

# COMPORTEMENT MECANIQUE DES MURS DE SOUTÈNEMENT T-WALL®

## MECHANICAL BEHAVIOUR OF T-WALL® RETAINING WALL

Xuan-Phu NGUYEN<sup>1</sup>, Marco CAMUSSO<sup>1</sup>, Daniel BILLAUX<sup>1</sup>, Yassin BENNANI-BRAOULI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ITASCA Consultants S.A.S., Écully, France

<sup>2</sup> Terre Armée, Rueil Malmaison, France

**RÉSUMÉ** – L'interaction sol/structure dans les murs de soutènement de type T-Wall®, développés par Terre Armée, est modélisée en utilisant le logiciel de calcul aux différences finies *FLAC3D*. Le mur se compose de différentes colonnes avoisinantes, constituées de la superposition de modules en béton en forme de « T », avec une face rectangulaire à l'avant reliée à une poutre à l'arrière. L'élévation du mur procède par phases alternées : pose d'un module pour l'ensemble des colonnes, puis remplissage des espaces entre les poutres et derrière le mur par un remblai granulaire. Ces phases sont répétées jusqu'à atteindre la hauteur souhaitée.

Cet article présente quelques résultats pour la configuration de mur dite standard, dans laquelle les longueurs des poutres des différents modules diminuent en allant de la base à la sommité du mur. L'objectif étant d'optimiser la configuration des modules, le béton est considéré élastique, afin de récupérer les efforts maximaux développés dans les modules. Des éléments d'interface simulent les interactions entre les modules, ainsi qu'entre ces modules et le sol. La fondation et les remblais sont représentés par un modèle élastoplastique de type Mohr-Coulomb.

Les résultats montrent deux zones de cisaillement principales : 2 familles de bandes dans le remblai à l'arrière du mur, et une bande dans la fondation sous les faces des modules, due à la poussée horizontale du remblai. Cette poussée provoque également des contraintes de compression dans le béton à proximité des plaques en néoprène - les seuls points de contact entre les modules superposés, et des contraintes de traction à la jonction entre la face et la poutre, plus fortes pour les unités inférieures. Ces contraintes restent néanmoins dans une zone de fonctionnement admissible. Par ailleurs, l'étude permet d'observer que les clés de cisaillement, introduites entre les modules d'une colonne pour solidariser leurs déplacements, ne sont pas sollicitées.

**ABSTRACT** – Soil/structure interaction in T-Wall® retaining walls, developed by Terre Armée, is modelled using the finite difference software *FLAC3D*. The wall is composed of different neighbouring columns, made up of superimposed T-shaped concrete panels, each one consisting of a rectangular face - to retain the ground - and a stem at the back. Wall construction is carried out by firstly installing a level of wall panels, then by filling the space between and behind the stems by a granular fill. These two phases are repeated until reaching the desired height.

This article presents some results for the so-called "standard" configuration, in which stem length decreases progressively from bottom panel to upper levels. The foundation and the backfill are represented by an elastoplastic Mohr-Coulomb model, whereas concrete elements are supposed elastic in order to recover maximum stress resultants for wall design purposes. The results show two main shear zones: 2 shear band sets in the backfill behind the stems, and a shear band in the foundation under the wall faces, due to horizontal loading by backfills. These horizontal stresses induce compressive stresses in concrete zones near neoprene plates – the only contact points between panels, and tensile stresses at the face-stem junction, higher for lower units. The stresses remain below the elastic limit. In addition, the results show that the shear keys introduced between stems are not stressed, the relative horizontal and vertical displacements between stems remaining less than the key/panel gap thickness.

## 1. Introduction

T-Wall® est un type de murs de soutènement à contrefort développé par Terre-Armée. Il est constitué d'unités en béton préfabriqué, en forme de « T » qui s'empilent (Figure 1), comprenant une face frontale permettant de retenir le sol et une poutre dentelée à l'arrière.

