

# GEO5

## Méthode des éléments finis : Tunnel creusé - analyse dynamique d'un séisme

### Résumé

L'objectif de ce cahier technique est de décrire l'utilisation du module « Sismique » du programme GEO5-MEF afin de réaliser l'analyse dynamique d'un tunnel creusé soumis à un séisme.

Les fichiers exemples correspondant sont « Demo\_manual\_48\_init.gmk » « Demo\_manual\_48.gmk ».

**ATTENTION** : Dans ce document, l'utilisateur sera guidé à travers toutes les étapes de définition et d'analyse d'un projet géotechnique, dans un contexte établi par l'auteur. L'utilisateur doit être informé que les réglages de l'analyse (onglet « Paramètres ») sont de sa responsabilité et doivent être vérifiés/adaptés avant de commencer tout nouveau projet.

## 1 Introduction

Le module « Sismique » du programme GEO5-FEM permet de réaliser l'analyse dynamique des structures géotechniques chargées par le mouvement du sol. La charge sismique peut être appliquée à une phase de construction quelconque du modèle existant et son effet est analysé comme un problème mécanique dynamique. Le résultat de l'analyse dynamique est l'évolution temporelle du champ de déplacement, du champ de déformation total et plastique et du champ de contraintes. En outre, le programme détermine l'évolution des efforts internes dans les éléments de structure tels que les poutres, les ancrages, etc. Ces quantités peuvent être affichées à un pas de temps arbitraire de l'analyse dynamique.

Dans ce cahier, nous fournissons un exemple d'analyse dynamique de tunnel creusé.

## 2 Projet

Nous souhaitons déterminer l'évolution de la déformation du sol et l'évolution des efforts internes dans le revêtement d'un tunnel creusé lors d'un tremblement de terre. Le tunnel est soumis à un séisme lors de la dernière phase de construction lorsque toutes les étapes d'excavation sont terminées et que le revêtement est installé. Le modèle par éléments finis adopté pour l'analyse statique de toutes les phases de construction est stocké dans le fichier « Demo\_manual\_48\_init.gmk ». Le modèle présente la définition du profil géologique, les paramètres matériels, la géométrie, les phases de construction ainsi que les données nécessaires à l'analyse statique.

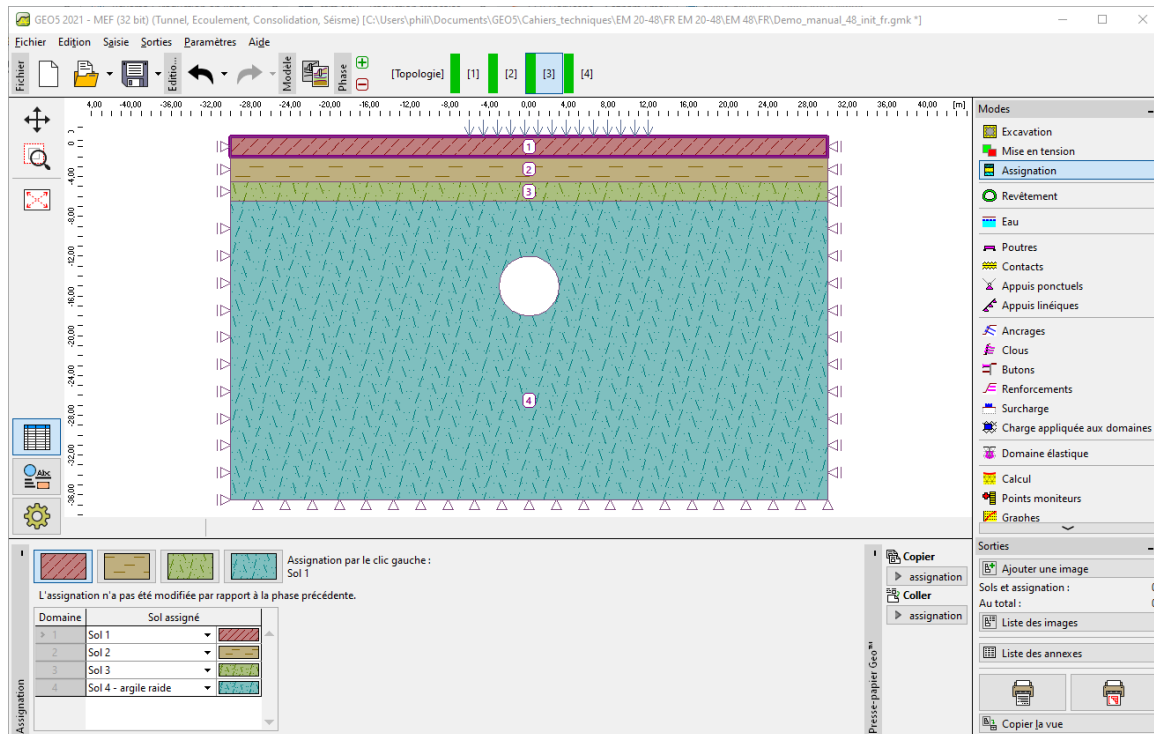


FIGURE 1 – Profil géologique et géométrie du modèle de tunnel creusé

Le tremblement de terre supposé a pour accélération maximale de calcul du sol  $a_g = 2 \text{ m/s}^2$ . Pour les différentes couches de sol, nous allons utiliser les valeurs approchées suivantes pour le module d'élasticité dynamique et le coefficient d'amortissement relatif :

Sol	Module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$ [MPa]	Coefficient d'amortissement relatif $\xi$ [-]
Sol 1	200	0,05
Sol 2	300	0,05
Sol 3	1200	0,05
Sol 4	1965	0,05

TABLE 1 – Module d'élasticité dynamique et le coefficient d'amortissement relatif (valeurs approchées)

La région principale du modèle nommée « Sol 4 » correspond à un sol argileux qui s'étend sur des dizaines de mètres sous la limite inférieure de l'actuel modèle par éléments finis.

En plus du modèle, ce cahier s'appuie sur l'« Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes ». Cette norme de conception spécifie les types de sol A - E, S<sub>1</sub> et S<sub>2</sub> et les spectres de réponse élastique correspondants. Le module Sismique du programme GEO5-FEM permet de générer un accélérogramme compatible avec le spectre de réponse qui entrera ensuite dans l'analyse dynamique.

## 3 Solution

Nous allons commencer par le modèle d'éléments finis existant que nous allons améliorer en ajoutant l'analyse dynamique du séisme. Nous allons ouvrir par ouvrir le fichier «Demo\_manual\_48\_init.gmk» et l'enregistrer en tant que copie de travail «Demo\_manual\_48.gmk».

