



HAL
open science

Caractérisation expérimentale et modélisation numérique des jonctions voile-plancher dans les structures en béton armé sous séisme

Estelle Hervé-Secourgeon, François Voldoire, Fabrice Gatuingt, Cécile Oliver
Oliver-Leblond, Guillaume Herve-Secourgeon, Florian Escoffier, Adrien
Guilloux, Thierry Chaudat, Fan Wang

► To cite this version:

Estelle Hervé-Secourgeon, François Voldoire, Fabrice Gatuingt, Cécile Oliver Oliver-Leblond, Guillaume Herve-Secourgeon, et al.. Caractérisation expérimentale et modélisation numérique des jonctions voile-plancher dans les structures en béton armé sous séisme. 10eme Colloque National AFPS, Sep 2019, Strasbourg, France. hal-02436674

HAL Id: hal-02436674

<https://hal.science/hal-02436674>

Submitted on 13 Jan 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.

Caractérisation expérimentale et modélisation numérique des jonctions voile-plancher dans les structures en béton armé sous séisme

Estelle Hervé-Secourgeon*,** — François Voldoire* — Fabrice Gatuingt** — Cécile Oliver-Leblond** — Guillaume Hervé-Secourgeon* — Florian Escoffier*** — Adrien Guilloux*** — Thierry Chaudat**** — Fan Wang****

* *Électricité de France, R&D Division, SEISM Institute, IMSIA UMR EDF-CNRS-CEA-ENSTA 9219, 91120 Palaiseau, France - {estelle.herve-secourgeon, francois.voldoire}@edf.fr*

** *LMT, ENS Paris-Saclay, CNRS, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France*

*** *Électricité de France, R&D Division, SEISM Institute, 91120 Palaiseau, France*

**** *CEA, DEN/DM2S/SEMT/EMSI, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France*

RÉSUMÉ. *La contribution des jonctions voile-plancher au comportement et à la résistance des structures nucléaires en béton armé est étudiée. Un programme expérimental a été défini conjointement par EDF et le CEA pour améliorer nos connaissances du comportement de la jonction. Comme cela a déjà été proposé dans la littérature pour des joints poteaux-poutres, notre objectif est de proposer un modèle de la jonction susceptible d'être intégré à un modèle plaques ou coques du bâtiment pour un calcul éléments finis, et capable de représenter la contribution spécifique de la jonction en termes de raideur, de redistribution d'efforts et de résistance. La campagne expérimentale inclut deux fois deux maquettes en béton armé, soumises à des chargements cycliques quasi-statiques et dynamiques au moyen de la table vibrante Azalée du CEA, à la fois en flexion hors plan et en cisaillement dans le plan du plancher. Les contributions respectives des éléments structurels (voile, plancher) et de la jonction elle-même à la dégradation de raideur et à la réponse dynamique de la structure sont évaluées. Nous présentons ici les premières étapes de la définition du modèle numérique de jonction : cinématique, loi de comportement, selon les observations expérimentales physiques et numériques.*

ABSTRACT. *The contribution of Reinforced Concrete (RC) wall-slab junctions to both dynamical behaviour and strength of nuclear buildings subjected to seismic loadings is investigated. An experimental program has been defined jointly by EDF and CEA, in order to improve the knowledge of the junctions' behaviour. As it has already been proposed in the literature for beam-column joints, our aim is to define a constitutive model of reinforced concrete wall-slab junctions fit to be integrated in a structural FE plate or shell model of a RC building. The objective is to represent the specific contribution of the junction to stiffness, forces redistribution and strength, under representative in-plane and out-of-plane seismic loading components. In particular, we aim to evaluate the available margins in terms of in-plane shear strength, and of bending moments redistribution, at the junction, exerted from the slab. The experimental campaign, carried out on a series of 2 times 2 representative RC mockups, includes alternate static loading conditions and increasing seismic loading on Azalée shaking table, at CEA, up to high intensity ground motions. We discriminate the respective contributions of the slabs and the wall on one hand and of the junction on the other hand on the stiffness degradation and the dynamical responses. We present the first steps achieved in the definition of the numerical model: kinematics, constitutive relation, by reference to experimental observations.*

MOTS-CLÉS : *Analyse sismique, Essais, Maquette, Spectres de plancher, Robustesse, Marges sismiques, Best-estimate, Jonction voile-plancher, Béton armé, Comportement non-linéaire, Structures nucléaires, Sécurité.*