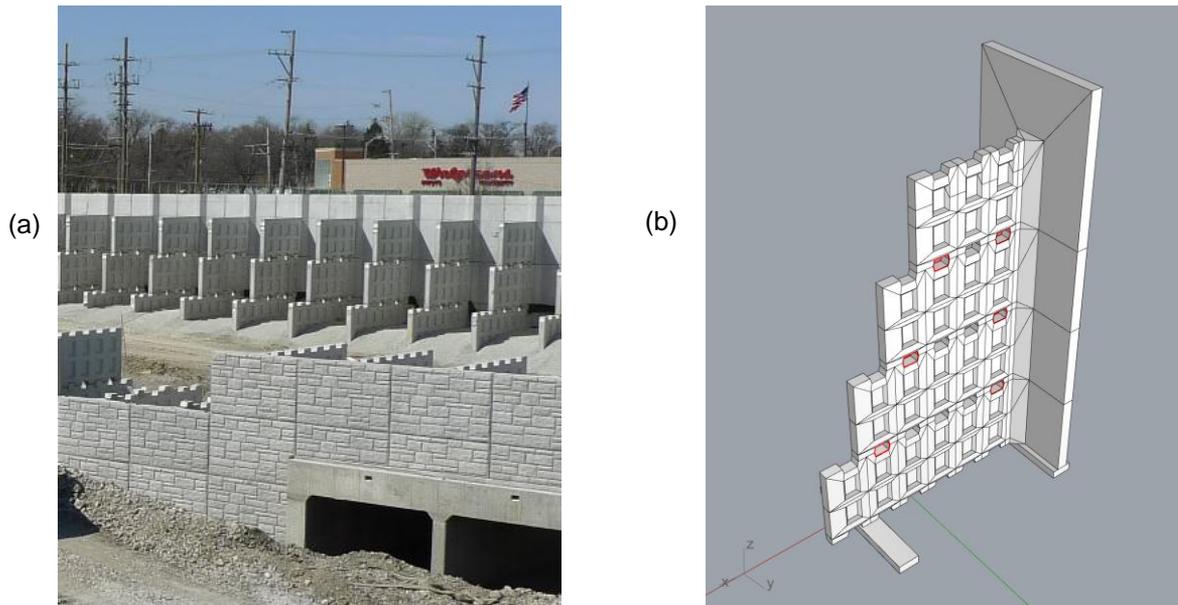


Figure 1. Exemple d'application (a) et constitution (b) d'un module standard de T-Wall

Plusieurs configurations de mur sont simulées avec le logiciel *FLAC3D* (code de calcul aux différences finies développé par Itasca) afin d'optimiser la conception du système en termes de stabilité globale et d'efforts développés dans le béton. Cet article présente les analyses d'une configuration dite « standard ». Après simulation des étapes de construction, le facteur de sécurité *FS* est évalué suivant la méthode de réduction des paramètres de résistance du critère de Mohr-Coulomb, *c* et  $\phi$ .

## 2. Description du mur T-Wall®

Un bloc de mur T-Wall® standard (Figure 1) consiste en 4 unités superposées, posées sur 2 plaques de nivellement enfouillées dans la fondation. Chaque unité comporte une plaque de face et une poutre à l'arrière, qui est dentelée et gaufree afin de favoriser l'interaction avec le sol. Le contact entre les unités superposées est assuré par l'introduction de plaques en néoprène (Figure 2), 2 le long de la poutre et 2 au niveau de la face frontale. Des clés de cisaillement introduites dans les entailles de la poutre (entailles en rouge sur la Figure 1b) permettent de solidariser les mouvements de l'ensemble de la structure. Cette conception vise à séparer le transfert des efforts entre les unités en deux composantes : la composante verticale à travers les plaques néoprène, et la composante horizontale via les clés de cisaillement. Un jeu initial est présent entre la poutre et la partie supérieure de la clé, ce qui permet d'éviter leur chargement vertical. Le même jeu est aussi présent entre les parties latérales de la clé et la poutre.

**RUBBER BLOCKS NOTES:**

1. FOUR NEOPRENE BLOCKS ARE TO BE PLACED AS SHOWN BELOW:

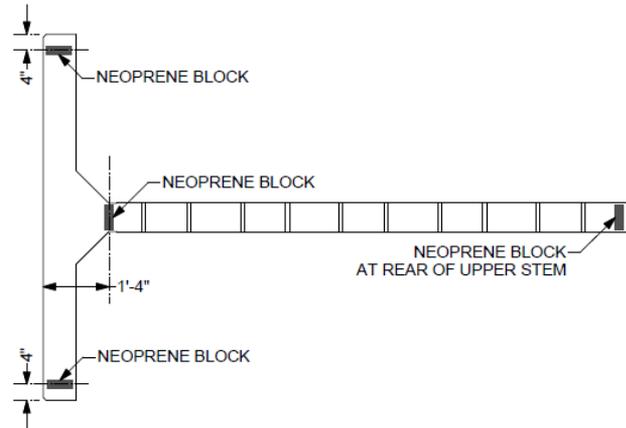


Figure 2. Positionnement des plaques néoprène entre unités superposées

Étant donné la symétrie de chaque unité de mur par rapport à l'axe de la poutre, seule une moitié de l'unité est représentée. Ainsi, le modèle s'étend entre l'axe d'une poutre et le plan équidistant entre deux poutres adjacentes, soit une épaisseur de 3'-9" (1,143 m) (Figure 3). Les surfaces supérieures du sol de fondation et du remblai sont libres tandis que les déplacements normaux aux autres surfaces du modèle sont bloqués (condition de symétrie). Par ailleurs, la surface latérale de la plaque frontale du mur est libre, ce qui permet de simuler l'absence d'une interaction directe entre deux colonnes de mur adjacentes.

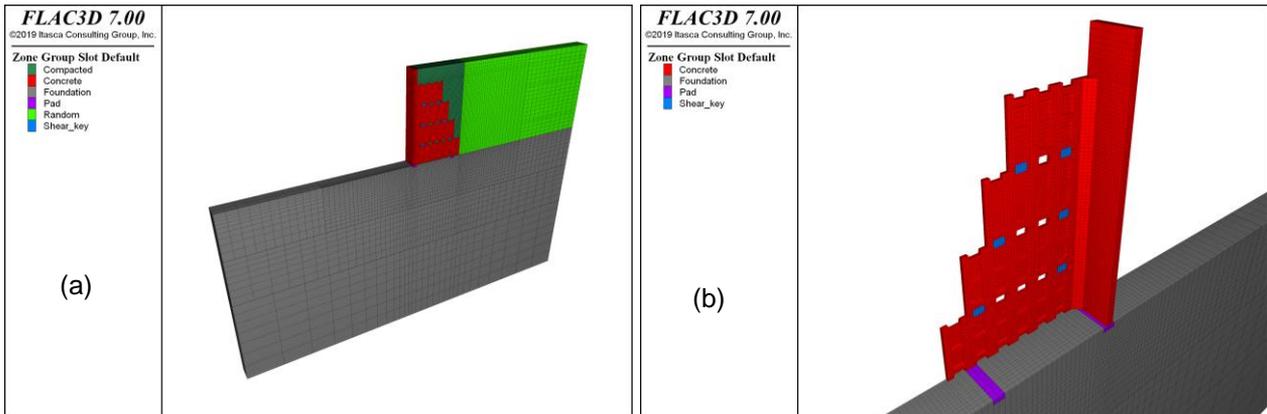


Figure 3. Maillage du modèle complet (a) et sans les remblais (b)

### 3. Matériaux et interfaces

Les propriétés utilisées pour les matériaux sont données en Tableau 1. Le béton est représenté par un modèle élastique, la fondation et les remblais par un modèle élastoplastique parfait avec un critère de Mohr-Coulomb.

Tableau 1. Propriétés des matériaux

Matériau	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$ (-)	c (kPa)	$\phi$ (°)	$\psi$ (°)
Béton	2,4	20000	0,2	-	-	-
Remblai compacté	2,0	70	0,3	0	36	6
Remblai aléatoire	1,8	50	0,3	0	30	0
Fondation	1,9	90	0,3	10	36	6
Plaques néoprène	-	25	0,5	-	-	-

Les différentes interactions entre matériaux sont modélisées avec des éléments d'interface de *FLAC3D*. Environ 40 interfaces au total sont créées entre les unités du mur, les clés de cisaillement, les remblais, la fondation et les plaques de nivellement (Figure 4a).

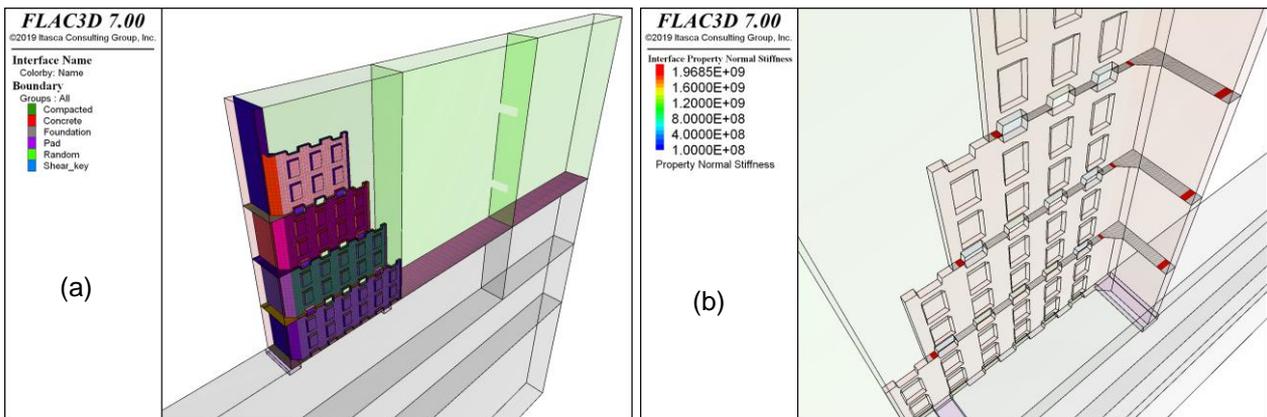


Figure 4. Interfaces du modèle : Géométrie (a) ; Rigidités initiales des interfaces entre unités via plaques néoprènes (rouge, de 2 GPa/m), entre unités à l'extérieur des plaques néoprènes, et entre clés de cisaillement et poutres (grise, de 2 kPa/m) (b)

Les plaques néoprène ne sont pas modélisées explicitement par des éléments volumiques, mais par des éléments d'interface de rigidité variable (Figure 4b). Tant que l'interpénétration de l'interface est inférieure à l'épaisseur de la plaque, la raideur de l'interface correspond aux propriétés du néoprène (Tableau 1 : 2GPa/m, dans la direction normale et en cisaillement). Quand elle dépasse cette épaisseur (écrasement de la plaque), la rigidité est augmentée de manière à reproduire un contact béton/béton. Cette rigidité est déduite des propriétés du béton (Tableau 1).

Une logique similaire est adoptée pour les interfaces entre les unités, et entre les clés de cisaillement et les poutres. En effet, les blocs superposés ne sont initialement en contact qu'à travers les plaques en néoprène, et sont donc espacés de l'épaisseur des plaques. De même, les clés de cisaillement sont légèrement plus petites que les entailles des poutres. Dans le modèle, ces espaces vides ne sont pas physiquement représentés, et ces éléments se touchent via des interfaces, dont la rigidité initiale est fixée à une valeur faible (Figure 4b :  $k_{n,s} = 2\text{kPa/m}$ , soit  $10^6$  fois plus petite que la raideur au niveau des plaques en néoprène). Quand l'interpénétration d'une interface atteint l'épaisseur du jeu correspondant, sa rigidité est modifiée pour modéliser un contact béton/béton.

#### 4. Résultats

La Figure 5 montre l'évolution de la force verticale sous l'unité inférieure avec l'avancement de la construction du mur. Les niveaux 1 à 4 indiqués en abscisse correspondent à la pose progressive des 4 unités superposées, puis le niveau 5 au remblayage au dessus de la poutre de l'unité supérieure. Comme le modèle ne reproduit que la moitié de l'unité, les forces d'interaction lues dans le modèle sont multipliées par un facteur 2. Elles représentent ainsi la force totale verticale échangée par l'unité inférieure avec la fondation. On observe que plus de la moitié de la force verticale est transférée sur la plaque de nivellement avant (située sous la partie frontale des unités), dès la mise en place de l'unité inférieure, et que ce rapport augmente lors de la construction du mur. La force transférée directement par l'unité inférieure sur la fondation reste faible. De plus, la somme des forces verticales sous l'unité inférieure est largement supérieure, de 2 à 4 fois, au poids total des unités installées (Figure 5b), et ce rapport augmente aussi avec la construction. Ceci est dû à deux actions : d'une part la poussée horizontale des remblais

vers la face frontale du mur, qui génère un moment de renversement de la structure avec une surcharge plus importante au niveau de la plaque de nivellement avant. D'autre part, l'interaction entre le sol et la surface gauffrée des poutres augmente la composante verticale des forces transmise *via* les unités.

