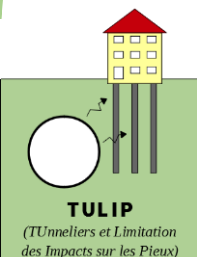


Synthèse des résultats obtenus par les participants à l'exercice de prévision TULIP

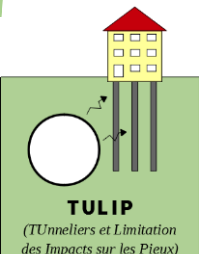
Nicolas BERTHOZ (CETU)

E. BOURGEOIS (UGE), W. MOHAMAD (UGE), D. BRANQUE (ENTPE), D. SUBRIN (CETU)



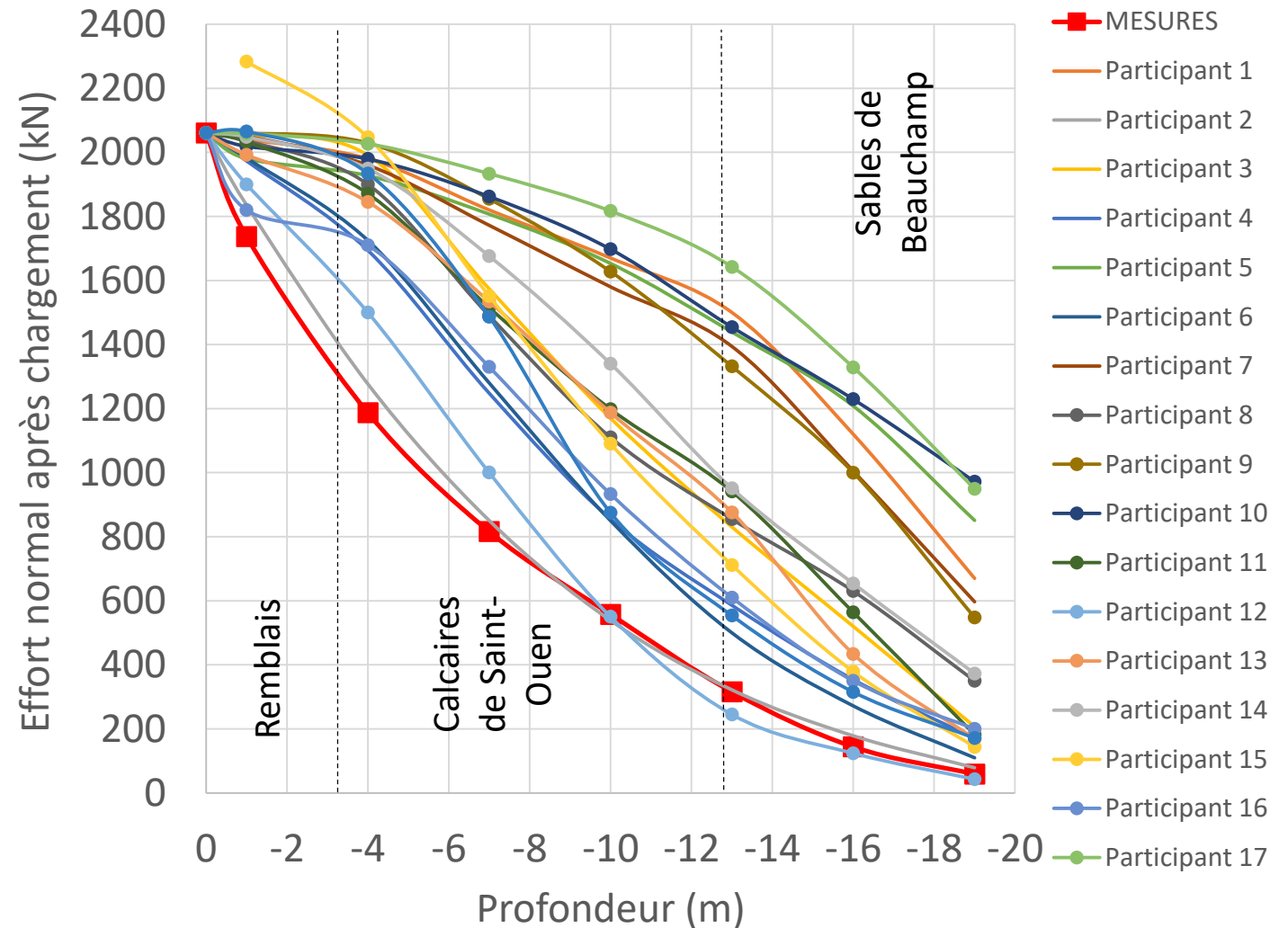
SOMMAIRE

- ❖ Synthèse des réponses n°1 (données « usuelles »)
- ❖ Synthèse des réponses n°2 (cuvette de tassement et effort normal initial dans le pieu fournis)
- ❖ Synthèse des réponses n°3 (modèle géotechnique imposé)
- ❖ Quelques conclusions

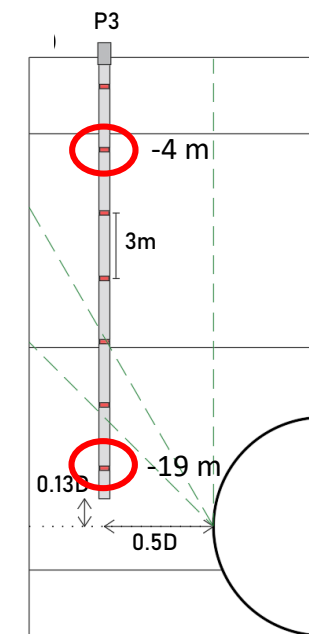
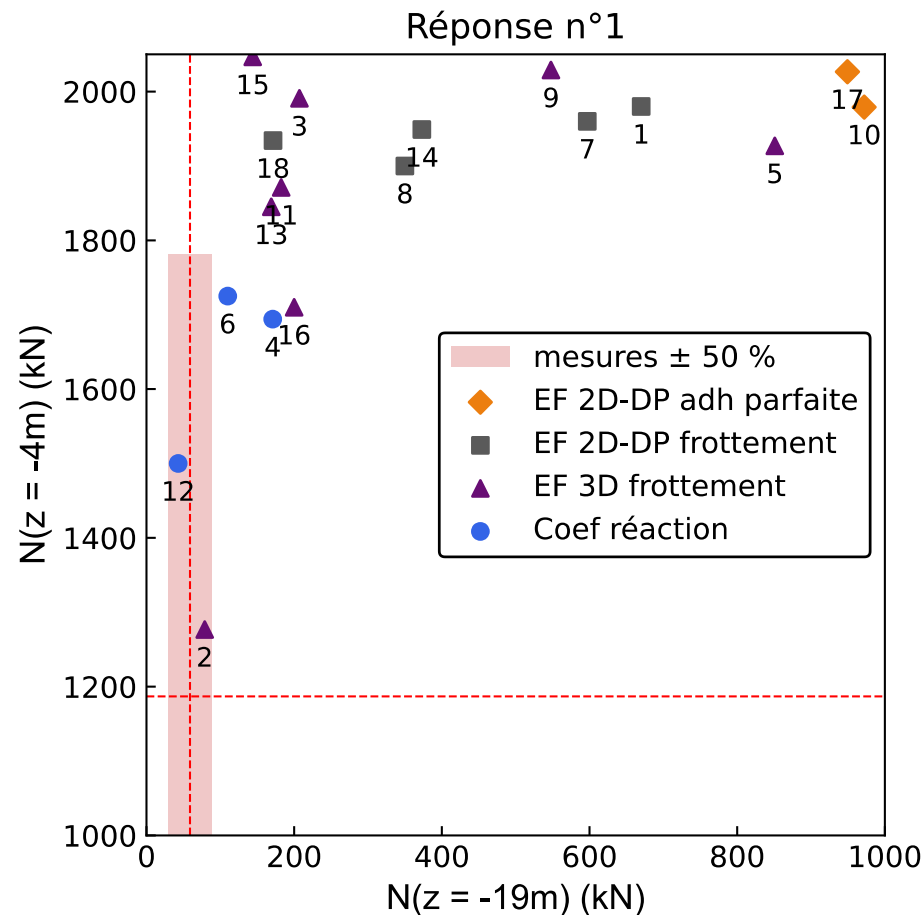


Effort normal initial dans le pieu après chargement

- Une majorité de modèles sur-estimant l'effort de pointe : jusqu'à 1000 kN contre presque zéro expérimentalement,
- Deux participants (2 et 12) très proches du résultat expérimental.

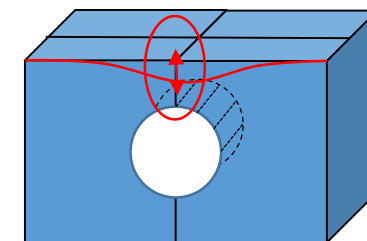
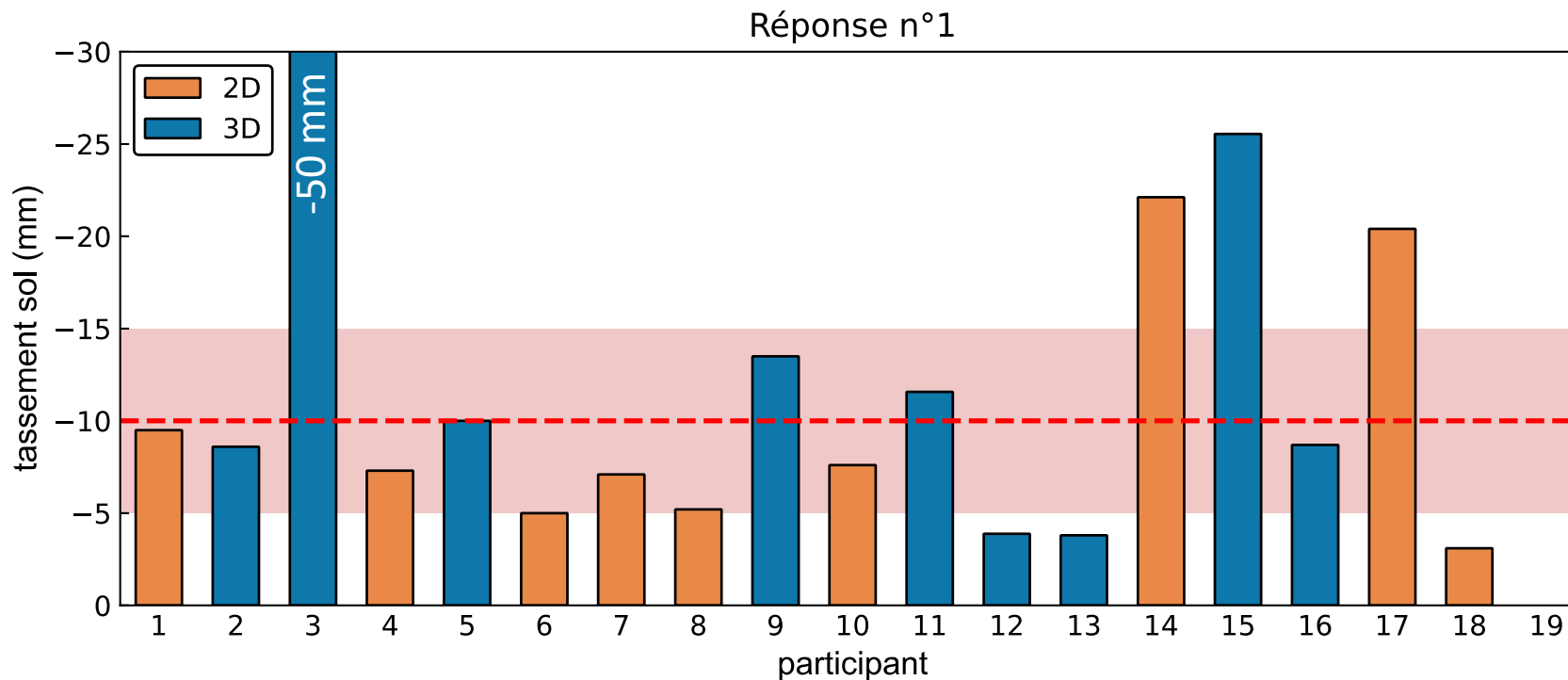


- Des écarts croissants avec la profondeur,
- Des modèles EF 2D en déformations planes surestimant plus fortement l'effort de pointe (surtout en cas d'hypothèse d'adhérence parfaite),
- De bons résultats atteignables via des calculs 3D (ou 2D axisymétrique) ou au coefficient de réaction.

