Excavation à l'abri d'une paroi moulée tirantée

Phasage de terrassement, tirants précontraints et rabattement de nappe

THÈME
Soutènement, interaction sol-structure

NIVEAU
Avancé

DURÉE INDICATIVE
2 h

APPLICATION
LMC_EF 2026 – modèle plan 2D

paroi moulée | tirants d'ancrage | précontrainte | phasage | écoulement | Mohr-Coulomb

> *Cet exercice détaille la réalisation d'une excavation profonde à l'abri d'une paroi moulée ancrée par 2 niveaux de tirants précontraints. L'étude permet d'aborder l'utilisation de tirants précontraints ainsi que les calculs d'écoulements pour redéfinir, après chaque étape d'excavation sous le niveau de la nappe, la distribution des pressions interstitielles.*

1. Énoncé du problème et approche théorique

1.1 Présentation de l'ouvrage

La fouille fait 20 mètres de largeur et 10 mètres de profondeur. La paroi moulée en béton, de 0.35 mètre d'épaisseur, est ancrée à 15 mètres de profondeur et maintenue par 2 niveaux de tirants. Les tirants du lit supérieur sont inclinés à 33.7° et font 14.5 mètres de longueur. Ceux du lit inférieur sont inclinés de 45° et font 10 mètres de longueur. L'excavation est symétrique; seule la moitié du problème est modélisée.

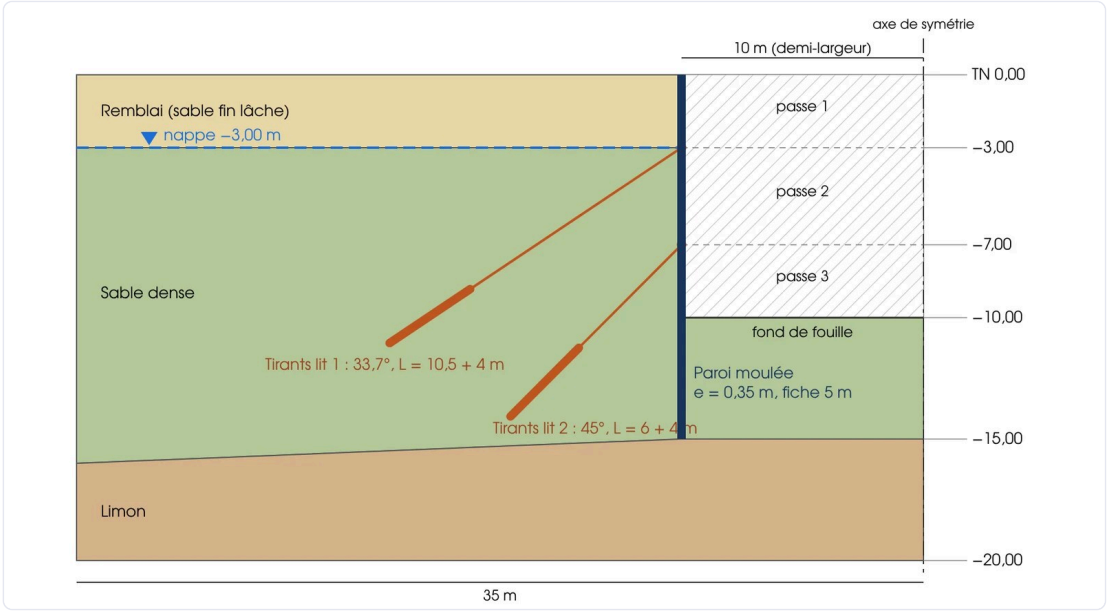


Figure 1 – Coupe schématique de l'ouvrage

1.2 Données géotechniques

Le contexte géotechnique du site est constitué d'un remblai de sable fin lâche jusqu'à 3 mètres de profondeur masquant une couche épaisse de sable dense présente jusqu'à 15 mètres de profondeur minimum ; l'ensemble masquant des limons présents jusqu'à la base du modèle soit 20 mètres. Les caractéristiques des matériaux sont présentées ci-dessous :

Tableau 1 – Caractéristiques des sols.

Couche	Épaisseur (m)	γ / γ_{sat} (kN/m³)	c' (kPa)	φ' (°)	E (MPa)	ν	kx = ky (m/s)

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

Couche	Épaisseur (m)	γ / γ_{sat} (kN/m³)	c' (kPa)	φ' (°)	E (MPa)	ν	kx = ky (m/s)
Remblai	3.00	16 / 20	1	30	8	0.30	1.157E-05
Sable	> 12.00	17 / 20	1	34	30	0.30	5.787E-06
Limon	> 4.00	17 / 19	8	29	20	0.33	1.157E-06

1.3 Caractéristiques des structures

Tableau 2 – Paroi et tirants.

Élément	Caractéristique	Valeur	Unité
Paroi moulée	Rigidité normale EA	12.10^6	kN/ml
	Rigidité de flexion EI	$0.12.10^6$	kN·m²/ml
	Poids	5.25	kN/m/ml
Tirants - lit supérieur	Espacement, inclinaison	2.5, 33.7	m, °
	Longueur libre (L_l) / Longueur scellée (L_s)	10.5 / 4	m
	Raideur normale EA	200000	kN (par tirant)
	Précontrainte P_0	300	kN par tirant
Tirants - lit inférieur	Espacement, inclinaison	2.5, 45	m, °
	Longueur libre (L_l) / Longueur scellée (L_s)	6 / 4	m
	Raideur normale EA	200000	kN (par tirant)
	Précontrainte P_0	500	kN par tirant

2. Construction du modèle dans LMC_EF

2.1 Choix de modélisation

La fouille étant symétrique, seule la moitié du problème est modélisée sur le bord droit du modèle. Ce dernier fait 35 mètres de longueur et 20 mètres de hauteur.
L'excavation va se dérouler en 5 étapes :

- Etape 1 : activation de la paroi moulée et première excavation à 3.00 mètres de profondeur (désactivation de la première région de terrassement),
- Etape 2 : activation du premier lit de tirants précontraints,
- Etape 3 : seconde excavtion jusqu'à 7 mètres de profondeur (désactivation de la deuxième région de terrassement). Cette étape s'accompagne d'un pompage de l'eau dans la fouille et donc d'un calcul d'écoulement pour obtenir la nouvelle distribution des pressions interstitielles,
- Etape 4 : activation du second lit de tirants précontraints,
- Etape 5 : excavation jusqu'à 10 mètres de profondeur avec pompage de l'eau en fond de fouille.

Fichier de données
Le projet complet se charge dans LMC_EF avec le bouton **Charger projet** à partir du fichier LMC_EF_paroi_tirantee.xlsx.

