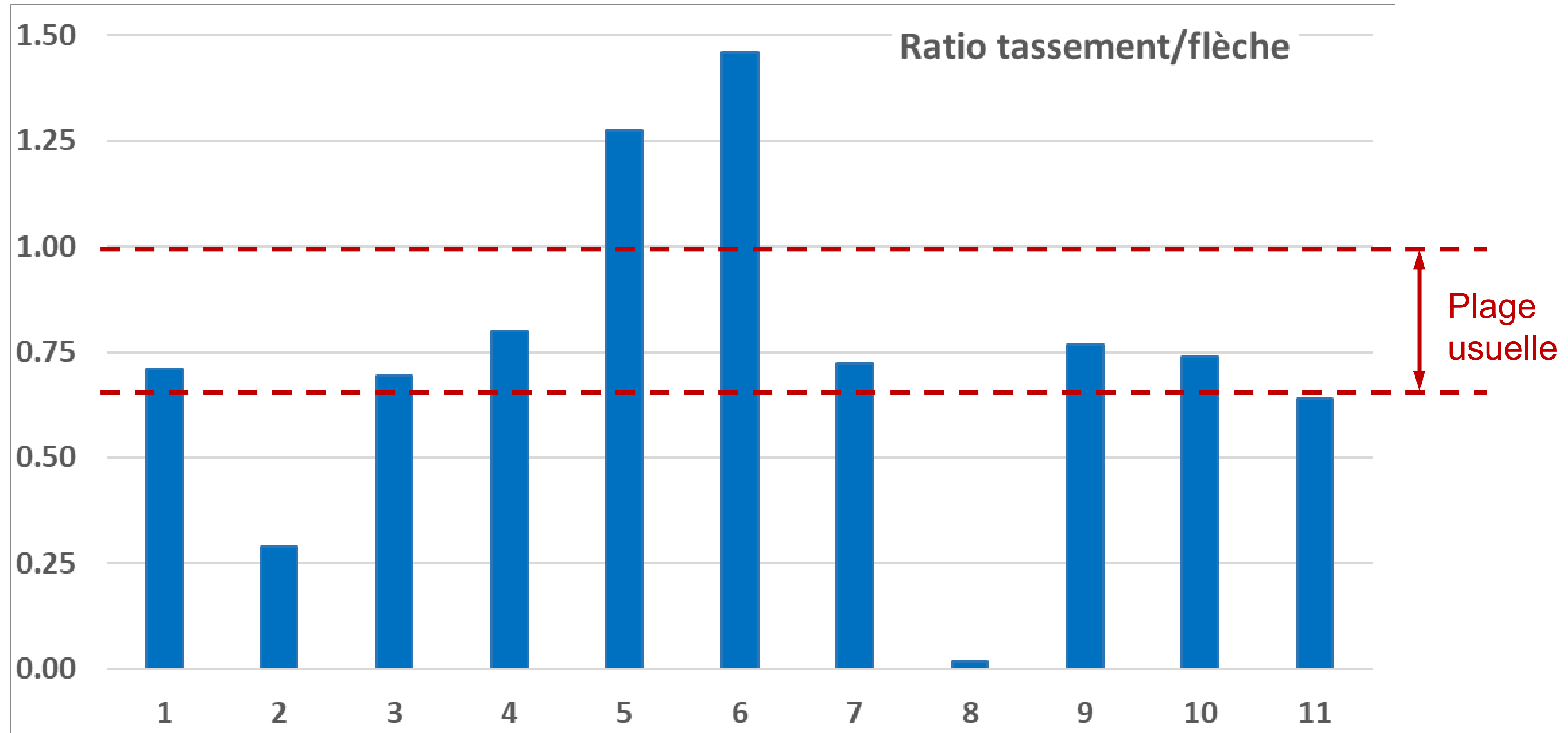
ANALYSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONFRONTATION À D'AUTRES APPROCHES

➡ Cuvette de tassements en surface



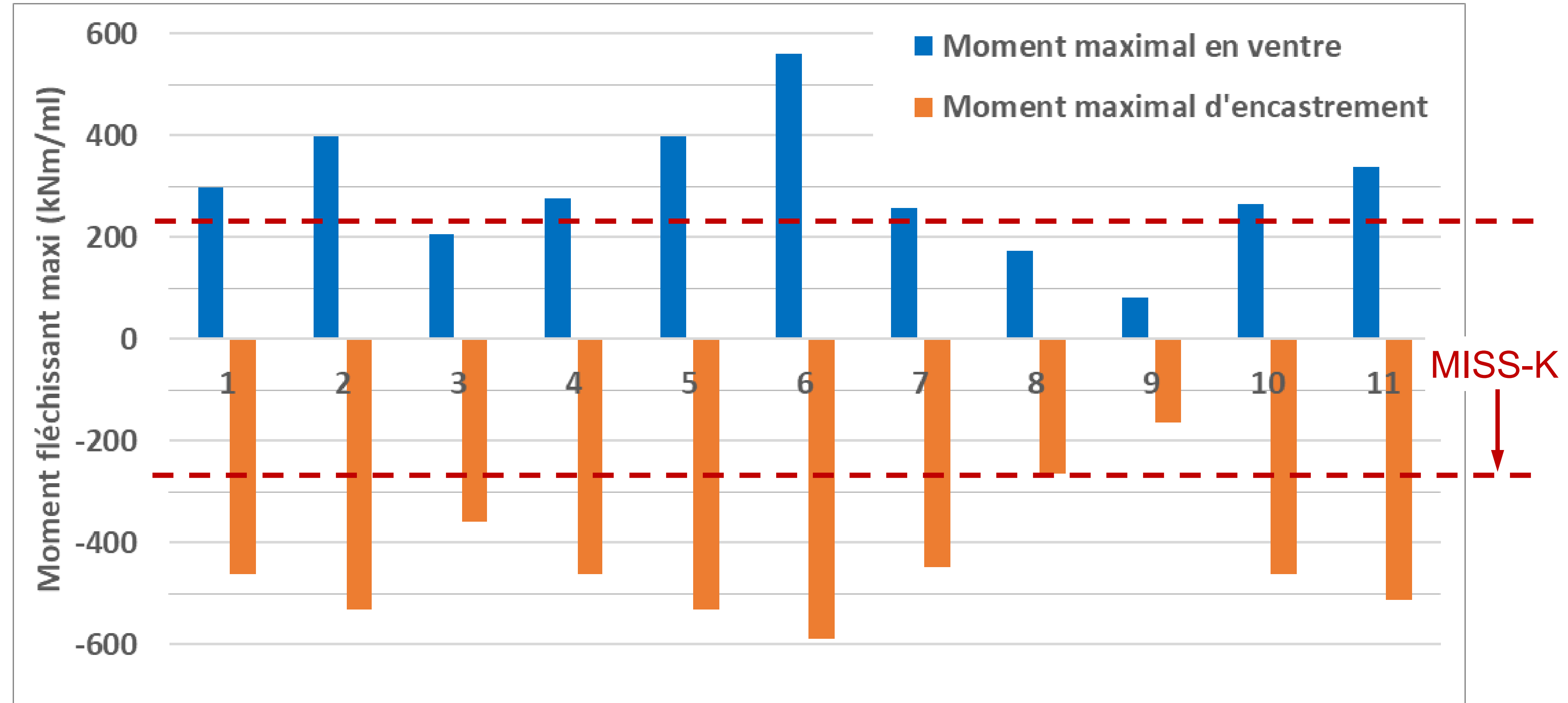
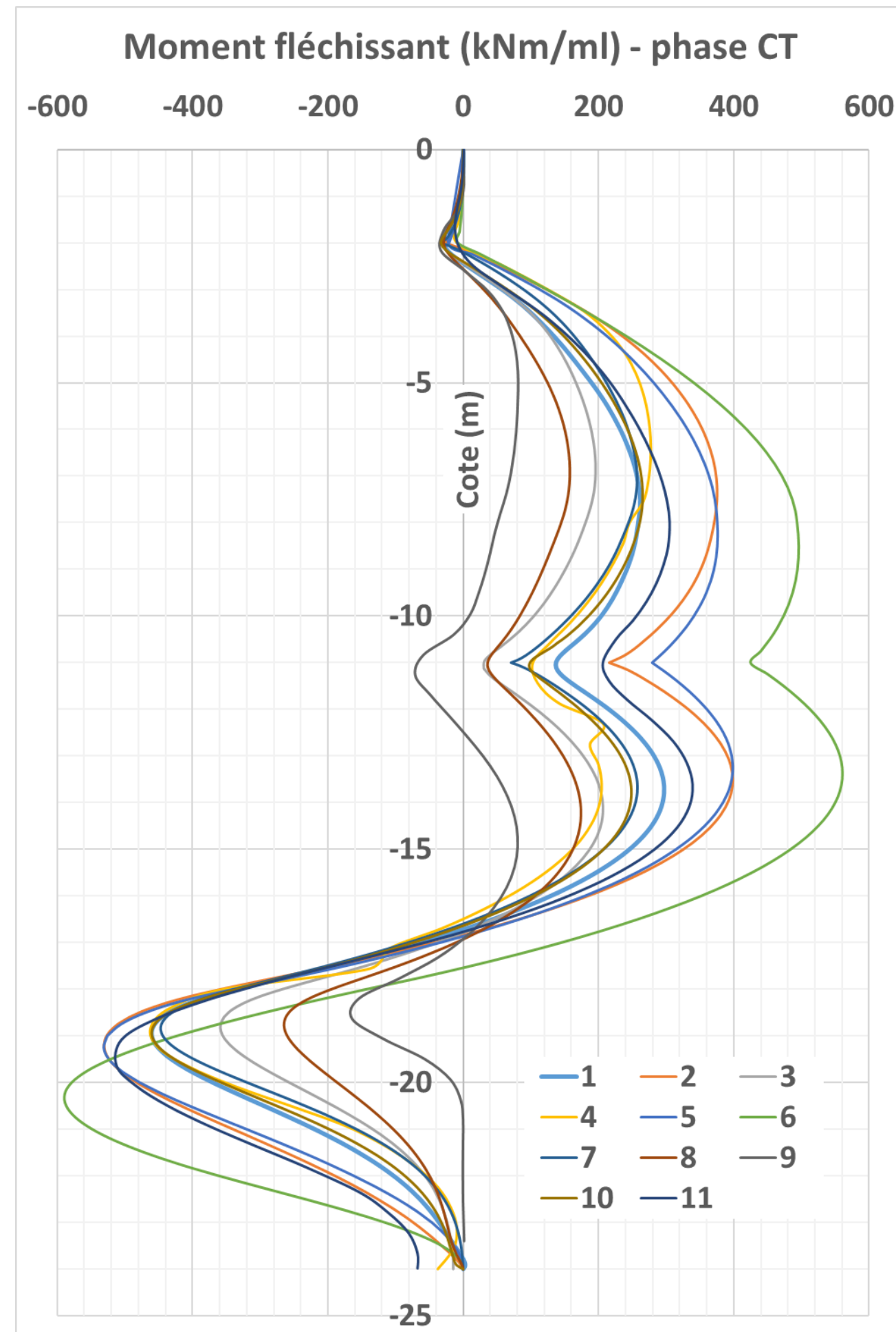
ANALYSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONFRONTATION À D'AUTRES APPROCHES

