

**INSTITUT FRANCAIS
DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES
DES TRANSPORTS,
DE L'AMENAGEMENT
ET DES RESEAUX**

Fondations superficielles sous charge sismique

Youssef Abboud (IFSTTAR / EDF)

Sous la direction de:
Jean-François Semblat (IFSTTAR - GERS)
Sébastien Burlon (IFSTTAR - GERS)

**Journée Technique du CFMS
Paris le 05 Avril 2016**



IFSTTAR

Contenu de l'exposé

- **Contexte et problématique**
- Approche macroélément
- Calculs réalisés
- Conclusions et perspectives

Contexte et problématique

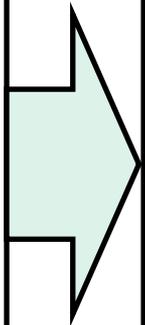
- Elaboration de méthodes de justification de fondations superficielles sous séisme
- Radiers de grande taille
- Niveaux de séisme élevés

Réévaluation de la sûreté nucléaire prenant en compte les retours de l'accident de Fukushima 2011



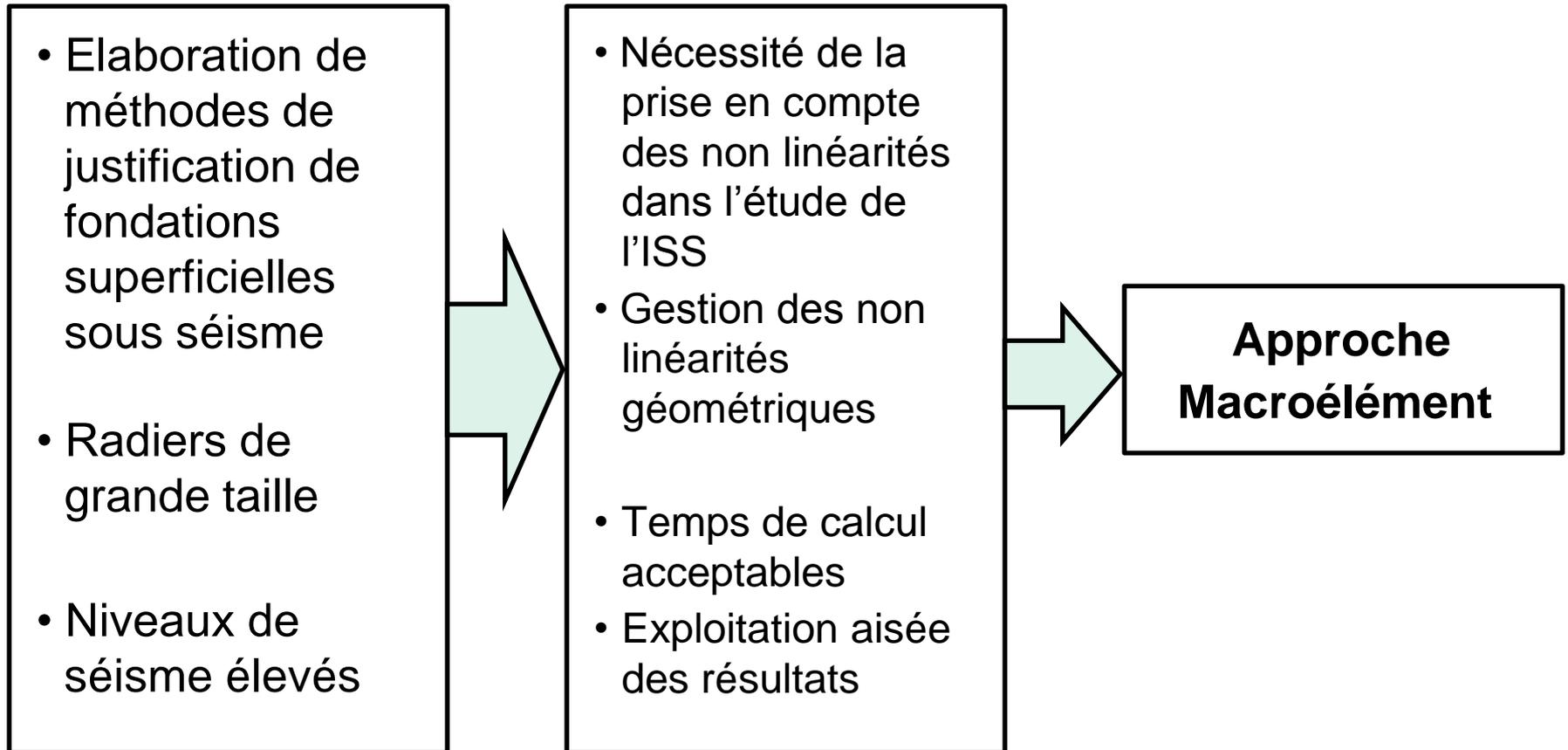
Contexte et problématique

- Elaboration de méthodes de justification de fondations superficielles sous séisme
- Radiers de grande taille
- Niveaux de séisme élevés



- Nécessité de la prise en compte des non linéarités dans l'étude de l'ISS
- Gestion des non linéarités géométriques
- Temps de calcul acceptables
- Exploitation aisée des résultats

Contexte et problématique



Contenu de l'exposé

- **Contexte et problématique**
- **Approche macroélément**
- **Calculs réalisés**
- **Conclusions et perspectives**

L'approche macroélément

- **Définition**

Le macroélément est un outil qui permet la prise en compte de l'ISS non linéaire en dynamique

L'approche macroélément

• Définition

Le macroélément est un outil qui permet la prise en compte de l'ISS non linéaire en dynamique

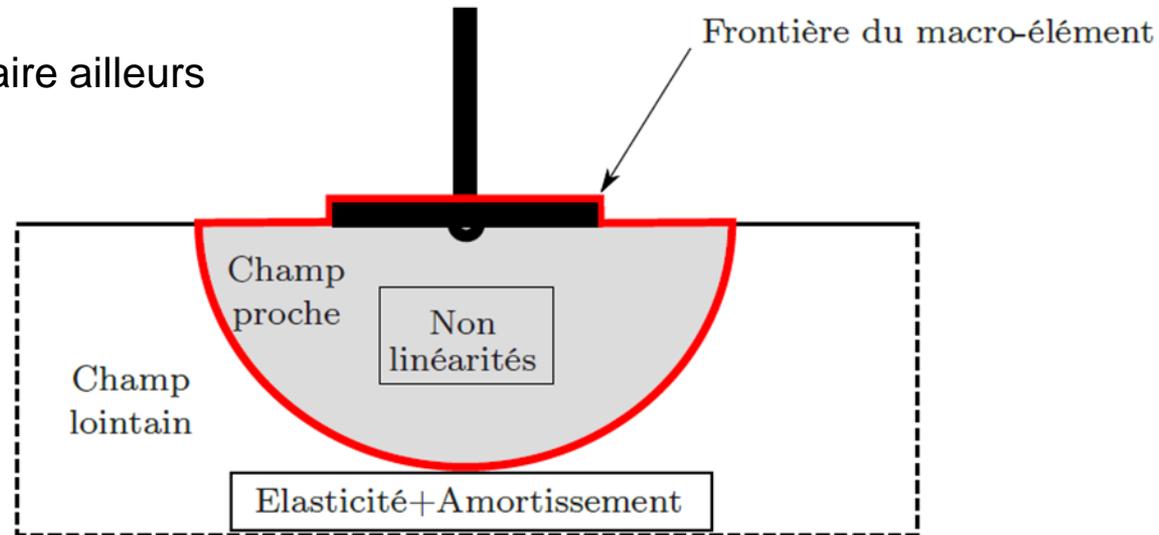
• Principe de base

Le principe de base consiste à concentrer les non linéarités matérielles (plasticité du sol) et géométriques (décollement, glissement) en des points particuliers.

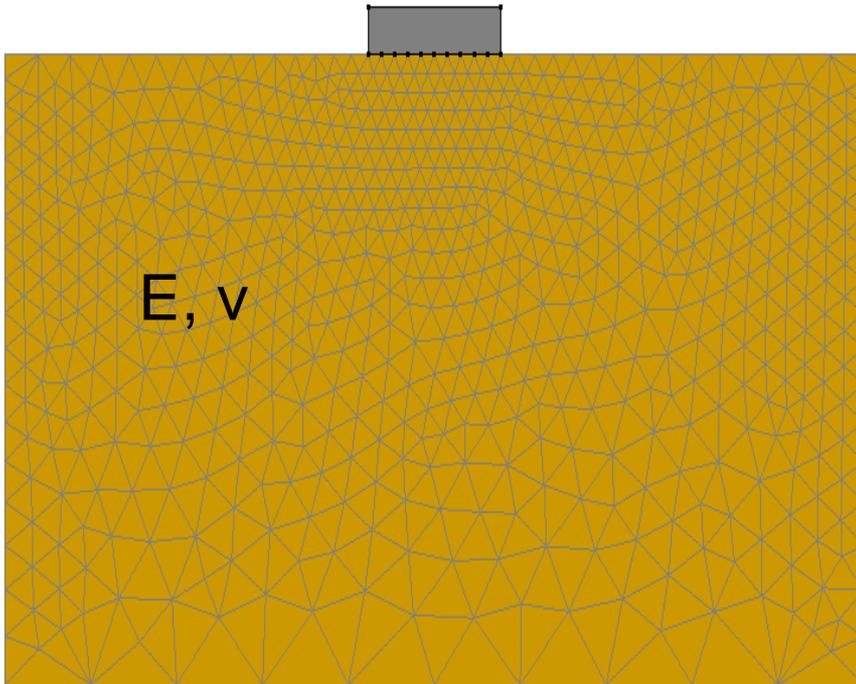
Le comportement est supposé linéaire ailleurs

... dans la littérature:

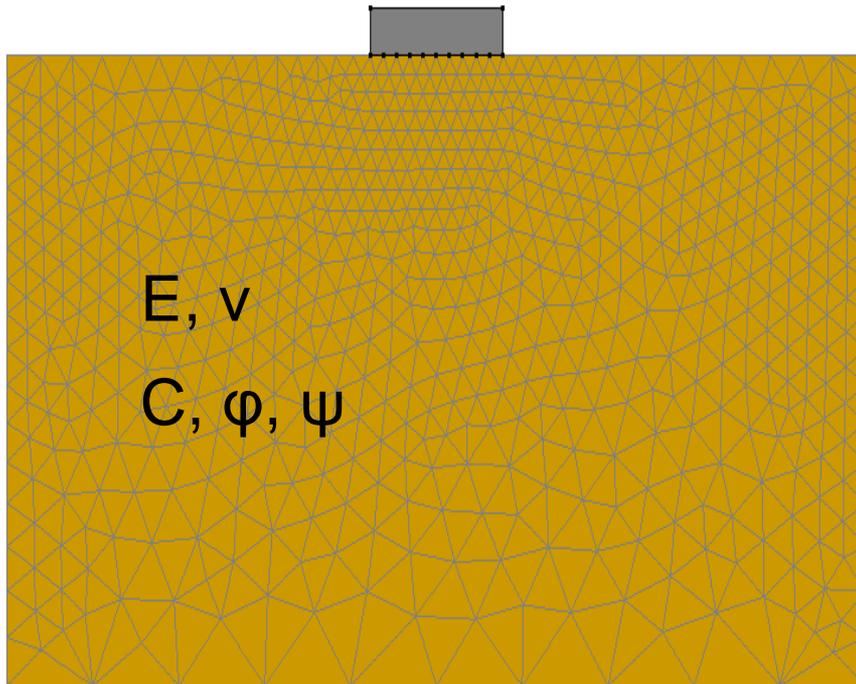
- Nova et Montrasio 1991
- Crémer 2001
- Chatzigogos 2007
- Grange 2008
- Zheng Li 2014



Simulation EF



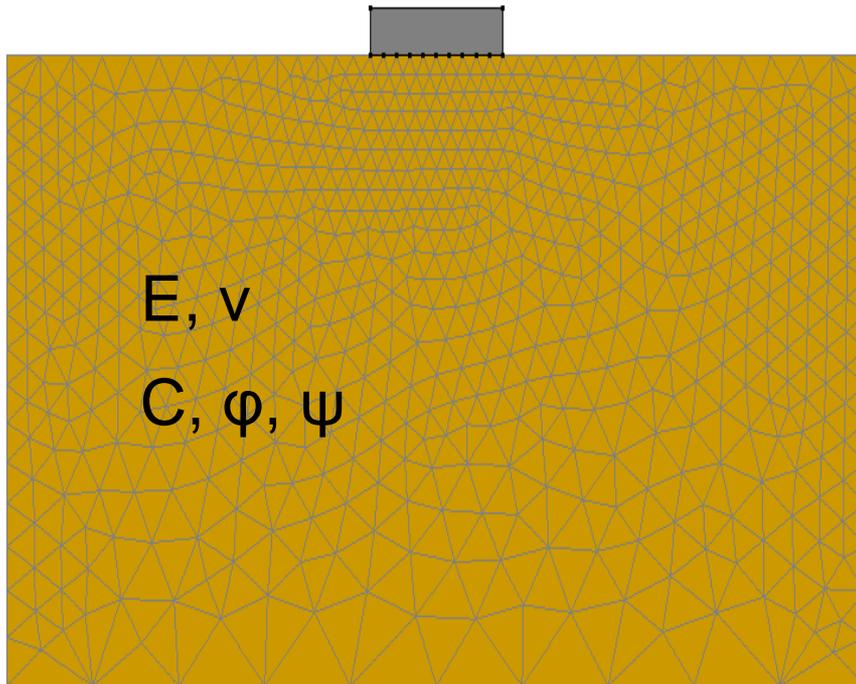
Simulation EF



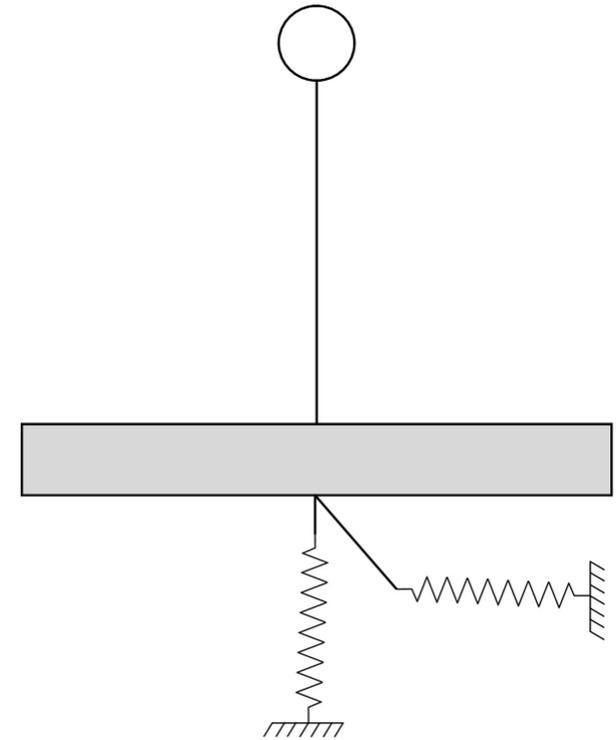
Simulation du comportement
non linéaire

Développement d'un macroélément

Simulation EF



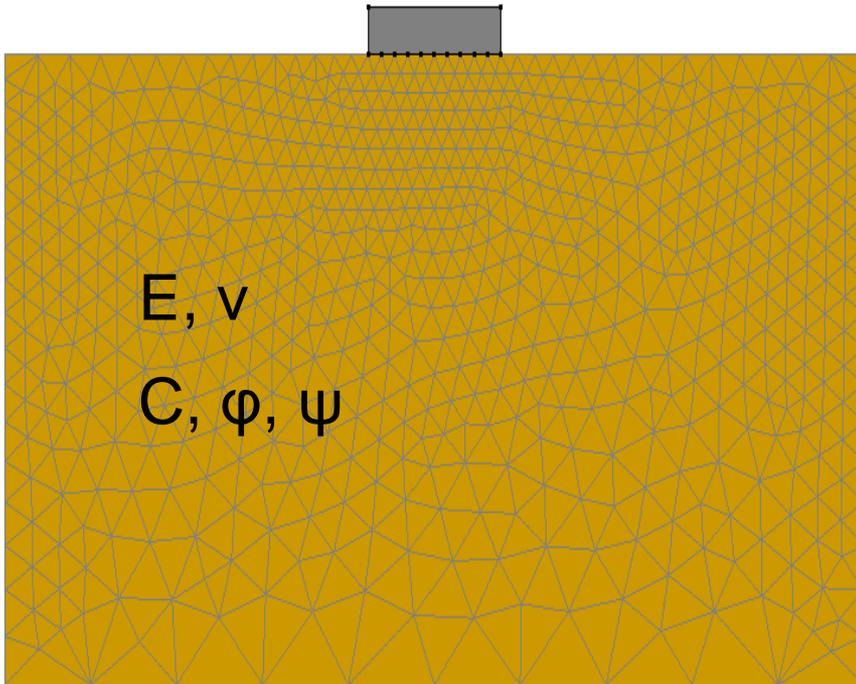
Macroélément



Simulation du comportement
non linéaire

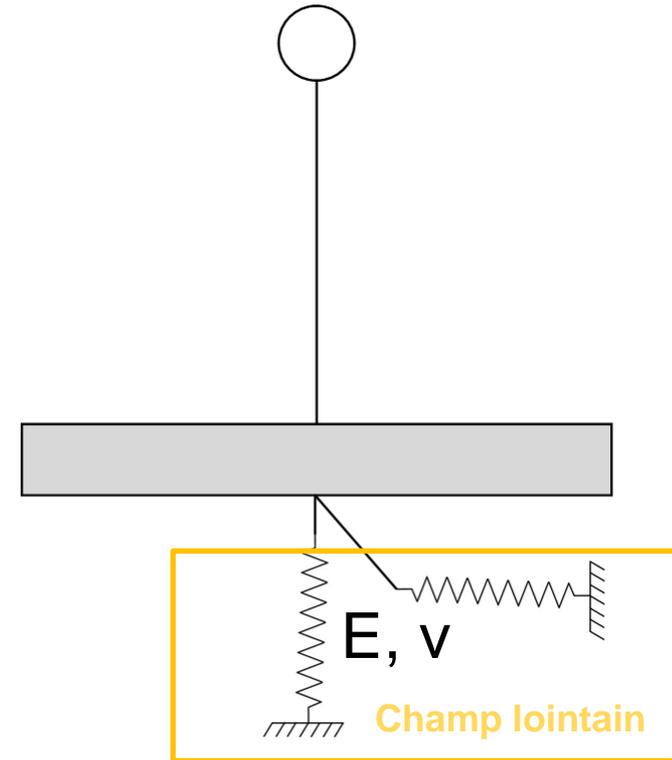
Développement d'un macroélément

Simulation EF



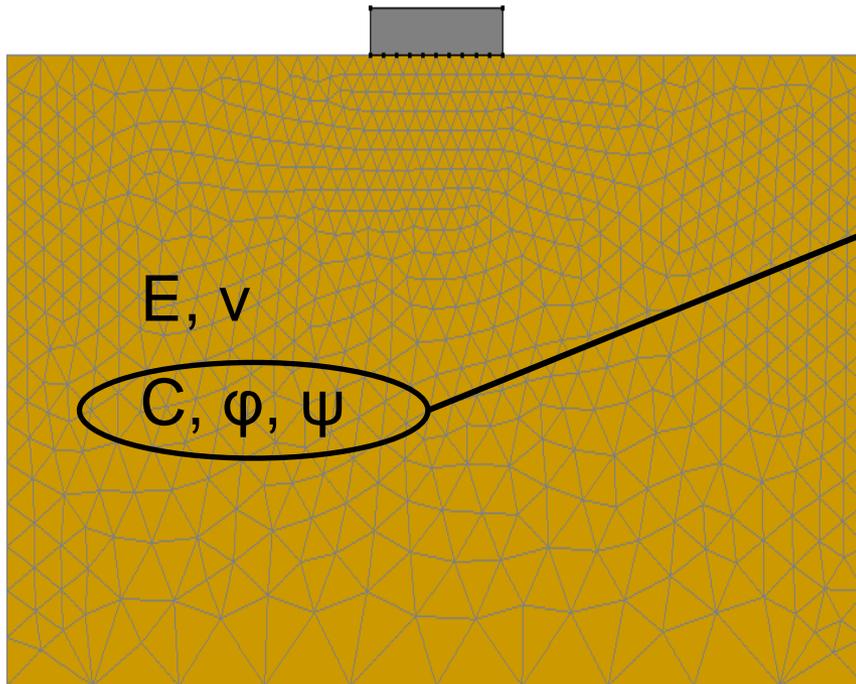
Simulation du comportement non linéaire

Macroélément



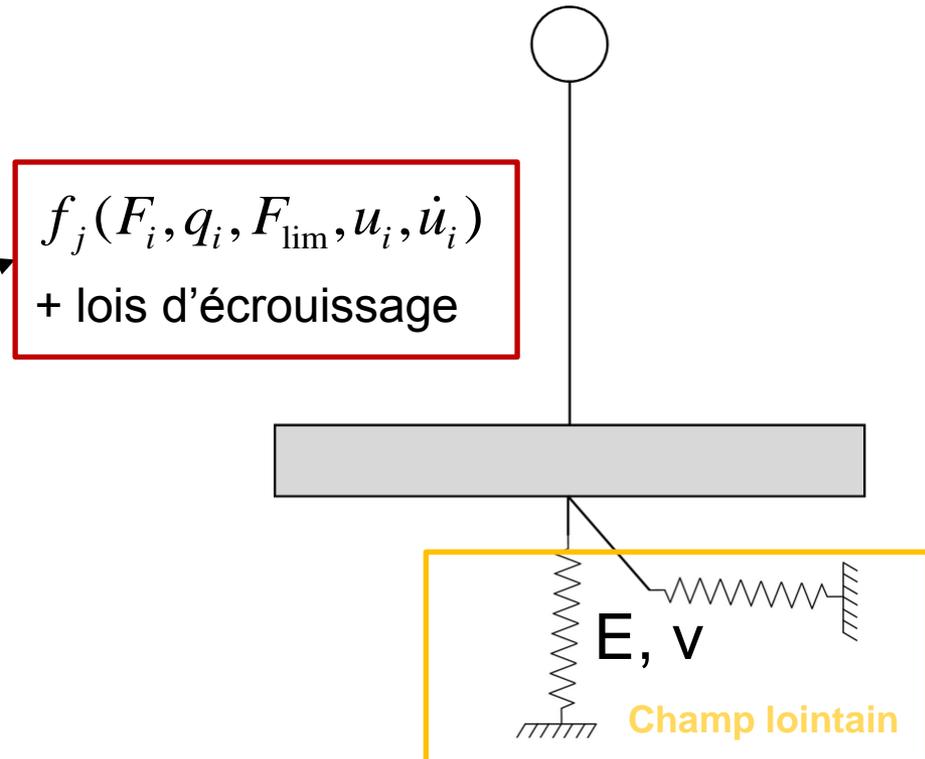
Sol élastique

Simulation EF



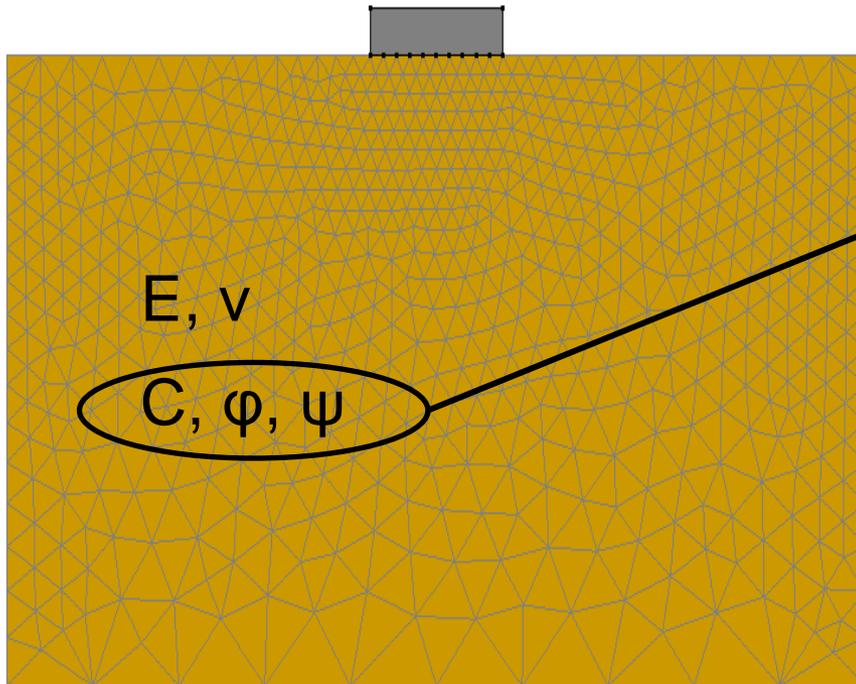
Simulation du comportement non linéaire

Macroélément



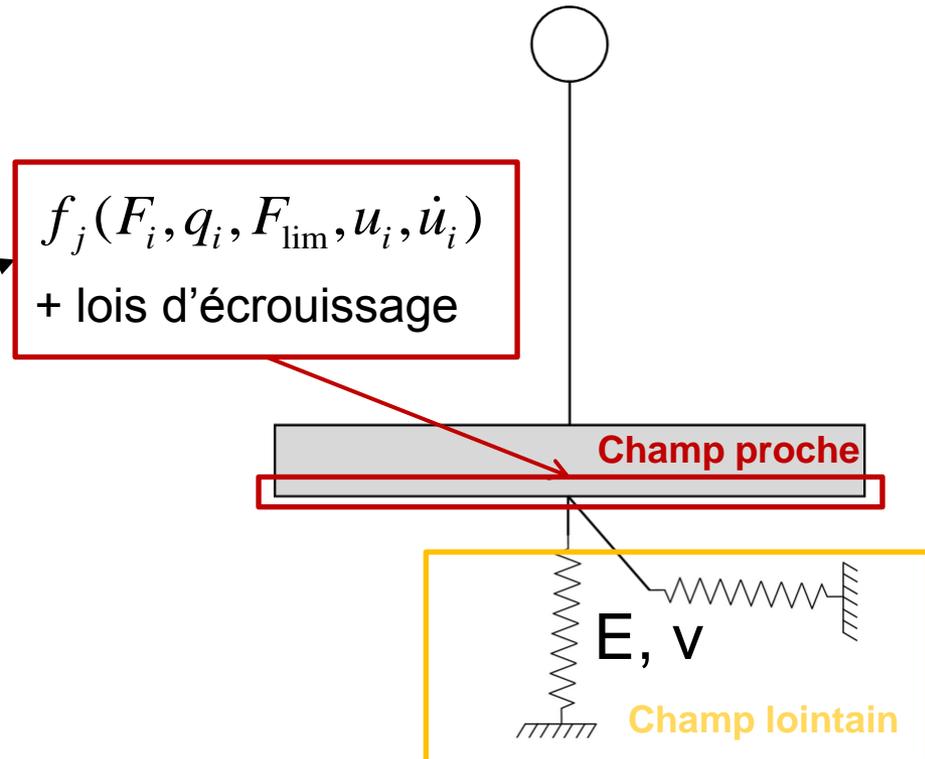
Sol élastique

Simulation EF



Simulation du comportement non linéaire

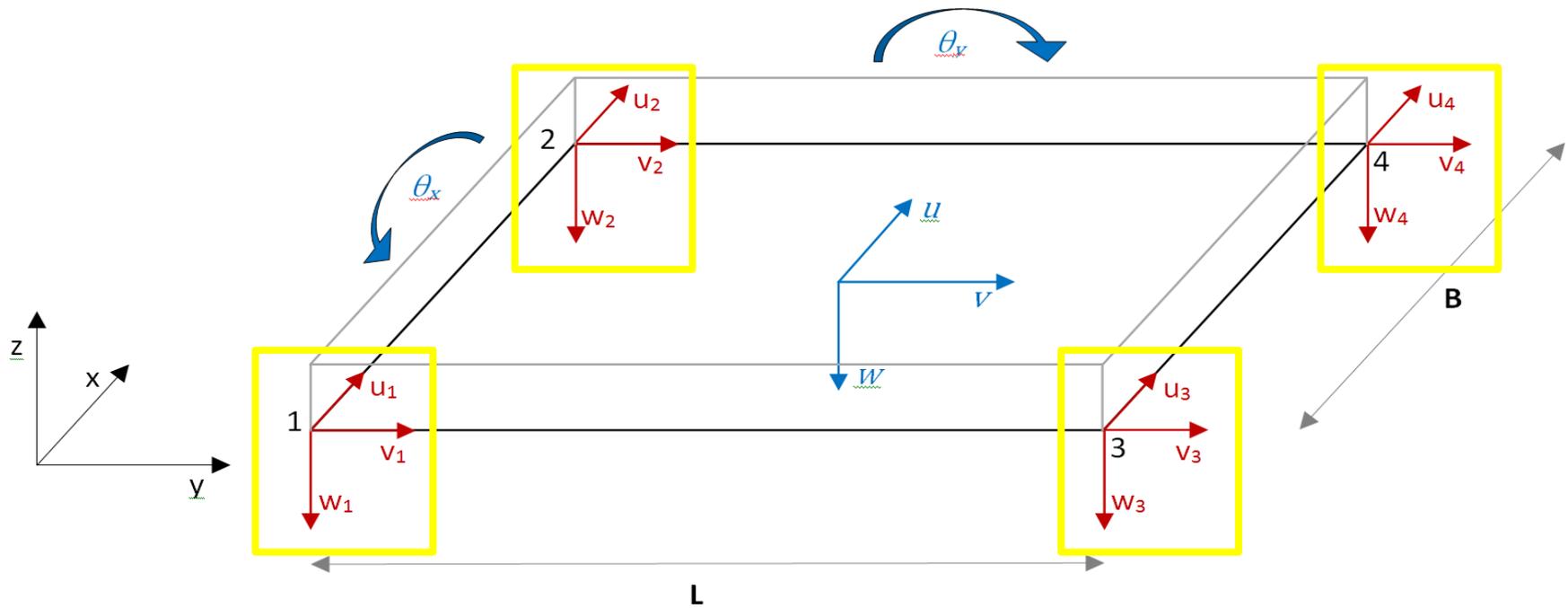
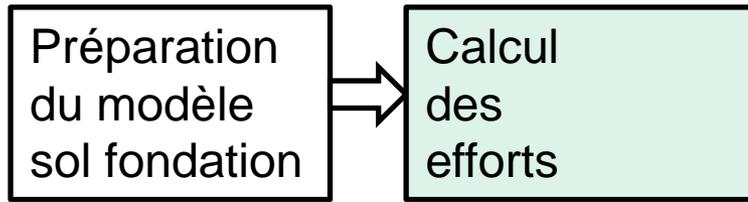
Macroélément



Sol élastique

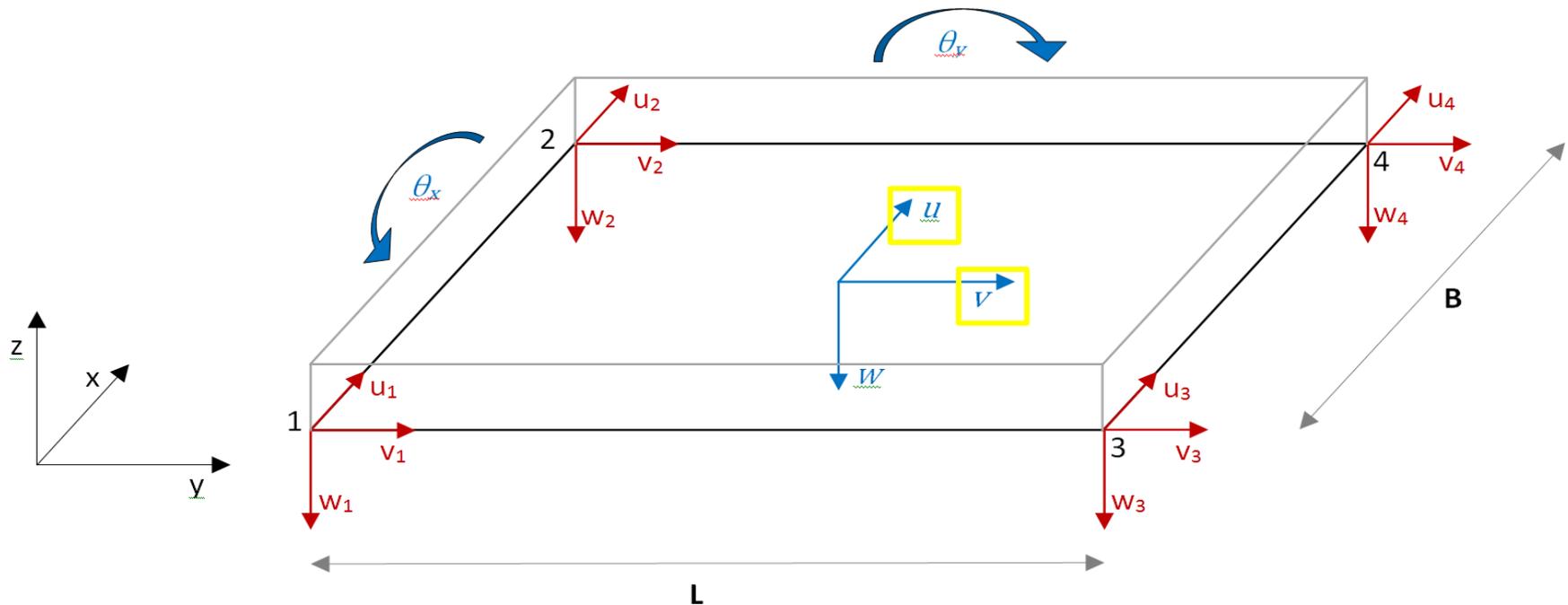
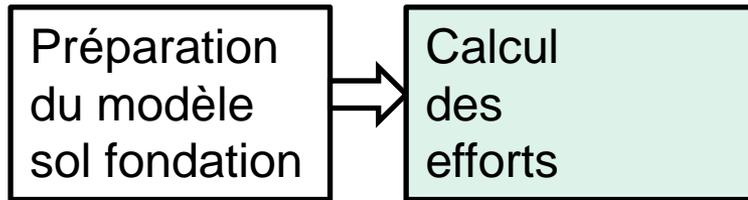
Non linéarités aux nœuds du ME

Implémentation numérique



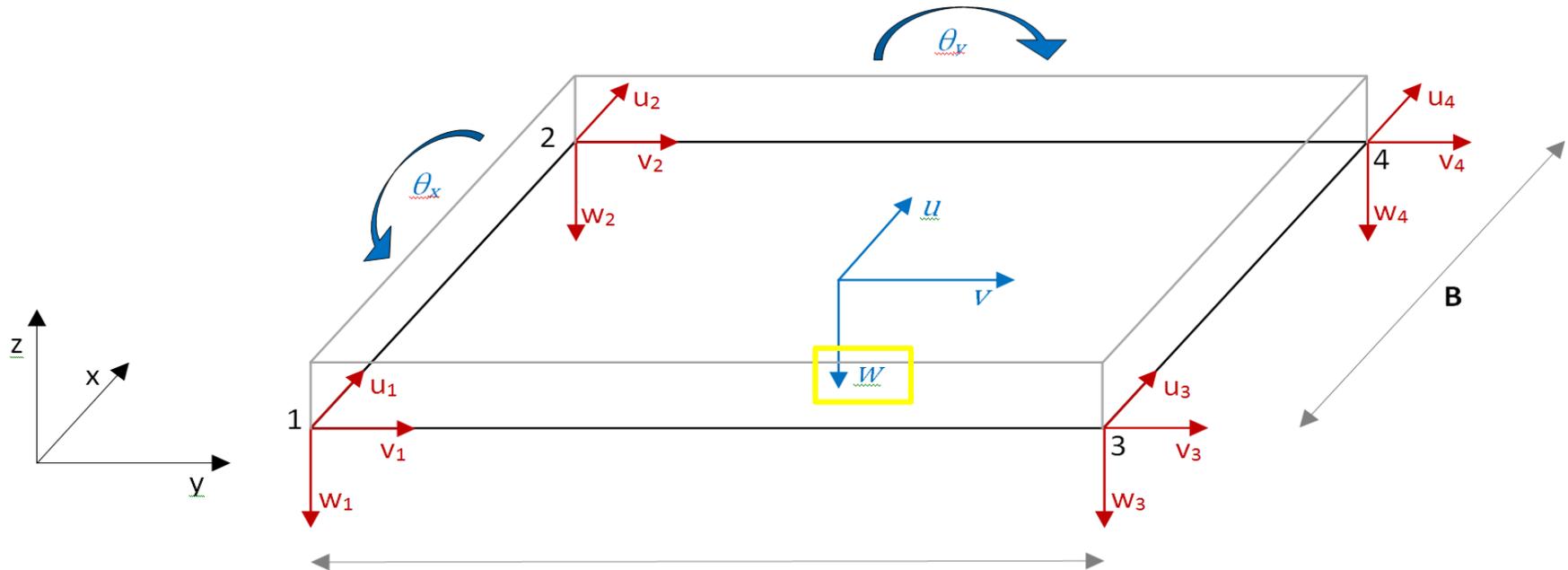
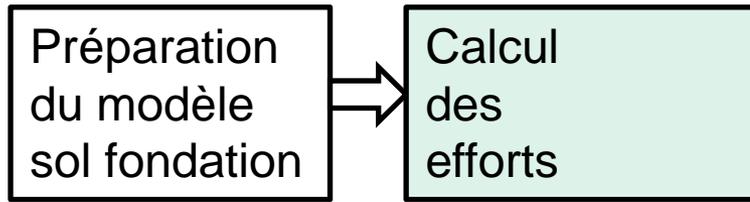
u, v, w pour chaque coin de la fondation

Implémentation numérique



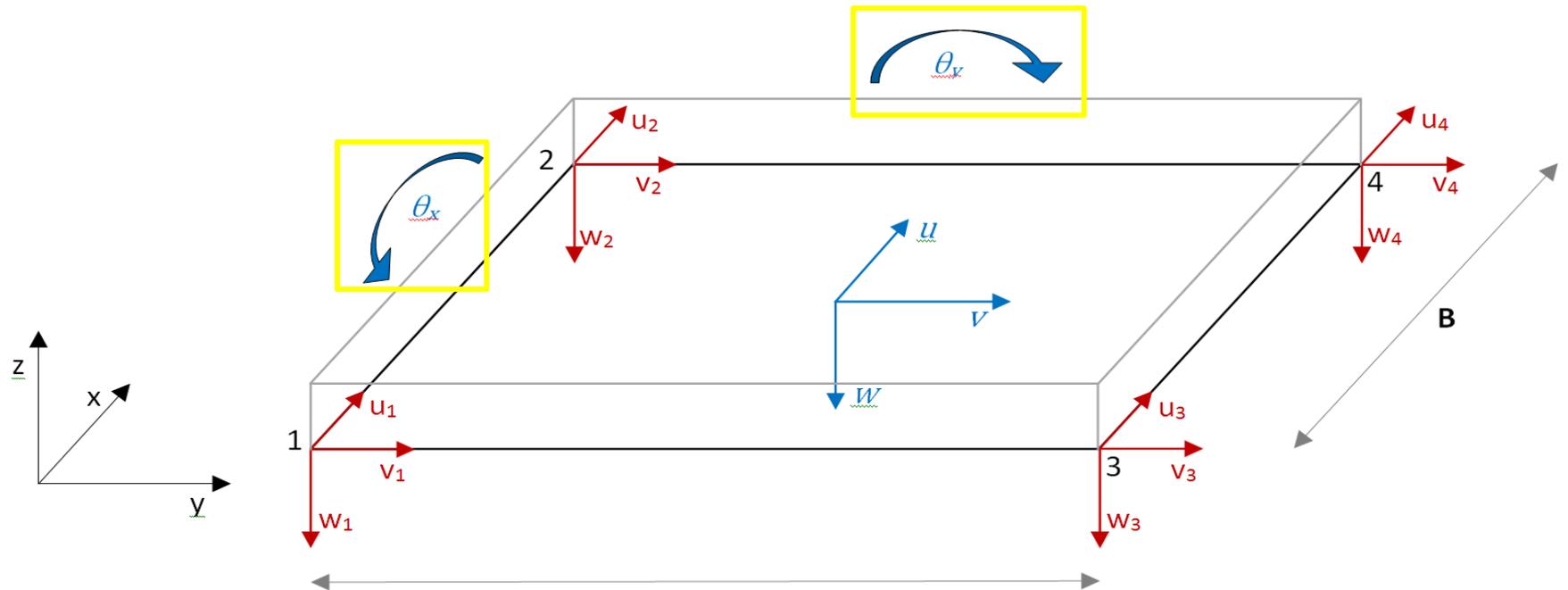
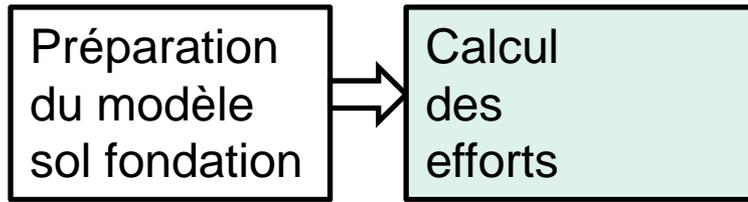
$$u = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 u_i \quad v = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i$$

Implémentation numérique



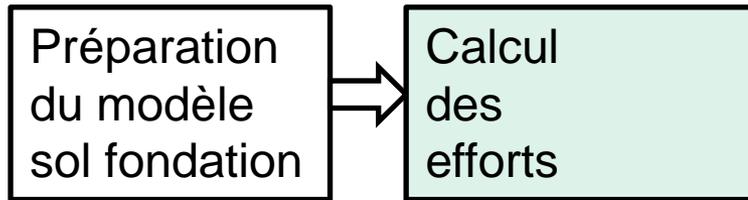
$$u = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 u_i \quad v = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i \quad w = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 w_i$$

Implémentation numérique



$$u = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 u_i \quad v = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i \quad w = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 w_i \quad \theta_x = \frac{(w_2 + w_4) - (w_1 + w_3)}{2B} \quad \theta_y = \frac{(w_1 + w_2) - (w_3 + w_4)}{2L}$$

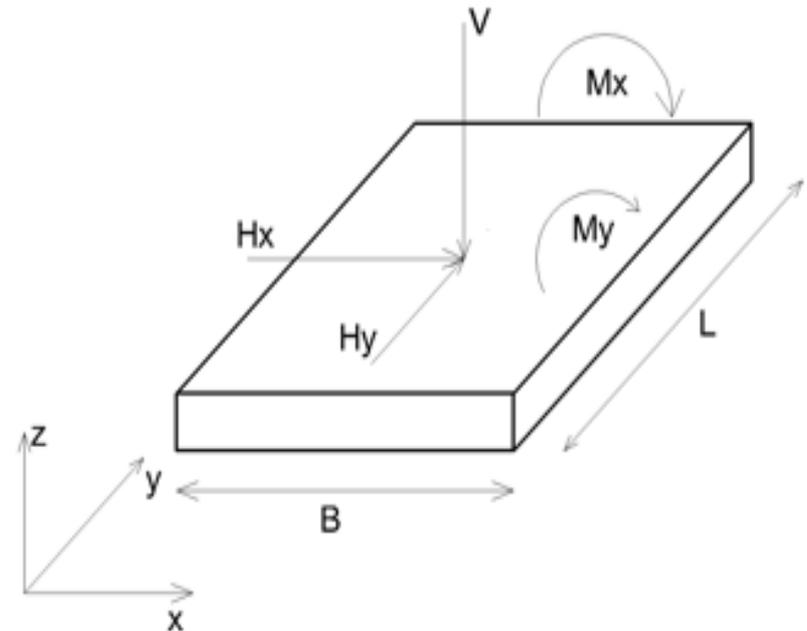
Implémentation numérique



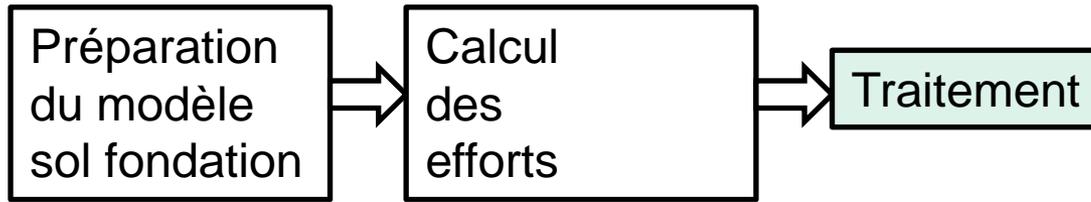
Calcul des efforts généralisés d'essai (trial efforts)

$$(F) = \overline{\overline{K}} \cdot (u)$$

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ V \\ M_x \\ M_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{mx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{my} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix}$$

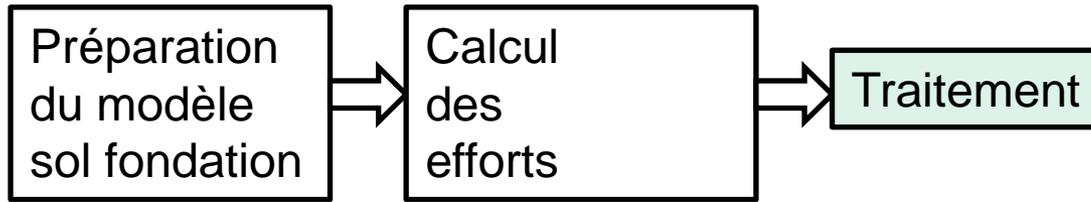


Implémentation numérique



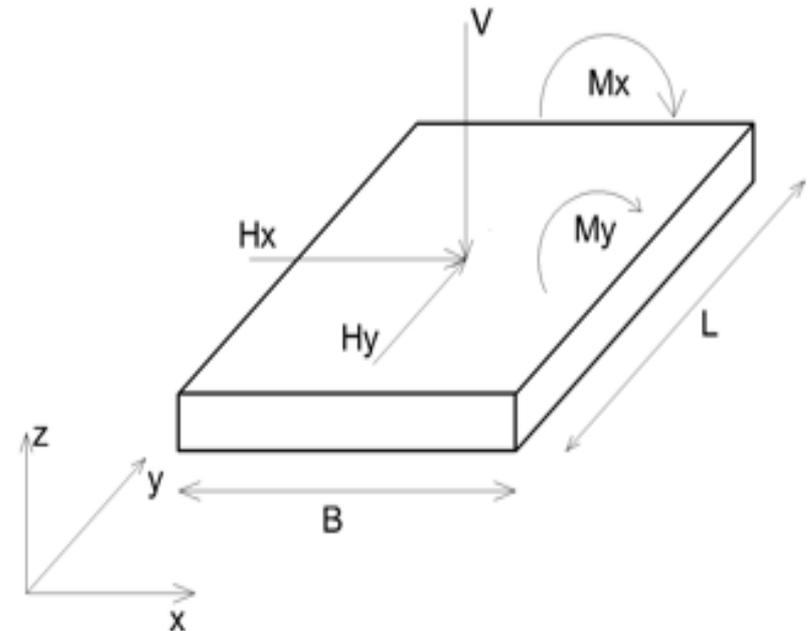
Vérification du torseur F vis-à-vis 3 critères de plasticité

Implémentation numérique

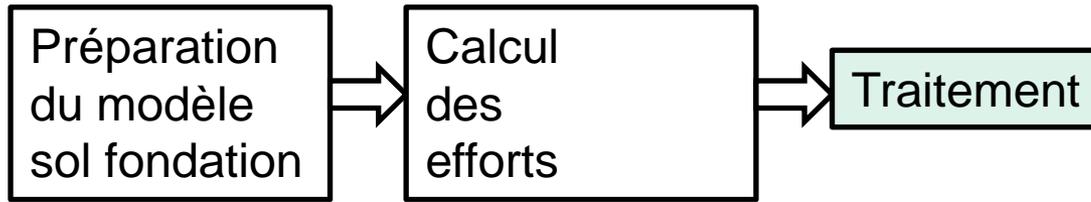


Vérification du torseur F vis-à-vis 3 critères de plasticité

- **critère de glissement:**
Modèle de frottement de Coulomb

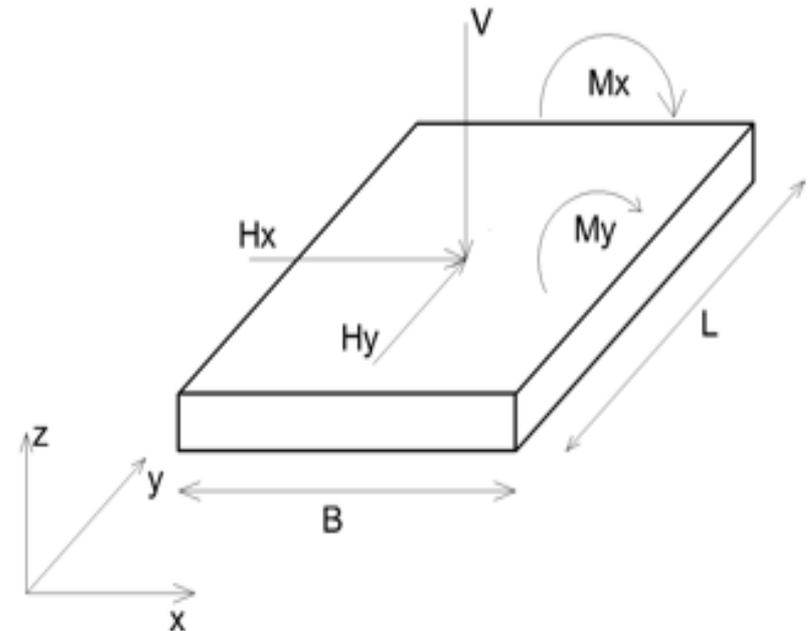


Implémentation numérique

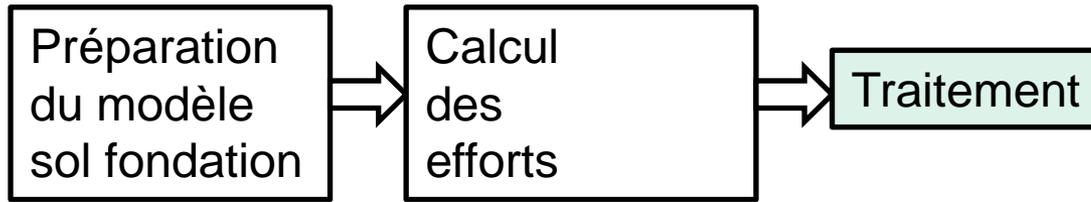


Vérification du torseur F vis-à-vis 3 critères de plasticité

- **critère de glissement:**
Modèle de frottement de Coulomb
- **critère de poinçonnement:**
Formules de l'Eurocode.

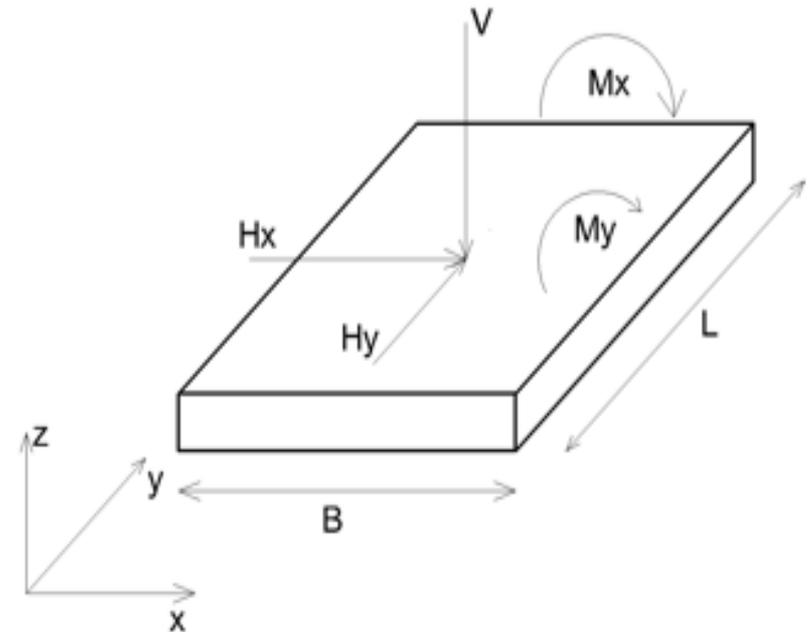


Implémentation numérique

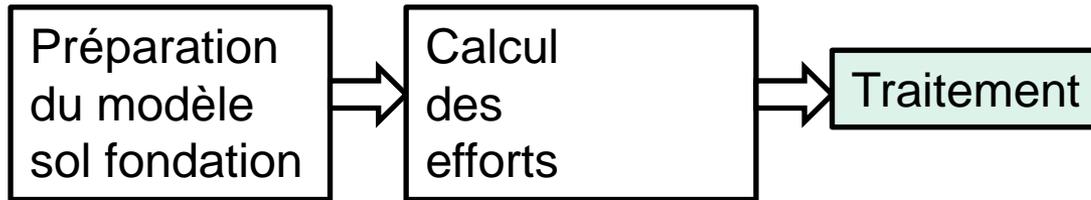


Vérification du torseur F vis-à-vis 3 critères de plasticité

- **critère de glissement:**
Modèle de frottement de Coulomb
- **critère de poinçonnement:**
Formules de l'Eurocode.
- **critère de décollement:**
Vérification de la surface comprimée de la fondation.



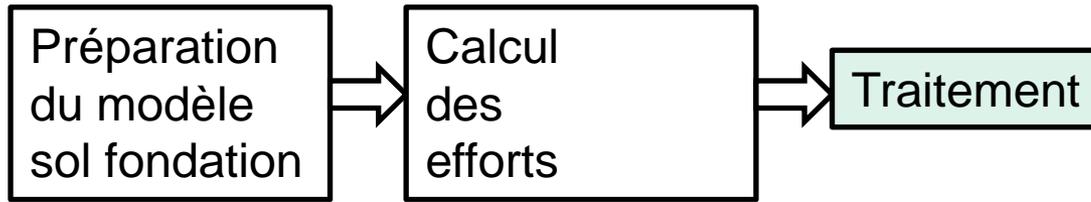
Implémentation numérique



Vérification du torseur F vis-à-vis 3 critères de plasticité

- **Si tous les critères sont vérifiés:**
incrément élastique.
on passe au pas de temps suivant.

Implémentation numérique



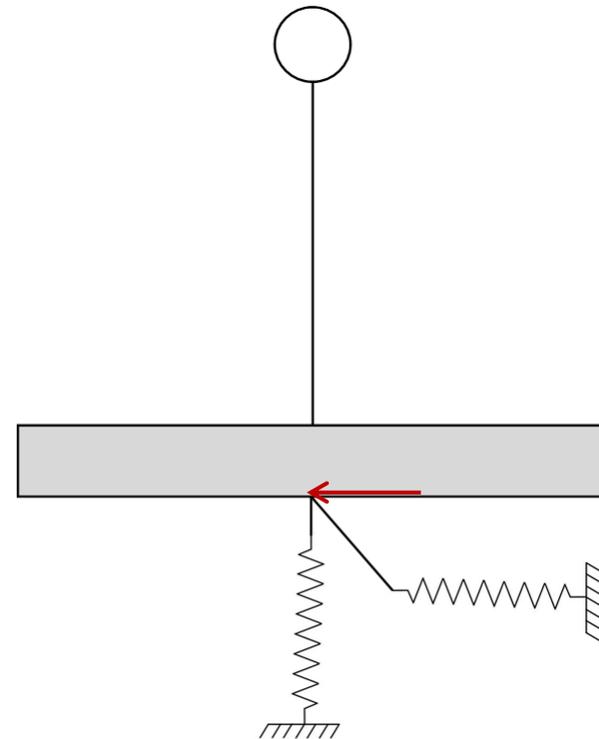
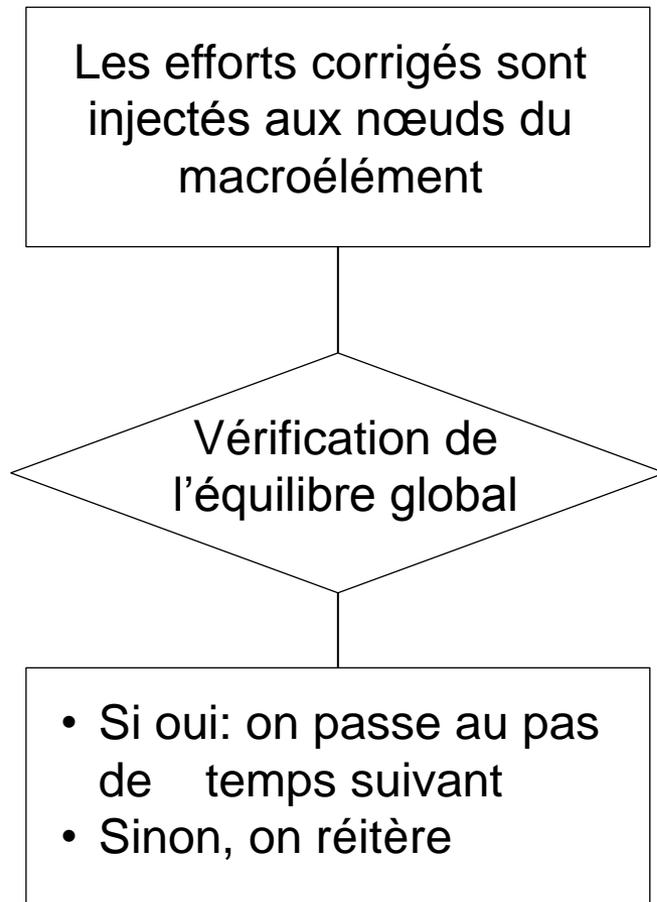
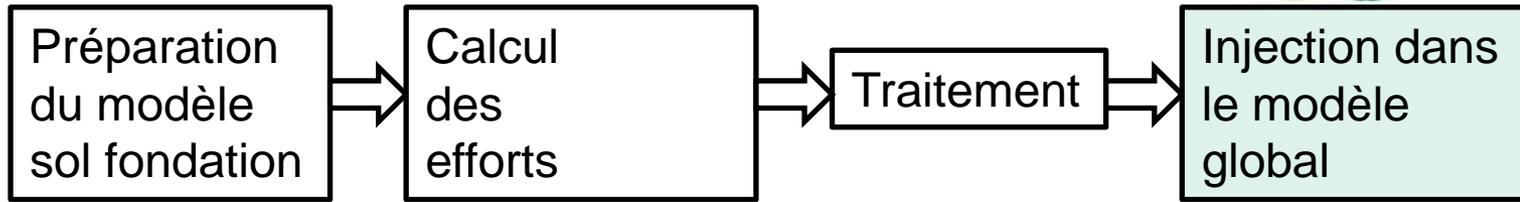
Vérification du torseur F vis-à-vis 3 critères de plasticité

- **Si tous les critères sont vérifiés:**
incrément élastique.
on passe au pas de temps suivant.
- **$M > 1$ critère(s) sont dépassés:**
 M mécanismes plastiques sont actifs.

On a recours à un algorithme de calcul plastique multimécanisme pour calculer:

- les déplacements plastiques,
- les efforts généralisés corrigés.

Implémentation numérique



Implémentation numérique

- Le macroélément est implémenté dans CESAR – LCPC.



Implémentation numérique

- Le macroélément est implémenté dans CESAR – LCPC.



- **Les paramètres à définir sont:**

- les 5 raideurs élastiques de la fondation,
- 4 paramètres pour le critère de glissement,
- 2 paramètres pour le critère de poinçonnement,
- et 2 paramètres pour le critère de renversement.

Soit en total 13 paramètres

Contenu de l'exposé

- **Contexte et problématique**
- **Approche macroélément**
- **Calculs réalisés**
- **Conclusions et perspectives**

Modèle d'application

- **Fondation**

Semelle rectangulaire de 3m x 4m en béton.

- **Massif de sol sous jacent**

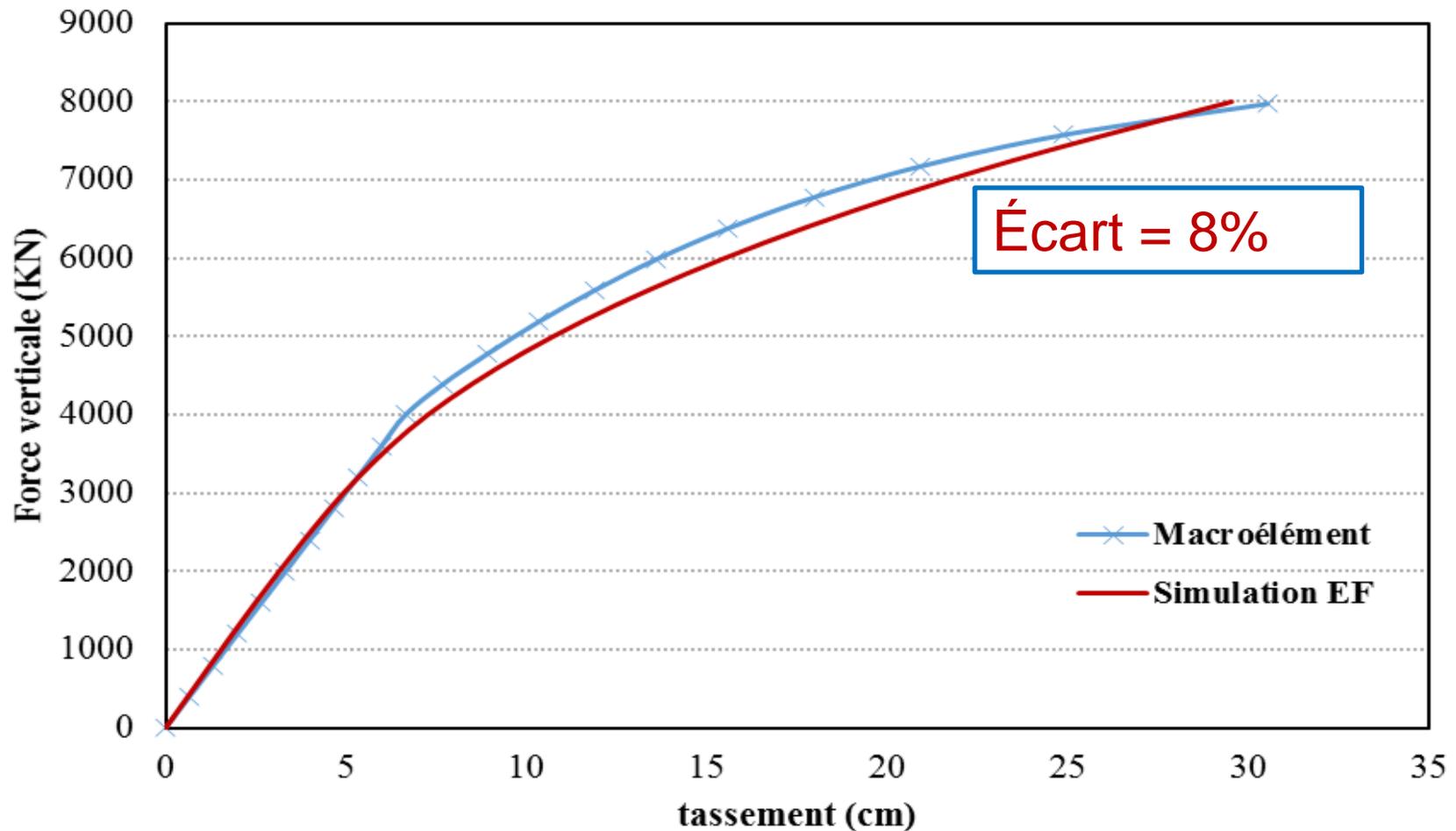
Sol cohérent de masse volumique 1400 Kg/m³

module de Young $E = 10$ Mpa

Cohésion $C=50$ KPa ; Angle de frottement interne de 10°

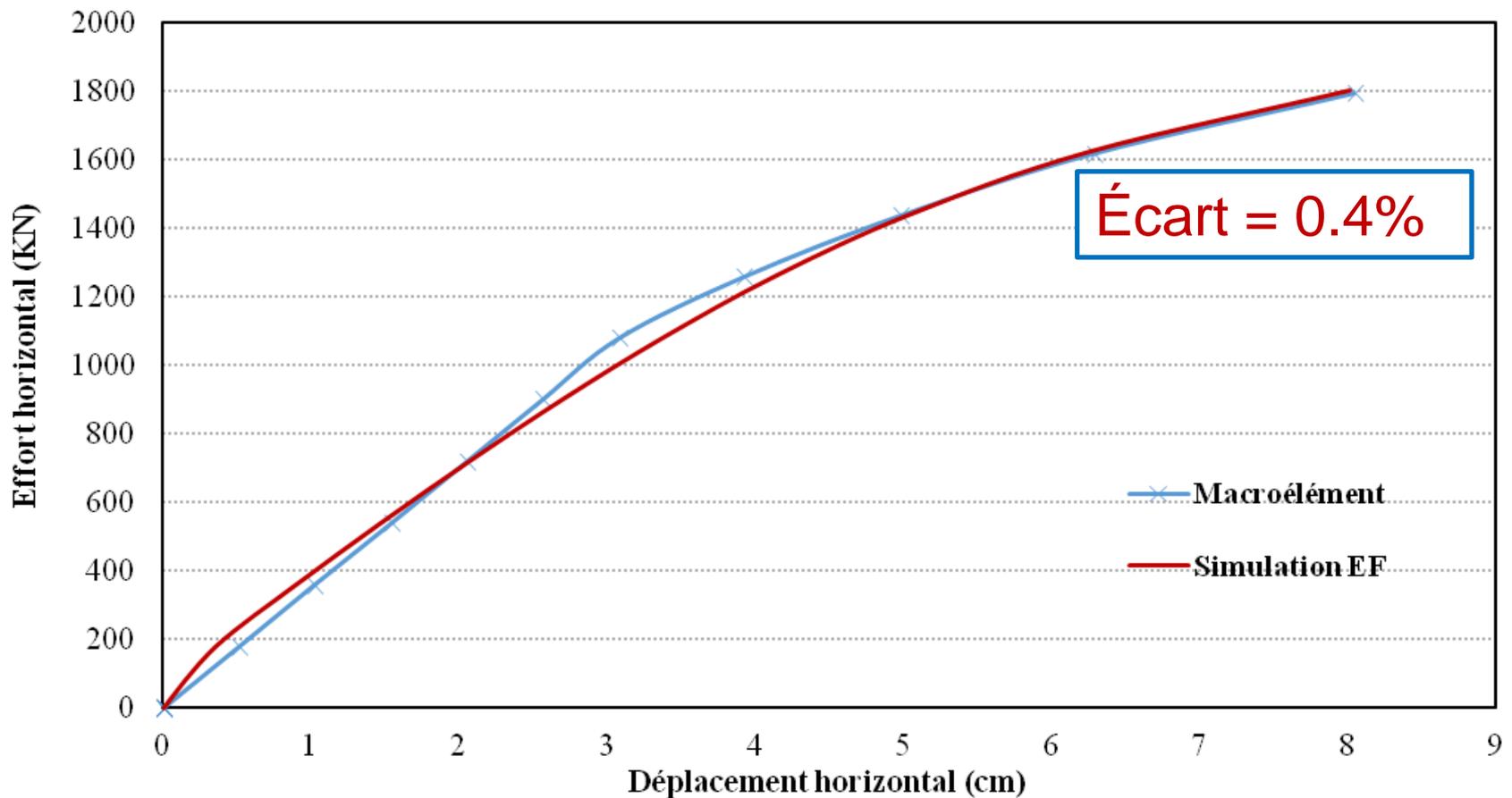
Calage du macroélément:

Chargement vertical monotone de 8000KN



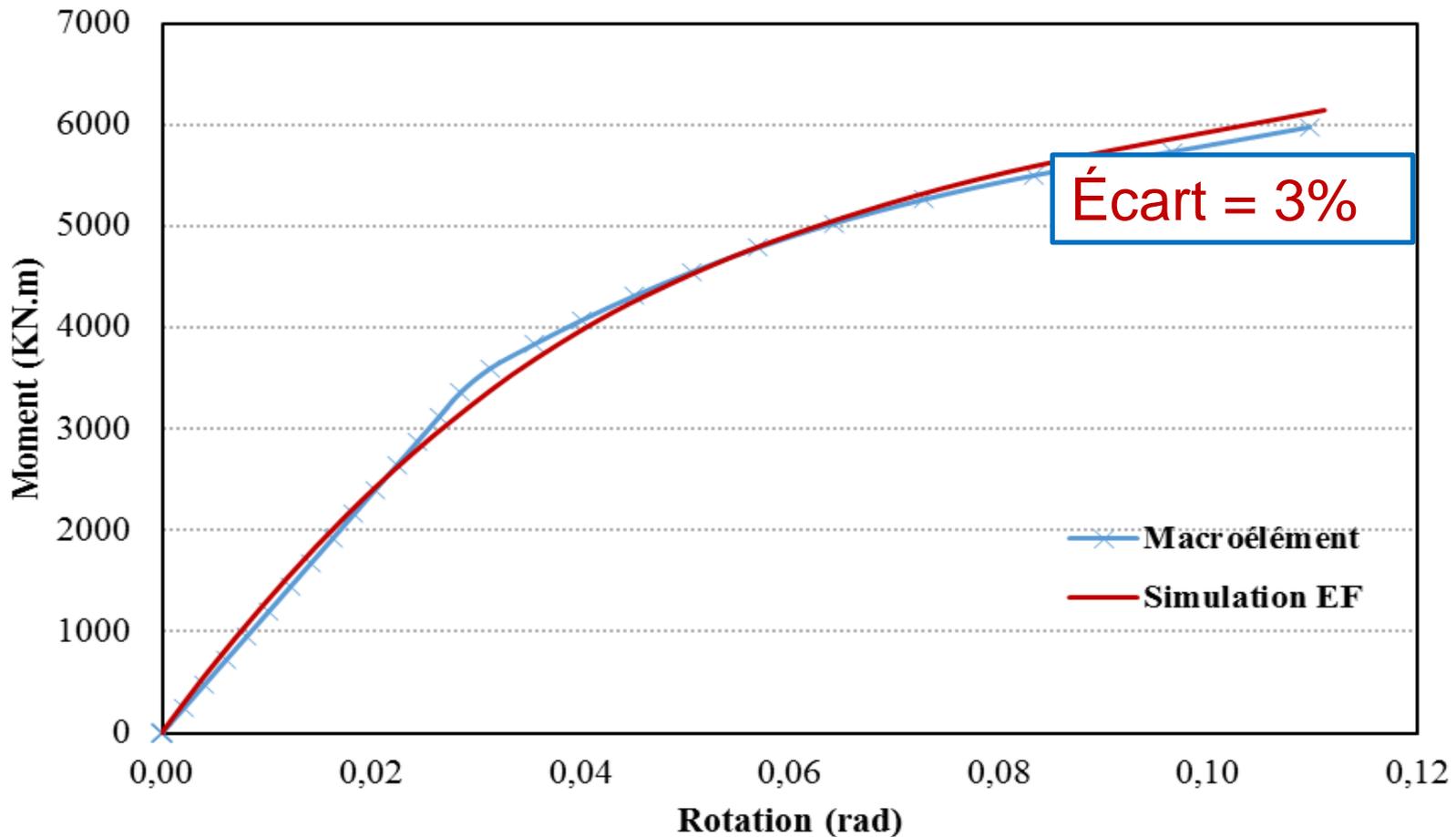
Calage du macroélément:

Chargement horizontal de 1800 kN ($V=3500$ kN)

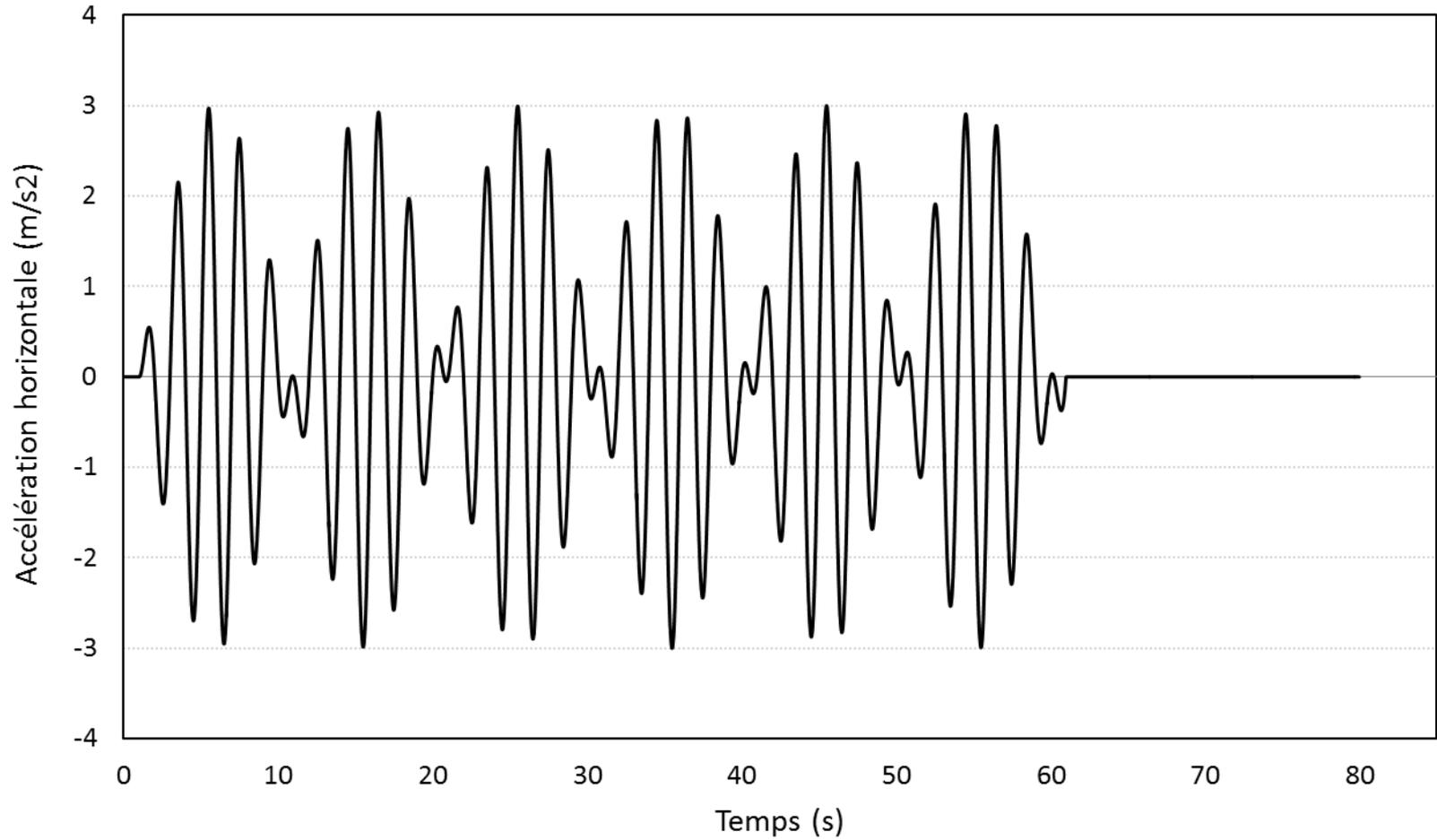


Calage du macroélément:

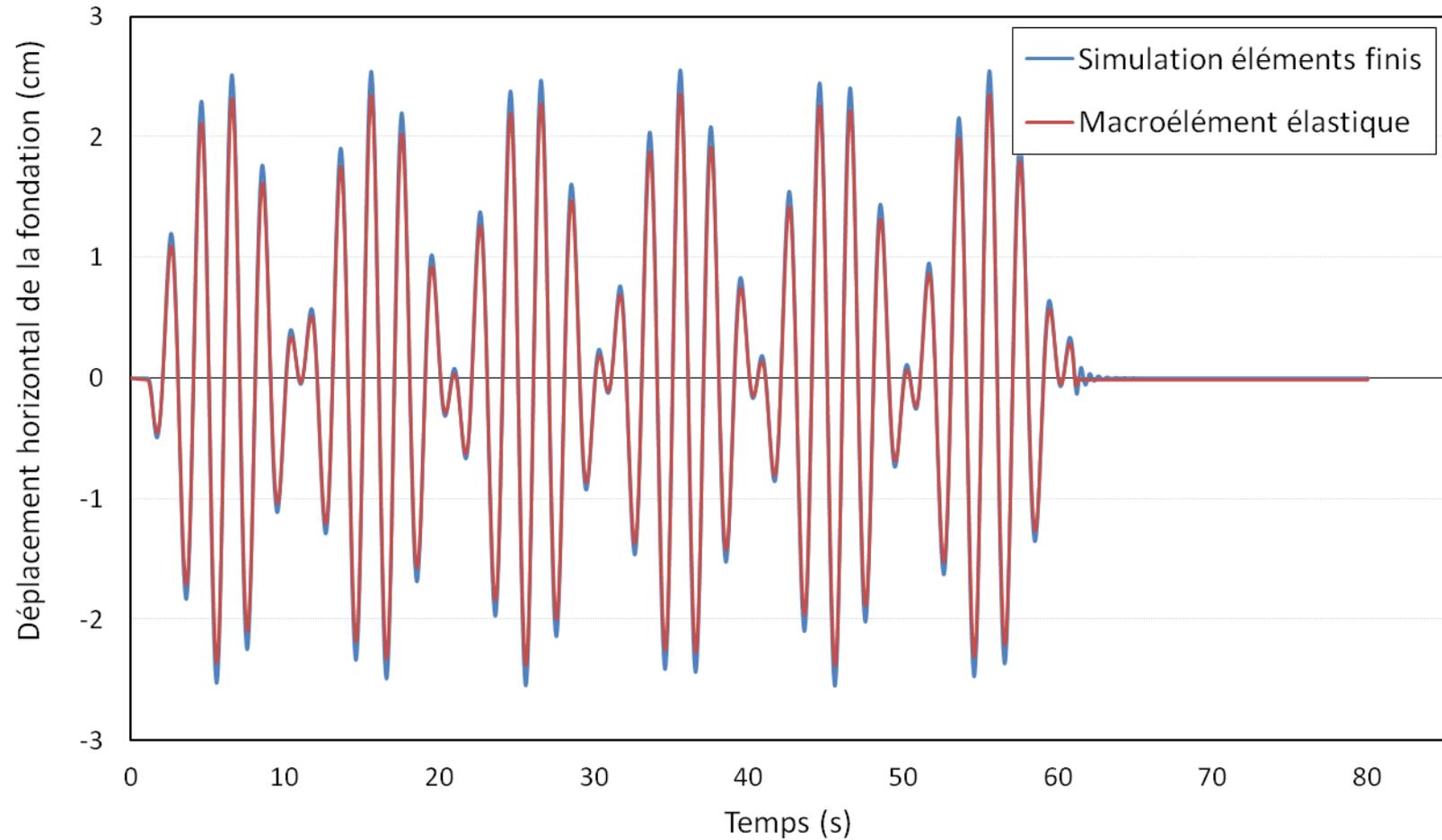
Moment renversant de 6000 kN.m ($V=3500$ kN)



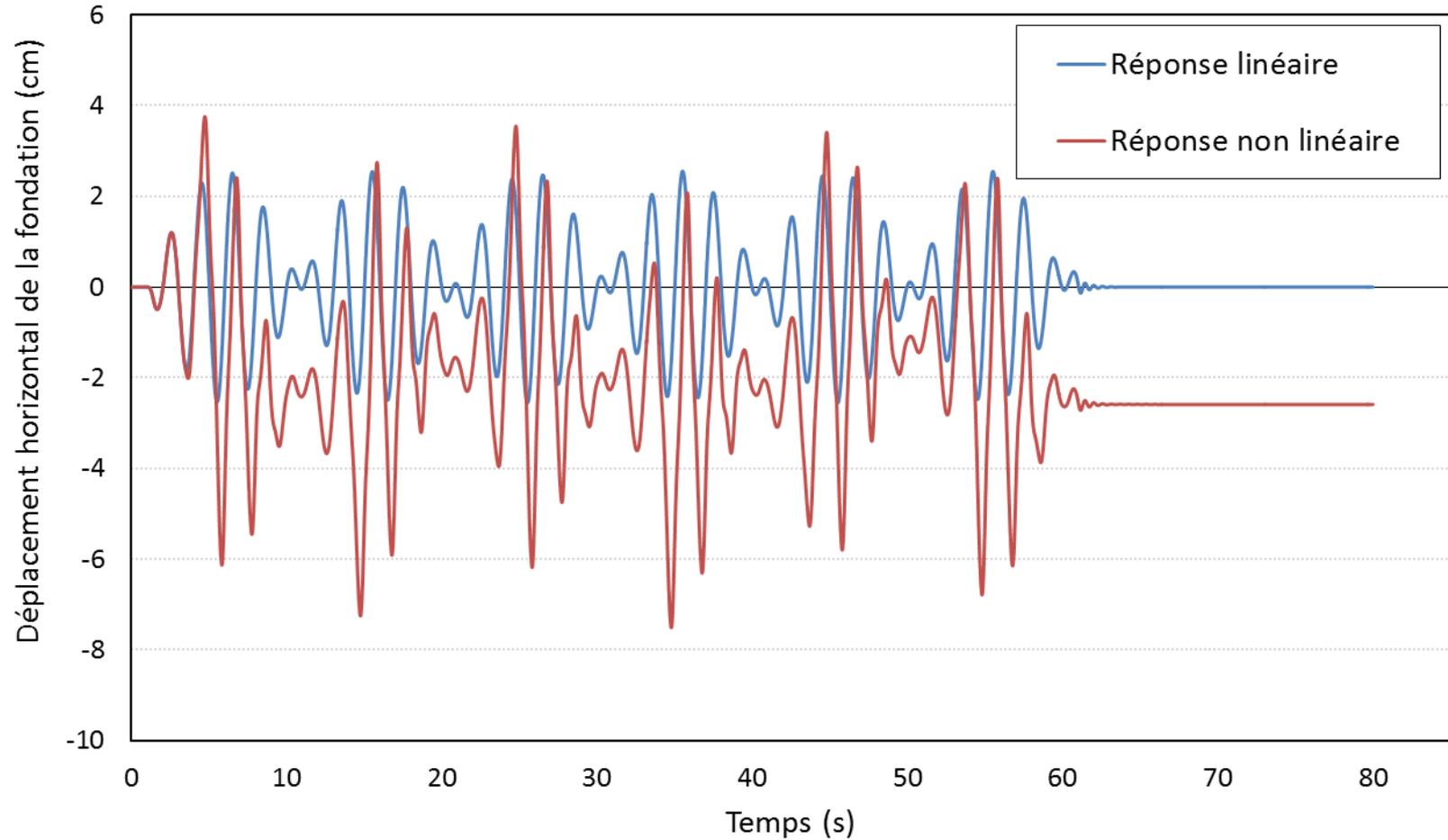
Signal d'excitation dynamique



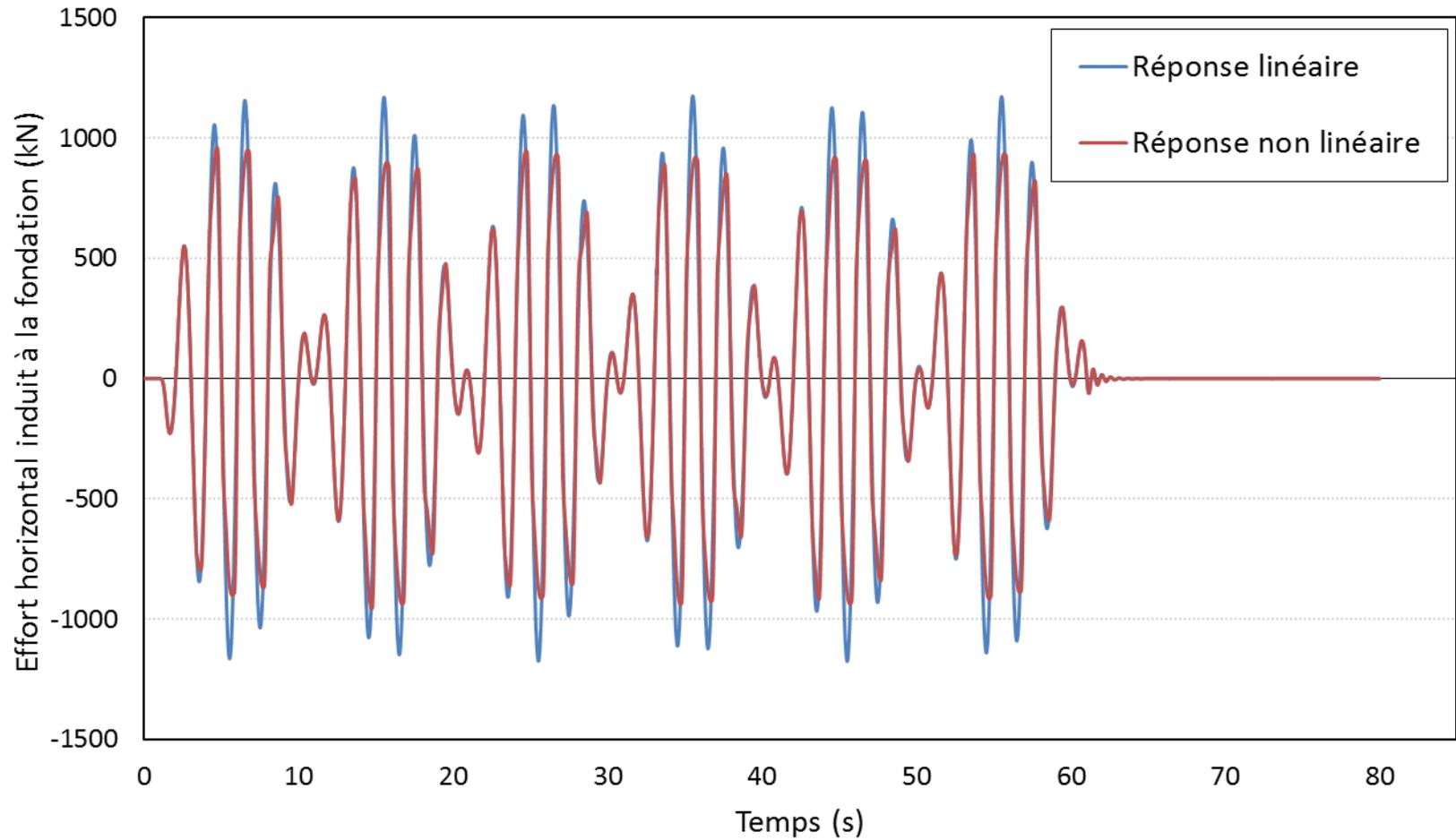
Validation du macroélément



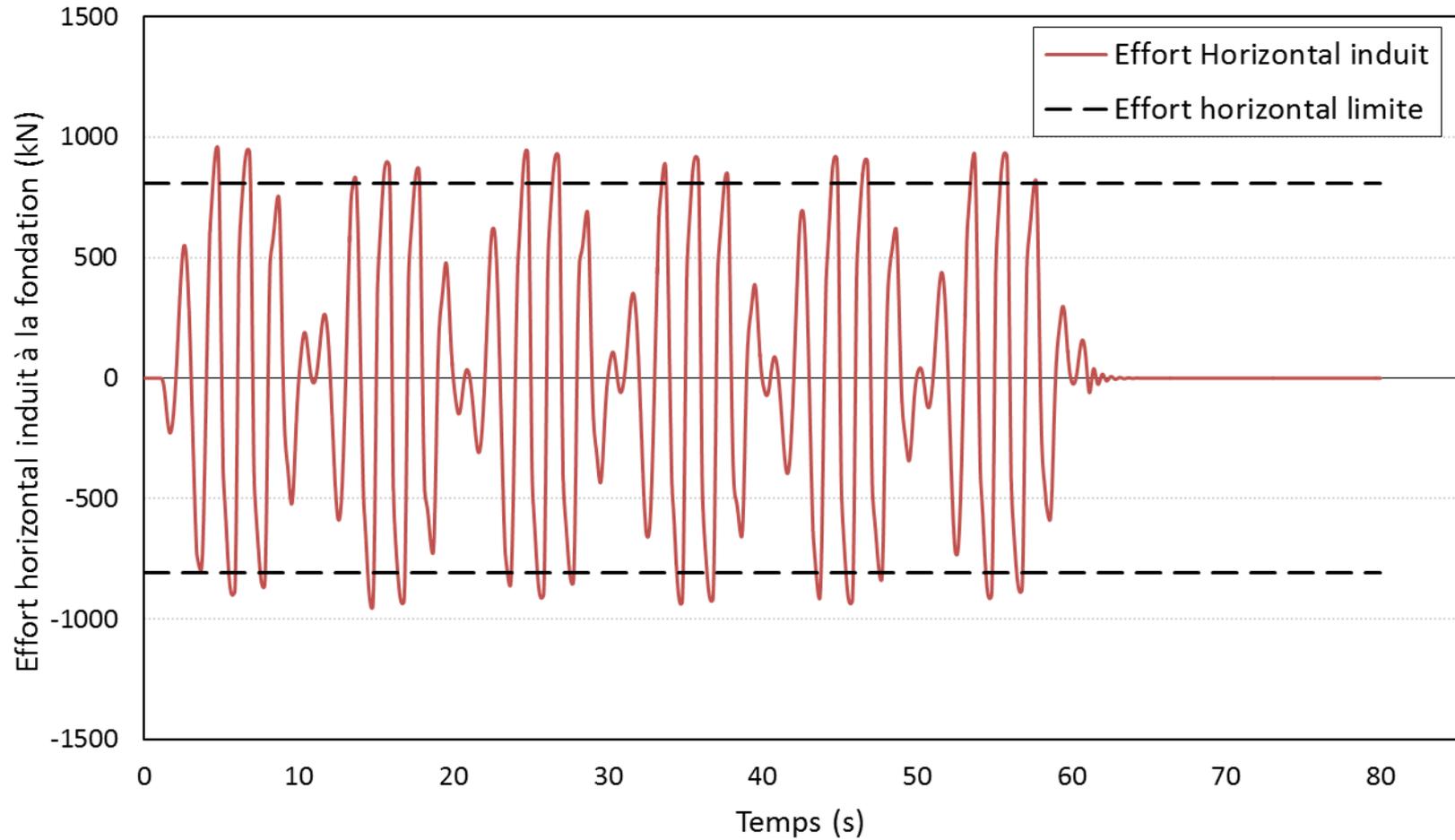
Réponse linéaire vs réponse non linéaire



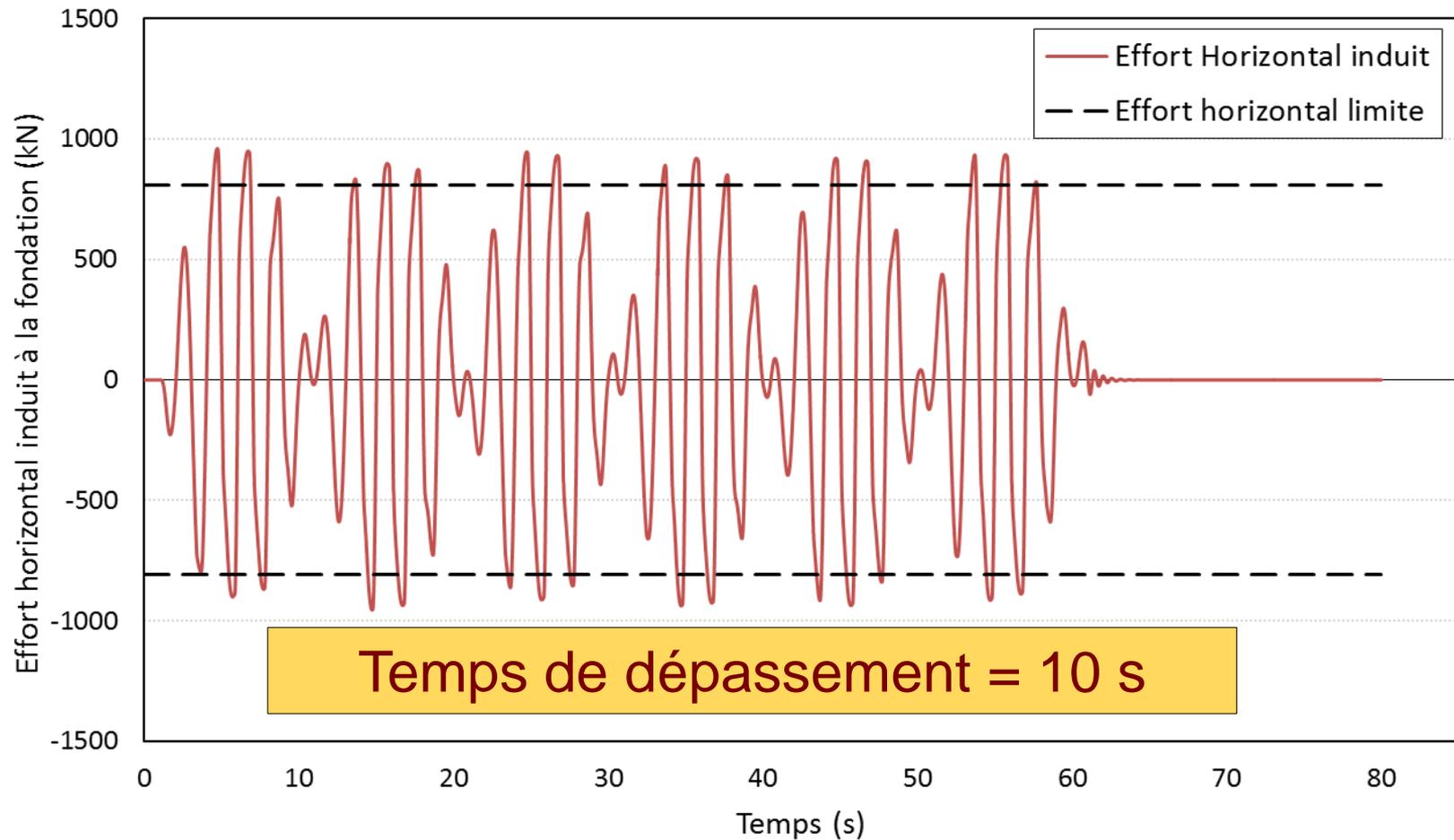
Réponse linéaire vs réponse non linéaire



Variation temporelle du coefficient de sécurité



Variation temporelle du coefficient de sécurité



Contenu de l'exposé

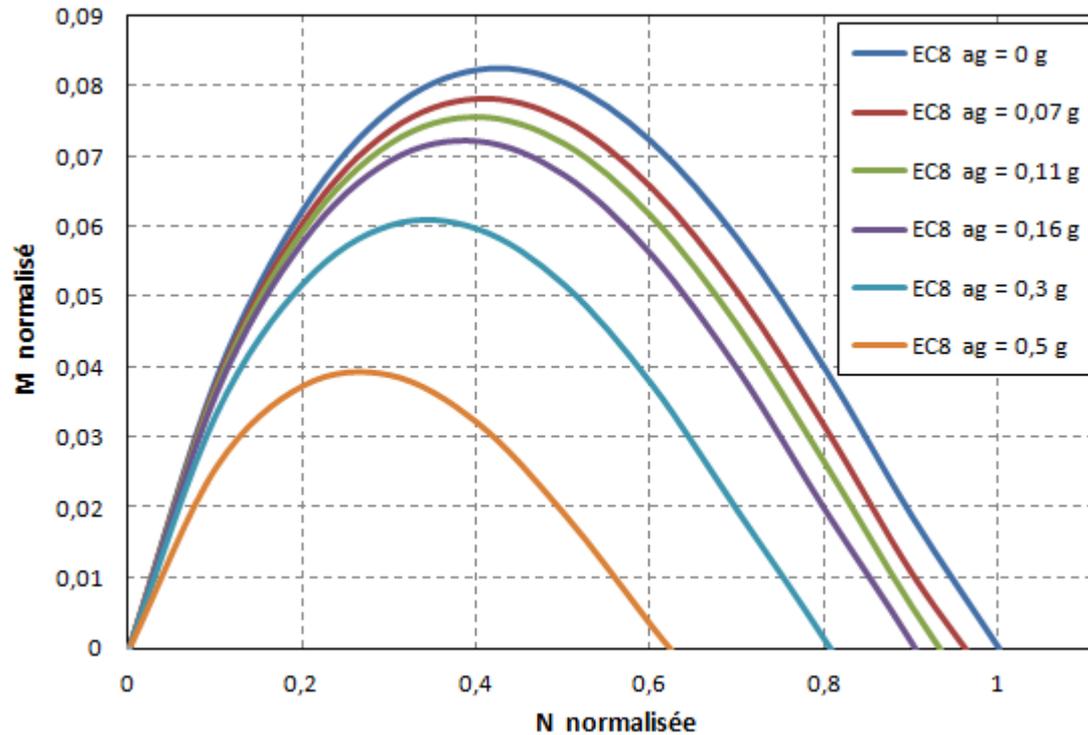
- **Contexte et problématique**
- **Approche macroélément**
- **Calculs réalisés**
- **Conclusions et perspectives**

Conclusions

- L'approche macroélément permet de représenter la réponse sismique des fondations superficielles, en prenant en compte des non linéarités.
- Le temps de calcul est réduit.
- Les résultats obtenus sont facilement exploités afin de mener des justifications d'ingénierie (calculs des tassements, des efforts, ...).

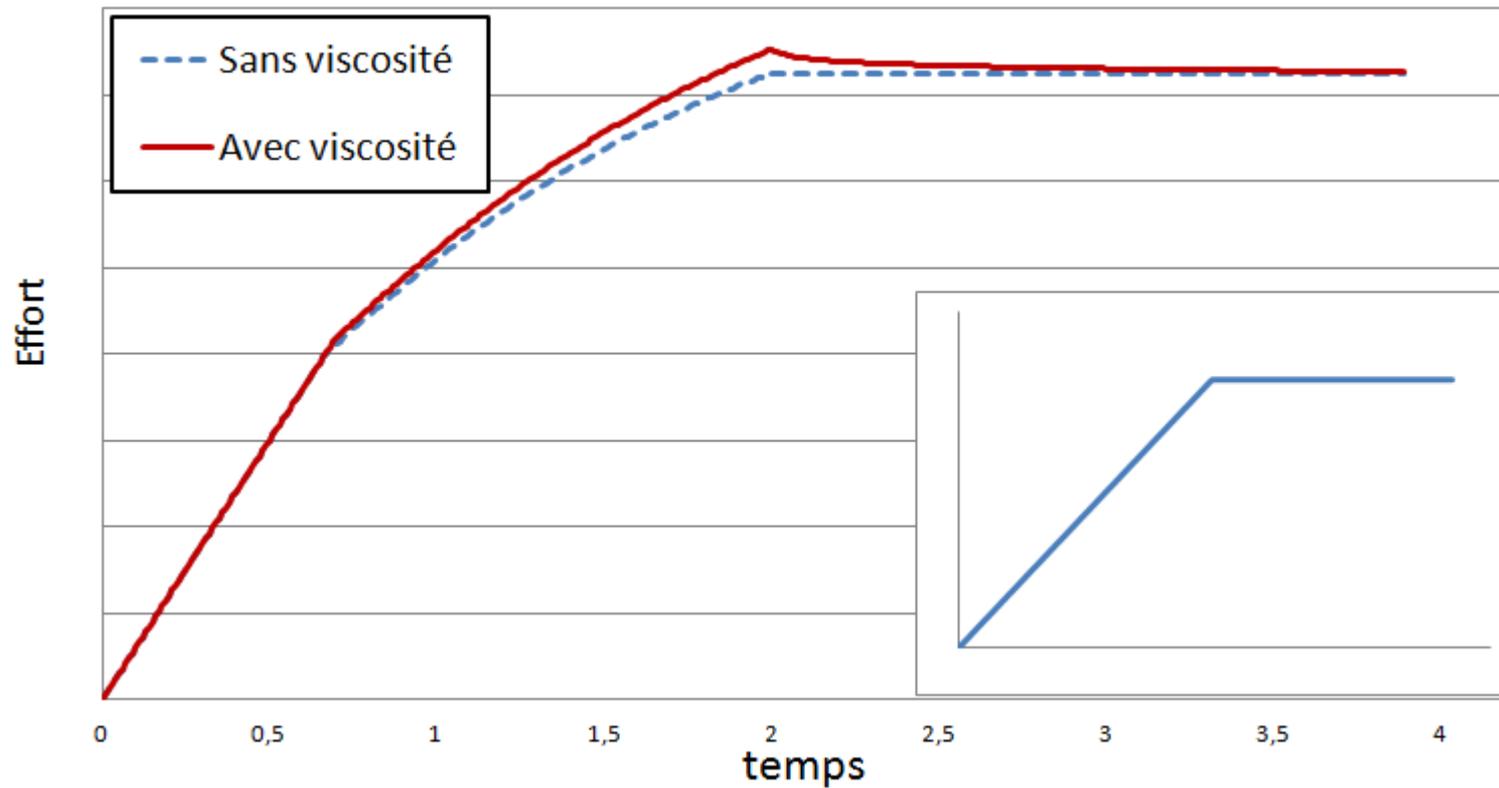
... A venir

- **Prise en compte des forces d'inertie dans le sol**
Formule Eurocode 8



... A venir

- Prise en compte de l'effet de la vitesse de chargement



... A venir

- Prise en compte de l'effet de l'encastrement

$$\begin{bmatrix}
 K_{hx} & 0 & 0 & \mathbf{K_{hmx}} & \mathbf{K_{hmxy}} \\
 0 & K_{hy} & 0 & \mathbf{K_{hmxy}} & \mathbf{K_{hmy}} \\
 0 & 0 & K_v & 0 & 0 \\
 \mathbf{K_{hmx}} & \mathbf{K_{hmxy}} & 0 & K_{m_x} & 0 \\
 \mathbf{K_{hmxy}} & \mathbf{K_{hmy}} & 0 & 0 & K_{m_y}
 \end{bmatrix}$$

... A venir

- **Prise en compte des effets liés aux radiers de grandes dimensions**



... A venir

- validation à partir d'essais en centrifugeuse



... Et application sur des ouvrages réels



Merci de votre attention

Questions?

Youssef Abboud

IFSTTAR / GERS

14-20 Bd Newton

77447 Marne-la-Vallée

youssef.abboud@ifsttar.fr