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

2.2 Saisie du modèle pas à pas

1 Matériaux

Dans l'onglet ***Calculs***, *ouvrez* ***Matériaux*** *et saisissez :*

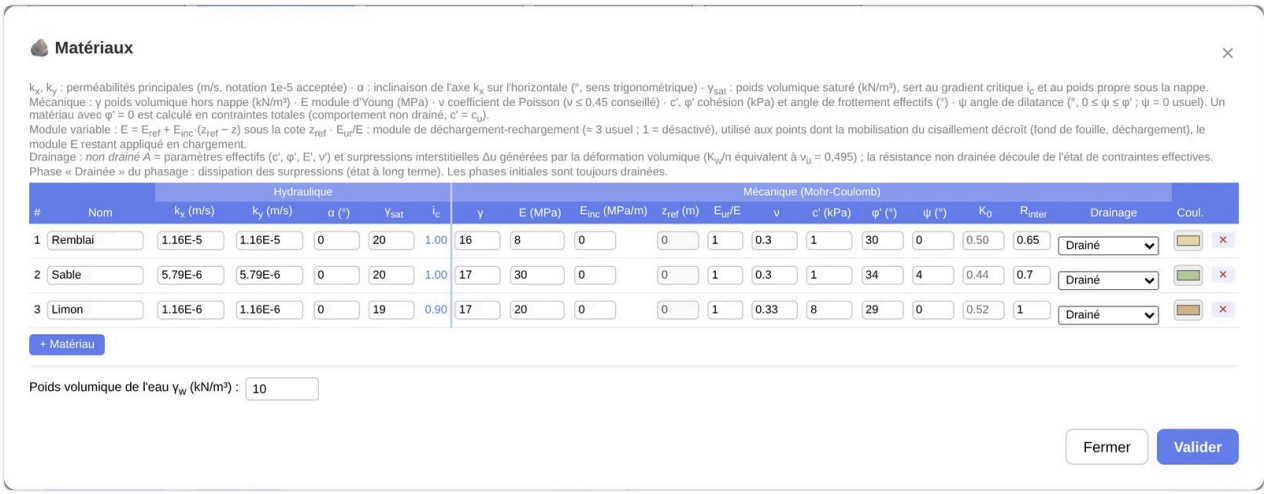


Figure 2 – Boite de dialogue matériaux

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

2 Géométrie des régions

Dessinez les régions de sol puis les régions de terrassement :

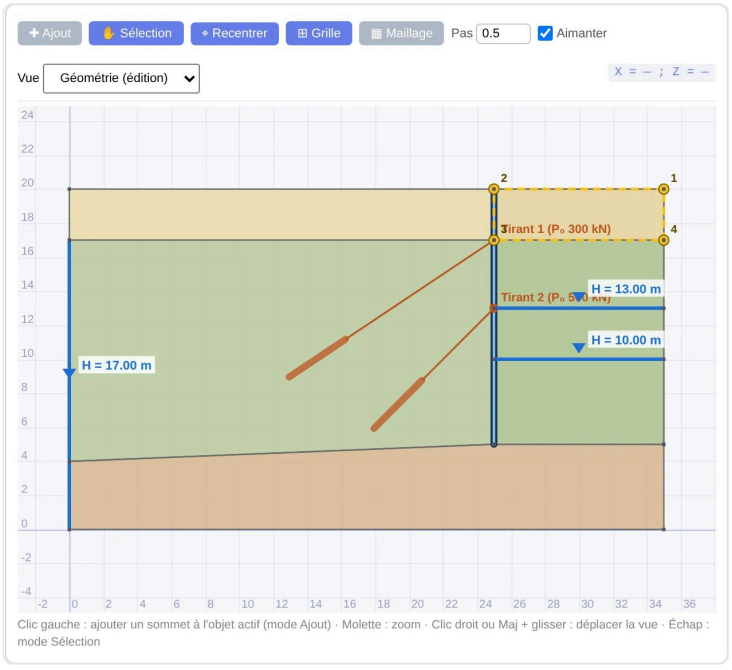
Tableau 3 – Points des régions

Régions	Points (x;y)
Limon	(0;4)(25;5)(35;5)(35;0)(0;0)
Sable	(0;17)(35;17)(35;5)(25;5)(0;4)
Remblai	(0;17)(35;17)(35;20)(0;20)
Terrassement 1	(35;20)(25;20)(25;17)(35;17)
Terrassement 2	(25;17)(35;17)(35;13)(25;13)
Terrassement 3	(25;13)(35;13)(35;10)(25;10)
Terrassement 4	(25;10)(35;10)(35;5)(25;5)

La région « Terrassement 4 », en sable, reste en place dans toutes les phases : elle sert seulement à placer une ligne du maillage au niveau du fond de fouille final (−10 m).



a) Editeur



b) Régions de sols et de terrassement

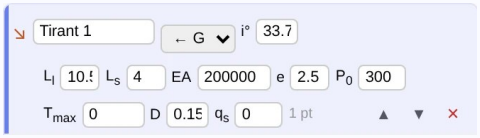
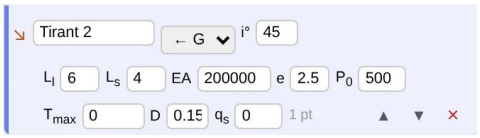
Figure 3 – Dessin des régions de sols et de terrassement.

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

3 Paroi et tirants

Placez la paroi (plaque structurelle avec interface), puis les deux lits de tirants :

Tableau 4 – Points de la paroi et des tirants

Eléments de structure	Points (x;y)	Commentaires
Paroi	(25;20)(25;5)	
Tirant supérieur	(25;17)	
Tirant inférieur	(25;13)	

⚠ **Précontrainte dans les tirants :**

Les tirants sont ici précontraints à 120 kN pour la ligne supérieure et 200 kN pour la ligne inférieure. Avec un espacement de 2.50 mètres entre chaque tirant d'un même lit, les précontraintes unitaires à renseigner dans le modèle sont respectivement 120 x 2.5 = 300 kN et 200 x 2.5 = 500 kN