**Forces verticales sous l'unité inférieure**

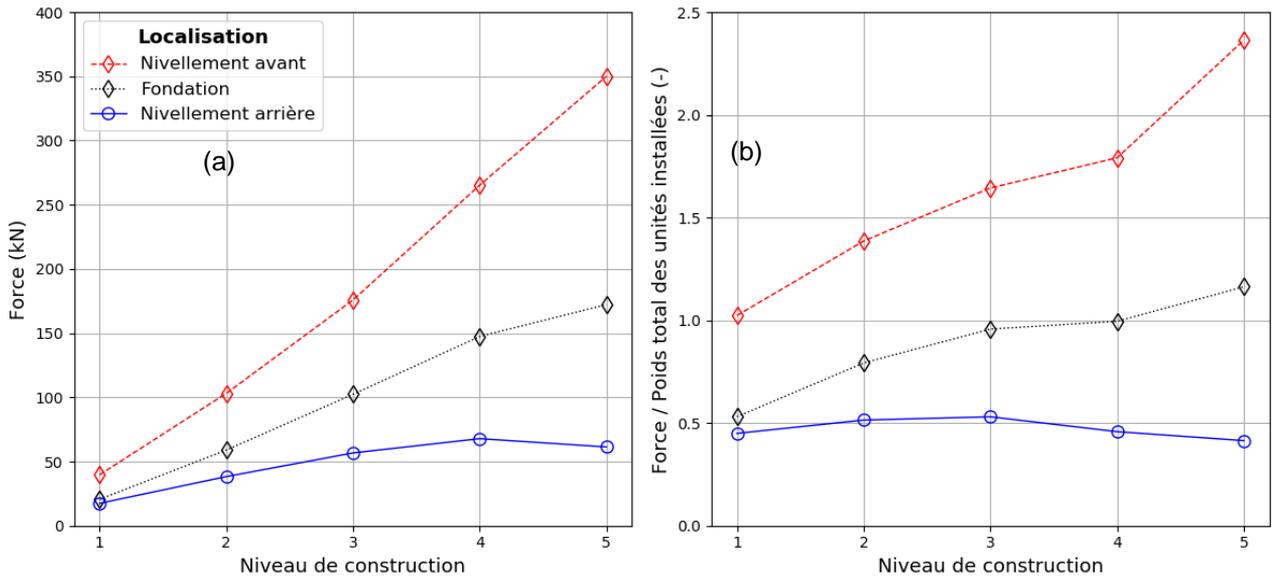


Figure 5. Distribution des forces verticales sous l'unité inférieure, en valeur absolue (a) et rapportées au poids total des unités (b)

La Figure 6 montre que les déplacements relatifs au niveau des interfaces entre unités et entre clés de cisaillement et poutres, sont d'ordre millimétrique, donc largement inférieures à l'épaisseur des plaques néoprènes et aux jeux entre les éléments de la structure. Les clés de cisaillement ne jouent donc aucun rôle mécanique et les contacts entre les unités se font uniquement via les plaques néoprènes : il n'y a pas d'interaction béton/béton.

Le bilan des forces transférées par une unité sur l'unité sous-jacente, via les 3 plaques néoprènes, ainsi que son évolution avec la construction, sont présentés sur la Figure 7. Pour les plaques situées le long de l'axe de la poutre (plaques « à l'angle » et « arrière »), la force lue dans le modèle est multipliée par 2. La valeur indiquée représente donc la poutre complète. La force verticale sur la plaque néoprène latérale est plus grande que celles sur les 2 autres plaques. Notons que pour le 5<sup>e</sup> niveau de construction aucune nouvelle pose d'unité de mur est effectuée. Malgré cela, la force verticale sur la plaque latérale augmente autant que pour le 4<sup>e</sup> niveau (pose de la 4<sup>e</sup> unité).

Les forces horizontales (orientées le long de l'axe de la poutre) de la 2<sup>e</sup> unité sur l'unité inférieure s'orientent logiquement de l'arrière vers l'avant (Figure 7b) et restent similaires pour les trois plaques tout au long de la construction du mur.

Dans le mur, on observe logiquement une compression plus importante à proximité des plaques néoprènes, surtout les latérales (Figure 8a), et des contraintes de traction plus grandes aux jonctions face – poutre (Figure 8b). Naturellement, ces contraintes augmentent en descendant vers les unités inférieures.