### 3.1 Paramétrage de l'analyse

#### 3.1.1 Activation de l'analyse sismique dynamique

L'analyse dynamique du tremblement de terre devient disponible en cochant la case correspondante dans le cadre « Paramètres » du mode « Topologie ».

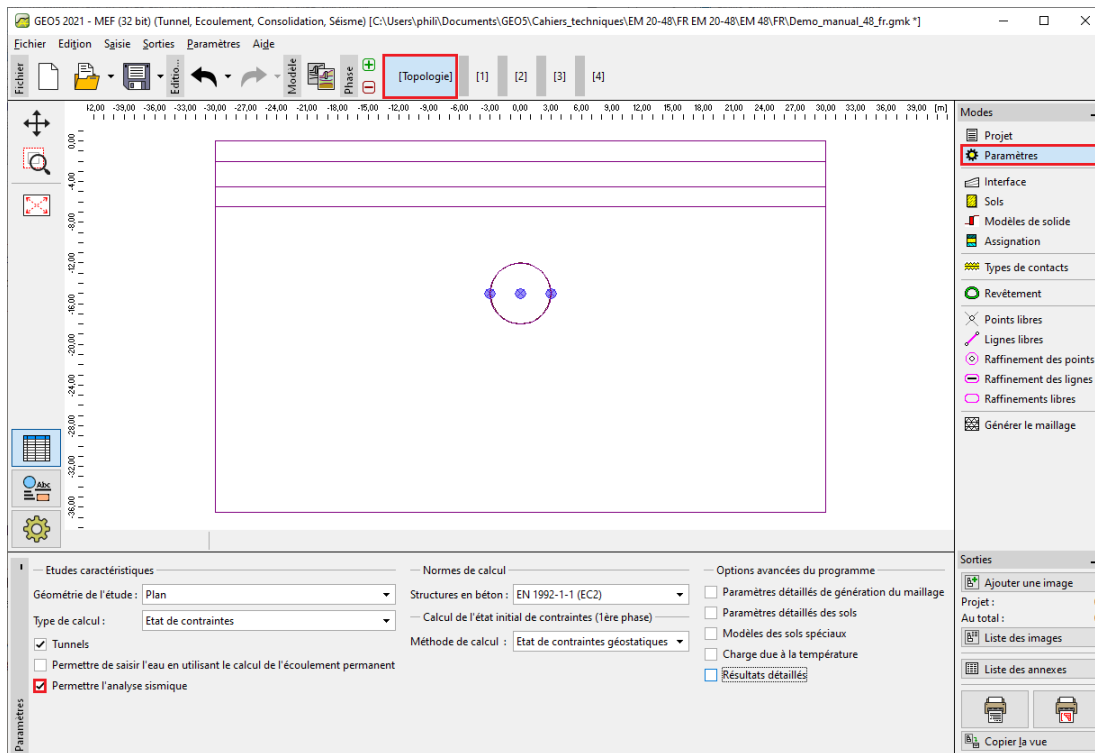


FIGURE 2 – Cadre « Paramètres » - comment activer l'analyse sismique

Lorsque cette option est cochée, le programme impose la saisie de paramètres matériels supplémentaires pour l'analyse sismique, ce qui permet de l'exécuter à chaque phase de la construction.

### 3.1.2 Paramètres matériels pour l'analyse sismique

L'étape suivante de préparation du modèle consiste à spécifier les paramètres sismiques de chaque sol. Ces paramètres sont spécifiés dans le cadre « Sols » du mode « Topologie ». Dans la fenêtre de dialogue « Modification des propriétés du sol », nous allons valoriser les données suivantes :

- *Module d'élasticité dynamique* - c'est le module de Young que le sol présente en petites déformations.
- *Type d'amortissement* - le programme permet de choisir entre la saisie du coefficient d'amortissement relatif  $\xi$  ou directement les paramètres d'amortissement de Rayleigh  $\alpha$  et  $\beta$ . La signification de ces paramètres est développée dans « Module FEM-earthquake - Theoretical grounds » disponible sur <https://www.finesoftware.eu/user-guides/>. La valeur la plus courante du coefficient d'amortissement dans les applications géotechniques est  $\xi = 5$ .

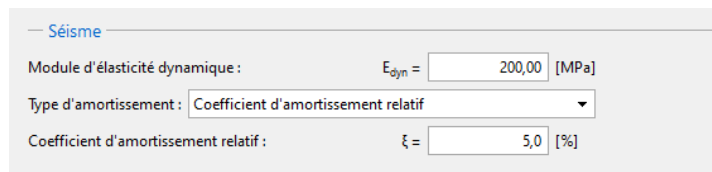


FIGURE 3 – Paramètres de sols associés à l'analyse sismique

Ensuite, nous valorisons les valeurs du module d'élasticité et du coefficient d'amortissement indiqués dans le tableau ci-dessus. Les matériaux sont maintenant définis, nous pouvons donc continuer avec le paramétrage du séisme dans la phase de construction choisie.

### 3.1.3 Activation de l'analyse sismique à l'étape sélectionnée

Pour exécuter l'analyse dynamique dans une phase de construction donnée, il convient de cocher, dans le cadre « Séisme », l'option « Calculer le séisme », le programme pourra alors exécuter à la volée les analyses suivantes :

1. analyse des contraintes statiques
2. analyse modal (fréquences et modes propres)
3. analyse en champ libre (free-field)
4. analyse dynamique de l'effet sismique

Pour l'analyse statique, nous pouvons naturellement utiliser les options telles que l'ajout de surcharge, l'activation ou la désactivation de régions, l'installation d'éléments structurels, etc. L'analyse dynamique démarre alors à partir de l'état d'équilibre obtenu en fin d'analyse statique.

Notre modèle existant en analyse statique comporte quatre phases de construction :

1. calcul de la contrainte géostatique,
2. surcharge sur le terrain,
3. creusement partiel de la section du tunnel,
4. pose du revêtement et fin du creusement.

La quatrième étape correspond donc à l'étape finale de construction. Il serait bien sûr possible d'activer l'option « Calculer le séisme » à cette étape. Néanmoins, comme il est de bonne pratique de garder les phases de construction aussi simples que possible, nous allons ajouter encore une autre étape de calcul (la cinquième), dans laquelle nous allons définir le séisme. Puisqu'il n'y a pas de chargement supplémentaire agissant dans l'analyse statique à cette étape, ses résultats seront identiques aux résultats de l'étape précédente.