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

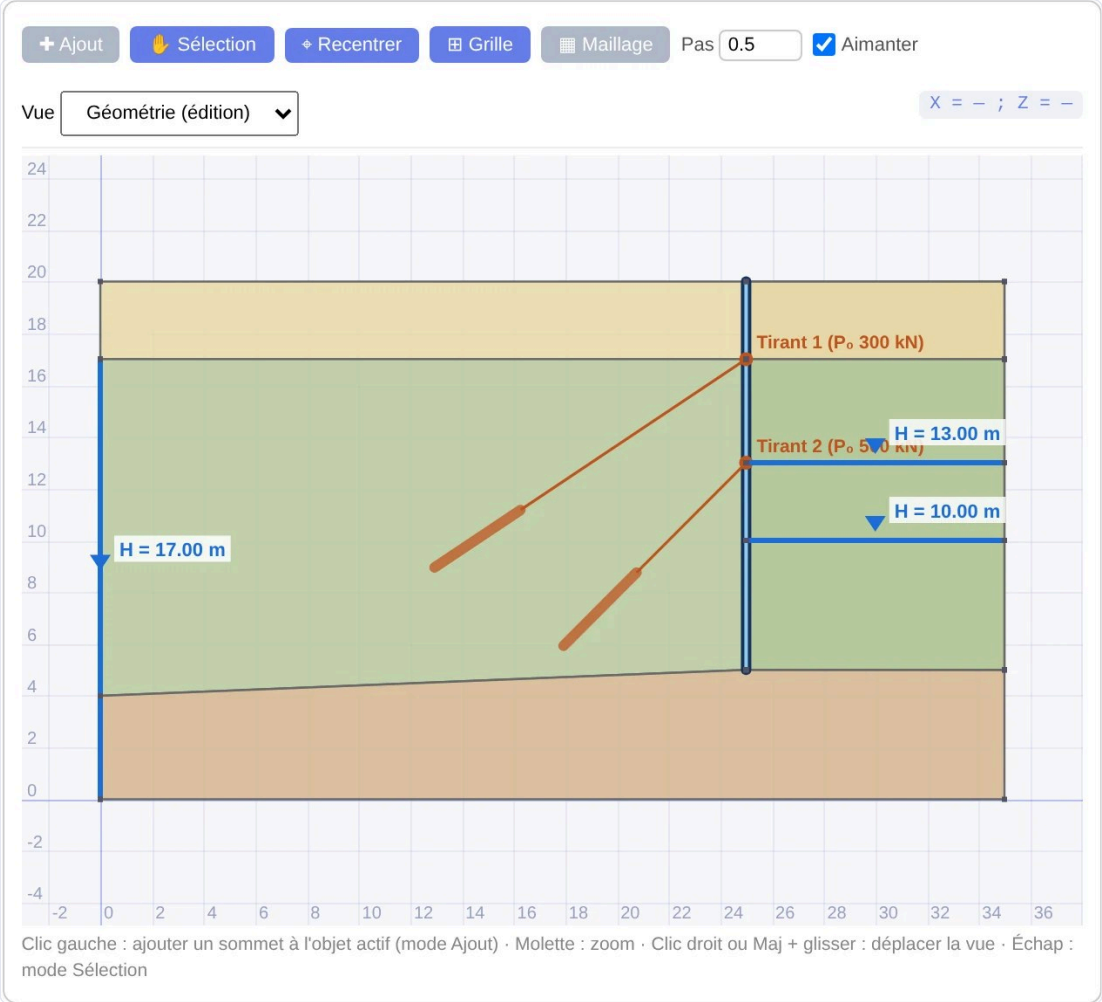


Figure 4 – Dessin de la paroi et des tirants

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

4 Conditions hydrauliques

Imposez la charge à l'extérieur et sur le fond de fouille de chaque phase :

Tableau 5 – Limites hydrauliques

Limites	Points (x;y)	Commentaires
Limite 1	(0;17)(0;0)	H imposé = 17 m
Fond de fouille (13 m)	(25;13)(35;13)	H imposé = 13 m
Fond de fouille (10 m)	(25;10)(35;10)	H imposé = 10 m

