



**HAL**  
open science

# Recommandations pour l'évaluation des spectres de plancher des structures en béton armé par des méthodes de modélisation avancées “ Best-Estimate ”

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

## ► To cite this version:

Nicolas Ile, François Voltaire, David Bouhjiti, Estelle Herve-Secourgeon, Ibrahim Bitar, et al.. Recommandations pour l'évaluation des spectres de plancher des structures en béton armé par des méthodes de modélisation avancées “ Best-Estimate ”. 11ème Colloque National de l'AFPS, Nov 2023, Le Gosier (Guadeloupe), France. hal-04455107

**HAL Id: hal-04455107**

**<https://hal.science/hal-04455107>**

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

# Recommandations pour l'évaluation des spectres de plancher des structures en béton armé par des méthodes de modélisation avancées « Best-Estimate »

Nicolas ILE<sup>1</sup>, François VOLDOIRE<sup>2</sup>, David BOUHJITI<sup>3\*</sup>, Estelle HERVE-SECOURGEON<sup>2</sup>, Ibrahim BITAR<sup>3</sup>, Marie-Cécile ROBIN-BOUDAUD<sup>4</sup>, Benjamin RICHARD<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CEA/DES/ISAS/DM2S/SEMT/EMSI, Université Paris-Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup> EDF R&D, F-91120 PALAISEAU, France

<sup>3</sup> IRSN/PSN-EXP/SES/LMAPS, Fontenay-aux-Roses, France

<sup>4</sup> FRAMATOME-DTI, France

\*Corresponding author: [david.bouhjiti@irsn.fr](mailto:david.bouhjiti@irsn.fr)

---

**Résumé.** Afin de mieux répondre aux enjeux de la R&D appliquée au nucléaire civil, les quatre partenaires EDF, CEA, FRAMATOME et IRSN travaillent de façon collaborative et continue sur la levée des verrous scientifiques et techniques permettant d'améliorer les connaissances et de maîtriser les risques associés à l'exploitation des installations nucléaires sur le territoire français. Parmi les nombreux axes de recherche en cours, il y a la thématique de l'évaluation du comportement structural des bâtiments soumis à des niveaux sismiques dépassant celui du dimensionnement (Beyond Design) ; particulièrement l'évaluation des spectres transférés de planchers représentatifs (approche Best Estimate) via des méthodes de modélisation transitoire non linéaire. Dans ce cadre, les partenaires ont réalisé une analyse exhaustive des références réglementaires et techniques couramment utilisées dans le but de modéliser le comportement ou d'évaluer la robustesse des installations nucléaires en béton armé sous sollicitations sismiques. Ils ont également mené des études comparatives des effets des lois de comportement cycliques et de l'amortissement sur les spectres de plancher. Ce papier présente la synthèse de ces travaux à date sous la forme de recommandations communes complémentaires à celles souvent retenues pour des analyses conventionnelles linéaires équivalentes.

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

**Abstract.** In order to better address R&D issues applied to the civil nuclear industry, the four partners EDF, CEA, FRAMATOME and IRSN are working in a collaborative and permanent manner to overcome the scientific and technical barriers allowing to enhance knowledge and to control the risks associated with the operation of nuclear facilities on French territory. Among the many research areas underway, there is the evaluation of the structural behavior of buildings subjected to seismic levels beyond the design stage; more precisely, the evaluation of a representative transferred spectra via non-linear transient analysis methods (Best-estimate). In this context, the partners carried out an exhaustive analysis of the regulatory and technical references commonly used to model the behavior or evaluate the robustness of reinforced concrete nuclear installations under seismic loads. They also conducted comparative studies of the effects of cyclic behavior laws and damping modeling on floor spectra. This paper presents the synthesis of this work up to date in the form of common recommendations complementary to those usually adopted for conventional equivalent linear analyses.

**Keywords:** Transferred spectra; seismic loads; transient nonlinear; damping.

---

## 1. INTRODUCTION

Dans un objectif d'amélioration continue des connaissances et des pratiques de l'ingénierie dans le domaine nucléaire civil, également de maîtrise du risque lié à l'exploitation des installations nucléaires existantes ou nouvelles, les quatre partenaires que sont Électricité de France (EDF), le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA), FRAMATOME et l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) mènent conjointement des activités de recherche et développement pluriannuelles et pluridisciplinaires. Ces activités traitent des questions complexes et cruciales pour mener à bien le processus d'évaluation du risque sismique et de quantification des incertitudes associées. Une des questions, traitée dans le présent papier, concerne le comportement structural des bâtiments complexes en béton armé lorsqu'ils sont soumis à des niveaux sismiques dépassant celui de dimensionnement. Dans ce cadre, le présent travail s'intéresse particulièrement à l'évaluation des spectres transférés de plancher via des approches de modélisation transitoire non linéaire et aux effets de la modélisation de l'amortissement sur cette grandeur [1].

Notons que, dans les références réglementaires et techniques couramment utilisées dans le but de modéliser le comportement ou d'évaluer la robustesse des installations nucléaires en béton armé sous sollicitations sismiques [2][3][4][5][6], nous constatons une certaine cohérence des recommandations et exigences formulées. Ces dernières sont bien souvent conçues pour des analyses conventionnelles linéaires équivalentes. Les analyses non linéaires ne sont que très succinctement évoquées, en partie parce que les méthodologies afférentes sont continuellement améliorées, de plus en plus complexes et validées sur la base de références expérimentales à échelles intermédiaires (éprouvette, éléments de structure, maquettes) limitant ainsi leur adoption par les organismes certificateurs pour des structures à échelle réelle.

Ces référentiels donnent des éléments pour la comparaison entre analyses conventionnelles (linéaires équivalentes) et analyses avancées (non linéaires), ainsi que des critères de transition entre régimes de réponse des structures à considérer. Comme ces conclusions résultent d'une expérience des praticiens sur plusieurs décennies, il est légitime de les prendre comme points de repère. Cependant, il est tout autant nécessaire de les compléter par des dispositions et des recommandations ayant pour finalité générale de guider le praticien dans la mise en œuvre d'une démarche de modélisation et de production de résultats de simulation reposant sur des méthodes avancées (non linéaires) visant à évaluer avec réalisme (« Best-Estimate ») les marges de sûreté. Par la suite, les recommandations proposées couvrent le domaine d'utilisation des analyses transitoires non linéaires correspondant au cas de « non-linéarités faibles à modérées » ; c'est-à-dire bien avant la ruine de la structure dans la gamme d'états limites notés « LS-C » et « LS-B » selon [4]. Elles concernent des objectifs d'étude de type analyse des spectres de plancher pour la vérification des équipements et pour la vérification des conditions de supportage et s'inscrivent dans un cadre d'études de « Beyond Design ». Elles sont présentées selon trois catégories<sup>1</sup> :

- (a) déroulement d'une étude (R1) ;
- (b) choix et paramétrage de la modélisation aux éléments finis de la structure (R2) ;
- (c) choix et paramétrage du ou des lois de comportement non linéaires (R3).

---

<sup>1</sup> Notons que, comme dans tout référentiel technique ou guide réglementaire, il est possible de mettre en œuvre une démarche de modélisation plus spécifique à l'application d'intérêt, relativement avancée ou complexe, à condition d'y apporter les éléments de justification scientifiques nécessaires ; particulièrement en ayant recours à des analyses comparatives avec des approches davantage courantes.

## **2. DEROULEMENT GENERALE D'UNE ETUDE (R1)**

Ci-après une série de recommandations permettant le bon déroulement d'une étude donnée selon une approche transitoire non linéaire.

### **R1.1 – Mise en place d'une approche graduée**

Nous inscrivons la démarche de simulation non linéaire, si elle est nécessaire, à partir d'une approche conventionnelle, dans le cadre d'une approche graduée, dans le but d'assurer une bonne cohérence des hypothèses de modélisation, et in fine de faciliter les comparaisons sur les grandeurs d'intérêt et l'effet sur les marges de sûreté.

### **R1.2 Vérification des dispositions constructives**

Cela vise à vérifier systématiquement la bonne prise en compte des dispositions constructives a minima selon le référentiel de conception lors de la modélisation (justification des simplifications géométriques, implications de telles simplifications sur le comportement attendu et sur les critères de vérification).

### **R1.3 Vérification de la mise en donnée du modèle aux éléments finis**

Cela vise à vérifier la bonne saisie des données d'entrée (épaisseurs, ferrailage, propriétés matériaux, etc.) via des figures illustratives des champs caractéristiques d'intérêt, des calculs élémentaires pour démontrer la bonne prise en compte dans le modèle aux éléments finis du bâtiment des conditions aux limites, des calculs statiques sous charges permanentes et d'exploitation soumises à la pesanteur, des analyses modales sur base encastree puis des analyses modales avec prise en compte de l'interaction sol structure, des analyses sous chargements de type accélération d'entraînement de translation rigide unitaire dans les 3 directions, etc.

### **R1.4 Analyse transitoire linéaire puis linéaire équivalente**

Ces analyses, conventionnelles, visent à obtenir les valeurs des grandeurs d'intérêt, à identifier les zones sensibles de la structure et à justifier le recours à une modélisation non linéaire. Le nombre d'itérations, les coefficients d'abattement de module, une modification des conditions de liaison, le niveau d'amortissement doivent être choisis de telle sorte à permettre une comparaison pertinente avec les analyses transitoires non linéaires visées [2]. Le bilan d'énergie (en particulier celle dissipée par amortissement visqueux) au cours du transitoire constitue une des grandeurs d'intérêt dans cette finalité.

### **R1.5 Analyse transitoire non linéaire**

Le calcul transitoire non linéaire doit être justifié sur la base des résultats obtenus selon R1.4 et doit tenir compte de l'état initial évalué selon R1.3. Notons que le bilan d'énergie d'un calcul transitoire non linéaire est nécessaire afin d'évaluer la dissipation effective dans le modèle de comportement non linéaire, celle dissipée par amortissement visqueux, et de porter un regard critique sur la cohérence des résultats obtenus avec l'analyse conventionnelle (en termes d'amortissement attendu entre autres). La validation des résultats obtenus doit être basée dans un premier temps sur l'analyse du comportement global de la structure (déplacements vs. efforts, chute de fréquences, carte iso valeurs de raideurs effectives, etc.). Ensuite, vis-à-vis des spectres transférés de plancher, les spectres d'oscillateur en pseudo accélération absolue pour un ou plusieurs amortissements, permettent de vérifier/dimensionner une structure secondaire fixée à la structure primaire. Une analyse comparative des spectres obtenus via l'analyse transitoire linéaire équivalente et l'analyse transitoire non linéaire permet

de s'assurer de la cohérence d'ensemble, le cas échéant de décider d'une évolution des hypothèses de modélisation, cf. R2.

### **3. CHOIX ET PARAMETRAGE DE LA MODELISATION AUX ELEMENTS FINIS DE LA STRUCTURE (R2)**

Les structures GC, particulièrement nucléaires, sont composées de voiles, de planchers, de poutres et de poteaux avec de nombreuses zones de jonctions. La forte hyperstaticité de ce type de structures, associée à une irrégularité souvent importante, tant en plan qu'en élévation, complique la prévision de la répartition des forces sismiques entre les différents systèmes de contreventement, ainsi que leur redistribution selon la ductilité disponible, qui influe sur le transfert des spectres, donc sur les marges de sûreté. Les recommandations ci-après visent à s'assurer de la bonne conception des modèles aux éléments finis par rapport aux phénomènes dynamiques considérés et aux grandeurs d'intérêt visés.

#### **R2.1 Adaptation de l'échelle de modélisation**

Dans la pratique, la modélisation du comportement des structures peut être faite à trois niveaux : l'échelle locale (via des éléments massifs ou volumiques), l'échelle semi-globale (vis des éléments plaques/coques multicouches ou des éléments linéiques multifibres), l'échelle globale (via des éléments plaques/coques généralisés ou fibres généralisés). Le choix de l'échelle de modélisation est guidé par les caractéristiques des composants structurels représentés. Elle doit être adaptée à la longueur d'ondes des phénomènes représentés. La fréquence de coupure et la taille de l'élément fini peuvent être établies après la réalisation préalable d'une analyse modale de la structure. Notons que les calculs non linéaires sont plus sensibles à des défauts de qualité de maillage ; des techniques de régularisation (énergétique [7] ou autre) existent afin de limiter la dépendance au maillage. Il convient donc de démontrer la convergence de la solution en fonction de la discrétisation spatiale ; ce qui permet de justifier la discrétisation retenue.

#### **R2.2 Choix des lois de comportement non linéaires**

La modélisation du comportement des matériaux doit dépendre de la phénoménologie associée au niveau de sollicitation considéré ; en particulier l'écart avec le niveau de sollicitation pris en compte lors de la conception de la structure et donc le niveau de dégradation attendu et du niveau de précision de la réponse recherchée. Ainsi, la loi rhéologique du modèle mis en œuvre au sein d'une formulation discrétisée est l'une des composantes clés impactant les résultats. L'objectif étant de prévoir le comportement d'un bâtiment complet sous séisme avec un niveau de confiance acceptable, avec une formulation simple et robuste, tout en limitant le temps de calcul. Pour les lois cycliques du béton, il faudra prendre en compte (autant que faire se peut) la plupart des phénomènes suivants : dégradation du béton se traduisant par une diminution de la pente des courbes de recharge, apparition de déformations irréversibles, dissipation d'énergie par hystérésis, dissymétrie des seuils en traction et compression, effet unilatéral lié à la re fermeture de fissures, la dilatance en compression, les effets du confinement sur la résistance à la traction. Pour les lois d'acier, et compte tenu des niveaux limités des déformations dans les aciers, la plupart du temps, l'utilisation du modèle de Von Mises avec écrouissage cinématique suffirait. Une représentation plus fine de l'écrouissage non linéaire des aciers sous chargement cyclique pourrait être adoptée si le besoin est justifié (phénomène de fatigue, effets de la température ou autres).

## R2.3 Prise en compte de l'amortissement

Dans le contexte d'une analyse sismique transitoire non linéaire, il faut distinguer les phénomènes dissipatifs explicitement modélisés notamment via les lois constitutives ou encore les conditions aux limites (décollement, glissement/frottement, etc.), des sources d'amortissement associés aux phénomènes dissipatifs non modélisés explicitement (souvent il s'agit de l'hystérésis du béton non fissuré, de la fissuration unilatérale, du frottement en cisaillement entre lèvres des fissures et de la liaison acier/béton). Ces derniers font souvent l'objet de la définition d'un amortissement forfaitaire additionnel. Quelle que soit la méthode retenue pour le représenter (méthode de Rayleigh, méthode de Wilson-Penzien ou autres), il faudra s'assurer de la continuité et de la cohérence avec la dissipation d'énergie observée dans un calcul linéaire équivalent conventionnel. Si le modèle de comportement irréversible adopté avec les paramètres choisis, ne permet pas de produire cette cohérence alors il est proposé (a) d'effectuer une analyse de sensibilité afin d'apporter les éléments d'appréciation sur les résultats obtenus avec le modèle de comportement irréversible adopté avec les paramètres choisis ; (b) d'adopter si nécessaire un taux d'amortissement visqueux réduit, éventuellement en distinguant les zones restant en régime linéaire, cf. [2], de celles traitées en non linéaire, qui produise un bilan d'énergie dissipée en fin de transitoire globalement (amortissement visqueux et loi de comportement irréversible) du même ordre que celui obtenu dans l'analyse conventionnelle linéaire équivalente.

## R2.4 Schémas numériques amortissants

Si la modélisation retenue recourt à un schéma d'intégration temporelle dissipatif, par exemple HHT, alors il faut justifier le choix des paramètres par comparaison de l'énergie dissipée par le schéma avec les énergies dissipées par les différents mécanismes modélisés. La dissipation apportée par le schéma d'intégration temporelle doit intervenir essentiellement au-delà de la fréquence de coupure.

## 4. CHOIX ET PARAMETRAGE DES MODELES DE COMPORTEMENT NON LINEAIRE (R3)

Les paramètres des modèles constitutifs sont identifiés à partir des caractéristiques matériaux classiques. Ceci inclut les paramètres élastiques, comme le module élastique initial du béton et de l'acier ainsi que le coefficient de Poisson ; viennent ensuite les paramètres non linéaires comme les résistances maximales qui définissent le comportement en traction et en compression des deux matériaux, l'énergie de fissuration, l'énergie de rupture en compression pour le béton, la pente d'écrouissage pour les aciers et les paramètres qui définissent le comportement cyclique. La sélection des valeurs des caractéristiques matérielles doit être faite en fonction des objectifs de l'étude ; l'utilisateur peut adopter en justifiant soit les valeurs moyennes soit les valeurs caractéristiques de ces paramètres estimés ou fournis par les codes ou mesurés (à l'échelle de l'éprouvette ou à la l'échelle de la structure).

### R3.1 Vérification et Validation des modèles non linéaires

Les calculs à l'échelle structurale sont souvent réalisés de façon purement prévisionnelle sans possibilité de confronter les résultats numériques à des mesures expérimentales. Ainsi, pour limiter le risque de non-représentativité à l'échelle visée ou du moins maîtriser les limites du modèle non linéaire et les incertitudes associées, ce dernier doit faire l'objet d'une démarche de vérification et de validation multi-échelle bien définie [8] en comparant les résultats des modèles à des résultats expérimentaux issus de la littérature pour des chargements de même type (statique, poussée progressive, séisme) et des éléments de structures représentatifs. Ainsi, il faut privilégier des formulations qui bénéficient d'un dossier de vérification et de

validation (V&V) fourni et auditable, en particulier basé sur des campagnes expérimentales accompagnées d'études d'interprétation contradictoire, en particulier leur réponse unidirectionnelle sous différents types de chargement, et le bilan d'énergie correspondant.

### **R3.2 Choix de modèles non linéaires représentatifs des phénomènes d'intérêt**

A partir des analyses élastiques linéaires, il faut identifier la phénoménologie et le domaine de validité nécessaires pour les éléments structurels sur lesquels une modélisation non linéaire est jugée nécessaire pour choisir le modèle de comportement le plus adapté en conséquence. Dans ce sens, il faut prévoir des études de sensibilité à la variation des paramètres des modèles de comportement et aux choix de modélisation ; on utilisera les mêmes modalités choisies de modélisation des sections de béton armé que dans l'étude en vue en se basant sur des éléments de structures représentatifs du bâtiment étudié.

### **R3.3 Choix des paramètres en entrée des modèles**

Dans une démarche Best-estimate, il est recommandé d'utiliser les valeurs moyennes, cf. [3], des caractéristiques des matériaux (limite en traction, énergie de fissuration) et des sections géométriques et comportements. Cependant, compte tenu de la variabilité de ces paramètres et des incertitudes associées à la physique de la phénoménologie décrite, il semble raisonnable de prévoir des études de sensibilité couvrant ces incertitudes ; nous parlons alors de démarche « Best-Estimate Plus Uncertainty ».

## **5. CONCLUSIONS**

Ce papier présente un ensemble de recommandations sur la base des travaux menés par les partenaires EDF, CEA, FRAMATOME et IRSN de façon collaborative et continue sur la thématique de l'évaluation des spectres transférés de planchers représentatifs, concernant les installations nucléaires existantes ou nouvelles. Ces recommandations couvrent les trois points suivants : le déroulement général d'une étude d'évaluation de spectres transférés, le choix et le paramétrage de la modélisation aux éléments finis de la structure, le choix et le paramétrage des lois de comportement non linéaires ainsi que l'amortissement, en maîtrisant les conséquences des incertitudes. Elles sont complémentaires à celles souvent retenues pour des analyses conventionnelles linéaires équivalentes et visent à guider le praticien dans la mise en œuvre d'une démarche de modélisation et de production de résultats de simulation reposant sur des méthodes avancées (non linéaires) visant à prévoir avec réalisme (« Best-Estimate ») la réponse des structures, dans le cadre d'une approche graduée, permettant la comparaison avec les approches conventionnelles.

## **6. REFERENCES**

- [1] N. Ile, I. Bitar, F. Voldoire, E. Hervé-Secourgeon, D. Bouhjiti, B. Richard, M.-C. Robin-Boudaoud. Etude comparative des effets des lois de comportement cycliques et de l'amortissement sur les spectres de plancher. 11<sup>ème</sup> Colloque National de l'AFPS, Guadeloupe, Novembre 2023.
- [2] 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.
- [3] Eurocode 2, Calcul des structures en béton, NF EN 1992-1-1, 10/2005
- [4] ASCE/SEI Standard 43-05. Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities. 2005.
- [5] NUREG/CR-6011, EQE, March 1993. Review of Structure Damping Values for Elastic Seismic Analysis of Nuclear Power Plants.

- [6] NUREG/CR-6919, BNL-NUREG-77174-2006, November 2006. Recommendations for Revision of Seismic Damping Values in Regulatory Guide 1.61.
- [7] A. Hillerborg, M. Moéer, P.E. Petersson. Analysis of crack growth formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp 773-782, 1976.
- [8] Guide de l'ASN n°28, 07/2017. Qualification des outils de calcul scientifique utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire – 1ère barrière.