### 3.1.4 Conditions aux limites au bas du modèle

A cette cinquième étape, dans le cadre « Séisme », nous allons fixer les conditions aux limites en bas du modèle. Les options disponibles sont :

- conditions aux limites *fixes*
- conditions aux limites *absorbantes*.

Les *conditions aux limites fixes* sont utilisées quand la limite inférieure du modèle représente une interface entre un matériau relativement meuble et un très rigide, par ex. entre un sol sous-jacent et un substrat rocheux. Ces conditions aux limites décrivent la réflexion des ondes descendantes vers le modèle.

Les *conditions aux limites absorbantes* correspondent à une situation où il n'y a pas d'interface matérielle au niveau de la limite inférieure et le matériau assigné à la région la plus basse s'étend en dessous de la région du modèle. En supposant que le matériau sous-jacent ne se déforme que de manière élastique, ces conditions aux limites amortissent complètement les ondes descendantes, simulant ainsi que les ondes sortantes traversent librement la limite inférieure et continuent à se déplacer vers le bas en dehors de la région du modèle.

Étant donné que le sol argileux de la couche 4 de notre modèle s'étend à des dizaines de mètres sous le modèle et qu'il n'y a donc pas d'interface matérielle à la limite inférieure, nous allons donc choisir les conditions aux limites absorbantes.

### 3.1.5 Direction de l'accélérogramme

Le déroulement du séisme est défini sous la forme d'une liste d'instantanés et des accélérations correspondantes (un accélérogramme) de l'onde entrante par le bord inférieur du modèle. Le programme permet de saisir les composantes horizontales ou verticales de l'accélérogramme, ou une combinaison des deux. Un accélérogramme horizontal imposé à la limite inférieure crée une onde de cisaillement se déplaçant vers le haut (onde S). Un accélérogramme vertical imposé à la limite inférieure crée une onde de pression ascendante (onde P). Pour simplifier, nous n'utiliserons que l'accélérogramme horizontal dans notre modèle.

### 3.1.6 Accélérogramme artificiel

L'Eurocode 8 nous permet de décrire le mouvement sismique en utilisant des accélérogrammes générés artificiellement. Cependant ces accélérogrammes doivent être générés pour correspondre au spectre de réponse élastique requis. L'Eurocode 8 définit différents spectres de réponse élastique pour différentes classes de sol notées A - E. Par conséquent, nous devons d'abord déterminer la classe du sol et ensuite trouver les paramètres du spectre de réponse correspondant. Pour ces paramètres, le programme générera un accélérogramme compatible avec le spectre.

### 3.1.7 Classes de sol

Les classes de sol sont définies dans l'Eurocode 8. Le sol de notre modèle répond à la description de la classe B : « Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur ». Pour la classe B, le code de conception définit davantage la plage typique d'une vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans la couche supérieure de 30 m de sol, elle est comprise entre 360 m/s et 800 m/s.

La vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans la couche supérieure de 30 m de sol est selon l'Eurocode 8 calculée comme :

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

où  $h_i$  est l'épaisseur de la  $i$ -ème couche mesurée en [m].

La célérité des ondes de cisaillement de la  $i$ -ème formation est donnée par la relation :

$$v_i = \sqrt{\frac{G_{dyn,i}}{\rho_i}}$$

où

$$G_{dyn,i} = \frac{E_{dyn,i}}{2(1 + \nu_i)}$$

désigne le module de cisaillement dynamique,  $\rho_i = \gamma_i/g$  est la masse volumique,  $E_{dyn,i}$  est le module dynamique de Young,  $\nu_i$  est le coefficient de Poisson,  $\gamma_i$  est le poids spécifique et  $g$  représente l'accélération gravitationnelle.

$i$	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]	$G$ [MPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$v$ [m/s]	$h$ [m]	$h/v$ [s]
1	200	0,35	74,1	20	2000	192,5	2	0,0104
2	300	0,35	111,1	20	2000	235,7	2,5	0,0106
3	1200	0,3	461,5	21	2100	468,8	2	0,0043
4	1965	0,3	755,8	21	2100	599,9	23,5	0,0392
							$\sum \frac{h_i}{v_i} =$	0,0644
							$v_{s,30} =$	<b>465,6</b>

TABLE 2 – Calcul de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement

La vitesse des ondes de cisaillement  $v_{s,30} = 465,6$  m/s confirme que le sol est bien de classe B.

### 3.1.8 Spectre de réponse élastique

L'Eurocode 8 introduit le spectre de réponse élastique à l'accélération du sol défini par les paramètres répertoriés pour chaque classe de sol. Pour la classe de sol B et le type de spectre de

réponse 1<sup>1</sup>, le document prescrit  $S = 1,2$ ,  $T_B = 0,15$  s,  $T_C = 0,5$  s,  $T_D = 2,0$  s. La figure ci-dessous illustre la signification de ces paramètres :

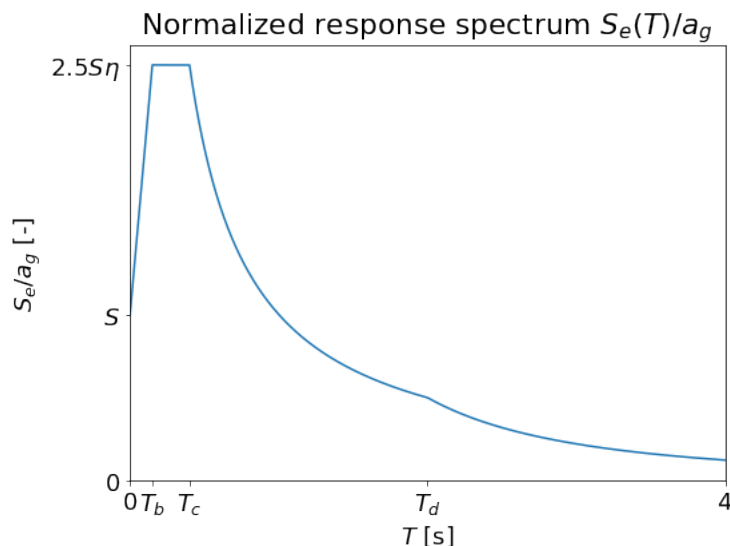


FIGURE 4 – Spectre de réponse élastique paramétrique défini dans l’Eurocode 8

### 3.1.9 Génération de l’accélérogramme

Pour générer un accélérogramme stationnaire, c’est-à-dire un accélérogramme sans période de montée, ni mouvement fort et ni décroissance caractéristique, il convient de cocher l’option « Stationnaire ». Nous supposons un accélérogramme non stationnaire dans notre modèle, nous allons donc laisser cette option décochée.