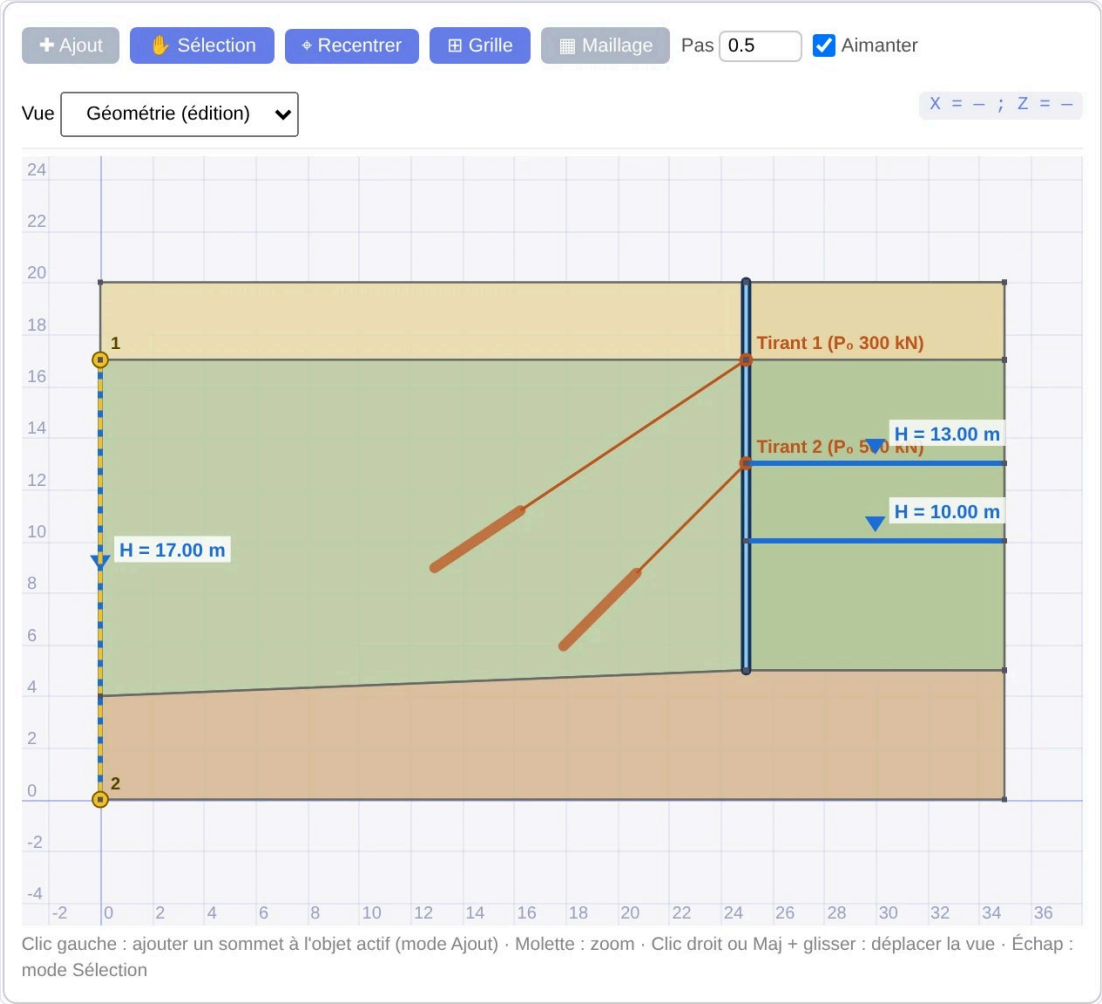


Figure 5 – Dessin des limites hydrauliques

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

5 Maillage

Dans l'onglet **Calculs**, *ouvrez* ***Maillage*** *et saisissez :*



Figure 6 – Boite de dialogue maillage

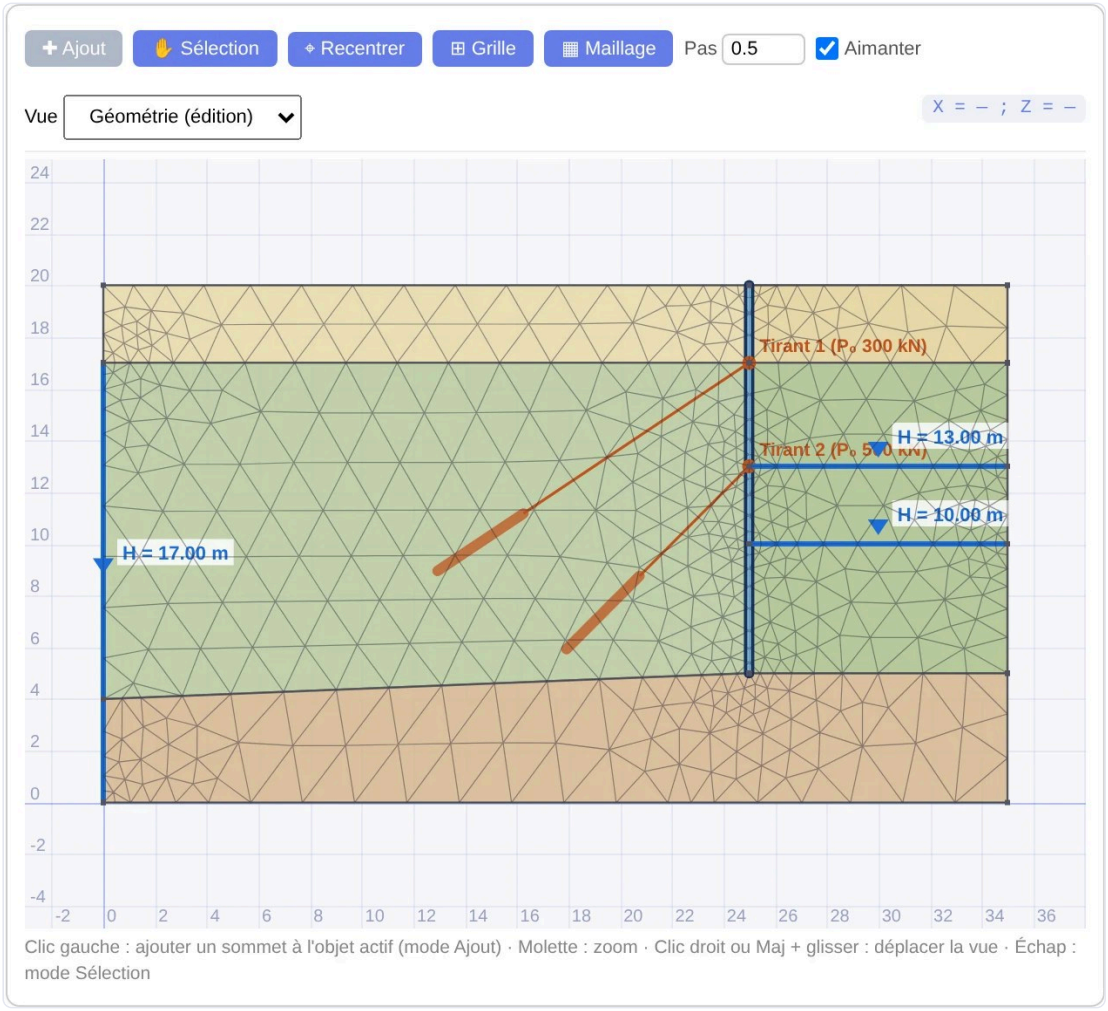


Figure 7 – Dessin du maillage

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

2.3 Phasage du calcul

Dans l'onglet **Calculs**, *ouvrez* ***Phases*** *et construisez les phases de calcul selon le tableau ci-dessous :*

Tableau 6 – Phases du calcul.

N°	Phase	Régions et structures	Eau	Remarque
0	État initial	massif complet, Limite 1 activée (plaque et tirants désactivés)	Ecoulement (limites actives)	*procédure* K_0
1	Paroi et terrassement à −3 m	Terrassement 1 désactivé, plaque activée	Inchangée	
2	Tirants niveau 1	Activation tirant supérieur	Inchangée	
3	Terrassement à −7 m	Terrassement 2 désactivé, limite hydraulique à -7 mètres activée	Recalculée	
4	Tirants niveau 2	Activation tirant inférieur	Inchangée	
5	Terrassement à −10 m	Terrassement 3 désactivé, limite hydraulique à -10 mètres activée (limite hydraulique à -7 mètres désactivée)	Recalculée	

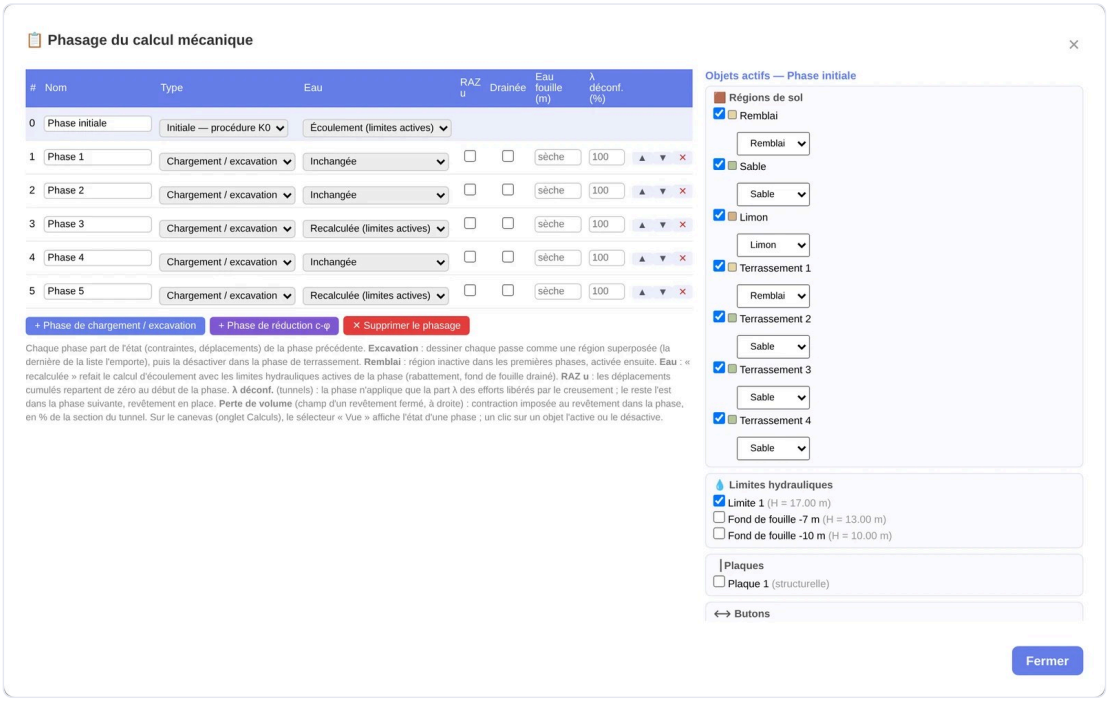
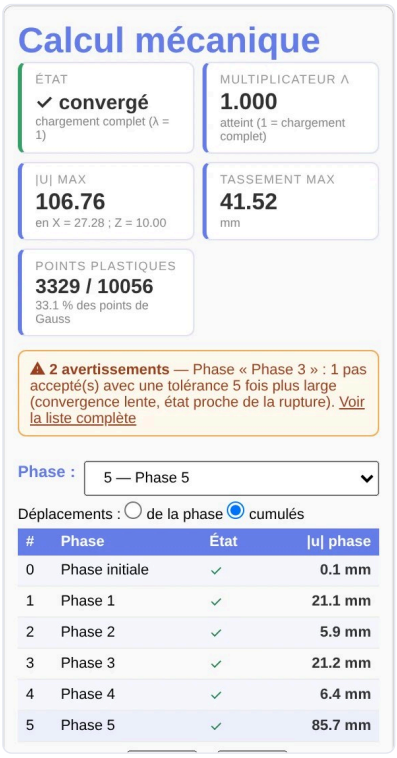