KEYWORDS: *Seismic analysis, Experimental campaign, Mock-up, Floor response spectra, Robustness, Seismic Margin, Best-estimate, Wall-slab junction, Reinforced concrete, Nonlinear structural behaviour, Nuclear Facilities, Safety.*

1 Introduction

Une campagne d'essais commune CEA et EDF a été définie dans le but d'améliorer la connaissance de la contribution des jonctions voile-plancher au comportement et à la résistance sous séisme des bâtiments nucléaires. Cette campagne, comportant des essais à la fois sous sollicitation hors plan du plancher et dans le plan du plancher, en statique et en dynamique, a commencé en 2018 et doit s'achever en 2019. Les enjeux de cette campagne d'essais sont de comprendre les phénomènes mécaniques en jeu dans la jonction au travers des cinématiques et des modes de dégradation et également de servir de base de validation expérimentale aux modèles proposés. La plage de sollicitation étant large, il est attendu de cerner le comportement dans le domaine élastique et jusqu'à un niveau de non linéarité modéré.

Le développement d'un modèle de jonction répond aux objectifs suivants :

- Dans le cadre des calculs de la tenue au séisme des bâtiments, améliorer l'évaluation du ferrailage nécessaire dans les voiles et planchers à proximité immédiate des jonctions et dans un second temps quantifier les marges disponibles par rapport à la ruine et de quantifier la ductilité. On cherche à mieux représenter la mécanique de la jonction, dans un cadre élastique, pour intrinsèquement mieux représenter les distributions des moments et, dans un cadre réglementaire, proposer une alternative aux méthodes d'écrêtage des moments au niveau des lignes d'appui qui sont peu pratiquées en conception nucléaire compte tenu de la taille des modèles et de la complexité des géométries. On souhaite aussi évaluer la redistribution des efforts suite à une première dégradation, et vérifier, selon les dispositions constructives, la capacité résistante de la jonction. Au final il est attendu d'évaluer le ferrailage de manière plus réaliste.
- Dans le cadre de la tenue des équipements au séisme, intégrer l'impact du comportement des jonctions voile-plancher sur les spectres de planchers. L'intégration dans un modèle non linéaire des modes de dégradation de la jonction et de la dissipation d'énergie associée permettra de se donner la possibilité de mieux évaluer les sollicitations transmises aux planchers, et *in fine* aux équipements qu'ils supportent.

Le développement du modèle élastique de jonction, répondant en particulier au premier objectif cité, est présenté ici. Les essais expérimentaux ont été complétés d'un plan d'expérience numérique assez large permettant de simplifier les objets d'étude en maîtrisant mieux les conditions aux limites. Ils ont permis de mettre en exergue les modes de déformation de la jonction pour en proposer un modèle élastique homogénéisé, validé par des essais numériques. Afin de quantifier les apports du modèle proposé au titre du dimensionnement, un modèle représentatif de cas industriel a été étudié pour une combinaison d'actions accidentelle sismique.

2 Développement d'un modèle élastique de jonction voile-plancher

2.1 Principe du modèle

Pour définir le modèle élastique de jonction, on s'intéresse à la cinématique et à la rigidité de la zone de jonction. Un modèle volumique avec une discrétisation suffisante est pris comme référence, car il doit permettre de représenter pertinemment le comportement de la zone de jonction. Néanmoins il est incompatible avec la modélisation d'un bâtiment nucléaire complet en termes de nombre de degrés de liberté. Le modèle plaque usuellement utilisé en ingénierie, quant à lui, présente certaines limites associées au fait que les éléments de structure (voile, plancher) sont supposés être prolongés jusqu'à l'axe de la jonction par des éléments plaques ou coques d'une souplesse égale à celle du plancher, qui sont de plus généralement chargées de façon identique au plancher (masse, charges réparties). Le modèle proposé doit être compatible avec l'usage des éléments plaques ou coques pour la représentation des éléments de structure tels que voiles ou planchers, mais permettre de traduire plus fidèlement la cinématique et la raideur de la zone de jonction. On propose donc d'introduire un élément de

jonction spécifique, qui représente le comportement homogénéisé de la jonction, dont l’emprise va du nu des planchers au nu des voiles connectés.

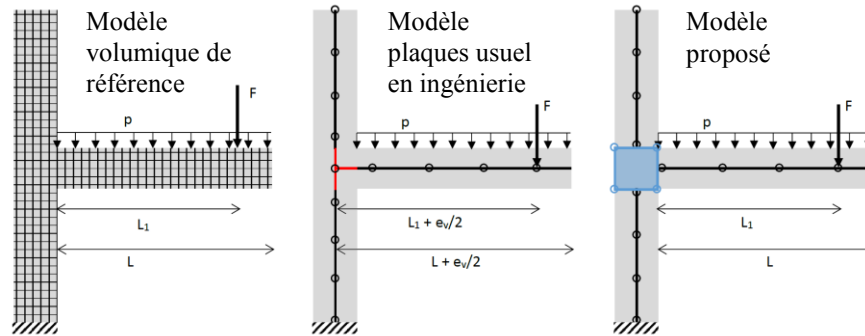


Figure 1. Comparaison de 3 types de modélisation d’une zone de structure incluant une jonction voile-plancher.

2.2 Description des modes de déformation

Pour étudier de façon plus complète la cinématique de la jonction élastique, on considère un modèle de référence volumique représentant la jonction ainsi qu’une partie des voiles et planchers s’y connectant. Des déplacements hors plan du plancher et des voiles et dans le plan du plancher sont imposés successivement, pour évaluer les modes de déformation de la jonction.

On retrouve dans une section normale à l’axe de la jonction, sous sollicitations hors plan du plancher, les modes de déformation principaux suivants, classés par ordre de grandeur des déformations observées sur les cas testés :

Mode	Cisaillement (1)	Flexion horizontale et verticale (2 et 3)	Dilatation horizontale et verticale (4 et 5)
Schéma			
Exemple de déformée du modèle de référence			

Tableau 1. Modes de déformation de la jonction, dans un plan perpendiculaire à son axe

Ces modes de déformation sont complétés dans le plan perpendiculaire à l’axe de la jonction des 3 modes rigides : 2 modes de translation ainsi que la rotation autour de l’axe.

A l’exception des modes de déformation en traction / compression, qui jouent finalement très peu sur les déformations de la structure, les modes de déformation correspondent à ceux d’un élément fini rectangulaire d’ordre 1, avec les faces de la jonction qui restent globalement planes. Un constat similaire est fait en 3 dimensions.

On se propose donc de modéliser la jonction à l'échelle du bâtiment par un élément fini de type volumique, d'ordre 1, représentatif du comportement homogénéisé de la jonction sur son emprise, du nu des planchers au nu des voiles connectés, compatible avec l'écriture de relations cinématiques avec des éléments finis de plaques usuels de code_aster.

2.3 Enseignements de la campagne d'essais EDF - CEA

Dans le cadre de l'institut tripartite CEA-EDF-Framatome, EDF et le CEA réalisent une campagne expérimentale visant à améliorer les connaissances du comportement des jonctions voile-plancher sous sollicitations hors plan du plancher et dans le plan du plancher, en statique et en dynamique. Pour cela, 4 maquettes de jonction en béton armé à l'échelle $\frac{1}{4}$ ont été conçues et sont testées :

- Deux maquettes sont testées sous des sollicitations hors plan du plancher (flexion et cisaillement hors plan), l'une en quasi-statique, l'autre en dynamique (avec les masses additionnelles nécessaires).
- Deux maquettes sont testées sous des sollicitations dans le plan du plancher (cisaillement membranaire), l'une en quasi-statique, l'autre en dynamique (avec les masses additionnelles nécessaires).

La figure suivante décrit la géométrie retenue pour les maquettes et la direction de chargement principale.

