Tassements dus au creusement d'un tunnel circulaire sous nappe

Tunnel au tunnelier, perte de volume imposée et efforts dans le revêtement

THÈME
Tunnels, interaction sol-structure

NIVEAU
Intermédiaire

DURÉE INDICATIVE
1 h 00

APPLICATION
LMC_EF 2026 (version 42 ou suivante) – modèle plan 2D

tunnel circulaire | tunnelier | perte de volume | cuvette de tassement | revêtement | nappe | Mohr-Coulomb

Cet exercice modélise le creusement au tunnelier d'un tunnel circulaire de 2,50 m de diamètre, à 20 m de profondeur, dans un terrain stratifié sous nappe. Le revêtement est posé dès le creusement, puis une perte de volume de 2 % lui est imposée pour représenter le vide annulaire et la convergence du terrain. L'exercice montre comment en déduire la cuvette de tassement en surface et les efforts dans le revêtement, et comment les confronter à une estimation empirique et à un calcul de référence.

1. Énoncé du problème et approche théorique

1.1 Présentation de l'ouvrage

Le tunnel est circulaire, de 2,50 m de diamètre. Son axe est à 20 m sous la surface du sol, à la limite entre une argile profonde et un sable profond. Il est creusé au tunnelier : le revêtement en béton, de 0,35 m d'épaisseur, est mis en place à l'avancement. La nappe est à 3 m sous la surface. Le tunnel est étanche : il ne modifie pas les pressions d'eau dans le terrain.

Le creusement s'accompagne d'une perte de volume : le terrain se referme sur le vide laissé autour du revêtement. Elle est fixée ici à 2 % de la section du tunnel.

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

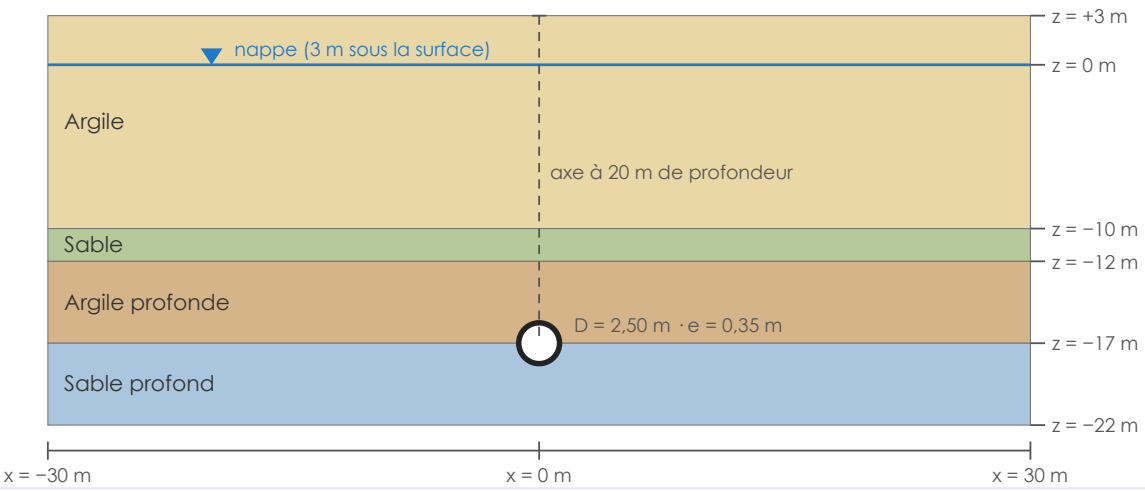


Figure 1 – Coupe schématique de l'ouvrage (surface du sol à z = +3 m, nappe à z = 0)

1.2 Données géotechniques

Le terrain comprend quatre couches horizontales. Toutes suivent la loi de Mohr-Coulomb en conditions drainées, avec un angle de dilatance nul et un coefficient des terres au repos $K_0 = 1 - \sin \varphi'$. Le module de l'argile de surface augmente de +0.65 MPa/m avec la profondeur à partir de la cote 0.

Tableau 1 – Caractéristiques des sols.