Figure 8 – Boite de dialogue phasage (phase initiale)

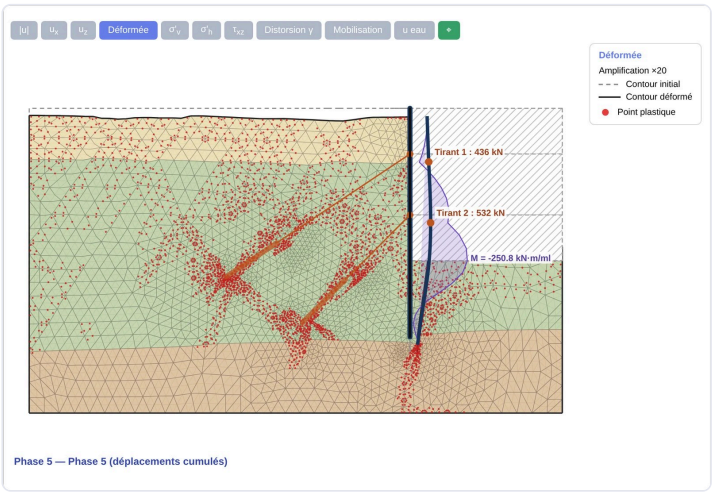
2.4 Lancement du calcul

Lancez **▶ Écoulement** *puis* **▶ Mécanique**. *Avec les éléments à 15 nœuds, le calcul dure environ deux minutes.*

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés



a) résultats



b) déformée en phase 5

Figure 9 – Résultats à l'issue de la phase 5

3. Résultats et commentaires

3.1 Déplacements du massif

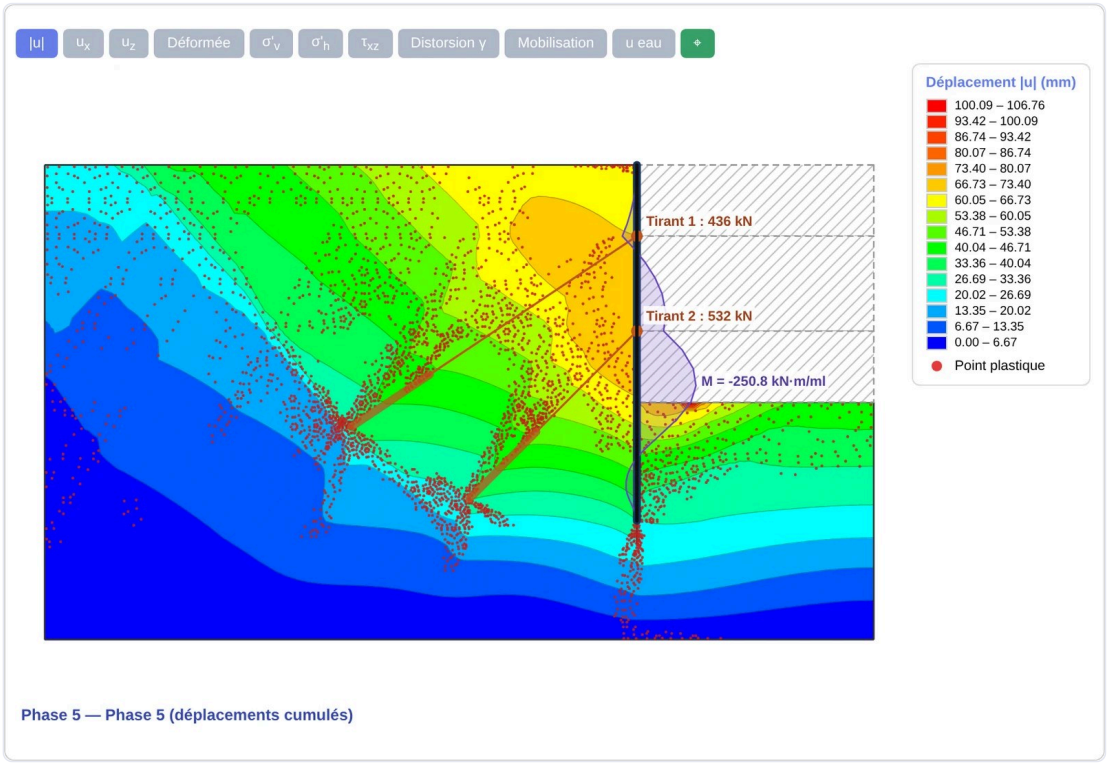


Figure 10 – Déplacements |u| en fin de terrassement

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

Commentaires : la paroi s'est déplacée de 7 centimètres vers la fouille. On observe également un léger tassement du sol en surface à l'arrière de la paroi :