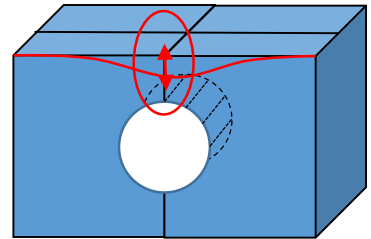
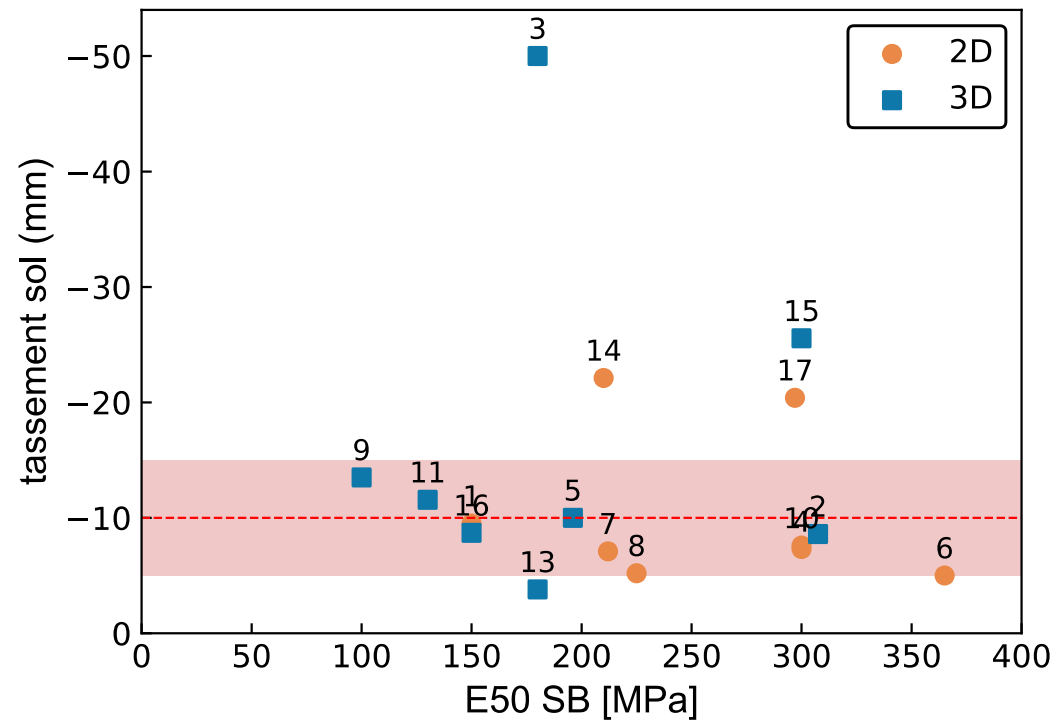
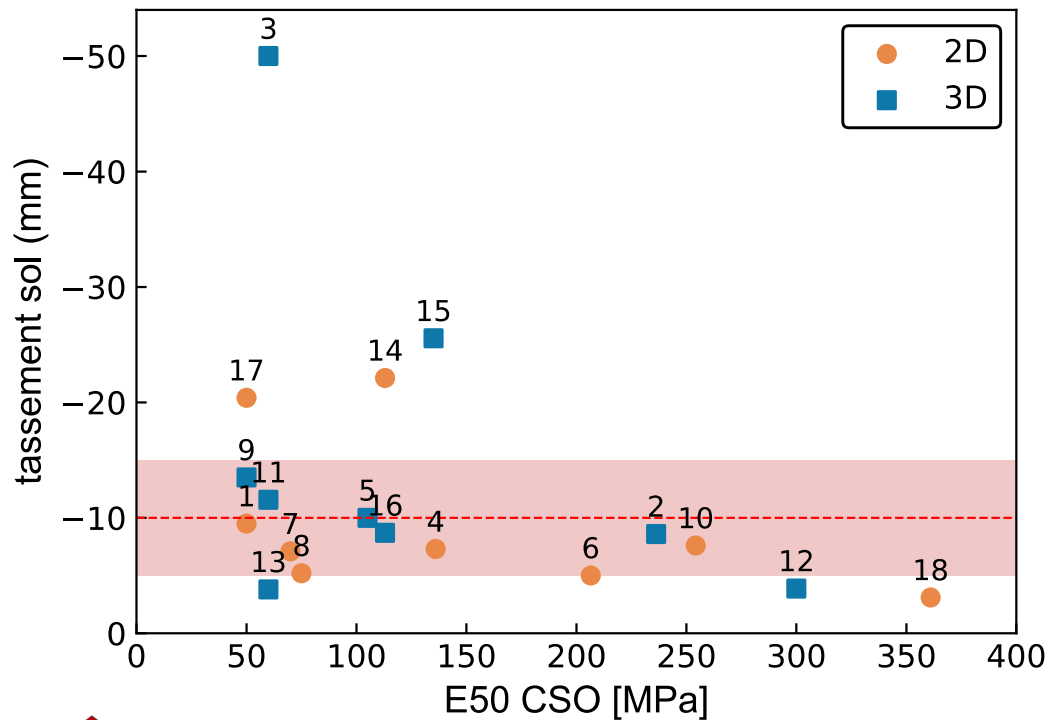


Tassement maximal de la surface du terrain

- 50% des participants dans la bonne gamme (5 à 15 mm),
- 3 participants optimistes (3 mm), 4 participants pessimistes (20 à 50 mm),
- Les modèles 3D ne sont pas systématiquement meilleurs que les 2D.

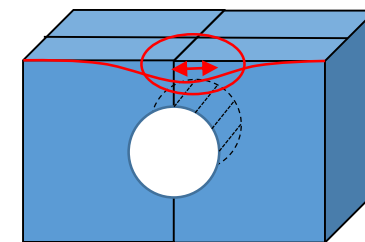
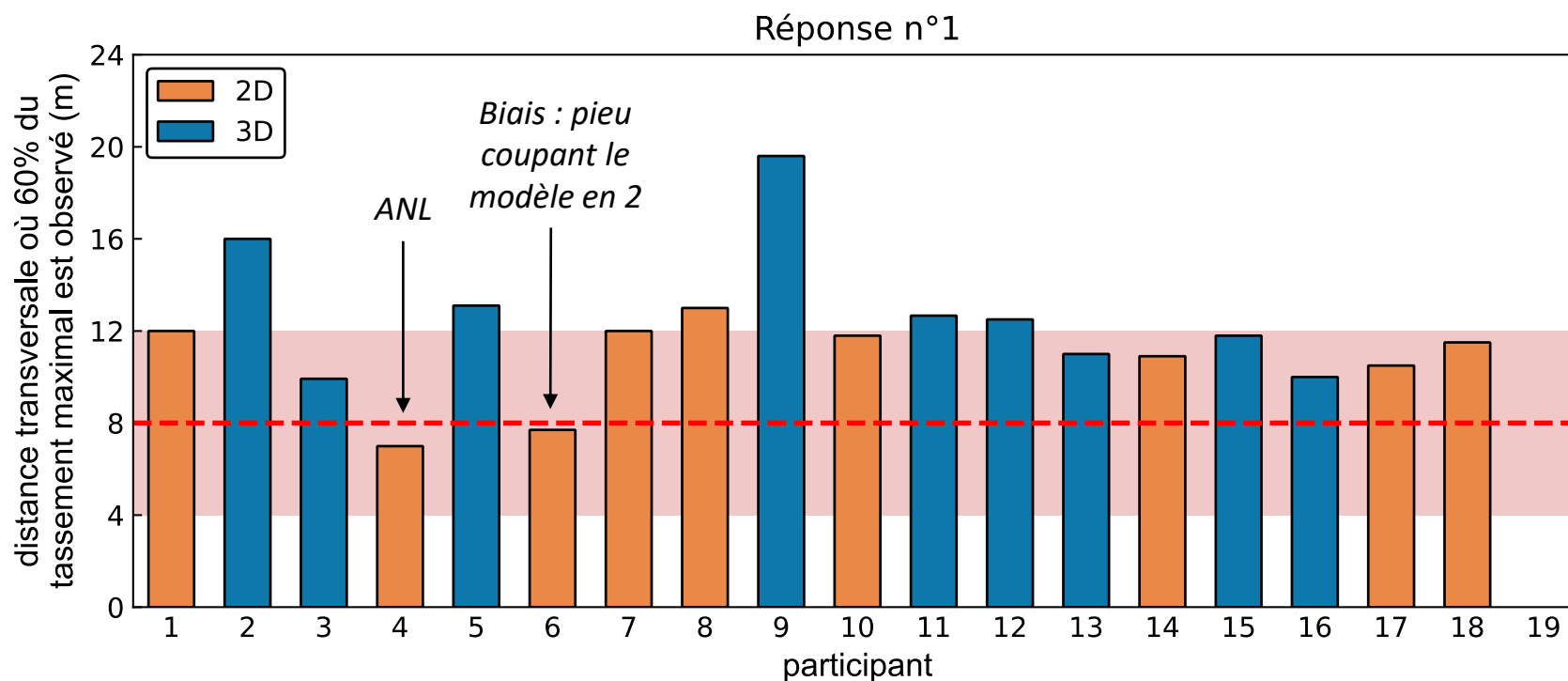


- Les tassements générés ne sont pas directement corrélés aux valeurs des modules du terrain → le processus de modélisation du creusement influence aussi les résultats.