Couche	Cotes z (m)	γ / γ_{sat} (kN/m³)	c' (kPa)	φ' (°)	E (MPa)	ν	R_{inter}
Argile	+3 à −10	15 / 18	5,5	24	1 + 0,65 par mètre sous z = 0	0,33	1
Sable	−10 à −12	16,5 / 20	1	31	80	0,30	1
Argile profonde	−12 à −17	16 / 18,5	8	28	10	0,33	0,8
Sable profond	−17 à −22	17 / 21	1	33	120	0,30	0,8

R_{inter} est le coefficient de réduction de la résistance à l'interface entre le sol et le revêtement. Les perméabilités n'interviennent pas dans le résultat : la nappe est au repos dans toutes les phases.

1.3 Caractéristiques du revêtement

Tableau 2 – Revêtement du tunnel.

Caractéristique	Valeur	Unité
Épaisseur e	0,35	m
Module E	40 000	MPa
Poids volumique	24	kN/m³
Rigidité normale EA = E·e	$14 \cdot 10^6$	kN/ml
Rigidité de flexion EI = E·e³/12	$0{,}143 \cdot 10^6$	kN·m²/ml

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

Caractéristique	Valeur	Unité
Poids w	8,4	kN/m/ml
Perte de volume imposée	**2**	**% de la section**

1.4 Estimation empirique de la cuvette de tassement

Avant tout calcul, la perte de volume donne un ordre de grandeur du tassement en surface. La section du tunnel vaut A = π·D²/4 = 4,91 m² ; le volume perdu par mètre de tunnel est donc :

$$V_s = 0{,}02 \times 4{,}91 = 0{,}098 \ \mathrm{m^3/ml} \tag{1}$$

Si le terrain se déforme à volume constant, ce volume se retrouve dans la cuvette de tassement. L'observation de nombreux chantiers montre que la cuvette a la forme d'une courbe de Gauss (Peck, 1969) :

$$s(x) = s_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{2\,i^2}\right) \qquad \text{avec} \qquad s_{max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}\,i} \tag{2}$$

La distance i du point d'inflexion à l'axe est proportionnelle à la profondeur de l'axe : i = K·z_0, avec K de l'ordre de 0,25 à 0,35 dans les sables et de 0,4 à 0,6 dans les argiles.

Question préalable

Avec z_0 = 20 m, estimez le tassement maximal en surface pour K = 0,4 puis K = 0,5.

▼ **Voir la réponse**

Pour K = 0,4 : i = 8 m et s_{max} = 0,098 / (2,507 × 8) = 4,9 mm. Pour K = 0,5 : i = 10 m et s_{max} = 3,9 mm. Le tassement attendu en surface est donc de l'ordre de 4 à 5 mm.

2. Construction du modèle dans LMC_EF

2.1 Choix de modélisation

Le modèle est plan et représente le tunnel entier : il fait 60 m de largeur (x de −30 à +30 m) et 25 m de hauteur (z de −22 à +3 m). La base est fixe, les bords verticaux sont bloqués horizontalement. Le calcul se déroule en trois phases :

- Phase 0 : état initial, contraintes calculées par la procédure K_0, nappe à z = 0 ;
- Phase 1 : creusement et pose du revêtement. La région du tunnel est désactivée et le revêtement activé dans la même phase, comme derrière un tunnelier ;
- Phase 2 : perte de volume. Une contraction de 2 % de la section est imposée au revêtement.

© 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 les quatre sols. Pour l'argile, renseignez l'augmentation du module avec la profondeur : E_{inc} = 0,65 MPa/m et z_{ref} = 0.

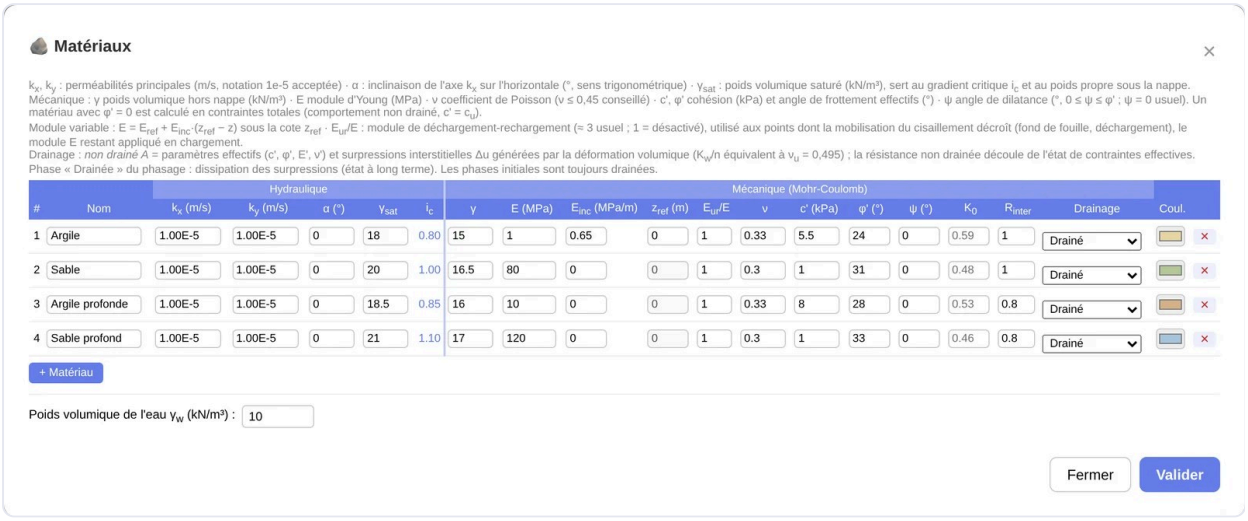


Figure 2 – Boîte de dialogue Matériaux

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

2 Géométrie des régions

Dessinez les quatre couches de sol, de la surface vers la base :

Tableau 3 – Points des régions.

Région	Matériau	Points (x ; z)
Région 1	Argile	(−30 ; 3) (30 ; 3) (30 ; −10) (−30 ; −10)
Région 2	Sable	(−30 ; −10) (30 ; −10) (30 ; −12) (−30 ; −12)
Région 3	Argile profonde	(−30 ; −12) (30 ; −12) (30 ; −17) (−30 ; −17)
Région 4	Sable profond	(−30 ; −17) (30 ; −17) (30 ; −22) (−30 ; −22)

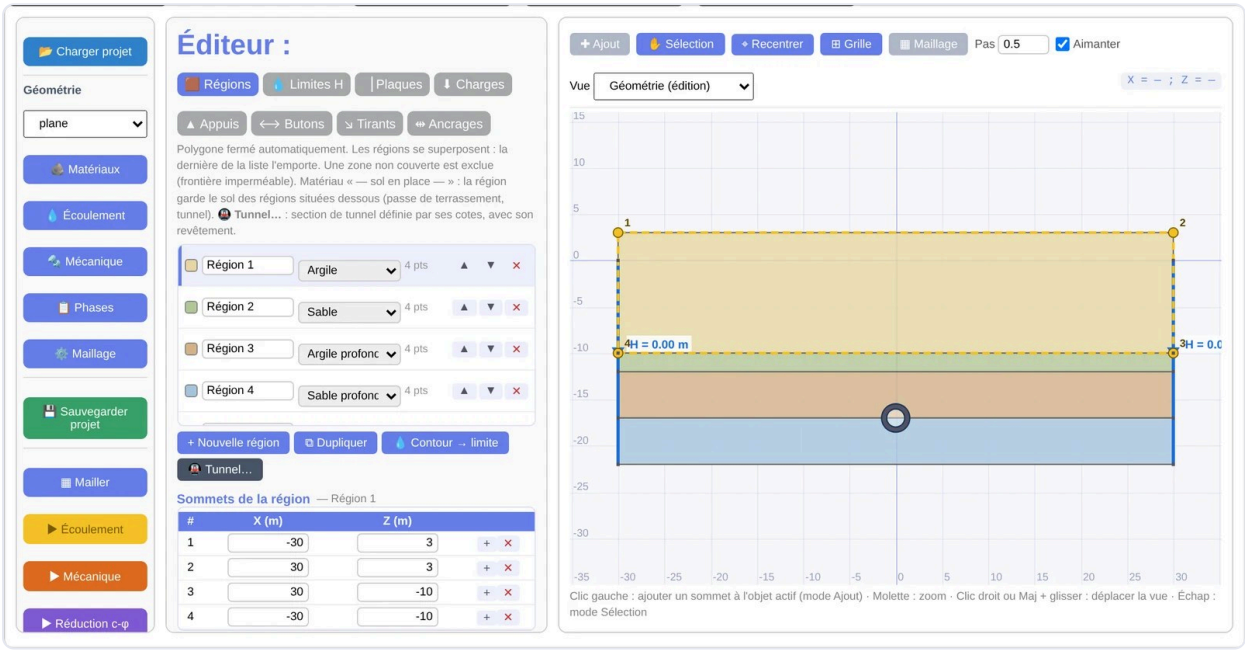


Figure 3 – Éditeur : régions de sol, tunnel et limites hydrauliques

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

3 Tunnel et revêtement

Dans la liste des régions, cliquez sur **Tunnel…** et renseignez la section : forme circulaire, axe en x = 0 et z = −17 m, diamètre 2,5 m. Cochez **Plaque structurelle sur le contour** (e = 0,35 m, E = 40 000 MPa, 24 kN/m³) et **Interface sol-revêtement**. Laissez décochée la case **Tunnel drainant** : le tunnel est étanche. La fenêtre affiche les rigidités EA, EI et le poids w qui en découlent.

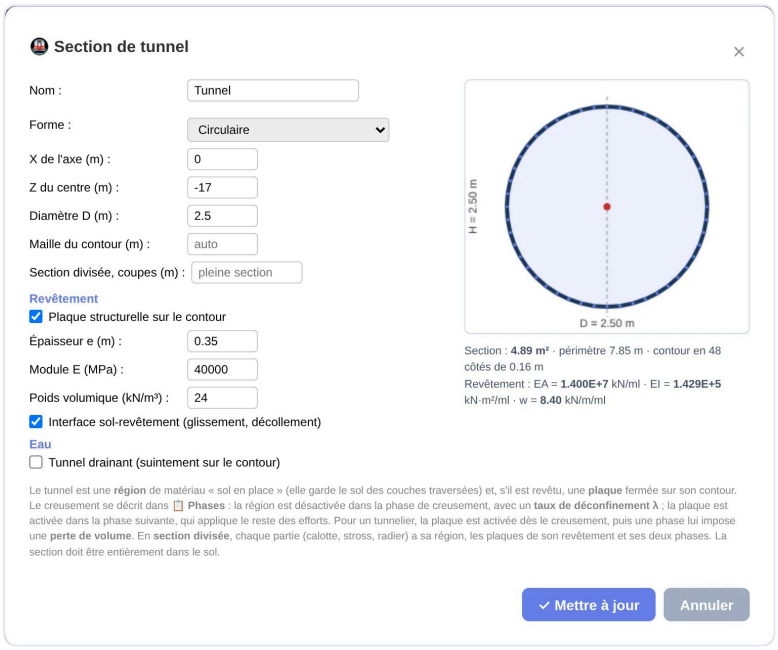


Figure 4 – Fenêtre Section de tunnel

L'application crée la région « Tunnel » (matériau « sol en place »), la plaque « Revêtement — Tunnel » sur son contour et les deux phases de calcul du tunnel.

4 Conditions hydrauliques

Imposez la charge de la nappe sur les deux bords du modèle :

Tableau 4 – Limites hydrauliques.

Limite	Points (x ; z)	Condition
Limite 1	(−30 ; 0) (−30 ; −22)	H imposée = 0 m
Limite 2	(30 ; 0) (30 ; −22)	H imposée = 0 m

Dans **Mécanique**, choisissez les pressions d'eau issues de l'écoulement. Avec la même charge sur les deux bords, la nappe est horizontale à z = 0 et les pressions sont hydrostatiques.

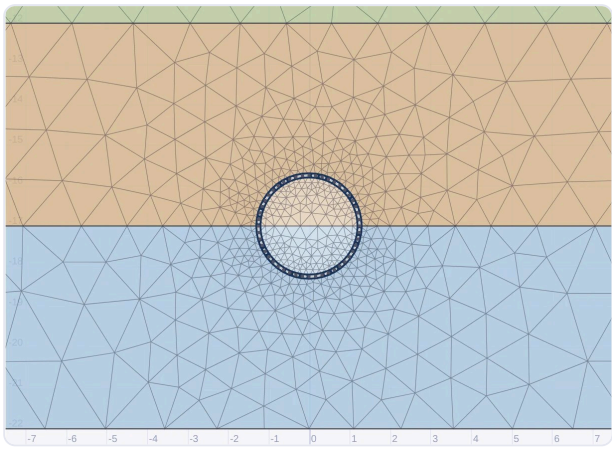
© 2018–2026 www.lelabgeolpack.com. Tous droits réservés

5 Maillage

Ouvrez **Maillage** et saisissez une taille de maille de 1,5 m, un raffinement local de 5 et des éléments à 6 nœuds, puis cliquez sur **▦ Mailler**. Le maillage se resserre de lui-même autour du tunnel.



a) paramètres



b) maillage autour du tunnel

Figure 5 – Maillage du modèle

2.3 Phasage du calcul

Ouvrez **Phases**. Les phases 1 et 2 ont été créées par la fenêtre du tunnel ; réglez-les selon le tableau ci-dessous.

Tableau 5 – Phases du calcul.

N°	Phase	Régions et structures	Eau	Remarque
0	Phase initiale	Massif complet, limites 1 et 2 actives, revêtement inactif	Écoulement (limites actives)	Procédure K_0
1	Creusement et revêtement	Région « Tunnel » désactivée, revêtement activé	Recalculée	λ = 100 %, fouille sèche
2	Perte de volume	Inchangées	Inchangée	Perte de volume du revêtement : 2 %

La perte de volume se saisit dans la colonne de droite, sous la plaque « Revêtement — Tunnel », et uniquement en phase 2.

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

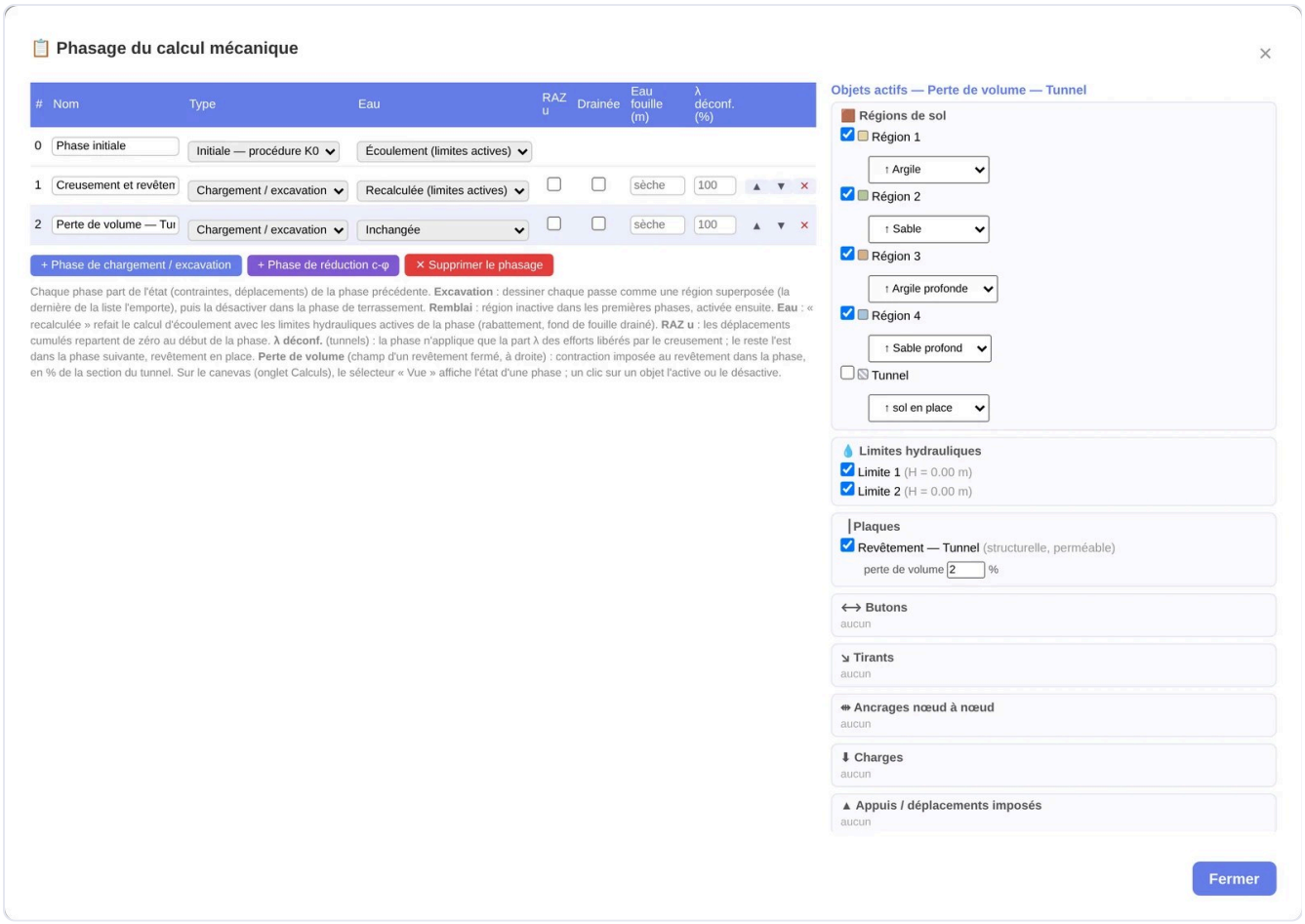


Figure 6 – Boîte de dialogue Phasage (phase 2 sélectionnée)

> ⚠ **Les pertes de volume s'ajoutent d'une phase à l'autre**
>
> Si la valeur de 2 % est saisie en phase 1 et en phase 2, la section diminue de 4 % au total. Laissez le champ vide en phase 1.

2.4 Lancement du calcul

Cliquez sur **▶ Mécanique**. Le calcul dure une vingtaine de secondes. Un avertissement de convergence lente apparaît en phase 2 : un pas de chargement a été accepté avec une tolérance élargie, ce qui est sans conséquence sur les résultats présentés ici.

3. Résultats et commentaires

3.1 Déplacements du massif

En phase 1, les déplacements restent inférieurs au millimètre : le revêtement, très raide, reprend les efforts libérés par le creusement. C'est la perte de volume de la phase 2 qui produit les tassements.

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



Figure 7 – Déplacements verticaux u_z en fin de phase 2

La clé de voûte descend de 24,2 mm et le radier remonte de 1,1 mm : le revêtement se contracte en restant appuyé sur le sable profond, beaucoup plus raide que l'argile qui le surmonte. La section du tunnel diminue de 1,99 %, soit la quasi-totalité de la perte imposée. Les tassements se propagent vers la surface en s'élargissant.

3.2 Cuvette de tassement en surface

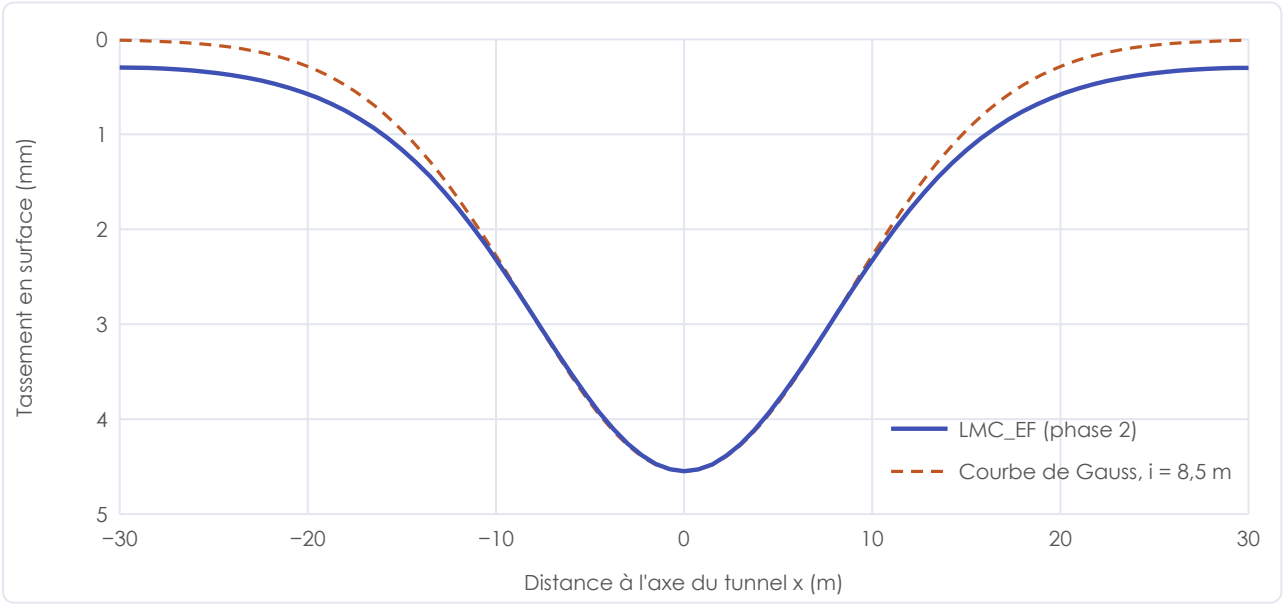


Figure 8 – Tassement de la surface du sol en fin de phase 2, comparé à une courbe de Gauss