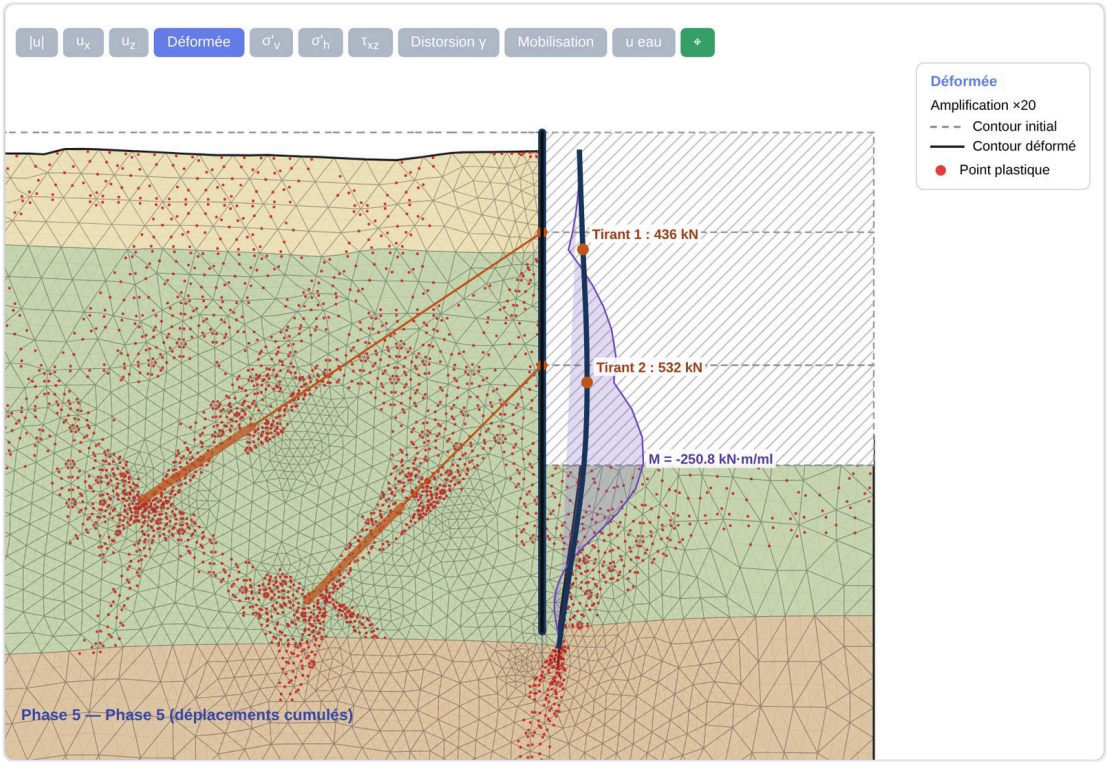
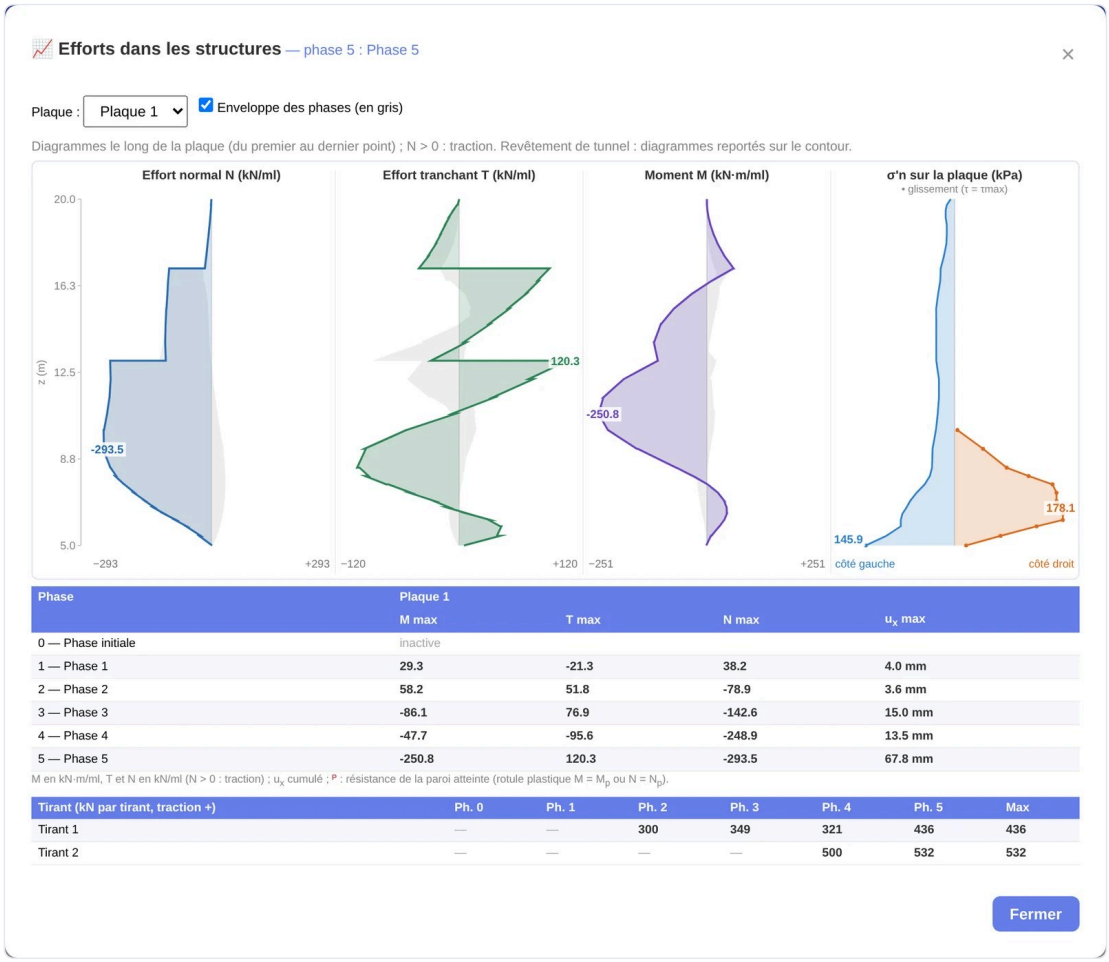


Figure 11 – Déformée en fin de terrassement (amplification x 20)

3.2 Efforts dans la paroi et les tirants

Cliquez sur ***Efforts dans les structures*** *. La boite de dialogue suivante apparait alors :*

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés



Phase	Plaque 1			
	M max	T max	N max	u_x max
0 — Phase initiale	inactive			
1 — Phase 1	29.3	-21.3	38.2	4.0 mm
2 — Phase 2	58.2	51.8	-78.9	3.6 mm
3 — Phase 3	-86.1	76.9	-142.6	15.0 mm
4 — Phase 4	-47.7	-95.6	-248.9	13.5 mm
5 — Phase 5	-250.8	120.3	-293.5	67.8 mm

M en kN·m/ml, T et N en kN/ml (N > 0 : traction) ; u_x cumulé ; **P** : résistance de la paroi atteinte (rotule plastique M = M_p ou N = N_p).

Tirant (kN par tirant, traction +)	Ph. 0	Ph. 1	Ph. 2	Ph. 3	Ph. 4	Ph. 5	Max
Tirant 1	—	—	300	349	321	436	436
Tirant 2	—	—	—	—	500	532	532

Figure 12 – Efforts dans la paroi pour chaque phase.

Le tableau à la base de la boite de dialogue affiche les efforts de traction dans les tirants. Ces efforts doivent être divisés par l'espacement e = 2.5 mètres.

3.3 Analyse des résultats

Les valeurs ci-dessous sont celles du fichier de données fourni (triangles à 15 nœuds, h = 2 m, raffinement ×5, tirants de raideur EA = 200 000 kN). Les déplacements sont cumulés depuis l'état initial ; les efforts dans les tirants sont donnés par mètre linéaire de paroi, puis par tirant (espacement de 2,5 m).

Tableau 7 – Synthèse des résultats par phase : déplacements horizontaux de la paroi et tassement de la surface en mm, moments en kN·m/ml, tensions en kN/ml – kN par tirant.

