



Journée technique du CFMS du 5 décembre 2017

**« *Pratique de l'interaction sol-structure sous sollicitations
statiques et sismiques* »**

**Exemple d'ISS : Le cas d'un radier sur
inclusions rigides**

Présentateur : Jérôme Racinais

Sommaire

Présentation du projet

- ⊕ Localisation, géométrie, chargement
- ⊕ Conditions de sol
- ⊕ Renforcement de sol par inclusions rigides

Interaction Sol-Structure sous chargement statique

- ⊕ Interaction Sol / Inclusions Rigides
- ⊕ Interaction Sol Renforcé / Ouvrage

Interaction Sol-Structure sous chargement dynamique

- ⊕ Approche pseudo-statique
- ⊕ Calcul 3D dynamique. Analyse temporelle



01

Présentation du projet

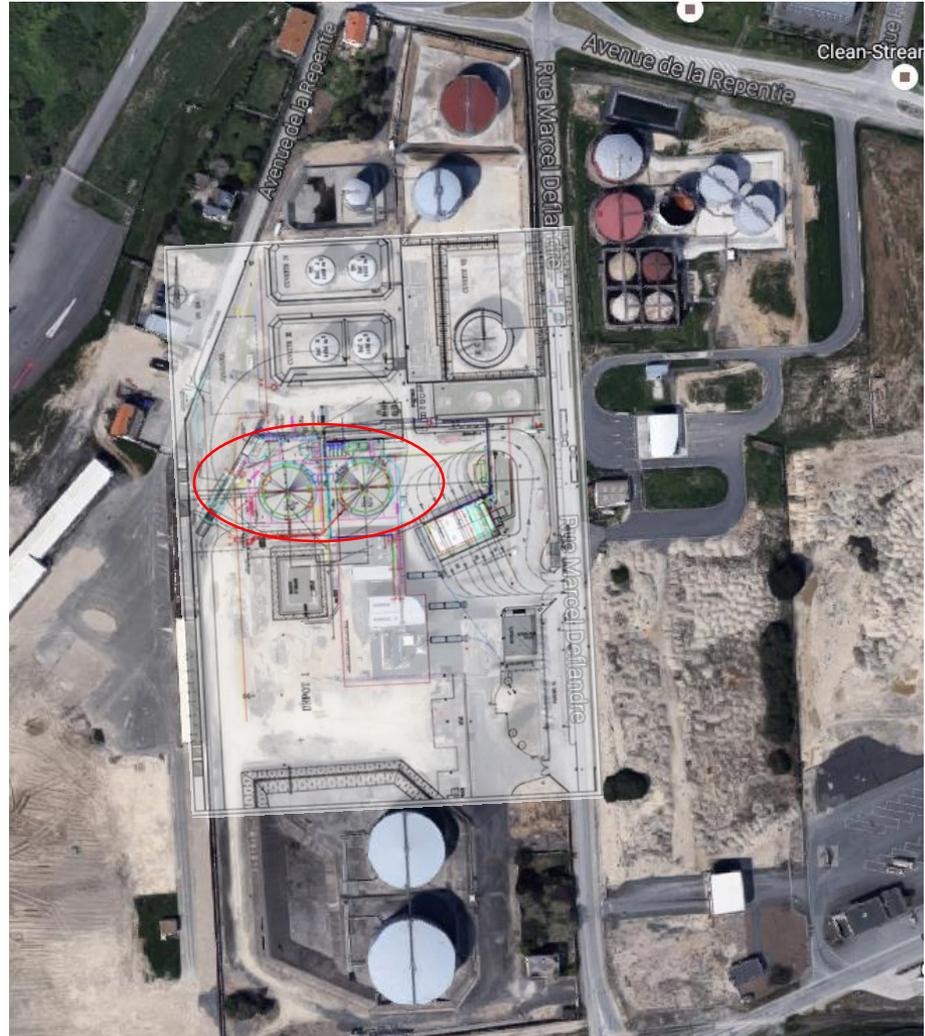
- ⊕ Localisation, géométrie, chargement
- ⊕ Conditions de sol
- ⊕ Renforcement de sol par inclusions rigides

Localisation du projet

2 réservoirs de méthanol

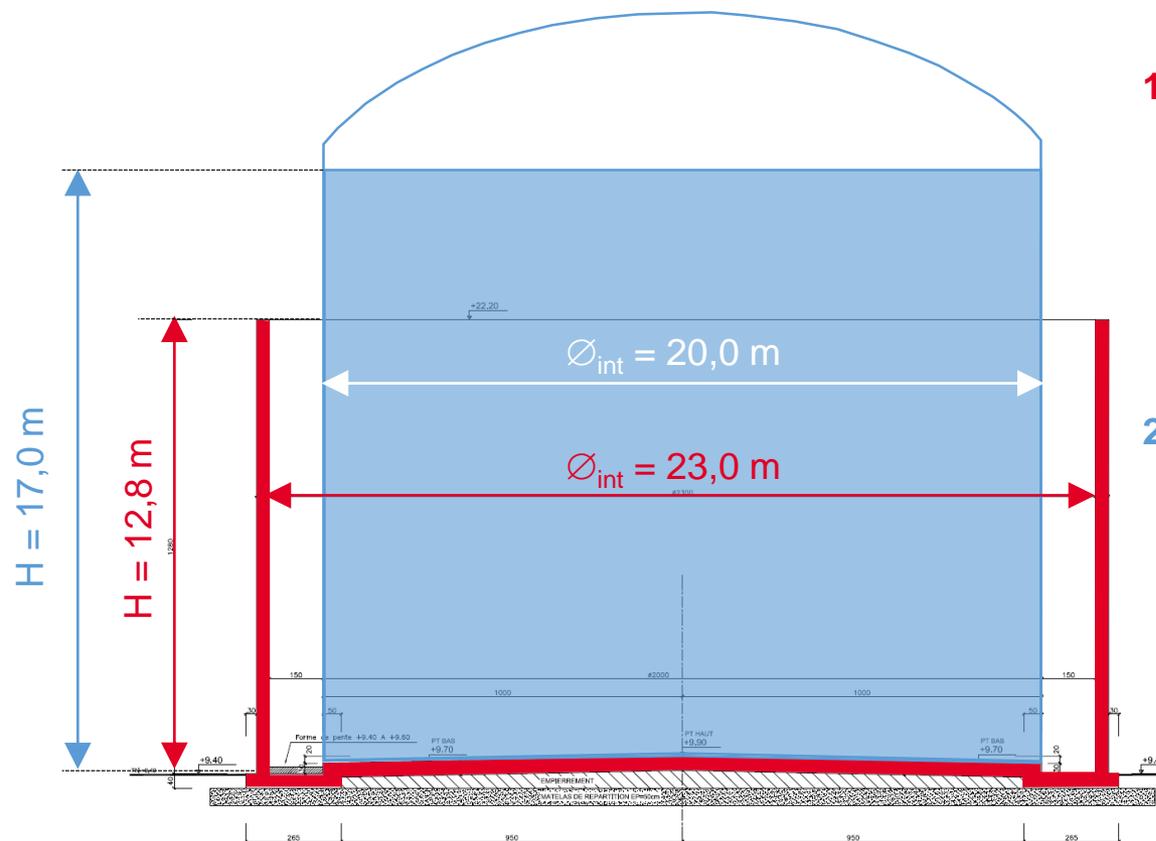


Poids volumique : 8.1 kN/m^3



Structure des réservoirs

5



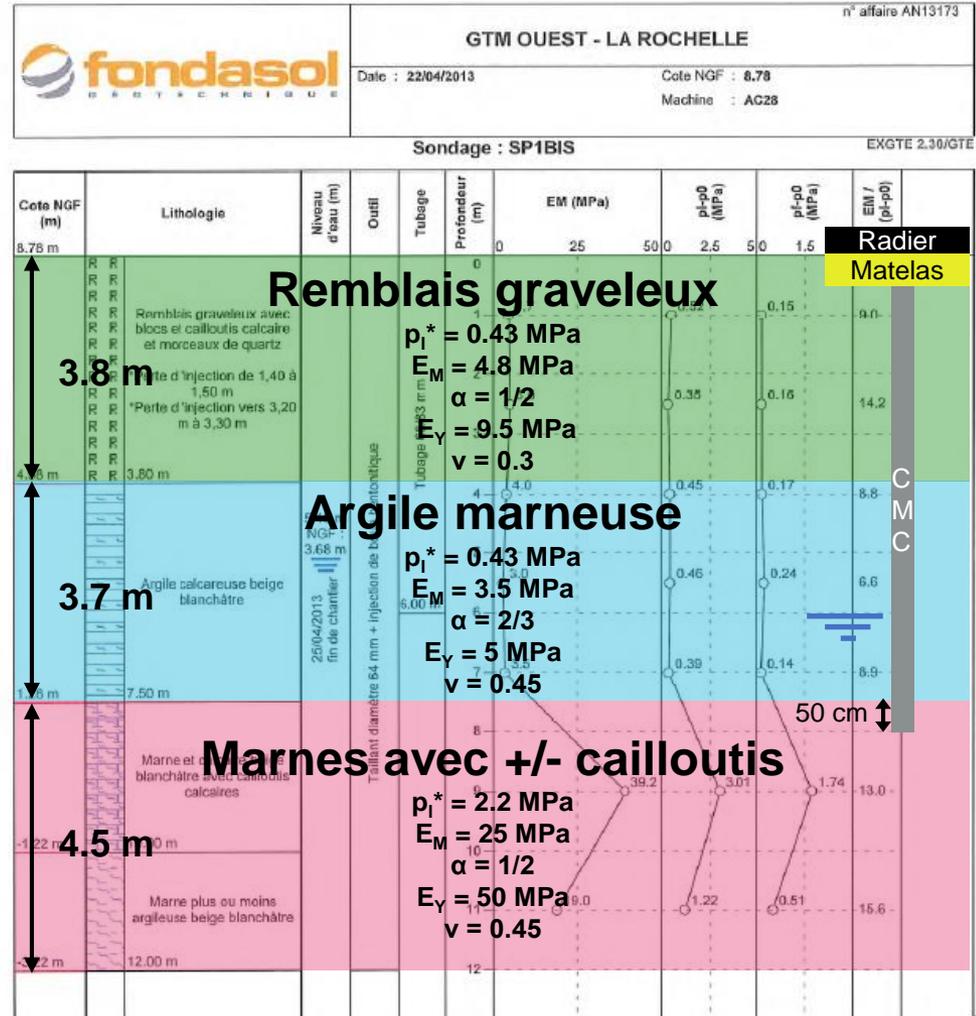
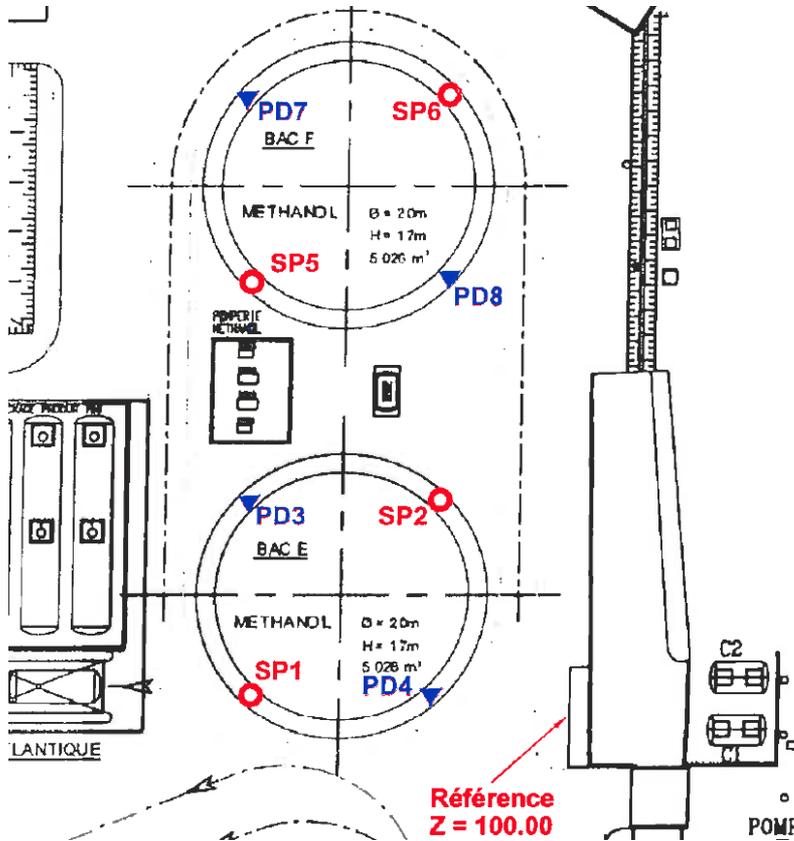
1. Cuve de retention en béton armé

- Diamètre intérieur = 23,0 m
- Hauteur = 12,8 m
- Epaisseur du voile = 35 cm
- Epaisseur du radier = 40 cm

2. Réservoir de stockage en acier

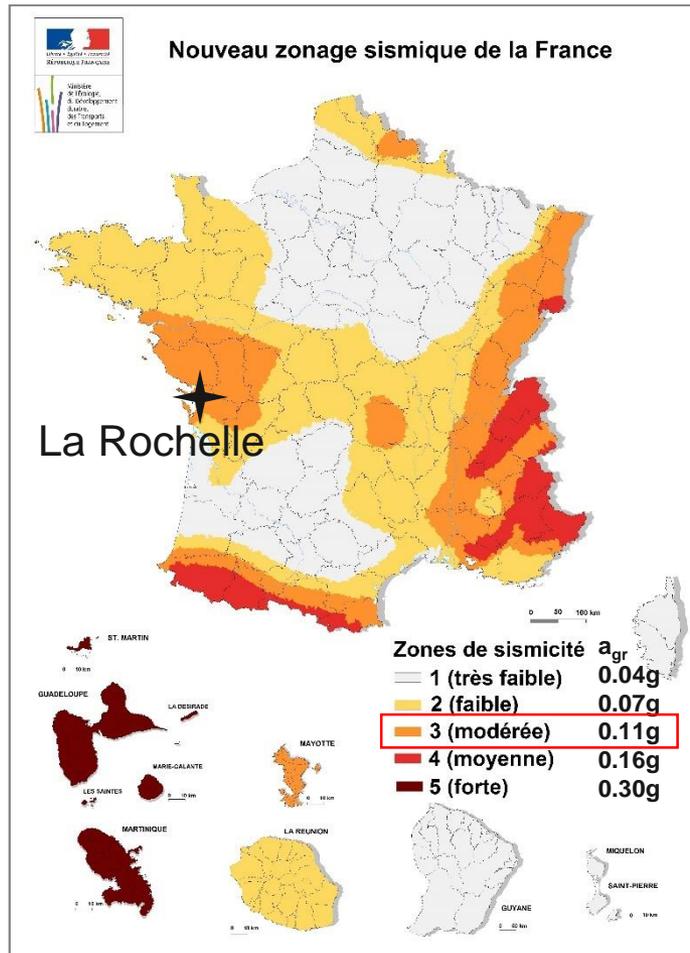
- Volume = 5 000 m³
- Diamètre intérieur = 20 m
- Hauteur de stockage = 17 m
- Poids de l'acier = 1 500 kN
- Charge totale en service = 42 000 kN
- Pression totale en service = 134 kPa

Conditions de sol



Conditions sismiques

8



Accélération de référence au rocher

$$a_{gr} = 0,11g$$

Accélération de calcul au rocher

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gr} = 0,242g$$

(d'après l'arrêté du 24 janvier 2011 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées)

Accélération de calcul au niveau du sol

Classe de sol E

Paramètre de sol $S = 1,8$

$$a_g \cdot S = 0,436g$$

Inclusions rigides CMC Ø320

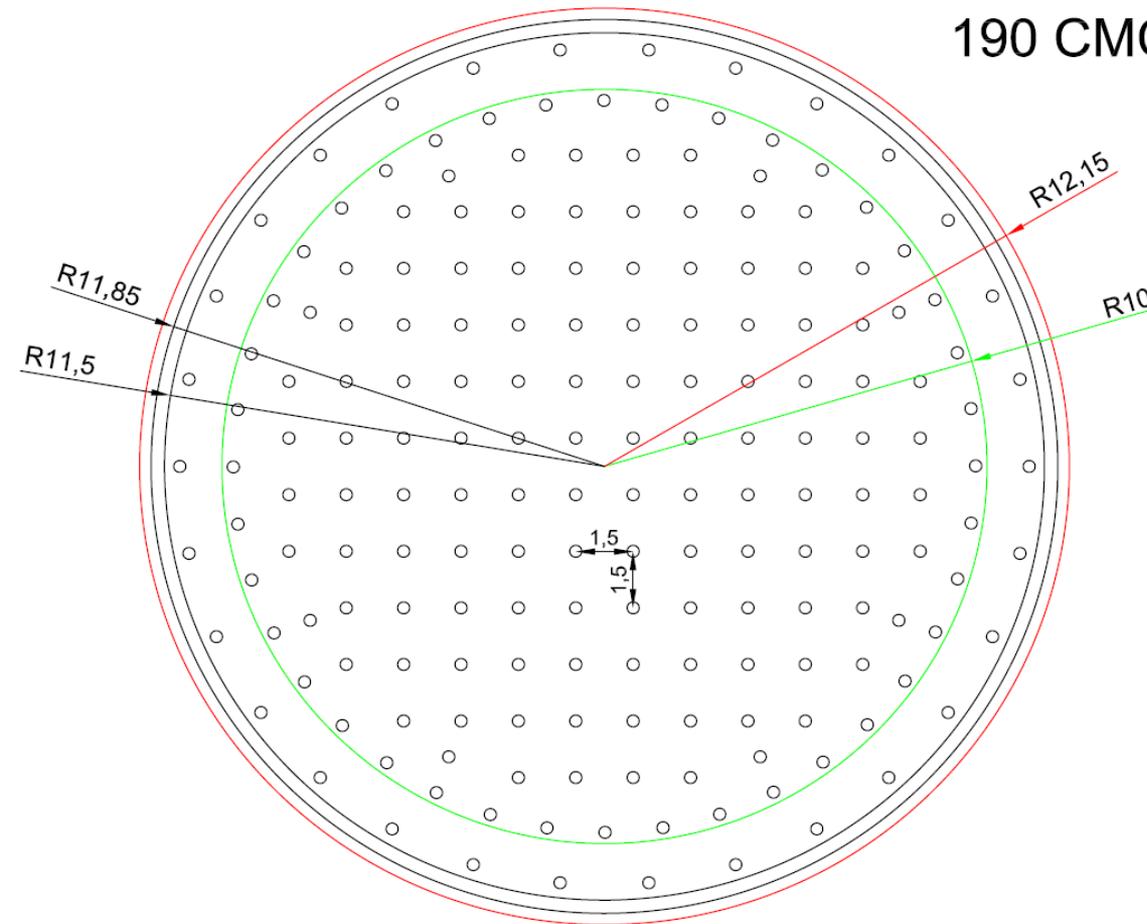


L'outil est vissé dans le sol jusqu'à la profondeur désirée puis lentement remonté sans déblais. Un coulis ou mortier est alors incorporé dans le sol sous faible pression par l'âme de la tarière creuse.

Inclusions rigides CMC Ø320

10

190 CMC



Inclusions rigides CMC

- Diamètre = 320 mm
- Maille = 1,5 m x 1,5 m
- $f_{ck28} = 16$ MPa
- Epaisseur matelas = 50 cm
- Contraintes admissibles:
 - ✓ ELS moy = 4,6 MPa
 - ✓ ELS max = 9,2 MPa
 - ✓ ELU moy = 7,0 MPa
 - ✓ ELU max = 8,3 MPa

Approches de dimensionnement

11

La justification de l'ouvrage sur sol renforcé doit être menée à la fois sous **chargement statique** ($G + Q = 10 + 134 = 144 \text{ kPa}$) et sous **chargement dynamique** ($a_g \cdot S = 0,436g$).

Pour chaque chargement (statique ou dynamique), la justification doit prendre en compte l'interaction entre le **sol**, les **CMC** et la **structure béton** du réservoir de méthanol.

L'analyse est simplifiée en étudiant séparément:

- L'interaction entre le sol et les CMC ;
- L'interaction entre le sol renforcé et la structure béton.

02

ISS sous chargement statique

- ⊕ Interaction Sol / Inclusions Rigides
- ⊕ Interaction Sol renforcé / Ouvrage

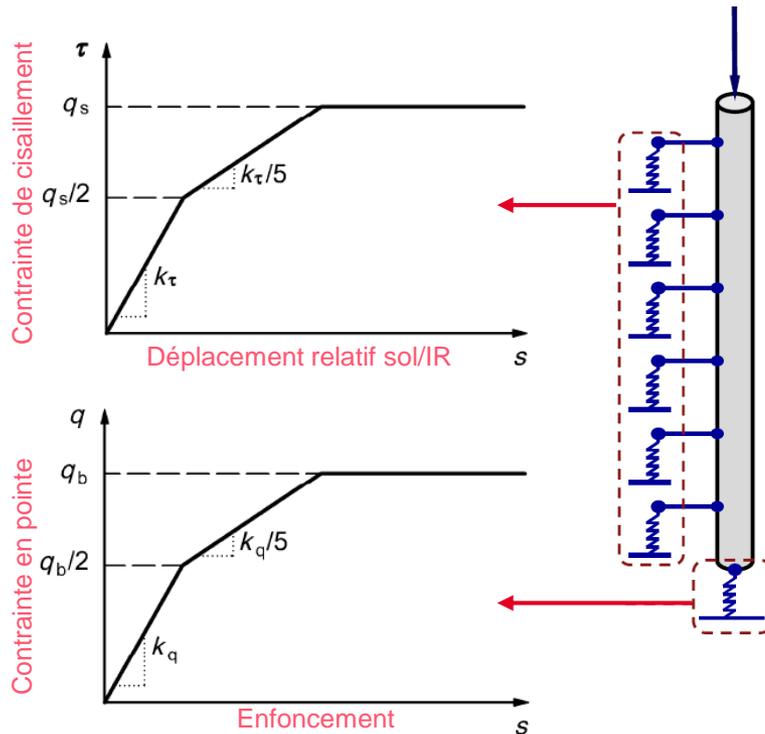
Interaction Sol / CMC

13

1. Calcul analytique

2. Calcul aux éléments finis

Courbes semi-empiriques de mobilisation de Frank & Zhao (EC7 – NF P94-262)



Courbes de Frank & Zhao

- ⊕ Comportement en frottement
 - ⊕ q_s : frottement latéral unitaire limite
 - ⊕ k_τ : pente de la loi de mobilisation
- ⊕ Comportement en pointe
 - ⊕ q_b : résistance limite en pointe
 - ⊕ k_q : pente de la loi de mobilisation

Détermination de q_b , k_q , q_s et k_τ à partir de:

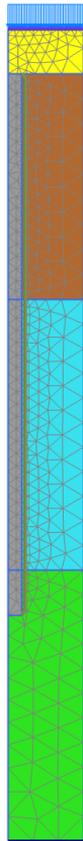
- ⊕ PMT et/ou CPT
- ⊕ Nature du sol
- ⊕ Géométrie de l'inclusion
- ⊕ Méthode d'exécution de l'inclusion

Interaction Sol / CMC

14

1. Calcul analytique

2. Calcul aux éléments finis



Lois de comportement disponibles

- + Linear Elastic model
- + Mohr-Coulomb model
- + Hardening soil model
- + Soft soil model
- + Soft soil creep model

Mohr-Coulomb model

- + Module d'Young
- + Coefficient de Poisson
- + Cohésion
- + Angle de frottement
- + Angle de dilatance

A partir des essais in-situ
(CPT, PMT, SPT)

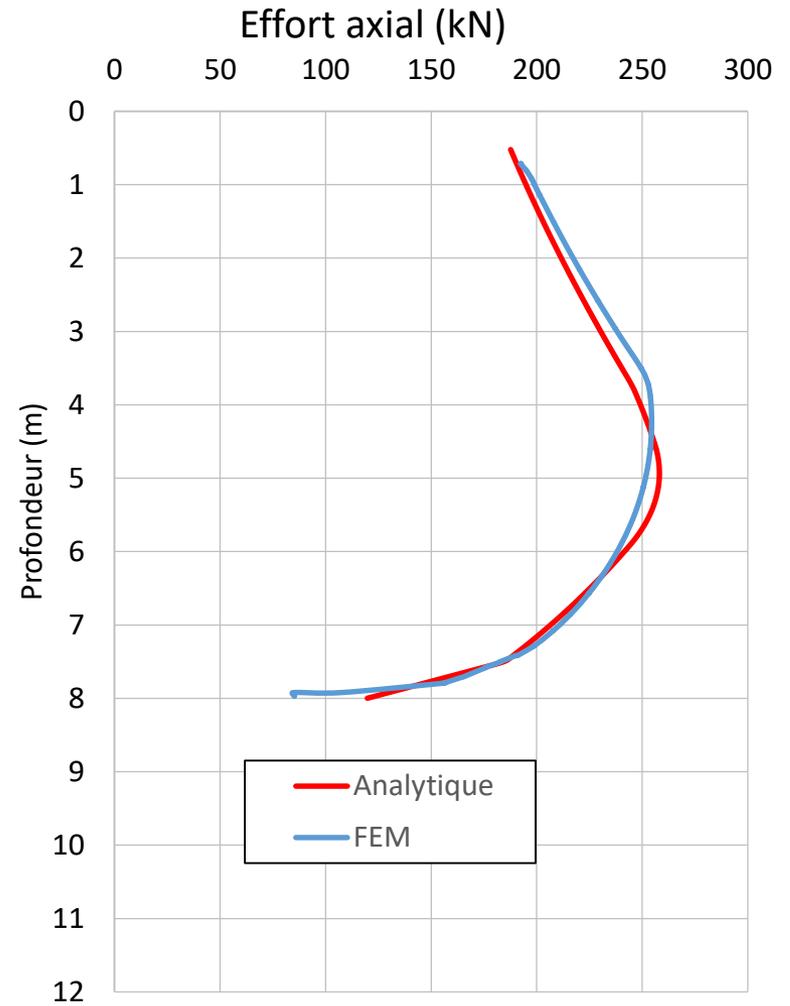
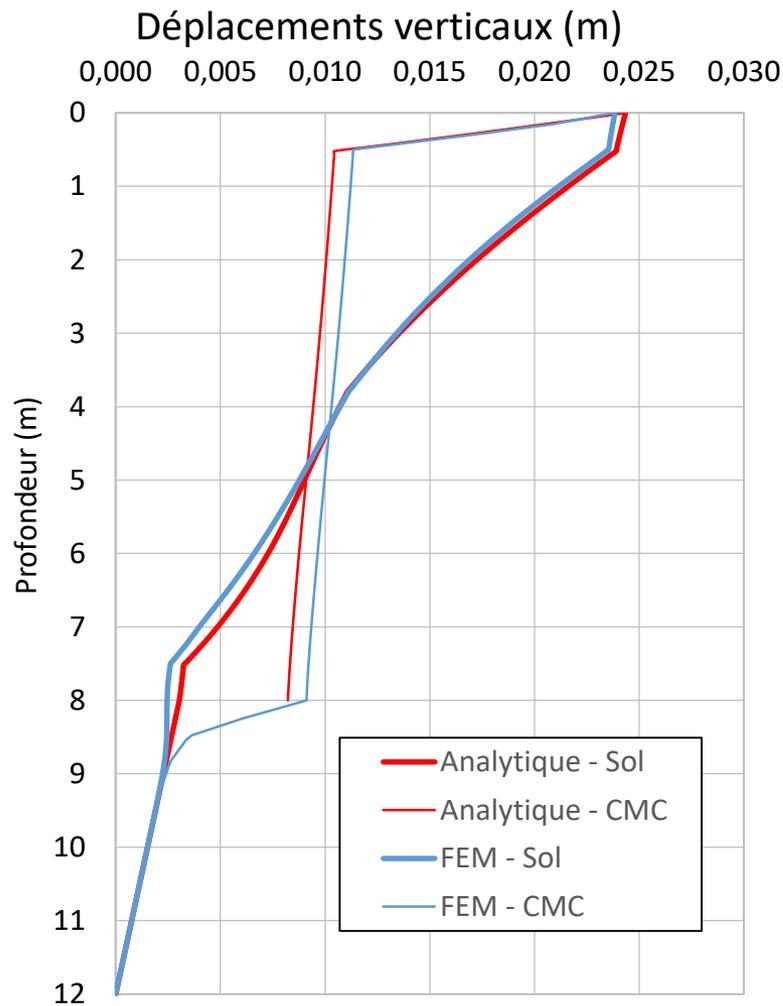
A partir des essais triaxiaux

Interaction Sol / CMC

15



Interaction Sol / CMC



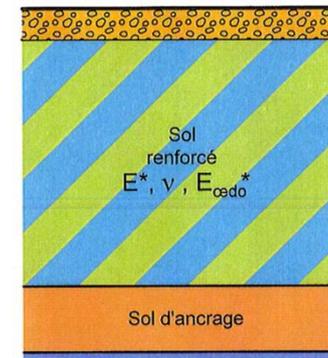
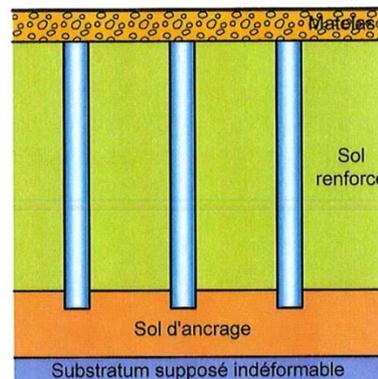
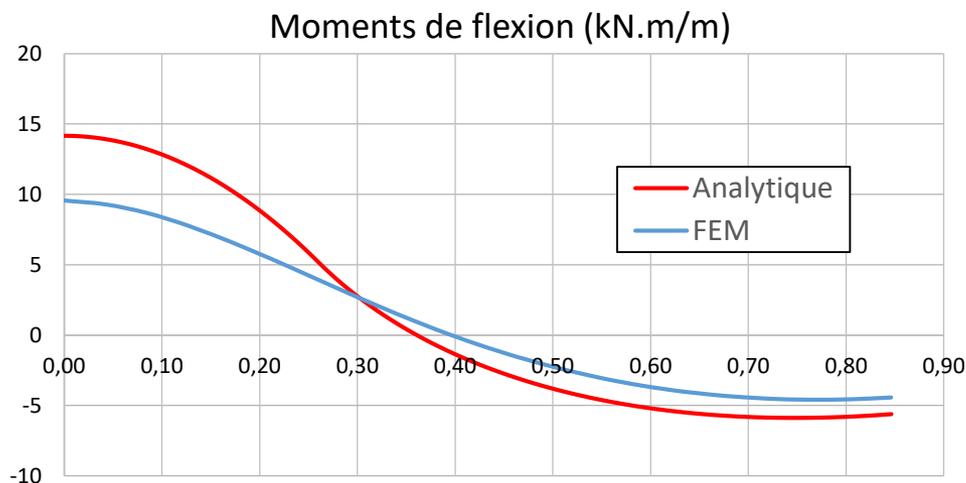
Interaction Sol Renforcé / Radier

17

La **méthode enveloppe des moments additionnels** développée dans ASIRI permet d'intégrer l'interaction entre le sol renforcé et le radier.

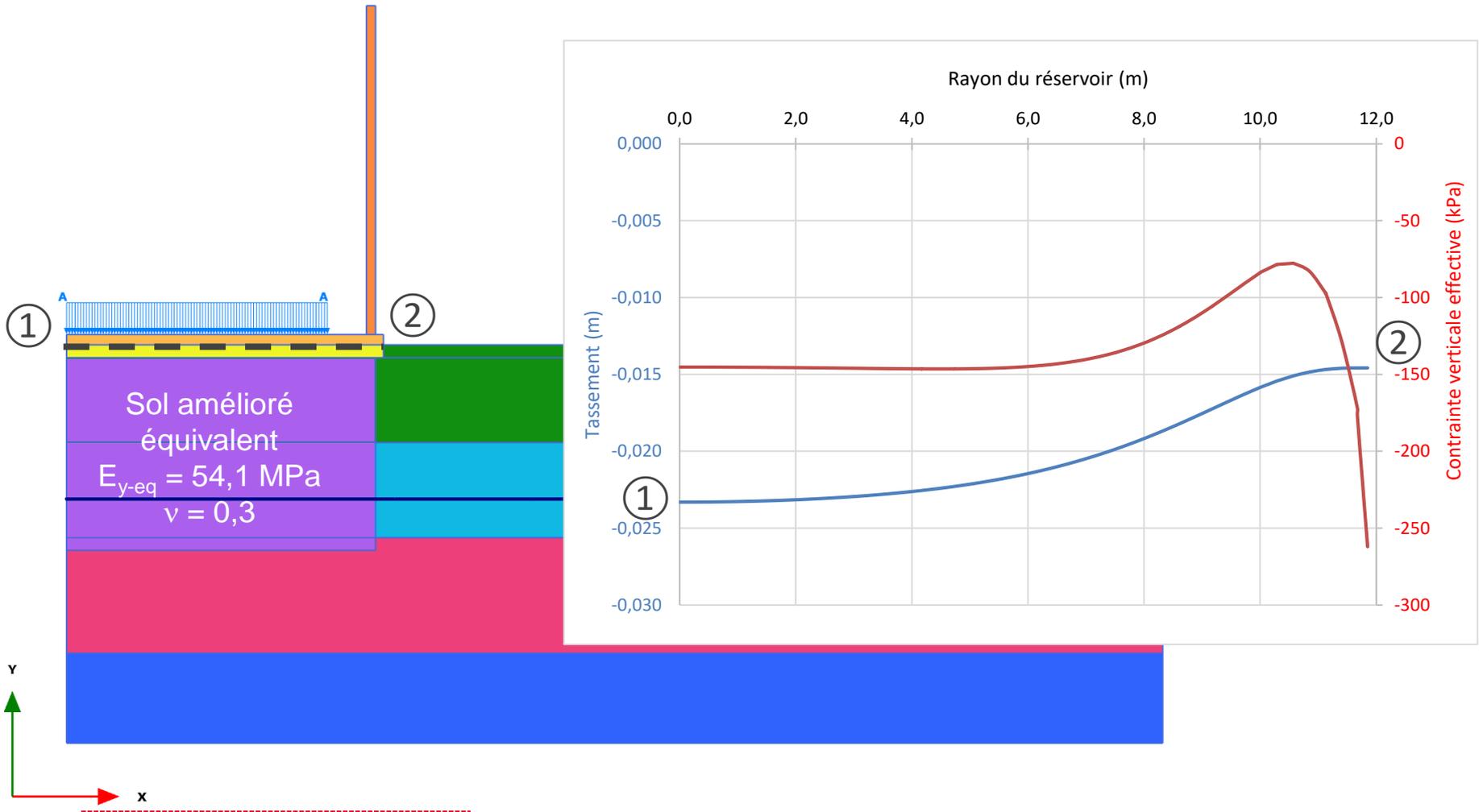
Elle consiste à:

- Définir les moments fléchissants additionnels liés à la présence des inclusions rigides;
- Définir le profil de sol homogénéisé équivalent.



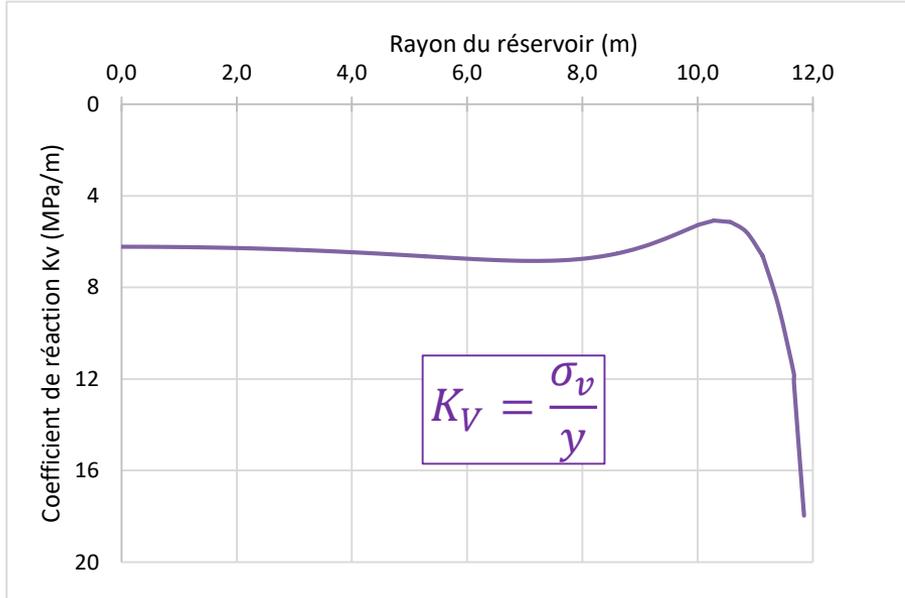
$$\begin{aligned} mb+mc &= [M_{sup}-M_{inf} ; -(M_{sup}-M_{inf})] \\ &= [+14 \text{ kN.m/m} ; -14 \text{ kN.m/m}] \end{aligned}$$

Interaction Sol Renforcé / Radier



Interaction Sol Renforcé / Radier

19



$$\begin{aligned} mb+mc &= [M_{\text{sup}}-M_{\text{inf}} ; -(M_{\text{sup}}-M_{\text{inf}})] \\ &= [+14 \text{ kN.m/m} ; -14 \text{ kN.m/m}] \end{aligned}$$

Conclusions

- L'entreprise de renforcement de sol a défini un **profil de coefficients de réaction K_V** représentant le sol renforcé et l'enveloppe des **moments additionnels** liés à la présence des CMC
- Le BE Structure a dimensionné le radier à partir d'un calcul de type « **dalles sur appuis élastiques** ». Les moments additionnels sont ajoutés aux résultats obtenus par ce calcul.

03

ISS sous chargement dynamique

- ⊕ Approche pseudo-statique
- ⊕ Calcul 3D dynamique temporel

Approche pseudo-statique

21

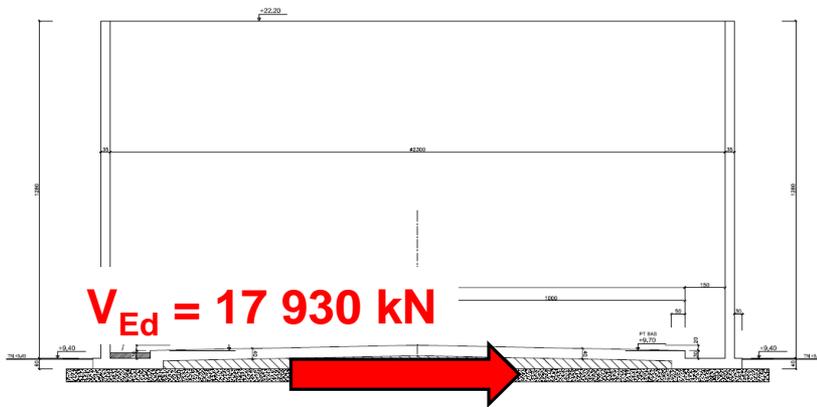
L'objectif est d'estimer les sollicitations dans les CMC lors du séisme.

Les CMC doivent être dimensionnées de façon à résister aux effets des deux types d'action suivants:

- a) **Forces d'inertie** provenant de la superstructure
- b) **Forces d'origine cinématique** résultant de la déformation du sol environnant due au passage des ondes sismiques

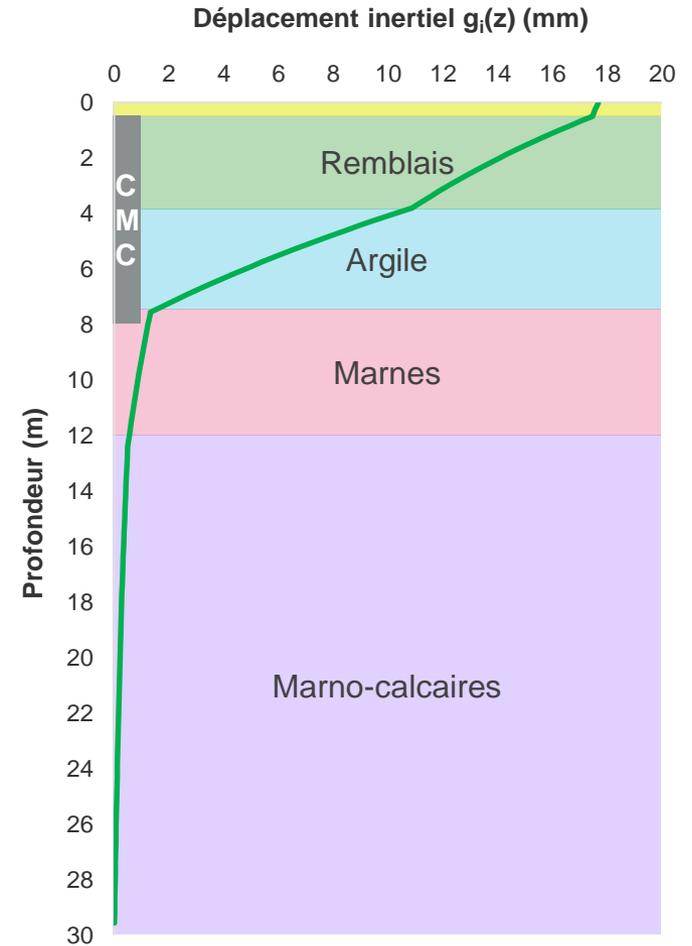
Ces efforts génèrent des déformations de cisaillement dans le sol. Les Inclusions Rigides sont alors soumises à ce champ de déformations.

Forces d'inertie



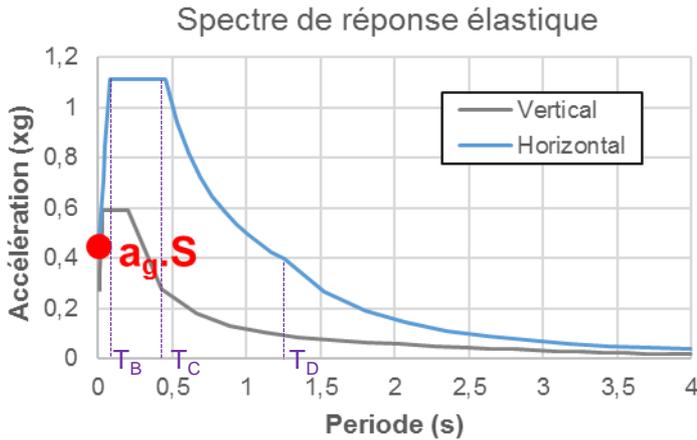
+

=

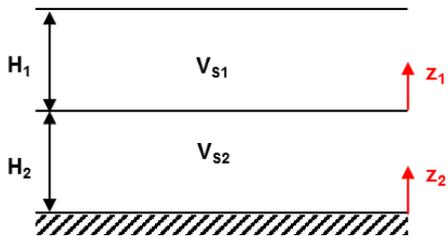


Forces d'origine cinématique

Méthode 1 : EC8 + procédure du bi-couche



$$d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D = 61 \text{ mm}$$

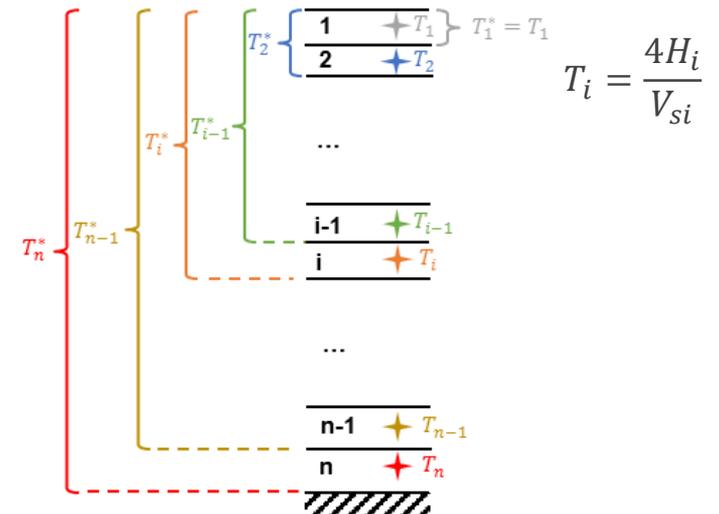


$$\frac{\partial^2 u_i(z_i, t)}{\partial t^2} - V_{si}^2 \times \frac{\partial^2 u_i(z_i, t)}{\partial z_i^2} = 0$$

$u_i(z_i, t)$: déplacement horizontal dans la couche i

V_{Si} : vitesse des ondes de cisaillement dans la couche i

Méthode 2 : Méthode de Madera



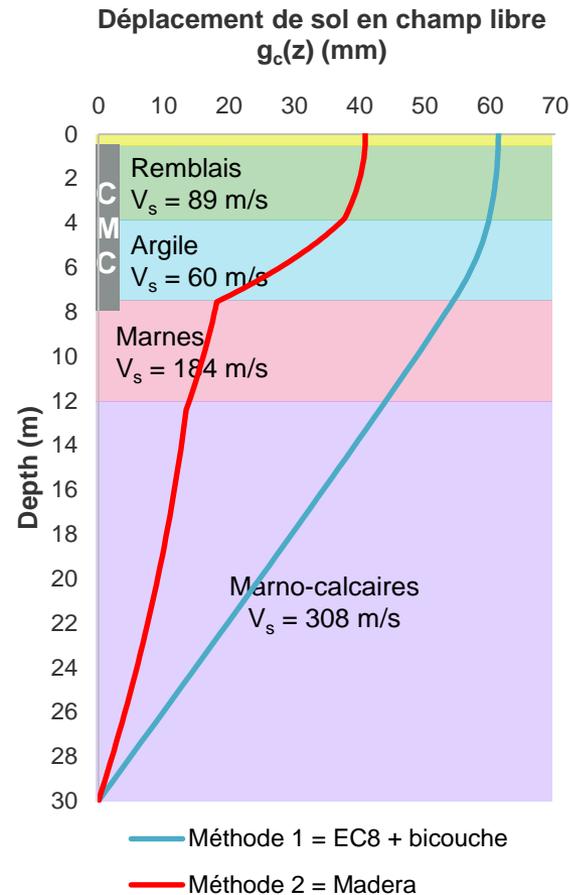
$$T^* = T_n^* = 0,61 \text{ s}$$

$$d_{max} = \frac{a_g S}{\omega^2} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot a_g \cdot S \cdot T^{*2} = 41 \text{ mm}$$

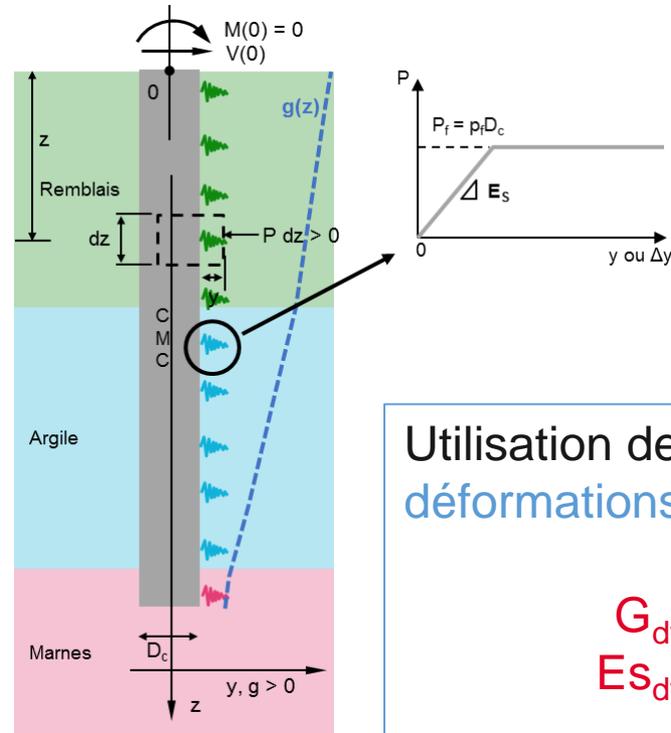
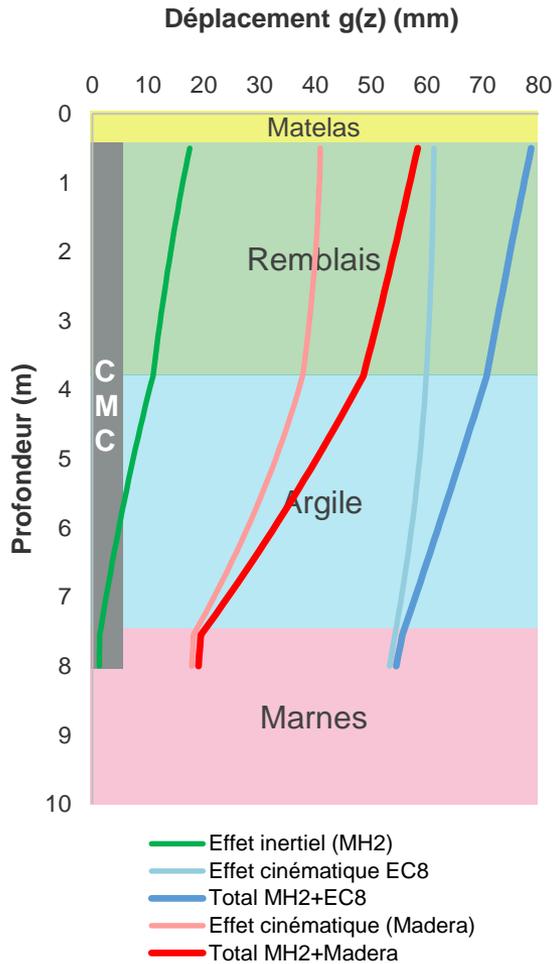
$$g_c(z_i) = d_{max} - \frac{T_i^{*2}}{4\pi^2} a_g S$$

Forces d'origine cinématique

25



Cumul des deux effets



Utilisation de modules en petites déformations

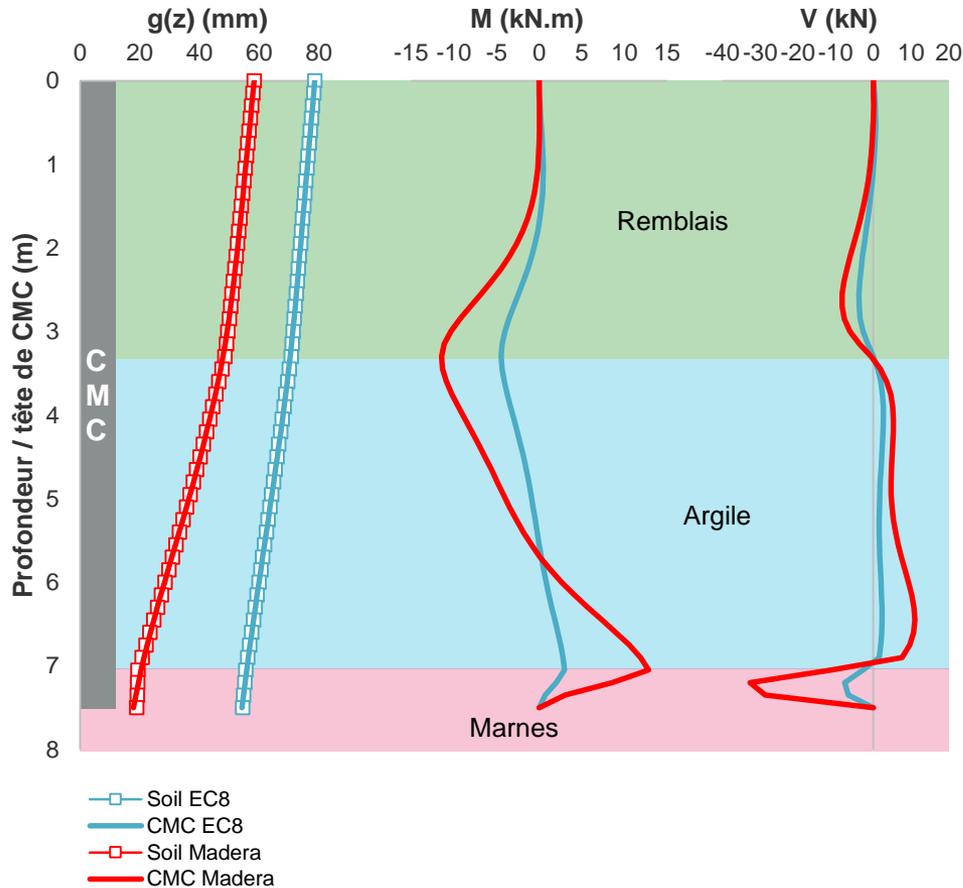
$$G_{\text{dyn}} = 4 G_{\text{stat}}$$

$$E_{s_{\text{dyn}}} = 4 E_{s_{\text{stat}}}$$

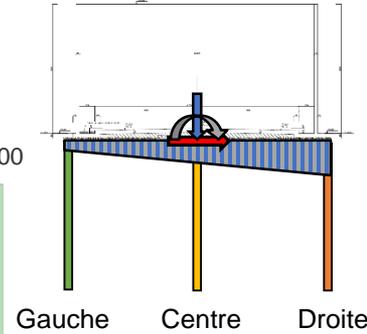
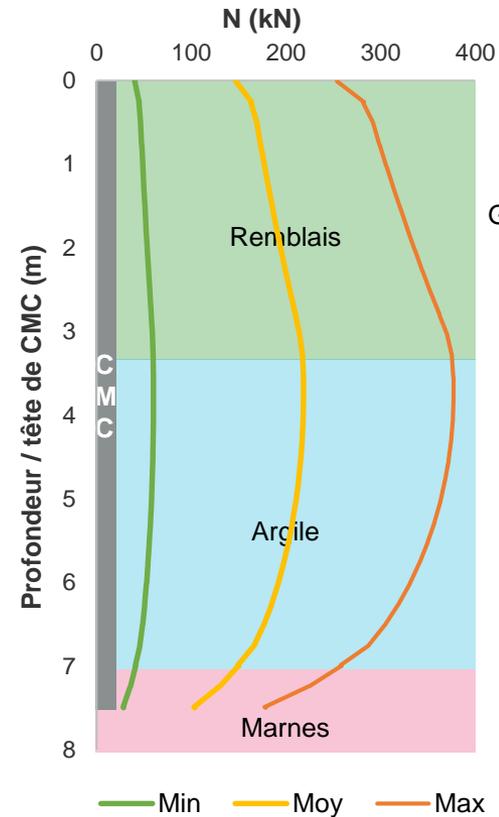
Estimation du rapport à partir de l'EC8 – *Partie 5 – Tableau 4.1* et du guide AFPS *Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques Tableau G.II.*

Calcul des sollicitations dans les CMC 27

Moment de flexion et effort tranchant

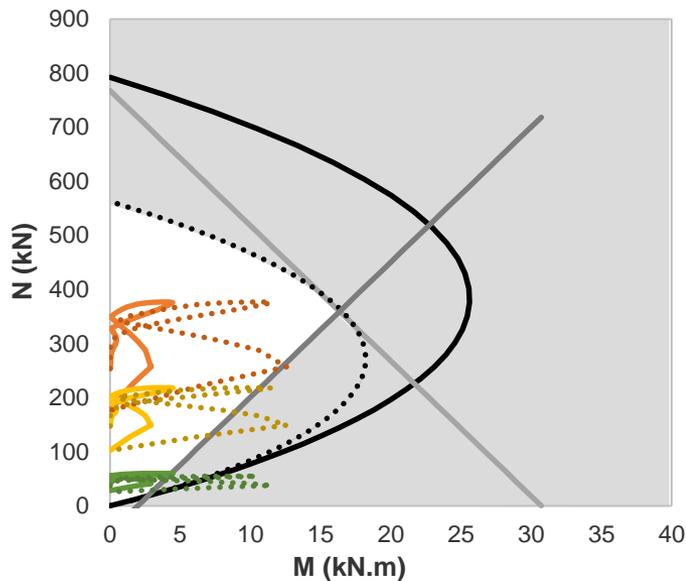


Effort axial

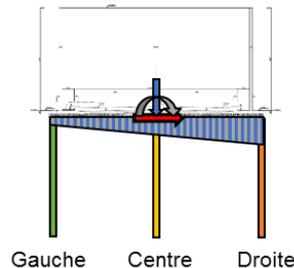


Calcul des sollicitations dans les CMC 28

Vérification en flexion composée



- EC2
- ASIRI ELU max
- ASIRI ELU moy
- ASIRI ELU traction
- CMC droite - MH2+EC8
- CMC centre - MH2+EC8
- CMC gauche - MH2+EC8
- CMC droite - MH2+Madera
- CMC centre - MH2+Madera
- CMC gauche - MH2+Madera



- EC 2 – Section 12 – Structures en béton non armé ou faiblement armé

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$N_{Rd} = A_{ref} \times f_{cd}$$

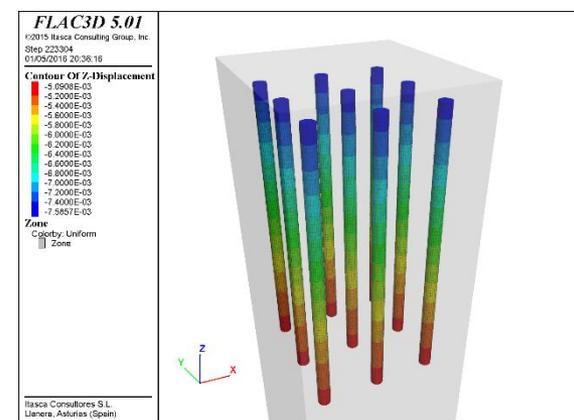
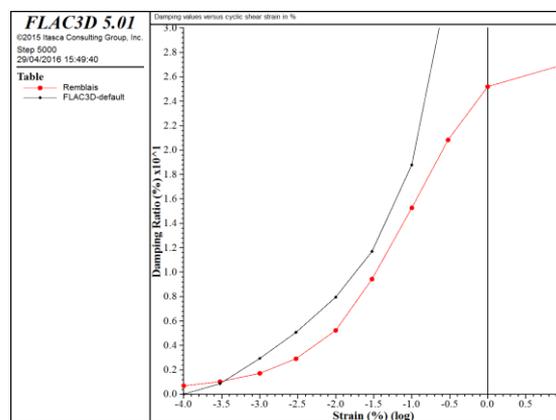
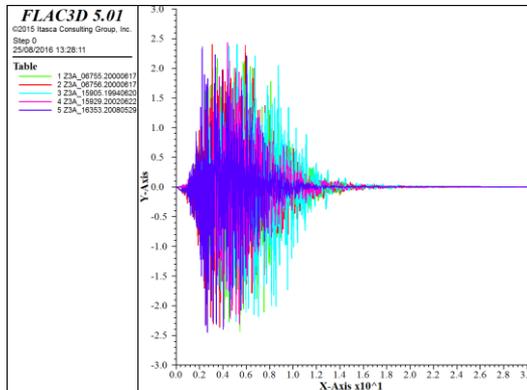
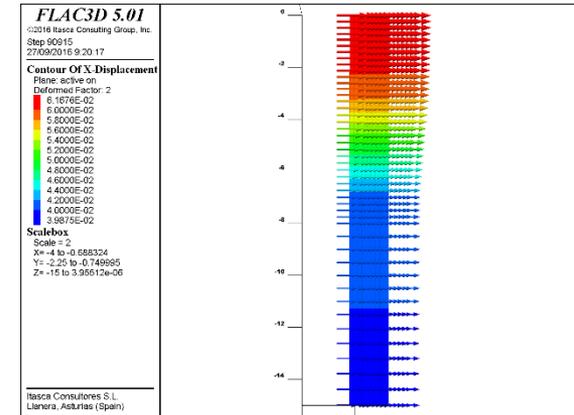
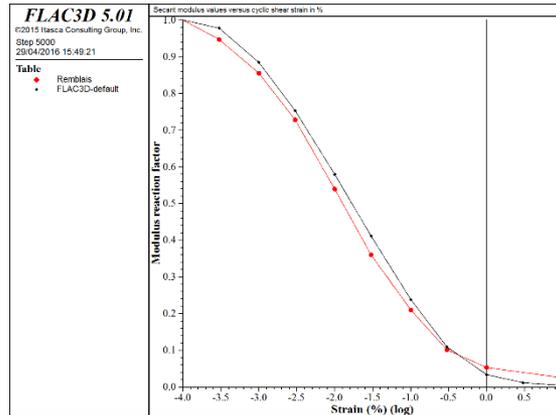
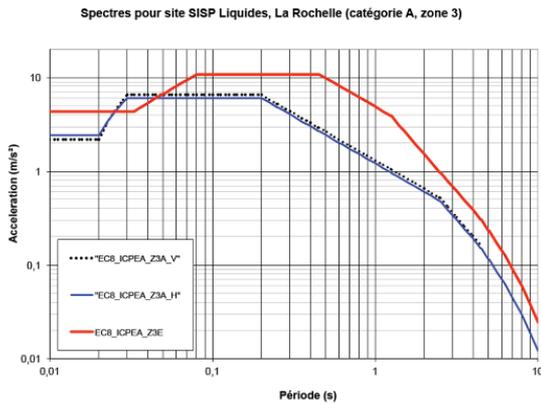
- ASIRI, chapitre 5, ELU
 - La contrainte maximale de compression est limitée à f_{cd} (k1, k2 & k3);
 - La contrainte moyenne de compression sur la seule section comprimée est limitée à **7 MPa**;
 - **Dans le domaine 2**, il est propose de ne pas armer les inclusions sous reserve que la contrainte maximale de traction soit acceptable ($< f_{ctd}$).

Calcul 3D dynamique temporel

Accélérogrammes

Lois de comportement

Modèles simplifiés



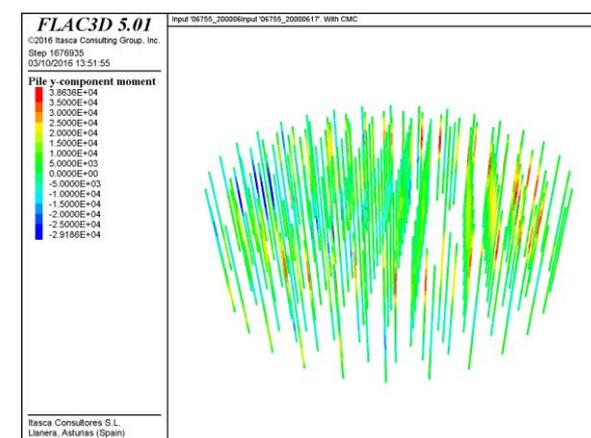
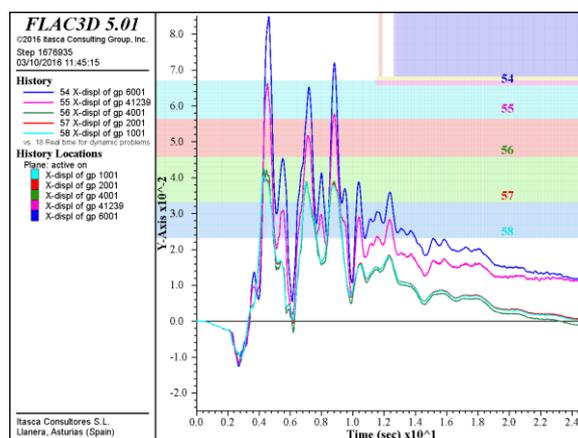
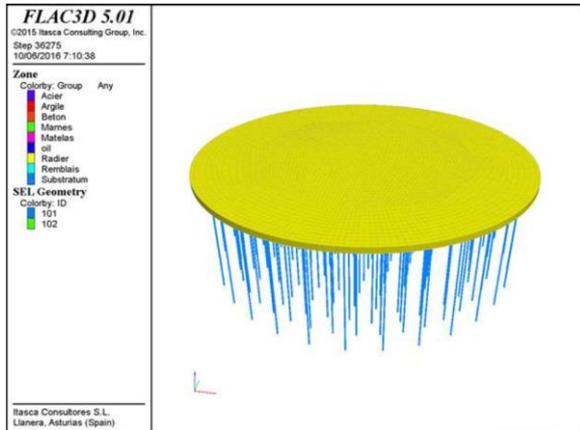
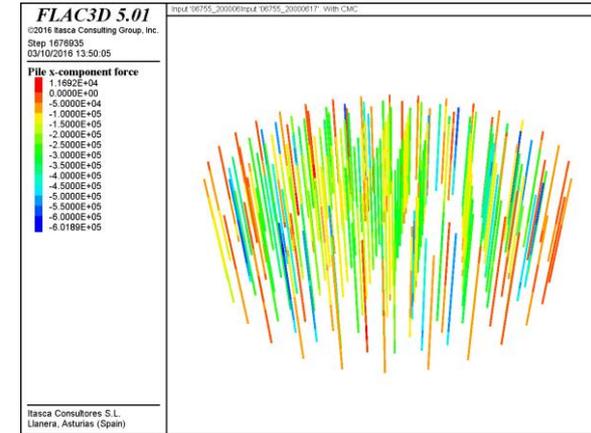
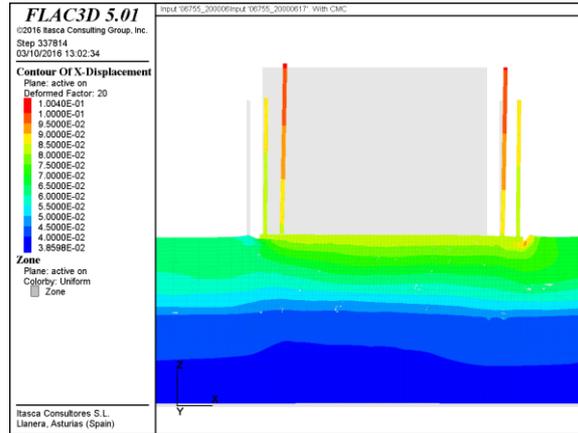
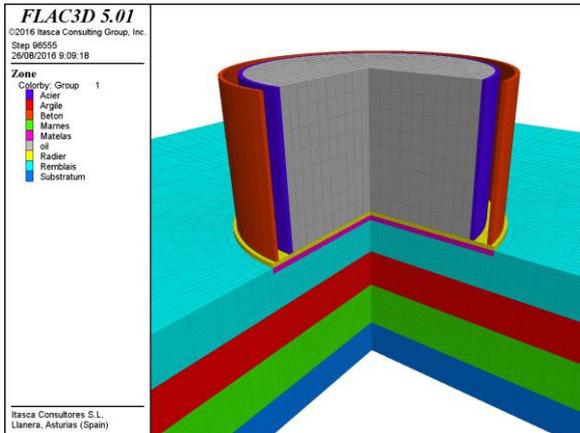
Calcul 3D dynamique temporel

30

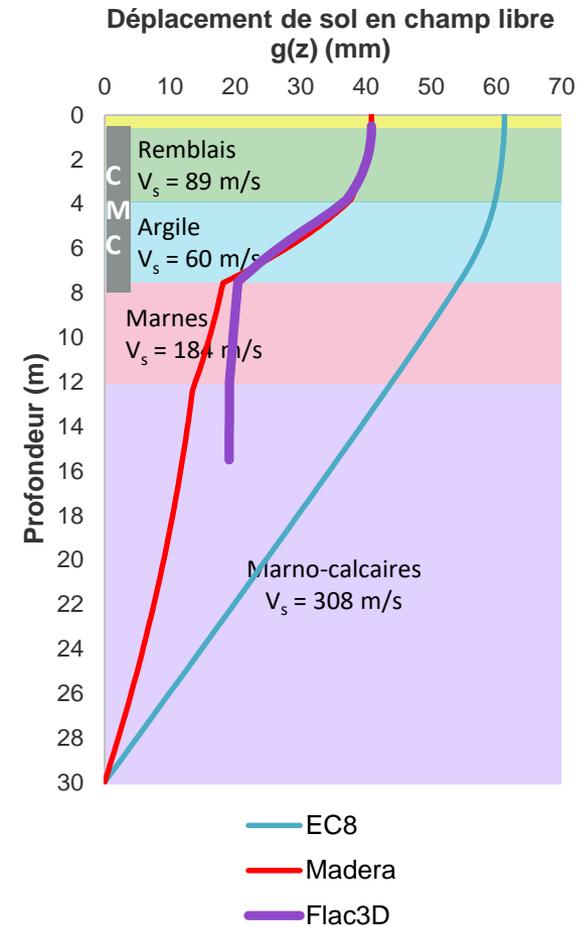
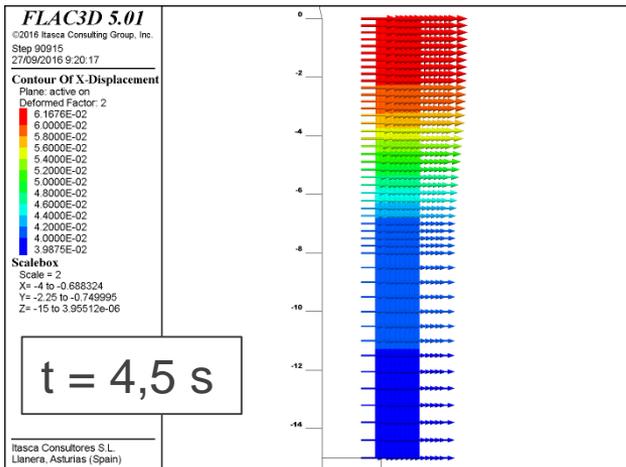
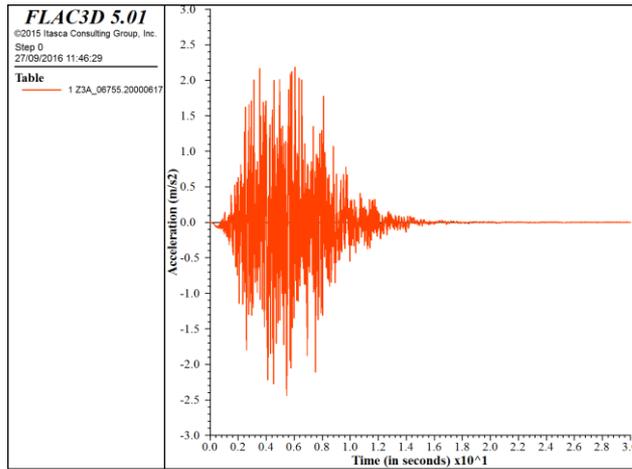
Modèle 3D

Déplacements

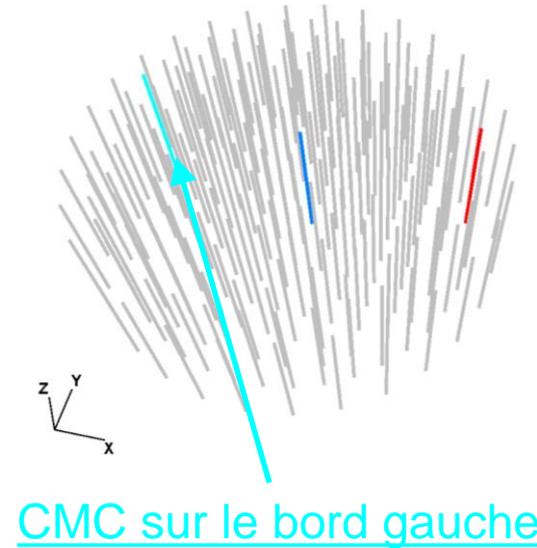
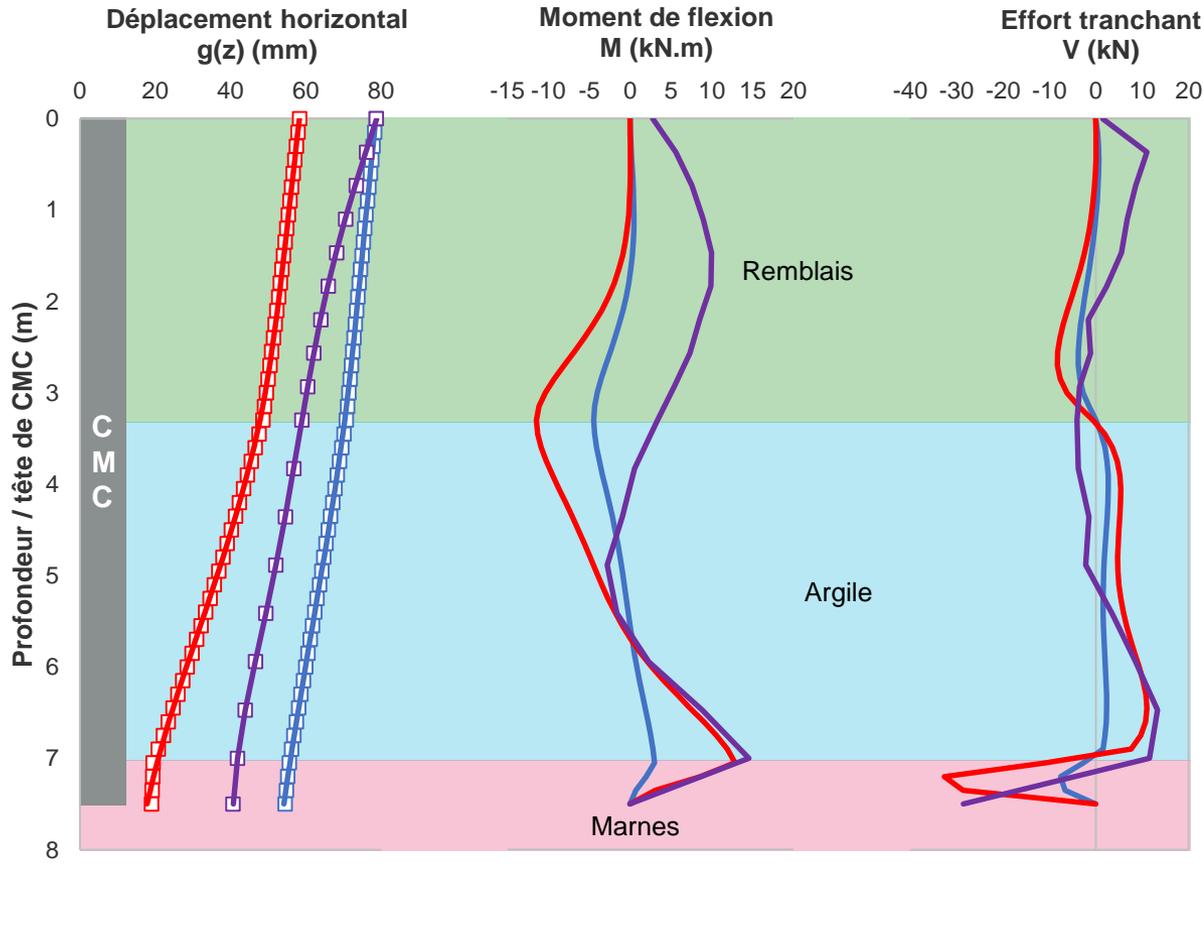
Sollicitations dans CMC



Comparaison : effet cinématique



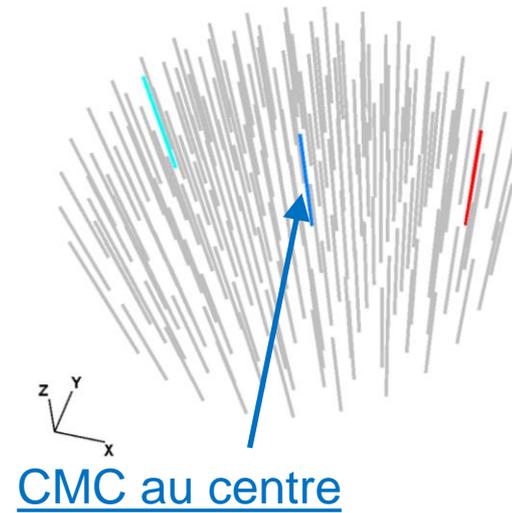
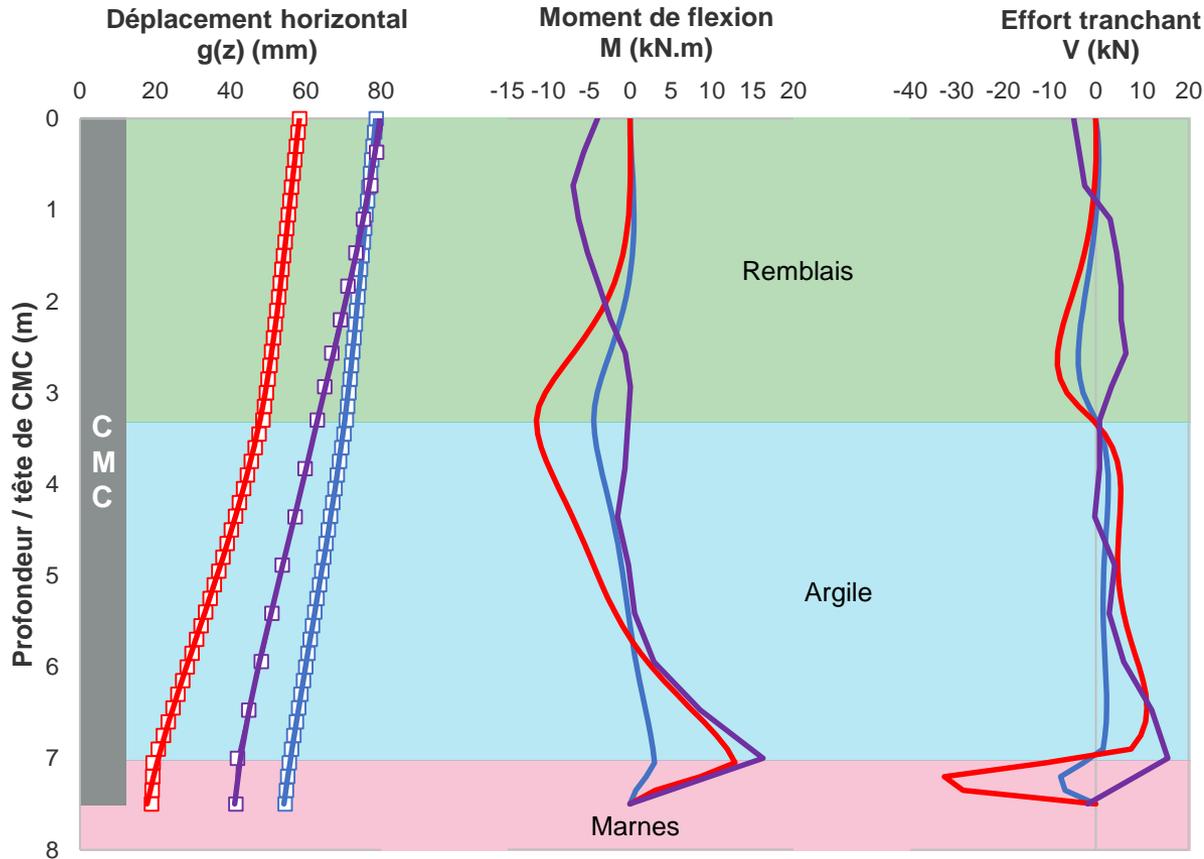
Comparaison : cumul des effets



CMC sur le bord gauche

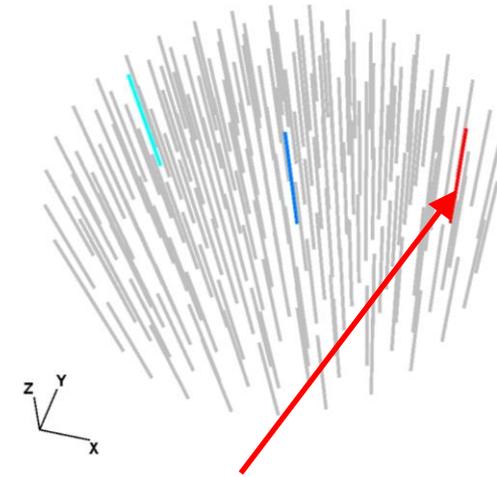
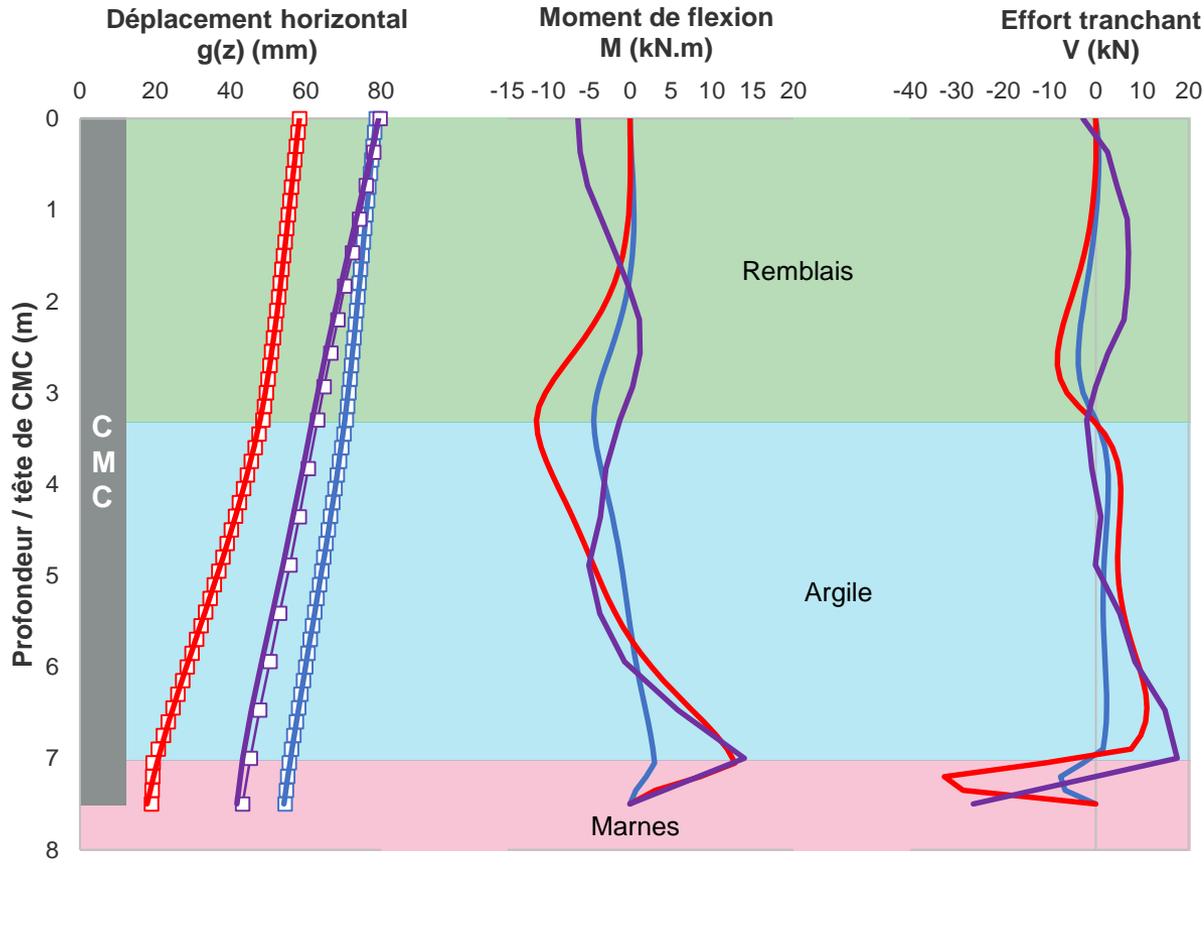
- Soil - MH2+EC8
- Soil - MH2+Madera
- Soil - Flac 3D
- CMC - MH2+EC8
- CMC - MH2+Madera
- CMC - Flac 3D

Comparaison : cumul des effets



- Soil - MH2+EC8
- Soil - MH2+Madera
- Soil - Flac 3D
- CMC - MH2+EC8
- CMC - MH2+Madera
- CMC - Flac 3D

Comparaison : cumul des effets



CMC sur le bord droit

Conclusions

35

L'interaction **sol / inclusions rigides / ouvrage** est certes complexe mais peut être raisonnablement approchée par des **méthodes analytiques**, que le chargement soit **statique** ou **dynamique**.

Sous chargement **statique**, les lois de mobilisation semi-empiriques de Frank et Zhao permettent de définir l'**interaction sol / inclusions rigides**. Le principe de la méthode des moments additionnels peut être élargie au cas des radiers pour évaluer l'interaction **sol renforcé / radier**.

Sous chargement **dynamique**, l'approche **pseudo-statique** s'est avérée fiable pour estimer les sollicitations dans les inclusions rigides lors d'un séisme. Le modèle analytique **MH2** développé dans ASIRI a, en particulier, permis de traiter l'**effet inertiel**.

Des approfondissements restent à mener sous chargement dynamique, en particulier pour étudier l'**atténuation éventuelle des efforts inertiels** dans la superstructure grâce à la présence des inclusions rigides et du matelas de répartition. Ce sera un des objectifs d'**ASIRI+**.