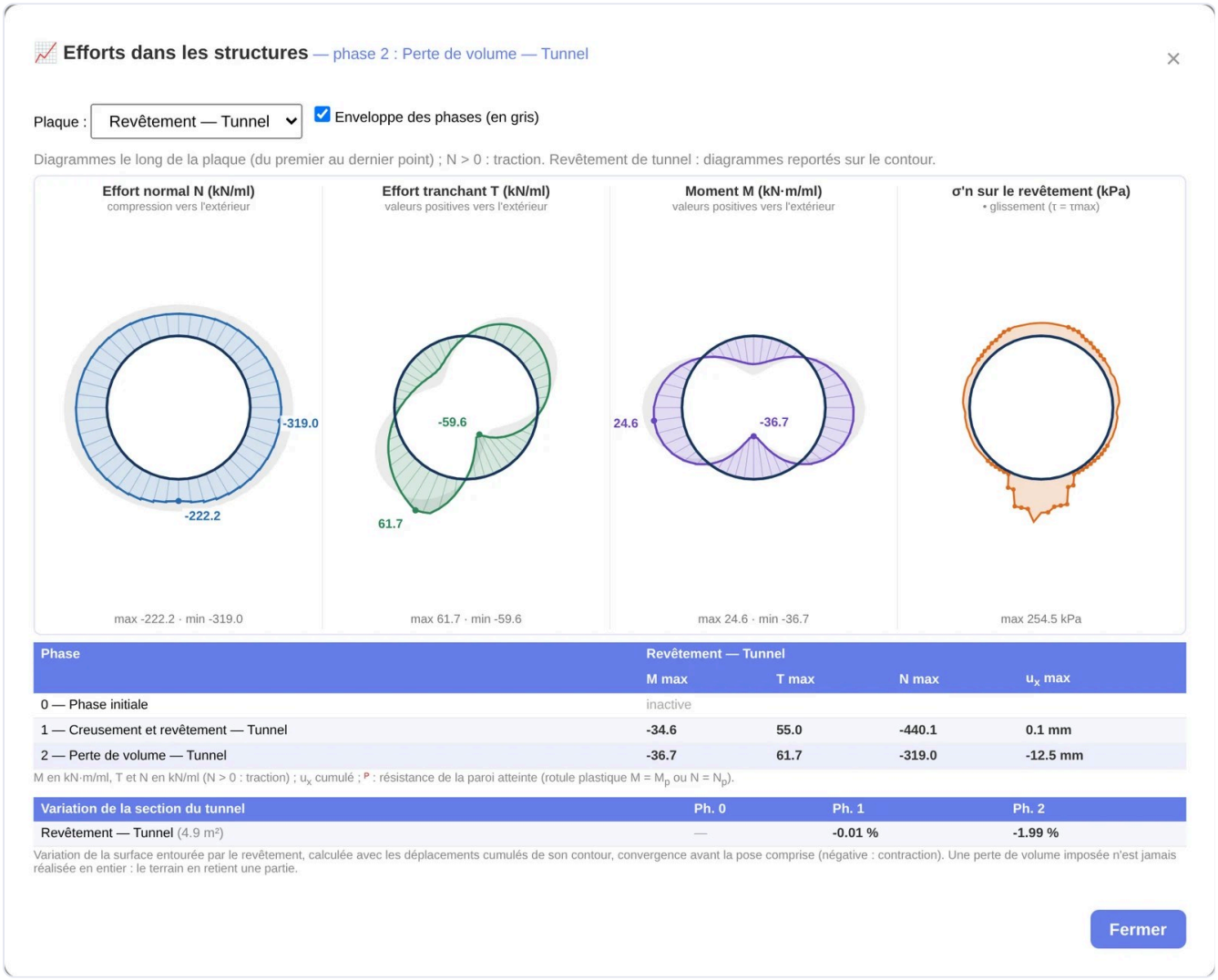
Le tassement maximal en surface vaut 4,5 mm, à l'aplomb de l'axe : il est dans la fourchette de 4 à 5 mm de l'estimation empirique. Jusqu'à 10 m de l'axe, la cuvette calculée suit une courbe de Gauss de paramètre i = 8,5 m, soit K = 0,43, valeur courante pour un terrain à dominante argileuse.