Phase	Fond	u_x tête	u_x max	M min / max	Tirant 1	Tirant 2	Tassement max
1	−3 m	4,0	4,0	−5 / +29	–	–	< 1
2	−3 m	−1,7	3,6	−18 / +58	120 – 300	–	1
3	−7 m	8,1	15,0	−86 / +49	140 – 349	–	8
4	−7 m	10,4	13,5	−48 / +44	128 – 321	200 – 500	8
5	**−10 m**	**56,2**	**67,8**	**−251 / +62**	**174 – 436**	**213 – 532**	**41**

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

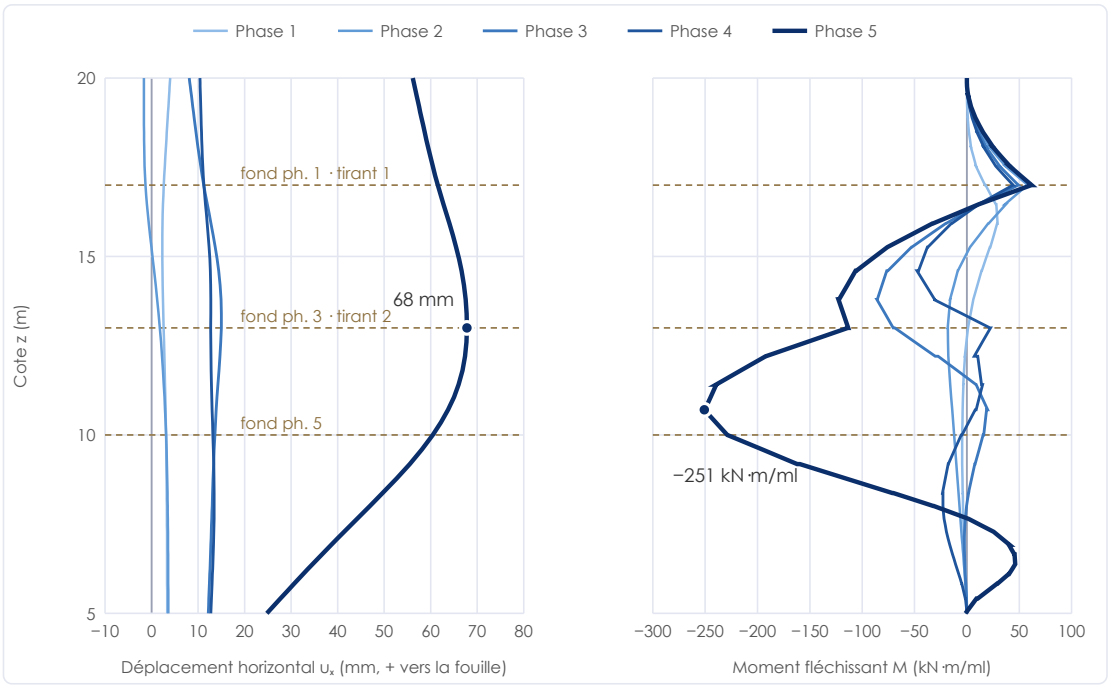


Figure 13 – Déplacement horizontal et moment fléchissant de la paroi à chaque phase

Comportement de la paroi au fil du phasage

- **Phase 1.** La paroi travaille en console : la tête avance de 4 mm vers la fouille et le moment reste faible (29 kN·m/ml).
- **Phase 2.** La mise en tension du premier lit ramène la tête de la paroi vers le terrain (−1,7 mm) et crée un moment local de 58 kN·m/ml au droit du tirant.
- **Phase 3.** Entre le tirant et le fond de fouille, la paroi prend un « ventre » de 15 mm vers la cote 13,4 m ; le moment en travée atteint 86 kN·m/ml.
- **Phase 4.** La précontrainte du second lit soulage la travée : le moment y passe de 86 à 48 kN·m/ml, pour un déplacement presque inchangé.
- **Phase 5.** Les trois derniers mètres de terrassement multiplient le déplacement maximal par cinq (de 13,5 à 68 mm, au droit du second lit) et le moment par plus de cinq (251 kN·m/ml à la cote 10,7 m, juste au-dessus du fond de fouille). Le pied de la paroi lui-même avance de 25 mm : la fiche ne joue plus le rôle d'un encastrement.

Cette réponse très non linéaire à la dernière passe est le fait marquant du calcul. Elle s'explique par l'état de la butée. Dès la phase 3, la résistance de l'interface côté fouille est mobilisée à 100 % sur toute la hauteur de la fiche, et en phase 5 un tiers des points d'intégration du massif (33 %) sont plastiques. LMC_EF le signale par l'avertissement « état proche de la rupture » affiché à la fin du calcul, pour les phases 3 et 5.

Efforts dans les tirants

La tension du tirant 1 augmente de 45 % par rapport à sa précontrainte (de 120 à 174 kN/ml), celle du tirant 2 de 6 % seulement (de 200 à 213 kN/ml). Ces variations restent modestes au regard des déplacements : en phase 5, le gain de 136 kN par tirant du lit supérieur correspond à un allongement de sa longueur libre de 136 × 10,5 / 200 000 ≈ 7 mm, alors que sa tête s'est déplacée d'environ 36 mm dans l'axe du tirant depuis sa mise en tension (62 mm vers la fouille et 27 mm vers le bas). Le scellement a donc suivi la paroi sur près de 30 mm : il est situé dans la masse de sol en mouvement et non dans un terrain fixe.

L'effort normal dans la paroi permet un contrôle simple. Les composantes verticales des tirants valent 174 × sin 33,7° + 213 × sin 45° ≈ 97 + 150 = 247 kN/ml ; en ajoutant le poids de la paroi jusqu'à la cote 9,2 m, où l'effort normal est maximal (5,25 × 10,8 ≈ 57 kN/ml), on obtient 304 kN/ml, pour un effort normal calculé de 294 kN/ml. Les deux valeurs sont très proches : le frottement du sol sur la paroi au-dessus de ce niveau est faible (de l'ordre de 10 kN/ml, dirigé vers le haut).

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

Tassements derrière la paroi et soulèvement du fond de fouille

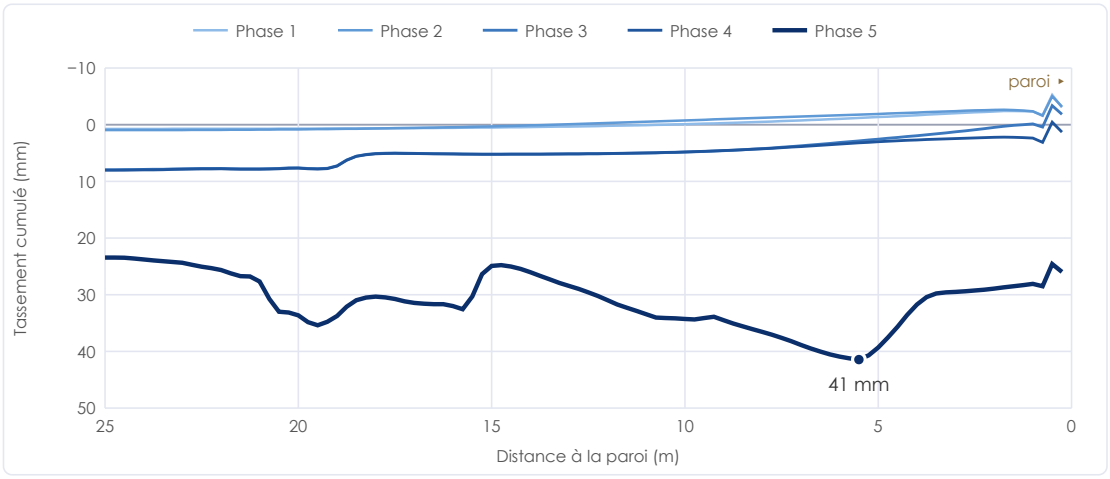


Figure 14 – Tassement cumulé de la surface du sol derrière la paroi à chaque phase

Jusqu'à la phase 4, la surface tasse de 8 mm au plus, et ce tassement est maximal loin de la paroi : il provient surtout du rabattement de la nappe en phase 3, qui augmente les contraintes effectives dans tout le massif, alors que près de la paroi la surface reste presque immobile. En phase 5, la cuvette atteint 41 mm à 5,5 m de la paroi et son profil devient irrégulier : il dessine des blocs séparés par des bandes de cisaillement. Le tassement vaut encore 23 mm sur le bord gauche du modèle, à 25 m de la paroi : le modèle est trop court côté terrain pour ce niveau de sollicitation, et les tassements lointains dépendent de la position de cette limite. Le fond de fouille se soulève quant à lui de 85 mm au plus, à 2 m de la paroi (45 mm sur l'axe de la fouille), sous l'effet du déchargement et de la butée de la fiche. C'est là que se trouve le déplacement maximal du modèle ($|u|$ = 107 mm).