Dans l’étape suivante, nous allons valoriser les paramètres communs aux accélérogrammes horizontaux et verticaux. Il s’agit de :

- *Durée du séisme  $t_s$*  : la durée totale de l’accélérogramme généré, y compris la montée, le mouvement fort et les périodes de décroissance (en secondes).
- *Nombre de pas* : nombre de points de temps pour lesquels l’accélération est générée. GEO5-FEM utilise la transformée de Fourier rapide (FFT) dans l’algorithme de génération de l’accélérogramme et il est donc recommandé d’utiliser  $2^n$  pas de temps, par exemple 256, 512, 1024, etc. Un pas de temps raisonnable est de l’ordre du centième de seconde.
- *Coefficient d’amortissement relatif  $\xi$* <sup>2</sup> : taux d’amortissement apparaissant dans la définition des spectres de réponse élastique, sa valeur est comprise entre 0 et 1.
- *Coefficient de correction d’amortissement  $\eta$*  : pour la valeur la plus courante du coefficient d’amortissement relatif  $\xi = 5\%$ , l’Eurocode 8 donne une valeur  $\eta = 1$  pour le coefficient de correction d’amortissement. Pour les autres valeurs de  $\xi$ , le document préconise d’utiliser la relation  $\eta = \sqrt{10/(5+\xi)}$ . Le coefficient d’amortissement  $\xi$  est exprimé en pourcentage.
- *Variante* : graine du générateur de nombres pseudo-aléatoires. Lorsque cette valeur est modifiée, le programme génère différents accélérogrammes avec un spectre de réponse élastique analogue. Cette option est utile lors de l’exposition du modèle à plusieurs accélérogrammes artificiels différents comme l’exige par exemple l’Eurocode 8.

1. L’Eurocode 8 distingue également deux types de spectres notés Type 1 et Type 2. Par souci de simplicité, nous considérons uniquement le Type 1 dans cet exemple.

2. Eurocode : coefficient d’amortissement visqueux

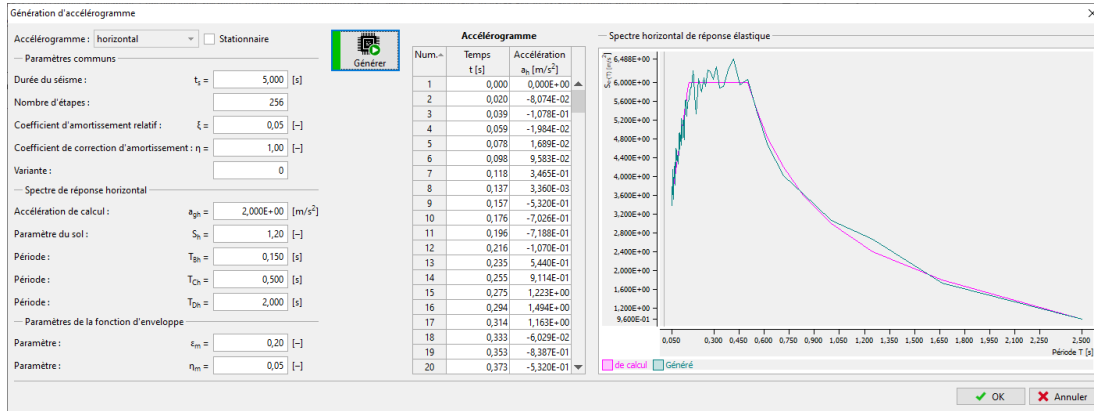


FIGURE 5 – Fenêtre de dialogue « Génération d'accélérogramme » avec les valeurs générées des pas de temps et des accélérations

Ensuite, il convient de valoriser les paramètres requis du spectre de réponse élastique. Nous allons spécifier ces paramètres séparément pour l'accélérogramme horizontal et vertical. Les valeurs de ces paramètres pour un type de sol particulier peuvent être trouvées dans l'Eurocode 8.

La dernière partie du formulaire de saisie permet de fixer les paramètres définissant la fonction d'enveloppe. Le paramètre  $\varepsilon_m$  détermine le temps  $t = \varepsilon_m t_s$ , auquel la fonction d'enveloppe atteint son maximum. Le paramètre  $\eta_m$  contrôle l'amplitude des accélérations à la fin de l'accélérogramme, il s'agit du rapport entre la valeur de la fonction enveloppe à la fin de l'accélérogramme au temps  $t_s$  et le maximum à  $t = \varepsilon_m t_s$ .

Après avoir défini tous les paramètres requis, nous allons générer l'accélérogramme en cliquant sur le bouton « Générer ». Puis en cliquant sur le bouton « OK », la fenêtre se ferme et l'enregistrement généré est affiché dans le cadre « Séisme ».

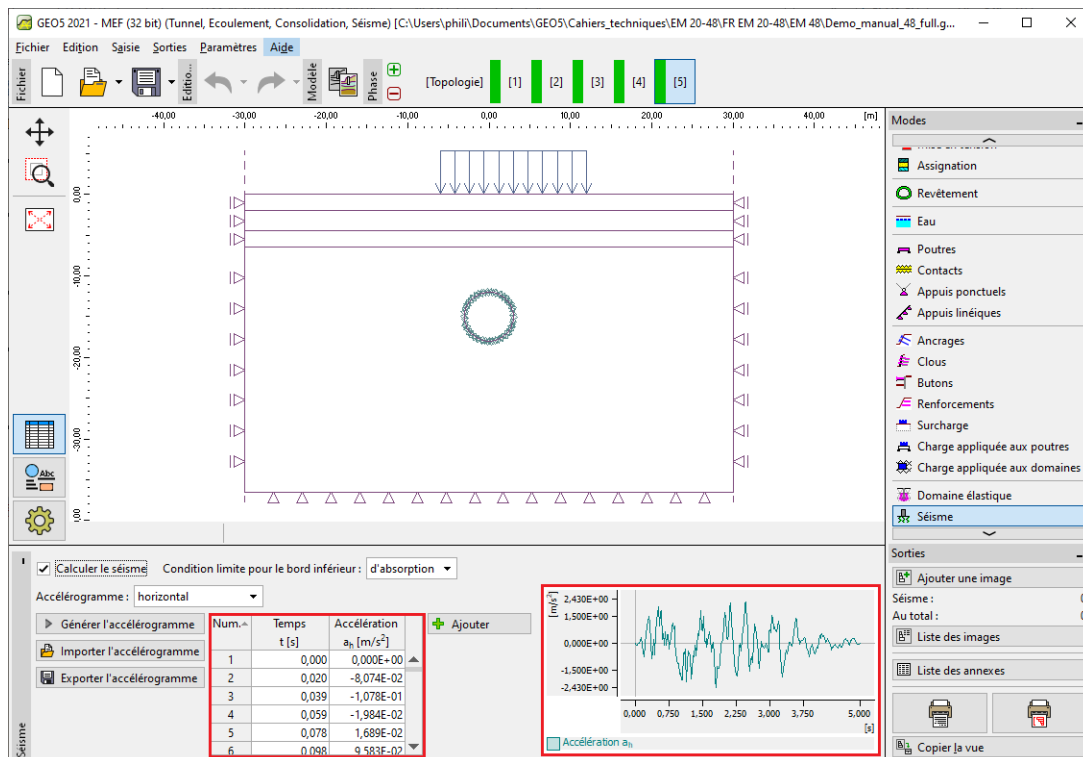


FIGURE 6 – Cadre « Séisme » présentant l'accélérogramme généré



## 3.2 Analyses

### 3.2.1 Analyse des modes propres et des fréquences propres

Nous avons défini l'amortissement du matériau via le coefficient d'amortissement  $\xi$ , il est donc nécessaire de spécifier quelle fréquence (ou paire de fréquences) sera amortie par cette valeur. Dans le module Sismique du programme GEO5-FEM, ces fréquences peuvent être choisies parmi les fréquences propres du modèle particulier. Les fréquences propres sont calculées avant d'exécuter l'analyse dynamique.

Supposons que la fréquence la moins amortie dans notre modèle est la première fréquence propre qui correspond au mouvement horizontal. Néanmoins, pour une meilleure compréhension, nous souhaitons calculer les cinq fréquences propres les plus basses et les modes propres correspondants. Dans la boîte de dialogue « Paramètres de calcul », onglet « Séisme », nous allons fixer le nombre de modes propres demandés à cinq. Cela garantit que l'algorithme recherchera au moins les cinq premiers modes propres et fréquences propres. Nous allons également définir le support des limites pour l'analyse des valeurs propres comme vertical. Ce choix impose des déplacements verticaux nuls pour les modes propres. Une telle exigence est raisonnable puisque nous supposons uniquement l'accélérogramme horizontal.

Nous fermons la boîte de dialogue « Paramètres de calcul » et cochons l'option « Arrêter l'analyse après calcul des modes propres » du cadre « Calcul ». Cela indique au programme d'exécuter les analyses statiques et en mode propre. L'analyse est soumise en cliquant sur le bouton « Calculer ».

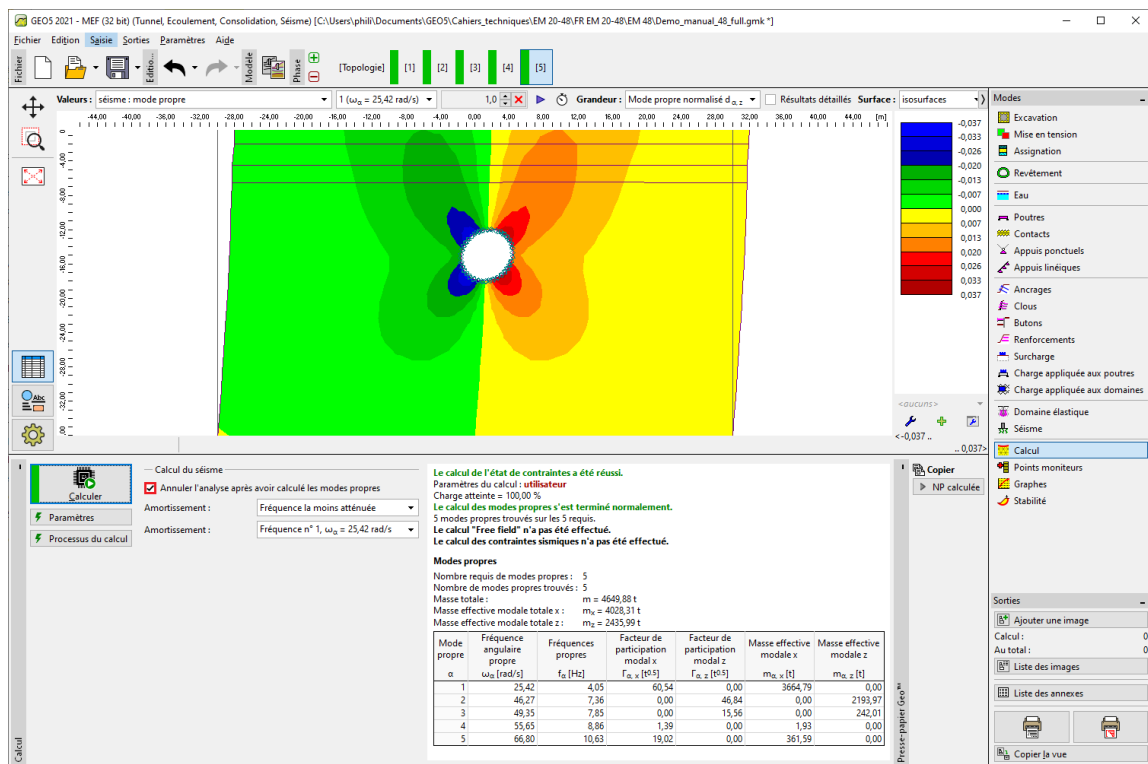


FIGURE 7 – Cadre « Calcul » - Résultats de l'analyse modale

**Modes propres**

Nombre requis de modes propres : 5  
 Nombre de modes propres trouvés : 5  
 Masse totale :  $m = 4649,88 \text{ t}$   
 Masse effective modale totale x :  $m_x = 4028,31 \text{ t}$   
 Masse effective modale totale z :  $m_z = 2435,99 \text{ t}$

Mode propre $\alpha$	Fréquence angulaire propre $\omega_\alpha$ [rad/s]	Fréquences propres $f_\alpha$ [Hz]	Facteur de participation modal x $\Gamma_{\alpha, x}$ [t <sup>0.5</sup> ]	Facteur de participation modal z $\Gamma_{\alpha, z}$ [t <sup>0.5</sup> ]	Masse effective modale x $m_{\alpha, x}$ [t]	Masse effective modale z $m_{\alpha, z}$ [t]
1	25,42	4,05	60,54	0,00	3664,79	0,00
2	46,27	7,36	0,00	46,84	0,00	2193,97
3	49,35	7,85	0,00	15,56	0,00	242,01
4	55,65	8,86	1,39	0,00	1,93	0,00
5	66,80	10,63	19,02	0,00	361,59	0,00

FIGURE 8 – Cadre « Calcul » - Résultats de l'analyse modale, en détail

Les résultats de l'analyse modale sont disponibles au bas du cadre « Calcul » (comme le montre l'illustration ci-dessus). Le programme nous informe que l'algorithme a trouvé les cinq premiers modes propres comme demandé. Les fréquences propres associées sont listées dans un tableau avec les facteurs de participation modale et les masses effectives modales. Une masse effective modale nous indique dans quelle mesure le mode propre associé contribue au mouvement dans une direction donnée (horizontale ou verticale). Dans notre modèle, la première masse effective modale dans la direction des  $x$  est égale à 3664,79 t. La masse totale du modèle est égale à 4649,88 t. Cela montre que la fréquence prédominante du mouvement horizontal est la première fréquence propre  $\omega_1 = 25,42 \text{ rad/s}$  et nous la choisissons donc comme fréquence la moins amortie. Les différents modes propres (cf. Figure 7) peuvent être visualisés en choisissant « Valeurs : Séisme : mode propre ». Il est également possible d'utiliser « Maillage : déformé par la taille » pour une meilleure visualisation.

### 3.2.2 Analyse dynamique

Les détails de l'amortissement sont définis, nous allons pouvoir donc exécuter l'analyse dynamique. Nous décochons l'option « Arrêter l'analyse après calcul des modes propres » et nous cliquons sur le bouton « Calculer ». Comme indiqué précédemment dans ce manuel, l'analyse dynamique 2D est précédée de l'analyse dite en champ libre. Il s'agit d'une analyse dynamique 1D de l'onde de cisaillement et de pression se déplaçant à travers un sous-sol stratifié qui correspond aux couches trouvées le long des limites gauche et droite du modèle. Les résultats de l'analyse en champ libre entrent ensuite dans le type spécial de conditions aux limites appliquées le long des limites verticales dans l'analyse dynamique 2D. Ces conditions aux limites de champ libre garantissent que les ondes mécaniques sortantes ne sont pas réfléchies vers le modèle<sup>3</sup>.

Les résultats en fin de séisme sont affichés en choisissant « Valeurs : séisme : total ».

Les résultats aux différents pas de temps sont affichés en choisissant « Valeurs : séisme : dans le temps ». Si nous parcourons les différents pas de temps et que nous voulons afficher le modèle déformé, il est pratique d'unifier l'échelle du maillage déformé en choisissant « Maillage : déformé par la taille ».

Pour visualiser les moments de flexion, nous devons définir « Maillage : non déformé » et vérifier le cochage des options « Grandeurs sur les poutres » et « Moment » dans les paramètres de dessin du cadre « Calcul » (en cliquant sur le bouton « Engrenage » dans la partie inférieure gauche de la fenêtre du programme). Les figures suivantes comparent les moments de flexion dans le revêtement à la fin de l'analyse statique (avant le séisme), à l'instant  $t = 2,539 \text{ s}$  où le moment atteint son maximum, et à la fin de l'analyse dynamique.

3. Les conditions aux limites fixes et libres réfléchissent les ondes mécaniques vers le modèle. Aucun de ces deux types ne peut être utilisé pour les limites verticales; par conséquent, des conditions aux limites de champ libre sont utilisées sur les bords verticaux

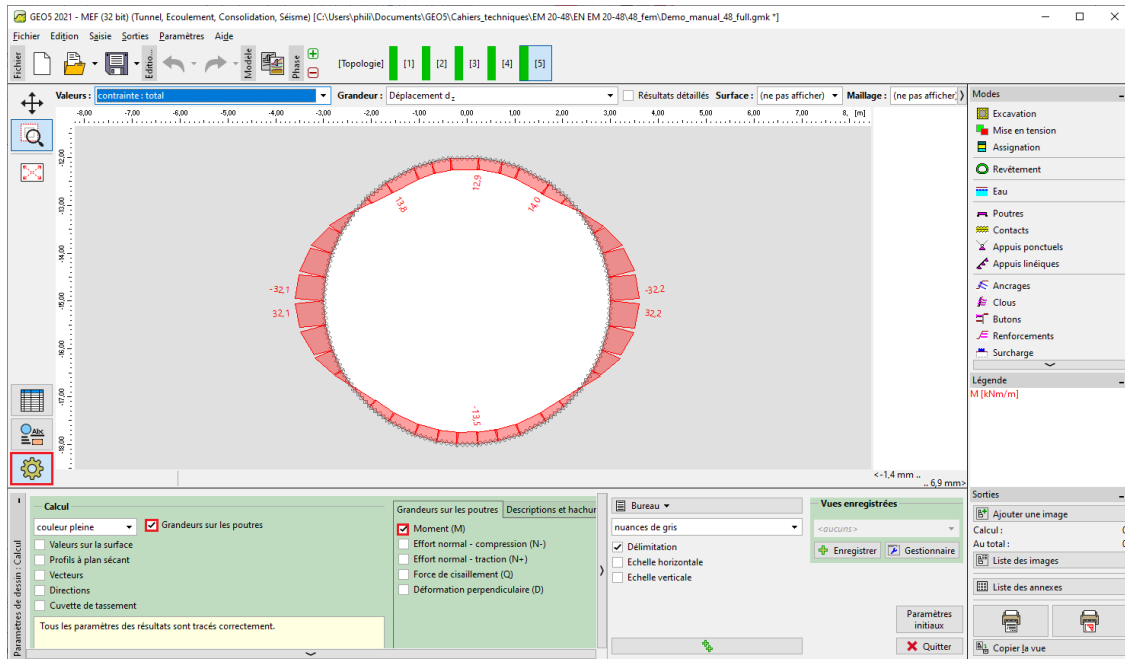


FIGURE 9 – Répartition du moment de flexion avant le séisme

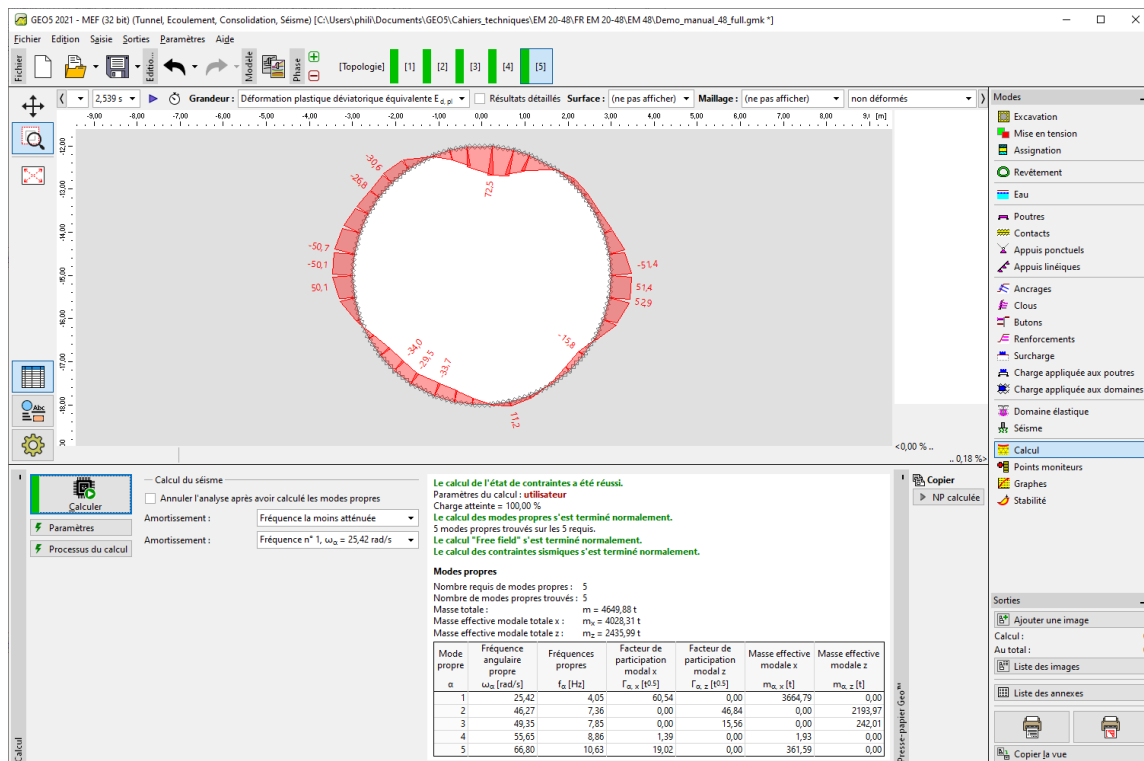


FIGURE 10 – Répartition du moment de flexion à  $t = 2,539 \text{ s}$

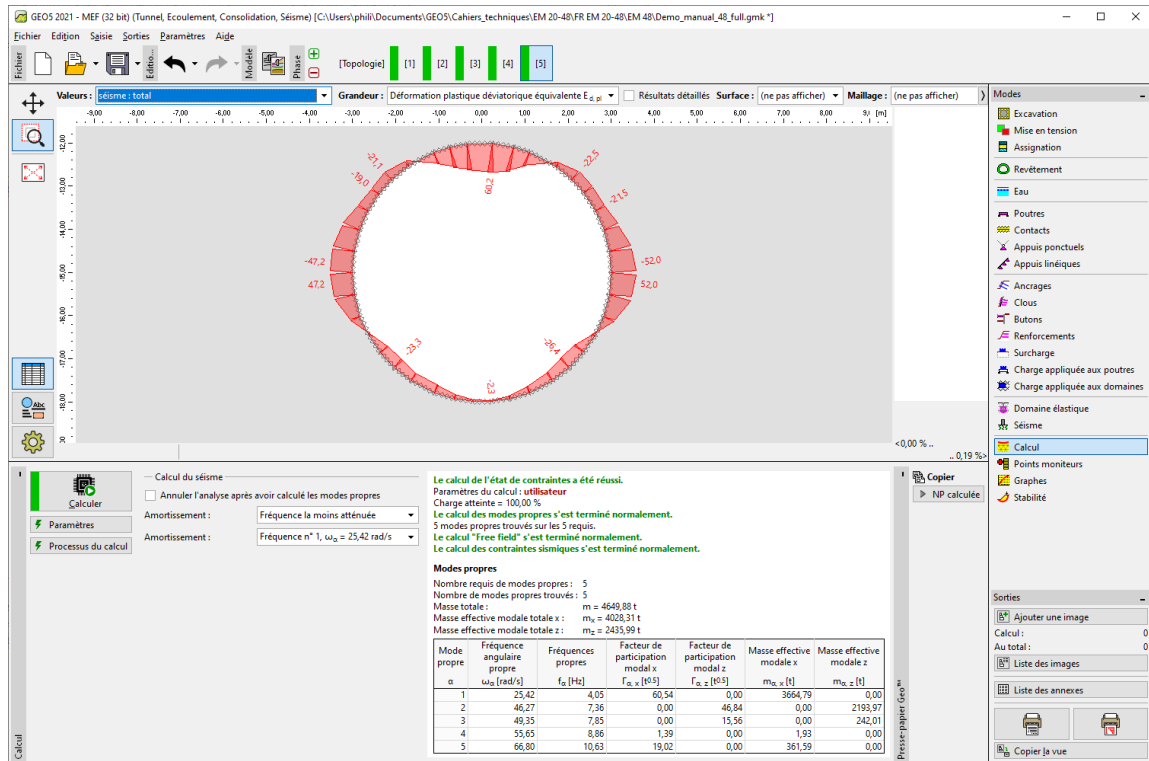


FIGURE 11 – Répartition du moment de flexion à la fin de l'analyse dynamique

Le changement permanent de la distribution du moment de flexion est lié à la redistribution de la contrainte due à l'évolution des zones plastiques et aux déformations permanentes associées du corps de sol. Les zones plastiques à la fin des analyses statiques et dynamiques sont restituées dans les figures suivantes.

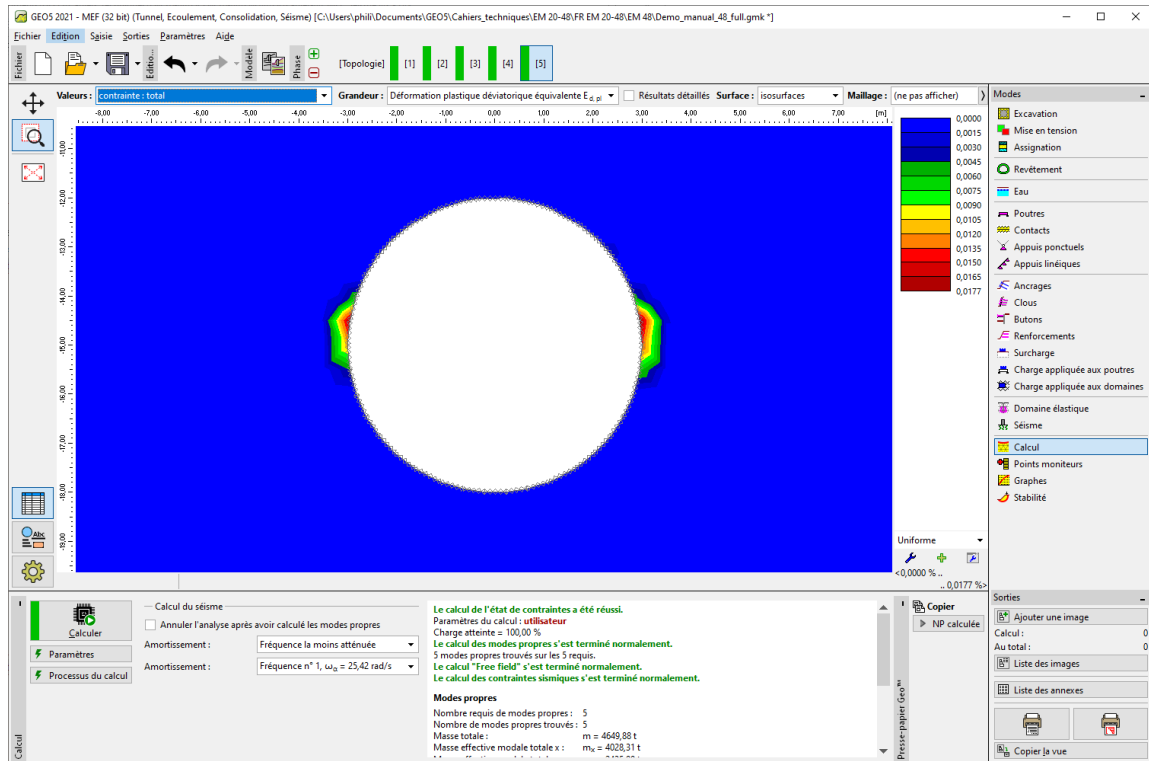


FIGURE 12 – Zones de déformation plastique déviatorique équivalente avant le séisme

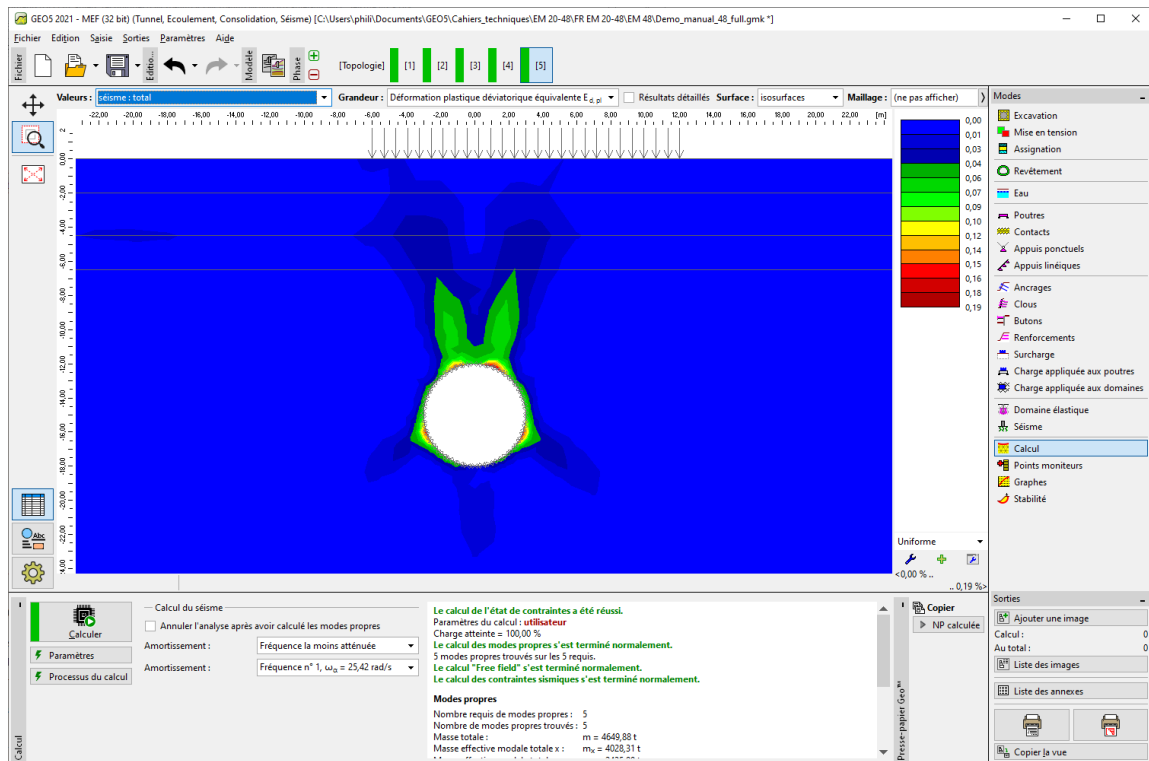


FIGURE 13 – Zones de déformation plastique déviatorique équivalente à la fin de l'analyse dynamique

## 4 Conclusions

Dans ce cahier technique, nous avons étendu le modèle existant dans le fichier nommé "Demo\_manual\_48\_init.gmk" par les saisies nécessaires à une analyse dynamique du séisme. Selon l'Eurocode 8, nous avons déterminé la classe de sol et généré un accélérogramme compatible avec le spectre de réponse. Sur la base de l'analyse des modes propres et des fréquences propres, nous avons choisi la première fréquence propre comme fréquence la moins amortie.

Les résultats de l'analyse dynamique montrent une évolution significative des régions plastiques autour du tunnel et une augmentation du moment de flexion maximal de 32,1 kNm (le moment maximal avant séisme situé sur les côtés du tube du tunnel) à 60,2 kNm (le moment maximal à la fin de l'analyse dynamique située au sommet du tunnel). Le moment de flexion maximal pendant le séisme était de 72,5 kNm.