

**MINISTERE DE L'HABITAT ET DE L'URBANISME**  
**CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE APPLIQUEE EN GENIE**  
**PARASISMIQUE**

**C.G.S.**

---

---

**DEPARTEMENT : ALEA SISMIQUE**

**FICHE TECHNIQUE CANEVAS M.H.U**

**INTITULE DU PROJET DE RECHERCHE**

***Instabilité des murs de soutènement sous l'action d'un accélérogramme réel***

**Résumé**

**Fait par Mr Haderbache Lahlou**

**Code du projet : CGS/DAS/2021/02**

# 1- Influence des poussées des terres sur le mur de soutènement

Il est remarquable que tous les facteurs influençant la stabilité d'un mur de soutènement, laissent des traces indélébiles sur ses poussées des terres. Donc, une modélisation correcte des poussées des terres appliquées à un mur de soutènement entrainera inéluctablement une bonne estimation des stabilités du mur.

## 2-Méthode des équilibres limites (GLEM)

Il est bien connu que dans la méthode pseudo-statique, l'action sismique est ponctuelle. Exactement, cette action intervient (sous forme de coefficient d'accélération sismique) dans le coefficient des terres (voir équation 1).

$$\begin{cases} \sigma_2 = \sigma_1 K \pm 2C\sqrt{K} \\ \sigma_1 = \gamma h \end{cases} \quad 1$$

$\sigma_1, \sigma_2$ : sont, respectivement, les contraintes principales majeur et mineur,

$K$ : étant le coefficient de poussée (respectivement de butée) des terres,

$\gamma$  : la densité,

$C$ : étant la cohésion du sol

Le diagramme des contraintes (majeur et mineur) aura la forme suivante :

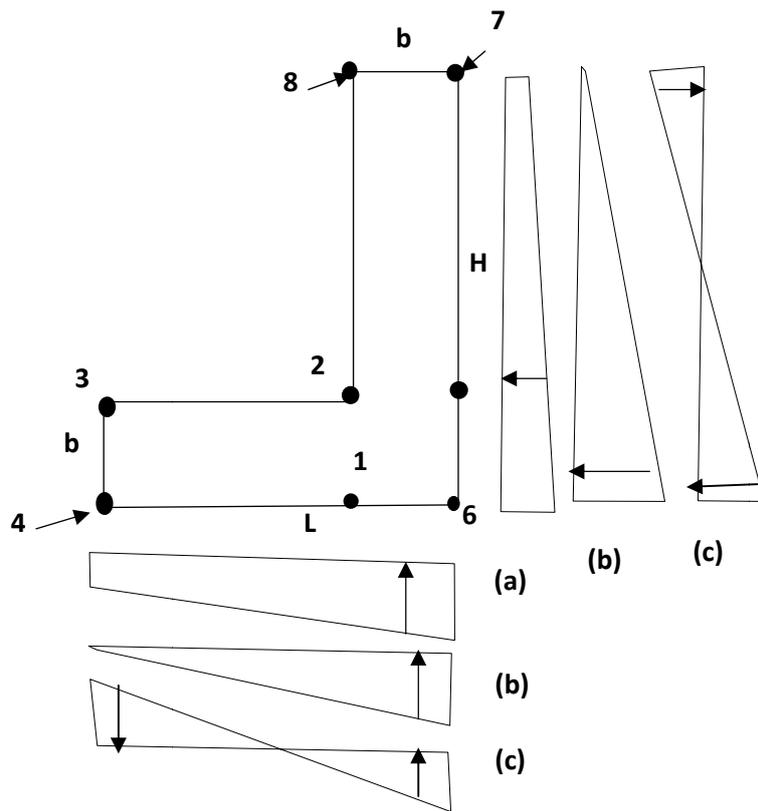


Fig 1 : Distribution des contraintes majeures et mineures sur le mur

Dans la GLEM classique, l'intégration des diagrammes de la figure 1, nous donne les forces derrière et à la base du mur et son poids :

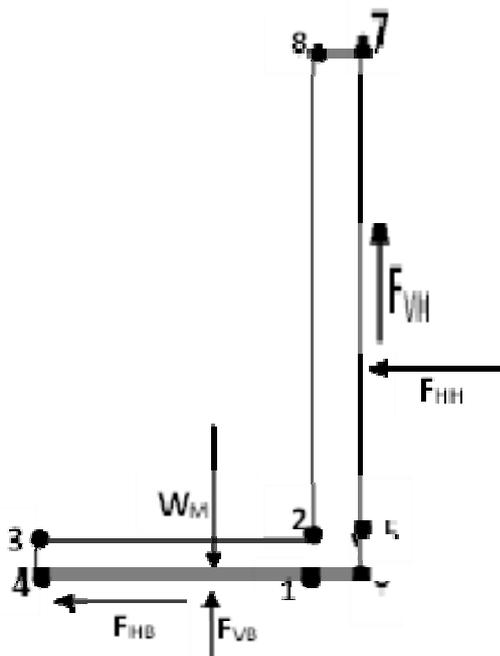


Fig 2 : Forces appliquée au mur

Les facteurs de sécurité qui en découlent sont les suivants :

$F_{S_g} = W_M / (F_{HB} + F_{HH})$  Fs pour le cas du glissement

$F_{S_p} = W_M / F_{VB}$  Fs pour le poinçonnement (ou bien par soulèvement)

$F_{S_R} = (W_M X_M + F_{HH} Y_{HH}) / (F_{VB} X_{VB})$  Fs dans le cas du renversement (Butée)

$F_{S_R} = (W_M X_M) / (F_{VB} X_{VB} + F_{HH} Y_{HH})$  Fs dans le cas du renversement (poussée)

### 3-Remarque importante

Un mur soumis à un accélérogramme réel ne donnera jamais une allure linéaire des contraintes montrées dans la figure 1. C'était l'intuition percussive de tout ce travail de recherche. Pourquoi ? Car, tout simplement, les accélérations (négatives et positives) formant l'accélérogramme tendent à jouer sur la ductilité du matériau auquel l'accéléro est appliqué. Donc, les contraintes qui en découlent n'auront probablement jamais la forme linéaire affichée par la GLEM classique de la figure 1.

### 4-Insufisance de la GLEM classique

La question de base qui se pose, pourquoi cette imprécision de la GLEM classique ? La réponse à cette question réside dans ses insuffisances. Aussi nous énumérons ces derniers.

- Dans le cas de la charge sismique (sous sa forme ponctuelle), l'amplification des grandeurs mécaniques du mur et du sol (surtout si ce dernier est très mou et/ou non linéairement prononcées) n'est pas prise en considération par la GLEM classique.
- Par contraste, la MEF ou sa formulation, dans les différentes parties du milieu continu, est assez puissante pour incorporer implicitement les variations apportées par ce phénomène d'amplification chère à la charge sismique, surtout dans le cas des milieux mous ou peu rigides et/ou non linéairement prononcés.
- La charge sismique sous forme d'accélérogramme réel n'est pas prise en considération. L'action sismique est plus réaliste avec les enregistrements sismiques que les valeurs ponctuelles des coefficients d'accéléérations sismiques.
- L'aspect semi infini du sol est complètement ignoré. La réflexion des ondes sismiques fauche une bonne estimation des outputs.
- Tous ces facteurs influencent implicitement et/ou explicitement les poussées des terres qui provoquent les différentes instabilités du mur.
- Ces facteurs ignorés dans la GLEM, laissent des traces indélébiles dans les contraintes des terres subies par le mur.
- Ceux-ci risquent de changer complètement le comportement du mur comparé au cas des diagrammes linéaires de ces contraintes de la GLEM classique.

*Enfin, le grand avantage de la GLEM classique, sa simplicité à estimer les stabilités du mur ou les FS.*

## 5- Concept de contraintes réelles et permanentes

- Nous pensons qu'à la fin du séisme, les contraintes du sol appliquées au mur seront stabilisées, donc considérées comme permanentes. Cet axiome tel qu'énoncé ici, nous paraît logique et le bon sens même. C'est ce qui reste quand tout est fini.
- Une fois le séisme terminé, les contraintes qui règnent dans le sol et dans le mur décident de la stabilité ou non du mur, car ces contraintes mémorisent tous les facteurs que la GLEM ignore en plus du fait qu'elles soient permanentes.
- Le choix des contraintes du sol au contact du mur est intéressant, car la formulation mathématique de la MEF est faite de manière que les informations d'un élément fini donné (respectivement nœud donné) du sol influencent inévitablement l'élément (respectivement le nœud) qui le juxtapose et appartenant au mur.
- La puissance de la formulation mathématique de la MEF, nous explique pourquoi le phénomène d'amplification du mouvement sismique fausse les résultats dans les contraintes « linéaire » de la GLEM classique. En effet, contrairement à la MEF, la GLEM classique occulte complètement les effets de ce phénomène sur la stabilité du mur.

## 6-Exemple et excitation sismiques réelles

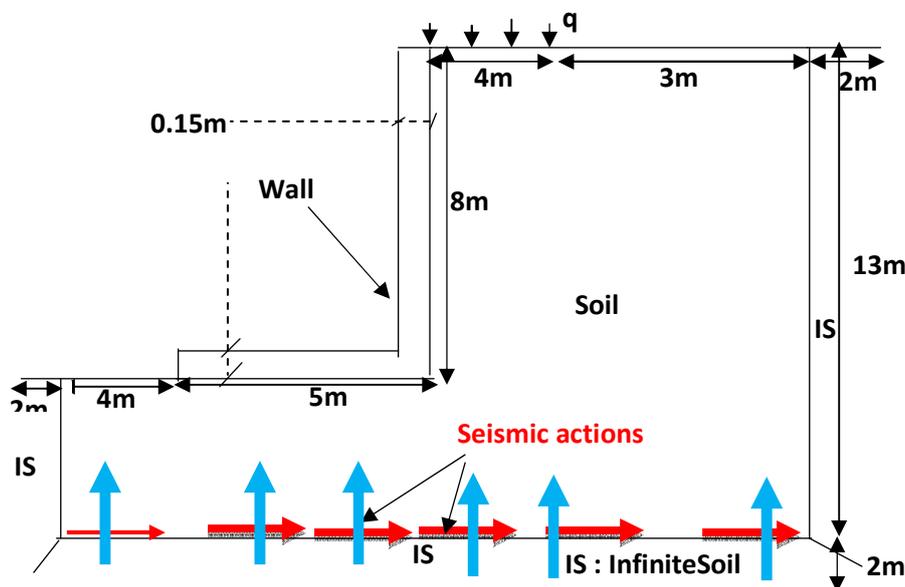


Fig 3 : Exemple utilisé dans Abaqus 2020

Les actions sismiques appliquées au mur sont ceux de Kheddara (Fig.4).

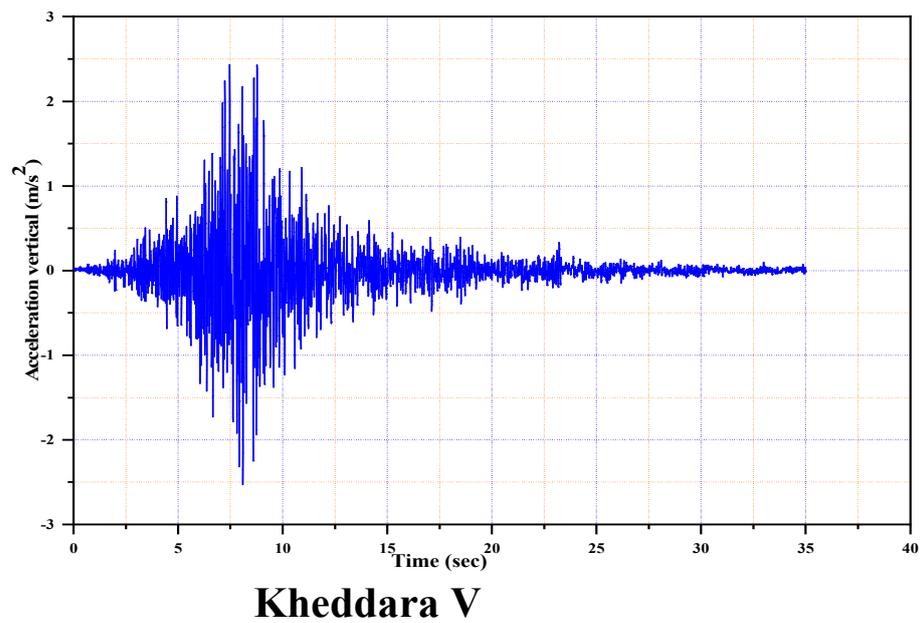
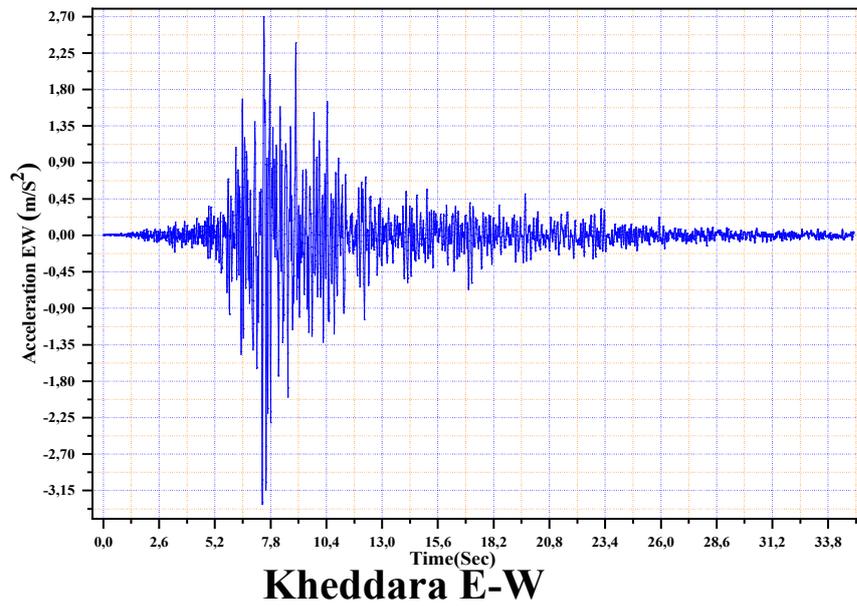


Fig 4 : Accéléros de Kheddara

La discrétisation est faite tel que donnée par la Fig.5 ci-dessous.

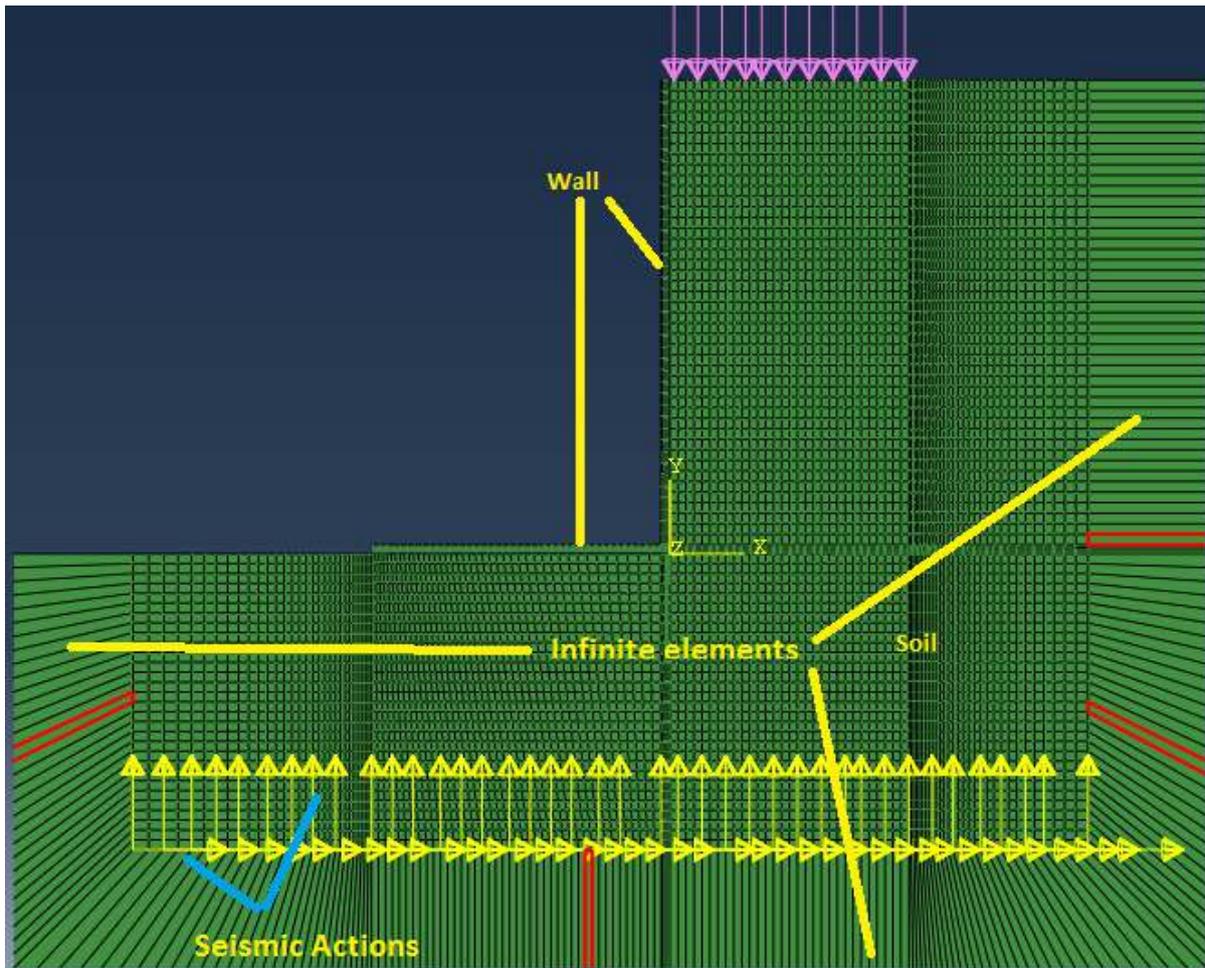


Fig5 Discrétisation faite par Abaqus 2020

Le sol et le mur travaillent non linéairement. Le sol semi infini travaille linéairement. Le mur et le sol travaillent en déformations planes. Le maillage du mur comporte 1001 nœuds et 900 éléments. Le nombre total de nœuds dans le cas du sol fini est de 7984 nœuds ayant deux degrés de liberté par nœud. Le nombre total d'éléments dans le sol fini est formé de 7500 éléments. Le sol infini est formé par 256 éléments. Le nombre d'itérations données par Abaqus est de : 4081 itérations. La surcharge surfacique  $q = 50 \text{ N/ml}$ . Les données matérielles utilisées sont données par :

Le model de Mohr Coulomb est utilisé dans le comportement non linéaire du sol et ayant les caractéristiques suivantes :

Angle de frottement :  $28^\circ$ , Angle de dilatation : 0.1, Déformation plastique absolue : 0, Contrainte de cohésion à l'écoulement : 5000 Pa et Coefficient de frottement sol mur: 0,3.

Tableau 1 : données matérielles du sol travaillant élastiquement

Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Module d'Young (Pa)	Coefficient de poisson
1600	20000000	0.35

Tableau 2 : Données matérielle du mur

Densité (Kg/m3)	Module d'Young (Pa)	Coefficient de poisson
2400	29500000000	0.2

Tableau 3 : Loi de comportement du béton en compression

Contrainte d'écoulement	Déformation inélastique
18200000	0
22100000	0.0004
24000000	0.0008
24500000	0.0012
23000000	0.002
21600000	0.0024
16600000	0.0036

Tableau 4 : Loi de comportement du béton en traction

Contrainte d'écoulement	Déformation de fissuration
2400000	0
1960000	0.0001
1500000	0.0003
1290000	0.0004
1080000	0.0005
723000	0,0008

Les résultats obtenus sont affichés ci-dessous :

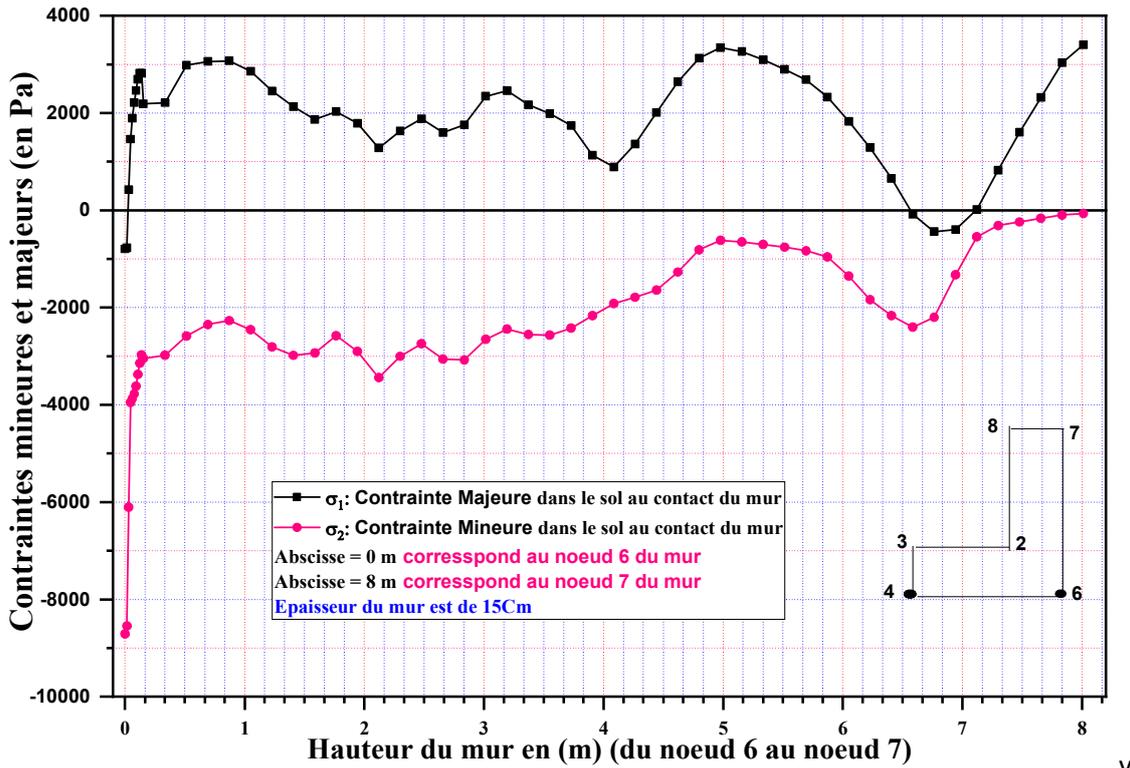


Fig 6 : Contraintes majeures et mineures sur la hauteur du mur

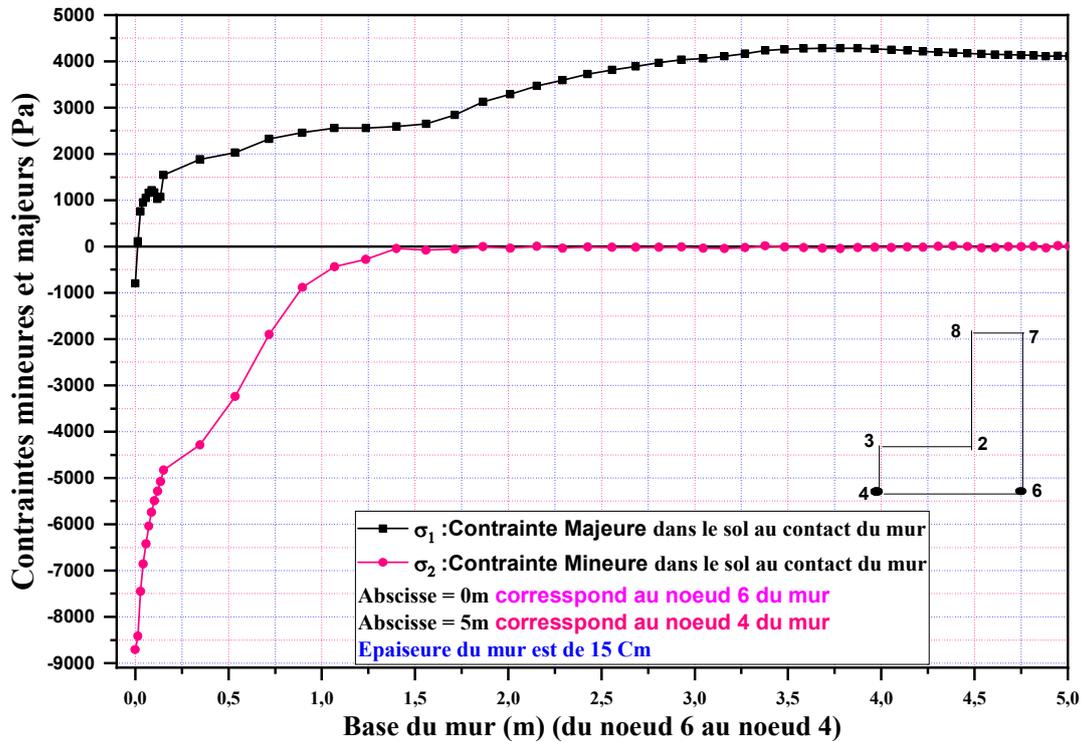


Fig7 : Contraintes majeures et mineures sur la base du mur

La non linéarité des courbes 6 et 7 exclue clairement la linéarité des contraintes majeures et mineures comme c'est le cas de la figure 1. Cela est raisonnable vu le fait que l'action sismique influence non linéairement le mur. Une intégration de ces contraintes nous donnera les forces

utilisée pour estimer les instabilités du mur. Celle-ci sont résumée ci-dessous avec leurs bras de levier.

$$F = \int \sigma dx(\text{ou } dy) = \sum \sigma dx(\text{ou } dy)$$

Tableau 5 : Résumé des efforts pour estimer les instabilités

$F_{HB}$ (N/ml)	$F_{VB}$ (N/ml)	$X_{VB}$ (m)	$F_{HH}$ (N/ml)	$Y_{HH}$ (m)
-3538,2126	16847,4916	2,0066	-15552,76612	3,17348

Tableau 6 : Caractéristique du poids du mur

$W_M$ (N/ml)	$X_M$ (m)
45 381,06 N/ml	3,98142

$F_{sg} = 2,377$      $F_{sp} = 2,694$      $F_{sr} = 2,172$

Le mur est stable vis à vis du Renversement ( $F_{sr}$ ), Poinçonnement ( $F_{sp}$ ) et du Glissement ( $F_{sg}$ ).

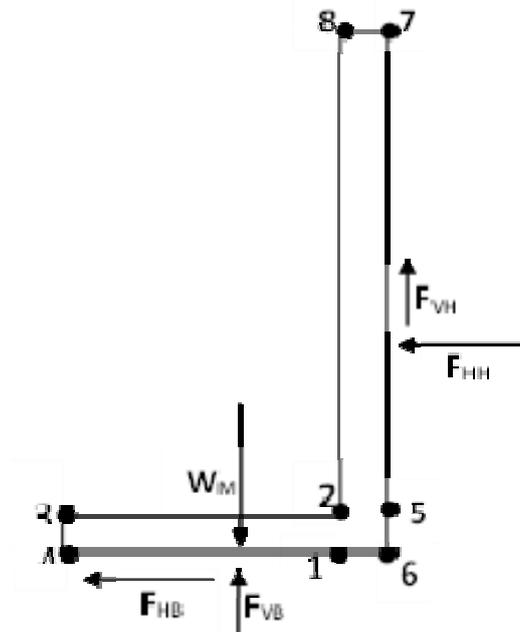


Fig8 : Forces appliquées au mur

## 7- Réponses aux questions soulevées

Ici un certain nombre de questions posées seront éclaircies.

- ✓ L'action sismique verticale est utilisée pour voir la stabilité du mur au poinçonnement (ou au soulèvement). On ne peut voir la stabilité au poinçonnement d'un mur sans une action verticale agissant sur sa base.

Il n'est pas raisonnable de dire que du moment que la hauteur du mur est de 8m les  $F_s$  sont exagérés. Et cela pour les raisons suivantes :

- ✓ La stabilité d'un mur ne peut être tributaire uniquement de sa hauteur ou de son épaisseur. Sa base est de 5m et d'autres problèmes tel que le sens d'application des charges sismiques, les dimensions des bases du mur, les caractéristiques mécaniques du mur et du sol, les conditions aux limites géométriques, les non linéarités des matériaux etc. jouent et contribuent à la stabilité du mur. Le plus important, est que dans le cas où réellement cette hauteur tend à rendre le mur instable, dans ce cas on aurait eu un mécanisme. Cela sous-entend que l'algorithme d'Abaqus n'aurait pas convergé et le programme se serait planté.

L'action sismique digne de ce nom ne peut que provoquer un comportement non linéaire dans les matériaux qui la subissent généralement. Un comportement linéaire d'un matériau sous une charge sismique veut dire tout simplement que la charge est dynamique non sismique.

La comparaison de cette méthode avec la GLEM classique est faite à travers ses diagrammes. Par ailleurs, même si cette comparaison est faite, cela ne veut absolument rien dire. Pourquoi ? Car, pour un sol relativement rigide, on peut aboutir à une validation donnée mais dans le cas d'un sol mou ou ayant un comportement non linéaire accentué cette comparaison passera à côté. L'amplification fera en sorte que la comparaison des deux approches n'est pas raisonnable. C'est comme si on fait courir un coureur du 10000 m avec son homologue du 100m dans une discipline du 5000m.

## 8- Conclusions

La stabilité d'un mur de soutènement sous l'effet d'un accélérogramme n'est point établie à notre connaissance. Ce modèle, tel qu'élaboré dans ce travail, est en réalité une amélioration de la GLEM classique.

La symbiose bénéfique entre la GLEM classique et la puissance de formulation de la MEF et sa capacité à brancher un accélérogramme réel dans sa formulation, l'aspect semi infini du sol, la non linéarité rhéologique du sol et/ou du mur etc., nous aideront à nous rapprocher de la réalité du comportement du mur.

Dans ce travail, l'idée assez simple de changer les contraintes classiques linéaires utilisées par la GLEM par celles données par la MEF, est très bénéfiques dans la mesure que les résultats seront optimisés en termes de précisions.

La méthode utilisée est la GLEM et les contraintes sont données par Abaqus 2020 (FEM).

Le concept de contraintes permanentes est pris en considération à la fin de l'application de la charge sismique. En effet, à la fin du séisme, ces contraintes seront stabilisées, donc permanentes.

Enfin, cette méthode est simple à utiliser, car les contraintes seront données par n'importe quel logiciel utilisant la MEF

En utilisant les équilibres des forces (et/ou moments) qu'on applique en rapport pour quantifier les stabilités du mur à travers ces  $F_s$ .

La GLEM tel qu'améliorée dans ce travail est plus précise car, elle tient compte de tous les insuffisance de la GLEM classique.