Pressions d'eau et écoulement

L'écoulement à surface libre rabat la nappe derrière la paroi : de la cote 17 m, elle descend vers 16 m en phase 3 et vers 14,9 m en phase 5. En pied de paroi, la pression interstitielle côté terrain n'est plus que de 78 kPa (120 kPa à l'état initial), pour 73 kPa côté fouille : la poussée différentielle de l'eau est donc bien plus faible que celle d'un calcul hydrostatique entre les niveaux 17 m et 10 m.

Sous le fond de fouille, la pression à 5 m de profondeur vaut 55 kPa contre 50 kPa en hydrostatique, soit un gradient ascendant moyen $i \approx 0{,}10$, très inférieur au gradient critique $i_c = \gamma'/\gamma_w \approx 1$. Il n'y a pas de risque de boulance ; l'essentiel de la perte de charge se produit côté terrain.

Marge de sécurité de la configuration finale

Pour quantifier la proximité de la rupture, ajoutez après la phase 5 une phase de type **Réduction c-φ** puis relancez le calcul. On obtient :

$$F = 1{,}11$$

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

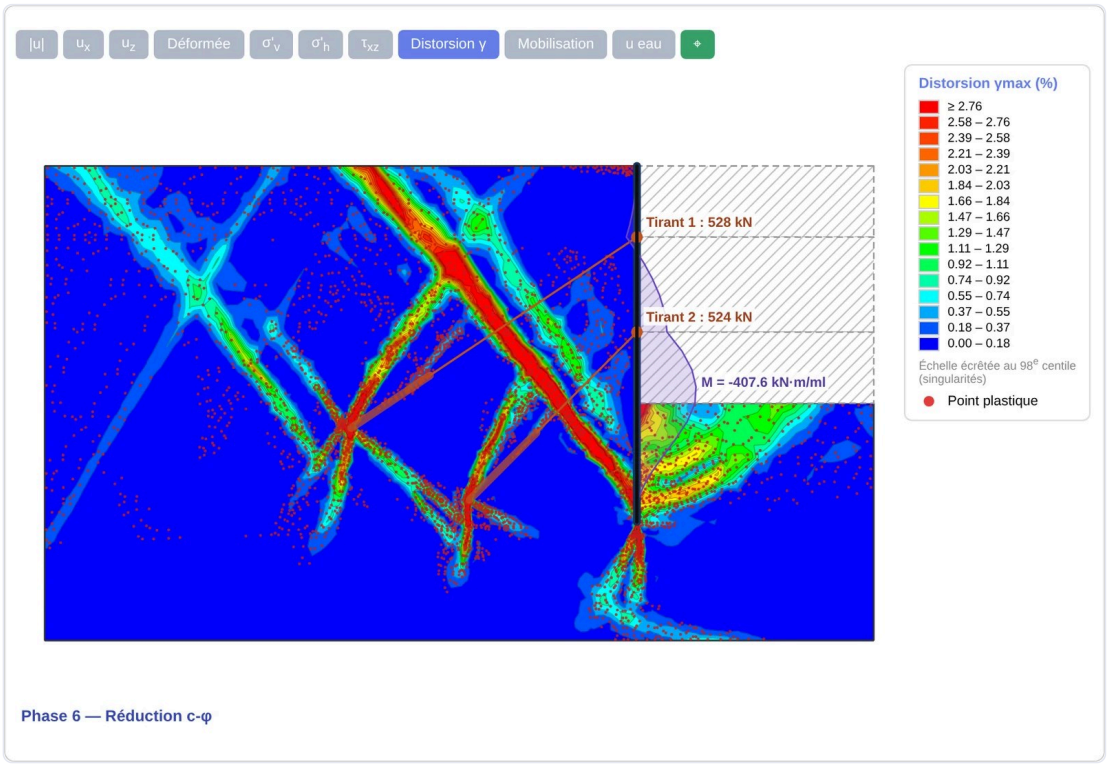


Figure 15 – Distorsions à la fin de la réduction c-φ : mécanisme de rupture (F = 1,11)

Le mécanisme associe un coin de poussée qui part du pied de la paroi et débouche en surface une dizaine de mètres en arrière, des bandes secondaires qui passent par les scellements des deux lits de tirants, et un coin de butée devant la fiche. Les scellements sont à l'intérieur du volume qui glisse : les tirants retiennent la paroi par rapport à ce volume, mais ne s'opposent pas à son mouvement d'ensemble.

⚠ **Une excavation stable, mais sans marge**

Un coefficient de 1,11 est très inférieur aux marges habituellement recherchées pour un soutènement. Le calcul converge, les efforts paraissent raisonnables, et pourtant l'ouvrage tel qu'il est défini ne serait pas acceptable : seuls l'évolution non linéaire des déplacements, l'avertissement du calcul et la réduction c-φ le montrent.

❓ **Pour aller plus loin**

- Allongez la fiche de la paroi de 2 m : comment évoluent F, le déplacement du pied et le moment maximal ?
- Allongez la longueur libre des tirants pour placer les scellements au-delà du coin de poussée : que devient le mécanisme de rupture ?
- Reculez la limite gauche du modèle de 20 m : quelle est l'influence sur la cuvette de tassement ?
- Refaites le calcul avec h = 1,5 m : les résultats dépendent-ils encore de la finesse du maillage ?

3.4 Conclusion

✅ **À retenir**

- La précontrainte d'un lit de tirants soulage la paroi au moment de sa mise en tension ; ensuite, la tension n'augmente que si la tête du tirant se déplace par rapport à son scellement.
- Un calcul d'écoulement à chaque passe sous la nappe modifie fortement les pressions d'eau sur la paroi : ici, la nappe est rabattue d'environ 2 m derrière l'écran et le gradient en fond de fouille reste faible.
- La dernière passe de terrassement produit l'essentiel des déplacements et des moments : une réponse aussi non linéaire signale que la butée est épuisée.
- **Un calcul qui converge n'est pas un ouvrage justifié : la réduction c-φ (F = 1,11) et l'examen du mécanisme de rupture font partie de l'analyse.**

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

Références

1. *Boulon M. et al. (nov. 2007). Pratique éclairée des éléments finis en géotechnique.*
2. *Guide d'utilisation LMC_EF 2026, LeLabGeolPack.com.*

© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés