

07.02  
2013

# Effet d'échelle

## Sur les résultats des essais sur maquette

Master Sciences et technologie  
SOMGC  
Parcours Recherche

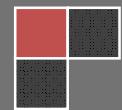


**Christian NADER**

Encadrant: Mr. Georges NAHAS

Soumis à Mr. BENNACER chef  
du département de Génie civil  
et Mr. GATUINGT le responsable  
du master.

Christian NADER  
Projet d'initiation à la recherche  
07-Fev-13



<b>Analyse bibliographique.....</b>	3
1) Projet SMART.....	3
2) Similitude.....	3
• Théorème de $\Pi$ .....	4
• Similitude de Froude.....	4
• Variables et équations adimensionnelles.....	5
3) Hypothèses.....	5
4) Coefficient de réduction lié à l'échelle de la maquette.....	5
<b>Représentativité, Conséquences et Limitations.....</b>	7
1) Justification et vérification de la loi de similitude.....	7
• Méthode de l'accélération linéaire.....	7
• Pour un modèle discrète.....	9
2) Conséquences du facteur d'échelle des masses.....	9
3) Effet de la taille des granulats.....	11
4) Effet sur la fissuration.....	12
• Effet volume.....	13
• Effet de la taille de la structure.....	14
• Résultats.....	14
5) Effet d'échelle dans les poteau en béton armé.....	15
6) Adhérence acier-béton.....	16
<b>Conclusion.....</b>	17
<b>Références.....</b>	18

Il est nécessaire d'effectuer des essais pour étudier le comportement sismique des structures de génie civil, on est donc amené à faire ces essais sur maquettes à échelles réduites pour des raisons de faisabilité et de réduction du coût du programme expérimental. Les résultats seront ensuite transposés à pleine échelle (prototype) par des règles simples qu'on va explicité dans ce qui suit.

L'objectif de ce mini-projet est de déterminer dans quelles mesures les tests sur modèle pourraient représenter la structure réelle, ainsi que les limites des lois de similitude utilisés en base pour faire la transition entre maquette et prototype.

Partie de ce projet, nous nous intéressons aux tests sur des tables vibrantes. dans ces essais, le comportement mécanique des structures sous sollicitations sismiques sont étudiés. L'application sera faite sur les tests réalisés au CEA de Saclay sur le modèle du projet SMART.

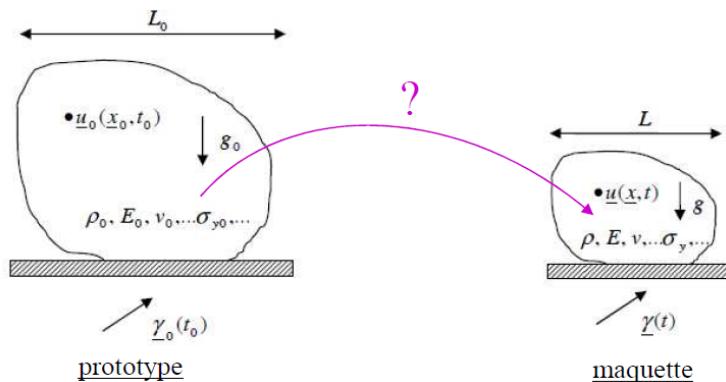
### 1) Projet SMART

Les bâtiments en béton armé, présentant des effets tridimensionnels avec un comportement non linéaire, occupent une place importante dans la recherche en génie parasismique et dans la réglementation. Afin d'évaluer leurs capacités à résister à des sollicitations sismiques, et d'évaluer les efforts transmis via les planchers aux équipements, une maquette de bâtiment de 3 étages à l'échelle 1/4 a été testée sur la table AZALEE du Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique du CEA Saclay entre juin et septembre 2008. Les sollicitations imposées à la maquette consistaient en une série d'excitations sismiques bi-axiales horizontales, ainsi qu'une série de bruits blancs.

L'objectif du projet "SMART-2008" (Seismic design and best-estimate Methods Assessment for Reinforced concrete buildings subjected to Torsion and non-linear effects) est de comparer et valider les méthodes et approches actuelles utilisées pour l'évaluation du comportement dynamique des bâtiments en béton armé sous sollicitations sismiques présentant des effets 3D (en particulier de la torsion) et un comportement non linéaire en incluant l'évaluation des efforts transmis aux équipements, de quantifier les marges des différentes méthodes de dimensionnement et d'appliquer des méthodes réaliste pour quantifier la variabilité afin d'obtenir des données nécessaires à l'évaluation de la fragilité.

### 2) Similitude

c'est la science qui permet, connaissant un phénomène physique pour des conditions données, de prédire ce phénomène pour d'autres conditions, grâce à des lois faisant intervenir des groupements ou nombres sans dimension.



#### Dynamique des solides:

variables:  $u, \varepsilon, \sigma, x, t, L, \gamma, \rho, E, v, g, \dots, \sigma_y$

#### Equations:

Poid propre:  $\text{div} \sigma = \rho g e_z$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla^T u + \nabla u \cdot \nabla^T u)$$

$\sigma = H(\varepsilon)$  (indépendant de  $\varepsilon$  et de l'échelle)

dynamique+poids propre :

$$\text{div} \sigma = \rho (\partial^2 u / \partial t^2 + \gamma + g e_z)$$

## PIR, Effet d'échelle

### Théorème de P: (Variables adimensionnelles)

En termes mathématiques, si nous avons une équation physique significatif comme:  $F(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0$

où les  $q_i$  sont les 'n' variables physiques, et ils sont exprimés en termes de 'k' unités indépendantes physiques (avec  $k=n-p$ , et  $p$  le nombre d'unités fondamentales distinctes dans notre cas  $p=3$  "M,L,T") alors l'équation ci-dessus peut être reformulée comme:  $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-p}) = 0$ ; Les paramètres  $x_1, x_2, \dots, x_{n-p}$  étant des fonctions monômes de  $q_1, q_2, \dots, q_n$

Exemple:

dans notre étude on a les variables suivantes:  $I, m, t, a, \sigma, \varepsilon, f, F, \psi, \rho, \phi$

Toutes ses variables sont fonctions des 3 premières variables L,M,T les 3 grandeurs fondamentales dans notre problème, ainsi on a:  $I \sim L$ ;  $m \sim M$ ;  $t \sim T$ ;  $a \sim L \cdot T^{-2}$  (accélération)...

La matrice dimensionnelle sera alors:

$$D = \begin{bmatrix} & m & I & t & a & \sigma & \varepsilon & f & F & \psi & \rho & \phi \\ M & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ L & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -2 & -3 & 2 \\ T & 0 & 0 & 1 & -2 & -2 & 0 & -1 & -2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

On peut alors, connaissant les facteurs d'échelle  $\lambda, \mu, \tau$  de L,M et T, trouver le facteur d'échelle de tout les autres grandeur.

Exemple: pour  $\sigma$ :

$$d = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -2 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_1 = \mu^{d1} \cdot \lambda^{d2} \cdot \tau^{d3} \cdot \sigma$$

$$\text{D'où : } \sigma_1 = \mu \cdot \lambda^{-1} \cdot \tau^{-2} \cdot \sigma$$

### Similitude de Froude: (d'accélération)

Jusqu'à présent, le seul facteur d'échelle qu'on connaît est  $\lambda = 4$ , facteur d'échelle de L. Mais pour résoudre le problème avec tous ces inconnues il nous manque  $\mu$  et  $\tau$ .

Pour cela on introduit des hypothèses qui vont nous permettre de construire notre système adimensionnel. comme première hypothèse on va admettre un type de similitude sous le nom de "similitude d'accélération". Elle est usuelle pour les essais dynamiques sur des structures de type bâtiment en béton armé.

Notamment parce que l'accélération de la pesanteur est nécessairement invariante, on va admettre d'après cette similitude une conservation des accélérations (donc l'accélération en un noeud de la maquette est la même pour un noeud homogène du prototype).

Ce qui introduit l'équation suivante:  $\ddot{u} = \ddot{u}_0$

( $\ddot{u}$  : accélération en un point de la maquette  
 $\ddot{u}_0$  : accélération du même point du prototype)

## PIR, Effet d'échelle

Bien qu'il existe d'autres types de similitudes (similitude de vitesse, similitude de Reynolds...), à chaque une ses propres conditions qu'il faut satisfaire quand on pratique l'expérience, dans ce projet on ne s'interessera qu'à la similitude d'accélération qui sera suffisante pour notre étude, et on va avoir si on arrive à vérifier toutes les conditions comme on va voir par la suite.

### Variables et équations adimensionnelles:

$$y = \frac{u}{L}, \quad t = t \frac{\sqrt{(E/\rho)}}{L}, \quad \bar{\gamma} = \frac{\rho L \gamma}{E}, \quad F = \frac{E}{\rho L g}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma}{E} \dots$$

Poid propre:  $\text{div}(\sigma_a) = \rho g e_z$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla y + \nabla^T y + \nabla y \cdot \nabla^T y)$$

$\sigma_a = H(\varepsilon)$  (indépendant de  $\varepsilon$  et de l'échelle)

$$\text{dynamique+poids propre : } \text{div} \sigma_a = \partial^2 y / \partial t^2 + \bar{\gamma} + \frac{1}{F} e_z$$

### 3) Hypothèses

Le but de l'étude est d'étudier le comportement non linéaire d'un bâtiment en béton soumis à un mouvement sismique. Pour faciliter la formulation de la loi de la similitude pour un tel bâtiment, on a besoin d'énoncé des hypothèses qui vont nous permettre de résoudre notre problème, puis on va traiter leurs validité.

1] On a déjà énoncé la première hypothèse qui consiste de la "conservation des accélérations".

2] En plus, il est évident de considérer qu'on a même loi de comportement pour la maquette et le prototype, c'est-à-dire les relations contrainte-déformation, puisqu'on utilise le même matériau (béton) pour les deux. Et d'après  $\sigma = H(\varepsilon)$  on a  $\varepsilon$  adimensionnelle ce qui rend justifiable qu'on prend comme une 2<sup>ème</sup> hypothèse, "la conservation des contraintes".

3] Les amortissements réduits,  $\beta$ , sont les mêmes pour le prototype et la maquette.

4] On se permet d'ajouter des masses additionnelles sur les planchers sans perturber notamment les raideurs locales de la maquette ni la répartition des masses.

### 4) Coefficient de réduction lié à l'échelle de la maquette

La maquette est une reproduction simplifiée d'un bâtiment électrique nucléaire à l'échelle 1/4. Afin de conserver la même accélération (l'effet de gravité étant une constante) ainsi que les mêmes caractéristiques matériau, une échelle de 1/4 impose les coefficients de réduction suivants.

Soit  $\lambda$ , facteur d'échelle (égal à 4, dans le cas du programme SMART) :

\* Conservation des accélérations:

$$[\text{Longueur}] / [\text{Temps}]^2 = [L] / [T]^2 = \text{cst} \quad \leftrightarrow \quad \lambda \tau^{-2} = 1$$

\* Conservation des contraintes (même lois matériau):

$$[\text{Force}] / [\text{Longueur}]^2 = [M] [L] / [T]^2 / [L]^2 = \text{cst} \quad \leftrightarrow \quad \mu \lambda^{-1} \tau^{-2} = 1$$

$$\text{Donc: } \mu = \lambda \tau^2 = \lambda^2$$

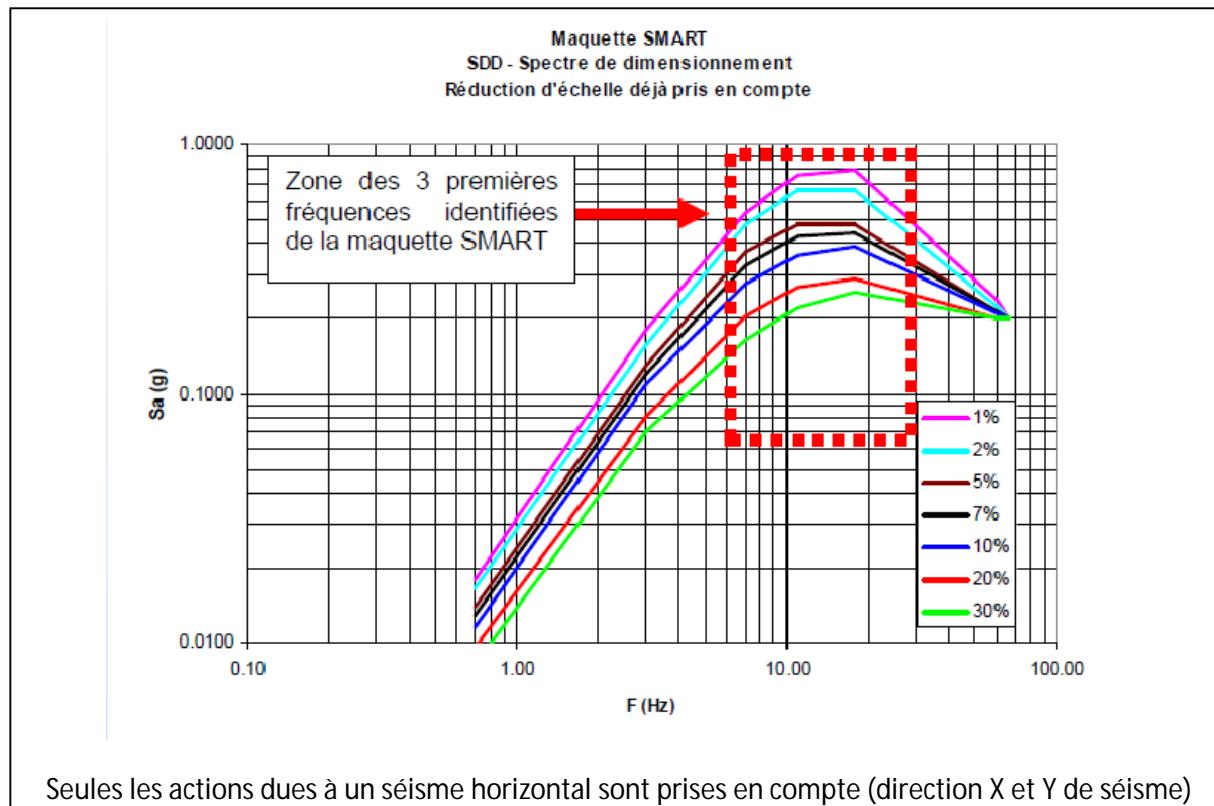
## PIR, Effet d'échelle

Grandeur	Symbol	Facteur d'échelle	valeur
Longueur	[L]	$\lambda$	4
Masse	[M]	$\mu$	16
Temps	[T]	$\tau$	2
Accélération	$[L][T]^{-2}$	$\lambda\tau^2$	1
Contrainte, pression	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$\mu\lambda^1\tau^{-2}$	1
Déformation	sans dimension	1	1
Fréquence	$[T]^{-1}$	$\tau^1$	$\frac{1}{2}$
Force	$[M][L][T]^{-2}$	$\mu\lambda\tau^2$	16
Masse surfacique	$[M][L]^{-2}$	$\mu\lambda^2$	1
Masse volumique	$[M][L]^{-3}$	$\mu\lambda^3$	$\frac{1}{4}$
Sections d'acier	$[L]^2$	$\lambda$	16
Sections d'acier répartie le long d'une paroi	$[L]^2[L]^{-1}$	$\lambda$	4

Il est donc important de noter que les fréquences de la maquette seront 2 fois plus grandes que celles de la structure en taille réelle.

## Spectre de Dimensionnement (SDD):

Le spectre pris en compte pour l'étude est donné ci-dessous. Il correspond au spectre réel décalé d'un facteur 2 en fréquence. C'est un spectre représentatif d'un SMS de magnitude 5.5 à une distance de 9 km. L'accélération du sol est de 0.2 g. L'accélération au pic est de 0.42 g pour un amortissement de 7%.



#### 1) Justification et vérification de la loi de similitude

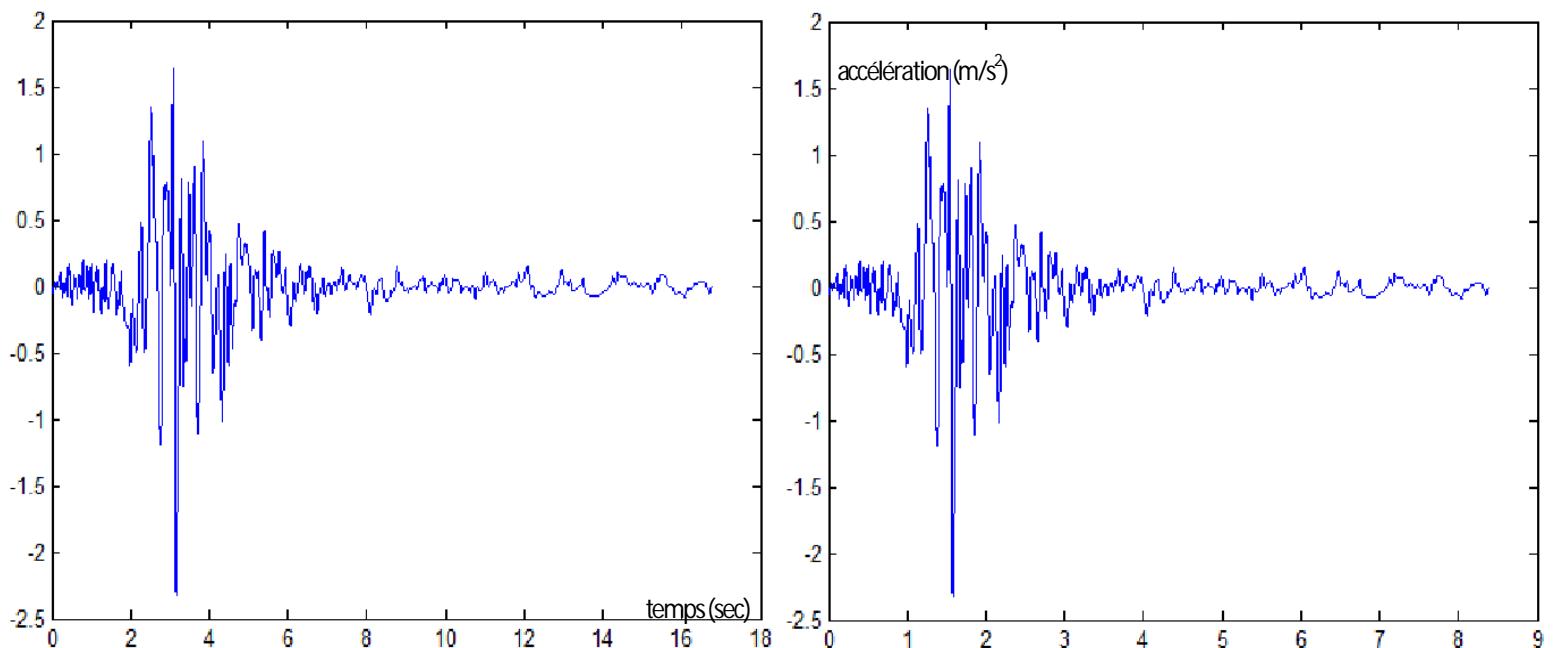
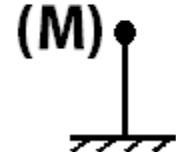
La vérification concrète de la similitude entre prototype et modèle réduit peut se faire de la manière suivante: étant donné la similitude géométrique et mécanique entre prototype et maquette, peut-on trouver une excitation similaire à celle appliquée au prototype pour laquelle la réponse de la maquette est similaire à celle du prototype? On cherche donc à obtenir des déformations égales en des points homologues du prototype et de la maquette et des déplacements dans l'échelle des longueurs. On pourra alors admettre que le comportement jusqu'à ruine sera une bonne représentation de celui du prototype. La structure est considérée encastree à la base des différents voiles et du poteau.

#### Méthode de l'accélération linéaire:

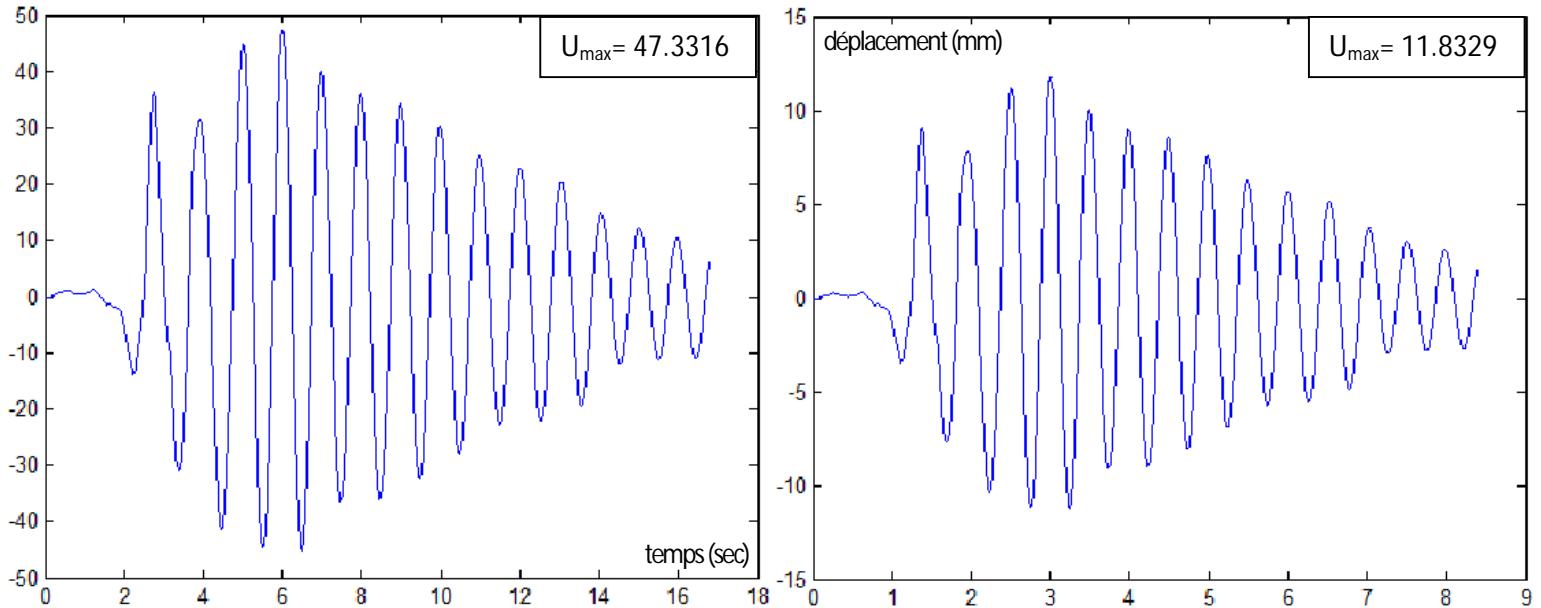
La vérification par un calcul sur MATLAB a été effectuée sur une structure choisie comme un simple poteau à masse M. La maquette est à l'échelle  $\frac{1}{4}$  du prototype. Et conformément aux hypothèses qu'on a pris, l'échelle de la masse est à  $\frac{1}{16}$  et l'échelle du temps à  $\frac{1}{2}$



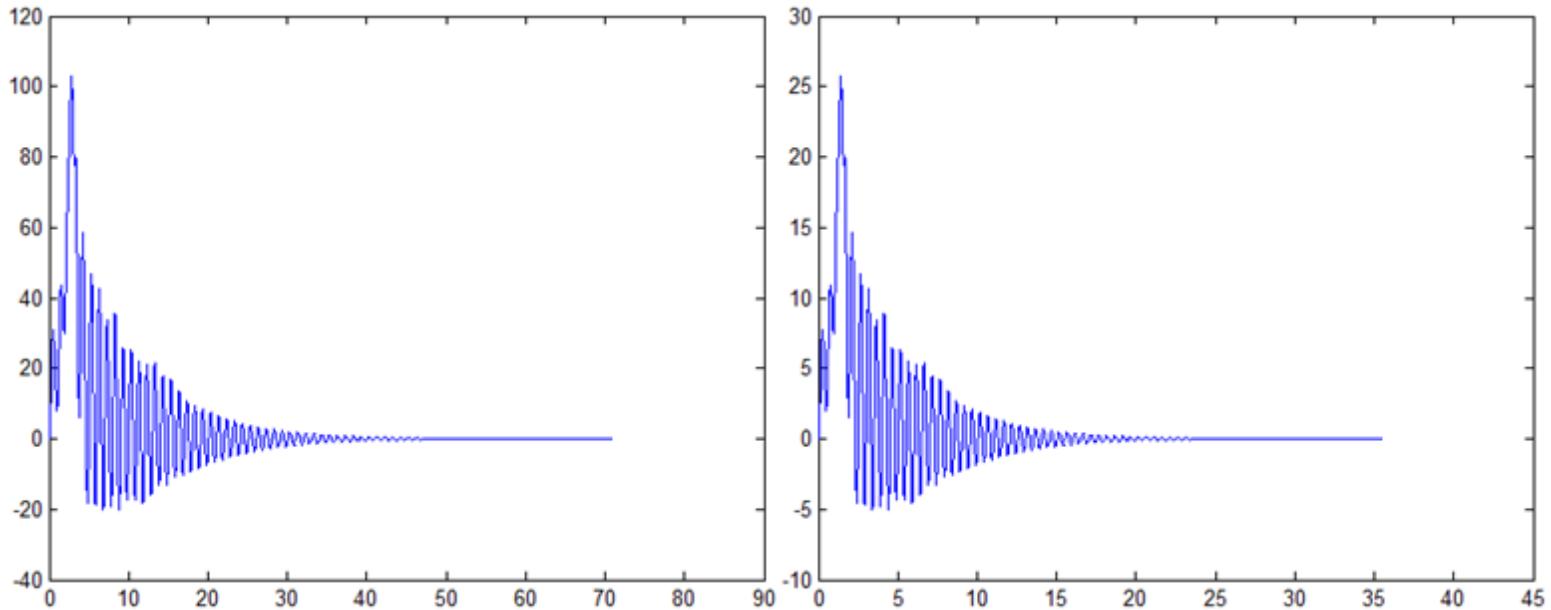
Un signal de séisme recordé a été appliquée respectivement au prototype et à la maquette. La fréquence est 1Hz pour le prototype et 2Hz pour la maquette. Le signal d'entrée et les réponses en déplacement aux sommets des poteaux sont tracées sur les figures suivantes, et on peut vérifier qu'elles obéissent parfaitement à la règle de similitude.



## PIR, Effet d'échelle



\*les solution pour le problème sans fonction de transfert pour le sol



\*ici on a utilisé une fonction de transfère pour un sol d'épaisseur  $H=20m$  et on a augmenter le vecteur de temps pour montrer l'amortissement après excitation.

$U_p/U_M = \lambda$ , on démontre ainsi que les lois de similitude sont applicables et représentatifs pour un modèle simple en dynamique.

## PIR, Effet d'échelle

### Pour un modèle discret:

Il ne suffit pas que la similitude vérifie un modèle analytique, il faut que les équations discrètes soit vrais aussi. Pour discréétisé alors l'équation de mouvement on utilise les équations suivantes:

- Hypothèses**

$$\text{DDL généralisés : } \underline{u} = \sum_i \underline{\phi}_i(\underline{x}) q_i \quad \text{Viscoélasticité linéaire : } \underline{\epsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \underline{u} + \nabla^T \underline{u}), \quad \underline{\sigma} = \underline{\underline{D}} : \underline{\epsilon} + \alpha \underline{\underline{D}} : \dot{\underline{\epsilon}}$$

$$\underline{x} = \lambda \underline{x}_0 \quad \underline{\underline{D}} = \underline{\underline{D}}_0 \quad \alpha = \alpha_0 \quad \underline{\sigma}_e = \underline{\sigma}_v$$

- Raideur**

$$\delta W_{\text{élastique}}^{\text{int}} = \int_V \underline{\sigma}_e : \underline{\epsilon} (\delta \underline{u}) dV = \sum_i \delta q_i \sum_j \int_V \underline{\epsilon} (\underline{\phi}_i(\underline{x})) : \underline{\underline{D}} : \underline{\epsilon} (\underline{\phi}_j(\underline{x})) dV q_j = \sum_i \delta q_i \sum_j k_{ij} q_j \rightarrow k_{ij} = \lambda k_{ij}^0$$

$$\frac{1}{\lambda} \underline{\epsilon}_0(\underline{\phi}_i) \quad \frac{1}{\lambda} \underline{\epsilon}_0(\underline{\phi}_j) \quad \lambda^3 dV_0$$

- Masse**

$$\delta W^{\text{acc}} = \int_V \rho \ddot{\underline{u}} \cdot \delta \underline{u} dV = \sum_i \delta q_i \sum_j \int_V \rho \underline{\phi}_i(\underline{x}) \cdot \underline{\phi}_j(\underline{x}) dV \ddot{q}_j = \sum_i \delta q_i \sum_j m_{ij} \ddot{q}_j \xrightarrow{\text{si } \rho/\rho_0 \text{ cte}} m_{ij} = \frac{\rho}{\rho_0} \lambda^3 m_{ij}^0$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} \rho_0 \quad \lambda^3 dV_0$$

- Fréquences**

$$\text{Si } \underline{\phi}_i(\underline{x}) \text{ déformée modale : } \omega_i = \sqrt{\frac{k_{ii}}{m_{ii}}} \quad \xrightarrow{\omega_i = \omega_i^0 / \sqrt{\lambda}} \quad \text{similitude Froude}$$

- Amortissement**

$$\delta W_{\text{viscosité}}^{\text{int}} = \int_V \underline{\sigma}_v : \underline{\epsilon} (\delta \underline{u}) dV = \sum_i \delta q_i \sum_j \alpha k_{ij} \dot{q}_j \rightarrow c_{ij} = \alpha k_{ij} = \lambda c_{ij}^0$$

$$\xi_i = \frac{c_{ii}}{2\sqrt{k_{ii}m_{ii}}} = \frac{\alpha k_{ii}}{2\sqrt{k_{ii}m_{ii}}} = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{k_{ii}}{m_{ii}}} \quad \xrightarrow{\xi_i = \xi_i^0 / \sqrt{\lambda}} \quad \text{similitude Froude}$$

## 2) Conséquences du facteur d'échelle des masses

La masse de la maquette doit respecter le facteur d'échelle  $\mu = 16$ , alors que le volume de béton est dans le rapport  $\lambda^3 = 64$ .

## PIR, Effet d'échelle

Pour respecter le facteur d'échelle des masses, la masse volumique du béton devrait être augmentée d'un facteur 4 sur la maquette, ce qui est évidemment impossible (d'après l'hypothèse [2] on a conservation de la loi de comportement, car le même béton est utilisé pour le prototype que la maquette). On décide alors, pour résoudre cette anomalie, de disposer des masses additionnelles sur les planchers et les voiles pour corriger la masse propre et respecter le facteur d'échelle des masses. Notons que, cet approche nous permet de résoudre le problème d'un point de vu dynamique (équation de mouvement -matrice de masse- en considérant que les raideurs locales de la maquette restent préservés 'hypothèse [4]'), mais d'un point de vu statique, il nous paraît peut être pas évident que la maquette reste représentative du prototype avec les masses ajoutées.

Calcul des masses additionnelles: Considérons une paroi du bâtiment réel (dalle ou voile) de masse propre surfacique  $g$  et supportant une masse additionnelle d'exploitation  $q$ . Notons  $g'$  la masse propre surfacique de la paroi de la maquette, et  $q'$  la masse surfacique additionnelle à disposer en complément pour respecter le facteur déchelle des masses. La masse surfacique totale devant être conservée (d'après le tableau des coefficients de réduction), on a:

$$\begin{aligned} g' + q' &= g + q \\ g' &= g/4 \text{ (d'après l'étude dimensionnelle)} \\ q' &= q + g - g' = q + g(1 - 1/4) = q + 3/4 g \end{aligned}$$

La masse additionnelle à disposer sur la paroi de la maquette est donc égale à la masse d'exploitation appliquée sur la paroi du bâtiment réel, augmentée de  $3/4$  de la masse propre surfacique de la paroi du bâtiment réel.

Par la suite on va vérifier si une telle supposition est conforme à nos hypothèses.

### Vérification pour un modèle simple:

Imaginons alors une poutre béton de masse propre surfacique  $g$  et supportant une masse additionnelle d'exploitation  $q$ . Pour simplifié le problème, on va chercher la contrainte maximale de traction pour cette poutre, considérant qu'elle est simplement appuyé à ses extrémités et soumis à une charge uniformément répartie (poutre en flexion simple).

$$\sigma = \frac{-m.y}{I}$$

( $m$ : moment fléchissant)

$$\sigma_{\max} = \frac{M.a}{2.I}$$

( $M = m_{\max}$ , pour  $x = L/2$ )

( $a$ : côté, poutre à section carré)

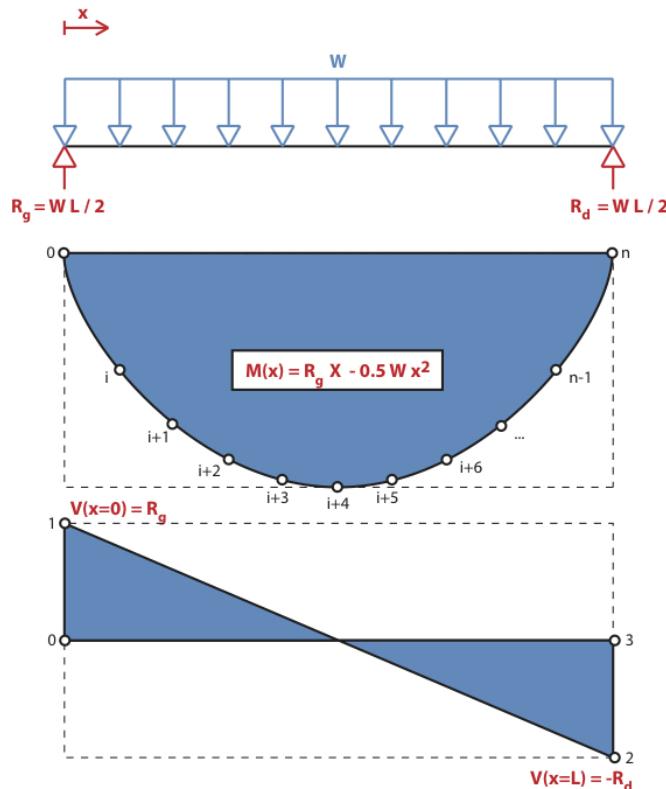
$$\text{Avec } M = w.L^2/8$$

$$w = 9.81 * (g+q) * a$$

$$I = a^4/12$$

$$\text{D'où } \sigma_{\max} = \frac{3wL^2}{4a^3}$$

## PIR, Effet d'échelle



Or pour la poutre à échelle  $\frac{1}{4}$  on aura:

$$L' = L/4$$

$$w' = w/4$$

$$a' = a/4$$

$$\Rightarrow \sigma'_{\max} = \sigma_{\max}$$

$\Rightarrow$  compatible avec l'hypothèse 2.

N.B. La théorie des poutres vérifie aussi les hypothèses pour les déplacements (la flèche), donc jusqu'à présent on a pas rencontré de problèmes qui nous empêchent de prendre les résultats sur maquette comme référence pour estimer de quelle façon agira le prototype.

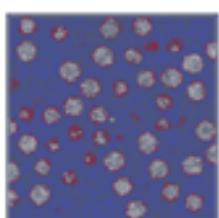
### 3) Effet de la taille des granulats

Quand on commence à regarder le béton à l'échelle macroscopique avec tous ses irrégularités et hétérogénéités, on se rend compte que ce n'est pas évident de gérer de la même manière l'échelle des composantes du béton et l'effet de leurs tailles sur la transposition des résultats.

En effet, dès que nous commençons à réfléchir à cette question, on croise un dilemme. Est ce qu'on considère que les granulats obéissent à l'échelle imposer ? Et si c'est le cas, est ce qu'on peut toujours considérer qu'on a la même loi de comportement que celle du prototype ?

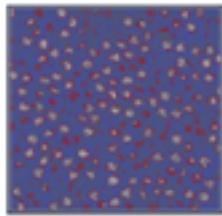
\*On néglige ici l'effet des autres composantes (ciment et eau) et nous nous concentrerons sur le problème dominant, celui des granulats.

Imaginons maintenant les deux cas qui se présentent :



- On n'applique pas l'échelle aux granulats, ce qui conserve la loi de comportement.

## PIR, Effet d'échelle



- On raffine la granulométrie de façon à respecter le facteur d'échelle.

Pour résoudre cette confusion on aura recours aux effets induits par les granulats mais on s'appuiera surtout sur le rôle que jouent les granulats vis à vis de la fissuration.

Premièrement, la taille des granulats induit une modification sur la longueur et la largeur des fissures à fraction volumique constante (Bisschop et al., 2002) comme le cas pour notre essai. De plus, la fissuration devient plus isotrope avec des tailles d'inclusions plus importantes.

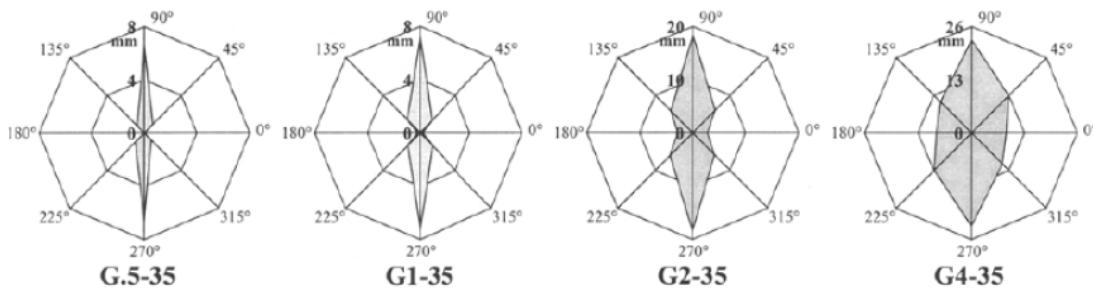


Figure 3

*Evolution de l'orientation de la fissuration en fonction de la taille des granulats à fraction volumique constante 35%*

*Taille de granulats : 0,5 – 1 – 2 – 4 mm  
Bisschop et al. (2002)*

En outre, on sait que la granulométrie a un grand effet sur les caractéristiques du béton :Module d'Young, resistance à la traction, resistance à la compression...

Il n'est pas donc sécuritaire de réduire l'échelle des granulats, et vaut mieux alors utiliser la même conception qu'on aurait utilisé pour le béton prototype.

### 4) Effet sur la fissuration

La rupture du béton est toujours accompagnée d'une microfissuration interne. Négliger ce genre de dégradation de la matière est la raison principale des phénomènes que l'on appelle l'effet de structure observés dans des expériences où un comportement élastique linéaire est pris en charge.

## PIR, Effet d'échelle

le principal mécanisme de rupture du béton est les dommages dus à la nucléation et la croissance de microfissures.

le comportement du matériau est supposé élastique linéaire. ainsi, la rupture d'une éprouvette en béton peut être décrite soit par:

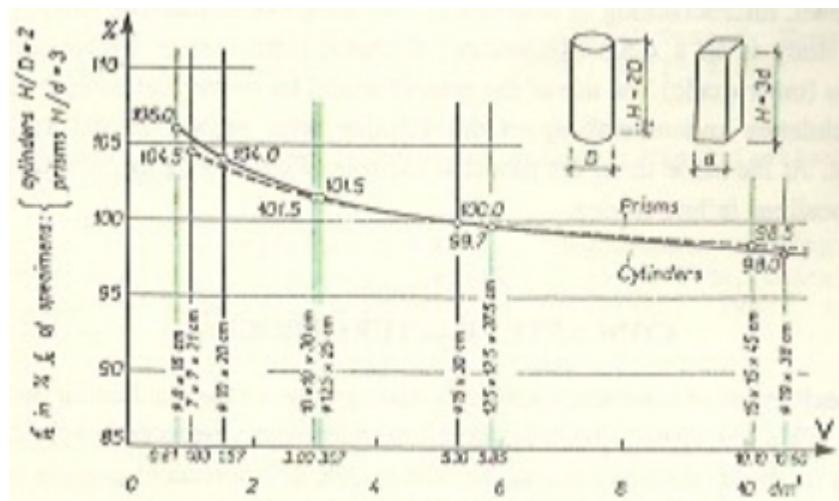
- Un **critère de résistance**, selon lequel il y aura échec si la contrainte appliquée dépasse une certaine valeur limite, ce critère ne s'applique pas aux structures qui sont déjà fissurés.
- Un **critère de LEFM (linear elastic fracture mechanics)**, qui tient compte la concentration de contraintes au voisinage de la pointe de la fissure. Il faut introduire les paramètres matériau qui contrôlent la croissance des fissures et les distributions de contraintes près du fond de la fissure.

Pour parvenir à une meilleure compréhension de ce phénomène on suggère de séparer les effets structurels en:

- l'effet volume
- l'effet de taille de structure

### Effet volume:

Lorsque les échantillons non fissurées sont chargés par des charges externes uniformes, il a été observé que la contrainte critique (contrainte juste avant la fissuration) diminue lorsque des échantillons de dimensions plus importantes sont utilisés.



La cause principale de ce phénomène est le caractère hétérogène ainsi que la microfissuration initiale de la structure du matériau. Et comme conséquence de la distribution aléatoire des défauts locaux, un grand volume exposera une plus petite résistance macroscopique.

Ce qui peut être déduit de la figure au-dessus, c'est que pour les structures de dimensions modérées aucun des 2 critères décrits là haut serait objectif et les résultats seront fonction des dimensions. Négliger la dissipation due aux dommages conduit en tout cas à des surestimations de la résistance des matériaux.

## PIR, Effet d'échelle

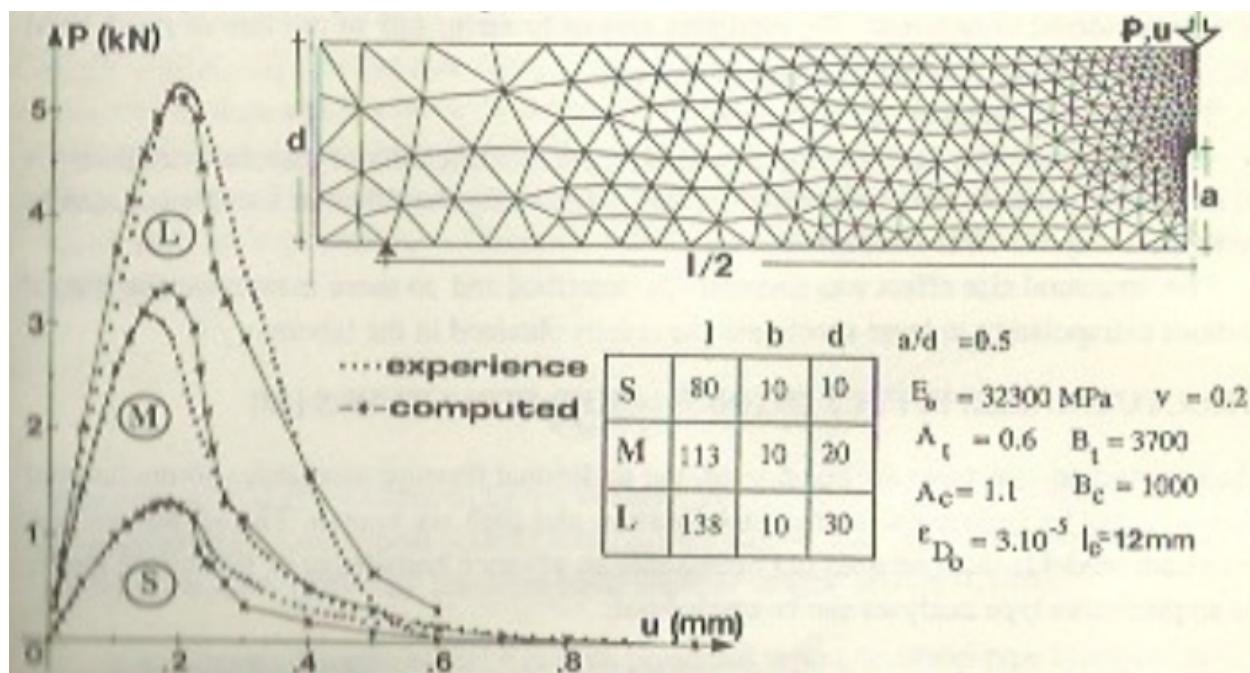
### Effet de la taille de la structure:

Il s'agit de la variation des paramètres de rupture (supposé être constantes du matériau) lorsque les structures géométriquement similaires sont testées.

Un grand nombre de résultats expérimentaux montre une augmentation des valeurs de ces paramètres avec la taille de l'échantillon et la seule possibilité d'obtenir une valeur constante est de tester des échantillons très grands. On a trouvé que des poutres entaillées de plus de 2 mètres de profondeur doit être utilisé si on veut appliquer un critère LEFM, ainsi des essais objectifs en laboratoire deviennent impossible.

Les considérations suivantes constituent la base de l'explication de l'effet de taille de structure: si la contrainte à la rupture élastique détuite expérimentalement (d'après la charge maximale) reste constante lorsque la taille augmente, (ce qui signifie qu'il n'y a pas d'effet de taille ni d'effet de singularité de fissure), alors un critère de type résistance doit être commode pour décrire le comportement du matériau. D'autre part, si la même contrainte diminue linéairement avec la taille de l'échantillon dans un diagramme log-log, (ce qui signifie qu'il n'y a pas d'effet taille, mais seulement effet de singularité de la fissure), alors le critère LEFM doit être adapté.

### Résultats sur l'effet de taille de structure:



Si dessus on a des résultats numériques ainsi que expérimentales pour des essais de flexion trois points sur 3 poutres de différentes dimensions. les paramètres du modèle sont identifiés numériquement de la façon suivante: l'ensemble de paramètres retenus est celle qui correspond à la réponse globale avec succès expérimental (courbe charge-flèche) de la plus petite poutre. Ce jeu de paramètres est alors maintenu identique pour les deux dernières simulations.

## PIR, Effet d'échelle

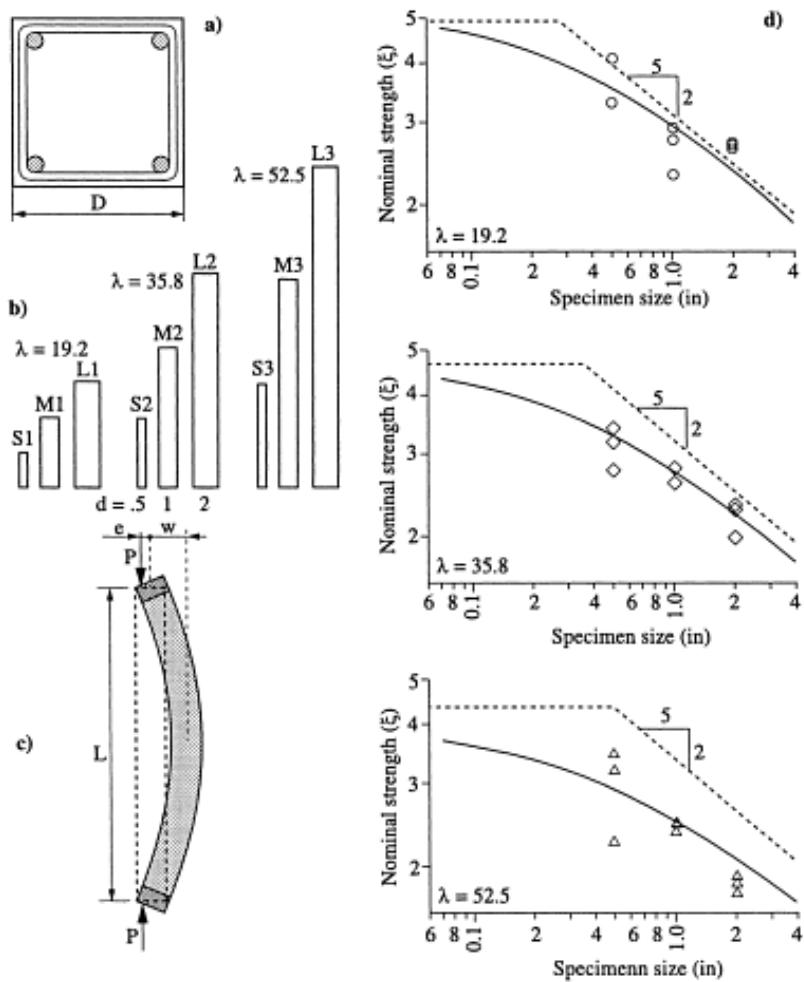
Le diamètre maximum des agrégats étant  $d = 8\text{mm}$ . Les courbes charge-flèche obtenus numériquement se superposent à celles obtenues expérimentalement.

En effet ces essais ne sont pas conformes à nos normes car il n'y a pas un rapport d'échelle entre les 3 poutres, on a just augmenté la taille, mais de toute façon, on comprend mieux la complexité et les restrictions d'assumer une similitude parfaite pour un matériaux comme le béton dont la loi de comportement est dicté par une infinité de paramètres aléatoires.

### 5) Effet d'échelle dans les poteaux en béton armé

Nous allons nous concentrer sur le flambement du poteaux due à une charge excentrique. On étudie ce concept sur trois tailles différentes (de ratios 1 : 2 : 4) et de trois élancements différents, 19.2 , 35.8 , 52.5

Les résultats d'essais ont indiqué un effet d'échelle que l'on peut voir sur la figure suivante.



\*Le flambement d'euler, de ça part, s'entend bien avec la similitude.

en effet:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

avec  $P = \sigma \cdot A$

les rapports de similitude sont comme suivant:

$$I_0/I = \lambda^4$$

$$l_0/l = \lambda$$

$$A_0/A = \lambda^2$$

Alors pour les équations analytique en générale on trouve que les hypothèses de similitude sont vérifiés et on a conservation des contraintes et loi de comportement.

La similitude a une base mathématique rigide pour cela on trouve qu'elle est vérifié pour n'importe quelle équation analytique.

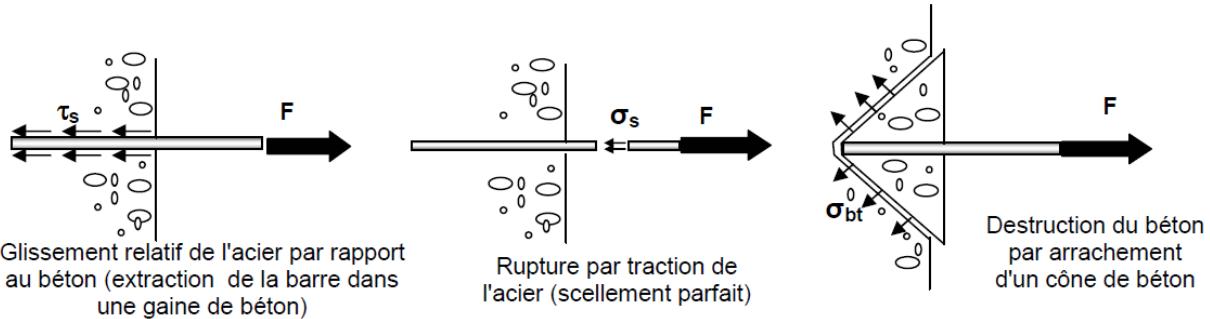
Mais en réalité, les essais montrent de plus en plus que pour le transfert entre maquette et prototype la similitude n'est pas rentable à 100% et il faut alors introduire des corrections, et prendre en compte les non linéarités pour pouvoir transposer les résultats obtenus sur maquette.

## PIR, Effet d'échelle

### 6) Adhérence acier-béton

L'adhérence est un phénomène de liaison tangentielle à l'interface acier béton due au frottement et à l'arc-boutement des bielles de béton.

Supposons une barre scellée dans un massif en béton. Si on exerce un effort d'arrachement suivant l'axe de la barre, on peut avoir trois modes de rupture :



Une transposition parfaite exigera une contrainte de rupture qui se produit pour le même mode et qu'elle soit de même dimension pour la maquette ainsi que le prototype.

Bien sûr que l'échelle s'applique à la barre, donc  $\varphi_0 = \varphi \cdot \lambda$  (diamètre)...

Cas 1:  $\sigma = \sigma_0$ , une contrainte de traction reprise par la barre (comme le cas de flexion d'une poutre on suppose que les efforts de tractions sont repris totalement par la barre)

$$F = \sigma \cdot S \quad (S : \text{section de l'acier, alors } S_0 = S \cdot \lambda) \text{ d'où } F_0 = F \cdot \lambda^2$$

L'équation sera:  $\tau \cdot \pi \cdot \phi \cdot I = F$

Pour le prototype:  $\tau_0 \cdot \pi \cdot \varphi_0 \cdot I_0 = F_0$

En remplaçant on retrouve  $\tau_0 = \tau$

On trouve donc que les hypothèses sont vérifiées

Cas 2: De même,  $\sigma_s = \sigma_{s0}$ , donc on a encore une similitude

Cas 3: Destruction du béton par arrachement d'un cône de béton,  $F = S \cdot \sigma_{bt} \cdot \cos(45^\circ)$

Avec  $S$ : surface du cône, et on suppose que l'angle de rupture est constant égal à  $45^\circ$

$$S = \sqrt{2}\pi r^2 \quad (r : \text{rayon à la base})$$

Ce revient au même, dans tous les cas on vérifie l'hypothèse de conservation de la loi de comportement

Sous réserve de la vérification de trois hypothèses, on a montré qu'il existe une parfaite similitude entre prototype et maquette, valable en dynamique, pour des matériaux non linéaires. Cependant, il faut réaliser la similitude géométrique de la maquette et satisfaire en particulier l'hypothèse de loi de comportement identique pour les matériaux, ce qui n'est pas une tâche facile.

Par ailleurs, on constate que les différents composants et l'hétérogénéité d'un matériau comme le béton sont des facteurs qui peuvent changer la résistance ultime du béton dépendant de la taille de la structure.

La plupart des effets d'échelle observés expérimentalement étaient attribués aux défauts initiaux dans les matériaux. De nos jours on s'appuie sur une nouvelle théorie fondée sur le fait que la restitution d'énergie due à la propagation stable de grandes fissures ou de bandes de fissuration distribuée provoquait un effet d'échelle de transition entre ceux prédis par la mécanique de la rupture et par la résistance des matériaux.

Notre sujet ne trait pas le problème de l'effet d'échelle des matériaux quasi-fragiles qui fait partie de la mécanique de l'endommagement, mais on a utilisé quelques résultats trouvés pour montrer que pour l'effet d'échelle, la similitude n'est vrais que pour une supposition approximative, en fait les problèmes derrière l'effet d'échelle sont très larges qu'il n'est pas possible de les impliquer dans cette étude.

- Bazant Z.P. (2002), Scaling of Structural Strength. Hermes Penton Science (Kogan Page Science), London; 2nd updated edition, Elsevier, *London 2005* (Errata: [www.civil.northwestern.edu/people/bazant.html](http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant.html)) (French translation (with updates), Introduction aux effets d' échelle sur la résistance des structures, Hermès Science Publ., Paris 2004).
- F.Wang – F.Gantenbein – J.Mazars, Loi de Similitude pour les essais sismiques de structures en beton arme application a CASSBA. *SOCOTEC – L.M.T.1991* ; Commissariat à l'Energie Atomique; Direction des reacteurs nucleaires, Département de mécanique et de technologie - Service d'études mecaniques et thermiques, Laboratoire d'étude de mécanique sismique.
- N.DOUARD – J-M. VEZIN – A.LANGEOIRE, Conception et calculs de detail de la maquette. *EDF SEPTEN*, Maquette SMART; SECHAUD 2006.
- Bazant, Z.P., 1976. Instability, ductility, and size effect in strain-softening concrete. *J. Engng. Mech. Div., Am. Soc. Civil Engrs.* 102 (EM2), 331-344 (disc. pps.: 103, 357-358, 775-777, 104, 501-502).
- Galileo, G.L., 1638. Discorsi i Demostrazioni Matematiche Intorno à Due Nuove Scienze. Elsevirii, Leiden, pp. 178-181 (English translation by T. Weston, London, 1730).
- S. JUSTER-LERMITTE et T. DOMINGUEZ, influence de la table azalee sur le comportement de la maquette SMART 2008; CEA, direction de l'énergie nucleaire direction deleguee pour les activites nucleaires de saclay departement de modelisation des systemes et structures service d'études mecaniques et thermiques.
- SANDRINE LERMITTE - THIERRY CHAUDAT - DIDRIK VANDEPUTTE - THIERRY PAYEN - EMMANUEL VIALLET, Evaluation de la fragilité d'un bâtiment de 3 étages présentant des effets tridimensionnels; *CEA DEN/Saclay, Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique*.
- R. Yoshinaka - M. Osada - H. Park - T. Sasaki - K. Sasaki, practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect; Geosphere Research Institute, Saitama University, 225, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan - Rock Engineering Laboratory, Suncoh Consultants Co., Ltd., 8-9, Kameido 1-chome, Koto-ku, Tokyo 136-8522, Japan
- Meei-Ling Lin - Kuo-Lung Wang, Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test; National Taiwan University, Department of Civil Engineering, No.1 Section 4 Roosevelt Road, Taipei, Taiwan.
- L.S. Sutherland - R.A. Shenoi - S.M. Lewis, Size and scale efects in composites: I. Literature review; Department of Naval Architecture, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal - Department of Ship Science, University of Southampton, Southampton, UK - Department of Mathematics, University of Southampton, Southampton, UK.

**Maquette smart:**



## PIR, Effet d'échelle

### Géométrie de la maquette:

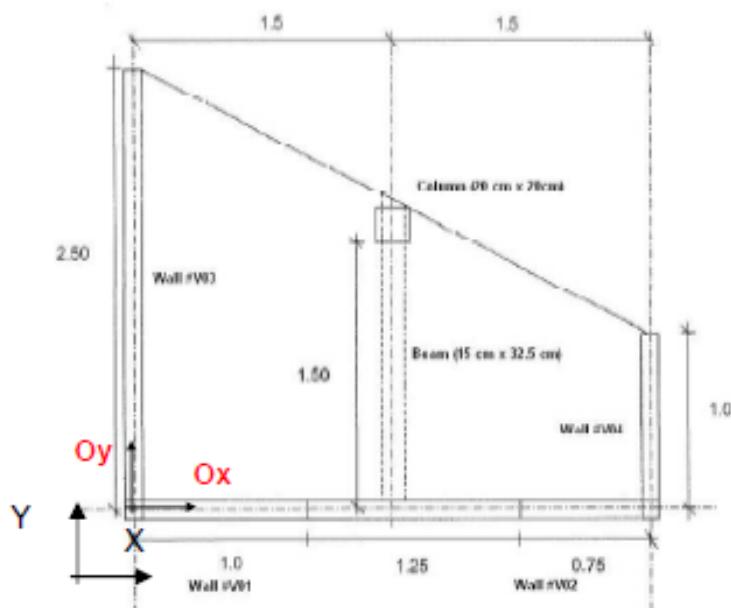


Figure 1: Vue en plan de la maquette SMART 2008

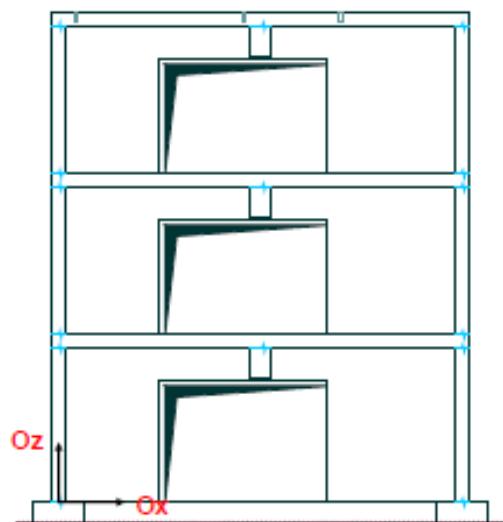


Figure 2: Elévation des voiles #V01 & #V02

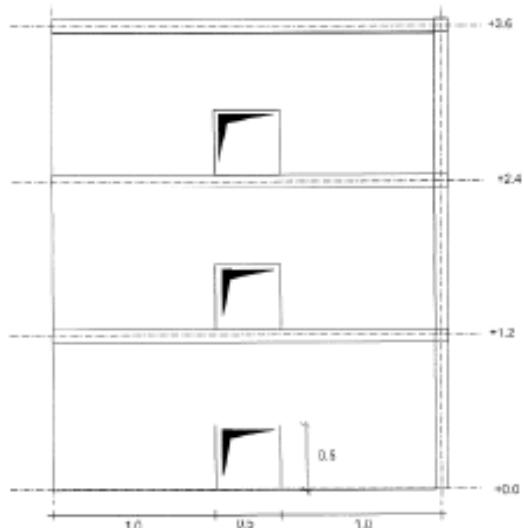
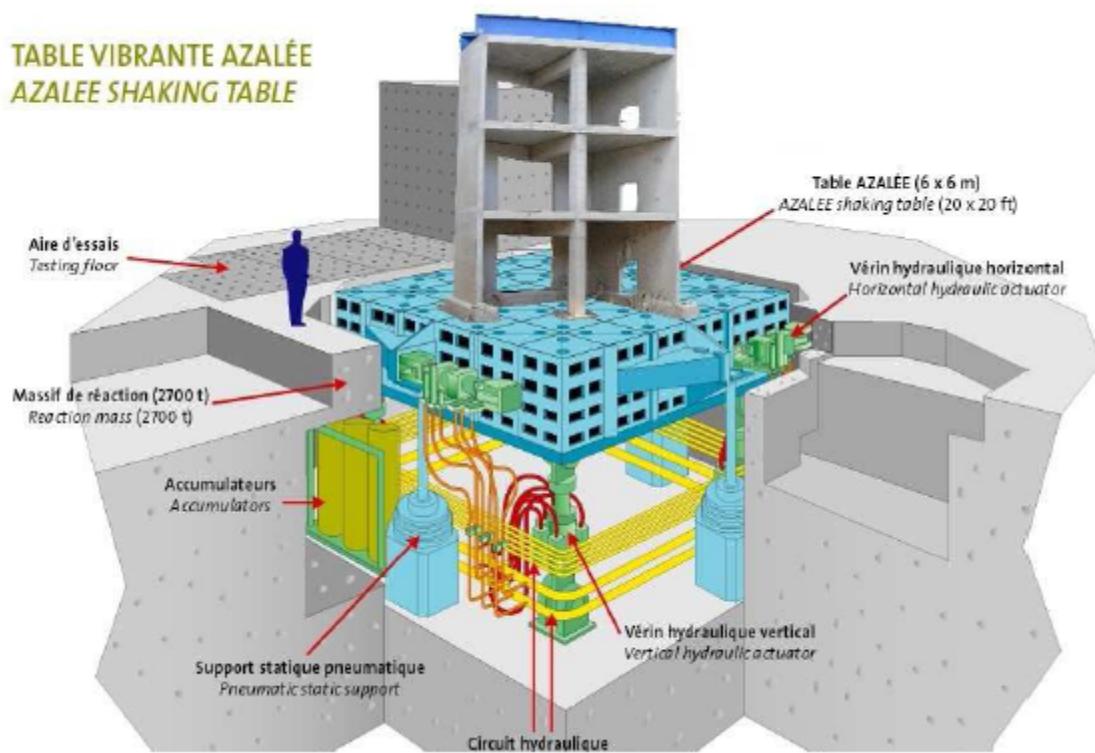


Figure 3: Elévation du voile #V03

## PIR, Effet d'échelle

Table Azalée:

**TABLE VIBRANTE AZALÉE**  
**AZALEE SHAKING TABLE**



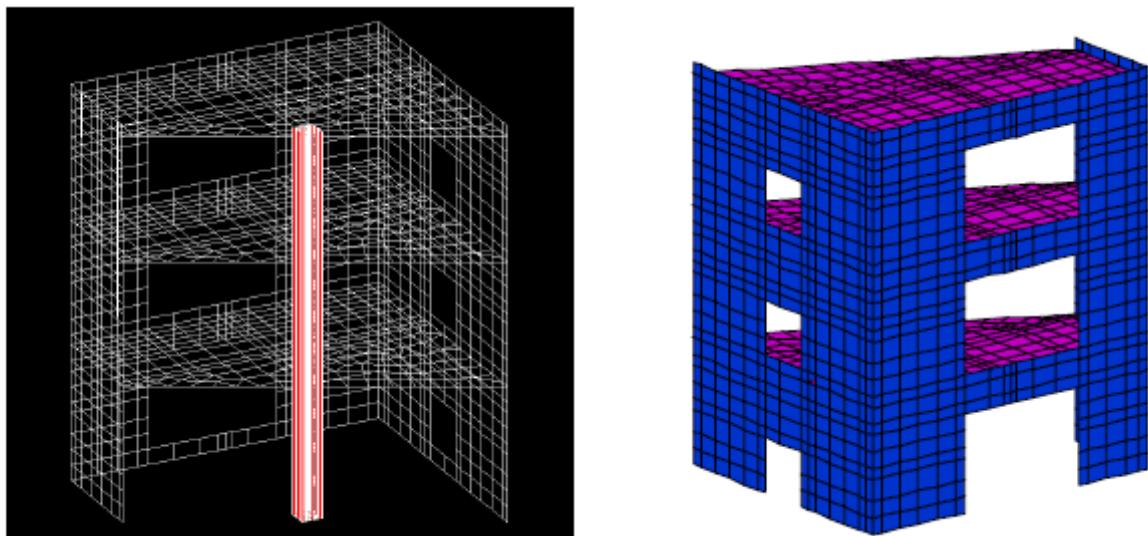
## PIR, Effet d'échelle

Disposition des masses additionnelles:



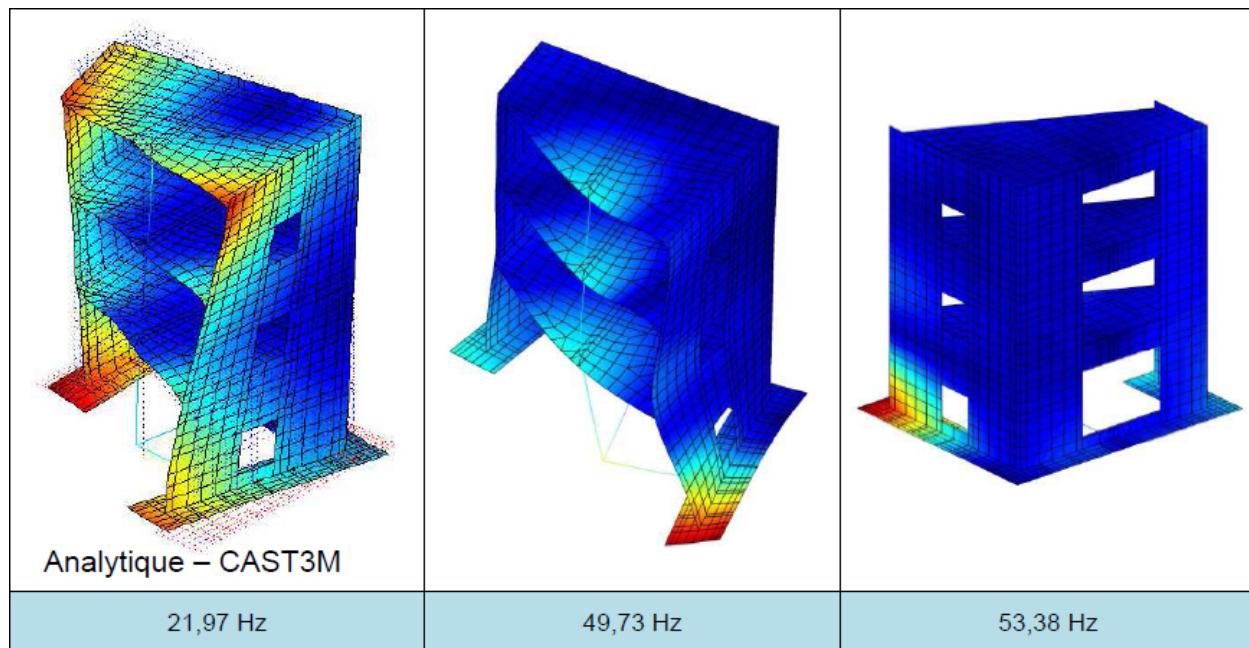
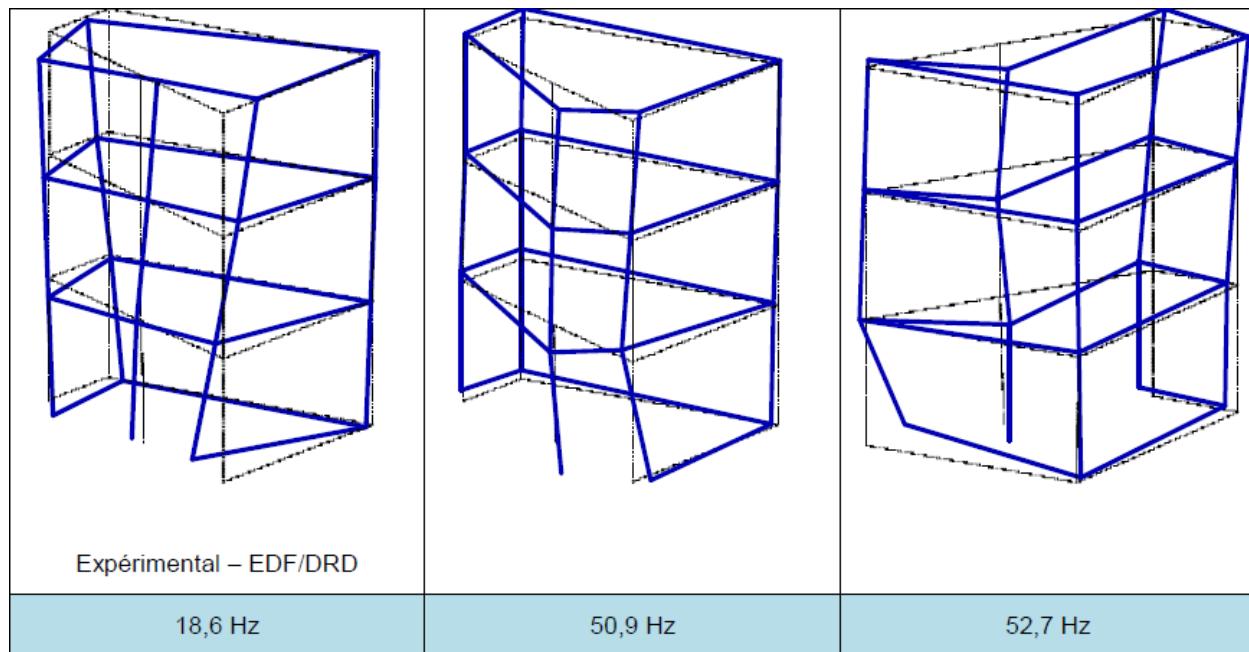
Masses additionnelles

Maillage 3D par éléments finis:



## PIR, Effet d'échelle

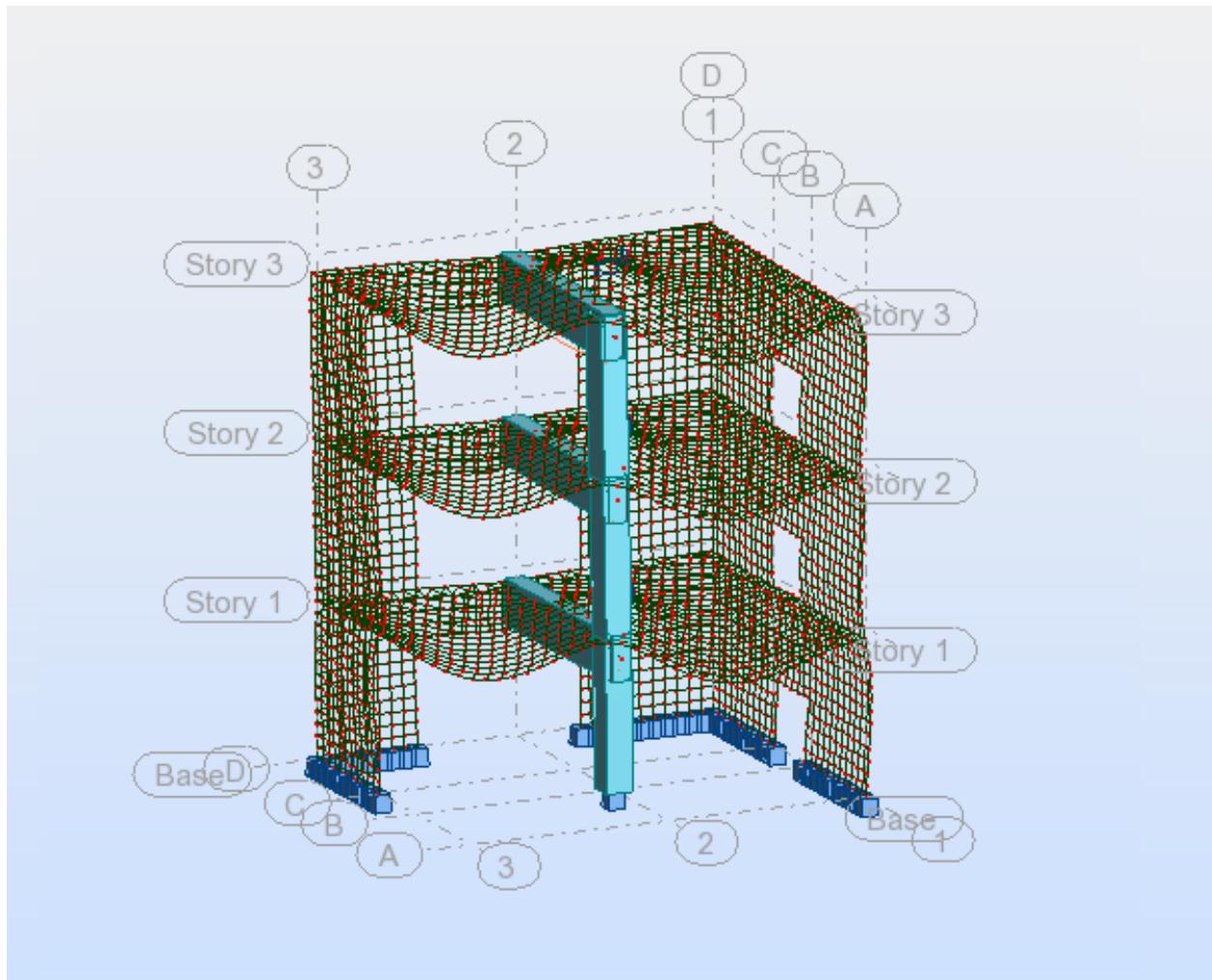
Déformés des modes identifiés sous condition libre-libre : Comparaison essais/calculs:



## PIR, Effet d'échelle

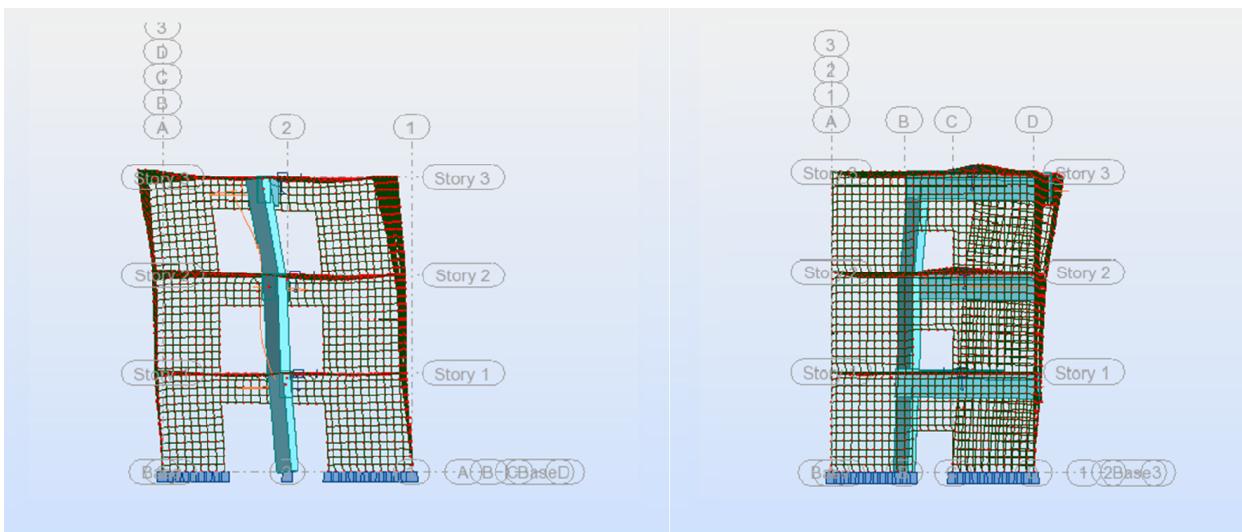
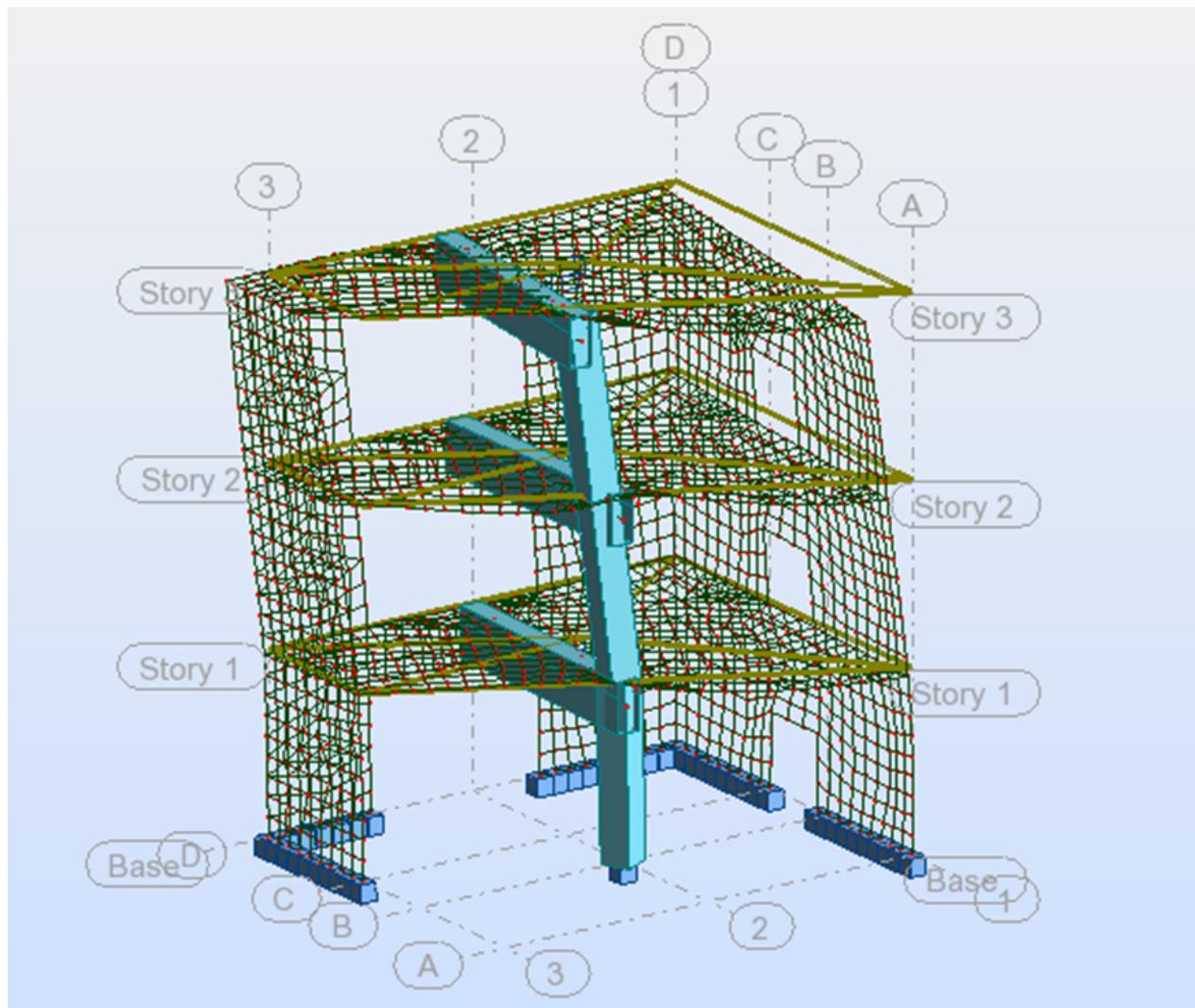
ROBOT:

- 1) Déformations dues aux charges statiques seules:



## PIR, Effet d'échelle

### 2) Déformations due au séisme:



## PIR, Effet d'échelle

Etat de contrainte enveloppe pour un chargement spectral SDD:

