

Benchmark SMART 2013 : enseignements sur les indicateurs d'endommagement pour les bâtiments en béton armé au-delà du niveau de dimensionnement

G. Thillard, F. Maxime, B. Richard, F. Voltaire, B. Capra, J. Mazars

► To cite this version:

G. Thillard, F. Maxime, B. Richard, F. Voltaire, B. Capra, et al.. Benchmark SMART 2013 : enseignements sur les indicateurs d'endommagement pour les bâtiments en béton armé au-delà du niveau de dimensionnement. 9ème Colloque national AFPS 2015 - IFSTTAR, Nov 2015, Marne La Vallée, France. cea-02509684

HAL Id: cea-02509684

<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02509684>

Submitted on 17 Mar 2020

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

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

Benchmark SMART 2013 : enseignements sur les indicateurs d'endommagement pour les bâtiments en béton armé au-delà du niveau de dimensionnement

Gaël Thillard* — Maxime Fontan* — Benjamin Richard** — François Voltaire***, **** — Bruno Capra* — Jacky Mazars*

* OXAND-France. 49 Avenue Franklin Roosevelt, F-77210 Avon (France).

maxime.fontan@oxand.com

** CEA, DEN, DANS, DM2S, SEMT, Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique. F-91191 Gif-sur-Yvette (France).

*** Institut des Sciences Mécaniques et Applications Industrielles, EDF-CNRS-CEA-ENSTA UMR9219. 1, Avenue du Général de Gaulle, F-92141 Clamart (France).

**** EDF, DR&D, Département d'Analyse Mécaniques et Acoustiques. 1, Avenue du Général de Gaulle, F-92141 Clamart (France).

RÉSUMÉ. Sur la période 2012-2014, le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) et Electricité De France (EDF) ont organisé le programme de recherche SMART 2013. Au cours de celui-ci, un benchmark international a mis en évidence la capacité des modèles numériques à reproduire le comportement d'une structure en béton armé asymétrique et sensible aux effets de torsion, sous chargements sismiques sévères. Le niveau d'endommagement de la maquette expérimentale et celui issu des modèles numériques ont notamment été comparé à l'aide de deux indicateurs : (1) le déplacement inter-étages maximal et (2) la chute de fréquence calculée au premier pic du spectre de plancher du point le plus excité. Le premier indicateur caractérise un endommagement local tandis que le second représente un endommagement global de la structure. Les résultats ont souligné la capacité des deux indicateurs, globaux ou locaux, à transcrire les comportements expérimentaux. Néanmoins, les seuils d'endommagement caractérisant l'état structural atteints par ces indicateurs sont parfois différents. L'une des conclusions du benchmark SMART 2013 est la difficulté de choisir un indicateur adapté à la structure ainsi que les seuils associés afin de conclure sur son état résiduel.

ABSTRACT. Over the period 2012-2014, the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA) and Electricité de France (EDF) organized the research program called SMART 2013. During this project, an international benchmark highlighted the ability of numerical models to reproduce the behavior of an asymmetrical reinforced concrete structure which is submitted to severe seismic loads and sensitive to torsion effects. The levels of damage resulting from the experimentations and the numerical modeling have been especially compared to using two indicators: (1) the maximum inter-story drift and (2) the peak frequency shift calculated to the first peak of floor response spectra at the most exciting point. The first indicator defines a local damage while the second one represents an overall structural damage. The results underlined the ability of two indicators, global or local, to describe the experimental behavior. However, the damage thresholds characterizing the structural state reached by these indicators may be sometimes different. Then, one of the conclusions of SMART 2013 is the difficulty to choose the most relevant and meaningful indicator and the corresponding thresholds for estimating the structural state.

MOTS-CLÉS : benchmark SMART 2013, sollicitations sismiques, CAST3M, maquette en béton armé, évaluation structurale, déplacements inter-étages, chute de fréquence, TAMARIS, AZALEE.

KEYWORDS: benchmark SMART 2013, seismic loads, CAST3M, reinforced concrete specimen, structural assessment, inter-story drift, peak frequency shift, TAMARIS, AZALEE.

1. Introduction

Le comportement des structures en béton armé présentant des effets tridimensionnels (y compris de torsion) est une préoccupation majeure dans le domaine de la recherche en ingénierie sismique et vis-à-vis de la réglementation. Dans la dernière décennie, plusieurs maquettes en béton armé ont été testées en Europe de l'Ouest : il s'agissait de voiles seules (une douzaine de campagnes) ou des structures à murs et planchers tel que CASSBA (Gantenbein *et al.*, 1992) (Coin *et al.*, 1994) ou CAMUS (Queval *et al.*, 1999) (Mazars *et al.*, 2004) (Combescure *et al.*, 2000).

Suite à cette série d'expérimentations et dans le but d'évaluer la capacité des bâtiments à résister à une charge sismique, ainsi qu'à des charges sismiques induites au sein de leurs équipements, un modèle réduit (échelle 1/4) représentatif d'une partie d'un bâtiment en béton armé d'un îlot nucléaire (palier 900 MWe du parc français) a été conçu et dimensionné selon les pratiques de l'industrie nucléaire française en vigueur. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet SMART 2008 (*Seismic design and best-estimate Methods Assessment for RC buildings subjected to Torsion and nonlinear effects*) (Richard *et al.*, 2015 (1) et (2)).

En continuité, un second modèle réduit, quasi-identique à celui de SMART 2008 (appelée « maquette » dans la suite de l'article) a été considéré au sein du projet SMART 2013 (<http://www.smart2013.eu>). S'agissant de la partie expérimentale du projet, les principales différences par rapport à SMART 2008 sont liées au choix du scénario sismique considéré et au plan d'instrumentation. En particulier, on note les points suivants :

- des signaux d'entrée naturels sont considérés (à l'exception du signal de dimensionnement) ;
- des chargements de forte intensité sismique sont appliqués (ayant un PGA supérieur à quatre ou cinq fois le niveau de dimensionnement) ;
- l'effet d'une réplique sismique sur le comportement dynamique de la structure préalablement endommagée est considéré afin d'évaluer la robustesse de la structure.

En parallèle, un benchmark international, visant à simuler le comportement de la maquette a été lancé en février 2013 sous l'organisation conjointe du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) et Electricité de France (EDF) (Richard *et al.*, 2014 (3)). Près d'une trentaine d'équipes ont proposé des résultats qui font l'objet d'un document de synthèse (Richard *et al.*, 2014 (4)) et ont été exposés lors d'un Workshop international organisé en novembre 2014 au centre du CEA à Saclay.

L'ensemble de ces travaux s'inscrit dans un large programme de recherche en support aux demandes d'évaluation de sûreté, d'optimisation des performances structurales et d'extension de la durée d'exploitation des centrales nucléaires. Plus particulièrement, le benchmark a eu pour principaux objectifs (1) d'évaluer la maturité des méthodes conventionnelles et avancées, non seulement pour des sollicitations sismiques proches du niveau de dimensionnement mais également pour celles dont l'amplitude est nettement supérieure, (2) de partager avec la communauté internationale sur les pratiques d'évaluation sismique et de calcul des spectres de plancher et (3) d'évaluer la pertinence des différentes méthodologies permettant la prise en compte des incertitudes aléatoires et épistémiques lors de la réalisation d'études de vulnérabilité se traduisant par la détermination de courbes de fragilité.

Cet article vise, plus précisément, à présenter les enseignements obtenus lors du benchmark SMART 2013 vis-à-vis de la définition et l'utilisation de deux indicateurs qui ont pour but d'évaluer l'état structural de la maquette à la suite de l'application de séquences de chargements sismiques :

- (1) le déplacement inter-étages maximal ;
- (2) la chute de fréquence calculée au premier pic du spectre de plancher évalué au point le plus excité de la maquette.

Pour cela, l'article rappelle brièvement le déroulement de la campagne expérimentale en partie 2. Puis, il propose les principaux résultats du benchmark en partie 3.

2. La campagne expérimentale

2.1. La maquette

La maquette de SMART 2013, dont des vues sont présentées figure 1, est une structure en béton armé composée de trois étages trapézoïdaux. Elle est décrite plus précisément dans (Richard *et al*, 2004 (3)). Cette maquette à l'échelle (1/4) mesure 3,65 m de haut et pèse près de 46 tonnes en tenant compte des masses additionnelles utiles pour respecter les principes de similitude. Elle a été installée sur la table vibrante AZALEE du CEA et a été instrumentée à chaque étage dans les trois directions (X, Y, Z) à l'aide d'accéléromètres et de vélocimètres (*Low Velocity Displacement Transducers*) disposés aux cinq points A à E. Les vérins de la table sont également instrumentés pour contrôler les déplacements appliqués.

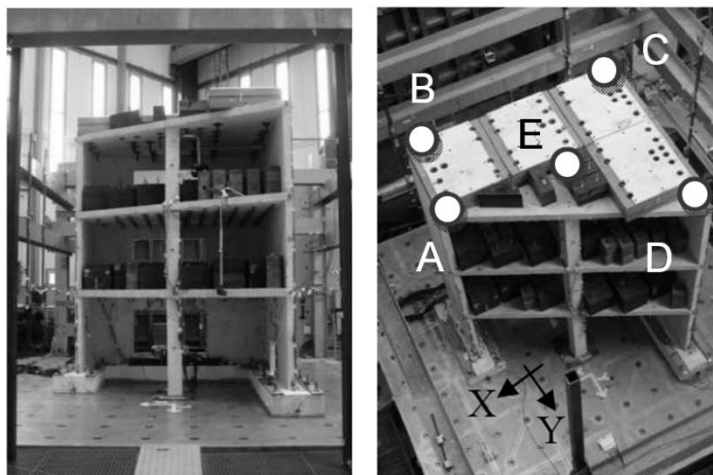


Figure 1. Maquette expérimentale posée sur la table vibrante AZALEE et position des cinq points de mesures

2.2. Les séquences de chargement sismique

Trois séquences de chargements ont été successivement appliquées à la maquette :

- (1) un séisme de dimensionnement : signal synthétique défini par une accélération maximale du sol (*Peak Ground Acceleration*, PGA) de l'ordre de 0,2 g ;
- (2) le choc principal du séisme de Northridge : signal naturel dont le PGA nominal maximum est de l'ordre de 1,8 g ;
- (3) une réplique du séisme de Northridge : signal naturel dont le PGA nominal maximum est de l'ordre de 0,4 g.

Le séisme de Northridge (choc principal et réplique) permet l'estimation de la *marge structurale* de la maquette au-delà du niveau de dimensionnement : marge intrinsèque par rapport au choc principal et extrinsèque vis-à-vis de l'aptitude à supporter les répliques qui suivent.

Afin d'assurer la robustesse du dispositif expérimental en reproduisant au mieux les signaux cibles au niveau du plateau supérieur de la table vibrante, les chargements sismiques sont appliqués progressivement par l'intermédiaire de « RUNS » successifs pour lesquels l'intensité maximale appliquée est une fraction de l'intensité nominale cible (voir tableau 1). Chaque séquence (ou RUN) se compose de chargements appliqués suivant les deux directions horizontales (X et Y sur la figure 1).

Séquence	RUN	PGA cible		PGA réalisé		Fraction du signal nominal cible (%)	Type
		X	Y	X	Y		
1	7	0,10	0,10	0,13	0,14	50	Séisme de dimensionnement réduit
	9	0,20	0,20	0,22	0,23	100	Séisme de dimensionnement nominal
2	11	0,20	0,11	0,21	0,16	11	Choc principal réduit du séisme de Northridge
	13	0,40	0,21	0,40	0,21	22	
	17	0,80	0,42	0,60	0,40	44	
	19	1,78	0,99	1,10	1,00	100	Choc principal nominal du séisme de Northridge
3	21	0,12	0,07	0,14	0,14	33	Réplique réduite du séisme de Northridge
	23	0,37	0,31	0,70	0,40	100	Réplique nominale du séisme de Northridge

Tableau 1. Les trois séquences sismiques appliquées à la maquette et les RUNS correspondant

2.3. Endommagements de la maquette

Les principaux constats en termes d'endommagement au cours des expérimentations sont :

- aucun dommage significatif n'est observé avant le RUN 13 (22% du choc principal de Northridge) ;
- le principal dommage (éclatement du béton avec désolidarisation des armatures) s'est produit lors de la séquence 2 (choc principal de Northridge) au niveau du pied du voile le plus court.

3. Le benchmark

3.1. Les quatre phases du benchmark

Le benchmark du projet SMART 2013 était divisé en quatre phases dont les objectifs étaient :

- Phase 1 (*Development of the Numerical Model*) : Caractériser le modèle numérique de chaque participant en termes de types d'éléments et de lois de comportement des matériaux (béton, acier, interfaces armatures / béton, etc.) et le tester sur des cas de chargements statiques élémentaires ;
- Phase 2 (*Elastic Calibration*) : Calibrer les paramètres du modèle dans le domaine élastique à l'aide d'analyses modales et d'analyses transitoires pour de faibles niveaux de chargement ;
- Phase 3 (*Blind Dynamic Computations with Strong Input Ground Motions*) : Simuler, à l'aveugle, le comportement de la structure dans le domaine non linéaire et évaluer les conséquences en termes d'endommagement ;
- Phase 4 (*Vulnerability Analysis*) : Etudier la vulnérabilité de la structure en construisant des courbes de fragilité.

3.2. Les modèles numériques proposés

Les participants ont définis des stratégies de modélisation variées en fonction de leur origine (ingénierie, instituts de recherche, universités), de l'outil de calcul utilisé, de la nature et de la précision des résultats recherchés, de leur savoir-faire et, pour certains, du retour d'expérience de benchmarks antérieurs. Ainsi, les modèles numériques peuvent être regroupés selon quatre classes principales en fonction de l'approche utilisée pour représenter les voiles courts :

- Classe (ED) pour les modèles à éléments discrets (un participant) ;

- Classe (1D) pour les modèles basés sur des éléments finis de type *poutre* pour les poteaux et les poutres et *treillis* pour les voiles (un participant) ;
- Classe (2D) pour les modèles basés sur des éléments finis de type *coque* et généralement complétés par des éléments *poutre* pour les poteaux et les poutres (environ deux tiers des participants) ;
- Classe (3D) pour les modèles basés sur des éléments finis volumiques (environ un quart des participants).

La figure 2 donne quelques exemples de maillages illustrant chaque classe de modèles.

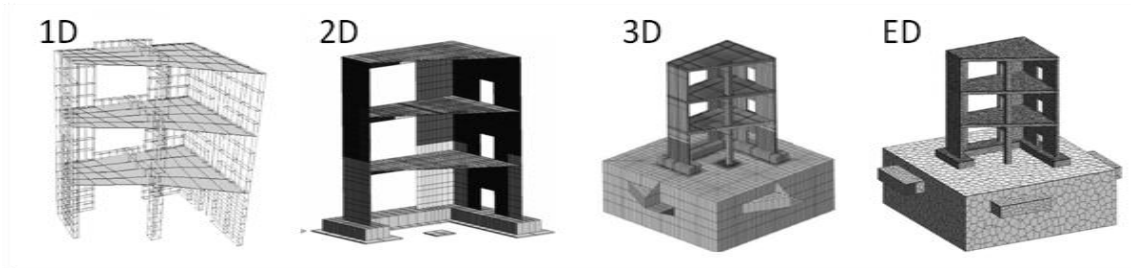


Figure 2. Quelques exemples des quatre classes de modèles numériques proposés lors du benchmark

Par ailleurs, en début de benchmark, le CEA a fourni un modèle numérique de la table AZALEE. Les participants étaient libres de l'utiliser, en l'adaptant si besoin, afin d'appliquer précisément les chargements sismiques puisque les évolutions en fonction du temps des déplacements et des accélérations au niveau des vérins de la table vibrante étaient également fournies.

A l'issue du benchmark de SMART 2013, il ressort que la classe de modèle la plus couramment utilisée s'appuie sur :

- une discrétisation 2D (éléments *coque* pour les voiles et les dalles et *poutre* pour les poteaux et les poutres) ;
- la prise en compte de la table vibrante dans l'analyse ;
- l'utilisation d'un modèle de comportement de type *smearred-damage* pour le béton et élasto-plastique avec écrouissage pour les armatures, qui sont représentées par des éléments *barre*.

3.3. Les séquences de chargements sismiques

Lors du benchmark, les participants ont appliqué à leur modèle numérique trois séquences de chargements représentant les trois séquences expérimentales (séisme de dimensionnement, choc principal et réplique de Northridge).

3.4 Les principaux résultats du benchmark

Parmi les résultats numériques demandés aux participants et analysés lors du benchmark, le tableau 2 résume les principales tendances observées vis-à-vis de l'estimation :

- des trois premières fréquences propres (FP) ;
- du spectre de réponse du plancher supérieur du troisième étage au niveau du point D (SR3D) ;
- de l'*Inter-Story Drift* entre les deuxièmes et troisièmes étages (ISD_{20-30}).

Ces tendances sont données en fonction du niveau de chargements sismiques et de la classe de modèles.

		Classe 1D	Classe 2D	Classe 3D	Classe ED
Séquence 1 (séisme de dimensionnement réduit, RUN 7)	FP	Bonne estimation de la 1 ^{ère} fréquence avec faible dispersion Tendance à la surestimation de la 2 ^{nde} fréquence avec faible dispersion Tendance à la surestimation de la 3 ^{ème} fréquence (mode de torsion) avec grande dispersion			
	SR3D	Bonne estimation en X et Y			
	ISD₂₀₋₃₀	Sous-estimation en X et Y			
Séquence 1 (séisme de dimensionnement nominal, RUN 9)	SR3D	Sous-estimation en X Bonne estimation en Y	Bonne estimation en X Surestimation en Y	Surestimation en X Bonne estimation en Y	Bonne estimation en X et Y
	ISD₂₀₋₃₀	Sous-estimation en X et Y	Bonne estimation en moyenne en X et Y (faible dispersion)	Sous-estimation en X et Y	Bonne estimation en X Sous-estimation en Y
Séquence 2 (choc principal du séisme de Northridge, RUN 19)	SR3D	Sous-estimation en X Bonne estimation en Y	Bonne estimation en X et Y	Bonne estimation en X et Y	Sous-estimation en X et Y
	ISD₂₀₋₃₀	Sous-estimation en X et Y	Sous-estimation en X Bonne estimation en moyenne en Y (grande dispersion)	Sous-estimation en X et Y	Bonne estimation en X Sous-estimation en Y
Séquence 3 (réplique du séisme de Northridge, RUN 23)	SR3D	Bonne estimation pour les basses fréquences (0 à 7 Hz) et non pertinent au-delà pour X et Y (large dispersion)			
	ISD₂₀₋₃₀	Sous-estimation en X et Y	Surestimation en X et Y (faible dispersion)	Bonne estimation en moyenne en X et Y (grande dispersion)	Sous-estimation en X et Y

NOTE. FP : Fréquences propres – SR3D : spectre de réponse du plancher supérieur du troisième étage au niveau du point D - ISD₂₀₋₃₀ : *Inter-Story Drift* entre les deuxièmes et troisièmes étages

Tableau 2. Tendances observées pendant l'analyse des résultats du benchmark (comparaison avec les résultats expérimentaux)

La phase 2 du benchmark a permis un recalage des modèles sur la base des réponses expérimentales notamment au cours du RUN 7 puisque les bas niveaux sismiques sollicitent la structure dans un domaine de comportement quasi-élastique. Au-delà du RUN 7 (phase 3), les simulations ont été conduites en aveugle. Cependant les phases 1 et 2 ont permis de *calibrer* dans le domaine quasi-élastique les modèles utilisés, ce qui place les simulations dans les meilleures conditions pour affirmer leurs pertinences aussi bien au niveau « matériau » (bonne description des non linéarités) que « structure » (bonne description des effets bidirectionnels qui induisent une combinaison flexion-tranchant-torsion). Les résultats obtenus lors du benchmark mettent en avant les classes 2D et 3D pour reproduire le comportement de la maquette. Toutefois, les dispersions des résultats obtenus pour le choc principal montrent que ce genre de situations pousse les modèles numériques dans leur retranchement et s'avère très sélectif. Enfin, par rapport au choc principal, la réplique est une sollicitation relativement modérée qui agit sur une structure fortement endommagée, mais encore résistante. De ce fait, le comportement observé est quasi-linéaire (pas de *sur-endommagement*) et la réponse des modèles dépend totalement de l'endommagement existant en début de séquence 3.

La synthèse du benchmark (Richard *et al.*, 2014 (4)) compare, plus précisément, les résultats numériques obtenus pour chaque séquence de chargements avec les résultats expérimentaux. Elle précise les tendances du tableau 2 en rappelant les pratiques et les hypothèses des participants. Elle nuance aussi certaines conclusions vis-à-vis :

- des classes 1D et ED qui comptent un seul participant chacune : la représentativité des résultats est donc limitée ;
- des différences de réponses dans les directions X et Y qui ne sont pas sollicitées à la même amplitude par le séisme de Northridge.

Enfin, la synthèse aborde d'autres résultats demandés aux participants tels que l'accélération à l'origine (*Zero Period Acceleration, ZPA*), les déplacements maximaux de chaque étage et les autres *ISD*.

3.5. Vulnérabilité de la structure et indicateurs d'endommagement

L'application des trois séquences des chargements sismiques a conduit à un endommagement progressif de la maquette. De fait, son comportement mécanique a évolué avec la baisse de raideur d'ensemble. Les résultats demandés aux participants (voir tableau 2) permettent de définir deux indicateurs d'endommagement afin d'évaluer la robustesse de la structure. Il s'agit de :

(1) **la valeur maximale de l'*ISD*₂₀₋₃₀** : indicateur local représentant la capacité du modèle numérique à représenter la ductilité entre deux étages et la capacité à résister aux efforts tranchants. L'intérêt de ce type d'indicateur a déjà été démontré pour des structures régulières en plan (voir commentaires en 3.5.1) ;

(2) **la chute de fréquence du premier pic identifié sur le *SR3D*** : indicateur global qui représente les capacités des modèles à capturer le comportement d'ensemble de la maquette pendant la progression de l'endommagement. Pour chaque participant, le premier pic de fréquence est identifié pour le premier RUN de chaque séquence (c'est-à-dire les RUNS 7, 11 et 21) afin de déterminer un « pic de fréquence de référence ». Ce pic de fréquence de référence est comparé au premier pic de fréquence des RUNS suivants pour estimer le décalage de fréquence (voir commentaires en 3.5.2).

Pour chaque indicateur, trois seuils d'endommagement (*endommagement léger, endommagement maîtrisé et endommagement étendu*) ont été définis (voir tableau 3). Ils ont été présentés et utilisés lors de l'analyse des résultats de la précédente campagne expérimentale SMART 2008 (Richard *et al.*, 2014 (2)).

Indicateur de robustesse (Directions X et Y)	Seuils d'endommagement		
	<i>Endommagement léger</i>	<i>Endommagement maîtrisé</i>	<i>Endommagement étendu</i>
<i>Inter-story drift maximum</i> (<i>ISD</i> ₂₀₋₃₀)	$ISD \geq 3 \text{ mm } (h^{(*)} / 400)$	$ISD \geq 6 \text{ mm } (h^{(*)} / 200)$	$ISD \geq 12 \text{ mm } (h^{(*)} / 100)$
Chute de fréquence (1 ^{er} pic du spectre de plancher)	Chute de 15 %	Chute de 30 %	Chute de 50 %

(*) h est la hauteur entre deux étages de la maquette, c'est-à-dire $h = 1,20 \text{ m}$.

Tableau 3. *Seuils d'endommagement pour les deux indicateurs d'endommagement*

Pour la direction X (direction sollicitée avec la plus forte intensité), la figure 6 compare les valeurs numériques et expérimentales en considérant ces seuils d'endommagement pour évaluer la robustesse de la structure vis-à-vis des différentes séquences sismiques. Les faisceaux grisés représentent l'intervalle de confiance à 90% des résultats numériques. Pour la direction Y, le même type de figure est disponible dans la synthèse du benchmark (Richard *et al.*, 2014 (4)).

3.5.1. *Inter-Story Drift maximum*

Pour la séquence 1 (dimensionnement), la valeur médiane des résultats numériques est satisfaisante par rapport aux valeurs expérimentales dans la direction X. La dispersion des résultats numériques est très faible. Les valeurs expérimentales et numériques n'excèdent jamais le seuil d'*endommagement léger*.

Pour la séquence 2 (choc principal de Northridge), la maquette en béton armé a été fortement endommagée. Dans la direction X, les modèles fournissent des résultats inférieurs aux valeurs expérimentales. En fin de séquence (RUN 19, 100% du signal nominal), le seuil d'*endommagement étendu* est largement franchi par les résultats expérimentaux alors que la médiane des résultats numériques l'a juste dépassé. Toutefois, les modèles

numériques prédisent de façon satisfaisante la tendance générale des variations de l'ISD₂₀₋₃₀ maximum même si la dispersion des résultats augmente avec l'intensité du chargement.

Pour la séquence 3 (réplique de Northridge), la médiane des résultats numériques est proche des valeurs expérimentales mesurées dans la direction X. En fin de séquence, les valeurs expérimentales sont proches du seuil d'endommagement léger : la maquette en béton armé n'a pas connu de nouvel endommagement significatif.

Pour la direction Y et pour les trois séquences (résultats non présentés ici), les résultats numériques sont proches des résultats expérimentaux. Ils sont peu dispersés et restent globalement inférieurs au seuil d'endommagement léger, à l'exception du RUN 19 (100% du choc principal de Northridge) pour lequel ce seuil est franchi.

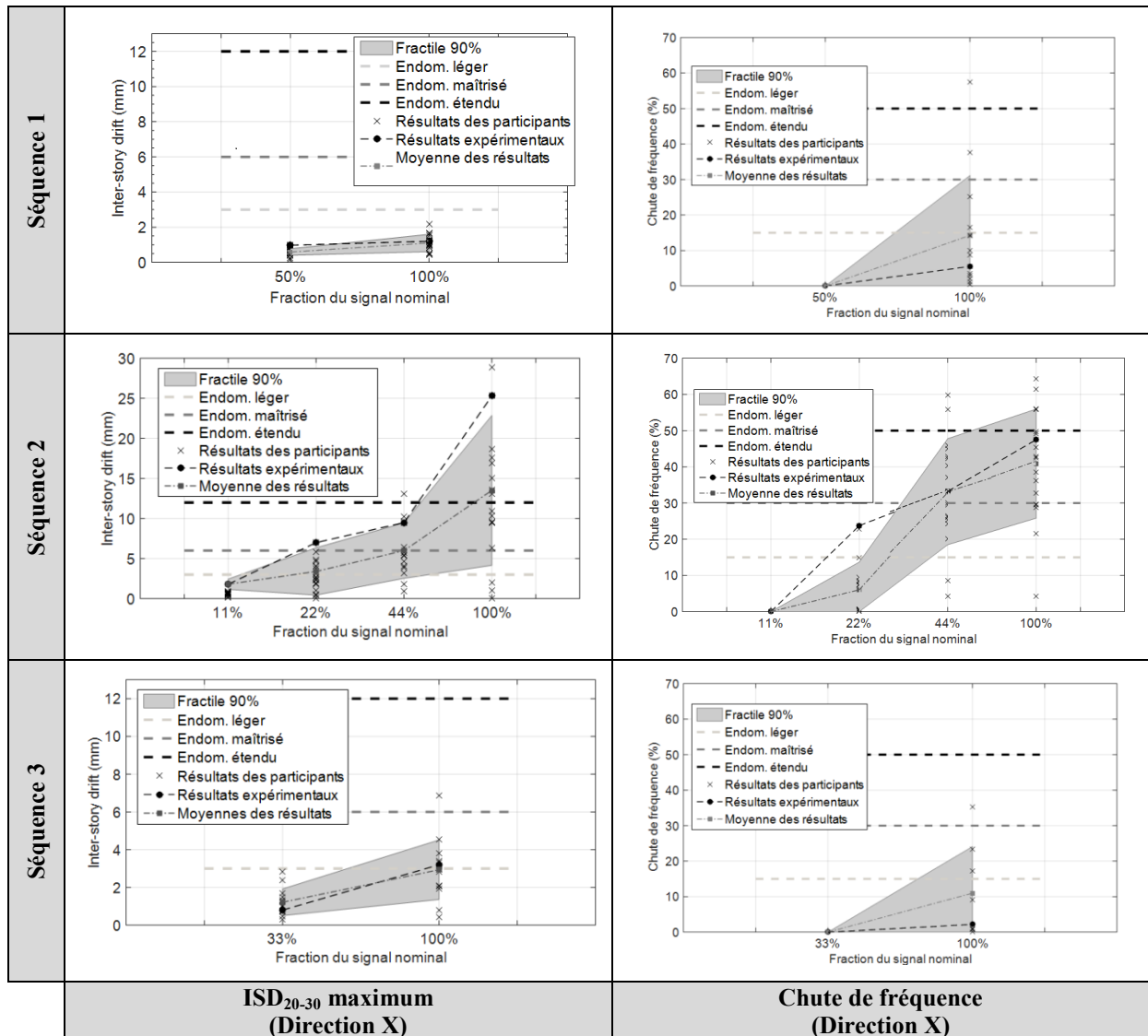


Figure 6. Variations des indicateurs d'endommagement dans la direction X au cours de chaque séquence

3.5.2. Chute de fréquence

Pour la séquence 1 (dimensionnement), dans la direction X, les valeurs expérimentales et la médiane des résultats numériques sont en dessous du seuil d'*endommagement léger*. Toutefois, la dispersion des résultats numériques est importante et plusieurs modèles fournissent des chutes de fréquence supérieures au seuil d'*endommagement léger*. On note que pour la direction Y, la médiane des résultats numériques est proche de la valeur expérimentale. Les modèles numériques captent une chute de fréquence qui dépasse le seuil d'*endommagement léger* ($\approx 21\%$) et qui est du même ordre que celle perçue par les mesures expérimentales. Ce résultat montre que la structure ne se comporte pas aussi linéairement que supposé à la conception. En d'autres termes, pour des structures comme celles de la maquette des approches non linéaires devraient être considérées même pour des niveaux de dimensionnement.

Pour la séquence 2 (choc principal de Northridge), dans la direction X, l'évolution de la médiane des valeurs numériques est cohérente avec celles des mesures expérimentales à l'exception du RUN 13. Malgré une valeur de PGA très élevée (9 fois celle du dimensionnement), le seuil d'*endommagement étendu* n'est pas dépassé pour les mesures expérimentales et pour la majorité des résultats numériques : les modèles approchent le comportement non linéaire de façon satisfaisante. Les mêmes commentaires peuvent être faits pour la direction Y.

Pour la séquence 3 (réplique de Northridge), dans la direction X, la médiane des résultats numériques surestime les valeurs expérimentales de chute de fréquence tout en restant inférieur au seuil d'*endommagement léger* : la réplique n'a pas engendré de dégâts supplémentaires à la maquette. Ici aussi, les mêmes commentaires peuvent être faits pour la direction Y.

4. Conclusion et perspectives

Le benchmark du projet SMART 2013 a été l'occasion de comparer deux indicateurs (l'ISD maximum et la chute de fréquence) pour statuer sur la représentativité par les calculs de l'endommagement d'une structure asymétrique à base de voiles courts en béton armé. Bien sûr, la valeur ajoutée de ces indicateurs n'existe que si le modèle utilisé est capable de bien reproduire le comportement de la structure, y compris dans un domaine de comportement fortement non linéaire. Aussi, pour SMART 2013, les modèles basés sur des éléments finis 2D ou 3D se sont avérés globalement les plus pertinents et performants mais avec, parfois, des dispersions non négligeables. Cependant, la fourniture par le CEA du maillage de la table sismique et des résultats de mesures réalisées sous des signaux de faibles intensités (dans le domaine linéaire) a permis une bonne calibration de nombreux modèles (quelque soit leur classe).

Pour statuer sur l'état effectif d'endommagement de la structure, la définition des seuils d'endommagement est un point délicat. Le tableau 4 résume le niveau d'endommagement atteint à la fin de chaque séquence en fonction des trois niveaux *Endommagement léger*, *Endommagement maîtrisé* et *Endommagement étendu*. Des divergences apparaissent pour chacune d'elles. En particulier, pour le choc principal du séisme de Northridge :

- l'ISD₂₀₋₃₀ maximum conduit à la conclusion que la maquette a largement dépassé l'état *Endommagement étendu*.

- la chute de fréquence moyenne se situe entre les seuils *Endommagement maîtrisé* et *Endommagement étendu*, ce qui apparaît davantage en accord avec la réalité des dégradations constatées sur la maquette.

Si l'ISD, indicateur local, a montré toute sa pertinence pour les structures poutres-poteaux, son utilisation comme indicateur d'endommagement pour des structures plus raides, à voiles en béton armé, comme celle de la maquette SMART 2013, doit être réalisée avec précautions. A minima, un ajustement des seuils est à envisager.

La chute de fréquence est un indicateur intéressant mettant en avant l'évolution de la rigidité globale d'une structure. Elle peut rapidement être mesurée sur site à l'aide de méthodes de mesures standards (marteau

d'impact, méthode par bruit de fond par exemple) et peut s'avérer complémentaire à l'ISD afin d'estimer un état structural complet à différentes échelles.

Néanmoins, la définition d'un indicateur pertinent permettant d'estimer avec précision l'état de l'endommagement d'une structure vis-à-vis de seuils limites est aujourd'hui un défi ouvert à la communauté scientifique et demande la mise en place d'un groupe de recherche spécifique.

	ISD ₂₀₋₃₀ maximum		Chute de fréquence	
	Mesures expérimentales	Médiane des valeurs numériques	Mesures expérimentales	Médiane des valeurs numériques
Séquence 1 (dimensionnement, RUN 9)	Aucun dommage	Aucun dommage	<i>Endommagement léger</i> (direction Y)	<i>Endommagement léger</i> (direction Y)
Séquence 2 (choc principal, RUN 19)	<i>Endommagement étendu</i> (direction X)	<i>Endommagement étendu</i> (direction X)	<i>Endommagement maîtrisé</i> (directions X et Y)	<i>Endommagement maîtrisé</i> (directions X et Y)
Séquence 3 (réplique, RUN 23)	<i>(Sur-)Endommagement léger</i> (direction X)	<i>(Sur-)Endommagement léger</i> (direction X)	Aucun dommage supplémentaire	Aucun dommage supplémentaire

Tableau 4. Bilan des états d'endommagement en fonction des indicateurs

5. Bibliographie

- Gantenbein F., Queval J. C., Wang F., « Programme d'essais CASSBA », *RFM Revue Française de Mécanique*, p. 121-127, 1992.
- Coin A., Mazars J. *et al.*, « Modélisation du comportement et fonctionnement sismique de la maquette CASSBA », *Annales de l'ITBTP* n°523, p.68-91, 1994.
- Queval J. C., Combescure D., Chaudat T., Sollogoub P., « Comportement des structures à murs porteurs sous chargement sismique », *Association Française du Génie Parasismique - Colloque national*, p. 589-596, 1999.
- Mazars J., « Fonctionnement sismique des murs en béton faiblement armé : Apports de la recherche française », *Revue française de génie civil*, Vol. 8, 2-3, p. 69-79, 2004.
- Combescure D., Chaudat T., ICONS European program seismic tests on R/C walls with uplift; CAMUS IV specimen, ICONS project, rapport CEA/DRN/DMT, 00-27, 2000.
- Richard B., Martinelli P., Chaudat T., Voldoire F., Abouri S. Bonfils N., « Experimental investigations on an asymmetric reinforced concrete structure subjected to seismic loadings », *Engineering structures*, 2015 (1) (en cours de soumission).
- Richard B., Martinelli P., Chaudat T., Voldoire F., Abouri S., Bonfils N., « SMART 2008: Overview, synthesis and lessons learnt from the International Benchmark », *Engineering structures*, 2015 (2) (en cours de soumission).
- Richard B., Chaudat T., Presentation of the SMART 2013 International Benchmark. CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/EMSI/ST/12-017/H, DEN Technical Specification, 2014 (3).
- Richard B., Fontan M., Mazars J., SMART 2013: overviews, synthesis and lessons learnt from International Benchmark. CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/EMSI/NT/14-037/A, DEN Technical report, 2014 (4).