➤ Cuvette de tassements en surface : ratio tassement/flèche



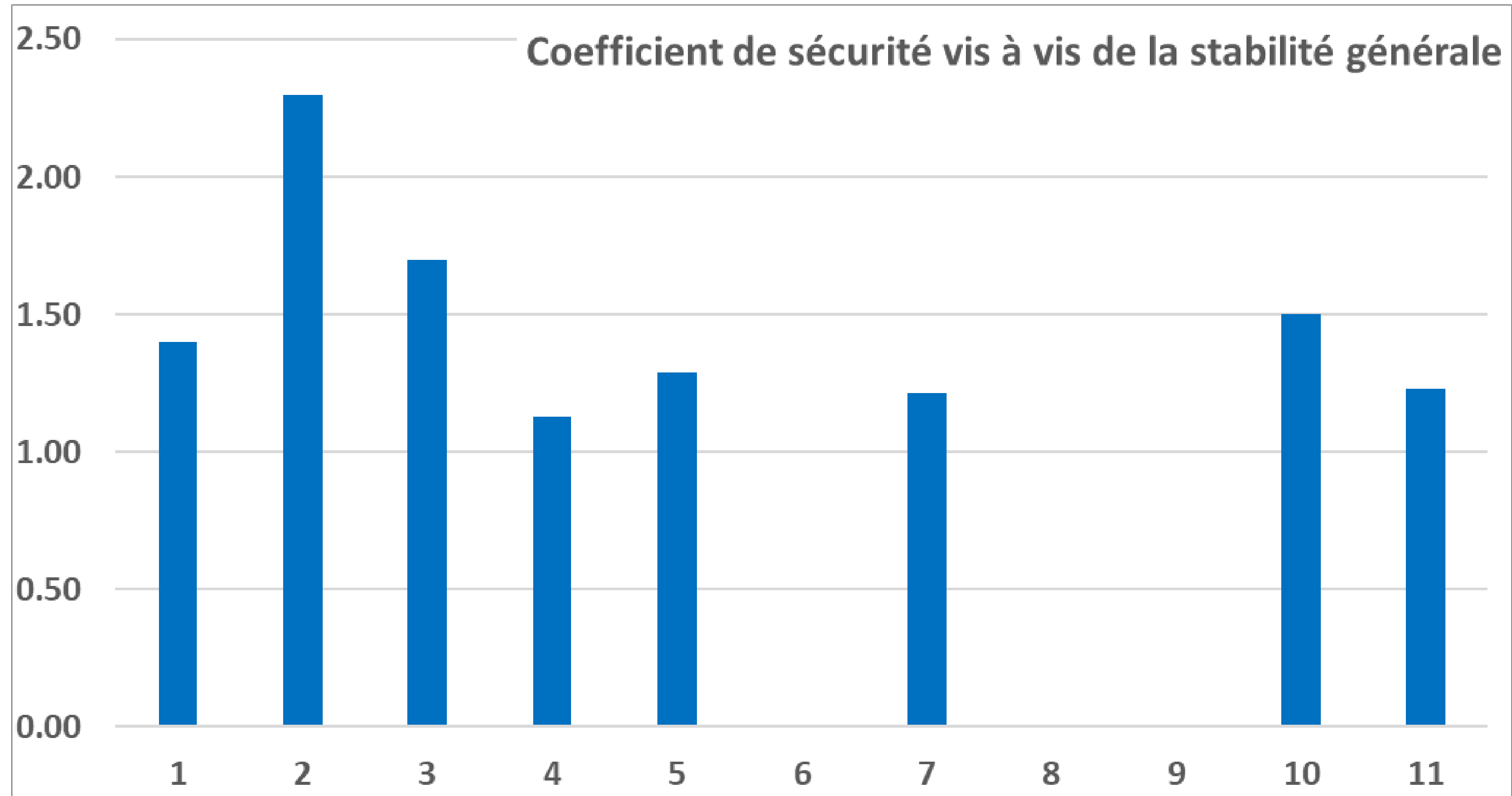
ANALYSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONFRONTATION À D'AUTRES APPROCHES

➡ Moments fléchissant dans la paroi



ANALYSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS ET CONFRONTATION À D'AUTRES APPROCHES

➤ Coefficient de sécurité vis à vis du mécanisme d'instabilité générale



RAPPEL DES PRINCIPES DE MODÉLISATION - RECOMMANDATIONS 2023

Chapitre 6 – Stratégie de modélisation

- Géométrie
- Initialisation des contraintes et choix de K0
- Modélisation des éléments de structure (volumique ou linéique)
- Prise en compte d'interfaces
- Choix des lois de comportement et modules (pour les soutènements)
- Phasage et modification des rigidités (Figure 42 - Exemple de procédure pour analyser le passage CT – LT)



RAPPEL DES PRINCIPES DE MODÉLISATION - RECOMMANDATIONS 2023

➤ Contrôle de la cohérence du modèle (tableau 6.6.2)

- Contrôle des ordres de grandeur : s'appuyer sur des estimations préalables faites à partir de modèles empiriques ou semi-analytiques:
 - calcul avec méthode au coefficient de réaction
 - rapports déformée/H, rapport tassement/déformée
- Exploitation du champ de déplacement vertical et de l'incrément de contraintes horizontales permet de contrôler la pertinence des limites latérales du modèle
- L'amplitude des déformations volumiques et déviatoriques permet de contrôler la validité des hypothèses faites (gammes de déformation) lors des choix des modules de déformation.
- Les sollicitations internes (N, V, M) doivent être compatibles avec la résistance structurale des éléments modélisés

RAPPEL DES PRINCIPES DE MODÉLISATION - RECOMMANDATIONS 2023

➤ Spécifiquement pour les ouvrages de soutènement (tableau 6.6.3)

- Contraintes initiales
- Portance globale et locale (soutènements porteurs)
- Cohérence du phasage
- Mécanismes de poussée/butée, cisaillements mobilisés
- Stabilité générale, défaut de butée
- Sollicitations dans les ancrages, cohérence avec les résistances structurales et géotechniques

FOCUS SUR DES POINTS PARTICULIERS

- **Modèle de sols et justifications des paramètres (modules)**
- **Modélisation de la paroi (CT/LT)**
- **Gestion du bâtiment existant**
- **Gestion des calculs ELU**

FOCUS SUR DES POINTS PARTICULIERS

➤ Modèle de sols et justifications des paramètres

➤ Dans le modèle HSM, 3 modules évoluant avec la pression E_{50} , E_{oed} et E_{ur}

