



**HAL**  
open science

# **Analyse du comportement sismique des voiles porteurs avec différents pourcentages de ferrailage et conditions limites**

J. Mazars, C. Cremer, Panagiotis Kotronis

## ► **To cite this version:**

J. Mazars, C. Cremer, Panagiotis Kotronis. Analyse du comportement sismique des voiles porteurs avec différents pourcentages de ferrailage et conditions limites. Vème Colloque National Génie Parasismique et réponse dynamique des ouvrages AFPS'99, 1999, Cachan, France. pp.612-620. <hal-01007876>

**HAL Id: hal-01007876**

**<https://hal.science/hal-01007876v1>**

Submitted on 28 Jan 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## **ANALYSE DU COMPORTEMENT SISMIQUE DES VOILES PORTEURS AVEC DIFFERENTS POURCENTAGES DE FERRAILLAGE ET CONDITIONS LIMITES**

### *ANALYSIS OF SEISMIC BEHAVIOUR OF STRUCTURAL WALLS WITH VARIOUS REINFORCEMENTS AND BOUNDARY CONDITIONS*

**Jacky MAZARS\*, Cécile CREMER\*\*, Panagiotis KOTRONIS\***

#### **RESUME**

Dans le cadre du projet de recherche ICONS-TMR, deux structures de cinq étages, CAMUS III et CAMUS IV, ont été testées sous sollicitations dynamiques au CEA Saclay. Des calculs numériques prédictifs ont été menés pour les deux projets en utilisant le code éléments finis multicouches EFICOS et le code DYNAFLOW. Les résultats sont comparés à ceux obtenus pour l'essai CAMUS I, une maquette de même géométrie, qui a été testée lors d'un précédent programme de recherche français. L'influence de différentes conditions de renforcement et de conditions limites est étudiée dans cet article.

**Mots clés** : voiles porteurs, EC8, PS92, éléments finis à couches multiples, conditions limites, pourcentage de renforcement, interaction sol-structure, décollement.

#### **ABSTRACT**

Within the framework of the ICONS-TMR research project, two five-story buildings, the so-called CAMUS III and CAMUS IV specimens, have been tested under dynamic loading in CEA Saclay. Predictive numerical calculations have been made for the two projects using a multi-layered finite element code (EFICOS) and the DYNAFLOW code. The results are compared with those of the previous French research program CAMUS I, a mock-up with the same geometry. Special attention has been paid on the influence of different reinforcement ratios (CAMUS III - CAMUS I) and boundary conditions (CAMUS IV - CAMUS I).

**Keywords** : Structural walls, EC8, PS92, multi-layered finite elements, boundary conditions, reinforcement ratio, soil-structure interaction, uplift.

---

\* Laboratoire de Mécanique et de Technologie (LMT) & ICONS network, Cachan, France

\*\* Géodynamique et Structure & ICONS network, Bagneux, France

## 1. INTRODUCTION

Cet article traite de l'influence de conditions de renforcement et de conditions limites différentes sur la réponse des structures en béton armé, soumises à des sollicitations sismiques. Dans le cadre du projet de recherche ICONS-TMR, deux structures de cinq étages, les spécimens CAMUS III et IV, ont été testées sous chargement dynamique au CEA Saclay. Des calculs numériques prédictifs ont été réalisés pour les deux projets en utilisant le code éléments finis à couches multiples EFICOS et le code DYNAFLOW. Le comportement des spécimens est comparé à celui de CAMUS I, réalisé lors d'un précédent projet de recherche français.

CAMUS I est dimensionné selon le code parasismique français PS92 et CAMUS III selon l'Eurocode 8, pour le même moment ultime en base. Les deux maquettes sont encastrées dans la table vibrante. La comparaison a pour but de mettre en évidence l'influence de différents pourcentages de renforcement et d'opposer les concepts « monofuse » et « multifuse » qui gouvernent les deux codes.

La maquette CAMUS IV, dimensionnée selon le code français PS92 (même renforcement que CAMUS I), est posée sur une couche de sable, ce qui permet le décollement de la structure. Le but de ce test est d'analyser l'effet des conditions limites souples sur la réponse de la structure.

## 2. DESCRIPTION DE LA MAQUETTE CAMUS I

CAMUS I est une maquette à échelle 1/3 composée de murs en béton armé supportant six planchers (figure 1). Une fondation en béton fortement armé permet un encastrement à la table vibrante. La hauteur totale de la maquette est de 5.1 m et la masse totale est estimée à 36 tonnes. CAMUS I a été dimensionnée selon le code sismique français PS92. Le renforcement est exposé dans le tableau 1. Les détails du programme expérimental ainsi que les résultats peuvent être trouvés dans CAMUS International Benchmark (1997) et Queval et al. (1998).

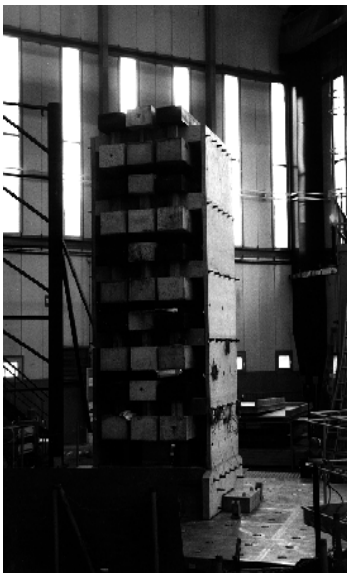


Figure 1. Maquette CAMUS I/  
Mock-up CAMUS I.

	Extrémités de voile	Partie médiane de
5 <sup>ème</sup> étage	$(1d4.5)*2=32\text{mm}^2$	$4d5=78.4\text{mm}^2$
4 <sup>ème</sup> étage	$(1d6)*2=57\text{mm}^2$	$4d5=78.4\text{mm}^2$
3 <sup>ème</sup> étage	$(1d8+1d6+1d4.5)*2=189\text{mm}^2$	$4d5+2d4.5=110\text{mm}^2$
2 <sup>ème</sup> étage	$(2d8+2d6+2d4.5)*2=378\text{mm}^2$	$4d5+2d4.5+1d6=138$
1 <sup>er</sup> étage	$(4d8+2d6+2d4.5)*2=579\text{mm}^2$	$4d5+2d4.5+1d6=138$

Tableau 1. Maquette CAMUS I - Renforcement/  
CAMUS I mock-up – Reinforcement.

	Extrémités de voile	Partie médiane de
5 <sup>ème</sup> étage	$(2d8)*2=201\text{mm}^2$	$14d4.5=223\text{mm}^2$
4 <sup>ème</sup> étage	$(4d8)*2=402\text{mm}^2$	$14d4.5=223\text{mm}^2$
3 <sup>ème</sup> étage	$(4d8)*2=402\text{mm}^2$	$14d4.5=223\text{mm}^2$
2 <sup>ème</sup> étage	$(4d8+2d6+2d4.5)*2=579\text{mm}^2$	$10d4.5=159\text{mm}^2$
1 <sup>er</sup> étage	$(4d8+2d6+2d4.5)*2=579\text{mm}^2$	$10d4.5=159\text{mm}^2$

Tableau 2. Maquette CAMUS III - Renforcement/  
CAMUS III mock-up – Reinforcement.

### 3. CAMUS III - CAMUS I : INFLUENCE DU POURCENTAGE DE RENFORCEMENT

#### 3.1. Description de CAMUS III

La maquette CAMUS III possède les mêmes caractéristiques géométriques que CAMUS I et a été dimensionnée pour le même moment ultime en base. Par contre, elle suit les recommandations de l'EC8 et le renforcement des niveaux supérieurs est plus important (tableau 2).

#### 3.2. Programme de chargement

Le programme sismique de chargement appliqué à la table vibrante Azalée du CEA consiste en différents accélérogrammes de niveaux croissants jusqu'à la rupture. Dans cet article, les résultats pour la séquence Nice 0.4g sont présentés. Le signal synthétique de Nice est représentatif du spectre de dimensionnement français.

#### 3.3. Modèle numérique

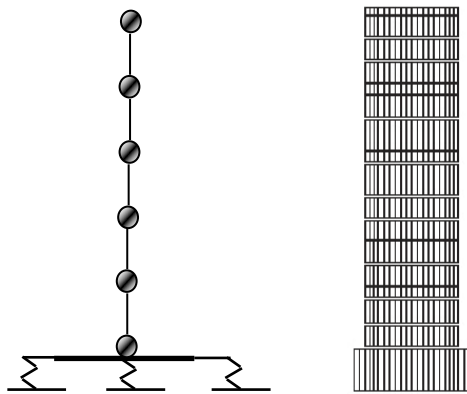


Figure 2. Modèle numérique – CAMUS III/  
Numerical model – CAMUS III

Le code éléments finis EFICOS est utilisé pour les calculs. Créé au LMT, ce code utilise la méthode des éléments finis à poutres multi-couches. Les lois constitutives, basées sur la mécanique de l'endommagement pour le béton et sur un modèle de plasticité pour l'acier, sont à définir dans chaque couche. Le code utilise l'algorithme de la matrice sécante initiale de raideur, où le comportement non linéaire apparaît dans le second membre de l'équation d'équilibre. Le modèle éléments finis 2D représente le voile porteur au moyen de 24 éléments poutres constitués chacun de 37 couches. Un seul voile est considéré. Pour reproduire la flexibilité de la table vibrante, trois poutres linéaires sont utilisées et la table est modélisée par une poutre raide horizontale.

#### 3.4. Lois constitutives

La loi constitutive utilisée pour le béton est basée sur la mécanique de l'endommagement développée au LMT (La Borderie 1991). Le modèle est conçu pour décrire le comportement des microfissures et comprend :

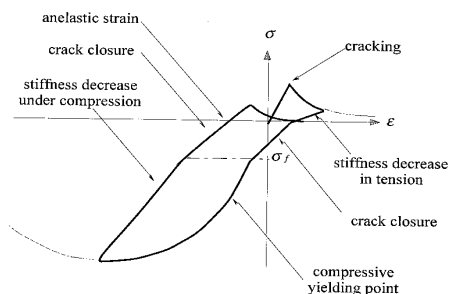


Figure 3. Modèle du béton /  
Concrete model.

- Deux variables d'endommagement (en traction et en compression) ;
- Déformations permanentes couplées à l'endommagement ;
- Comportement unilatéral. Ouverture et refermeture des fissures avec recouvrement de la raideur.

Un modèle classique de plasticité avec écrouissage cinématique linéaire est utilisé pour l'acier. Les armatures sont introduites dans des couches spéciales dont le comportement est une combinaison de

celui de l'acier et du béton, au moyen d'une loi d'homogénéisation. Les paramètres choisis pour les matériaux peuvent être trouvés dans Queval (1998) et Davenne et al. (1999).

### 3.5. Analyse modale

Les résultats de l'analyse modale sont présentés dans le tableau 3 pour le modèle CAMUS III encastré à la table. Les résultats sont très sensibles à la souplesse de la table, induite par trois ressorts linéaires.

	1 <sup>er</sup> mode horizontal (Hz)	1 <sup>er</sup> mode vertical (Hz)
Calculs préliminaires	7.25	20.0

Tableau 3. Analyse modale/Modal analysis.

### 3.6. Analyse des résultats

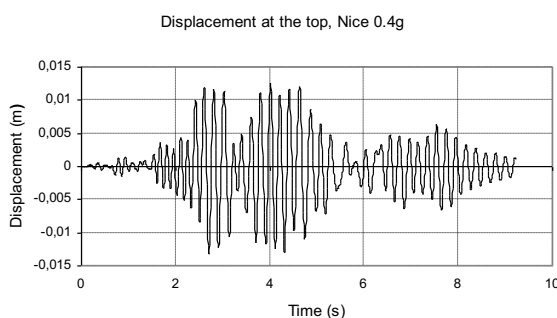


Figure 4. Histoire de déplacement en tête/Time history of the top

Les résultats numériques obtenus avec le code EFICOS (Kotronis & Mazars 1998) pour le modèle CAMUS III, soumis à l'accélérogramme de Nice à 0.4g, sont analysés ci-après.

L'histoire du déplacement en tête est présentée à la figure 4. Le comportement du modèle est dominé par le premier mode horizontal.

Les calculs numériques mettent en évidence une variation de la force axiale en base pour des hautes fréquences (figure 5 : poids mort 170.1 kN). Lors de la refermeture des fissures, un impact est induit, ce qui provoque un changement brusque de la raideur et une excitation du second mode (mode de pompage). La variation de la force verticale dynamique est importante et pour certaines séquences peut même doubler ou annuler le poids propre de la maquette. La figure 6 présente la variation du moment en base et la variation dynamique de la force axiale (rapportée à une valeur initiale nulle). A la refermeture des fissures, le déplacement ainsi que le moment s'annulent et des oscillations subites de la force axiale sont induites.

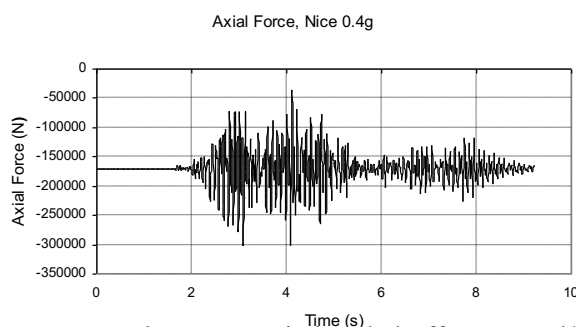


Figure 5. Variation de l'effort normal/  
Variation of the axial force.

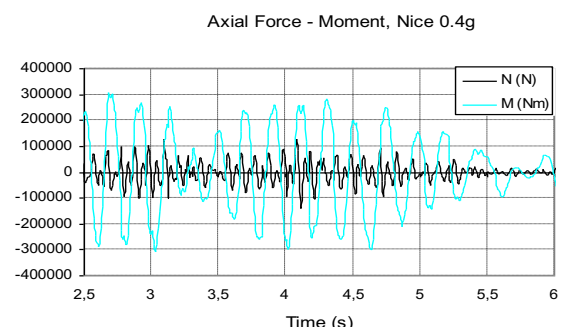


Figure 6. Variation de l'effort normal et du moment en base/  
Variation of the axial force and of the moment at the base.

L'endommagement en traction dans le béton est dessiné à la figure 7 en fin de séquence Nice 0.4g. L'indicateur d'endommagement varie normalement entre 0 (pas d'endommagement) et 1 (endommagement complet de la section).

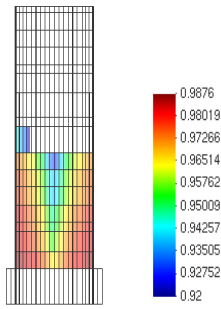


Figure 7. Endommagement/  
Damage state.

En filtrant ces valeurs entre 0.9 et 1, on supprime les microfissures afin d'obtenir une image des macrofissures.

Le voile est principalement endommagé en base, ce qui correspond à la philosophie de l'EC8 (« monofuse » concept), avec développement d'une rotule plastique en base. Pour ce faire, il est nécessaire d'introduire suffisamment d'armatures dans le reste de la structure (voir tableau 2).

### 3.7. Comparaison avec les résultats de CAMUS I

Le tableau 4 compare les valeurs maximales des forces issues du test expérimental CAMUS I et des calculs numériques prédictifs CAMUS III. On note que le moment de fléchissement maximum est plus grand pour les calculs CAMUS III. La variation dynamique de la force axiale en compression est également beaucoup plus élevée.

	Moment à la base	Effort axial (variation dyn. en compression)	Effort tranchant
CAMUS I (0.4g) exp.	279kNm	51.9kN	86.6kN
CAMUS III (0.4g) num.	309kNm	130kN	98kN

Tableau 4. Résultats expérimentaux et numériques : Efforts maximaux en base/  
Experimental and numerical results : maximum forces at the base.

CAMUS I est dimensionné selon les règles françaises PS92 qui préconisent un taux de renforcement plus faible pour les étages supérieurs et ainsi conduisent à une distribution optimisée des fissures. En fait, ce code permet la création de plus larges fissures, non localisées à la base, qui entraînent une multiplication des zones de dissipation. En opposition au concept « monofuse » adopté par l'Eurocode 8, les PS92 appliquent le concept « multifuse », plus économique, mais aussi plus difficile à maîtriser. La différence entre ces deux concepts est clairement visible à la figure 8. A la fin de la séquence CAMUS I (Nice 0.71g), les déformations maximales de l'acier ont été mesurées au niveau des troisième et quatrième planchers alors qu'elles sont localisées en base pour les calculs numériques de CAMUS III.

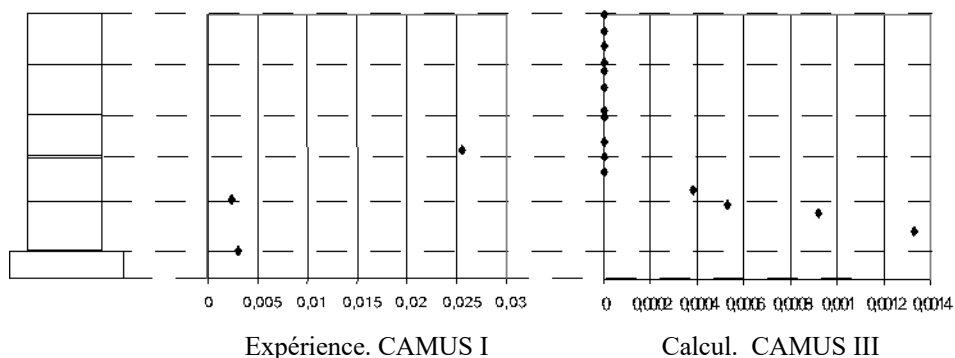


Figure 8. Déformation de l'acier / Steel strain (Nice 0.71g).

## 4. CAMUS IV – CAMUS I : INFLUENCE DES CONDITIONS LIMITES

### 4.1. Description de l'essai CAMUS IV

Dans le but de quantifier l'effet des conditions limites souples, la maquette CAMUS IV est posée sur une couche de sable. Pour comparer la réponse de la structure, elle a été dimensionnée avec le même taux de renforcement que CAMUS I. Les fondations ont été recalculées pour vérifier la capacité portante du sol et ont été étendues à deux fondations filantes de 0.8x2.1 m (figure 9).

La détermination de la hauteur de bac du sable fut guidée par la volonté de reconstituer des conditions d'interaction sol-structure plus ou moins réalistes. Vu les conditions expérimentales (test dynamique à échelle 1/3), l'épaisseur du bac de sable est largement limitée (conditions de sécurité et limitations techniques). Face à de telles contraintes, il était impossible de dimensionner un système qui décrit un comportement plastique réaliste du sol et de la fondation, en ce qui concerne le développement des mécanismes de rupture. Le bac a donc été dimensionné sur base de considérations purement élastiques. Selon cette philosophie, une couche de sable de 0.4m d'épaisseur fut choisie (Crémer 1999a).

### 4.2. Modèle numérique

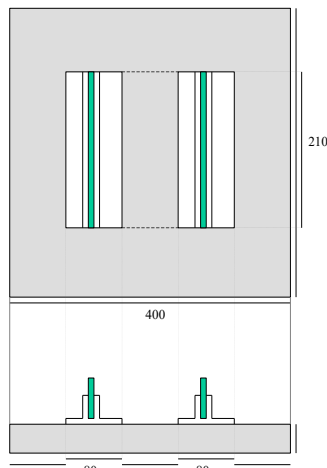


Figure 9. Fondation filante et bac de sable/ Strip foundation and sand container.

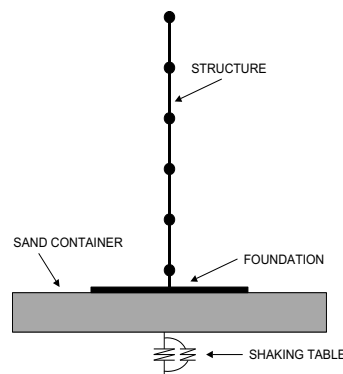
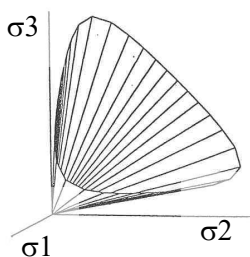


Figure 10. Modèle FEM / FEM model (DYNAFLOW).

Tous les calculs numériques ont été réalisés avec le code éléments finis DYNAFLOW, développé à l'Université de Princeton par Prévost (1998). Spécialisé pour traiter les problèmes de dynamique des sols, ce code propose des lois constitutives bien adaptées.

Le modèle numérique 2D, composé de la structure, du bac de sable et de la table vibrante, est présenté à la figure 10 et détaillé ci-après.

#### • SABLE



Le comportement du sol est gouverné par le critère élasto-plastique de Matsuoka Nakai (1985). Cette loi a été choisie car elle est particulièrement adaptée au comportement des matériaux granulaires.

Figure 11. Critère de Matsuoka Nakai/ Matsuoka Nakai criterion.

#### • STRUCTURE

Etant donné que nous sommes principalement intéressés par le comportement en décollement et que le code DYNFLOW n'est pas approprié pour modéliser une structure complexe, la maquette est simplement discrétisée par des poutres verticales avec masses concentrées. Les caractéristiques géométriques des voiles sont appliquées aux poutres. Les masses additionnelles et les masses des planchers, supportées par un mur, ainsi que les moments d'inertie sont concentrés au niveau de chaque étage. La fondation consiste en une poutre horizontale, supposée très rigide avec des masses uniformément réparties. Cependant, des ressorts non linéaires en rotation ont été introduits dans les poutres verticales pour prendre en compte la raideur réduite en flexion due aux fissures de traction dans le béton. L'hypothèse de localisation des non linéarités en un point de chaque niveau est sous-entendue. La raideur des ressorts a été déterminée par calage des relations moment de renversement – courbure, issues des calculs EFICOS (push over), pour chaque section de renforcement.

- **TABLE VIBRANTE**

Pour reproduire la souplesse de la table mesurée lors du test CAMUS I, deux ressorts (direction verticale et rotation) ont été introduits sous le bac en son centre. La raideur de ces ressorts a été déterminée par calage des fréquences propres calculées pour les premiers modes horizontal et vertical avec celles qui ont été mesurées pour le système encastré.

- **ELEMENTS DE CONTACT**

Pour permettre le glissement et le décollement de la maquette, des éléments de contact ont été introduits à l'interface sol-fondation. Ils sont gouvernés par le critère Mohr-Coulomb parfaitement plastique.

### 4.3. Analyse modale

Les résultats de l'analyse modale sont présentés dans le tableau 5 pour les systèmes suivants : structure à base encastrée + table vibrante, structure + table vibrante + bac de sable (structure linéaire, loi élastique pour le sol).

Pour le système avec bac de sable, la fréquence du premier mode horizontal décroît de 7.23 Hz à 5.05 Hz, et la fréquence du premier mode vertical est réduite à 17.1 Hz.

	structure + table vibrante (Hz)	Structure+table vibrante+bac de sable (Hz)
1 <sup>er</sup> mode horizontal	7.23	5.05
1 <sup>er</sup> mode vertical	20.0	17.1

Tableau 5. Analyse modale/Modal analysis.

### 4.4. Analyse des résultats

Les résultats numériques de DYNFLOW pour la structure soumise à l'accélérogramme Nice 0.4g sont analysés ci-après.

La rotation au centre de la fondation (figure 12) décrit de larges variations à faible fréquence (1.5 Hz à 3.5 Hz), ce qui correspond aux oscillations de la maquette sur sa base. Etant donné que la fréquence naturelle en balancement du système est de 5Hz, nous observons que les non linéarités dues au décollement et les non linéarités structurelles induisent une diminution significative de la fréquence en rotation. Nous notons également à la figure 13 que le déplacement vertical du centre de la fondation est rapidement initié, dès que le décollement se produit, étant donné le couplage entre les modes vertical et rotationnel. Le décollement, illustré à la figure 14, atteint rapidement 95% de la largeur de la fondation.

La figure 15 présente la variation du moment de renversement en base ainsi que la variation dynamique de la force axiale (rapportée à une valeur initiale nulle). Nous observons une grande

variation de la force axiale pour des hautes fréquences, qui affecte aussi le moment de renversement. L'excitation du mode vertical, largement amplifiée, ne peut être expliquée que par l'impact de la fondation sur le sol à chaque cycle. En effet, nous observons que les plus grands pics de la force axiale se produisent exactement pour un moment zéro, ce qui correspond à l'instant où la fondation reprend contact avec le sol. Un phénomène similaire a été observé dans le test CAMUS I dès que les fissures apparaissent. La refermeture des fissures induit également une variation importante de la force axiale.

La distribution des déformations verticales dans le sable est dessinée à la figure 17, au moment où la réponse est maximale. La plastification est concentrée dans des zones très localisées situées à chaque coin de la fondation.

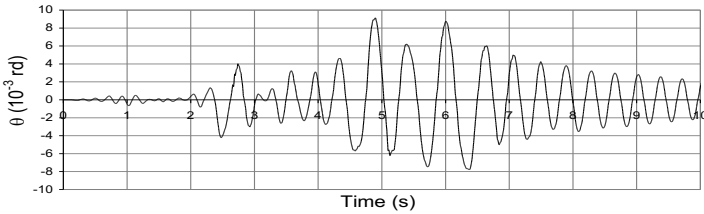


Figure 12. Rotation en base/ Rotation at the base.

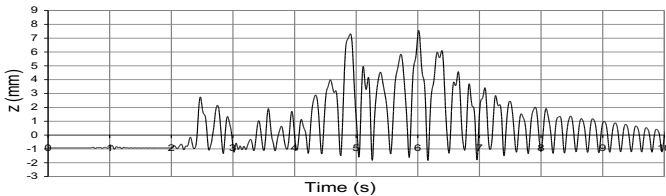


Figure 13. Déplacement vertical en base/ Vertical displacement at the base.

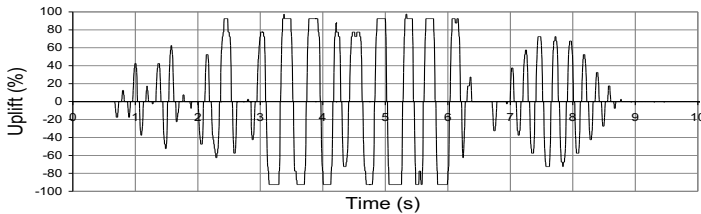


Figure 14. Soulèvement/Uplift.

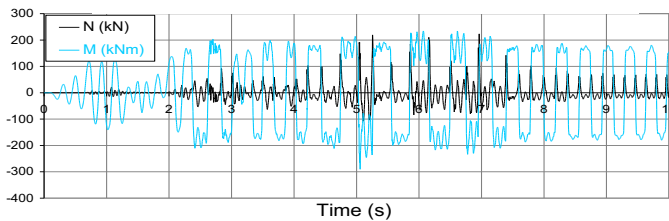


Figure 15.

## 5. CONCLUSIONS

Variation de la force axiale et du moment de renversement/ Variation of the axial force and of the overturning moment.

Les calculs prédictifs du test CAMUS III nous ont permis de comparer deux philosophies de dimensionnement différentes. Le code parasismique européen EC8 préconise la localisation de l'endommagement à la base du voile et maintient un comportement linéaire des niveaux supérieurs (concept « monofuse »). Les règles PS92 optent pour leur part pour un dimensionnement « multifuse » où l'endommagement est distribué en plusieurs zones et conduit à une multiplication des zones de

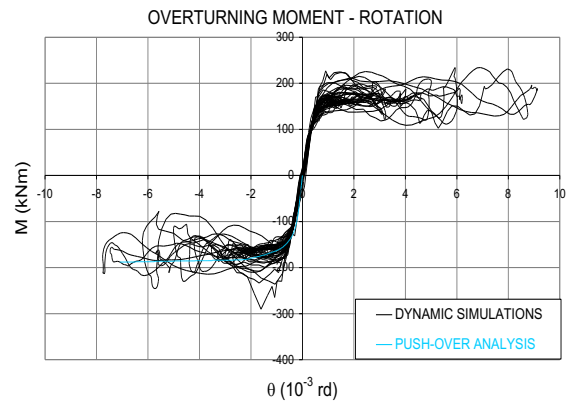


Figure 16. Moment de renversement – Rotation/ Overturning moment – Rotation.

