



HAL
open science

Etude comparative des effets des lois de comportement cycliques et de l'amortissement sur les spectres de plancher

Nicolas Ile, Ibrahim Bitar, François Voltaire, Estelle Herve-Secourgeon, David Bouhjiti, Benjamin Richard, Marie-Cécile Robin-Boudaoud

► To cite this version:

Nicolas Ile, Ibrahim Bitar, François Voltaire, Estelle Herve-Secourgeon, David Bouhjiti, et al.. Etude comparative des effets des lois de comportement cycliques et de l'amortissement sur les spectres de plancher. 11ème Colloque National de l'AFPS, AFPS, Nov 2023, Le Gosier (Guadeloupe), France. hal-04455093

HAL Id: hal-04455093

<https://hal.science/hal-04455093>

Submitted on 13 Feb 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



11^{ème} Colloque National de l'AFPS

Le risque sismique dans un contexte multi-risques :
Comprendre, gérer, prévenir

Guadeloupe | 7-10 novembre 2023

Etude comparative des effets des lois de comportement cycliques et de l'amortissement sur les spectres de plancher

Nicolas ILE¹, Ibrahim BITAR², François Voldoire³, Estelle HERVE-SECOURGEON³,
David BOUHJITI², Benjamin RICHARD⁴, Marie-Cécile ROBIN-BOUDAUD⁵

¹ Ingénieur chercheur, Den-Service d'étude mécanique et thermique (SEMT), CEA, Université Paris-Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

² Ingénieur chercheur, IRSN, SES, LMAPS, Fontenay-aux-Roses, France

³ Ingénieur chercheur senior, EDF R&D, Saclay, France

⁴ Chef de laboratoire, IRSN, SES, LMAPS, France, Fontenay-aux-Roses, France

⁵ Ingénieur chercheur, FRAMATOME-DTI, France

*Corresponding author: ibrahim.bitar@irsn.fr

Résumé. L'industrie nucléaire française, composée d'EDF, CEA, FRAMATOME et IRSN, est très impliquée dans le domaine du génie parasismique pour l'évaluation du risque sismique. Les activités de recherche se concentrent sur des questions complexes, telles que le comportement structurel des bâtiments soumis à des charges sismiques au-delà du niveau de dimensionnement pour quantifier les marges de sécurité. Les objectifs de cette étude sont d'améliorer la compréhension du transfert de spectres sismiques depuis le sol vers les équipements et d'améliorer la fiabilité et la robustesse des pratiques de modélisation avancées. Des essais sismiques ont été effectués sur trois maquettes de structures en béton armé à différentes échelles pour étudier leurs comportements sismiques. Les analyses numériques menées ont étudié le comportement dynamique de ces structures par l'utilisation de la méthode transitoire non linéaire, en adoptant différentes approches de modélisation de l'amortissement visqueux et plusieurs modèles de comportement cyclique de béton.

ABSTRACT. The French nuclear industry, which comprises EDF, CEA, FRAMATOME, and IRSN, is heavily involved in the field of seismic engineering for seismic risk assessment. Research activities are focused on complex issues, such as the structural behavior of buildings subjected to seismic loads beyond the design level to quantify safety margins. The objectives of this study are to improve the understanding of seismic spectra transfer from the ground to the equipment and to enhance the reliability and robustness of advanced modeling practices. Seismic tests were conducted on three reinforced concrete structure models at different scales to study their seismic behavior. By adopting several viscous damping models and different nonlinear constitutive concrete models, transient analysis have been carried out to study the behavior of these structures.

Mots Clés : Spectres transférés ; Essais sismiques ; Modèles non linéaires ; Amortissement.

1. INTRODUCTION

L'industrie nucléaire française est très active dans le domaine du génie parasismique, en particulier dans l'évaluation du risque sismique. Parmi les cadres existants, il en existe un qui implique les exploitants nucléaires français tels qu'Électricité de France (EDF), le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) et FRAMATOME, ainsi

que l'organisme français de support technique qu'est l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Dans ce cadre, des activités de recherche sont menées pour améliorer la sûreté nucléaire des installations existantes ou nouvelles. Ces activités se concentrent sur des questions complexes qui sont cruciales dans le processus d'évaluation du risque sismique. Une de ces activités concerne le génie civil, et vise à mieux comprendre le comportement structurel des bâtiments complexes lorsqu'ils sont soumis à une charge sismique au-delà du niveau du dimensionnement, afin de quantifier les marges de sécurité fournies par les approches conventionnelles. Le présent article offre un aperçu des travaux menés dans cette catégorie par le CEA-EDF-FRAMATOME-IRSN, ainsi que des principaux résultats obtenus.

Un premier objectif de cette étude vise à améliorer la compréhension du transfert de spectres sismiques depuis le sol vers les équipements dans le contexte de structures en béton armé présentant des non-linéarités modérées. L'identification précise des différentes sources de dissipation d'énergie (dissipation matérielle, dissipation visqueuse et dissipation numérique liée au schéma d'intégration temporelle) est nécessaire pour atteindre cet objectif. Un deuxième objectif est d'améliorer la fiabilité et la robustesse des pratiques de modélisation avancées (« *best-estimate* »).

Pour ce faire, des essais sismiques sur la table vibrante AZALEE du CEA sur des structures en béton armé et des éléments de structures conçus selon les règles de la filière nucléaire ont été utilisés. Ces essais ont été réalisés :

- sur un modèle de plancher du bâtiment BAS-BL 1300MWe à l'échelle 1/2,5 (maquette P4) [1],
- sur une structure asymétrique de type nucléaire qui ne comportait pas d'éléments de remplissage, à l'échelle 1/4 (maquette SMART 2013) [2],
- sur une poutre en béton armé à l'échelle 1 (maquette IDEFIX) [3].

Les études numériques du comportement sismique sont réalisées grâce aux analyses transitoires non linéaires. Le modèle d'amortissement global de Rayleigh et modal (Wilson-Penzien) [4] ont été employés dans le cadre de ces simulations numériques. Pour modéliser les phénomènes dissipatifs aux points matériels, plusieurs lois non linéaires cycliques disponibles dans le code Cast3M ont été utilisées. La modélisation de l'amortissement global forfaitaire est basée sur les recommandations de l'Agence de sûreté nucléaire (ASN) [5]. L'accent a été mis sur la comparaison entre les résultats du calcul et les mesures expérimentales pour les grandeurs caractérisant la réponse des équipements, en particulier les spectres de plancher.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux adoptées dans les analyses numériques ont été basées sur les valeurs moyennes établies à la suite des essais réalisés sur les éprouvettes de béton et sur les barres d'acier utilisées pendant la fabrication des maquettes. Les lois de comportement du béton utilisées ont été régularisées par la méthode classique d'Hillerborg, [6]. Dans les calculs des trois maquettes, l'adhérence acier-béton a été supposée parfaite. Elle s'est traduite par la continuité des déplacements de nœuds communs. L'algorithme d'intégration temporelle utilisé a été le schéma implicite de Newmark, d'accélération moyenne, avec un pas de temps variable compris entre 2.5×10^{-3} et 2.5×10^{-5} sec. L'équilibre des forces a été vérifié avec une précision de 10^{-6} .

En raison de limitations de taille de l'article, les descriptions détaillées des essais ainsi que toutes les informations relatives à la géométrie et aux propriétés matérielles des données d'entrée ne sont pas incluses dans cet ouvrage. Cependant, des références sont fournies pour orienter les lecteurs intéressés vers les sources pertinentes. Dans ce qui suit, les trois cas

d'étude sont étudiés dans trois sections dédiées. Chaque section commence par une brève description de la modélisation employée et se poursuit par l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

2. CAS D'ÉTUDE: MAQUETTE SMART 2013

2.1 Description

Le premier cas d'étude concerne la maquette SMART 2013 à l'échelle $\frac{1}{4}$, représentative d'une partie d'un bâtiment en béton armé d'un îlot nucléaire. Le maillage utilisé pour l'ensemble table-maquette est présenté à la Figure 1. Les voiles sont modélisés à l'aide d'éléments de type « coque » intégrés avec 4 couches dans l'épaisseur et ayant un comportement non linéaire. Des éléments finis de type « DKT » ayant un comportement élastique linéaire sont utilisés pour représenter les dalles, les poutres et le poteau. Les aciers des voiles sont modélisés à l'aide d'éléments de type « barre excentrée », ayant un comportement non linéaire. La fondation de la maquette est représentée à l'aide d'éléments volumiques à 8 nœuds, élastiques, « cub8 ». La table vibrante est représentée par le modèle testé et validé par le CEA. Ce modèle de table est construit avec des éléments de type « coque » élastiques. Le modèle élasto-plastique BETON [7], basé sur le principe de la fissuration répartie fixe, ainsi le modèle d'endommagement RICCOQ [8] associé à un modèle de plasticité, ont été utilisés. Les 4 paires de séismes, les plus importants qui ont été appliqués dans les deux directions horizontales lors des essais ont été considérés. Ces séismes d'intensité croissante sont enchaînés dans l'ordre suivant : RUN_09 (S_D = séisme de dimensionnement), RUN_13 ($S_D \times 1.5$), RUN_17 ($S_D \times 2.30$) et RUN_19 ($S_D \times 4.80$).

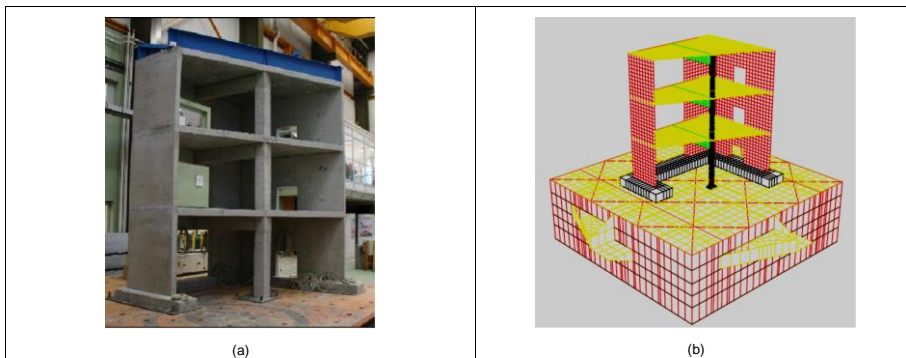


Figure 1 : (a) Maquette SMART en béton armé ; (b) Maillage de la maquette SMART 2013.

2.2 Discussion des résultats

Pour les premiers deux séismes (RUN_09 - S_D et RUN_13 - $S_D \times 1.5$), l'approche du guide ASN permet d'obtenir des résultats conservatifs. La Figure 2 illustre une première comparaison des spectres calculés avec ceux obtenus expérimentalement, au point B situé en tête de la maquette, dans la direction Y. Pour les deux modèles, on constate une bonne prédiction du glissement des fréquences à gauche, mais les valeurs spectrales prédites par le modèle BETON sont plus faibles et plus proches de celles mesurées en comparaison avec celles prédites par le modèle RICCOQ. La loi BETON semble donc plus dissipative, conduisant à une diminution des amplitudes spectrales, toute en restant conservative. Il a été aussi constaté, quel que soit la modèle utilisé, que la part qui revient à l'énergie dissipée par

amortissement visqueux est généralement beaucoup plus importante que la part qui revient à l'énergie dissipée par amortissement hystérétique. Cela est en partie dû au fait que, pour la maquette SMART 2013, les grands dommages sont généralement concentrés dans une zone restreinte à la base du voile V04. On doit également attribuer ceci au fait que la viscosité s'exprime tout au long du transitoire, partout, alors que les évolutions non linéaires dissipatives sont aussi localisées en temps sur les phases fortes.

Le modèle de Rayleigh et le modèle d'amortissement modal (Wilson-Penzien) fournissent des résultats très proches, dès lors que les taux d'amortissement dans la gamme de fréquences d'intérêt adoptées par ces deux modèles sont similaires. Le désavantage important du modèle d'amortissement modal réside dans le fait que son utilisation dans le cadre d'une analyse sismique temporelle exige des temps de calcul assez longs, à cause du fait que la matrice d'amortissement est, dans ce cas, pleine.

Finalement, pour le niveau d'intensité sismique le plus élevé (RUN_19 - $S_D \times 4.80$) la modélisation utilisée atteint ses limites et devrait être améliorée pour prendre en compte les phénomènes complexes tels que la perte d'adhérence des armatures, le flambement et la rupture des barres d'acier.

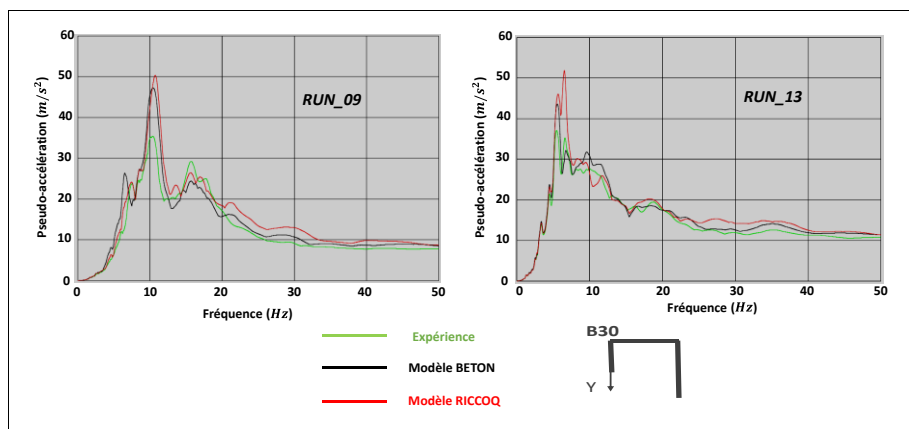


Figure 1: Spectres de plancher pour 5% d'amortissement au point B (direction Y), pour le RUN_09 et RUN_13.

3. CAS D'ETUDE : MAQUETTE DE PLANCHER P4

3.1 Description

Dans le cadre de l'action bipartite EDF-CEA « Vibration de plancher et séisme vertical », une campagne d'essais sismiques a été menée en 2002 au CEA sur une maquette de plancher, pour analyser le comportement au séisme vertical des planchers et valider les méthodologies de calcul des spectres de plancher des ouvrages de génie civil des REP. Les excitations appliquées à la maquette ont été mono-axiales verticales, de niveau d'intensité croissant. 5 signaux qui ont excité la maquette lors des essais ont été sélectionnés. Dans les calculs, ces séismes ont été enchaînés dans l'ordre suivant : RUN 1 ($S_D \times 0.5$), RUN 2 (S_D), RUN 3 ($S_D \times 1.5$), RUN 4 ($S_D \times 2$) et RUN 7 ($S_D \times 4$). Les calculs de la maquette ont été réalisés à l'aide d'une modélisation coques multicouches (éléments COQ4) et 3D (éléments volumiques CUB8 et PRI6), voir Figure 3. Quatre modèles de comportement non linéaire cyclique du béton ont été inclus dans ces modélisations :

- le modèle élasto - plastique BETON et le modèle d'endommagement RICCOQ pour la formulation coques multicouches : C_BETON et C_RICCOQ,
- le modèle d'endommagement couplé à la plasticité CONCYC [9] et le modèle de fissuration fictive d'OTTOSEN [10] pour la formulation volumique 3D : V_CONCYC et V_OTTOSEN.

Conformément aux recommandations du guide ASN n°2/01, [5], l'amortissement visqueux est représenté par un amortissement global de Rayleigh, construit par combinaison linéaire des matrices de masse et de raideur ($C = \alpha M + \beta K$), calé à 2% pour la première et la 3^{ème} pour toutes les modélisations et pour tous les RUNs.

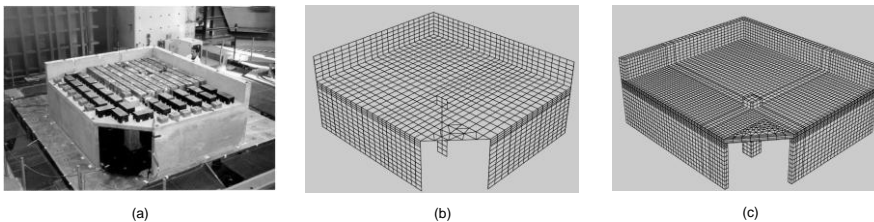


Figure 3 : (a) Maquette de plancher en béton armé ; (b) Maillage coques multicouches de la maquette P4 ; (c) Maillage volumique de la maquette P4.

3.2 Discussion des résultats

Les spectres de plancher obtenus sont représentés sur les courbes des Figures 4 et 5. Ils ont été calculés avec un amortissement de 5%, au centre du plancher (point de mesure AZP11, [1]). Pour le RUN 2 (RUN quasiment élastique), toutes les modélisations donnent de bons résultats avec une faible surestimation (comprise entre 5 et 11%) des spectres de réponse. Du RUN 3 (RUN très faiblement non linéaire) à RUN7 (RUN non linéaire) on constate que l'amplification au pic du spectre devient plus importante et qu'elle s'accroît avec l'intensité sismique. Cependant, cette surestimation dépend fortement de la loi de béton employée : pour le RUN 7 les modélisations C_CEA et V_CONCYC amènent une amplification de 1.28 et de 1.54, respectivement, alors que dans le cas des modélisations C_RICCOQ et V_OTTOSEN, le facteur d'amplification est proche de 2. Par ailleurs, les fréquences au pic issues des différentes modélisations sont, en règle générale, bien corrélées avec les résultats expérimentaux. Les évolutions des énergies pour les modélisations C_CEA et C_RICCOQ sont présentées sur la Figure 6. On constate que l'énergie dissipée par l'amortissement de Rayleigh, augmente toujours avec le temps et que la part qui revient à l'énergie dissipée par amortissement visqueux est généralement beaucoup plus importante que la part qui revient à l'énergie dissipée par amortissement hystérétique. L'évolution de l'énergie hystérétique au cours du temps prédite par les deux modèles, montre que le modèle CEA a la tendance à dissiper plus d'énergie que le modèle RICCOQ. A la fin du RUN 7, le ration énergie visqueuse/énergie hystérétique pour le modèle CEA se situe à environ 3.5, alors que le même ratio pour le modèle RICCOQ est proche de 10.5.

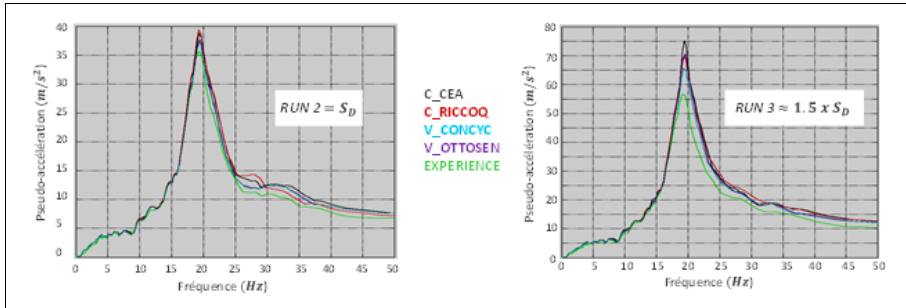


Figure 4 : Spectres de plancher pour 5% d'amortissement au centre du plancher pour RUN 2 et RUN 3.

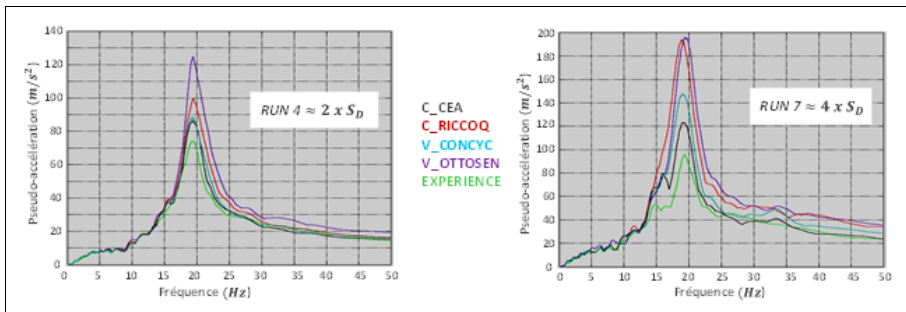


Figure 5 : Spectres de plancher pour 5% d'amortissement au centre du plancher pour RUN 4 et RUN 7.

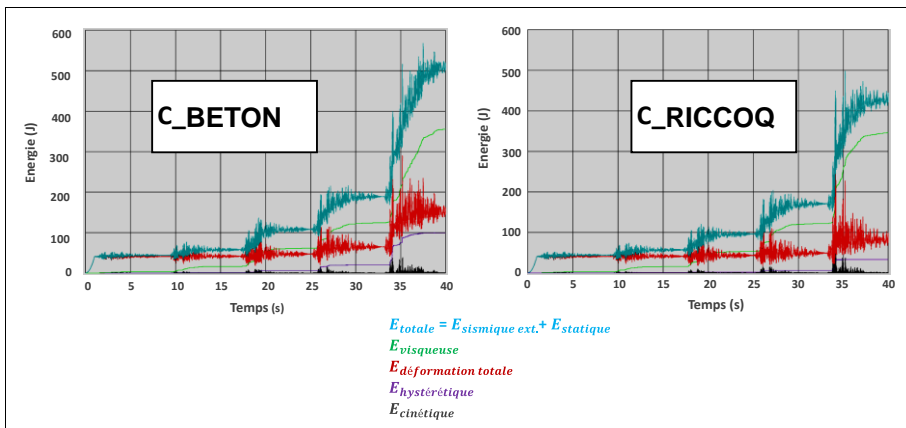


Figure 6 : Bilan des énergies au cours de différents RUNS avec les modèles BETON et RICCOQ.

4. CAS D'ÉTUDE : POUTRE IDEFIX

4.1 Description

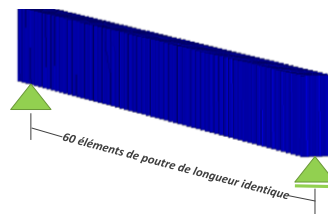
La campagne d'essais IDEFIX [3] a été menée par le CEA dans le cadre du programme de recherche PIA SINAPS@ pour évaluer et caractériser l'amortissement des structures en béton armé. Cette campagne est composée des essais pseudo-statiques et dynamiques avec des poutres en béton armé testées sur la plateforme TAMARIS. Au total, 20 poutres ont été testées

avec différents types de signaux d'entrée. Un banc d'essais de flexion 4 points a été conçu et monté sur la table vibrante AZALEE pour solliciter en dynamique la poutre au niveau des appuis situés en extrémités de travée (Figure 7(a)). Deux appuis intermédiaires ont été placés aux quarts de travée de la poutre, afin de supporter la masse propre de la poutre et les deux masses supplémentaires de 360 kg chacune. Ces supports reposaient sur des dispositifs à coussin d'air, qui annulaient le frottement avec la table. Les appuis d'extrémité de poutre ont été conçus pour résister uniquement aux charges horizontales tout en permettant la rotation des extrémités de la poutre presque sans moment de résistance. Pour les analyses numériques et les comparaisons calcul/expérience, la réponse de la poutre HA12-C1B soumise à deux signaux sismiques naturels est étudiée. Les calculs de la poutre IDEFIX ont été réalisés à l'aide d'une modélisation poutre multifibre (Figure 7 (b)) et de deux modèles de comportement : le modèle BETON_UNI [7] et le modèle GKIMOUSIS [11] formulé dans le cadre de la plasticité classique et de la mécanique de l'endommagement. Ce deuxième modèle a été implémenté dans le code Cast3M afin d'évaluer l'influence d'un modèle plus dissipatif sur les spectres de plancher. L'analyse dynamique transitoire non linéaire est effectuée en employant un modèle d'amortissement global de Rayleigh, proportionnel à la matrice de raideur ($C = \beta K$), calé à 1% pour la première fréquence propre en régime élastique. Nous allons considérer dans cette étude la réponse de la poutre soumise au signaux d'intensité 0,27 g (RUN 2 = $S_D \times 1.5$) et 0,54 g (RUN 3 = $S_D \times 4$).

Commenté [VF1]: Propre en régime élastique ?



(a)



(b)

Figure 7 : (a) Maquette IDEFIX ; (b) Maillage de la poutre IDEFIX.

4.2 Discussion des résultats

La Figure 8 illustre les spectres de plancher calculés, en comparaison avec les spectres expérimentaux. Pour les deux modèles, on peut observer que le glissement de fréquence à gauche est correctement simulé pour le RUN2, mais il est moins bien prédit pour le RUN3. On peut constater également que la simulation dont la loi interne apporte le plus de dissipation (modèle de GKIMOUSIS) est nettement plus adaptée, surtout dans la phase d'apparition et du développement des fissures (voir les spectres correspondant au RUN2). Cependant, l'écart entre les deux simulations tend à disparaître à mesure que le chargement augmente, car le long du deuxième chargement (RUN3), les deux modèles employés, contrairement à la réalité expérimentale, semblent avoir épuisé leur capacité dissipative. Néanmoins, même pour le RUN 3, le pic du spectre prédit par le modèle de GKIMOUSIS reste inférieur à celui correspondant au modèle BETON_UNI.

Commenté [VF2]: Pseudo-accélération à 5%

Les évolutions des énergies au cours du RUN 2 pour les deux modèles sont présentées sur la Figure 9. Tout au long de ce chargement, l'énergie hystérétique dissipée par le modèle de GKIMOUSIS est supérieure à celle dissipée par le modèle BETON_UNI. On peut aussi remarquer que lorsque l'on emploie la loi GKIMOUSIS, la dissipation par hystérésis est prédominante (l'énergie hystérétique est supérieure à l'énergie visqueuse), alors que ce n'est pas le cas pour le modèle BETON_UNI, pour lequel la dissipation visqueuse est supérieure à

Commenté [VF3]: Indiquer comment est-elle calculée.

celle dissipée par hystérésis. De plus, l'énergie dissipée par hystérésis avec le modèle BETON_UNI reste constante après l'atteinte des valeurs crête des accélérations, alors que l'énergie dissipée avec le modèle de GKIMOUSIS, continue de croître sur presque toute la durée de l'excitation sismique.

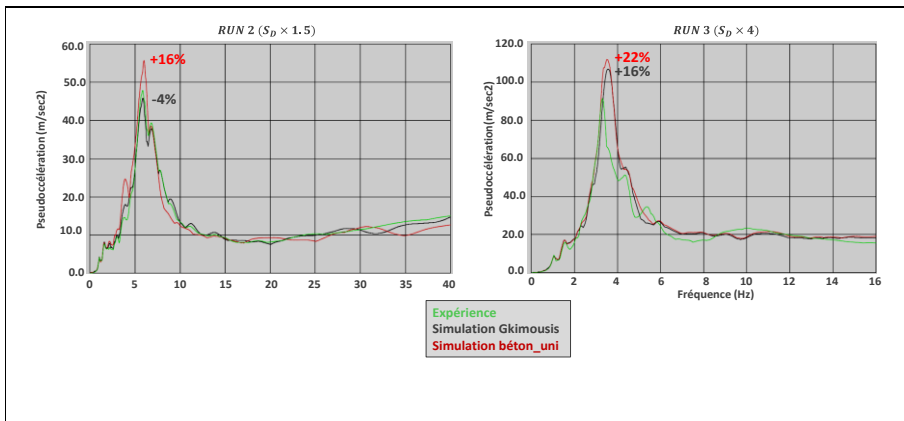


Figure 8 : Spectres de plancher (Pseudo-accelération à 5%) au centre de la poutre.

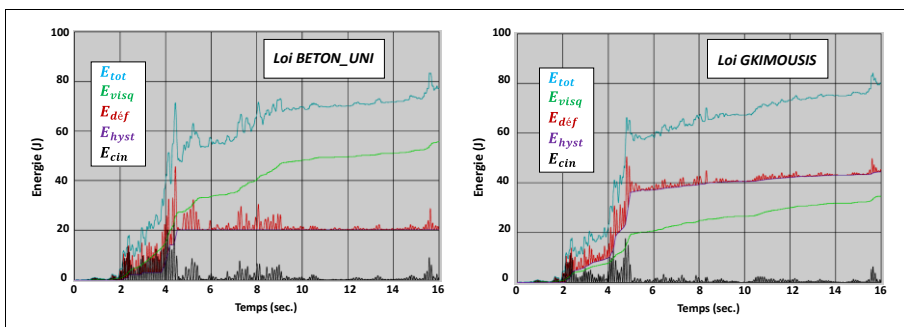


Figure 9: Bilan des énergies au cours du RUN 2 avec les modèles BETON_UNI et GKIMOUSIS.

5. CONCLUSIONS

Les conclusions principales de ces études sont exposées ci-dessous :

- Pour le niveau de dimensionnement, lorsque le comportement est faiblement non linéaire, avec peu de fissuration, le choix du modèle d'amortissement - Rayleigh ou modal (Wilson-Penzien) n'a pas d'influence sur les résultats attendus. L'application des prescriptions du guide ASN [5], avec un taux d'amortissement maximal de 2% pour les principaux modes et de 5% au plus pour la fréquence de coupure, permet d'obtenir des résultats proches de l'expérience et conservatifs.
- Pour des chargements sismiques à 1-2 fois le niveau de dimensionnement (en terme de PGA), les simulations non linéaires donnent toujours des résultats proches des mesures et restent conservatifs par rapport à l'expérience. Avec l'emploi d'un amortissement selon le guide ASN [5], le calcul a une certaine tendance à surestimer les déplacements et les pics des spectres de plancher expérimentaux, en assurant néanmoins une bonne reproduction du glissement des fréquences à gauche.
- Pour des chargements sismiques à 2-4 fois le niveau de dimensionnement, les simulations non linéaires fournissent de résultats satisfaisants et conservatifs. La dissipation totale dans la structure est influencée par la dissipation d'énergie par

amortissement visqueux global, cumulée à la dissipation hystérétique aux points matériels. Si le modèle non linéaire cyclique de béton mis en œuvre ne dissipe pas assez d'énergie, on constate une surestimation des déplacements et des pics des spectres de plancher par rapport à l'expérience, mais le glissement des fréquences à gauche est reproduit de manière satisfaisante. La surestimation des pics des spectres s'accroît avec l'intensité sismique, mais elle est moins importante pour les modèles de béton plus dissipatifs. La dissipation hystérétique du modèle de béton joue donc un rôle important dans la diminution des conservatismes, étant donné que la phase de refermeture d'une fissure induit un amortissement intrinsèque qui contribue à l'amortissement global. Dans le bilan énergétique, une bonne représentation du comportement dissipatif, apporte un accroissement de la part qui revient à l'énergie dissipée par amortissement hystérétique, par rapport à l'énergie dissipée par amortissement visqueux.

- En général, la capacité d'accumulation de l'énergie dissipée sur une longue durée de l'excitation sismique, n'est pas l'attribut des modèles de béton établis selon le formalisme des Matériaux Standards Généralisés, qui garantit toutefois la robustesse de la réponse de ces modèles, mais au détriment d'une modélisation plus approximative de la dissipation d'énergie. Pour accroître la pertinence des modélisations « avancées », il est essentiel d'améliorer la description de la phénoménologie observée lors des essais cycliques sur des éprouvettes, notamment les règles de charge-décharge, y compris les décharges et recharges partielles formant des boucles d'hystérésis, l'augmentation de l'énergie dissipée avec la déformation, etc. Une autre solution envisageable consisterait à introduire une contribution dissipative supplémentaire de type visqueux dans la relation de comportement non linéaire, comme celle proposée en [12].

6. REFERENCES

- [1] T. Chaudat, « Rapport des essais sismiques réalisés sur une maquette de plancher EDF type P4 à échelle réduite », SEMT/EMSI/RT/02-048/A, 2002.
- [2] B. Richard *et al.*, « SMART 2013: Experimental and numerical assessment of the dynamic behavior by shaking table tests of an asymmetrical reinforced concrete structure subjected to high intensity ground motions », *Engineering Structures*, vol. 109, p. 99-116, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.11.029.
- [3] T. Heitz, « Nonlinear local behaviours and numerical modeling of damping in civil engineering structures in dynamic », Université Paris-Saclay, 2017.
- [4] Ray W. Clough et J. Penzien « Dynamics of structures », Third edition, *Computers & Structures, Inc*, 2003.
- [5] « Guide de l'ASN n°2/01, 05/2006. Prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil d'installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme des déchets radioactifs. »
- [6] A. Hillerborg, M. Mod'eer, et P.-E. Petersson, « Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements », *Cement and concrete research*, vol. 6, n° 6, p. 773-781, 1976.
- [7] F. Fleury, « Prédiction du comportement des structures en béton armé sous sollicitations sismiques: proposition d'un modèle global de noeud d'ossature intégrant le comportement de la liaison acier/béton », PhD Thesis, Clermont-Ferrand 2, 1996.
- [8] B. Richard et F. Ragueneau, « Continuum damage mechanics based model for quasi brittle materials subjected to cyclic loadings: Formulation, numerical implementation and applications », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 98, n° 1, p. 383-406, 2013, doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.11.013.
- [9] M. Vassaux, B. Richard, F. Ragueneau, et A. Millard, « Regularised crack behaviour effects on continuum modelling of quasi-brittle materials under cyclic loading », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 149, p. 18-36, nov. 2015, doi: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.040.
- [10] O. Dahlblom et N. S. Ottosen, « Smeared crack analysis using generalized fictitious crack model », *Journal of engineering mechanics*, vol. 116, n° 1, p. 55-76, 1990.
- [11] I. Gkimousis et V. Koumousis, « Modeling RC column flexural failure modes under intensive seismic loading », *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 47, n° 9, p. 1942-1962, 2018.
- [12] F. Voldoire, « Modélisation de l'amortissement dans les structures en béton armé sous séisme », 10^{ème} Colloque National AFPS 2019 – Strasbourg.