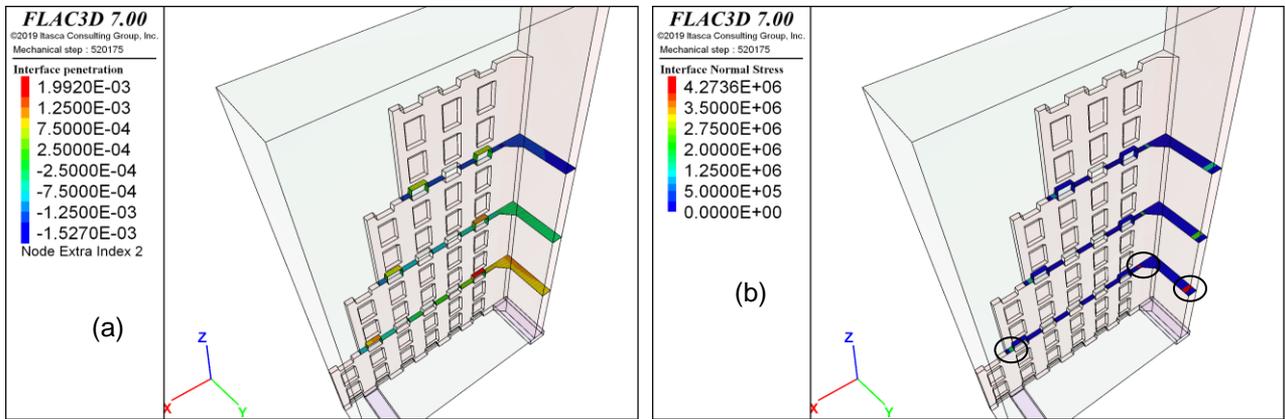


Figure 6. Pénétration (a) et contrainte normale (b) sur les interfaces entre les unités et les clés de cisaillement

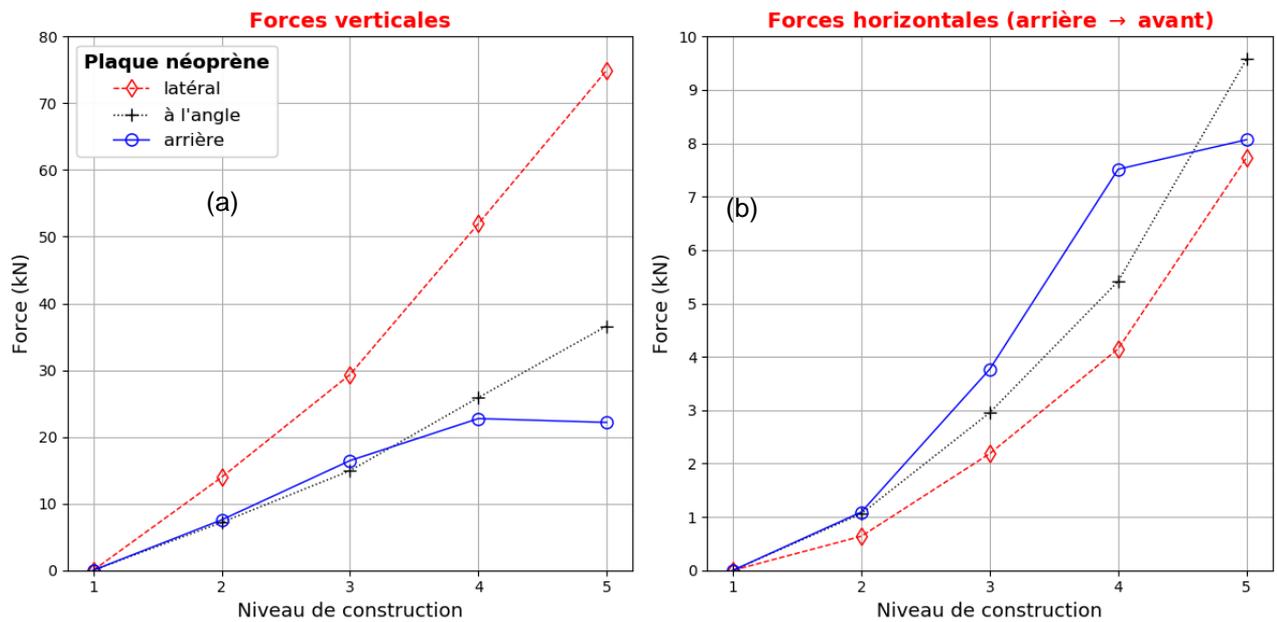


Figure 7. Evolution des forces verticales (a) et horizontales (b) s'appliquant sur l'unité inférieure via les plaques néoprènes, entourées sur la Figure 6b

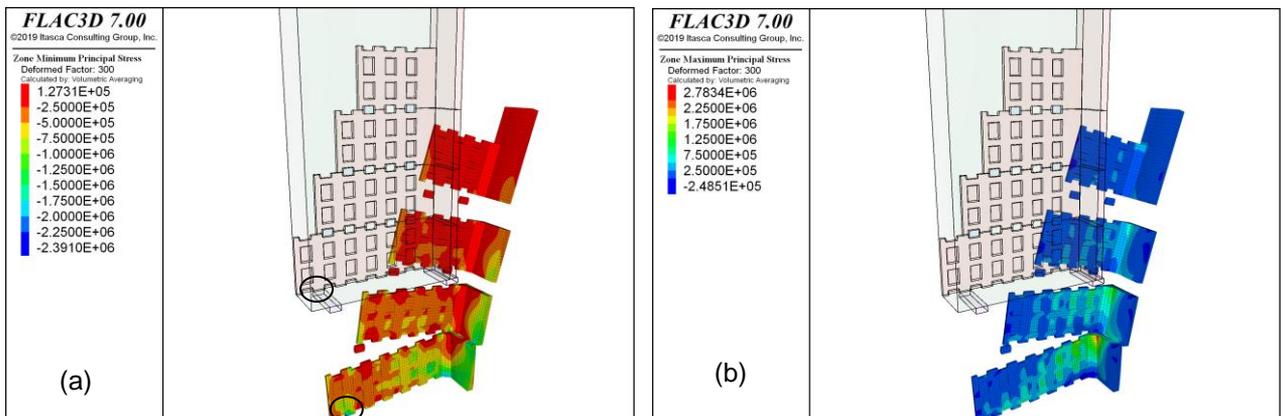


Figure 8. Contraintes principales mineure (la plus compressive - a) et majeure (la moins compressive - b) dans les unités à la fin de la construction. Facteur d'exagération des déplacements = 300

Le déplacement vertical accumulé à la fin de la construction (Figure 9a) montre que l'unité inférieure tasse plus vers l'arrière, ce qui semble contredire l'analyse des forces transférées sur les plaques de nivellement. En effet, comme le montre la Figure 5, la force

verticale est nettement plus importante sur la plaque avant, située sous les faces frontales du mur. Ce résultat est cependant logique et il s'explique par le tassement du sol de fondation sous le poids du remblai, avec des valeurs plus fortes à l'arrière du mur (Figure 9b). Ainsi, le tassement différentiel de la fondation domine celui des plaques de nivellement.

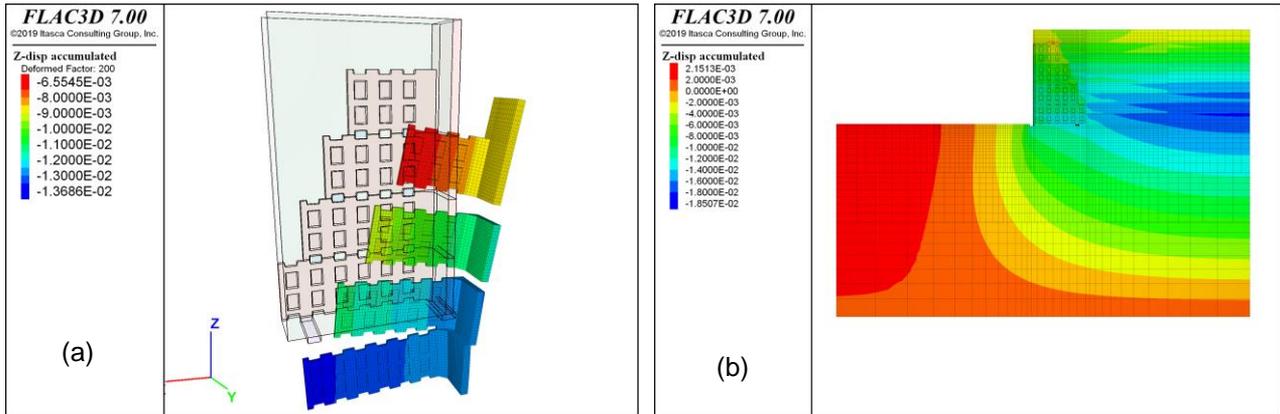


Figure 9. Déplacement vertical cumulé lors de la phase de construction, au niveau des unités (a - déformée exagérée 200 fois), des remblais et de la fondation (b)

L'essentiel de la plasticité en cisaillement a lieu dans les remblais à l'arrière du mur, dans la fondation sous-jacente, et à l'avant du mur (Figure 10a). Dans les remblais, 2 familles de bandes de plastification sont observées : l'une suit les limites arrière des poutres (pendage vers l'arrière), et l'autre s'incline vers l'avant. Les plus grandes déformations de cisaillement se trouvent dans les remblais à l'arrière des poutres, et dans la fondation à l'avant de la plaque de nivellement (Figure 10b).

Le facteur de sécurité (FS) calculé avec la méthode de réduction de  $c$  et  $\phi$  est de 1,3. Les mécanismes de rupture illustrés sur la Figure 10 sont également observés, mais avec des amplitudes plus importantes. La rupture se produit alors à l'arrière du mur. En fin de calcul de FS, les pénétrations au niveau des interfaces béton/béton et clé de cisaillement/poutre restent inférieures aux épaisseurs des plaques néoprènes ou des jeux.

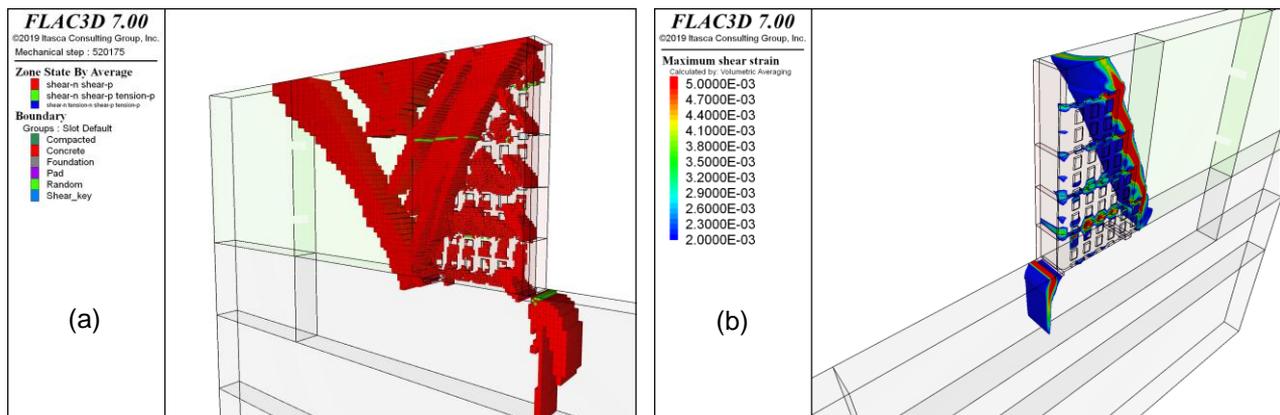


Figure 10. Plasticité (a) et déformation de cisaillement (b) entre 0,2 – 0,5 % à la fin de la construction

## 5. Conclusions

Les interactions dans un mur de soutènement de type T-Wall<sup>®</sup>, développé par Terre Armée, ont été étudiées pour la configuration standard, en utilisant le logiciel aux différences finies *FLAC3D*. Les mécanismes de rupture potentielle identifiés se produisent à l'extérieur du mur. Deux familles de bandes de cisaillement sont observées dans les remblais à l'arrière du mur. La poussée horizontale des remblais sur la face frontale du

mur provoque des forces verticales importantes sur la plaque de nivellement avant et provoque la plastification du sol de fondation situé à proximité de cette plaque. L'interaction entre les unités du mur se produit exclusivement via les plaques néoprènes. Les clés de cisaillement ne jouent aucun rôle mécanique, pour les propriétés considérées des matériaux. Ceci reste vrai à la fin du calcul du facteur de sécurité avec la méthode de réduction de  $c$  et  $\varphi$ . Les forces verticales transférées via les plaques néoprènes latérales (situées entre les panneaux frontaux) sont clairement plus importantes que celles transitant via les deux autres plaques néoprènes. Ceci engendre des contraintes de compression plus importantes aux extrémités latérales des faces du mur, et des contraintes de tractions maximales à la jonction entre la face frontale et l'élément poutre. Ces contraintes sont logiquement plus importantes en passant des unités supérieures vers les unités inférieures.