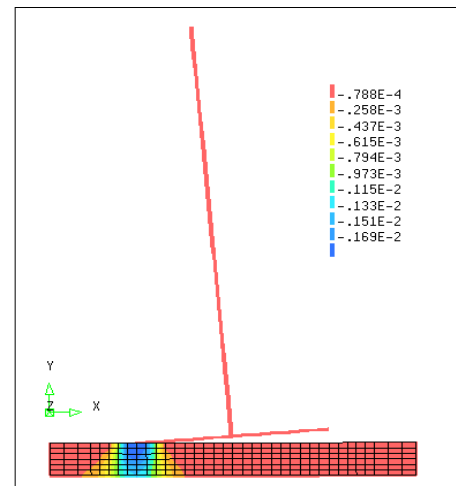


Figure 17.

Distribution des déformations verticales dans le sol/ Distribution of vertical strains in the soil.

dissipation. Nous avons également montré l'importance de la variation de la force axiale. Le phénomène est dû à la refermeture des fissures et à l'excitation du mode vertical.

Les calculs prédictifs sur le test CAMUS IV ont permis de mettre en évidence les effets de condition limites souples, en particulier du décollement. Nous avons observé que le décollement induit une diminution significative de la fréquence apparente en rotation. De plus, l'excitation du premier mode vertical est grandement amplifiée et entretenue par l'impact de la fondation sur le sable. Une importante variation de la force axiale a été également observée, ce qui induit un moment de renversement élevé en base.

Les recherches sur cette étude se poursuivent et plus de résultats expérimentaux et numériques seront présentés dans les articles à venir (Mazars, Kotronis et Crémer 2000).

## REFERENCES

- CAMUS International Benchmark. 1997. Mock-up and loading characteristics, specifications for the participants report, *Report I, CEA and GEO*.
- Crémer, C. 1999a . CAMUS IV - Design of the foundation, specification of laboratory and in situ tests and sand, *ICONS PROJECT, report n° 2 , Géodynamique et Structure*, 1-19.
- Crémer, C. 1999b. Predictive calculations of the CAMUS IV test. Study of the effect of foundation uplift on structural response, *ICONS PROJECT, report n° 3 , Géodynamique et Structure*, 1-52.
- Davenne, L. & Kotronis, P. & Combescure, D. 1999, Results of the tensile test of the steel reinforcement used for the CAMUS III and IV structural walls , *Rapport DMT, SEMT/EMSI/RT/99-034-A, CEA*.
- Kotronis, P. & Mazars, J. 1998. Predictive calculations for CAMUS III and U-shaped structural walls. *ICONS PROJECT, report n°1, LMT Cachan*.
- La Borderie, C.L. 1991. Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable: modélisation et application à l'analyse des structures en béton, *Thèse de doctorat Université Paris 6*.
- Matsuoka, H. & Nakai, T. 1985. Relationship among Tresca, Mises, Mohr-Coulomb and Matsoka-Nakai failure criteria, *Soils and Foundations*, 25(4) : 123-128.
- Mazars, J. & Kotronis, P. & Crémer, C. 2000. Analysis of seismic behaviour of structural walls with various reinforcements and boundary conditions. *12th World Conf. on Earthquake Engineering* (à paraître).
- Prevost, J.H. 1998, DYNAFLOW - A finite element analysis program for the static and transient response of linear and non linear two and three-dimensional systems. *Department of Civil Engineering - Princeton University*.
- Queval, J. C. 1998. Cahier des spécifications et conditions techniques pour la réalisation de deux maquettes en génie civil Camus III et Camus IV, *CEA/SEMT/EMSI/PT/98/021*.
- Queval, J. C. & Combescure, D. & Sollogoub, P. & Coin, A. & Mazars, J. 1998. CAMUS experimental program. In plane tests of 1/3rd scaled R/C bearing walls, *Proc. XIth EERC*, 4-8th September 1998, Paris, France, Balkema, Rotterdam.