➤ En général les participants ont suivi la « recommandation »

$$E_{oed} = E_{50} \text{ et } E_{ur} = 3 E_{50}$$

➤ E_{50} est défini par E_{50}^{ref} , m et p^{ref}

➤ $m=0$, le module reste constant dans la couche

➤ $m \neq 0$ le module évolue avec la profondeur (« recommandation » $m=0,5$ sable et $m=1$ argile)

➤ p^{ref} doit être cohérent avec la profondeur de mesure de E_M si pris comme référence pour calculer E_{50}^{ref})

➤ valeur par défaut de 100 kPa par exemple dans Plaxis

Tableau 10 - Choix de la loi de comportement en fonction de l'ouvrage étudié

Ouvrage type	Loi élastique linéaire ou non linéaire (voir §2.4.1)	Loi élastoplastique	
		Plasticité parfaite (voir §2.4.2)	Plasticité avec écrouissage (voir §2.4.4 et §2.4.5)
Semelles, radiers, dallages, pieux et inclusions rigides sous charge verticale	Recommandé (voir §6.3.1)	Optionnel	Superflu
Pieux et Inclusions rigides chargés transversalement	Insuffisant	Recommandé	Optionnel
Soutènements, excavations, tunnels	Insuffisant	Peut être suffisant dans certains cas	Recommandé (voir §6.3.4)
Remblais sur sol compressible	Insuffisant	Insuffisant	Recommandé (voir §6.3.4)

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

FOCUS SUR DES POINTS PARTICULIERS

➤ Modèle de sols et justifications des paramètres

- Détermination de E_{50}^{ref} à partir du module pressiométrique E_M
- Différentes approches ont été utilisées
- Une large gamme de valeur de $k = E_{50}/E_M$ est obtenue : de 1 à 9
- Un cas de calage de k sur la base d'un calcul préalable effectué avec la méthode au coefficient de réaction (moments)
- Un cas de référence à des rétro-analyses sur ouvrages dans un contexte voisin
- Des références à la norme NF P 94-282

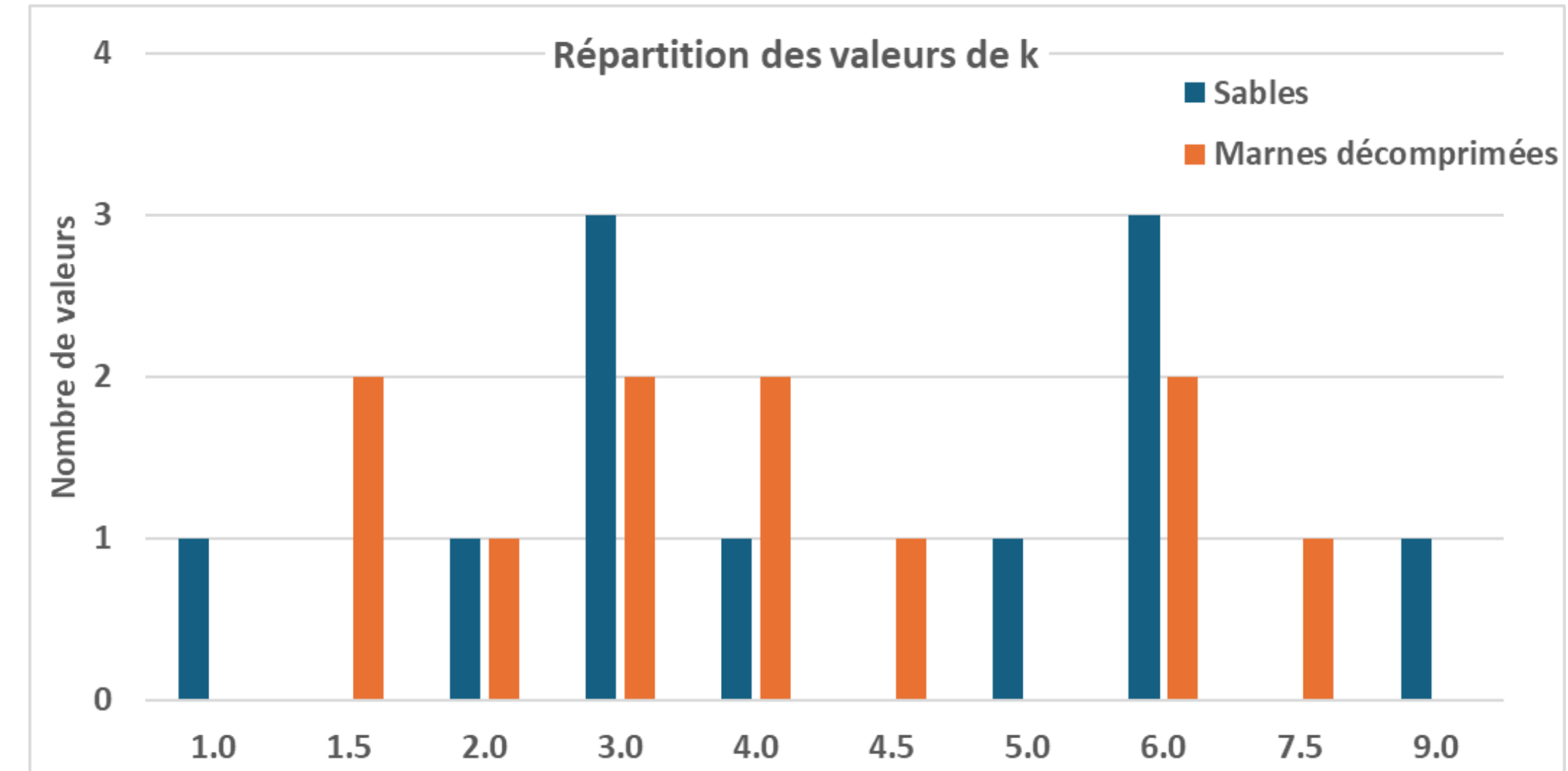


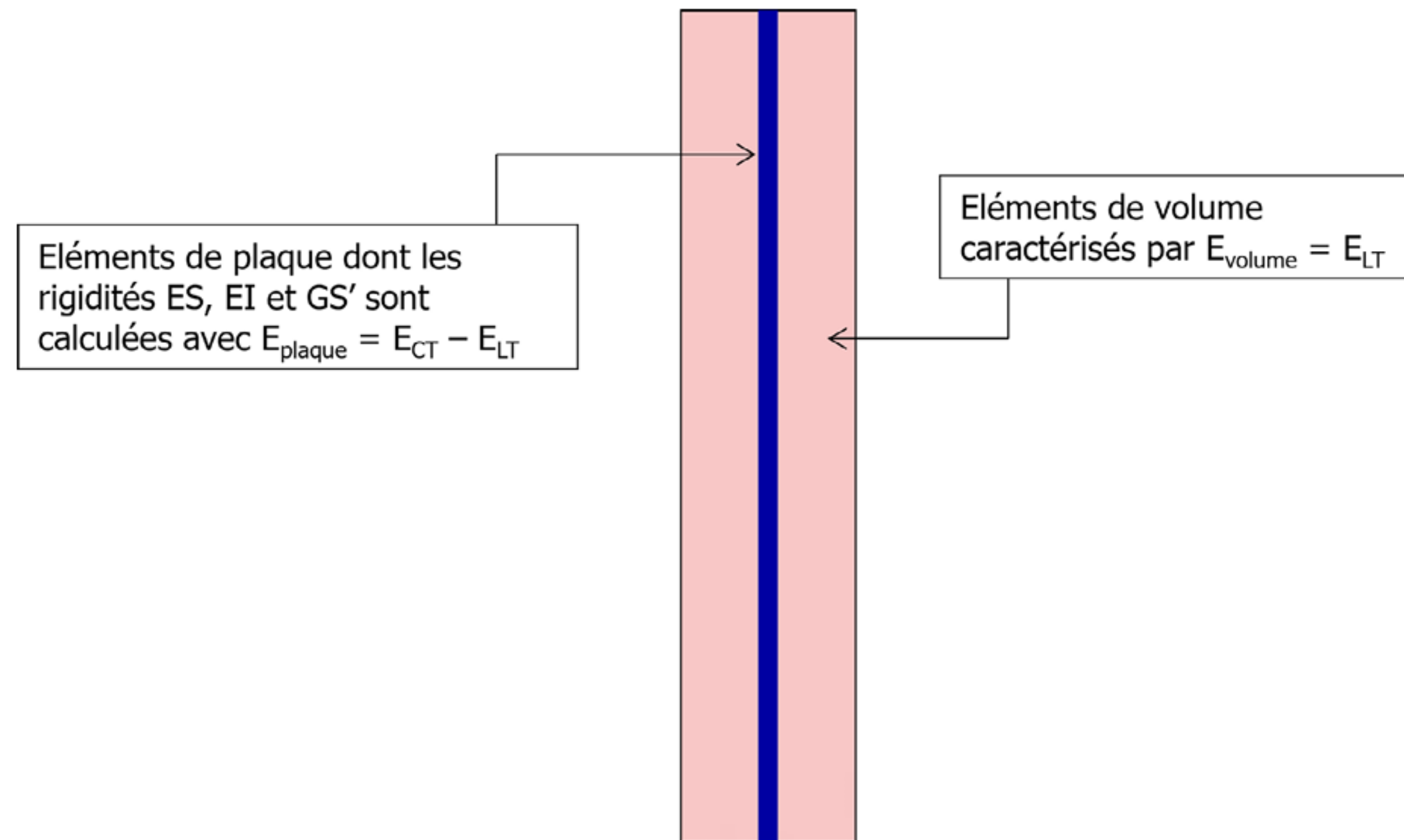
Tableau 8 - Rapport E / E_M pour les ouvrages courants (à titre indicatif)

Ouvrage	Gamme de déformation	Rapport E / E_M	
		Limons et Argiles	Sables et Graves
Radiers et dallages	10^{-3} à 10^{-2}	2 à 4	3 à 6
Semelles et pieux isolés	$\sim 10^{-3}$	3 à 4	4 à 6
Ecrans de soutènement	10^{-4} à 10^{-3}	3 à 8	4 à 12
Tunnels	10^{-3} à 10^{-2}	2 à 4	3 à 6

FOCUS SUR DES POINTS PARTICULIERS

➤ Modélisation de la paroi (CT/LT)

- Certains logiciels (comme Plaxis) ne permettent pas de simuler le fluage par une simple modification des propriétés mécaniques (calcul incrémental)
- cf. approche proposée dans le guide §6



FOCUS SUR DES POINTS PARTICULIERS

➤ Gestion du bâtiment existant

- K_0 pas applicable en présence du bâtiment
- Bâtiment à activer dans une phase préalable avant mise en place de la paroi
- cf. guide §6

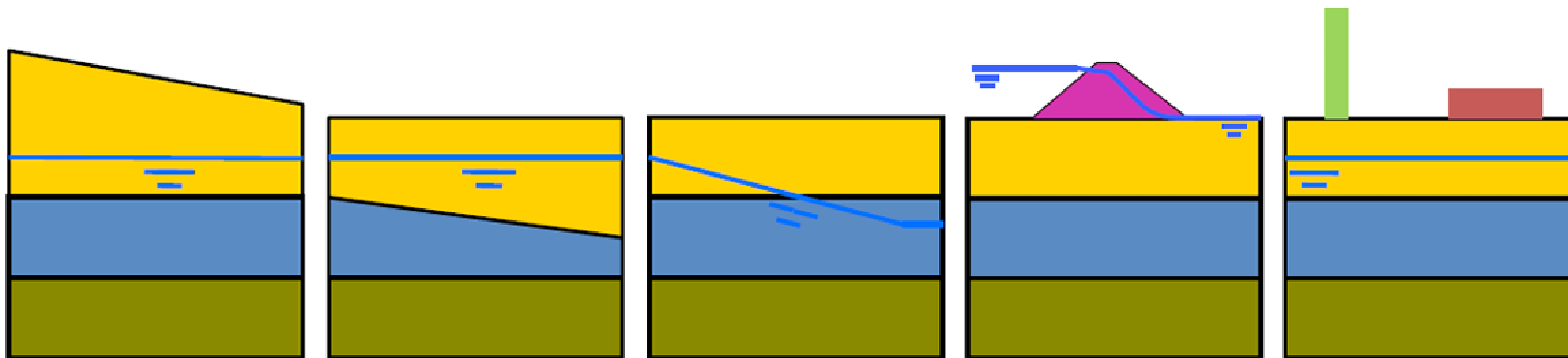


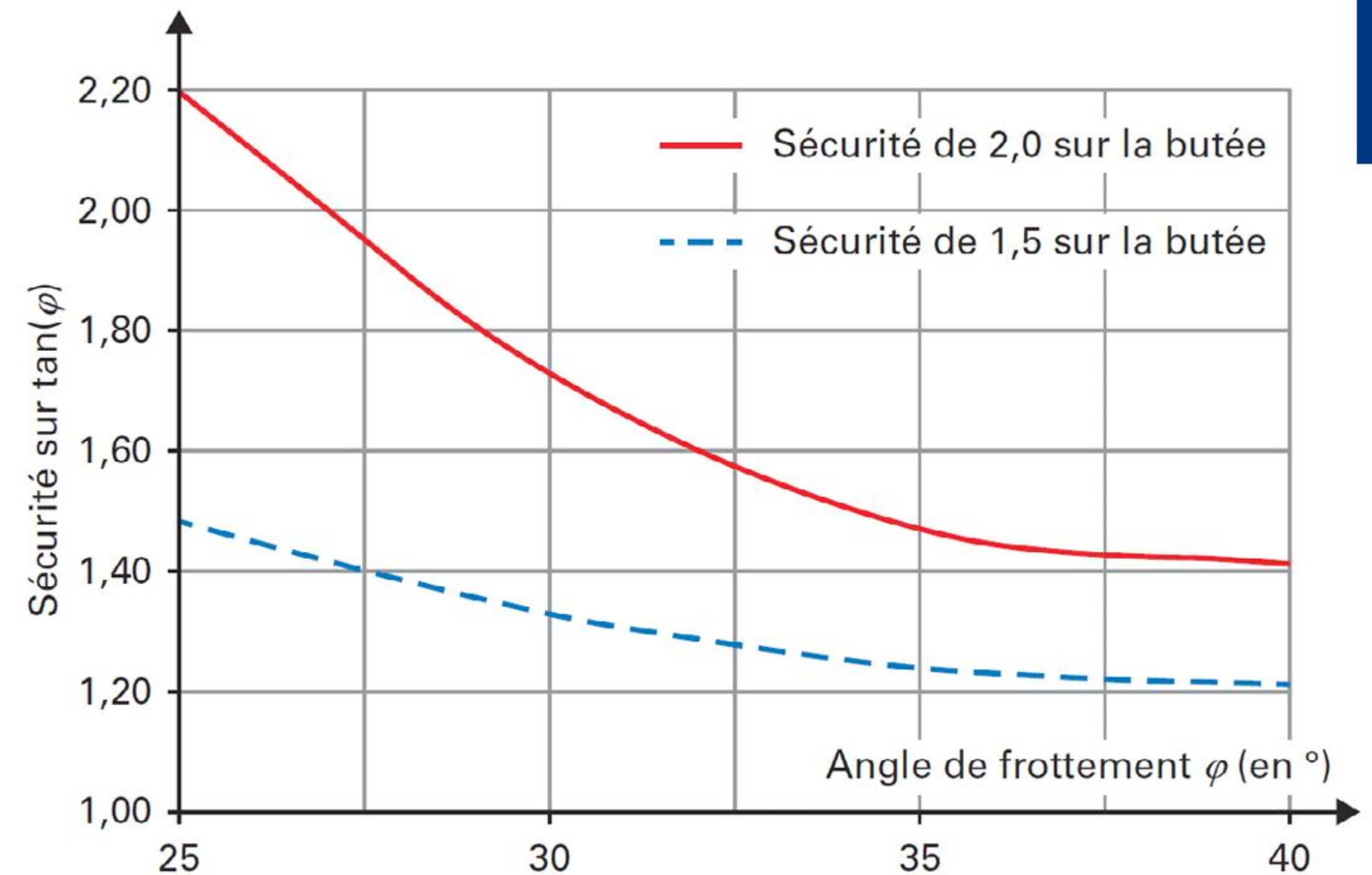
Figure 27 - Exemples de situations pour lesquelles la procédure K_0 n'est pas directement applicable pour le calcul du champ de contraintes initiales.

- Remise à 0 des déplacements avant les phases d'excavation

FOCUS SUR DES POINTS PARTICULIERS

➤ Gestion des calculs ELU

- Attention aux sollicitations internes dans les éléments structuraux obtenue dans une phase de réduction des propriétés de cisaillement (efforts non plafonnés par défaut avec une loi de comportement linéaire élastique)
- Pour la butée : gestion en post-traitement (rapport entre butée mobilisable calculée analytiquement et butée mobilisée issue du modèle) ou gestion par une réduction locale des propriétés de cisaillement
- cf. guide Chapitre 7
- Une anticipation de la révision de l'Eurocode 7



CONCLUSIONS

- **Un cas d'ouvrage « classique » porteur d'enseignement sur la méthodologie générale de modélisation numérique**
- **Pratique générale en cohérence avec les Recommandations 2023**
- **Un retour d'expérience sur 3 aspects importants**
- **Pour le challenge 2026, un couplage hydromécanique fort viendra compléter cette problématique d'interaction sol-structure marquée. Des PV d'essais in-situ et en laboratoire seront également fournis pour aider au choix des lois de comportement et à la détermination des paramètres**