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

Au-delà, la cuvette calculée est plus large que la courbe de Gauss : il reste 0,3 mm de tassement aux bords du modèle, à 30 m de l'axe. Son volume est de 0,107 m³/ml, contre 0,098 m³/ml perdus au tunnel. Cette cuvette trop étalée est un comportement connu des calculs en élasticité linéaire avec le critère de Mohr-Coulomb ; elle reste sans effet sur le tassement maximal.

3.3 Efforts dans le revêtement

Cliquez sur **Efforts dans les structures**. Les diagrammes sont reportés sur le contour du tunnel ; le tableau donne les valeurs extrêmes de chaque phase.



Phase	Revêtement — Tunnel			
	M max	T max	N max	u_x max
0 — Phase initiale	inactive			
1 — Creusement et revêtement — Tunnel	-34.6	55.0	-440.1	0.1 mm
2 — Perte de volume — Tunnel	-36.7	61.7	-319.0	-12.5 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).

Variation de la section du tunnel	Ph. 0	Ph. 1	Ph. 2
Revêtement — Tunnel (4.9 m²)	—	-0.01 %	-1.99 %

Variation de la surface entourée par le revêtement, calculée avec les déplacements cumulés de son contour, convergence avant la pose comprise (négative : contraction). Une perte de volume imposée n'est jamais réalisée en entier : le terrain en retient une partie.

Figure 9 – Efforts dans le revêtement et contrainte normale à l'interface en fin de phase 2

Tableau 6 – Efforts extrêmes dans le revêtement.

Grandeur	Phase 1	Phase 2
Effort normal N (kN/ml, compression négative)	−440 à −322	−319 à −222
Moment M (kN·m/ml)	−34,6 à +34,1	−36,7 à +24,6
Effort tranchant T (kN/ml)	±55,0	−59,6 à +61,7
Contrainte normale effective à l'interface σ'_n (kPa)	90 à 180	15 à 254

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

La compression du revêtement diminue d'un quart environ entre les deux phases : en se contractant, l'anneau se décharge sur le terrain. Pour le dimensionnement, l'effort normal à retenir est donc celui de la phase 1.

À l'interface, la contrainte normale est régulière en phase 1 (de 90 kPa aux reins à 180 kPa au radier). En phase 2, elle baisse sur presque tout le contour et se concentre au radier, où le revêtement s'appuie sur le sable profond.

3.4 Comparaison avec la référence

Tableau 7 – Résultats de LMC_EF et valeurs de référence en fin de phase 2.

Grandeur	Référence	LMC_EF
Moment maximal (kN·m/ml)	36,71	36,75
Effort normal maximal (kN/ml)	327	319
Effort tranchant maximal (kN/ml)	67,1	61,7
Contrainte normale effective maximale à l'interface (kPa)	201,74	254
Tassement en clé de voûte (mm)	*24.4*	24,2
Tassement maximal en surface (mm)	**4.6**	**4,5**

Le moment est identique à la référence, l'effort normal s'en écarte de 2 % et l'effort tranchant de 8 %. La référence utilise des triangles à 15 nœuds et modélise un demi-tunnel ; LMC_EF calcule ici le tunnel entier avec des triangles à 6 nœuds.

L'écart est plus net sur la contrainte normale effective à l'interface (+26 %), comparée dans les deux cas en fin de phase 2. Cette grandeur est locale : elle dépend de la raideur attribuée à l'interface et de la finesse du maillage dans la zone d'appui du radier, étroite, où elle varie très vite.

Le calcul peut être relancé avec un modèle à 15 noeuds et un maillage plus fin autour du tunnel.

3.5 Conclusion

À retenir

- Un tunnel au tunnelier se modélise en deux phases : creusement avec pose du revêtement, puis perte de volume imposée au revêtement.
- Les tassements viennent de la perte de volume : la cuvette de surface en restitue à peu près le volume, et son maximum se vérifie à la main avec la courbe de Gauss.
- Les efforts de dimensionnement du revêtement se lisent sur l'enveloppe des phases : l'effort normal est maximal avant la perte de volume.
- Les pertes de volume de phases successives s'ajoutent : la valeur ne se saisit que dans la phase concernée.

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

Références

1. Peck R. B. (1969). *Deep excavations and tunnelling in soft ground*. 7^{e} Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations, Mexico.
2. Guide d'utilisation LMC_EF 2026, chapitre 3.12 « Tunnels », LeLabGeolPack.com.

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