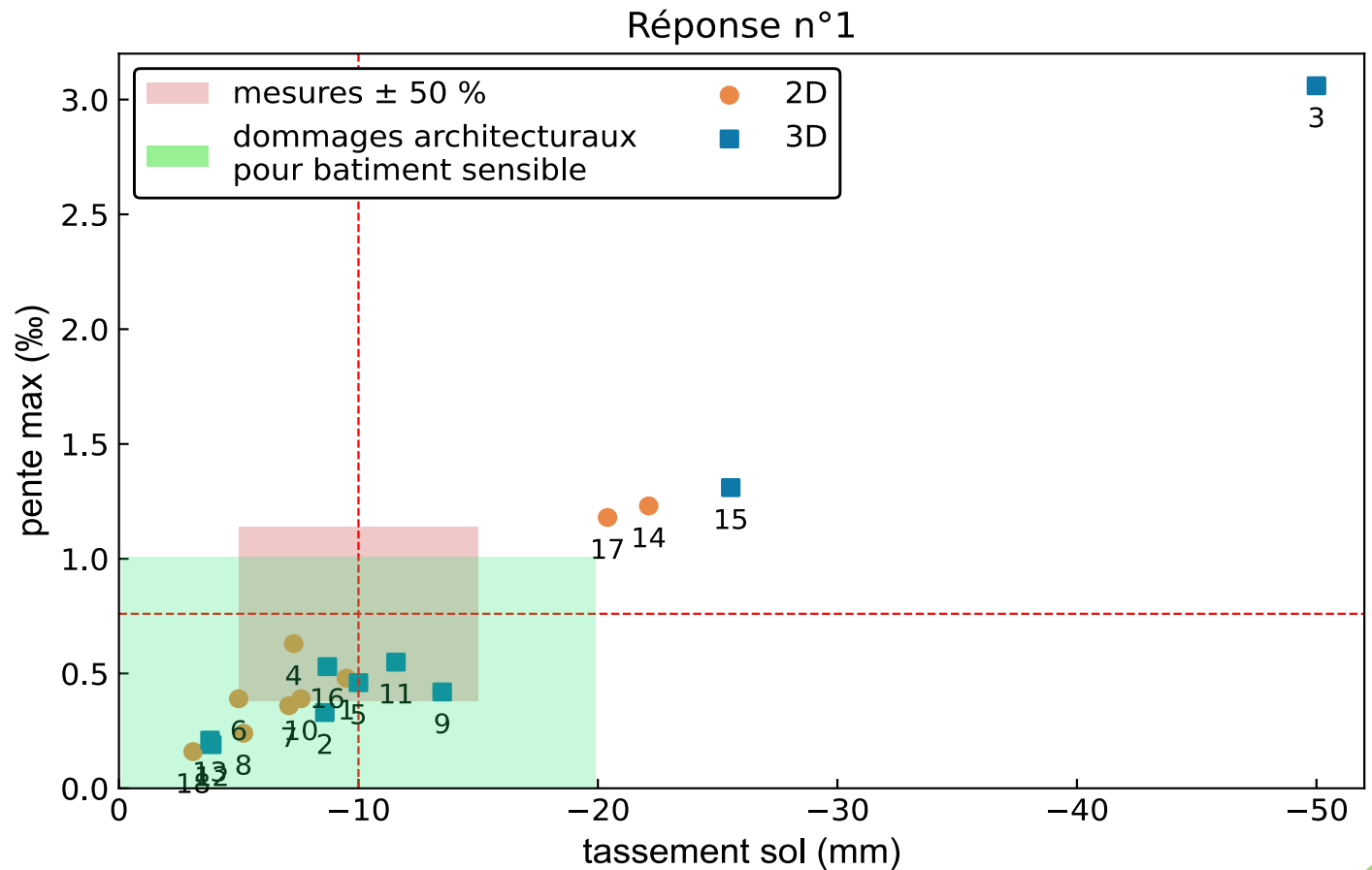
Extension transversale de la cuvette de tassement en surface

- Une extension surestimée d'environ 50% pour la quasi-totalité des modèles,
- Pas de différence notable entre modèles 2D et 3D,
- Utiliser une élasticité anisotrope non linéaire resserre la cuvette.



Tassements différentiels et lien avec les déplacements « admissibles »

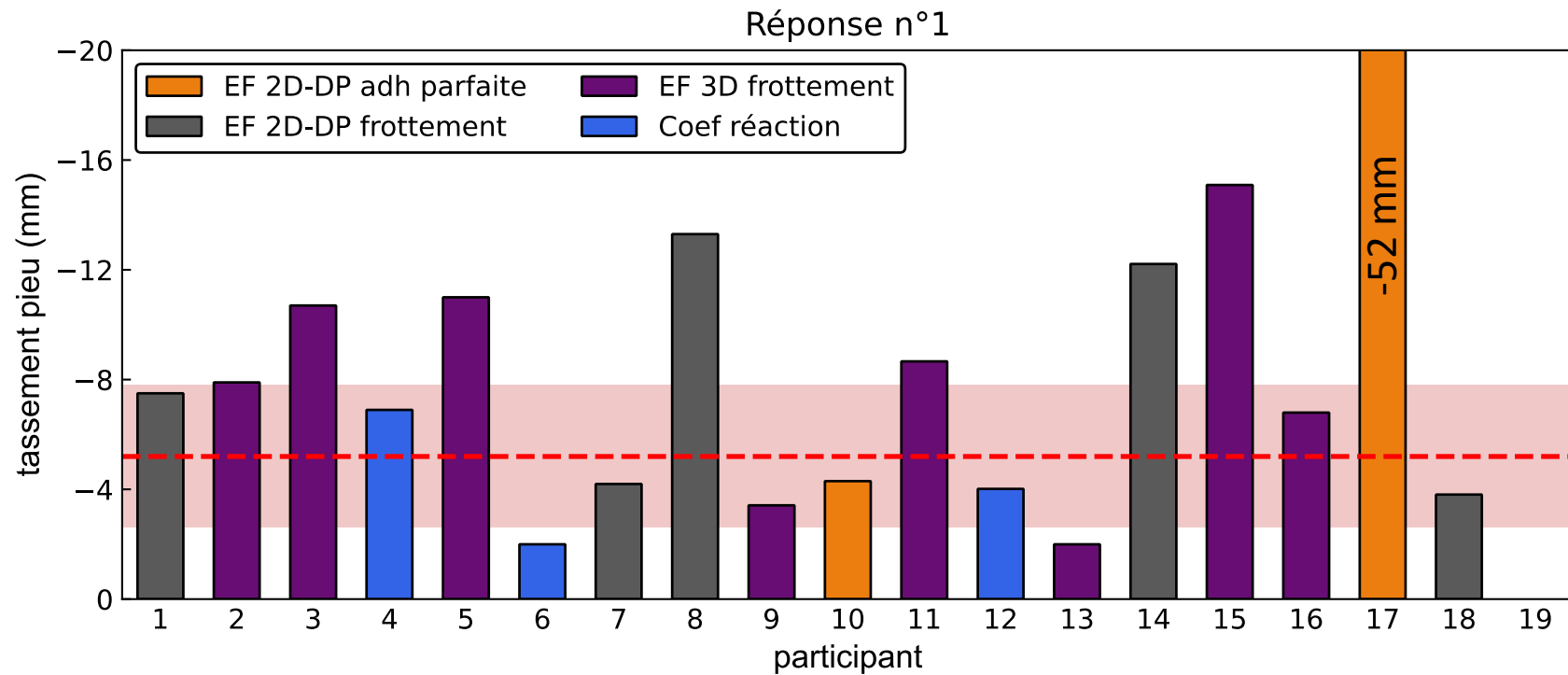
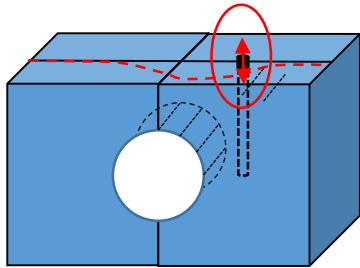
- Les pentes maximales (dédites de l'hypothèse d'une gaussienne) sont comprises entre 0,2 et 3 ‰,
- 60 % des modèles sont optimistes (sans facteur de sécurité ici),
- 4 estimations pourraient conduire à des adaptations de conception en raison de dépassement des seuils de sensibilité intrinsèque « usuels ».



Tassement du pieu

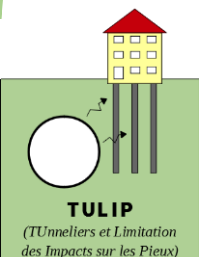
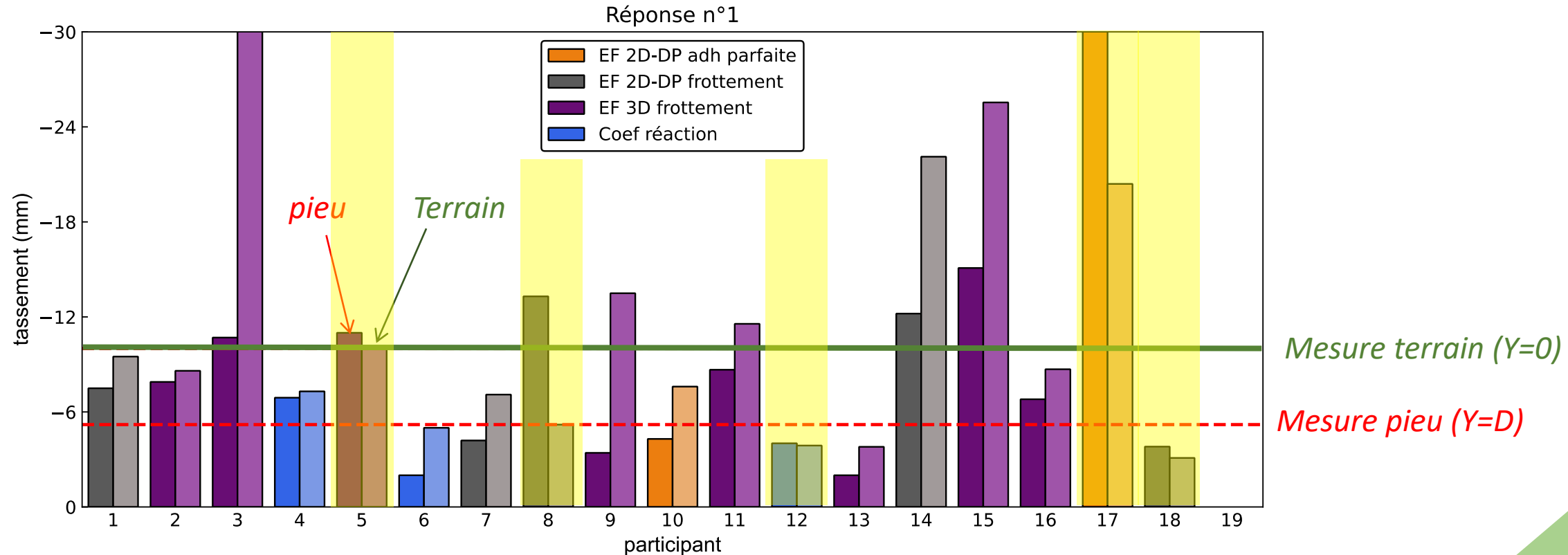
- Une grande dispersion des tassements estimés (2 à 52 mm, *i.e.* 0,5 à $10.s_{\text{pieu-réel}}$),

Nota : charge appliquée = 33% de la capacité portante du pieu !

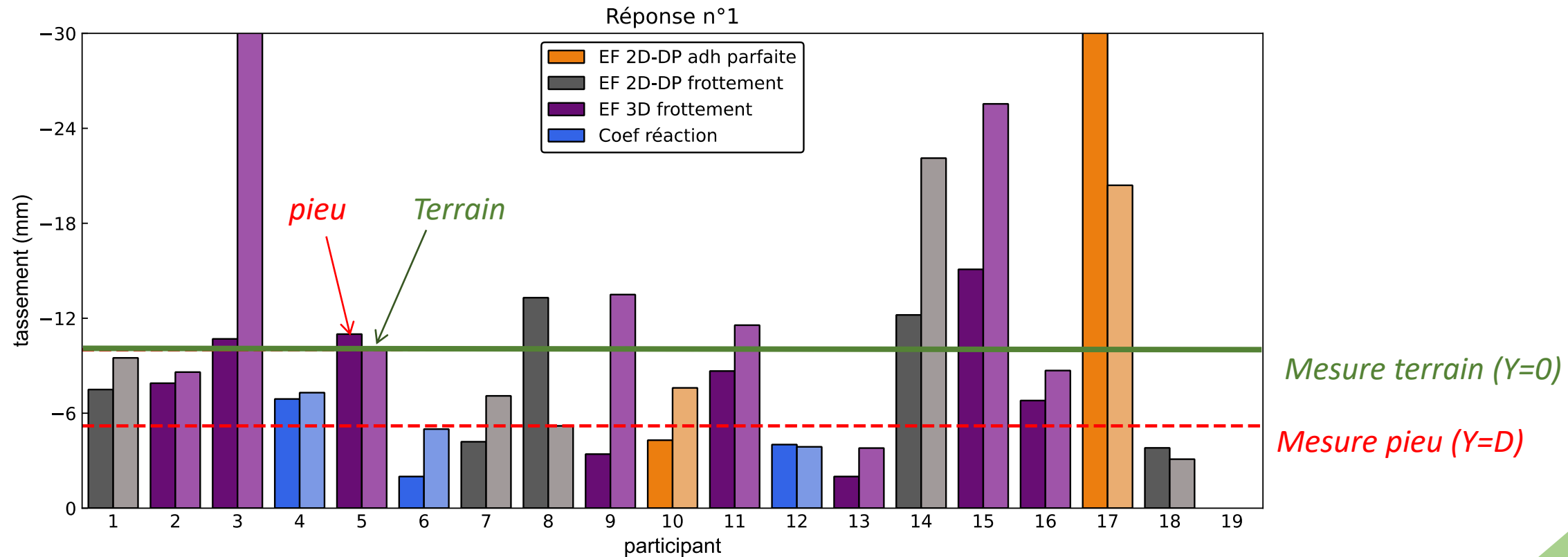


- $0,2 < s_{\text{pieu}} / s_{\text{max-terrain}} < 2,5$ (pour 0,5 mesuré)
 - 13 participants obtenant $s_{\text{pieu}} < s_{\text{max-terrain}}$
 - 5 participants obtenant $s_{\text{pieu}} > s_{\text{max-terrain}}$
- Une bonne estimation du tassement en surface du terrain « en champ libre » ne garantit pas une bonne estimation du tassement du pieu (ex : P5),

Attention : on compare ici des tassements qui n'ont pas lieu pas à la même distance de l'axe du tunnel

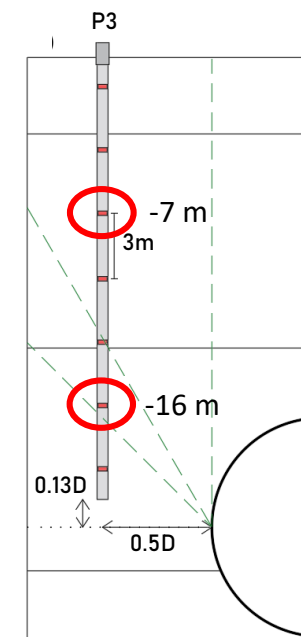
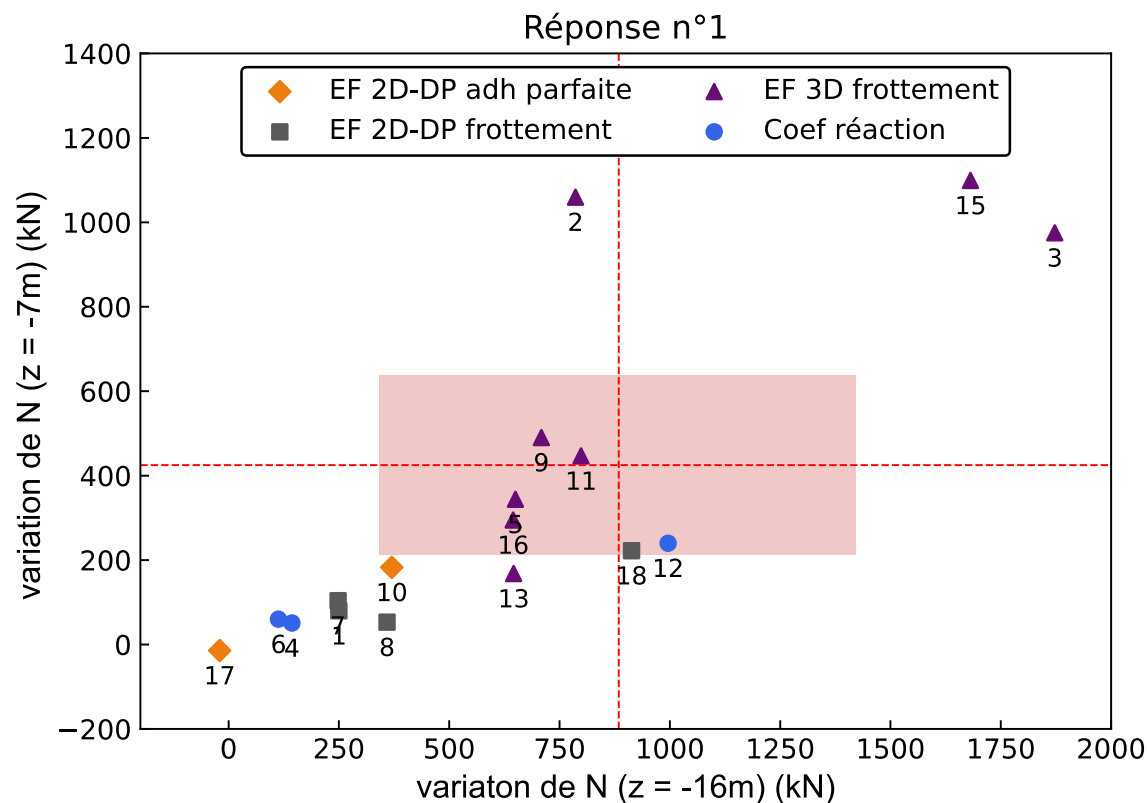


- Pas de tendance évidente quant à l'influence du type de calcul réalisé :
 - P3 et P5 : EF 3D, mais procédé TBM différent ($P_j = 0$ ou P_f), et modules P3 plus faibles,
 - P10 et P17 : EF 2D DP adhérence parfaite, mais loi comportement terrain différente.

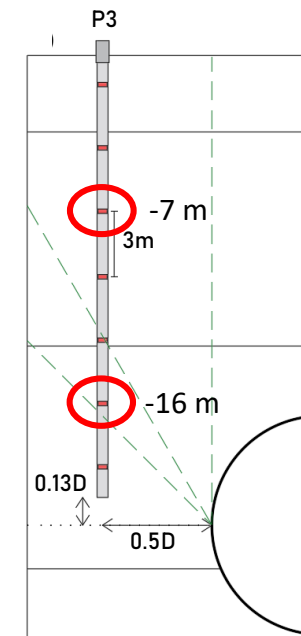
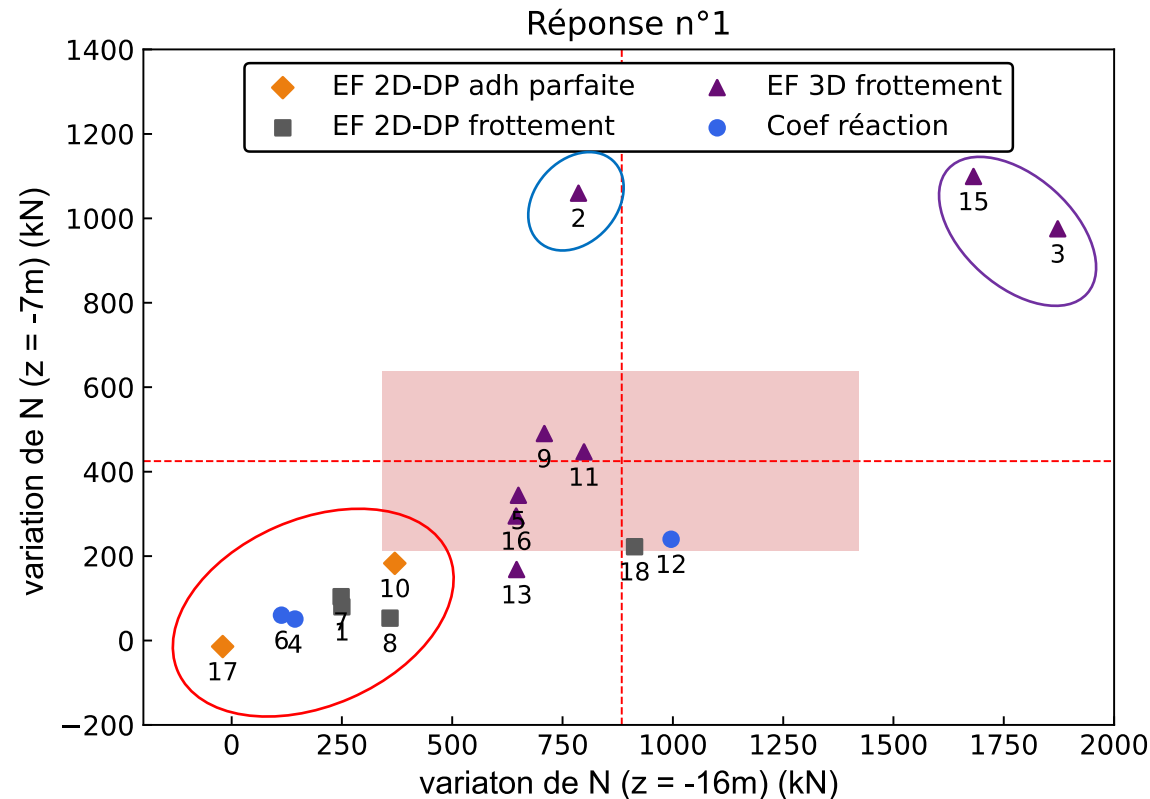


Effet du passage du tunnelier sur les efforts normaux dans le pieu

- On raisonne sur la variation d'effort normal pour ôter l'erreur sur N_{ini}
- 6 participants ont des variations du bon ordre de grandeur, 3 les surestiment fortement ($\times 2$ à 3), 7 les sous-estiment fortement ($/ 4$ à ∞)

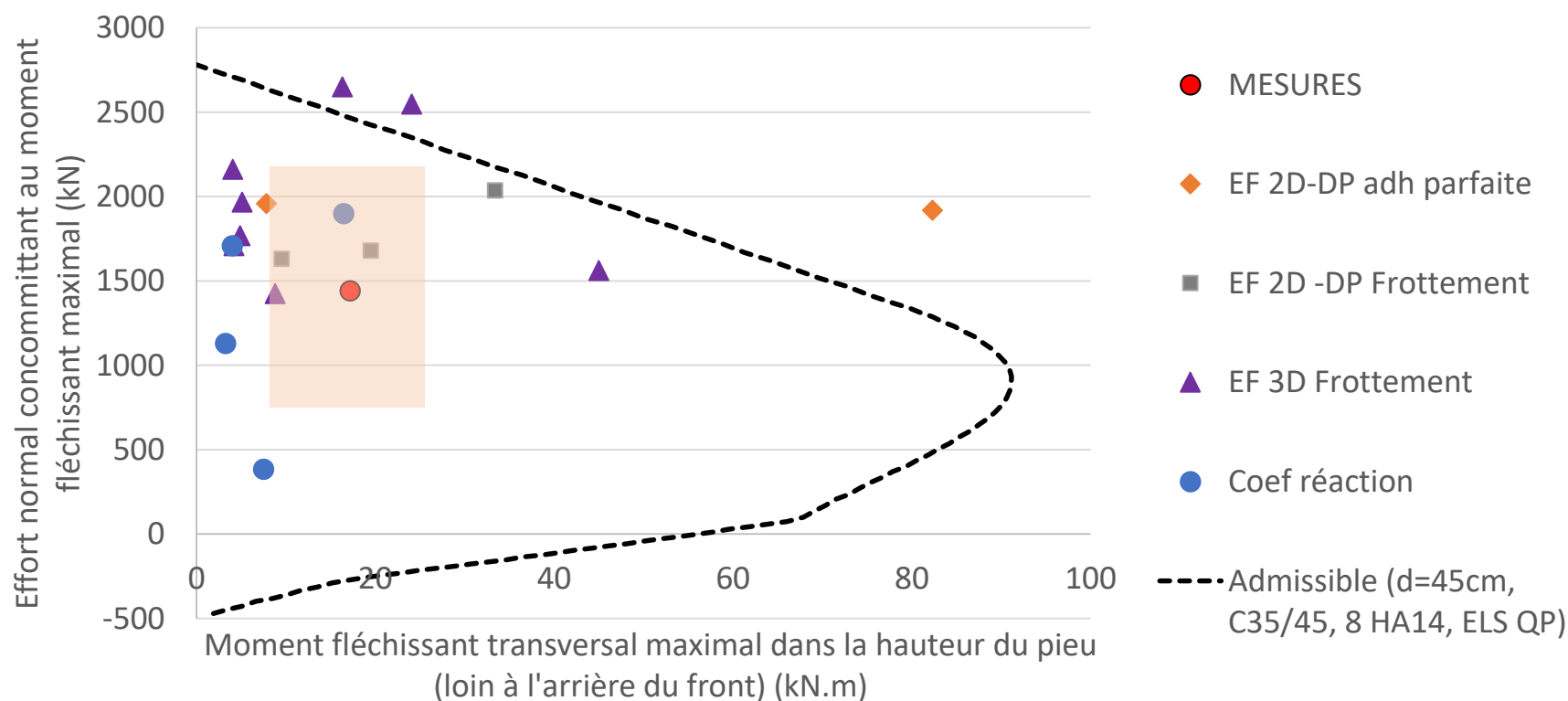


- Des modèles 2D plutôt optimistes ici,
- Deux modèles 3D pessimistes (P3 et P15). *Nota : s_{terrain} élevés*
- Une cinématique complexe : un modèle 2 estimant bien s_{terrain} , s_{pieu} et $N_{z=-16m}$, mais pessimiste pour N_{-7m}



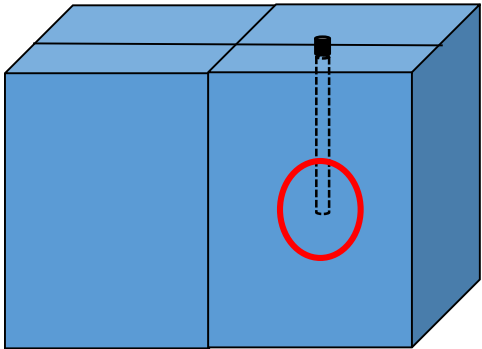
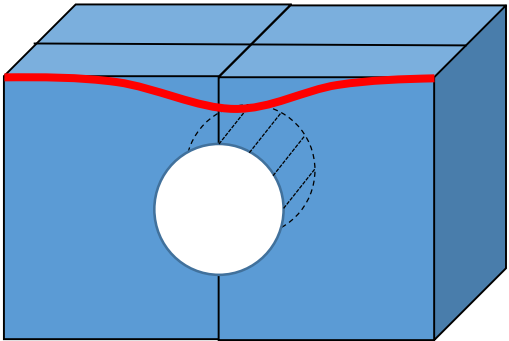
Moments fléchissants transversaux générés par le TBM

- Des moments fléchissants du bon ordre de grandeur ($\pm 20 \text{ kN.m}$),
- Des couples (N,M) parfois en limite d'admissibilité (à l'ELS QP).

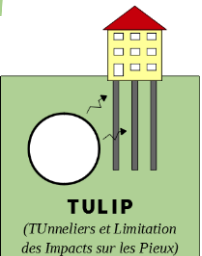


Rappel des données complémentaires transmises pour la phase 2

Etat final (loin à l'arrière du front)	Tassement maximal en surface du terrain	$u_{zmax-terrain}$	-10,0	mm
	Distance transversale où le tassement vaut 60% de $U_{zmax-terrain}$	$Y_{60\%-uzmax}$	8,0	m
	Distance transversale où le tassement vaut 30% de $U_{zmax-terrain}$	$Y_{30\%-uzmax}$	12,5	m

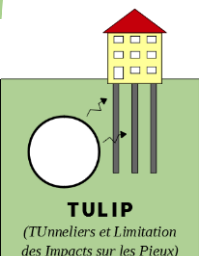


Etat initial (avant creusement)	Effort normal dans le pieu P3 à différentes profondeurs par rapport à la surface du terrain	N_{ini_16m}	≈ 0	kN
		N_{ini_19m}	≈ 0	kN



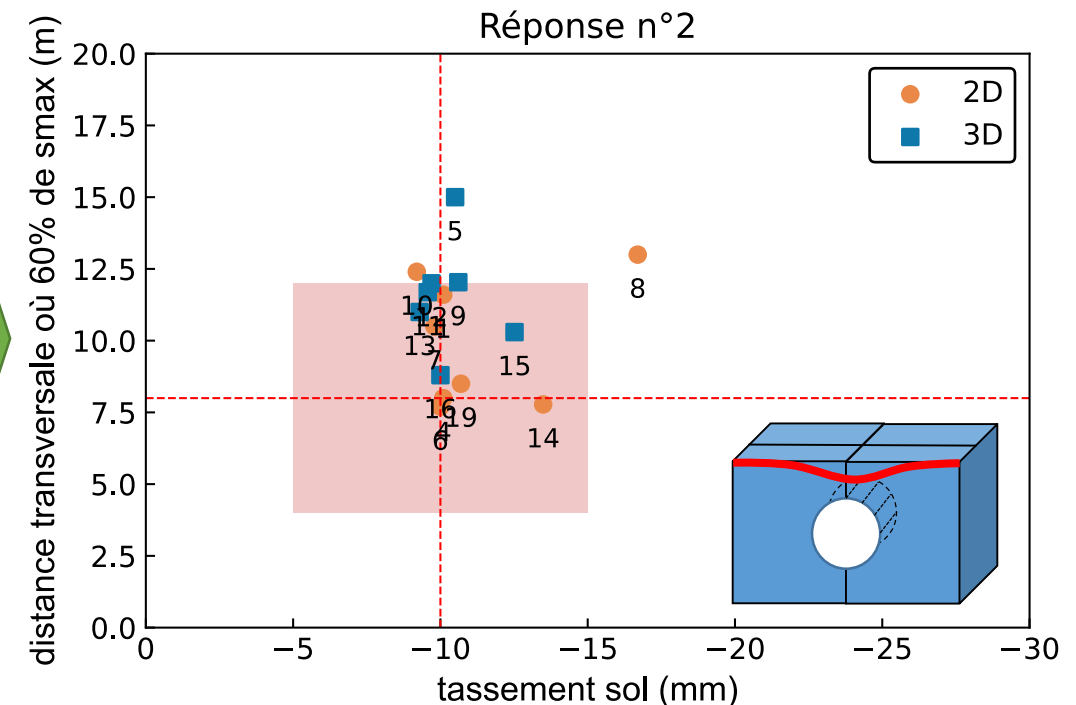
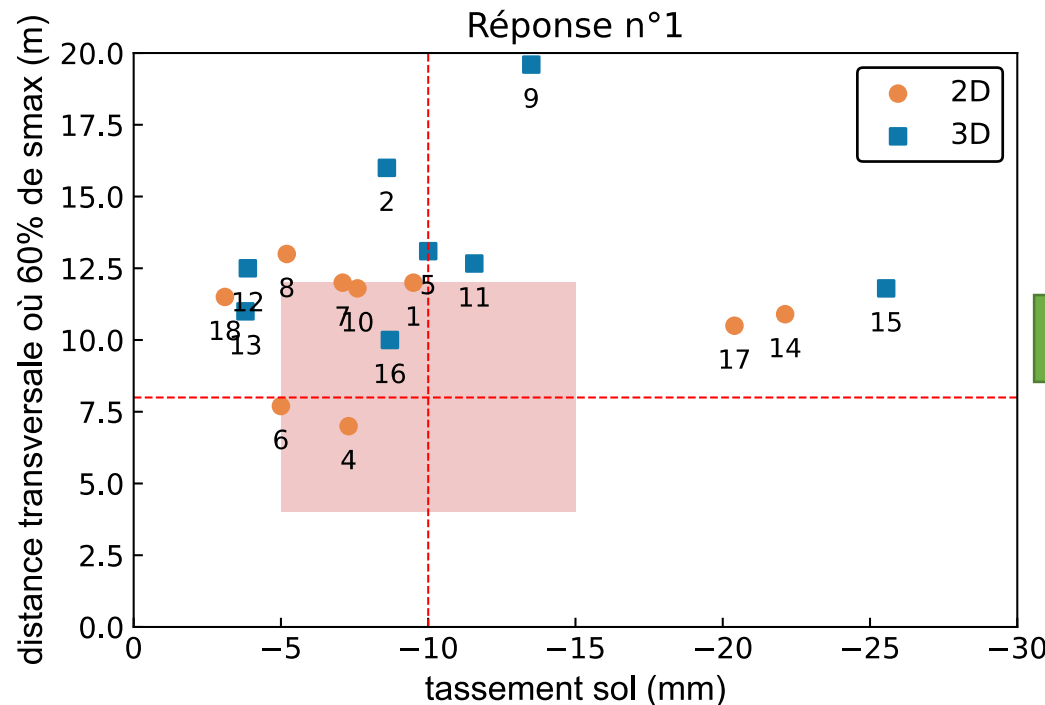
Leviers utilisés pour le calage du tassement maximal du terrain « en champ libre »

- Modification des paramètres de déformabilité des SB et CSO (d'un facteur 0,5 à 2 par rapport aux réponses 1) + pour ceux qui ne l'avaient pas fait, prise en compte de l'évolution des modules avec σ_3 ($m = 0,5$ au lieu de 0) : 10 participants
- Modification du taux de déconfinement imposé dans le modèle EF 2D : 2 participants
- Passage sur un calcul EF 3D au lieu de 2D : 1 participant



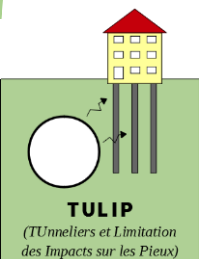
Cuvette de tassement obtenue « en champ libre »

- Calage pertinent en terme de tassement maximal du sol (sauf dans un cas),
- Sur-extension persistante de l'extension transversale de la cuvette en surface.



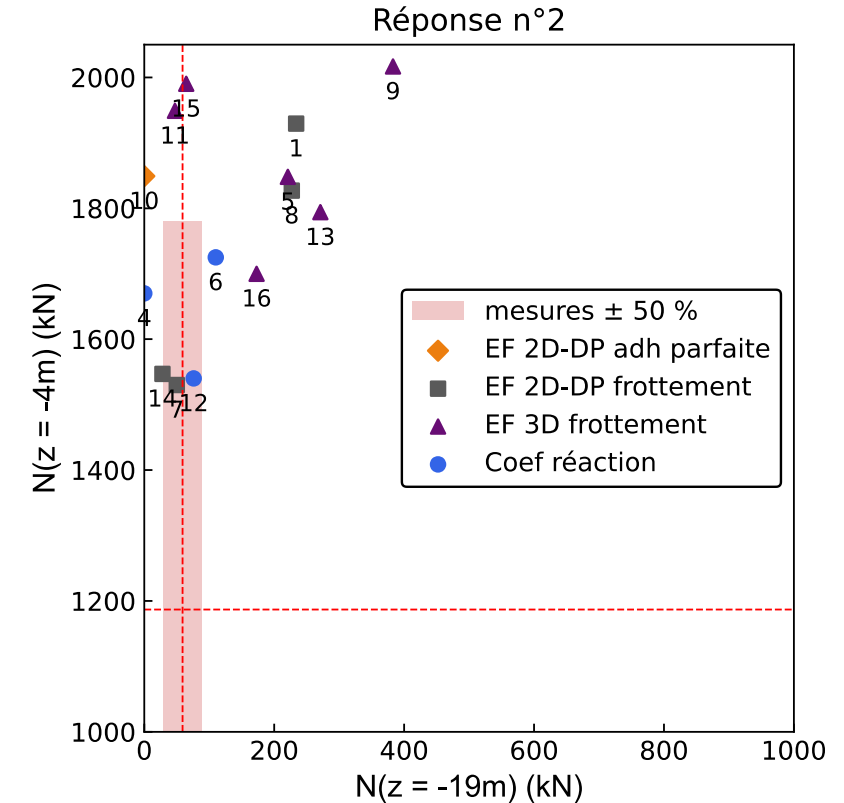
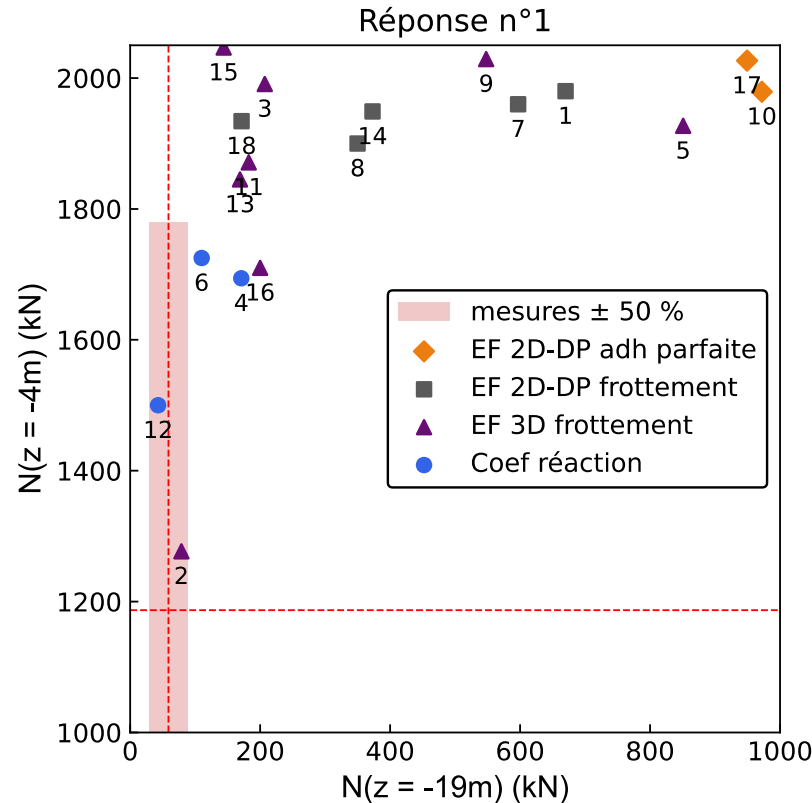
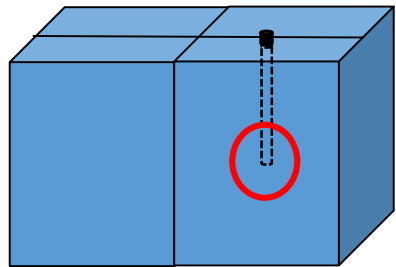
Leviers utilisés pour le calage de l'effort de pointe dans le pieu post-chargement

- Modification des paramètres d'interface : 4 participants
- Troncature du pieu à 16m de profondeur : 1 participant



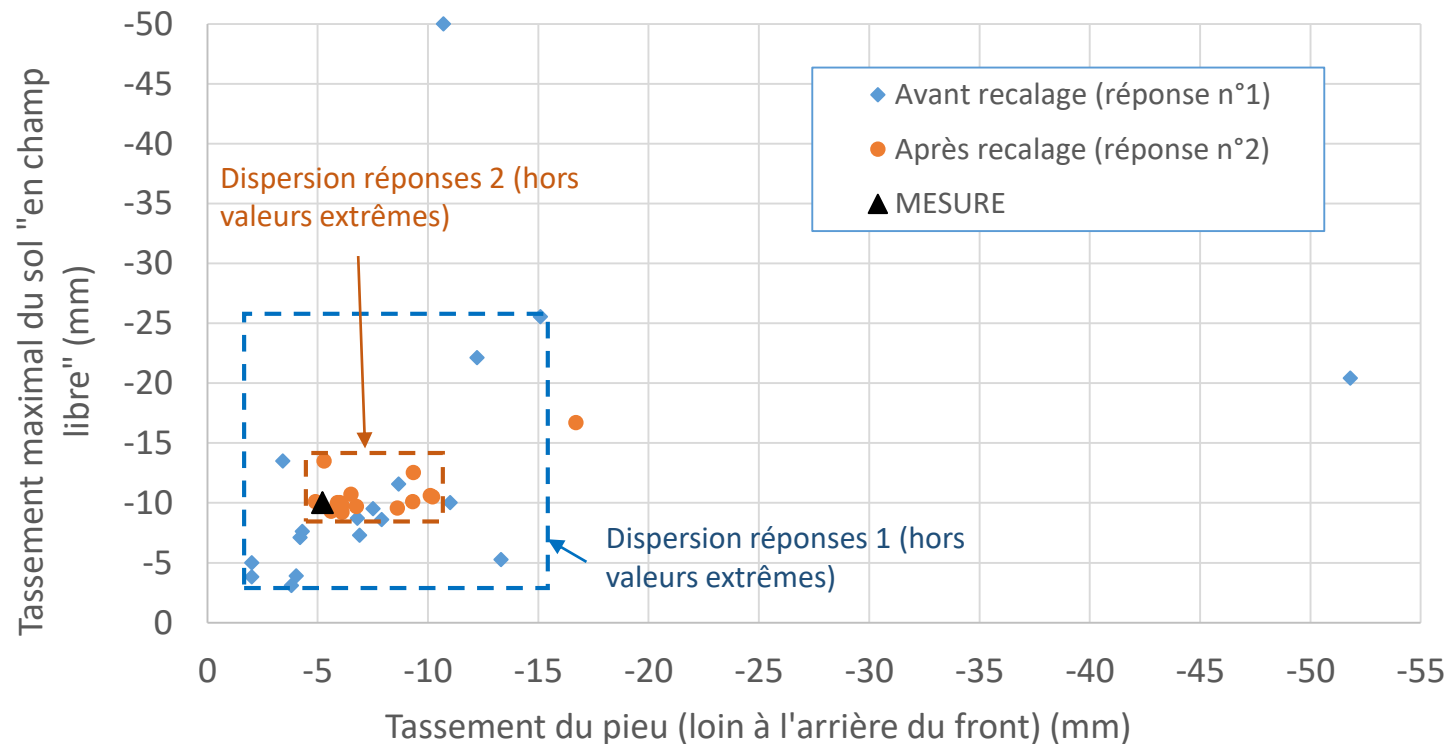
Effort normaux dans le pieu après chargement

- Amélioration par rapport à la réponse 1,
- Un effort axial dans le pieu restant supérieur aux mesures.



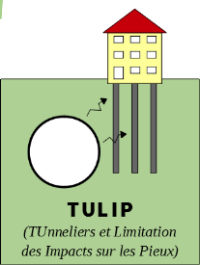
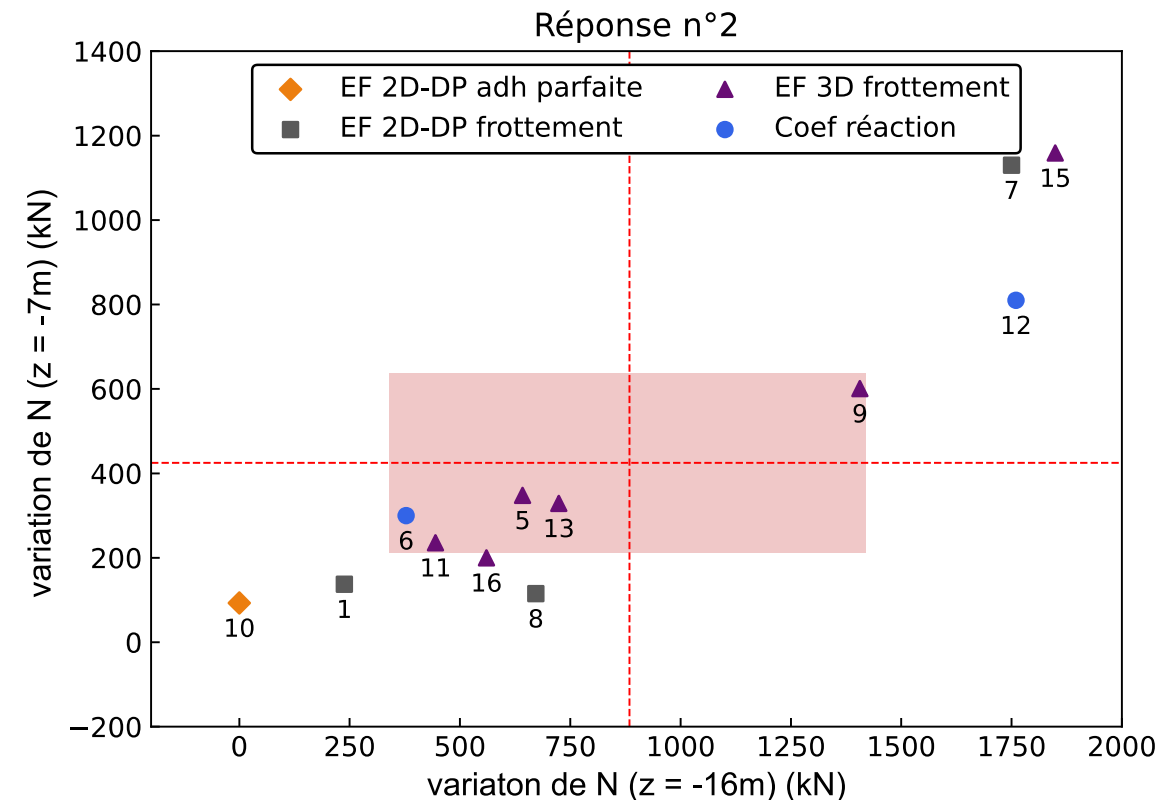
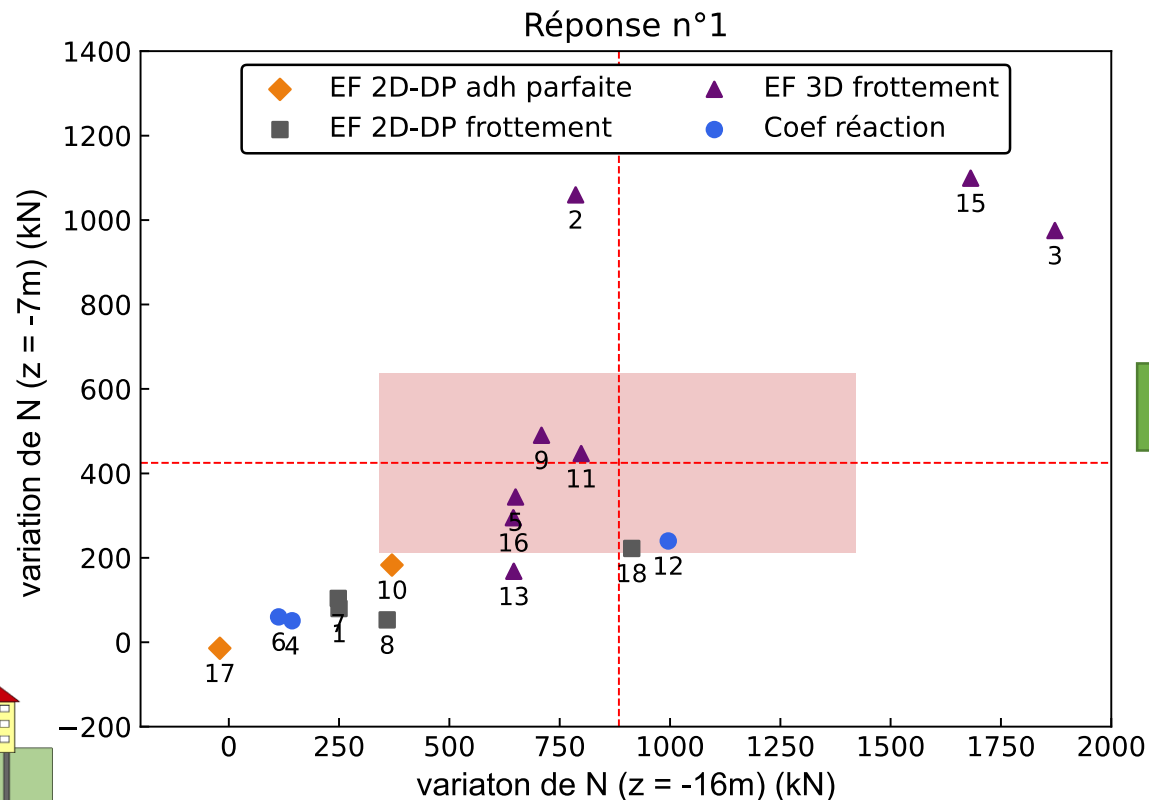
Tassement du pieu après passage du tunnelier

- Les tassements estimés sont compris entre 5 et 16 mm (pour 5 mm mesurés),
- Une meilleure estimation des tassements du sol « en champ libre » améliore l'estimation du tassement du pieu.



Efforts normaux dans le pieu après passage du tunnelier

- Pas d'amélioration évidente : une cinématique complexe !
 - Cas de P15 : s_{terrain} OK, mais s_{pieu} et N_{pieu} surestimés,
 - Cas de P12 : recalage conduit à des efforts moins justes.



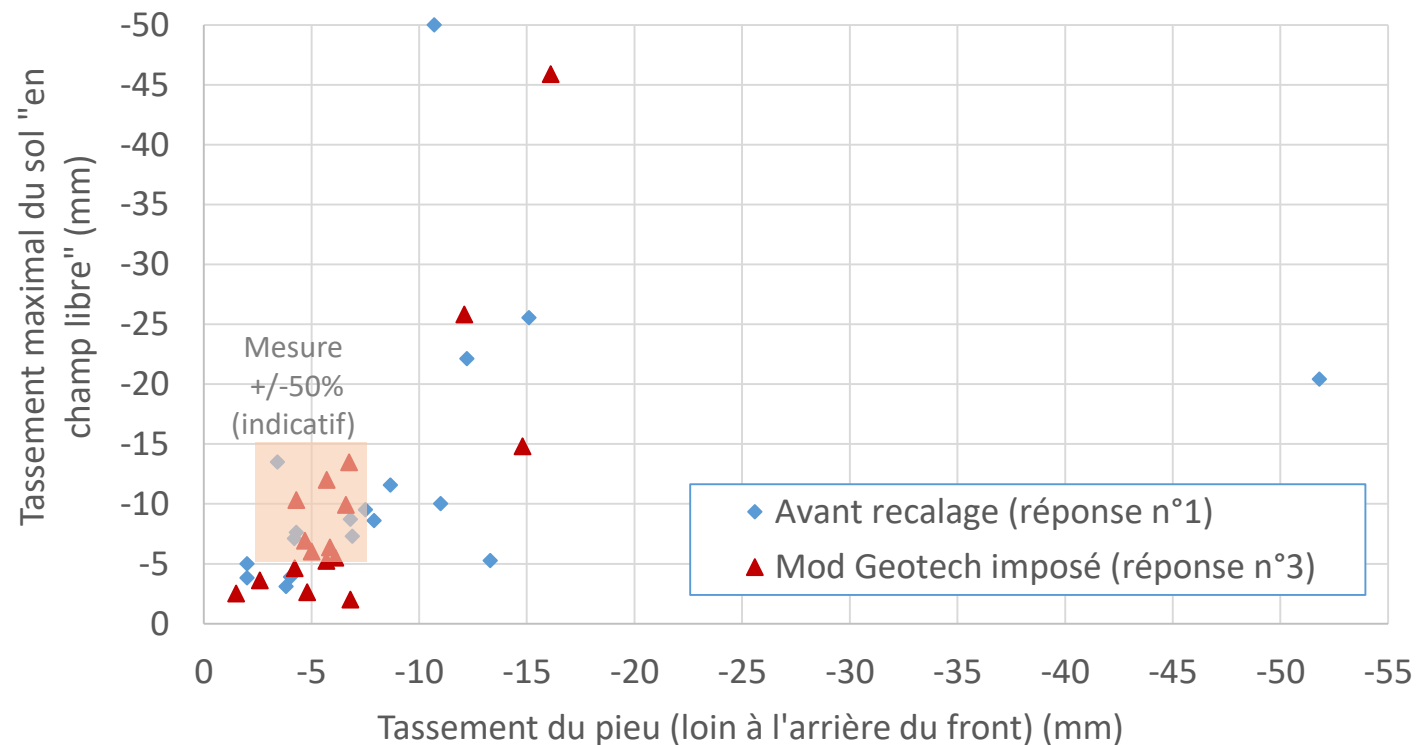
Analyses à modèle géotechnique imposé

- HSM imposé avec paramètres ci-dessous,
- Liberté quant au procédé de modélisation du TBM (à évaluer par chacun grâce aux données du sujet, *i.e.* = procédé retenu pour la réponse 1)

Paramètre	Description	Remblai	Calcaires de Saint-Ouen	Sables de Beauchamp	Marnes et Caillasses
Ep.	Epaisseur (m)	3,5	9,8	10,2	11,3
L.C.	Modèle de comportement	Hardening Soil Model (HSM)			
γ ou γ' (kN/m³)	Poids volumique humide hors nappe ou déjaugé sous nappe	19	18	11	10
K₀	Coefficient de pression des terres au repos	0,5			
E_{50ref} (MPa)	Module sécant à 50% du déviateur ultime pour la contrainte de confinement p_{ref}	100	180	500	800
E_{urref} (MPa)	Module de déchargement / rechargement pour la contrainte de confinement p_{ref}	300	540	1500	2400
p_{ref} (kPa)	Contrainte de confinement de référence (<i>celle-ci correspond à la contrainte horizontale effective à mi-épaisseur de chaque couche</i>)	17	77	150	206
ν (-)	Coefficient de Poisson	0,3			
c' (kPa)	Cohésion effective	0	10	5	15
φ' (°)	Angle de frottement interne	28	33	35	38
ψ (°)	Angle de dilataance à la rupture	0	3	5	8
R_f (-)	Coefficient minorateur de la résistance au cisaillement	0,95			
m (-)	Exposant d'évolution des modules avec la contrainte de confinement	0,5			

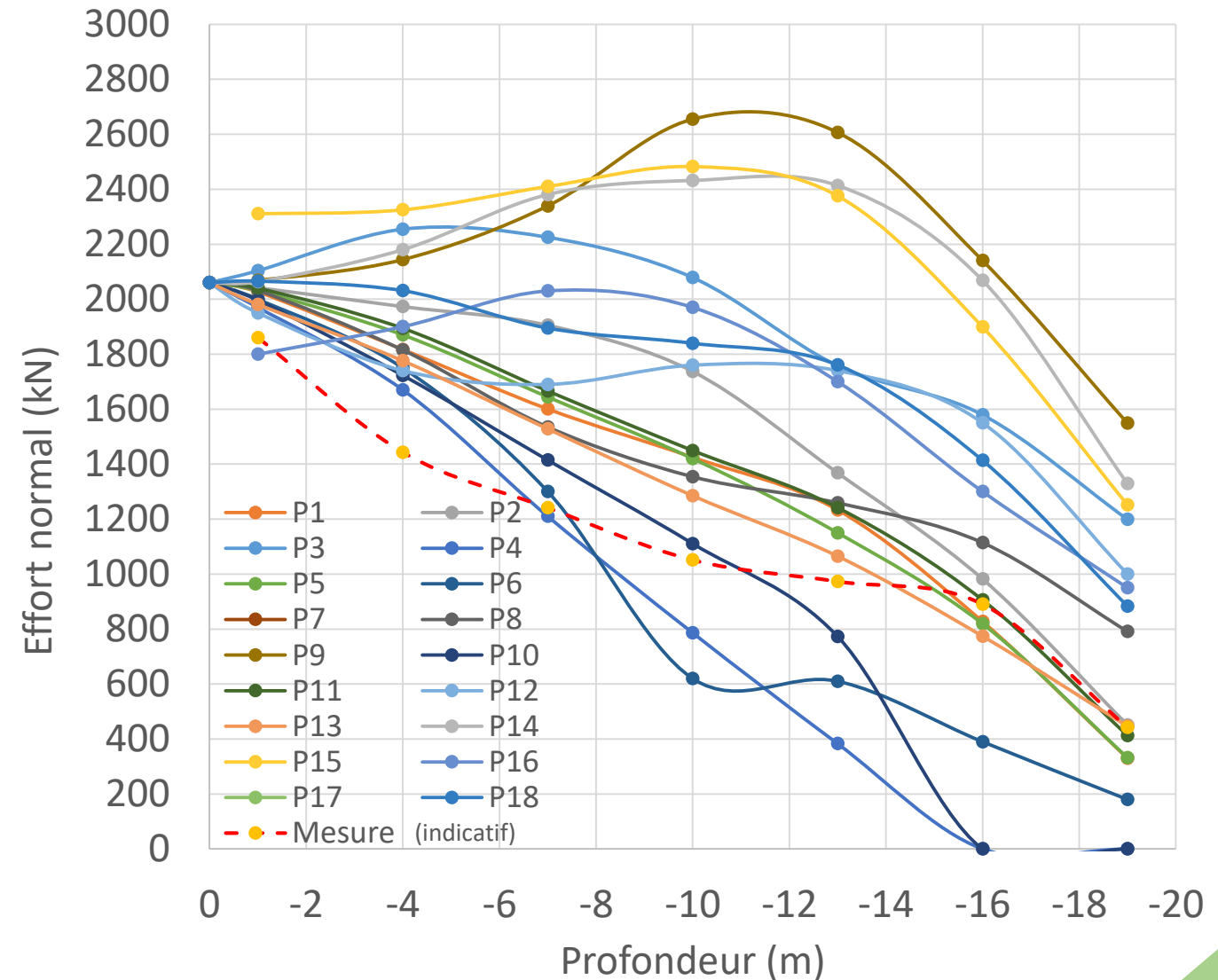
Tassements du terrain et du pieu à modèle géotechnique imposé

- Une dispersion importante des résultats : 3 et 45 mm pour le terrain, 1 à 16 mm pour le pieu,
- C'est bien le couple [Caractéristiques mécaniques terrain ; Manière de modéliser le TBM] qui est important (Cf. diapo 6).



Efforts axiaux dans le pieu après passage du TBM

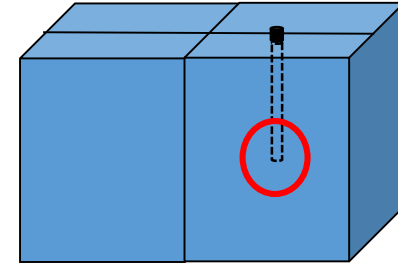
- Une grande variabilité en termes d'effort de pointe : il est compris entre 0 et 80 % de la charge exercée en tête,
- Une grande variabilité également à mi-profondeur : l'effort axial est compris entre 30 et 130 % de la charge exercée en tête



Principales conclusions de l'exercice

Efforts axiaux dans le pieu après chargement :

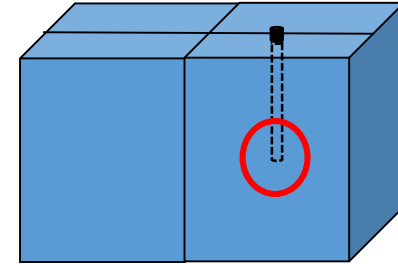
- Une majorité de modèles **sur-estimant fortement l'effort de pointe**,
- Des modèles 2D en déformations planes moins bons que les modèles 3D / 2D axisymétrique / coefficient de réaction.



Principales conclusions de l'exercice

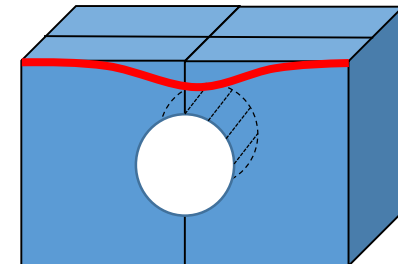
Efforts axiaux dans le pieu après chargement :

- Une majorité de modèles **sur-estimant fortement l'effort de pointe**,
- Des modèles 2D en déformations planes moins bons que les modèles 3D / 2D axisymétrique / coefficient de réaction.

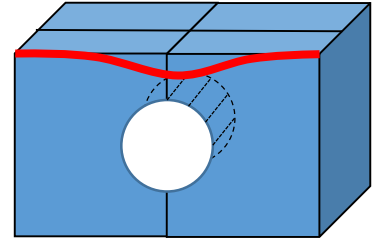


Tassements en surface du terrain « en champ libre » :

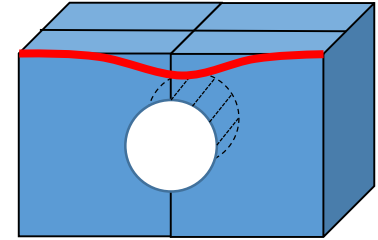
- 50 % des réponses dans la bonne gamme (5 à 15 mm), mais valeurs extrêmes (3 à 50 mm),
- Sur-estimation d'environ 50 % de l'extension transversale de la cuvette (via des modèles 2D comme 3D), avec un intérêt de la loi ANL,
- Recalage du couple (Tassement maximal ; Extension transversale) pas évident,
- Pas d'étude paramétrique quant à l'influence de K_0 .



- Dispersion modérée des résultats malgré des hypothèses très différentes en termes de : (i) déformabilité des terrains (E_{50}) et de (ii) procédé de modélisation du tunnelier.
- **Choix d'un couple (i,ii) fiable « par expérience ».** Les réponses à modèle géotechnique imposé en sont révélatrices,
- **Modèles 3D pas nécessairement meilleurs que les modèles 2D pour répondre à cette question.**

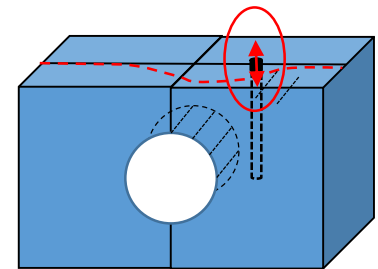


- Dispersion modérée des résultats malgré des hypothèses très différentes en termes de : (i) déformabilité des terrains (E_{50}) et de (ii) procédé de modélisation du tunnelier.
- **Choix d'un couple (i,ii) fiable « par expérience ».** Les réponses à modèle géotechnique imposé en sont révélatrices,
- **Modèles 3D pas nécessairement meilleurs que les modèles 2D pour répondre à cette question.**



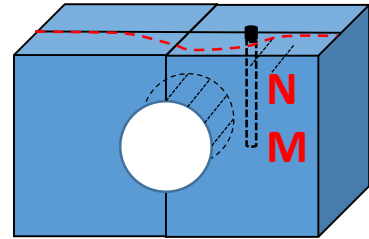
Tassements de la tête du pieu :

- **Grande dispersion** des tassements estimés (2 à 52 mm),
- Une bonne estimation du tassement du terrain « en champ libre » aide à bien estimer le tassement du pieu, mais ça n'est pas systématique → **Cinématique complexe !**
- Pas de tendance évidente quant aux **performances des différents types de modèles** (EF 2D-DP, 3D complet, coefficient de réaction).



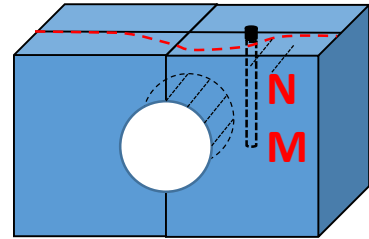
Efforts dans le pieu après passage du tunnelier :

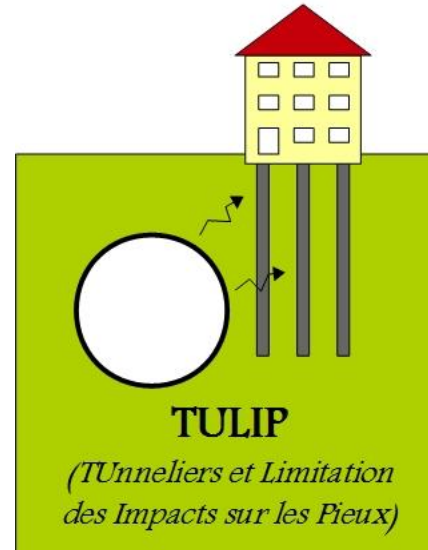
- **Seuls 3 participants quantifient correctement** les variations d'efforts axiaux induites par le tunnelier. Grande dispersion : variations nulles à 300 % des variations mesurées,
- Bien estimer les tassements en surface du terrain et du pieu ne conduit pas nécessairement à une juste distribution des efforts axiaux dans le pieu → **Cinématique complexe**,



Efforts dans le pieu après passage du tunnelier :

- **Seuls 3 participants quantifient correctement** les variations d'efforts axiaux induites par le tunnelier. Grande dispersion : variations nulles à 300 % des variations mesurées,
- Bien estimer les tassements en surface du terrain et du pieu ne conduit pas nécessairement à une juste distribution des efforts axiaux dans le pieu → **Cinématique complexe**,
- Des modèles **2D en déformations planes plutôt optimistes** (sous-estimation des efforts axiaux N induits),
- Des moments fléchissants transversaux M_y du bon ordre de grandeur,
- Des couples **(N , M_y) induits parfois en limites d'admissibilité dans le cas présent.**





**Merci de votre
attention**

Pour mémoire, autres remarques intéressantes des participants :

- Besoin d'essais pressiométriques cycliques et jusqu'à $p_1 = 8$ MPa (n°2), ainsi qu'en très petites déformations (n°12),*
- Influence non négligeable de R_{inter} sur les résultats (n°3),*
- Influence significative du critère isotrope du HSM de Plaxis sur les tassements (n°4),*
- Calcul en petites déformations suffisant (n°9),*
- Effet négligeable des deux bancs indurés dans le CSO (n°12),*
- Effet négligeable de la durée de prise du mortier de bourrage (n°12),*
- Léger intérêt du HSSM par rapport au HSM pour resserrer la cuvette de tassements (n°12).*

