

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



CONTRIBUTIONS EN MÉCANIQUE SISMIQUE :

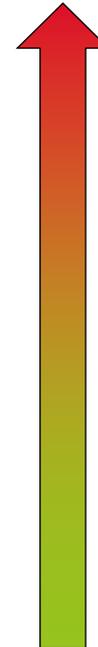
INTERACTION SOL/STRUCTURE ET LOIS CONSTITUTIVES

Club CAST3M | Alberto FRAU
Benjamin RICHARD

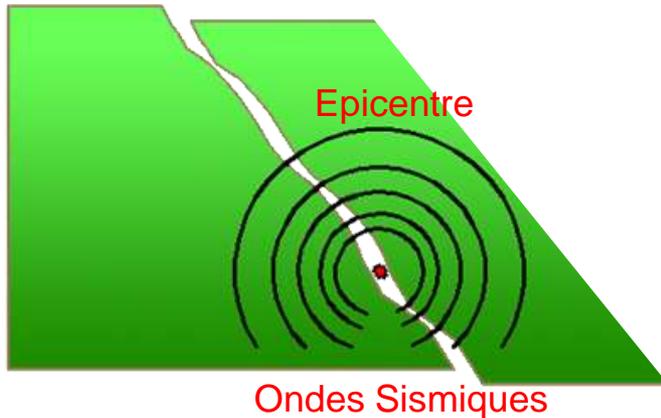
29 NOVEMBRE 2012

www.cea.fr

Evaluation aléa sismique

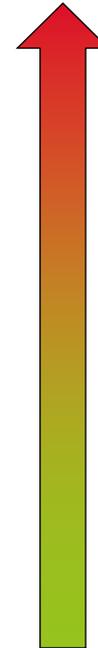


Evaluation aléa
sismique

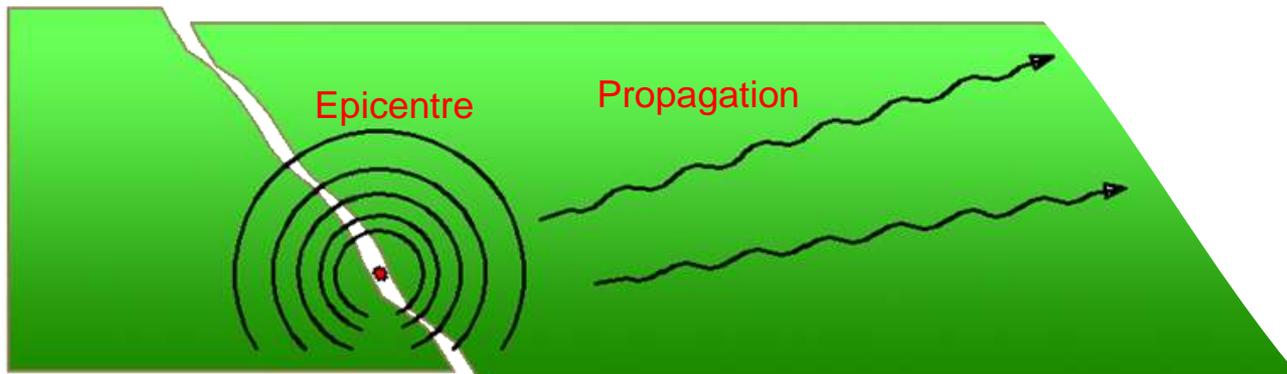


EVALUATION RISQUE SISMIQUE - INTRODUCTION

Evaluation aléa sismique



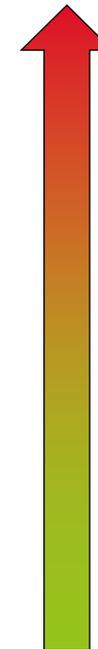
Evaluation aléa
sismique



Ondes Sismiques

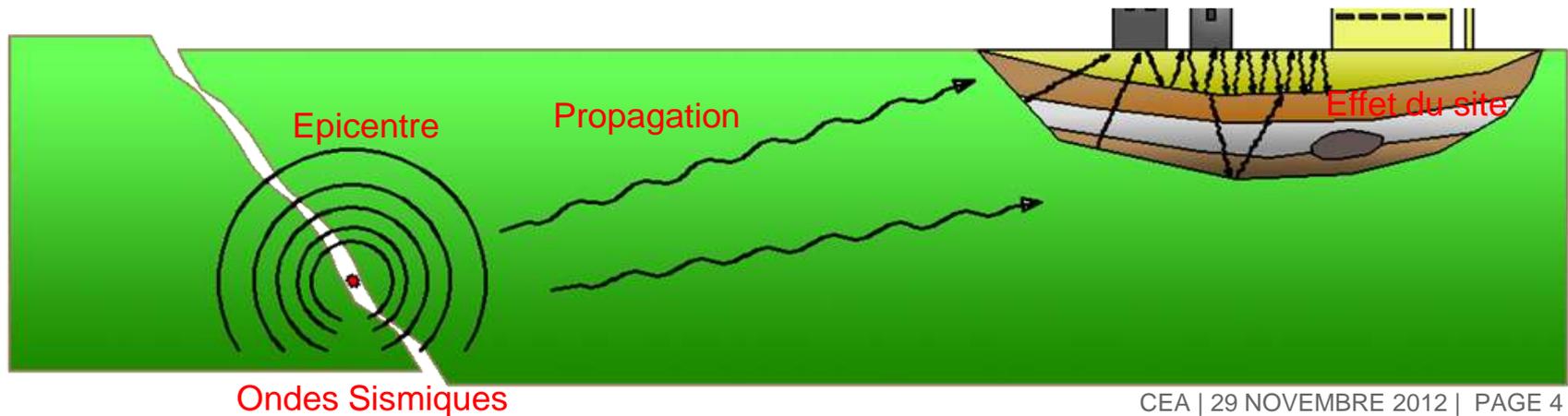
EVALUATION RISQUE SISMIQUE - INTRODUCTION

Interaction Sol-Structure



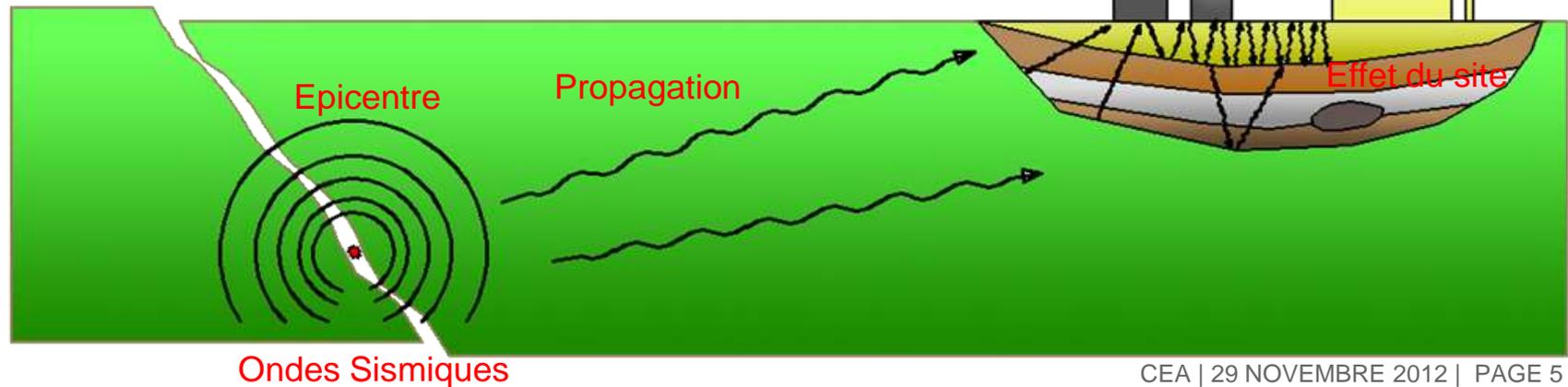
ISS

Evaluation aléa
sismique



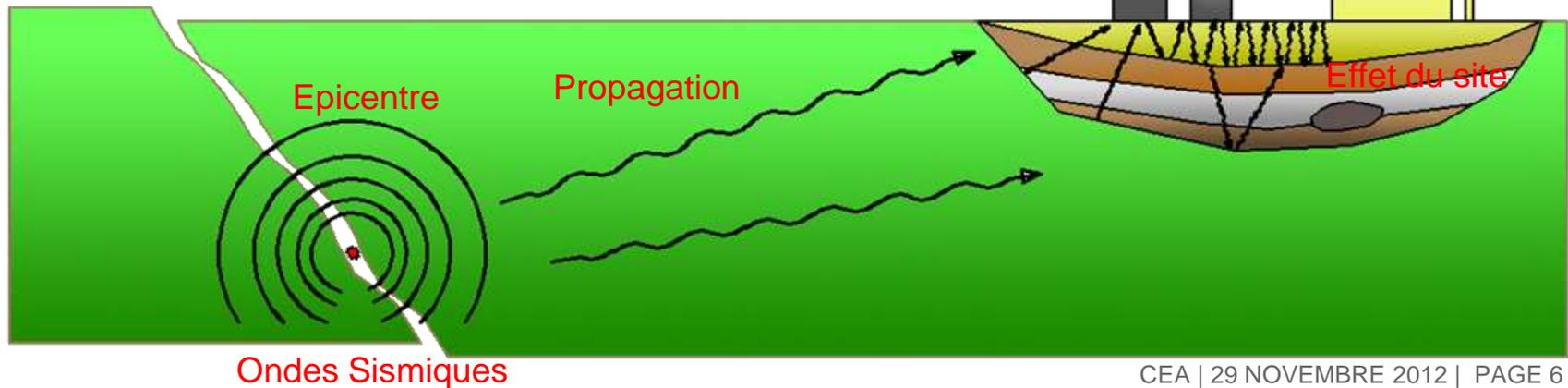
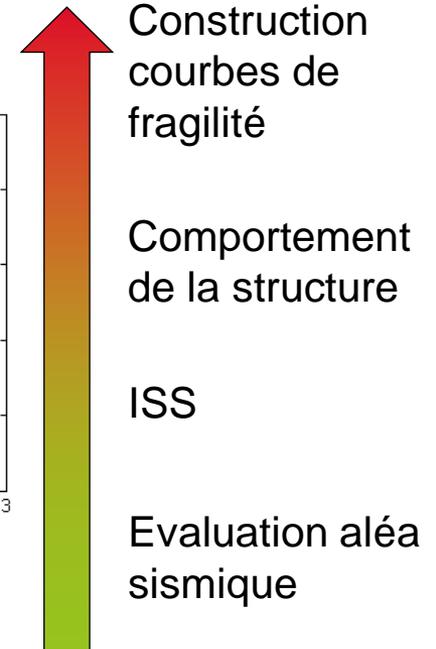
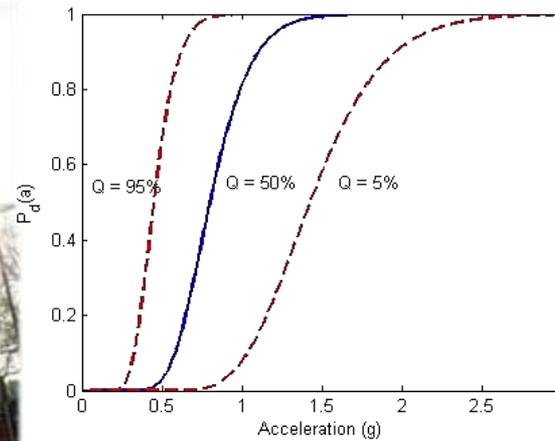
EVALUATION RISQUE SISMIQUE - INTRODUCTION

Comportement de la structure



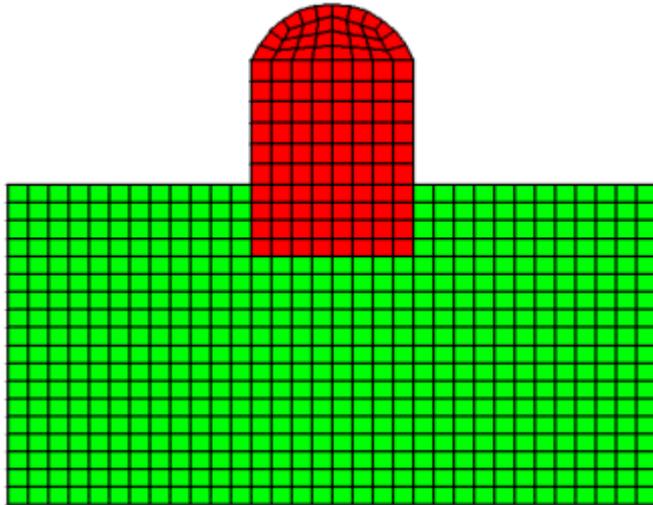
EVALUATION RISQUE SISMIQUE - INTRODUCTION

Courbes de fragilité

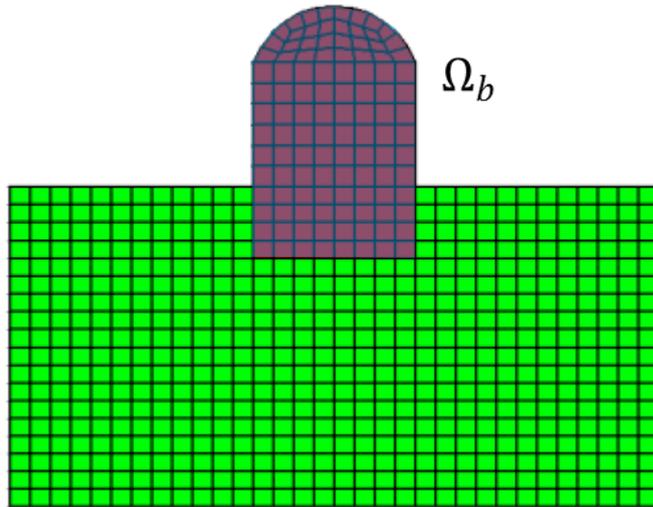


**INTERACTION SOL-STRUCTURE
CHAÎNAGE CAST3M-MISS3D**

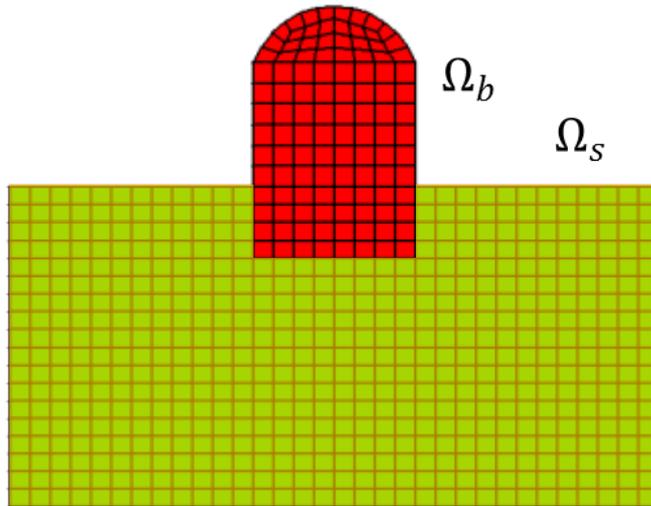
Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM »



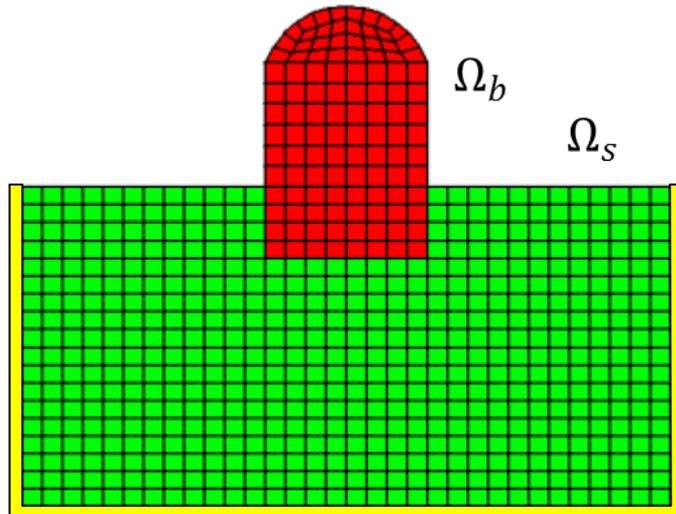
Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM »



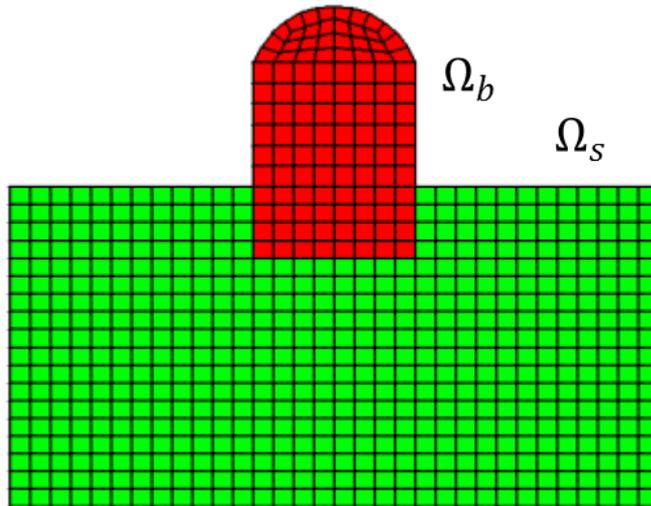
Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM »



Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM »

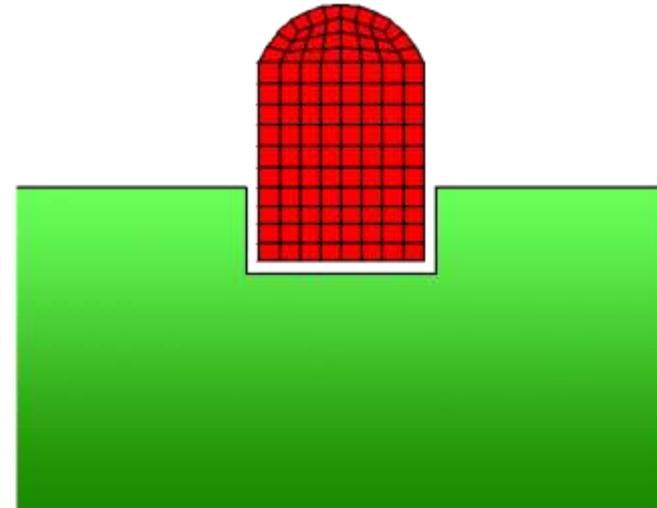
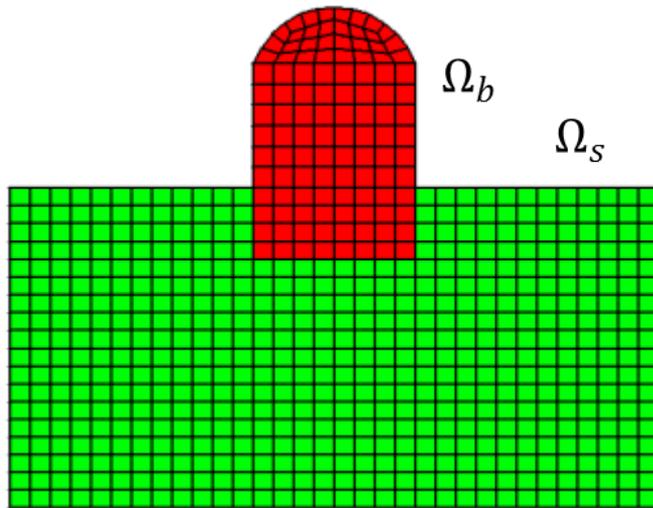


Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM »



- Avantages:
 - Possibilité d'effectuer des calculs non linéaires
- Inconvénients:
 - Temps de calcul excessif

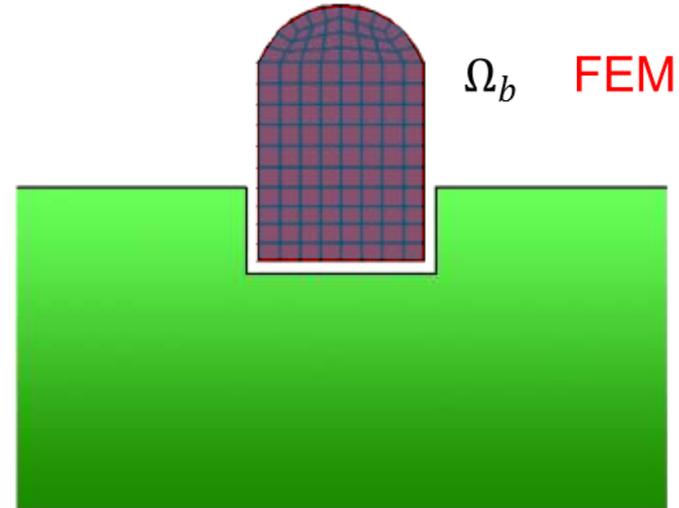
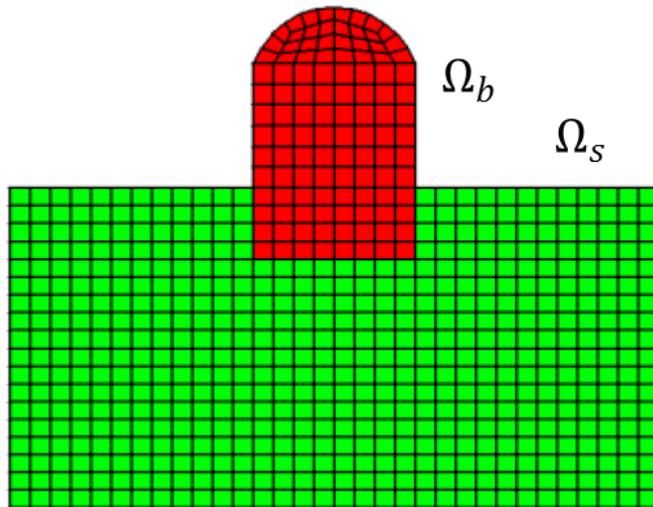
Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM » FEM-BEM



- Avantages:
 - Possibilité d'effectuer des calculs non linéaires

- Inconvénients:
 - Temps de calcul excessif

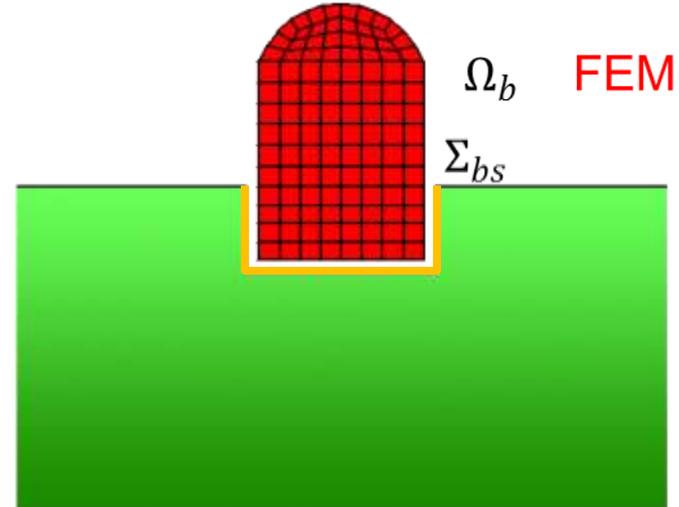
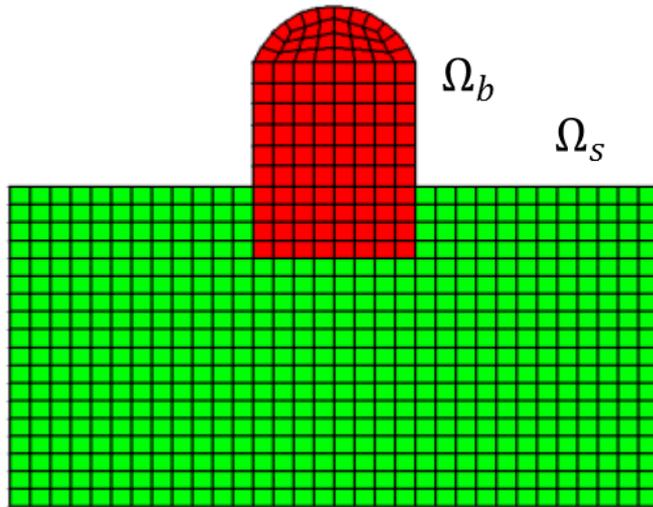
Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM » FEM-BEM



- Avantages:
 - Possibilité d'effectuer des calculs non linéaires

- Inconvénients:
 - Temps de calcul excessif

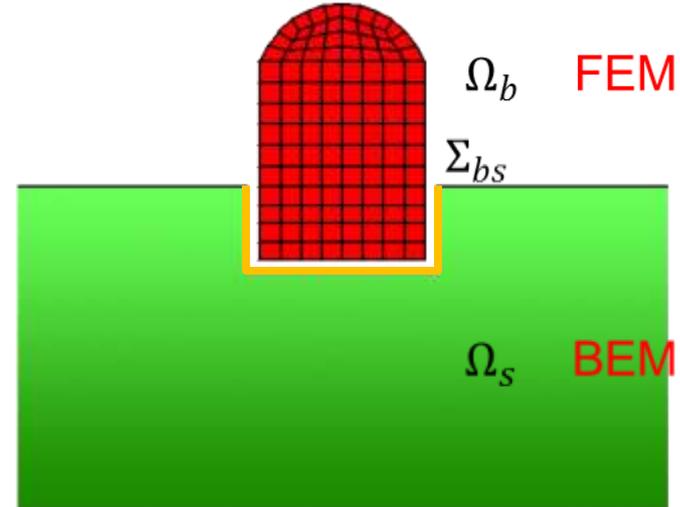
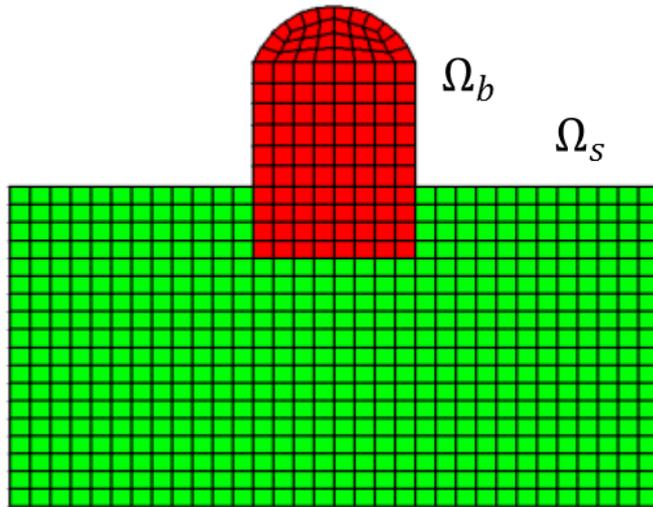
Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM » FEM-BEM



- Avantages:
 - Possibilité d'effectuer des calculs non linéaires

- Inconvénients:
 - Temps de calcul excessif

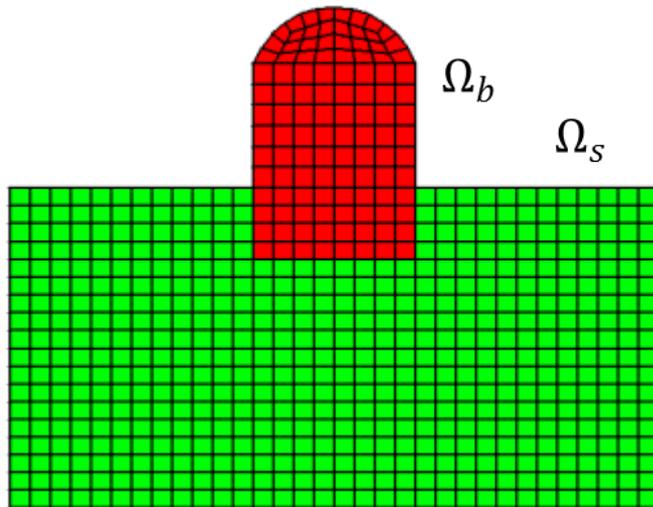
Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM » FEM-BEM



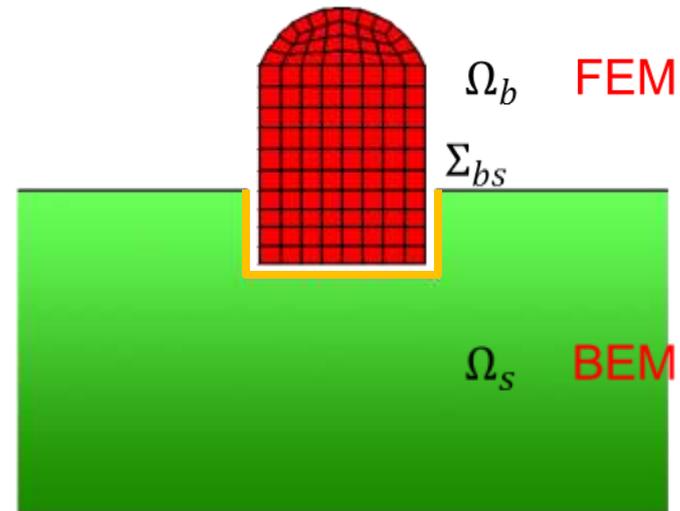
- Avantages:
 - Possibilité d'effectuer des calculs non linéaires

- Inconvénients:
 - Temps de calcul excessif

Méthodes résolution problèmes ISS « full FEM » FEM-BEM



- Avantages:
 - Possibilité d'effectuer des calculs non linéaires
- Inconvénients:
 - Temps de calcul excessif



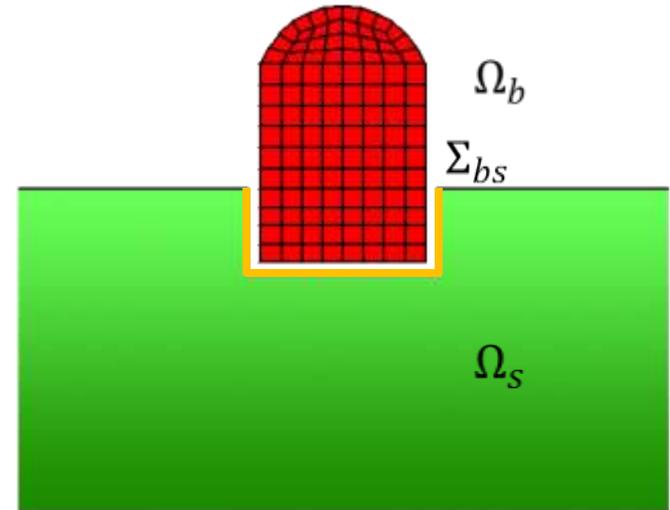
- Avantages:
 - Augmentation de la vitesse du calcul
- Inconvénients:
 - Résolution dans le domaine fréquentiel: calcul linéaire

Hypothèses du calcul

- Comportement linéaire de la structure et du sol:
 - Géométrie;
 - Loi de comportement;

Concept du calcul

- Sous-structuration;
- Sol est représenté par un demi-espace composé par des couches horizontales;
- Résolution dans le domaine fréquentiel.



Cinématique

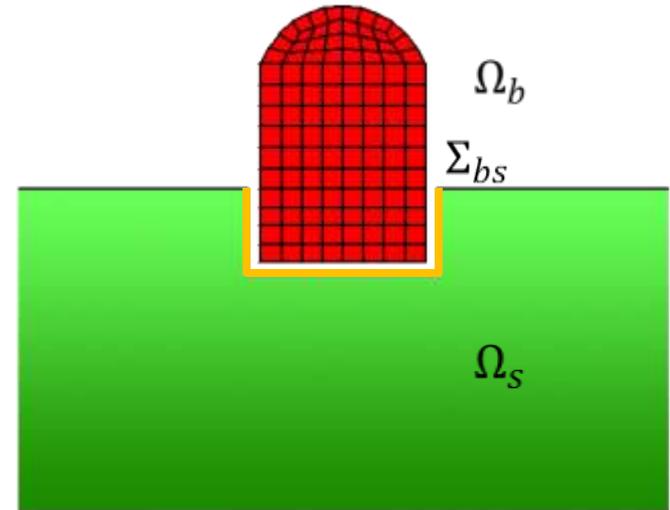
- Mode à base encastree + Modes d'interface

$$\underline{u}(\underline{x}, t) = \underline{\Phi}(\underline{x})\underline{a}(t) + \underline{\Psi}(\underline{x})\underline{b}(t)$$

Equations d'équilibre

$$\operatorname{div}(\underline{\sigma}(\underline{u}^b(\underline{x}, t))) + \underline{f} = \rho \underline{\dot{u}}^b(\underline{x}, t) \text{ sur } \Omega_b$$

$$\underline{u}^b(\underline{x}, t) = \underline{u}^s(\underline{x}, t); \underline{t}^b(\underline{x}, t) = -\underline{t}^s(\underline{x}, t) \text{ sur } \Sigma_{bs}$$



$$\begin{cases} (\underline{K}_{fifi} + i\omega \underline{C}_{fifi} - \omega^2 \underline{M}_{fifi}) \underline{a} + (i\omega \underline{C}_{fist} - \omega^2 \underline{M}_{fist}) \underline{b} = \underline{0} \\ (i\omega \underline{C}_{fist} - \omega^2 \underline{M}_{fist})^t \underline{a} + (\underline{K}_{stst} + i\omega \underline{C}_{stst} - \omega^2 \underline{M}_{stst} + \underline{K}_{imp}(\omega)) \underline{b} = \underline{F}_s(\omega) \end{cases}$$

Cinématique

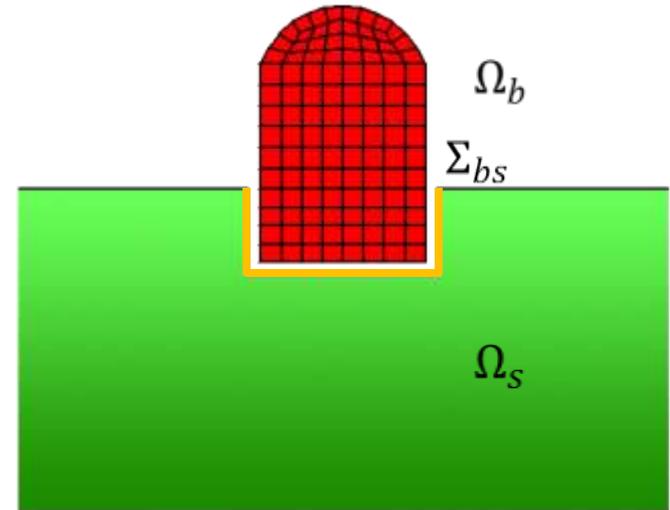
- Mode à base encastree + Modes d'interface

$$\underline{u}(\underline{x}, t) = \underline{\Phi}(\underline{x})\underline{a}(t) + \underline{\Psi}(\underline{x})\underline{b}(t)$$

Equations d'équilibre

$$\operatorname{div}(\underline{\sigma}(\underline{u}^b(\underline{x}, t))) + \underline{f} = \rho \underline{\dot{u}}^b(\underline{x}, t) \text{ sur } \Omega_b$$

$$\underline{u}^b(\underline{x}, t) = \underline{u}^s(\underline{x}, t); \underline{t}^b(\underline{x}, t) = -\underline{t}^s(\underline{x}, t) \text{ sur } \Sigma_{bs}$$



$$\begin{cases} (\underline{K}_{fifi} + i\omega \underline{C}_{fifi} - \omega^2 \underline{M}_{fifi}) \underline{a} + (i\omega \underline{C}_{fist} - \omega^2 \underline{M}_{fist}) \underline{b} = \underline{0} \\ (i\omega \underline{C}_{fist} - \omega^2 \underline{M}_{fist})^t \underline{a} + (\underline{K}_{stst} + i\omega \underline{C}_{stst} - \omega^2 \underline{M}_{stst} + \underline{K}_{imp}(\omega)) \underline{b} = \underline{F}_s(\omega) \end{cases}$$

Cinématique

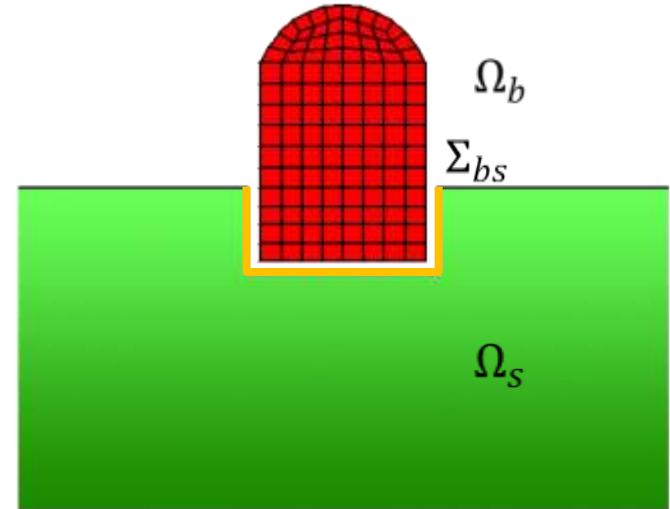
- Mode à base encastree + Modes d'interface

$$\underline{u}(\underline{x}, t) = \underline{\Phi}(\underline{x})\underline{a}(t) + \underline{\Psi}(\underline{x})\underline{b}(t)$$

Equations d'équilibre

$$\text{div}(\underline{\sigma}(\underline{u}^b(\underline{x}, t))) + \underline{f} = \rho \underline{\ddot{u}}^b(\underline{x}, t) \text{ sur } \Omega_b$$

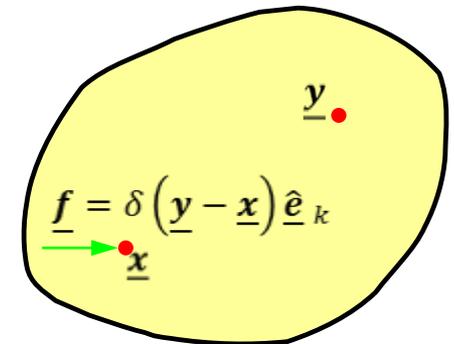
$$\underline{u}^b(\underline{x}, t) = \underline{u}^s(\underline{x}, t); \underline{t}^b(\underline{x}, t) = -\underline{t}^s(\underline{x}, t) \text{ sur } \Sigma_{bs}$$



$$\begin{cases} (\underline{K}_{fifi} + i\omega \underline{C}_{fifi} - \omega^2 \underline{M}_{fifi}) \underline{a} + (i\omega \underline{C}_{fist} - \omega^2 \underline{M}_{fist}) \underline{b} = \underline{0} \\ (i\omega \underline{C}_{fist} - \omega^2 \underline{M}_{fist})^t \underline{a} + (\underline{K}_{stst} + i\omega \underline{C}_{stst} - \omega^2 \underline{M}_{stst} + \underline{K}_{imp}(\omega)) \underline{b} = \underline{F}_s(\omega) \end{cases}$$

Formule de représentation, équation integrale directe

$$ku_i(\underline{x}) = \int_{\partial\Omega} \{t_i(\underline{y}) U_i^k(\underline{x}, \underline{y}) - u_i(\underline{y}) T_i^k(\underline{x}, \underline{y})\} dS_y$$



Formule de représentation, équation integrale indirecte

$$\bar{u}_k(\underline{x}) = \int_{\partial\Omega} \{\phi_i(\underline{y}) U_i^k(\underline{x}, \underline{y}) - [\psi_i(\underline{y}) - \psi_i(\underline{x})] T_i^k(\underline{x}, \underline{y})\} dS_y$$

$$U_i^k(\underline{x}, \underline{y})$$

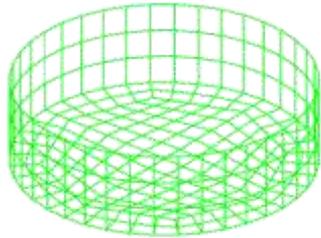
$$T_i^k(\underline{x}, \underline{y}) = \Sigma_{ij}^k(\underline{x}, \underline{y}) n_j$$

$$\Sigma_{ij}^k(\underline{x}, \underline{y}) = C_{ij\alpha\beta} U_{\alpha,\beta}^k(\underline{x}, \underline{y})$$

CAST3M

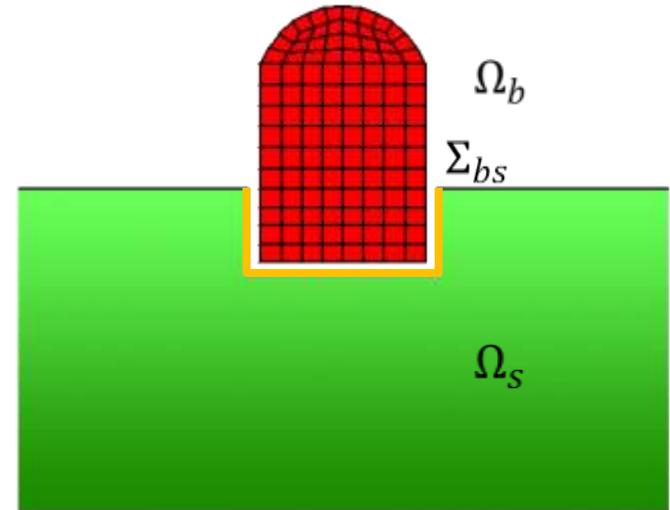
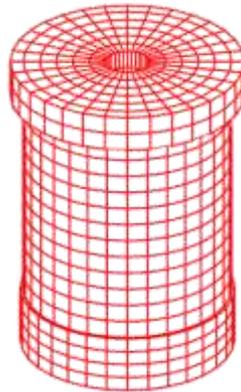
- Discrétisation de la structure;
- Discrétisation de l'interface;

Interface



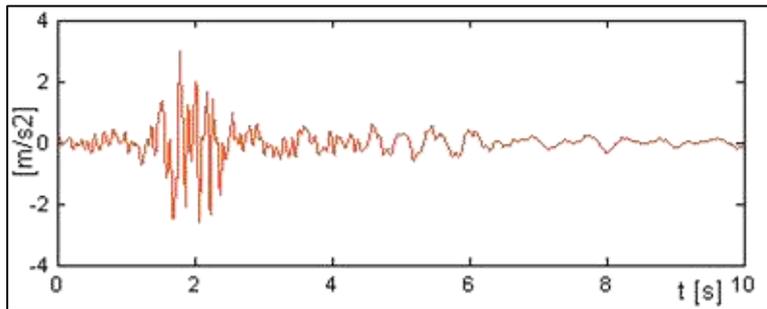
CAST3M

Structure

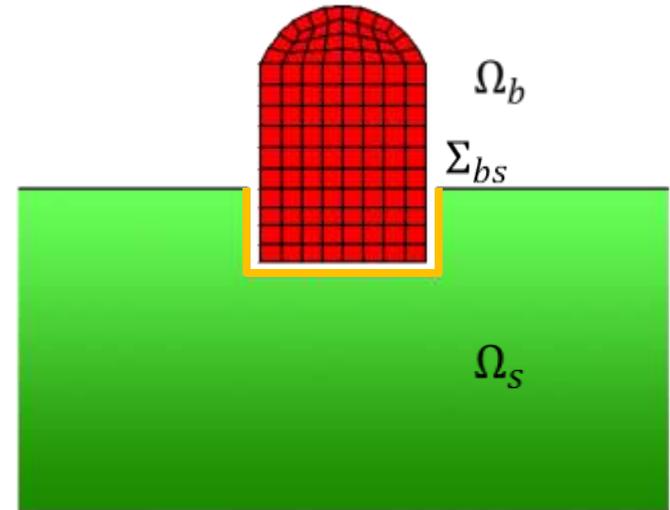


CAST3M

- Discrétisation de la structure;
- Discrétisation de l'interface;
- Signal Sismique;

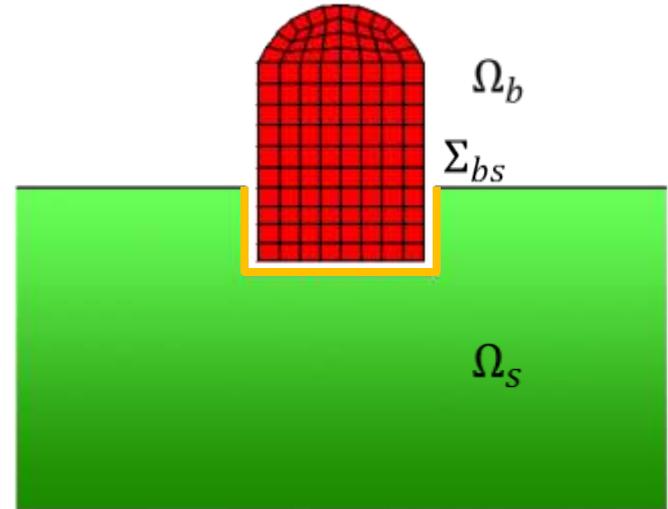
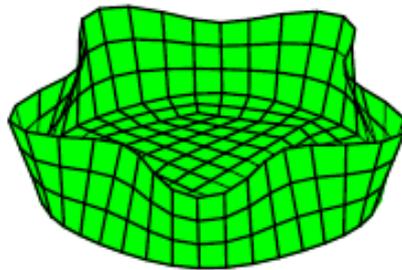


CAST3M



PREPMISS

- Vérification des données;
- Identification de la cinématique:
 - Modes à base encastrée;
 - Modes d'interface;



CAST3M

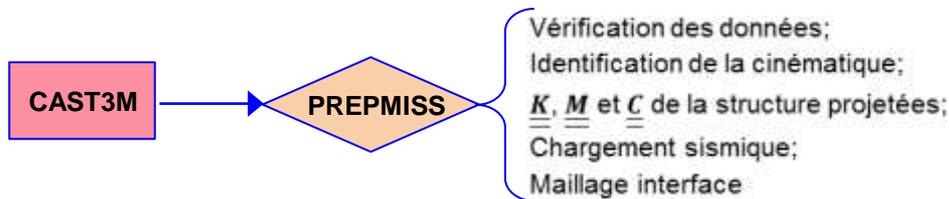
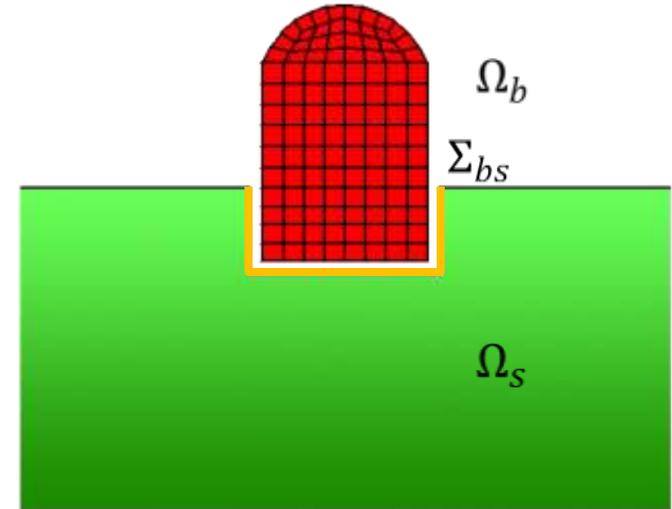
PREPMISS

Vérification des données;
 Identification de la cinématique;
 \underline{K} , \underline{M} et \underline{C} de la structure projetées;
 Chargement sismique;
 Maillage interface

PREPMISS

- Vérification des données;
- Identification de la cinématique:
 - Modes à base encastrée;
 - Modes d'interface;
- Détermination des matrices de rigidité, de masse et d'amortissement;

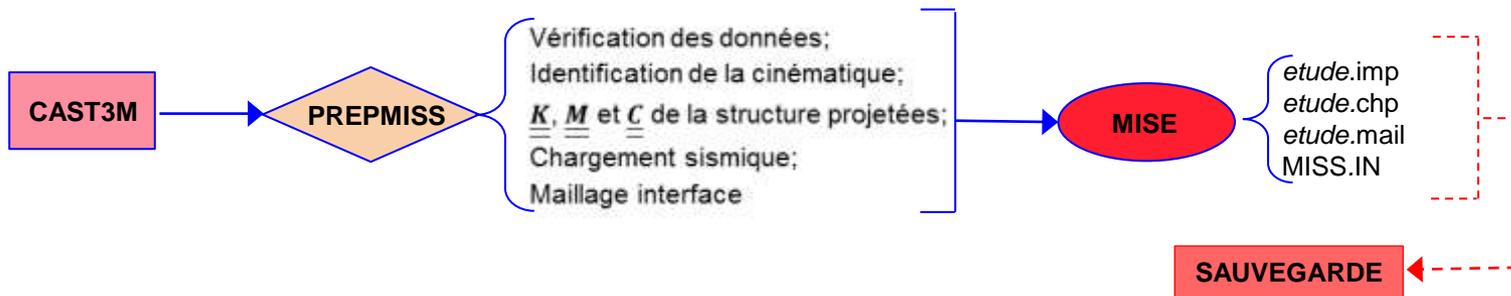
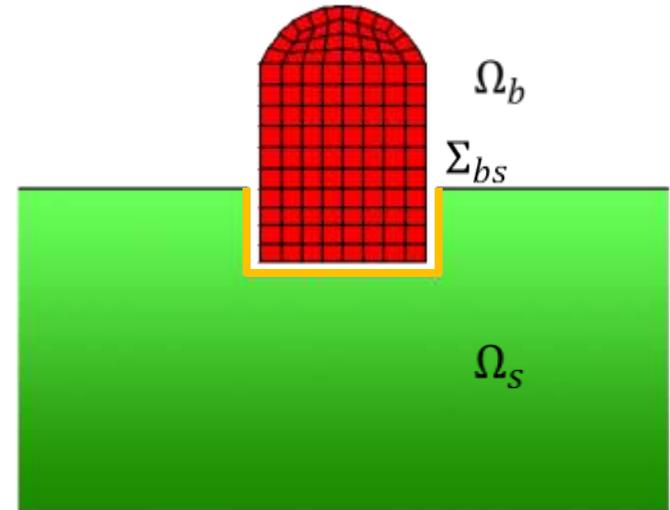
$$\begin{aligned} \underline{\underline{M}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{M}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{K}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{K}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{C}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{C}} \underline{\underline{\Phi}} \\ \underline{\underline{M}}_{fist} &= \underline{\underline{\Psi}}^t \underline{\underline{M}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{K}}_{fist} &= \underline{\underline{\Psi}}^t \underline{\underline{C}} \underline{\underline{\Phi}} \end{aligned}$$



PREPMISS

- Vérification des données;
- Identification de la cinématique:
 - Modes à base encastrée;
 - Modes d'interface;
- Détermination des matrices de rigidité, de masse et d'amortissement;

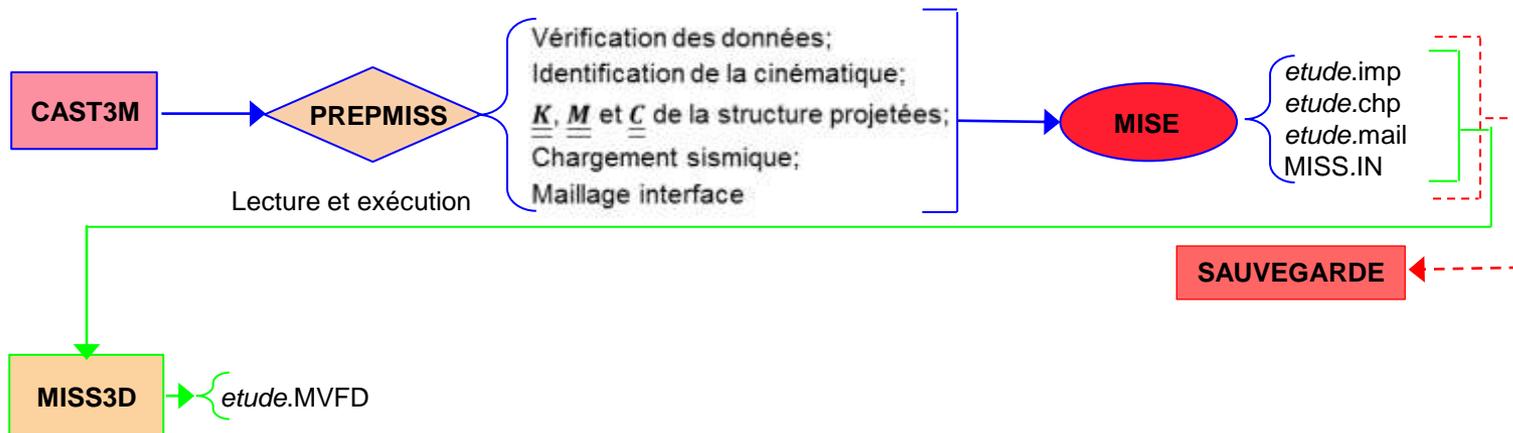
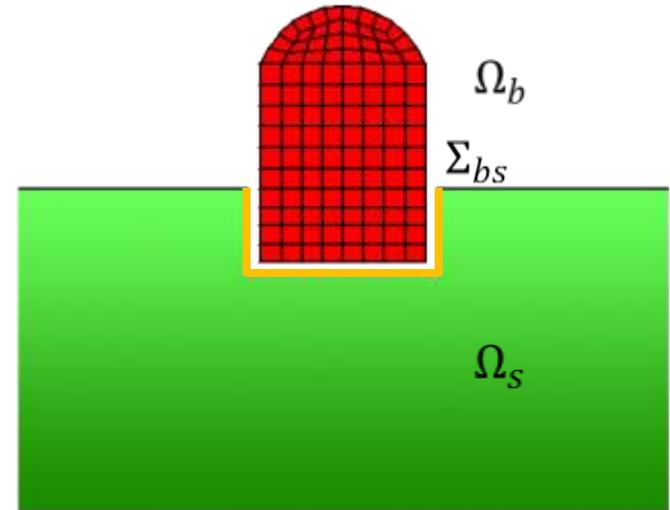
$$\begin{aligned} \underline{\underline{M}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{M}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{K}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{K}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{C}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{C}} \underline{\underline{\Phi}} \\ \underline{\underline{M}}_{fist} &= \underline{\underline{\Psi}}^t \underline{\underline{M}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{K}}_{fist} &= \underline{\underline{\Psi}}^t \underline{\underline{K}} \underline{\underline{\Phi}} \end{aligned}$$



PREPMISS

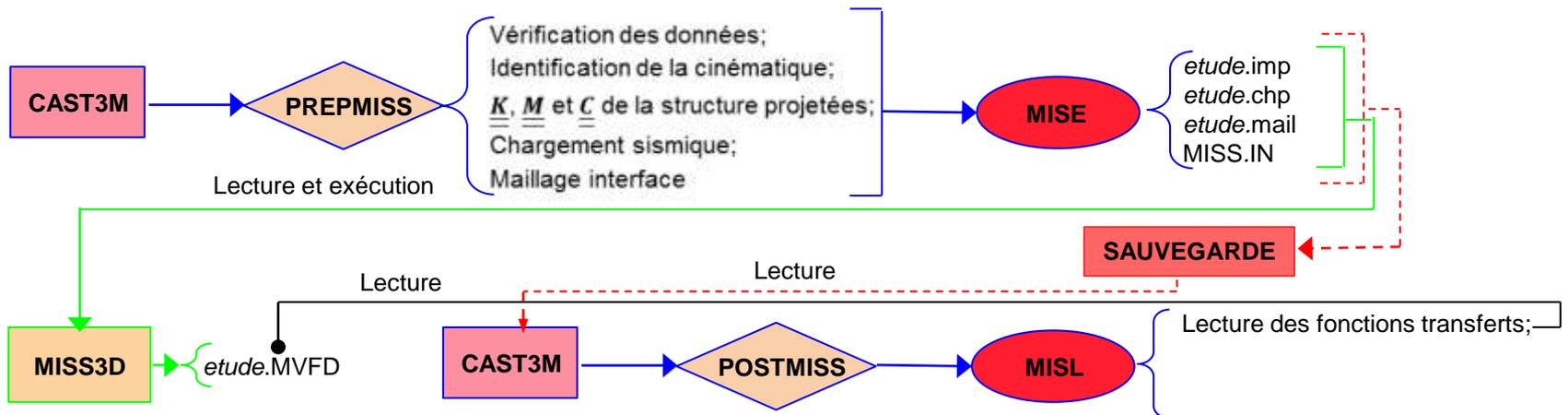
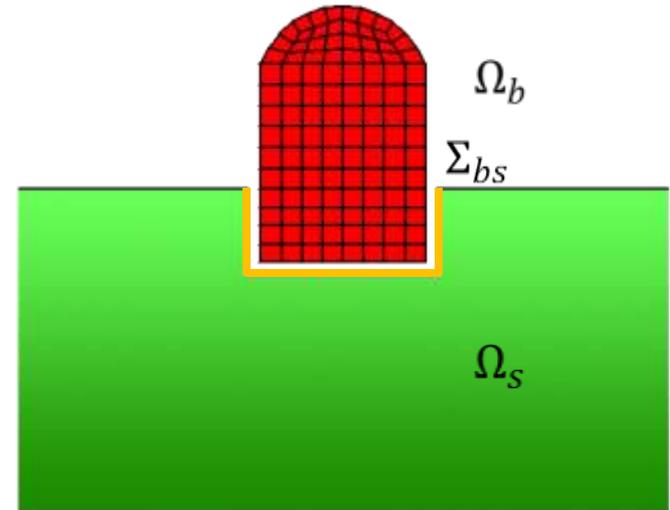
- Vérification des données;
- Identification de la cinématique:
 - Modes à base encastrée;
 - Modes d'interface;
- Détermination des matrices de rigidité, de masse et d'amortissement;

$$\begin{aligned} \underline{\underline{M}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{M}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{K}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{K}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{C}}_{stst} &= \underline{\underline{\Phi}}^t \underline{\underline{C}} \underline{\underline{\Phi}} \\ \underline{\underline{M}}_{fist} &= \underline{\underline{\Psi}}^t \underline{\underline{M}} \underline{\underline{\Phi}} & \underline{\underline{K}}_{fist} &= \underline{\underline{\Psi}}^t \underline{\underline{K}} \underline{\underline{\Phi}} \end{aligned}$$



POSTMISS

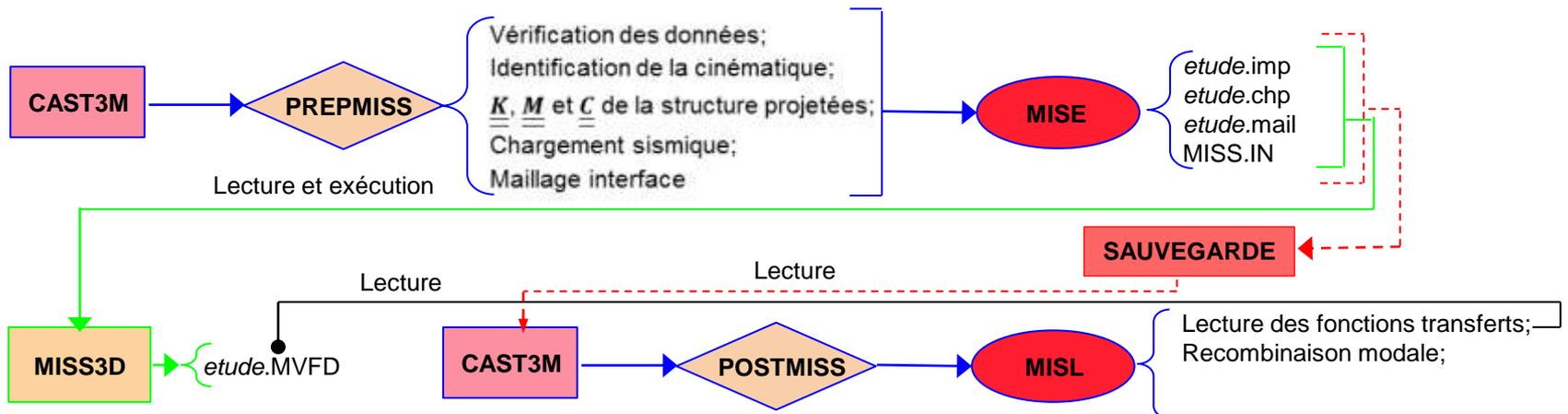
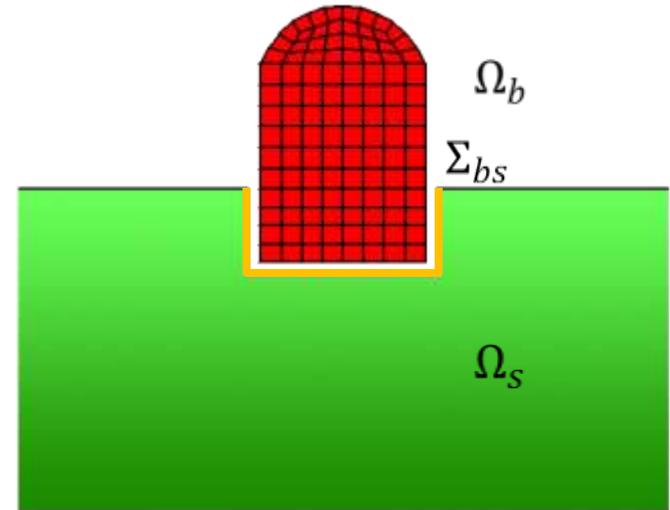
- Lecture des résultats MISS3D



POSTMISS

- Lecture des résultats MISS3D
- Recombinaison modale;

$$\hat{u}_i(\omega) = \sum_{m=1}^{n_{sta}} s(\omega) \Psi_i^m b_m(\omega) + \sum_{n=1}^{n_{fix}} s(\omega) \Phi_i^n a_n(\omega)$$



POSTMISS

- Lecture des résultats MISS3D
- Recombinaison modale;

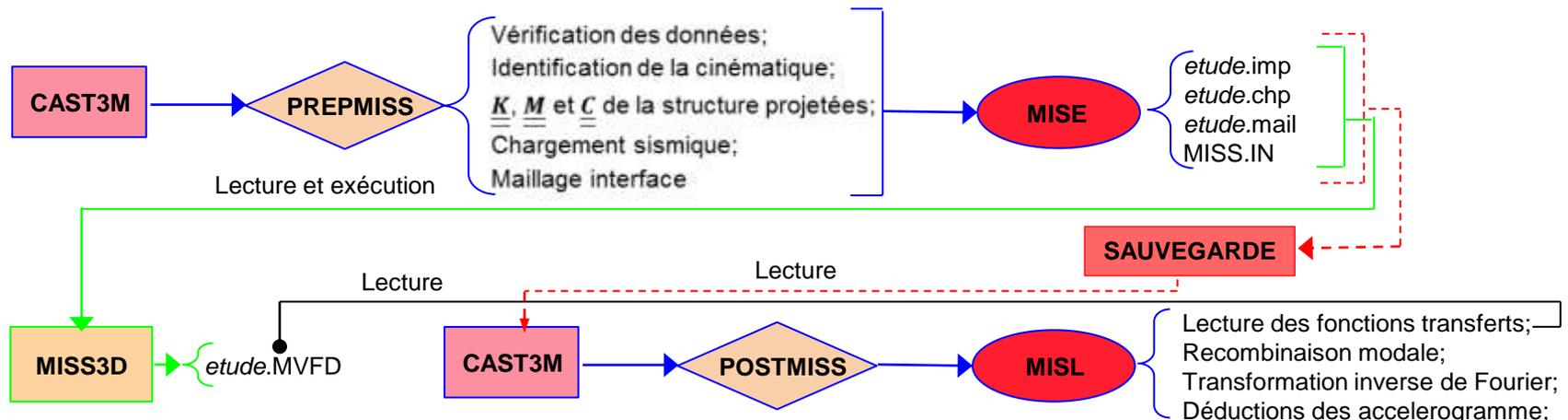
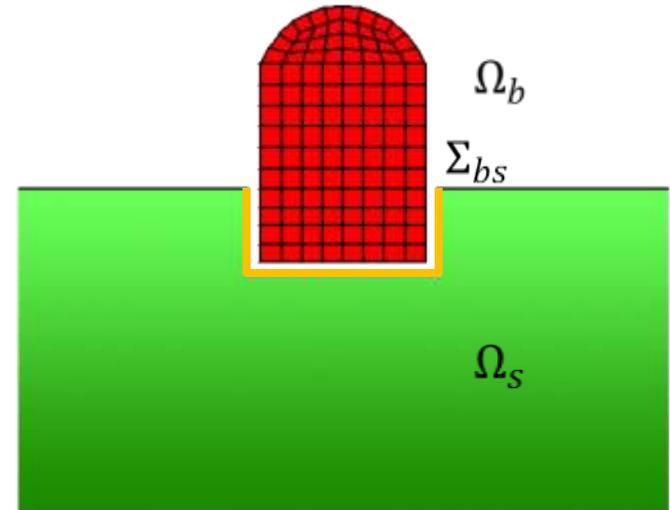
$$\hat{u}_i(\omega) = \sum_{m=1}^{n_{sta}} s(\omega) \Psi_i^m b_m(\omega) + \sum_{n=1}^{n_{fix}} s(\omega) \Phi_i^n a_n(\omega)$$

- Dédudition des champs de déplacement, vitesse et amortissement:

$$u_i(t) = \text{ifft}(\hat{u}_i(\omega))$$

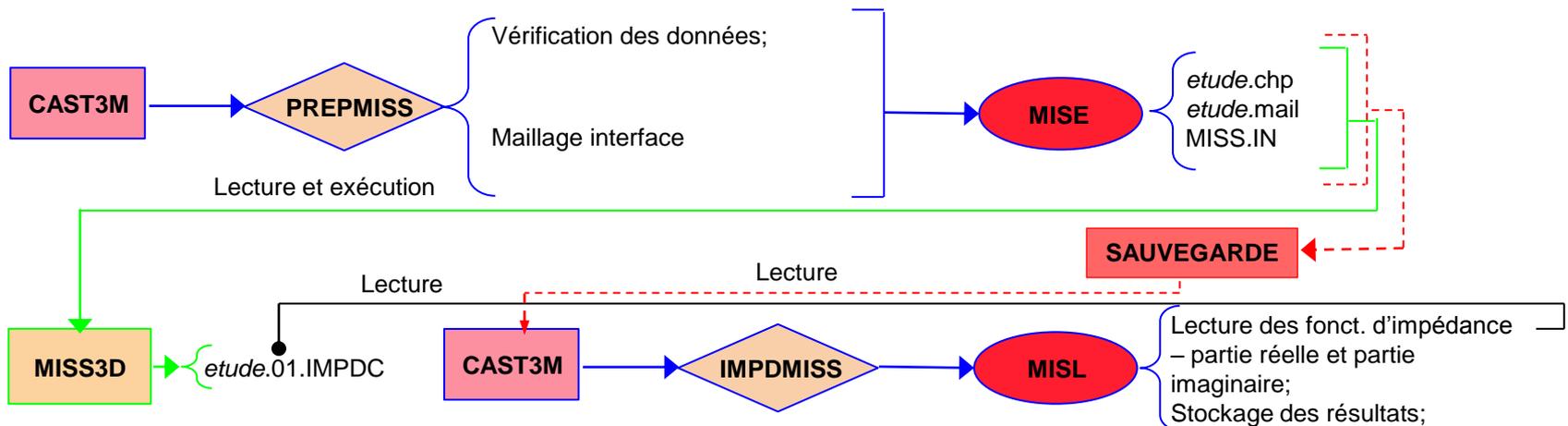
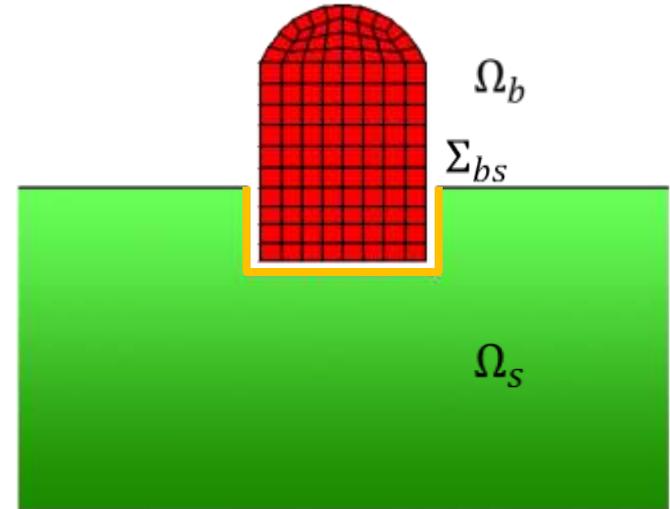
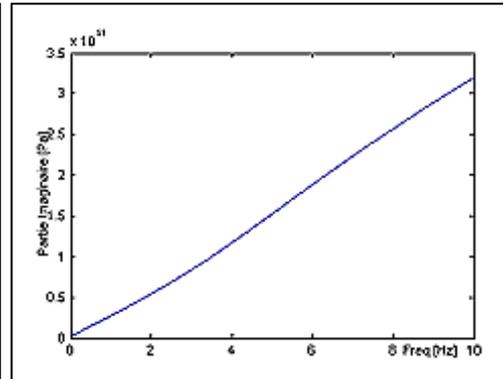
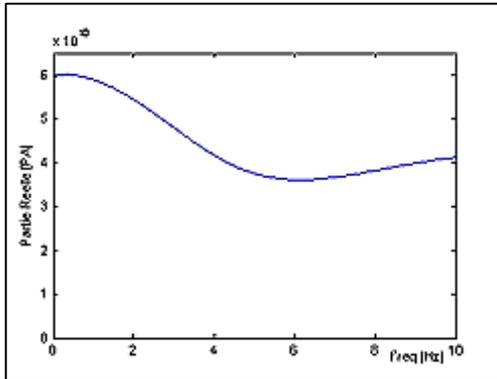
$$v_i(t) = \text{ifft}(\hat{u}_i(\omega)/(i \cdot \omega))$$

$$a_i(t) = \text{ifft}(\hat{u}_i(\omega)/(-\omega^2))$$



IMPDMISS

■ Lecture des fonctions d'impédance;

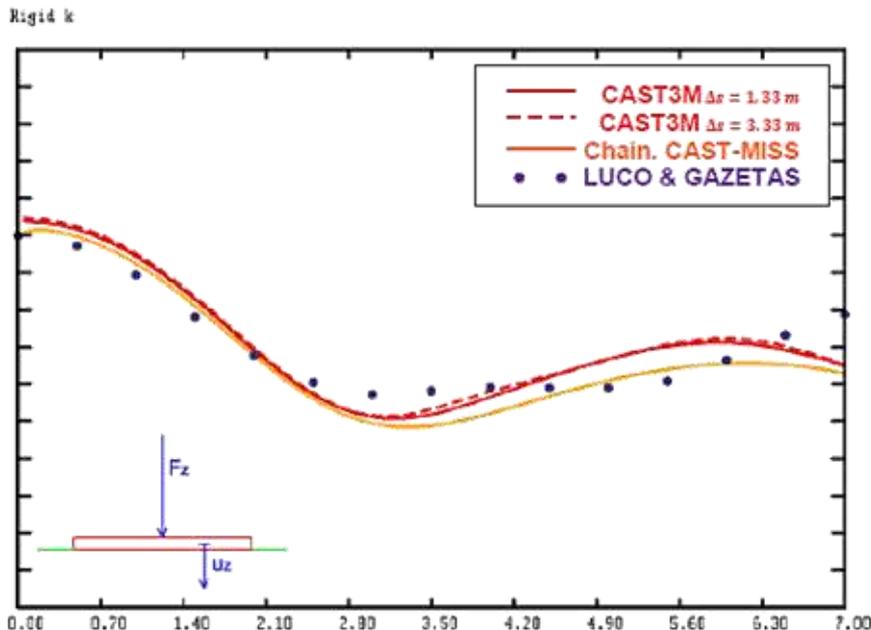
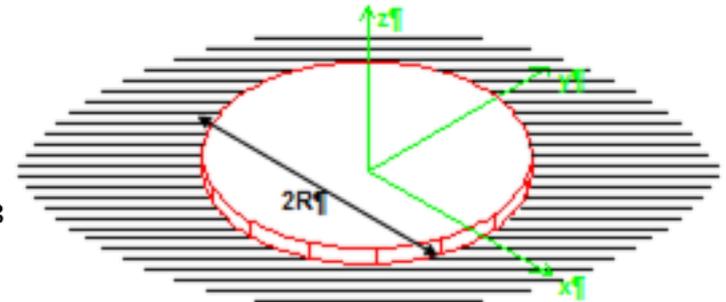


Cas de validation: Calcul des impédances

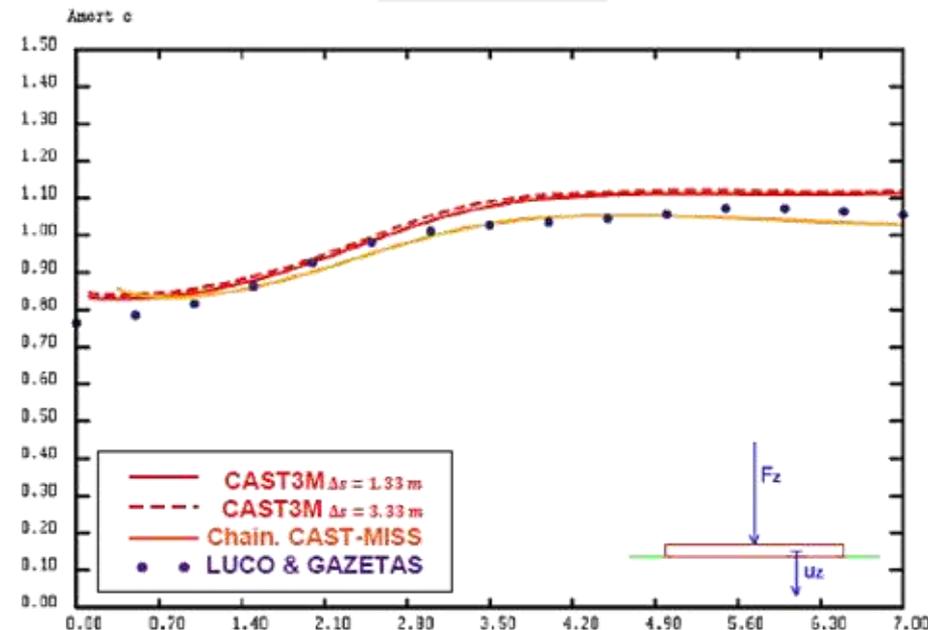
- Fondation circulaire superficielle sur sol homogène

$$2R = 60 \text{ m} \quad F_{max} = 15 \text{ Hz} \quad a_{max} = 7$$

$$G_{sol} = 288 \text{ MPa} \quad V_s = 400 \text{ m/s} \quad \rho = 1800 \text{ kg/m}^3$$



$$k_{ij}(a_0) = \Re[K_{ij}(a_0)] / K_{sta}^{ij}$$



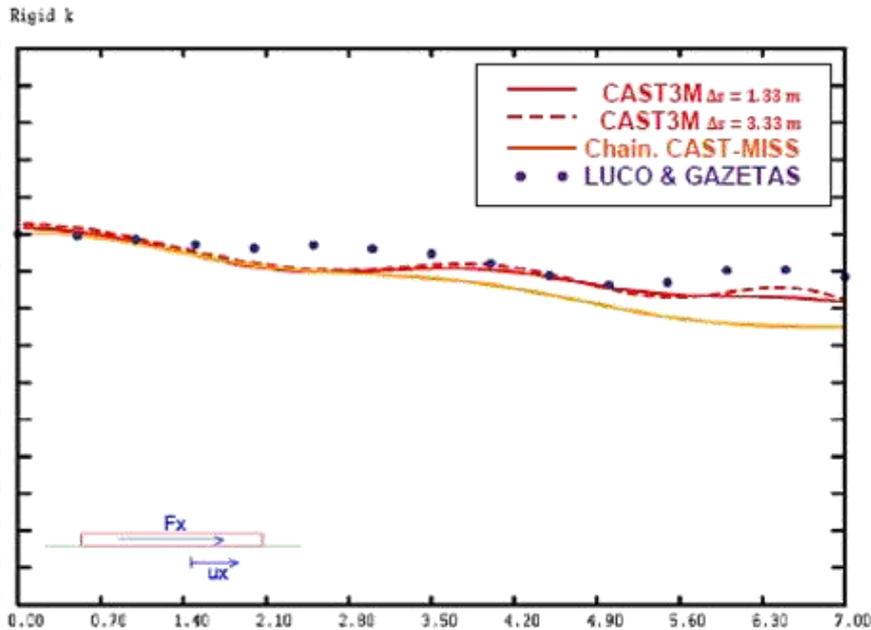
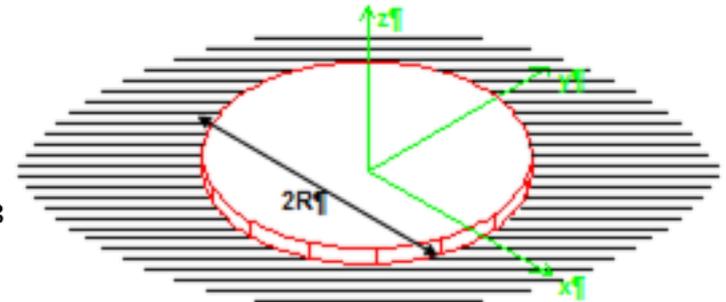
$$c_{ij}(a_0) = \Im[K_{ij}(a_0)] / (K_{sta}^{ij} \cdot a_0)$$

Cas de validation: Calcul des impédances

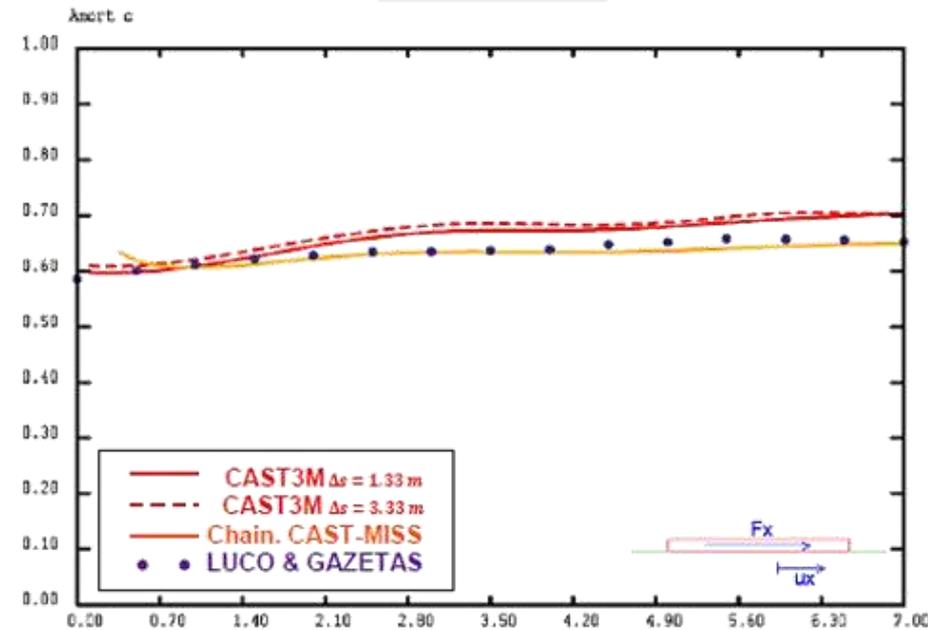
- Fondation circulaire superficielle sur sol homogène

$$2R = 60 \text{ m} \quad F_{max} = 15 \text{ Hz} \quad a_{max} = 7$$

$$G_{sol} = 288 \text{ MPa} \quad V_s = 400 \text{ m/s} \quad \rho = 1800 \text{ kg/m}^3$$



$$k_{ij}(a_0) = \Re[K_{ij}(a_0)]/K_{sta}^{ij}$$



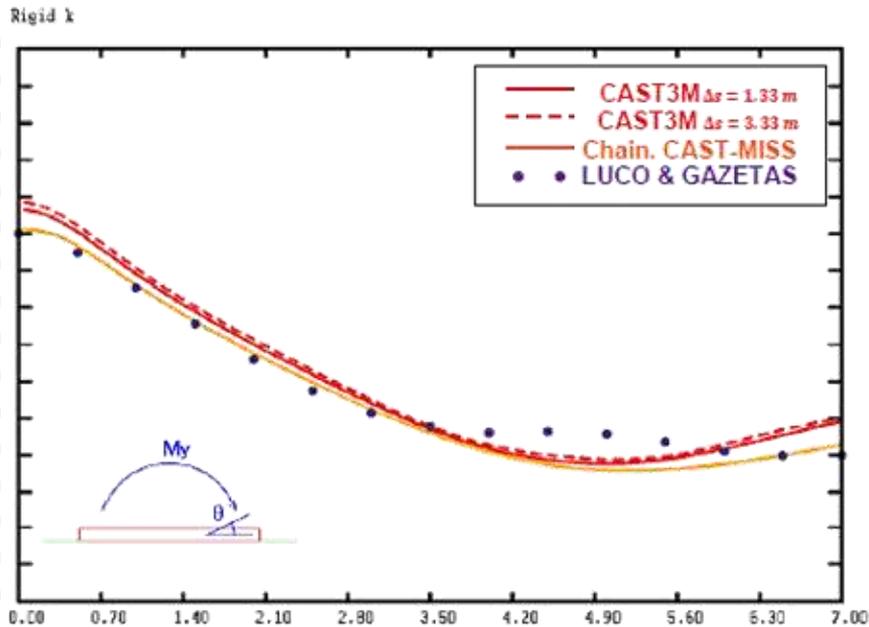
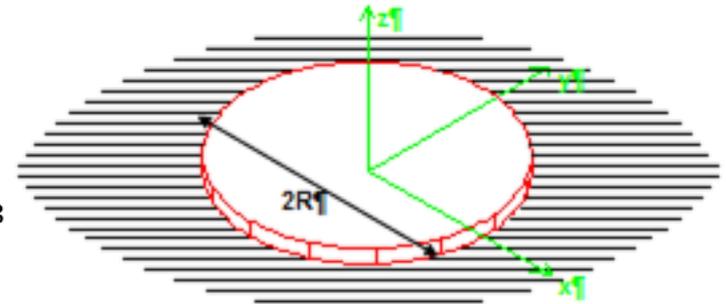
$$c_{ij}(a_0) = \Im[K_{ij}(a_0)]/(K_{sta}^{ij} \cdot a_0)$$

Cas de validation: Calcul des impédances

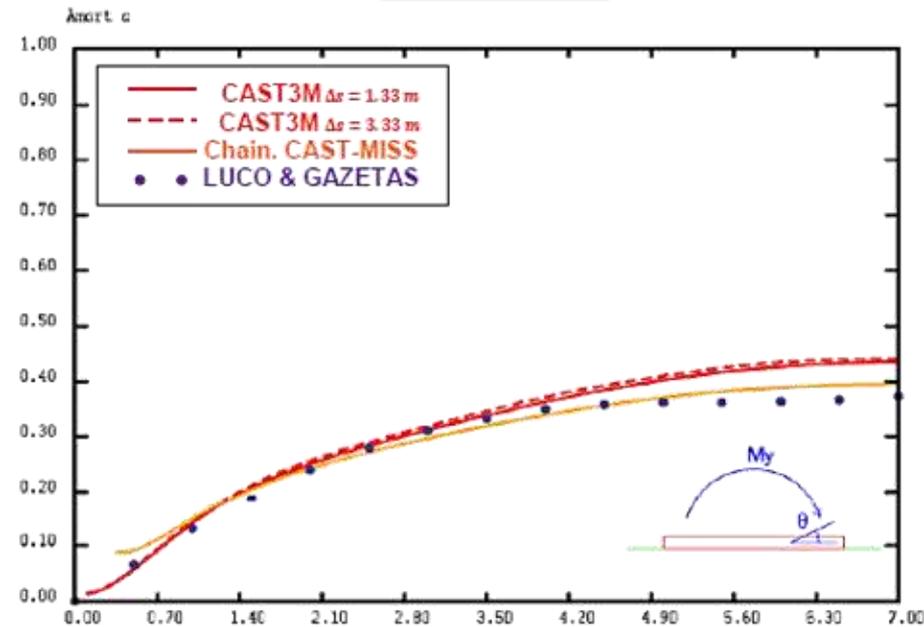
- Fondation circulaire superficielle sur sol homogène

$$2R = 60 \text{ m} \quad F_{max} = 15 \text{ Hz} \quad a_{max} = 7$$

$$G_{sol} = 288 \text{ MPa} \quad V_s = 400 \text{ m/s} \quad \rho = 1800 \text{ kg/m}^3$$



$$k_{ij}(a_0) = \Re[K_{ij}(a_0)]/K_{sta}^{ij}$$



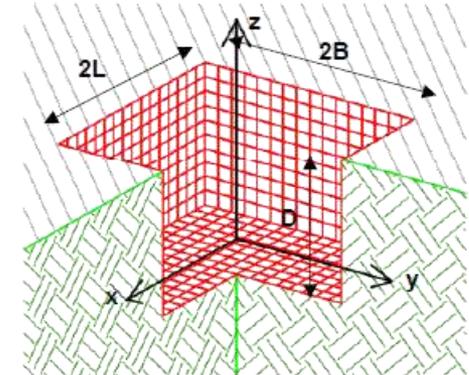
$$c_{ij}(a_0) = \Im[K_{ij}(a_0)]/(K_{sta}^{ij} \cdot a_0)$$

Cas de validation: Calcul des impédances

- Fondation rectangulaire enfoncée sur sol multicouche

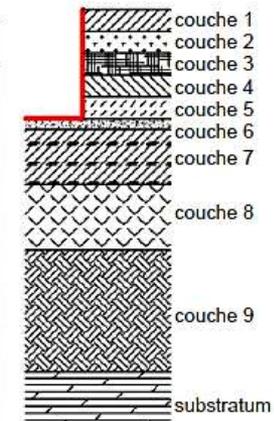
$$2B = 8 \text{ m} \quad 2L = 8 \text{ m} \quad D = 5 \text{ m}$$

$$F_{max} = 30 \text{ Hz}$$



Stratigraphie du sol

Couche	Epai [m]	E [MPa]	ν	ρ [Kg/m ³]	G [MPa]	V_s [m/s]	V_p [m/s]	β
1	1	117.880	0,386	1770	42.525	155	359,72	0,05
2	1	190.270	0,279	1770	74.382	205	370,27	0,05
3	1	207.000	0,265	1770	81.818	215	380,23	0,05
4	1	224.190	0,251	1770	89.604	225	390,23	0,05
5	1	248.670	0,272	1770	97.748	235	419,92	0,05
6	0,5	97.776	0,12	1940	43.650	150	228,27	0,05
7	2,5	614.930	0,371	1940	224.260	340	750,77	0,05
8	3	1015.100	0,415	1940	358.690	430	1128,05	0,02
9	14	10190.00	0,386	2210	367.600	1290	2993,13	0,02
Subs		15010.00	0,343	2210	558.820	1590,1	3252,93	0,02

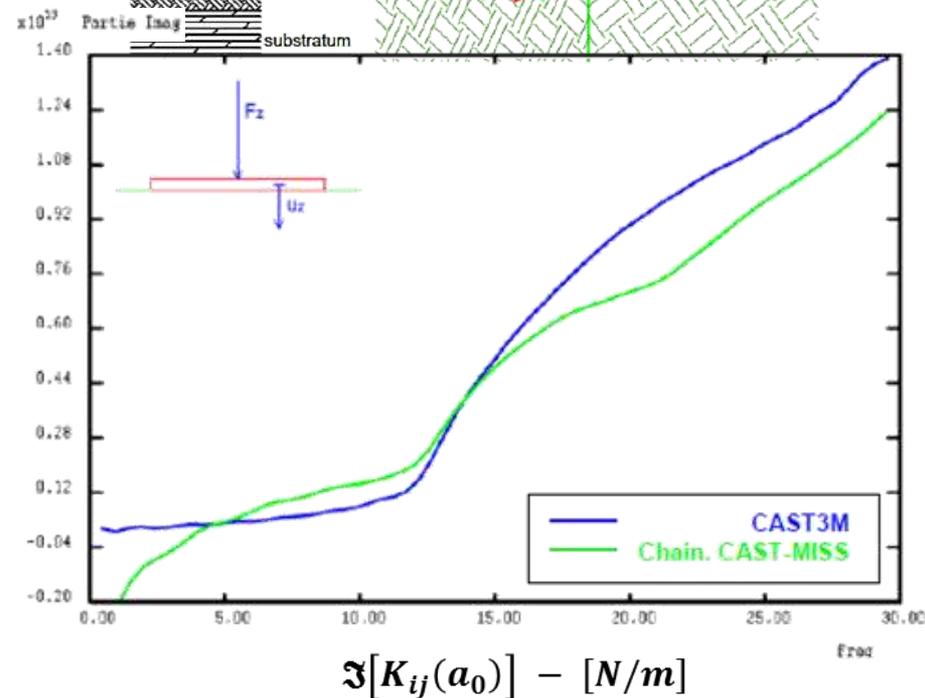
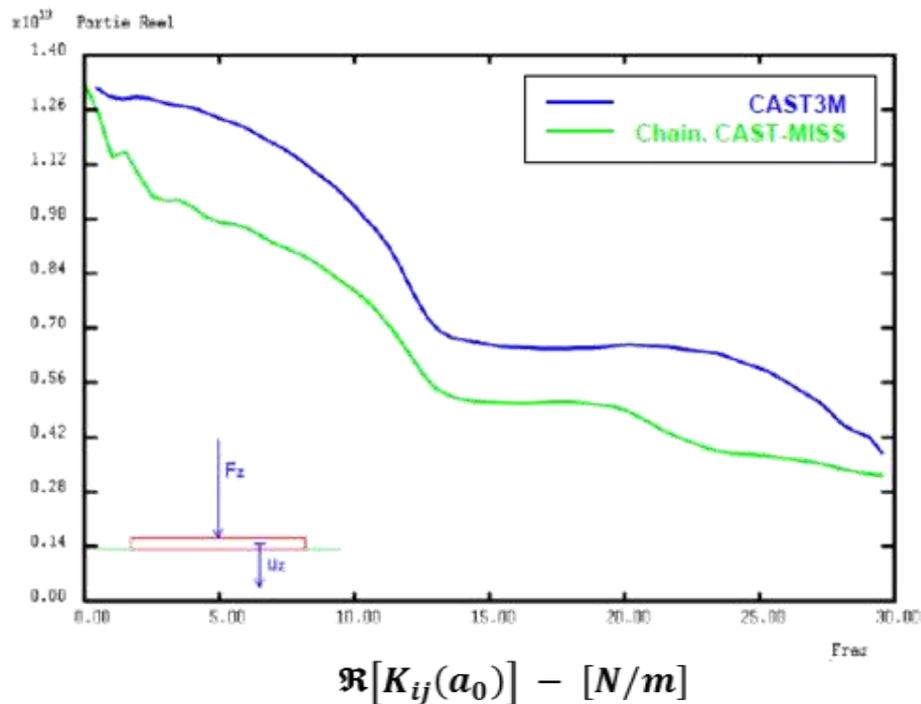
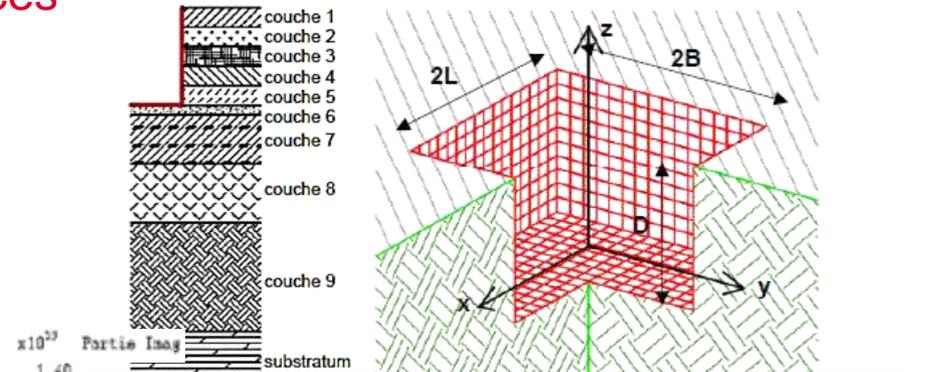


Cas de validation: Calcul des impédances

- Fondation rectangulaire enfoncée sur sol multicouche

$$2B = 8 \text{ m} \quad 2L = 8 \text{ m} \quad D = 5 \text{ m}$$

$$F_{max} = 30 \text{ Hz}$$

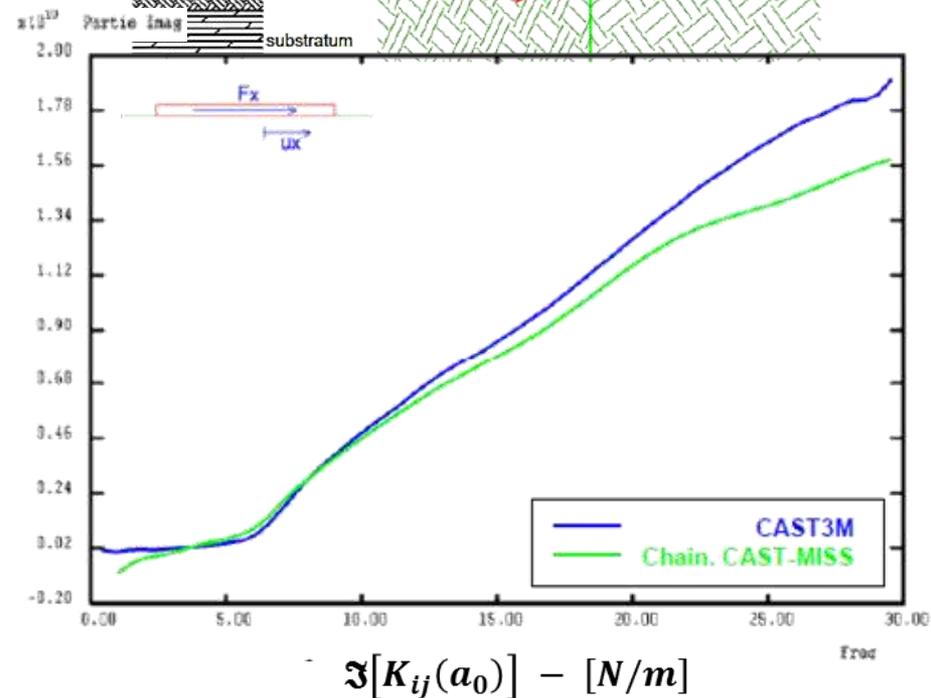
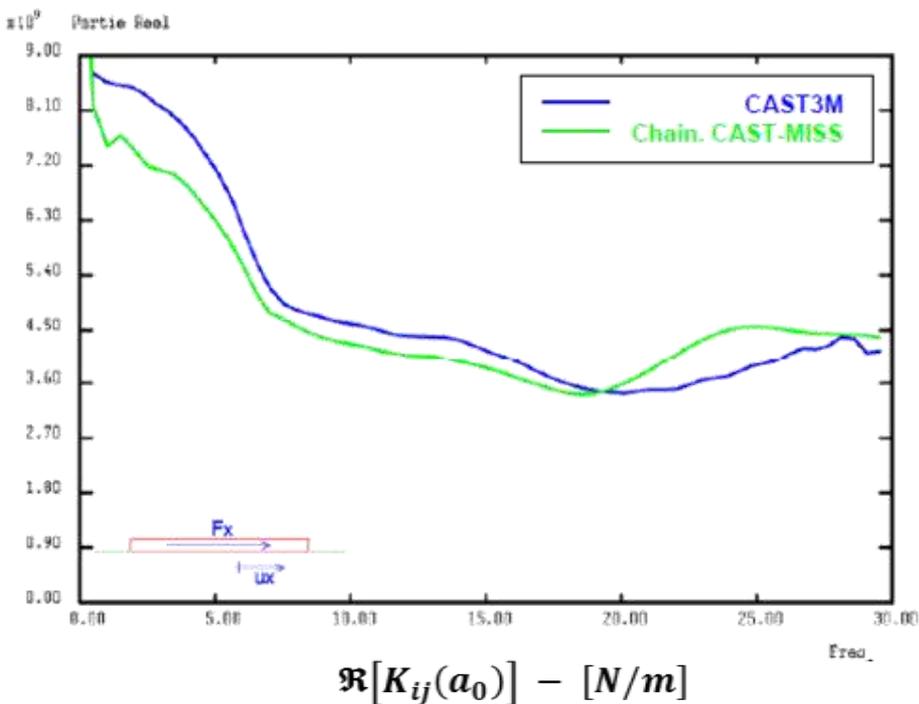
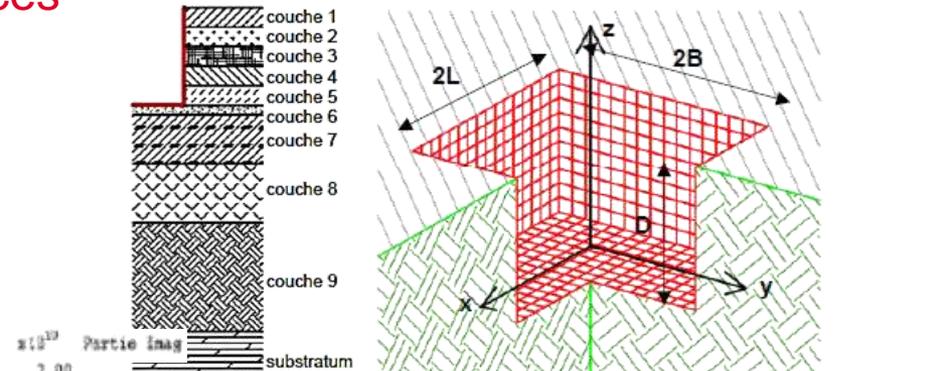


Cas de validation: Calcul des impédances

- Fondation rectangulaire enfoncée sur sol multicouche

$$2B = 8 \text{ m} \quad 2L = 8 \text{ m} \quad D = 5 \text{ m}$$

$$F_{max} = 30 \text{ Hz}$$

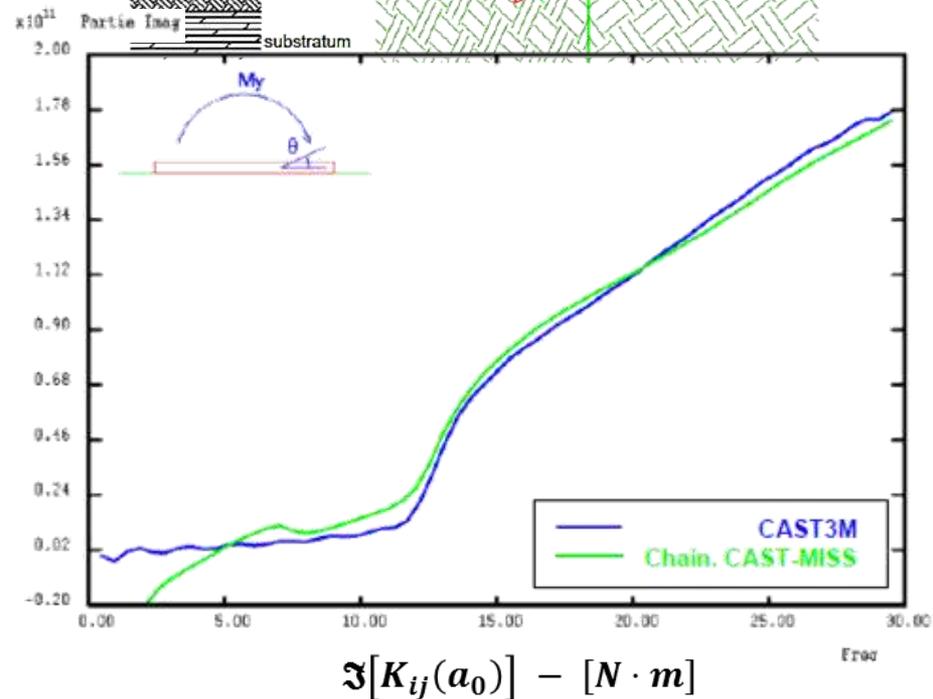
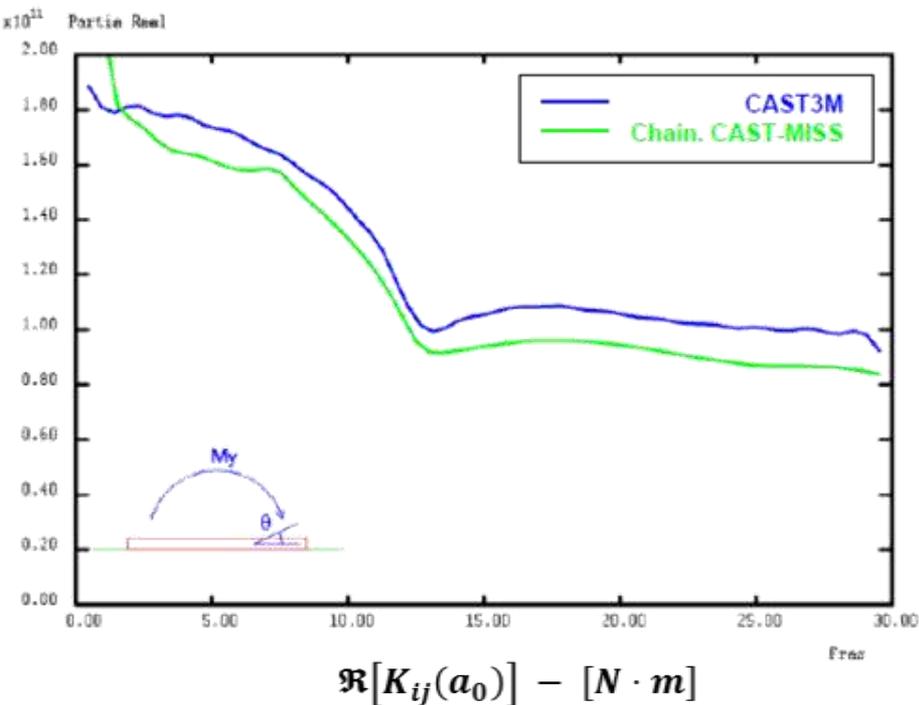
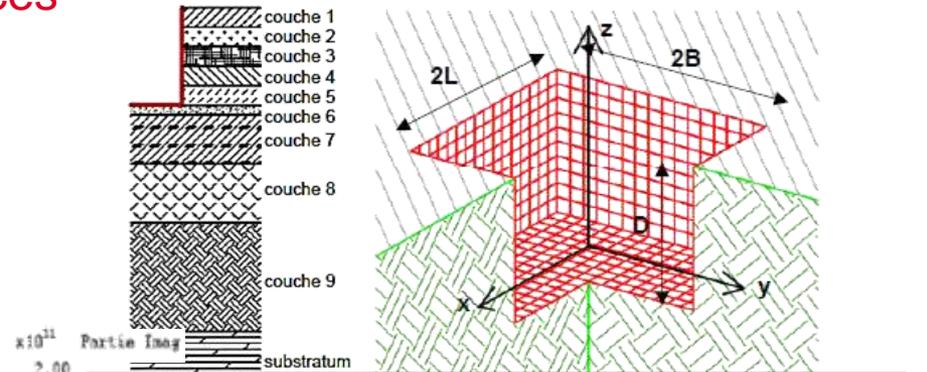


Cas de validation: Calcul des impédances

- Fondation rectangulaire enfoncée sur sol multicouche

$$2B = 8 \text{ m} \quad 2L = 8 \text{ m} \quad D = 5 \text{ m}$$

$$F_{max} = 30 \text{ Hz}$$



Cas de validation: Calcul ISS

- Poteau posé sur une fondation superficielle
Sol homogène

$$R = 1,13 \text{ m}$$

$$H = 10 \text{ m}$$

$$M_{tot} = 10000 \text{ kg}$$

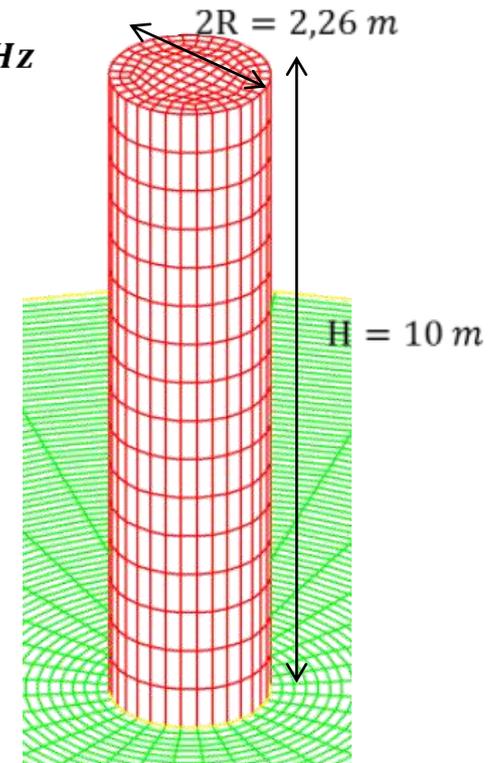
$$f_0 = 9,67 \text{ Hz}$$

$$G_{sol} = 100 \cdot e7 \text{ Pa}$$

$$\nu = 0.33$$

$$\rho_{sol} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\beta_{sol} = 0.01$$

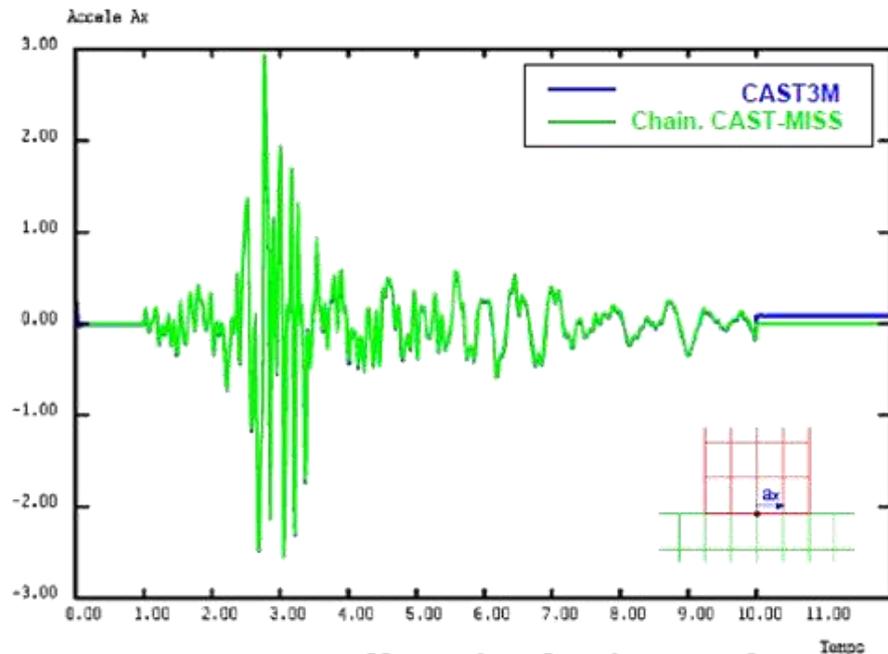
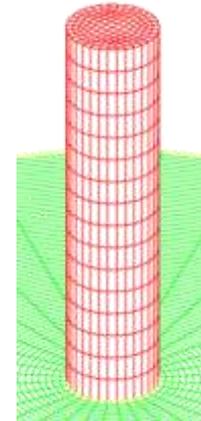


Cas de validation: Calcul ISS

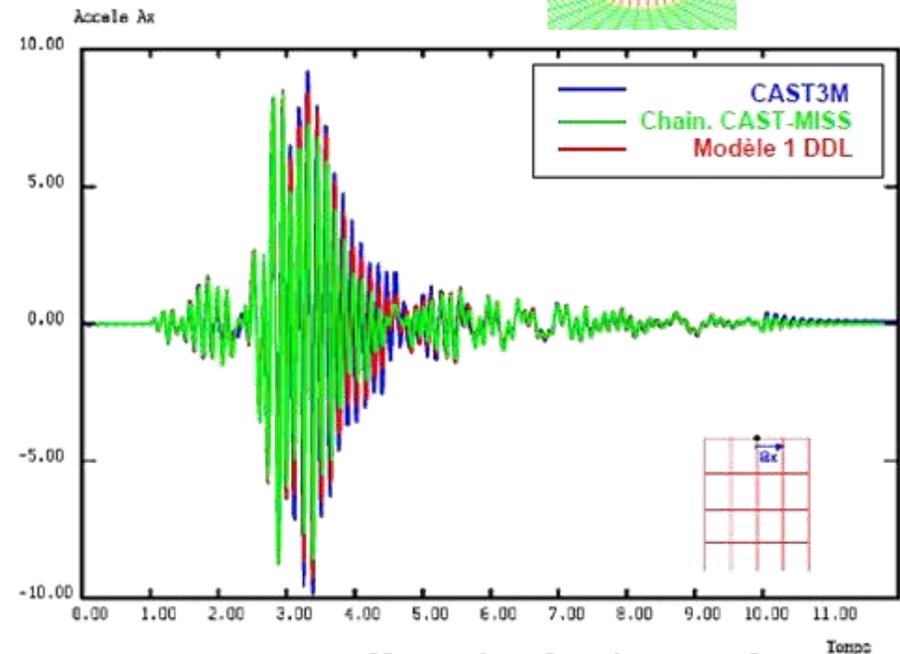
- Poteau posé sur une fondation superficielle
Sol homogène

$$R = 1,13 \text{ m} \quad H = 10 \text{ m} \quad M_{tot} = 10000 \text{ kg} \quad f_0 = 9,67 \text{ Hz}$$

$$G_{sol} = 100 \cdot e7 \text{ Pa} \quad \nu = 0.33 \quad \rho_{sol} = 2000 \text{ kg/m}^3 \quad \beta_{sol} = 0.01$$



*Accélération horizontale
du radier – [m/s²]*



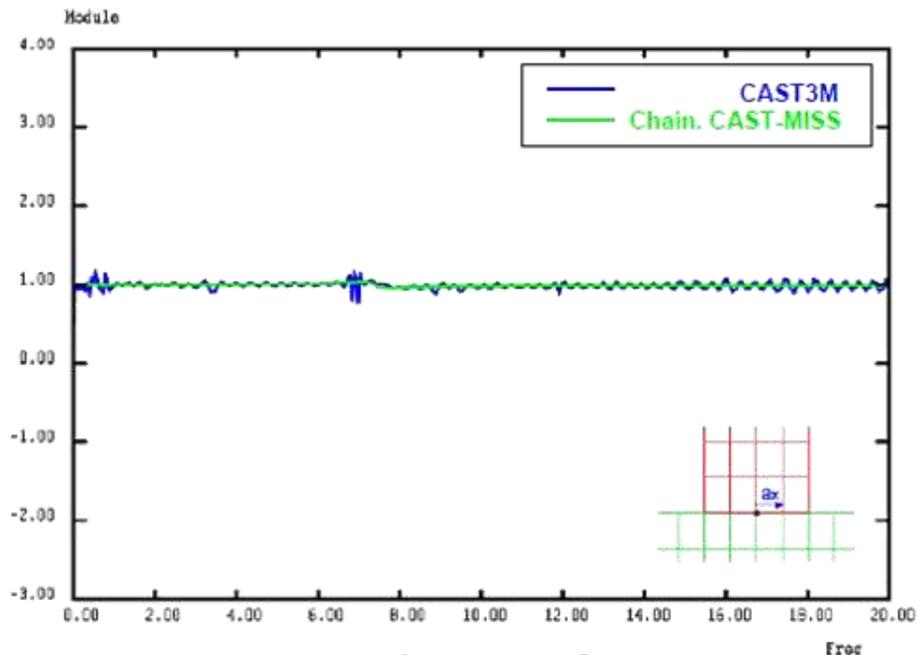
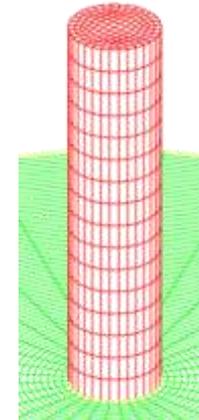
*Accélération horizontale
du sommet – [m/s²]*

Cas de validation: Calcul ISS

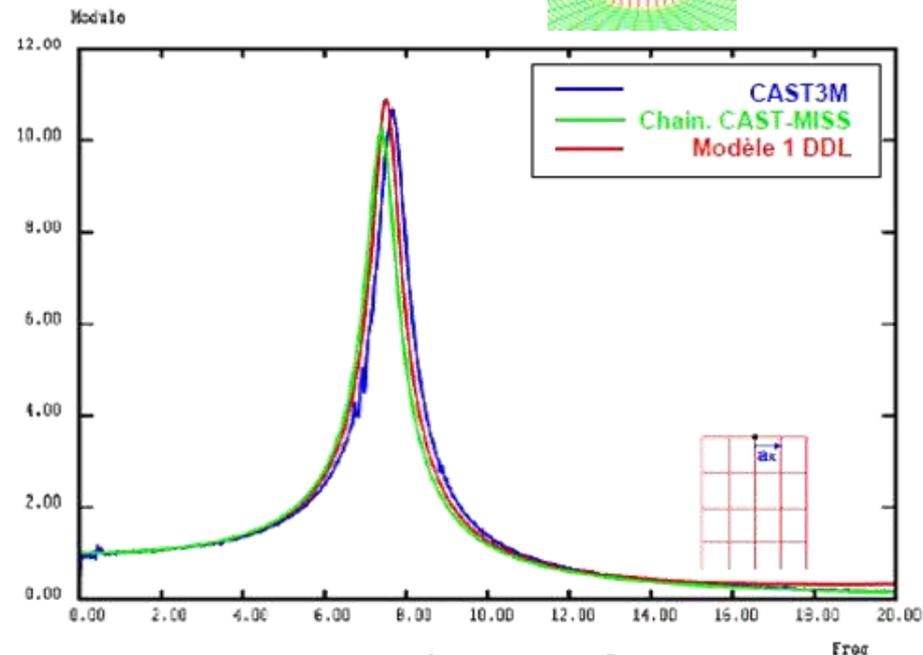
- Poteau posé sur une fondation superficielle
Sol homogène

$$R = 1,13 \text{ m} \quad H = 10 \text{ m} \quad M_{tot} = 10000 \text{ kg} \quad f_0 = 9,67 \text{ Hz}$$

$$G_{sol} = 100. e7 \text{ Pa} \quad \nu = 0.33 \quad \rho_{sol} = 2000 \text{ kg/m}^3 \quad \beta_{sol} = 0.01$$



*Fonction transfert
accel.radier/seisme*



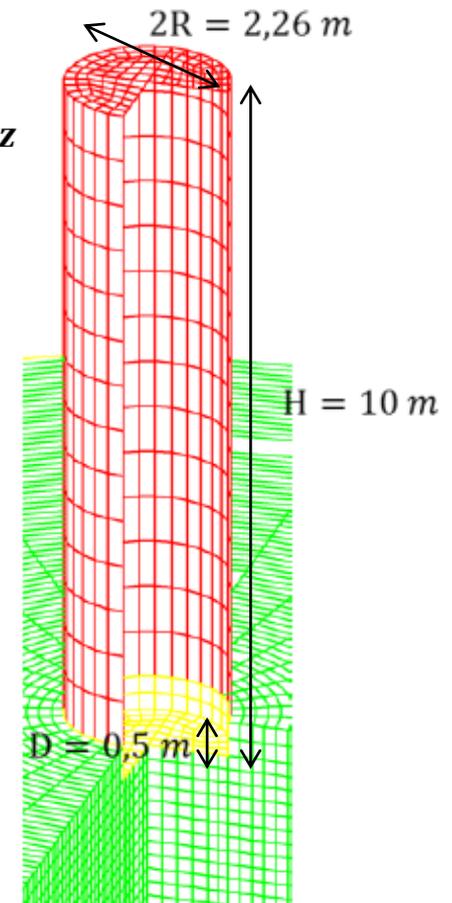
*Fonction transfert
accel.sommet/seisme*

Cas de validation: Calcul ISS

- Poteau posé sur une fondation enfoncée
Sol homogène

$$R = 1,13 \text{ m} \quad H = 10 \text{ m} \quad D = 0,5 \text{ m} \quad M_{tot} = 10000 \text{ kg} \quad f_0 = \mathbf{10,39 \text{ Hz}}$$

$$G_{sol} = 100 \cdot e7 \text{ Pa} \quad \nu = 0,33 \quad \rho_{sol} = 2000 \text{ kg/m}^3 \quad \beta_{sol} = 0,01$$

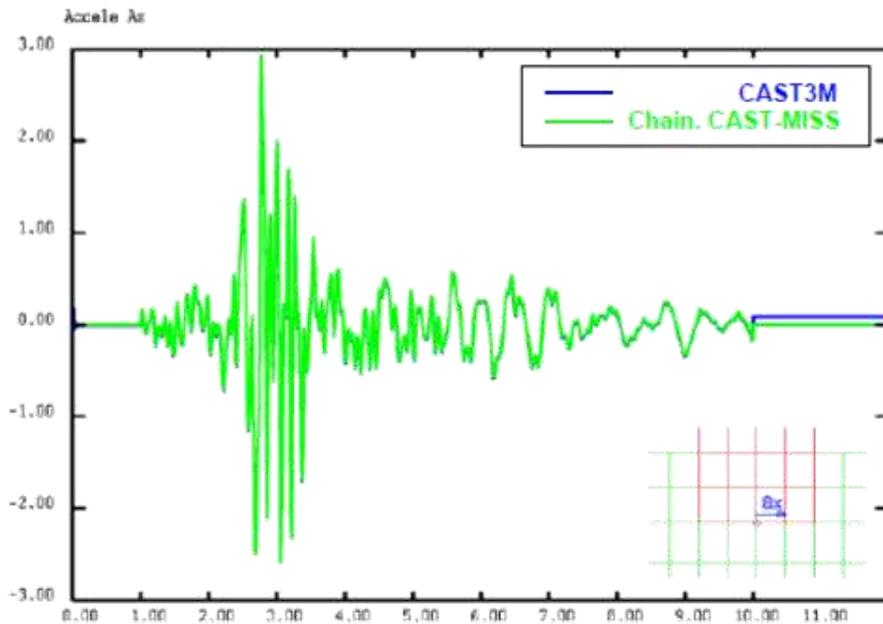
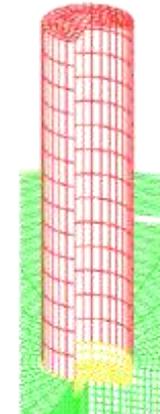


Cas de validation: Calcul ISS

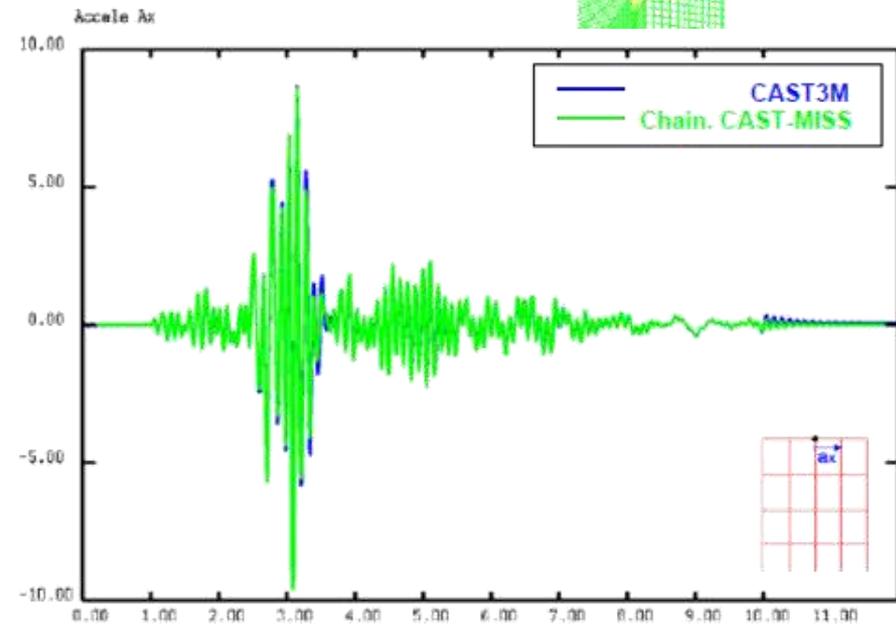
- Poteau posé sur une fondation enfoncée
Sol homogène

$$R = 1,13 \text{ m} \quad H = 10 \text{ m} \quad D = 0,5 \text{ m} \quad M_{tot} = 10000 \text{ kg} \quad f_0 = 10,39 \text{ Hz}$$

$$G_{sol} = 100 \cdot e7 \text{ Pa} \quad \nu = 0,33 \quad \rho_{sol} = 2000 \text{ kg/m}^3 \quad \beta_{sol} = 0,01$$



**Accélération horizontale
du radier – [m/s²]**



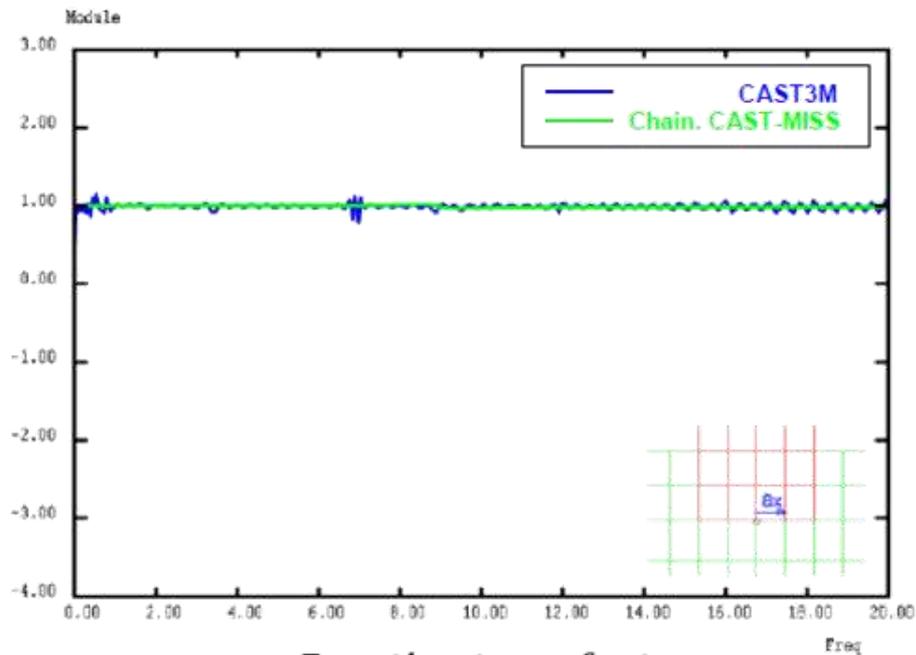
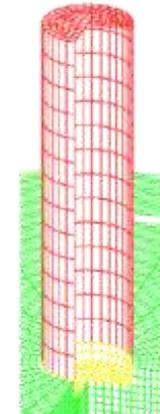
**Accélération horizontale
du sommet – [m/s²]**

Cas de validation: Calcul ISS

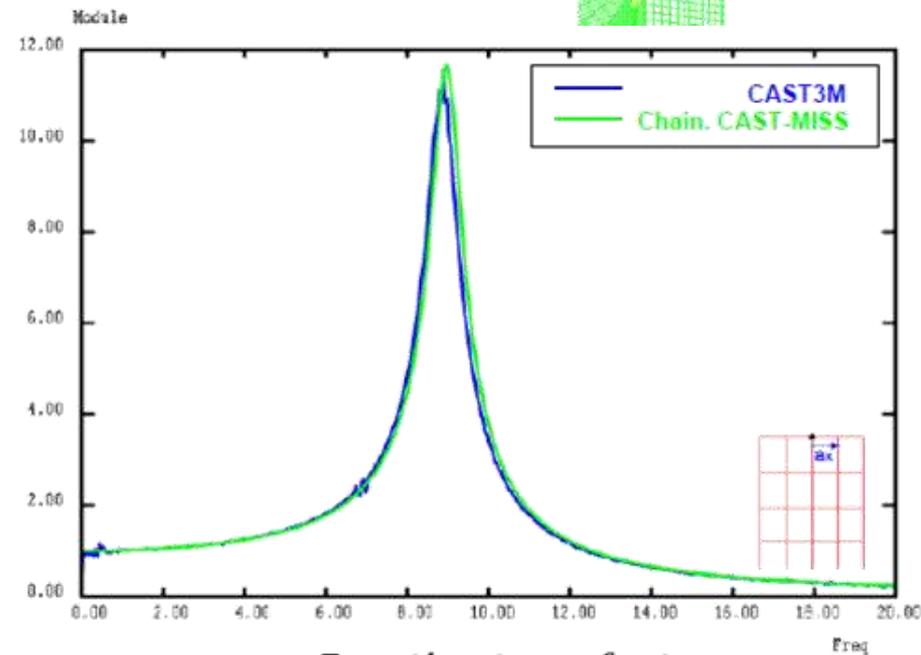
- Poteau posé sur une fondation enfoncée
Sol homogène

$$R = 1,13 \text{ m} \quad H = 10 \text{ m} \quad D = 0,5 \text{ m} \quad M_{tot} = 10000 \text{ kg} \quad f_0 = \mathbf{10,39 \text{ Hz}}$$

$$G_{sol} = 100.e7 \text{ Pa} \quad \nu = 0.33 \quad \rho_{sol} = 2000 \text{ kg/m}^3 \quad \beta_{sol} = 0.01$$

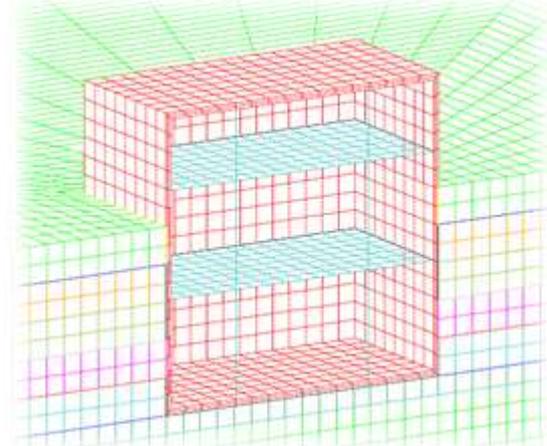
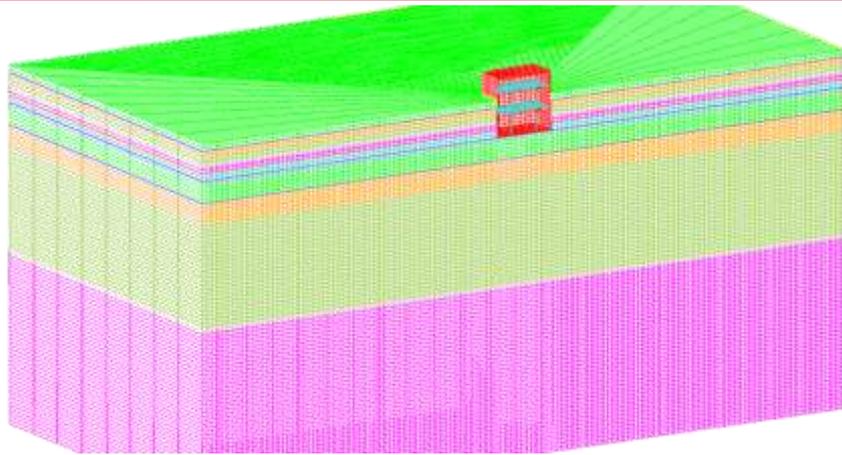


*Fonction transfert
accel.radieur/seisme*



*Fonction transfert
accel.sommet/seisme*

ISS – CHAÎNAGE CAST3M-MISS3D



- On a une économie du temps de calcul par rapport à la méthode directe pour les fondations superficielle;
- En revanche, pour une fondation souple ou enfoncée le temps de calcul augmente énormément;
- Les cas tests ont montré la validé du chainage;
- Problèmes numériques dans les cas où on utilise les liaisons statiques (DDL par DDL) pour décrire la cinématique de la fondation;
- La possibilité de choisir des modes d'interface pour une fondation souple réduit le temps de calcul par rapport à des liaisons statiques. Il reste à mieux comprendre comment choisir ces modes et selon quel critère.

MODÉLISATION SIMPLIFIÉE D'UN ÉLÉMENT « BÉTON ARME »

Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Principes

- Comportement du béton

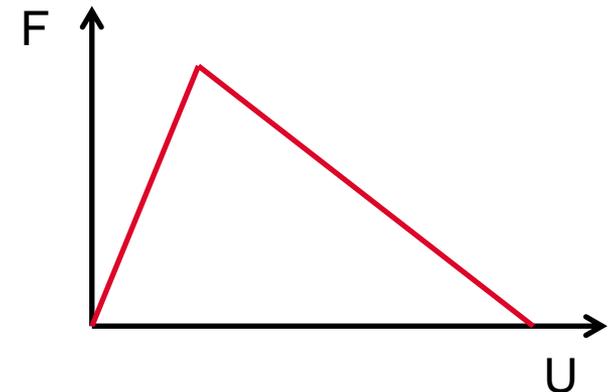
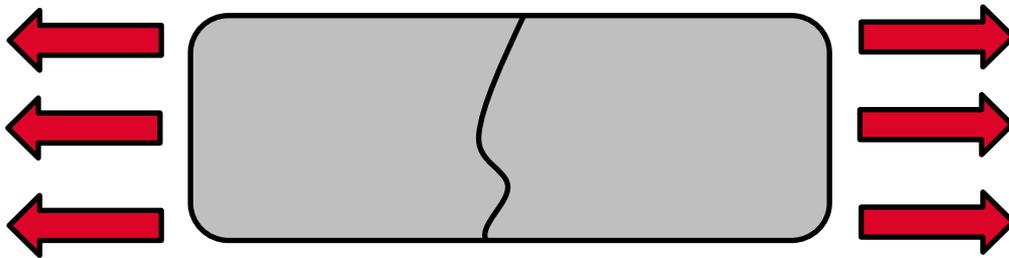


Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Principes

- Comportement du béton



Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Principes

- Comportement de l'acier

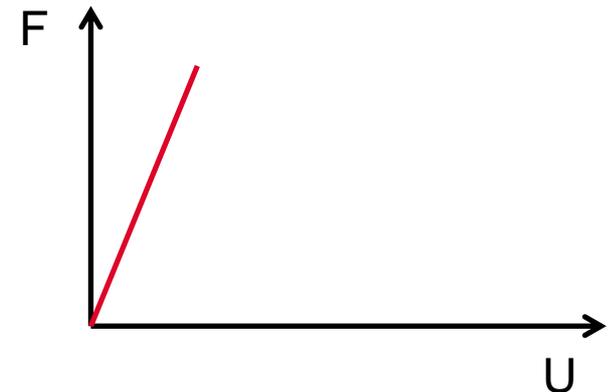


Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Principes

- Comportement de l'acier



Limitation

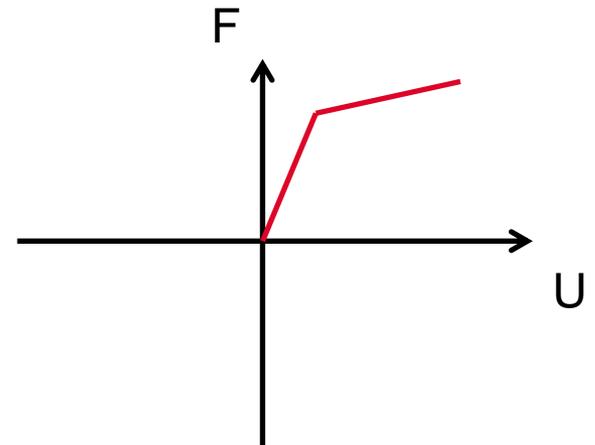
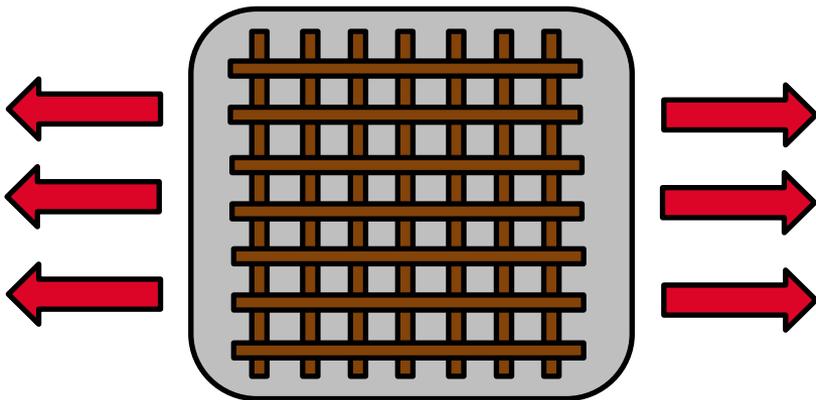
- Pas de plastification de l'acier possible;

Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Principes

- Comportement d'une élément « béton armé »
 - Partie membrane : endommagement isotrope asymétrique;

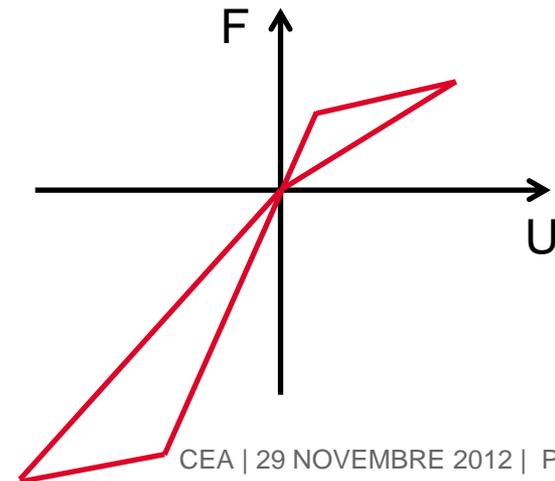
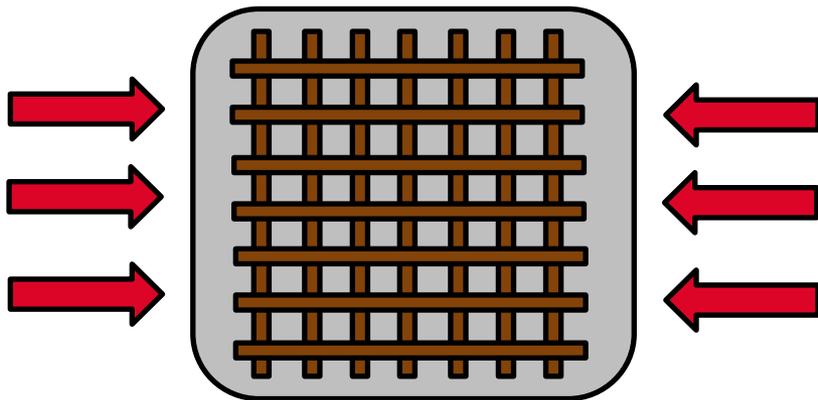


Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Principes

- Comportement d'une élément « béton armé »
 - Partie membrane : endommagement isotrope asymétrique;

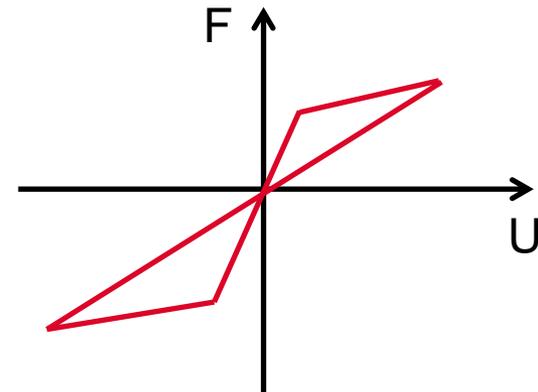
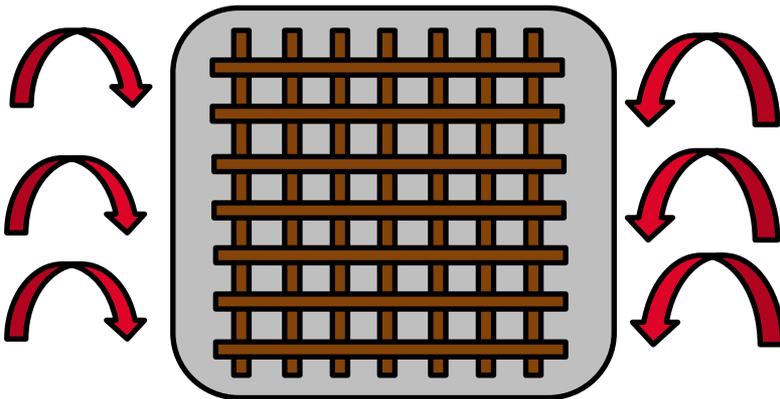


Motivations

- Simplicité de la formulation;
- Indépendance vis-à-vis du maillage;
- Efficacité en terme de coût de calculs;

Principes

- Comportement d'une élément « béton armé »
 - Partie flexion : endommagement isotrope symétrique;



Formulation

- Potentiel d'état : énergie libre d'Helmholtz;
- Elasticité linéaire isotrope;

$$\Psi = \frac{\lambda}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon})^2 + \mu \sum_{i=1}^3 \tilde{\epsilon}_i^2$$

Formulation

- Potentiel d'état : énergie libre d'Helmholtz;
- Elasticité linéaire isotrope;

$$\Psi = \frac{\lambda}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon})^2 + \mu \sum_{i=1}^3 \tilde{\epsilon}_i^2$$

- Mécanisme d'endommagement isotrope (deux variables scalaires)

$$\Psi = \frac{\lambda}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon})^2 \xi(\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}), d_j) + \mu \sum_{i=1}^3 \tilde{\epsilon}_i^2 \xi(\tilde{\epsilon}_i, d_j)$$

Formulation

- Potentiel d'état : énergie libre d'Helmholtz;
- Elasticité linéaire isotrope;

$$\Psi = \frac{\lambda}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon})^2 + \mu \sum_{i=1}^3 \tilde{\epsilon}_i^2$$

- Mécanisme d'endommagement isotrope (deux variables scalaires)

$$\Psi = \frac{\lambda}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon})^2 \xi(\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}), d_j) + \mu \sum_{i=1}^3 \tilde{\epsilon}_i^2 \xi(\tilde{\epsilon}_i, d_j)$$

- Séparation parties membrane et flexion – isolation de la déformation transversale

$$\Psi_S = \frac{\lambda_m}{2} (\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}) + \epsilon_{zz})^2 \xi_m(\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}), d_j) + \mu_m \left(\sum_{i=1}^2 \tilde{\epsilon}_i^2 \xi_m(\tilde{\epsilon}_i, d_j) + \epsilon_{zz}^2 \right) + \frac{\lambda_f}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\kappa})^2 \xi_f(\text{tr}(\boldsymbol{\kappa}), d_j) + \mu_f \sum_{i=1}^2 \tilde{\kappa}_i^2 \xi_f(\tilde{\kappa}_i, d_j)$$

Formulation

- Lois d'état – repère principal;

$$\tilde{N}_i = \lambda_m (\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}) + \epsilon_{zz}) \xi_m (\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}), d_j) + 2\mu_m \tilde{\epsilon}_i \xi_m (\tilde{\epsilon}_i, d_i)$$

$$\tilde{M}_i = \lambda_f \text{tr}(\boldsymbol{\kappa}) \xi_f (\text{tr}(\boldsymbol{\kappa}), d_j) + 2\mu_f \tilde{\kappa}_i \xi_f (\tilde{\kappa}_i, d_j)$$

Formulation

- Lois d'état – repère principal;

$$\tilde{N}_i = \lambda_m (\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}) + \epsilon_{zz}) \xi_m(\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}), d_j) + 2\mu_m \tilde{\epsilon}_i \xi_m(\tilde{\epsilon}_i, d_i)$$

$$\tilde{M}_i = \lambda_f \text{tr}(\boldsymbol{\kappa}) \xi_f(\text{tr}(\boldsymbol{\kappa}), d_j) + 2\mu_f \tilde{\kappa}_i \xi_f(\tilde{\kappa}_i, d_j)$$

- Lois d'état – repère de travail;

$$\mathbf{N} = \mathbf{Q}_m \tilde{\mathbf{N}} \mathbf{Q}_m^t$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{Q}_f \tilde{\mathbf{M}} \mathbf{Q}_f^t$$

Formulation

- Lois d'état – repère principal;

$$\tilde{N}_i = \lambda_m (\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}) + \epsilon_{zz}) \xi_m(\text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}), d_j) + 2\mu_m \tilde{\epsilon}_i \xi_m(\tilde{\epsilon}_i, d_i)$$

$$\tilde{M}_i = \lambda_f \text{tr}(\boldsymbol{\kappa}) \xi_f(\text{tr}(\boldsymbol{\kappa}), d_j) + 2\mu_f \tilde{\kappa}_i \xi_f(\tilde{\kappa}_i, d_j)$$

- Lois d'état – repère de travail;

$$\mathbf{N} = \mathbf{Q}_m \tilde{\mathbf{N}} \mathbf{Q}_m^t$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{Q}_f \tilde{\mathbf{M}} \mathbf{Q}_f^t$$

- Seuils et évolution des variables d'endommagement;

$$f_{d_j} = Y_j - k_{0_j} \leq 0$$

$$Y_j = -\frac{\partial \Psi_s}{\partial d_j} = Y_j^m + Y_j^f$$

$$\dot{d}_j = \dot{\eta} \frac{\partial f_{d_j}}{\partial Y_j}$$

Identification efficace des paramètres

- Paramètres élastiques «béton armé»:
 - Paramètres élastiques du béton;
 - Paramètres élastiques de l'acier;

Identification efficace des paramètres

- Paramètres élastiques «béton armé»:
 - Paramètres élastiques du béton;
 - Paramètres élastiques de l'acier;

- Seuils initiaux:
 - Résistance en traction du béton;
 - Densité de ferrailage;
 - Densité d'effort normal maximal en compression;
 - Position relative de la nappe dans l'épaisseur;

Identification efficace des paramètres

- Paramètres élastiques «béton armé»:
 - Paramètres élastiques du béton;
 - Paramètres élastiques de l'acier;

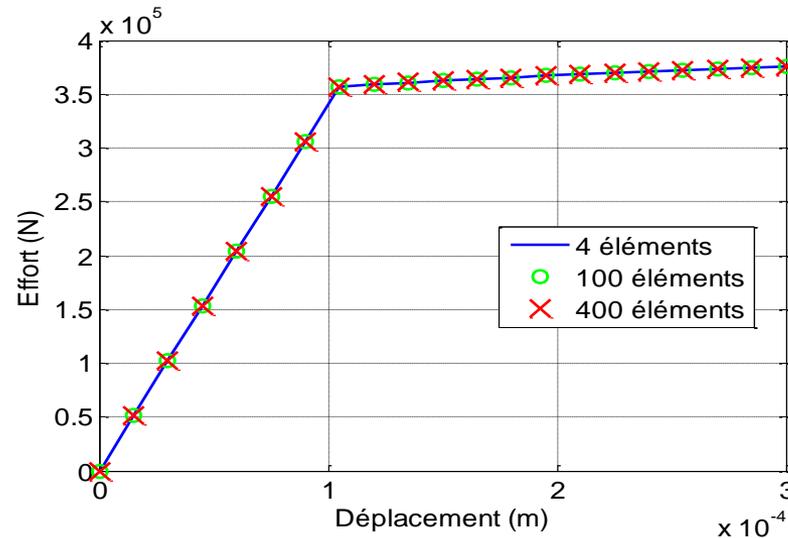
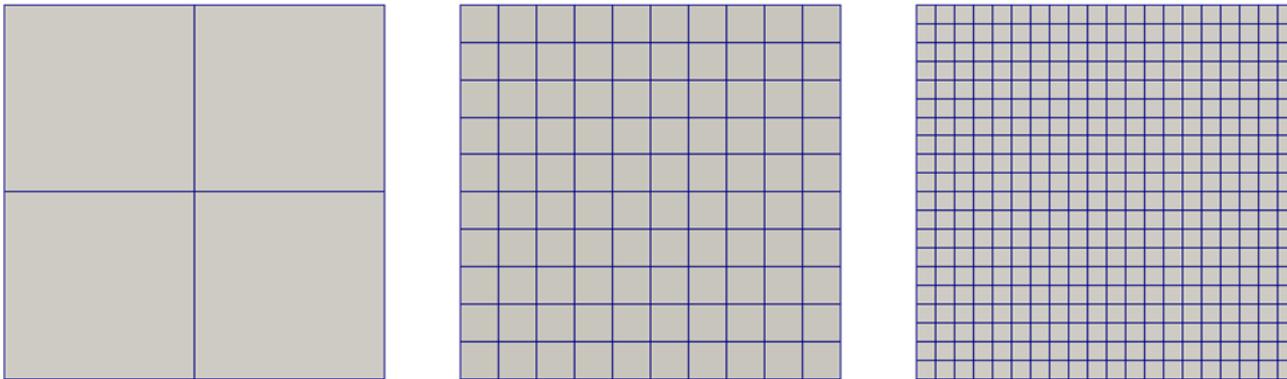
- Seuils initiaux:
 - Résistance en traction du béton;
 - Densité de ferrailage;
 - Densité d'effort normal maximal en compression;
 - Position relative de la nappe dans l'épaisseur;

- Paramètres d'évolution des variables d'endommagement:
 - Valeurs nominales recommandées selon le cas de chargement (prédominance du cisaillement, etc.);

PROCEDURE « IDENTI.PROCEDUR »

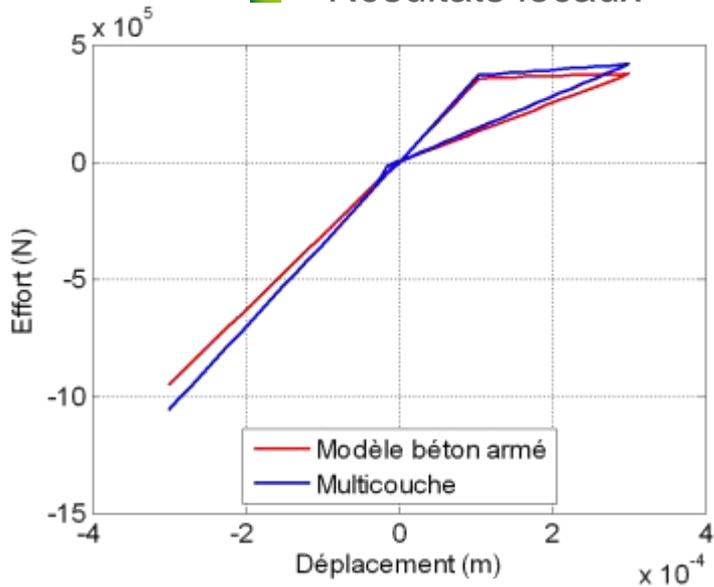
Résultats numériques

■ Résultats locaux

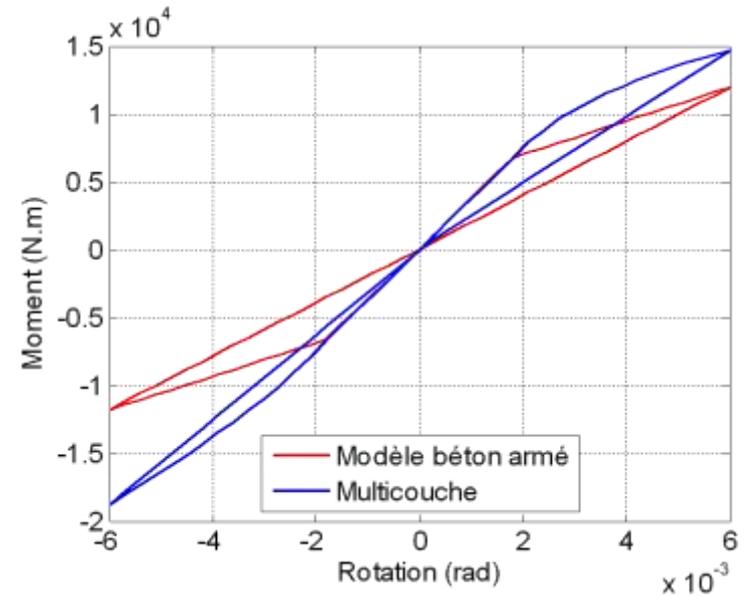


Résultats numériques

■ Résultats locaux



Traction/compression – partie membrane



Flexion alternée – partie flexion

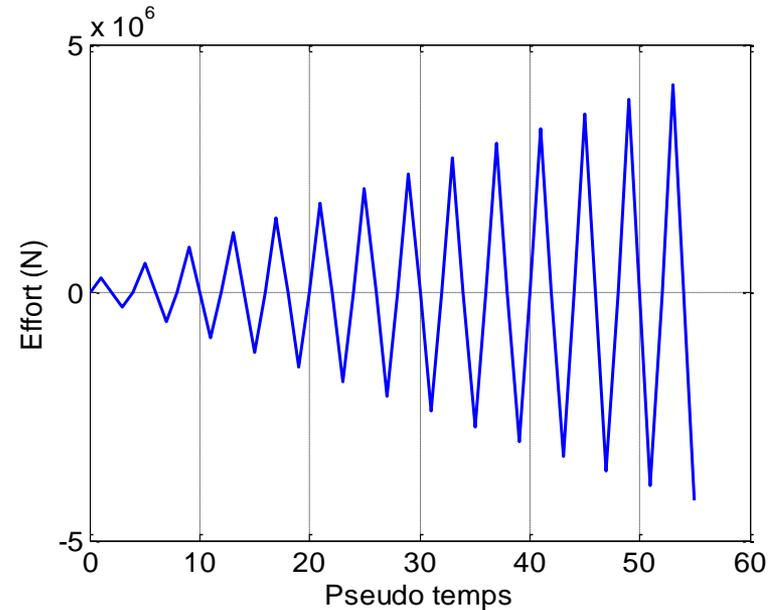
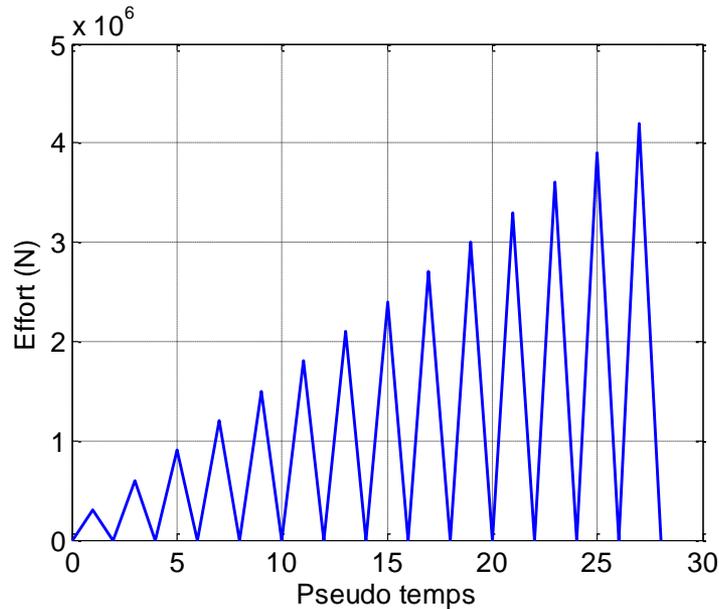
Résultats numériques

- Chargement Statique monotone et cyclique
 - Voile en béton armé testés dans le cadre de CEAOS.fr au CEBTP



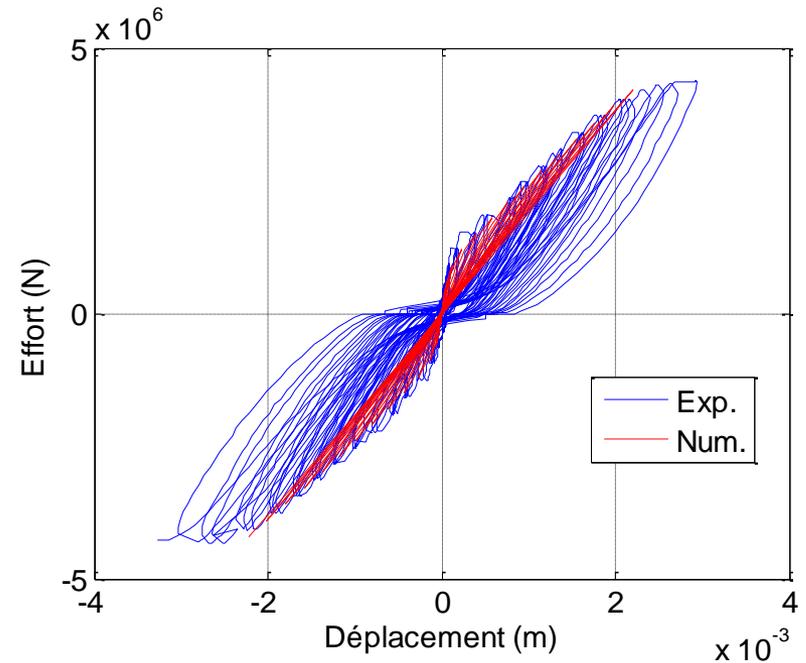
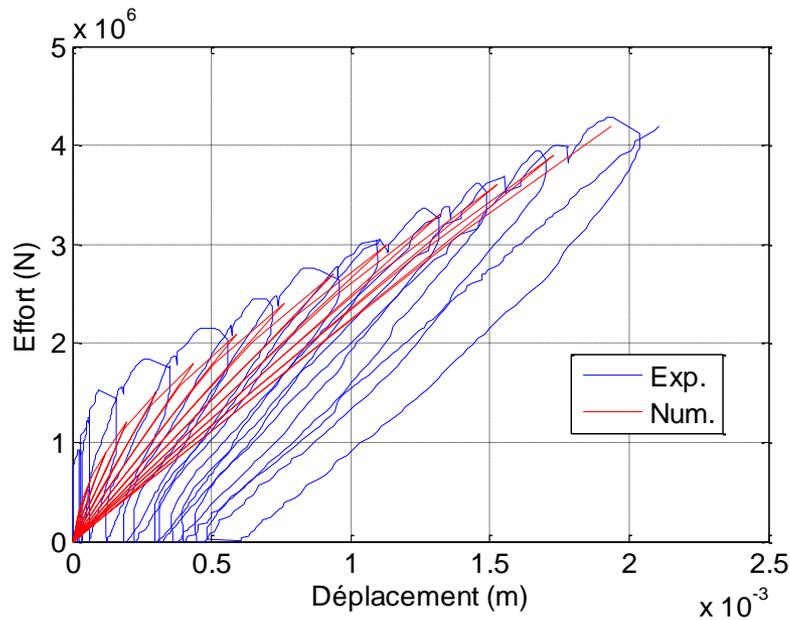
Résultats numériques

- Chargement Statique monotone et cyclique
- Voile en béton armé testés dans le cadre de CEAOS.fr au CEBTP



Résultats numériques

- Chargement Statique monotone et cyclique
- Voile en béton armé testés dans le cadre de CEAOS.fr au CEBTP



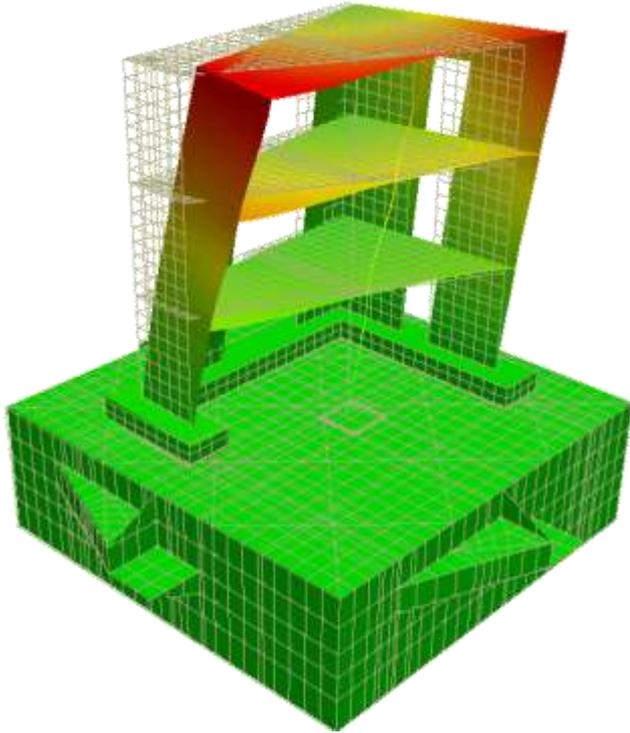
Résultats numériques

- Chargement dynamique non linéaire – Comparaison numérique/numérique
 - Campagne d'essai ENISTAT (janvier 2013 – laboratoire EMSI) dans le cadre du projet Européen FP7/SERIES

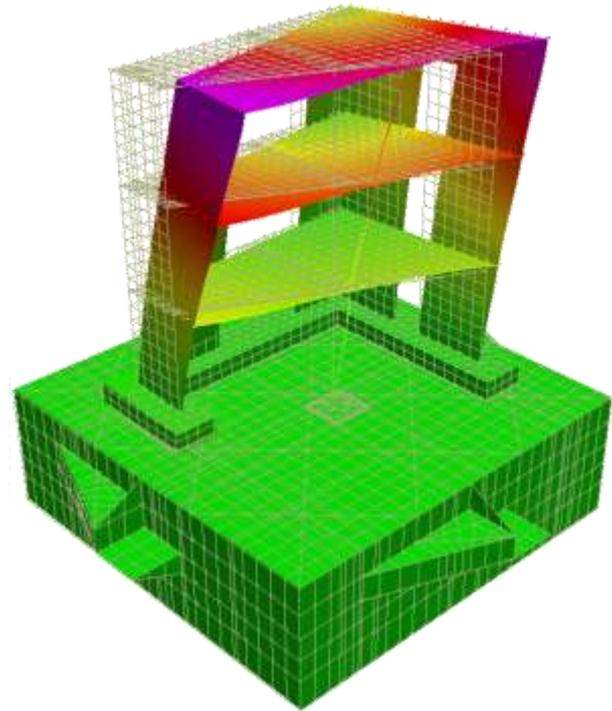


Résultats numériques

- Chargement dynamique non linéaire – Comparaison numérique/numérique
 - Campagne d'essai ENISTAT (janvier 2013 – laboratoire EMSI) dans le cadre du projet Européen FP7/SERIES



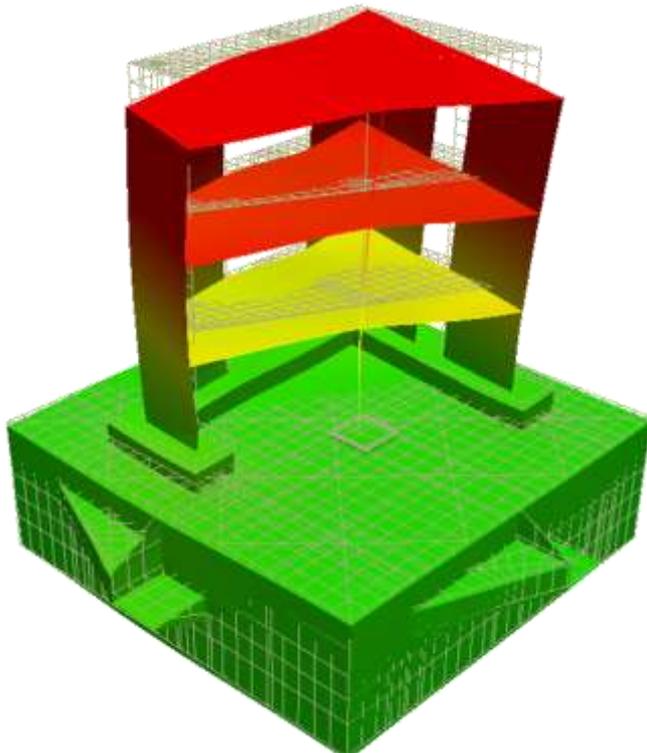
REF – 6,34 Hz



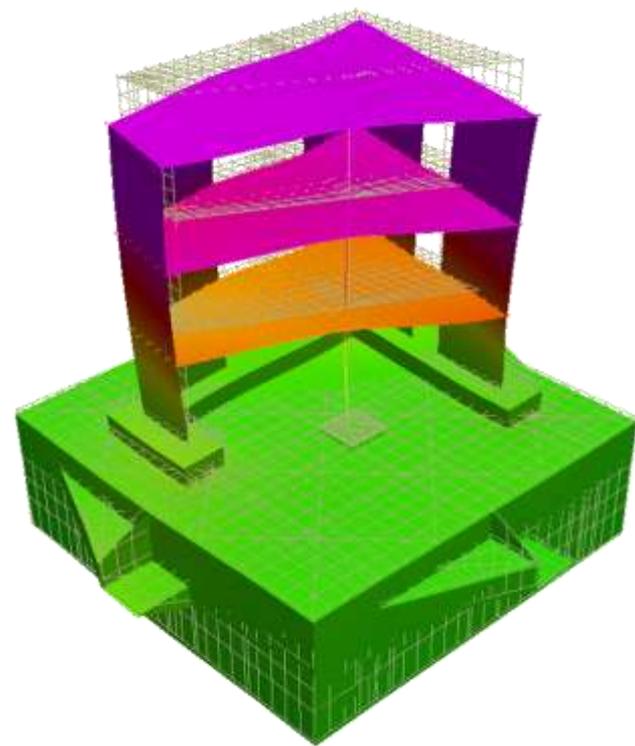
« Béton armé » - 6,44 Hz

Résultats numériques

- Chargement dynamique non linéaire – Comparaison numérique/numérique
 - Campagne d'essai ENISTAT (janvier 2013 – laboratoire EMSI) dans le cadre du projet Européen FP7/SERIES



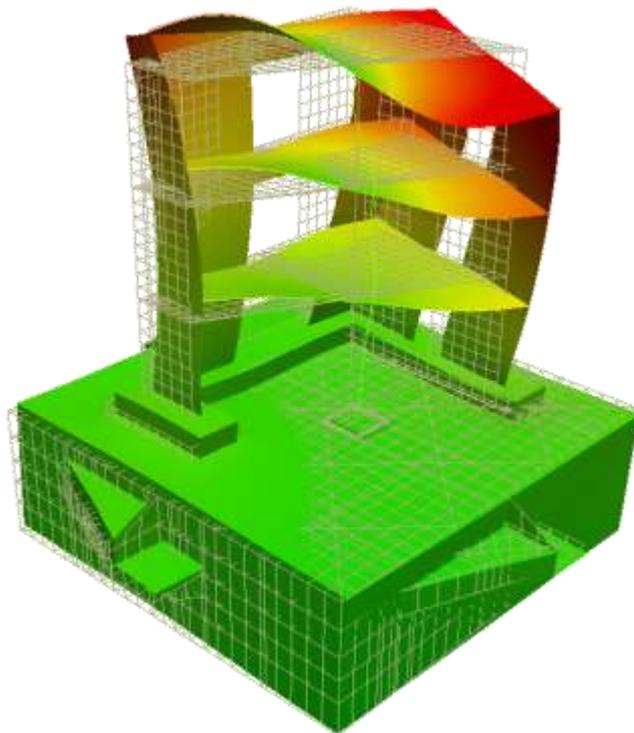
REF – 10,40 Hz



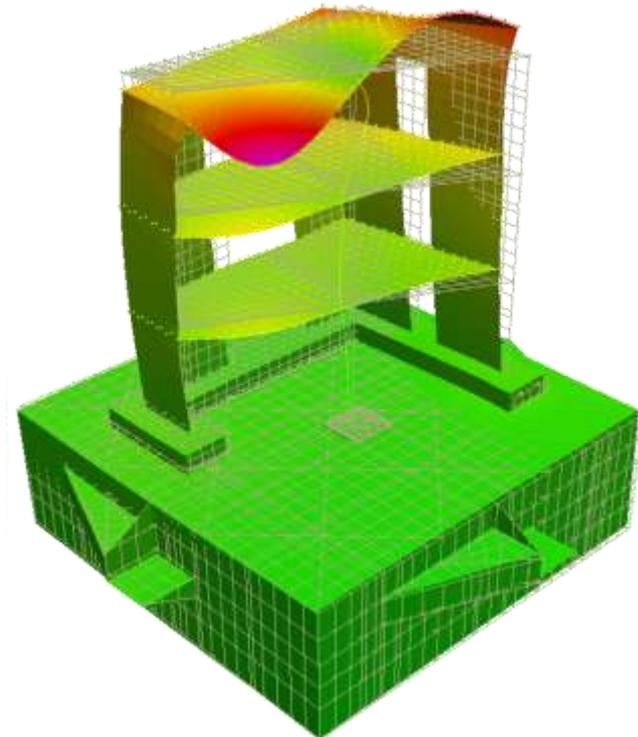
« Béton armé » - 10,60 Hz

Résultats numériques

- Chargement dynamique non linéaire – Comparaison numérique/numérique
 - Campagne d'essai ENISTAT (janvier 2013 – laboratoire EMSI) dans le cadre du projet Européen FP7/SERIES



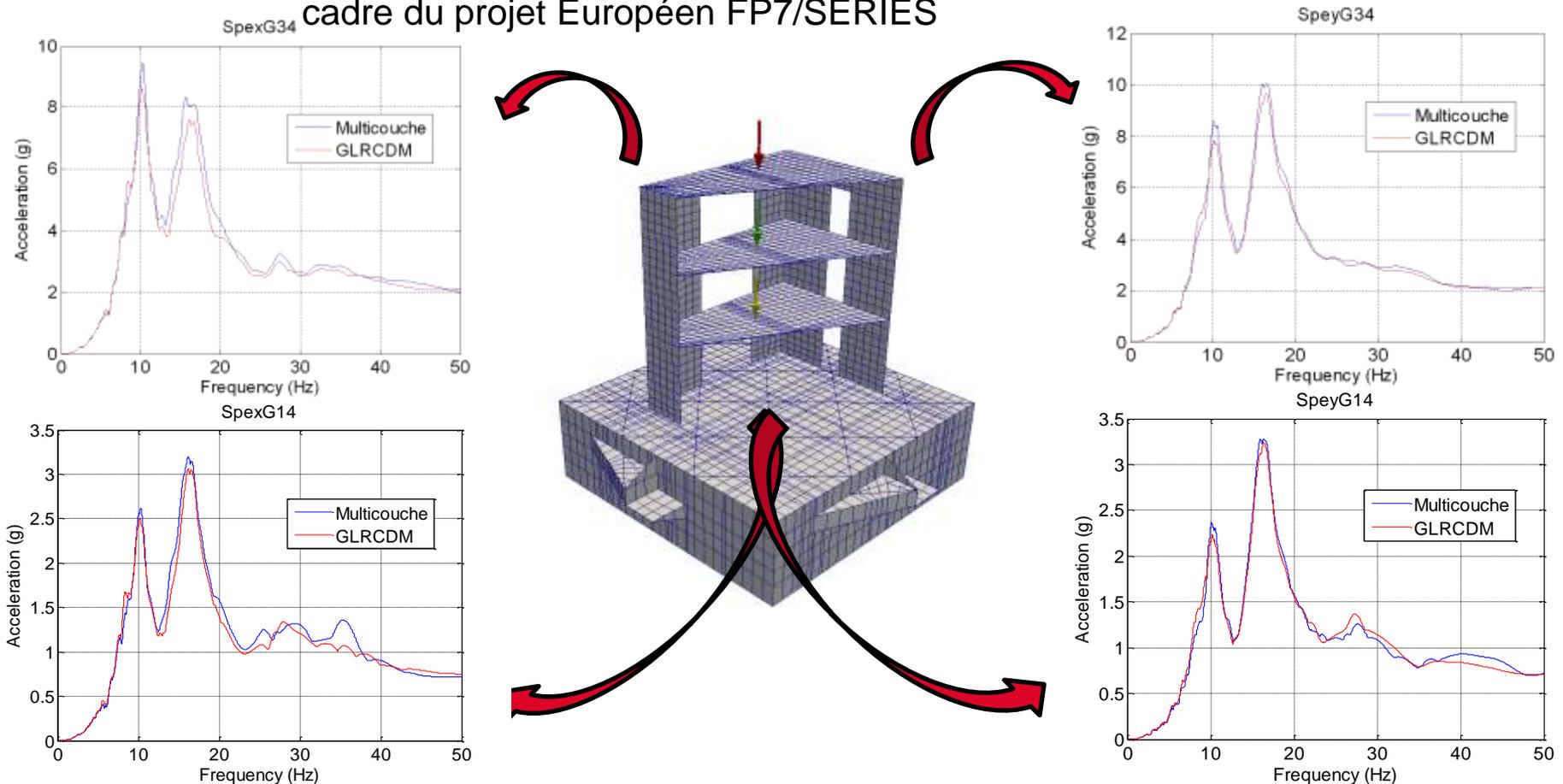
REF – 19,30 Hz



« Béton armé » – 19,50 Hz

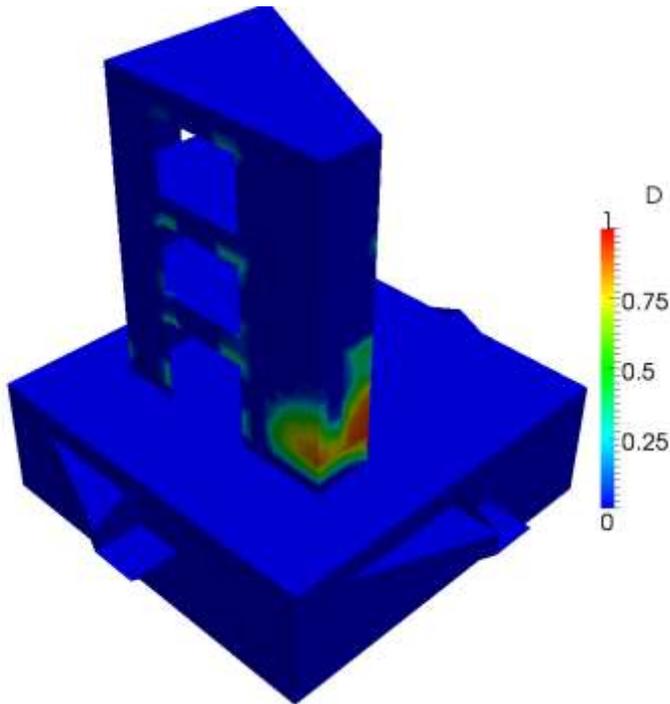
Résultats numériques

- Chargement dynamique non linéaire – Comparaison numérique/numérique
- Campagne d'essai ENISTAT (janvier 2013 – laboratoire EMSI) dans le cadre du projet Européen FP7/SERIES

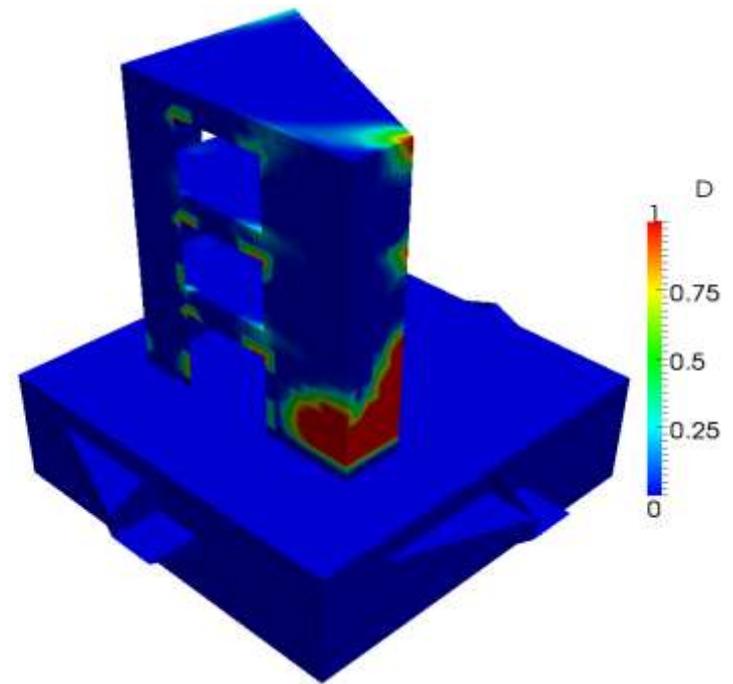


Résultats numériques

- Chargement dynamique non linéaire – Comparaison numérique/numérique
 - Campagne d'essai ENISTAT (janvier 2013 – laboratoire EMSI) dans le cadre du projet Européen FP7/SERIES

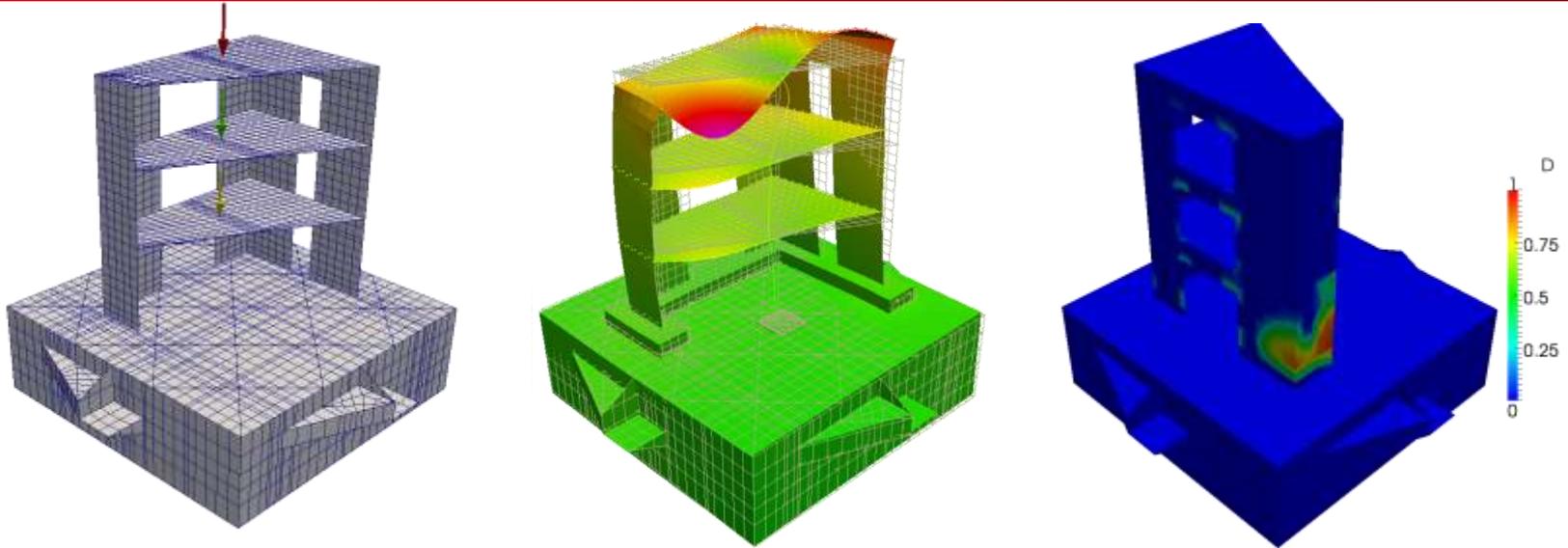


REF



« Béton armé »

MODÉLISATION SIMPLIFIÉE D'UN ÉLÉMENT « BÉTON ARME »



- Implantation d'un modèle global « béton armé » dans CAST3M;
- Validation numérique/numérique et expérience/numérique;
- Identification efficace des paramètres matériaux à partir des données observables;
- Une limitation: plastification des aciers non prise en compte;

- *Marc Bonnet*, **Equations intégrales et éléments de frontières**, Sciences et techniques de l'ingénieur, ISBN 2-212-05820, 1995
- *Didier Clouteau*, **Thèse: «Propagation d'ondes dans des milieux hétérogènes – application à la tenue des ouvrages sous séismes»**, Ecole Central Paris, LMSSMat, 1990
- *Didier Clouteau*, **MISS 6.4: «Manuel Scientifique» Version 1.2**, Manuel MISS3D <http://www.mssmat.ecp.fr/>, 2005
- *Didier Clouteau*, **MISS 6.5: «Manuel Informatique» Version 2.4**, Manuel MISS3D, <http://www.mssmat.ecp.fr/>, 2005
- *Didier Clouteau*, **MISS 6.5: «Manuel Utilisateur» Version 2.4**, Manuel MISS3D, <http://www.mssmat.ecp.fr/>, 2005
- *Nader MEZHER*, **Couplage code Miss3D et CAST3M**, Rapport Technique N162_2009_CEA_A, 2009
- *Jean-Georges SIEFFERT & Franck CEVAER*, **Manuel des Fonctions d'impédance**, OUEST EDITIONS – Presses Académique ISBN-908264-32-4, 1991
- *D. Clouteau, D. Broc, G. Devesa, V. Guyonvarh, P. Massin*, **Calculation methods of Structure-Soil-Structure Interaction (3SI) for embedded buildings: Application to NUPEC test**, Soil and Dynamics Earthquake Engineering 32 pag 129-142, 2012
- [CONCRACK, 2010] <http://www.concrack.org/>
- *S. Fayolle*. **Loi de comportement GLRC_DM. Manuel de référence Code_Aster**. R7.01.32. 2011.
- *N. Ile, JM. Reynouard*. **Non-linear analysis of reinforced concrete shear wall under earthquake loading**. Journal of Earthquake Engineering. 4(2):183-213. 2000
- *N. Ile*. **Influence de la fissuration du béton sur les mouvements transférés – phase 1 : capitalisation des résultats des études expérimentales sur des voiles en béton armé**. Rapport Technique DEN. RT-12-001/A. 2012.
- *L. Jason*. **Projet National CEOS.fr - Simulation de deux cas test du Benchmark « concrack »**. Rapport Technique DEN. RT-11-001/A. 2010.
- *D. Markovic, S. Ghavamian, S. Poulin, F. Voldoire*. **Reinforced Concrete Structures under seismic motion – safety margin assessment by FEM simulation**. Eccomas thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering. 2007.
- *O. Merabet, JM. Reynouard*. **Formulation d'un modèle élasto-plastique fissurable pour le béton sous chargements cycliques**. Contrat EDF/DER, Rapport final, URGC-Structures, No INSA-1/943/002. 1999.
- *B. Richard, N. Senegats*. **Contribution du DM2S au benchmark de la conférence internationale en génie parasismique**. Rapport Technique DEN. A paraître. 2012.
- *B. Richard, F. Ragueneau*. **Continuum damage mechanics based model for quasi brittle materials subjected to cyclic loadings: formulation, numerical implementation and applications**. Engineering Fracture Mechanics. Accepté. 2012.
- *F. Voldoire, D. Markovic, S. Moulin, L. Davenne, S. Ghavamian, N. Mezher*. **Modélisation des ouvrages de génie civil en béton armé sous sollicitations sismiques**. Journées AFPS. 2009.

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 69 08 76 74 | F. +33 (0)1 69 08 83 31

DEN
DM2S
SEMT

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019