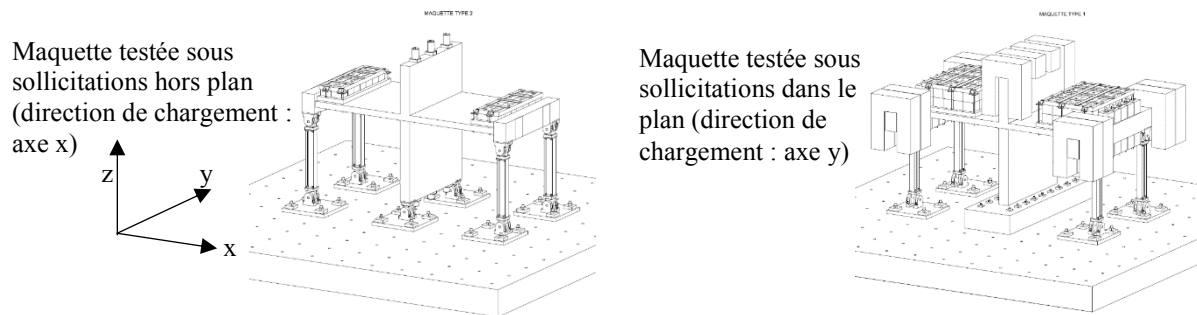


Figure 2. Géométrie des maquettes testées au CEA/EMSI

Les chargements imposés sont les suivants : pour les essais quasi-statiques, on impose des chargements cycliques d'intensité croissante par le biais de vérins sur la ou les poutres de rives, dans la direction choisie ; pour les essais dynamiques, on impose une sollicitation dynamique représentative d'un chargement sismique par le biais de la table vibrante Azalée du CEA, sur laquelle les maquettes sont fixées. Le chargement dynamique principal est appliqué dans les directions x et z pour la maquette testée sous sollicitations hors plan, et dans la direction y pour la maquette testée sous sollicitations dans le plan du plancher. Le chargement dynamique est défini à partir d'un spectre de type EUR, large bande, également mis à l'échelle $\frac{1}{4}$ (loi de similitude de Cauchy-Froude), ce qui amène un décalage fréquentiel d'un facteur 2. Le spectre de dimensionnement est calé à 0,25g.

2.3.1 Focus sur les essais de flexion statique et leur interprétation

Les essais quasi-statiques sous sollicitations hors plan, que l'on nommera « essais de flexion statique », ont été menés sur le plancher renforcé du CEA/EMSI en avril 2018. Ces essais sont encore en cours d'interprétation, néanmoins les premières analyses des déplacements, rotations, et déformations de la maquette au cours des essais montrent un cinématique similaire à celle obtenue sur les simulations numériques élastiques, avec des déformations principalement en distorsion à l'intérieur du volume de jonction, et au-delà du régime élastique des ouvertures de fissure en flexion dans les éléments connectés, à proximité immédiate de la jonction.

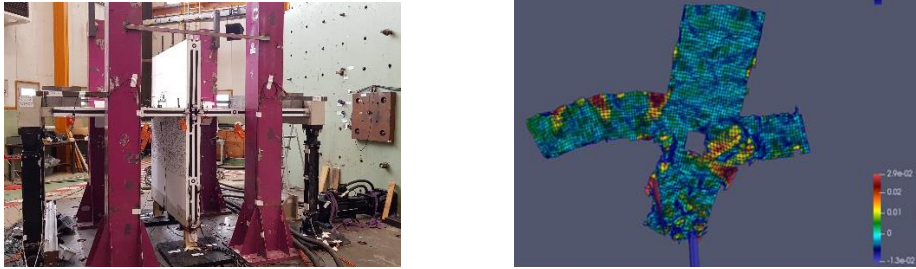


Figure 3. A gauche : vue de la maquette « flexion statique » avant chargement. A droite : vue amplifiée des déformations de la maquette sur le pignon, issue d'un traitement par corrélation d'image, selon (Recchia, 2018)

2.4 Ecriture des relations cinématiques

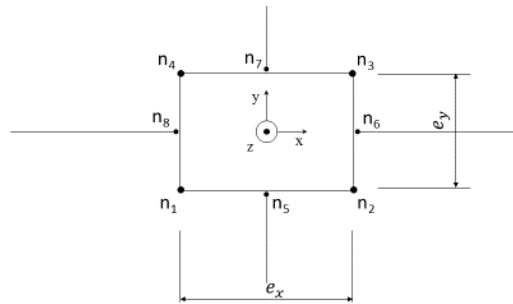


Figure 4. Schéma de la numérotation des nœuds sur une section perpendiculaire à l'axe de la jonction

On note les nœuds dans le repère local de la jonction tels que n_1, n_2, n_3, n_4 , appartiennent à la jonction et n_5, n_7, n_6, n_8 , appartiennent respectivement aux deux voiles et aux deux planchers qui s'y connectent.

On note \underline{u}_{c,n_i} le vecteur déplacement d'un élément de type coque ou plaque d'un voile ou d'un plancher exprimé au nœud n_i considéré. Ce vecteur a 6 composantes : 3 composantes en translation suivant les directions x, y et z et 3 composantes en rotation autour de x, y et de z . On note \underline{u}_{j,n_j} le vecteur déplacement d'un élément de type volume de la jonction exprimé au nœud n considéré.

$$\underline{u}_{c,n_i} = \begin{Bmatrix} x_{n_i} \\ y_{n_i} \\ z_{n_i} \\ r_{xn_i} \\ r_{yn_i} \\ r_{zn_i} \end{Bmatrix} \text{ et } \underline{u}_{j,n_j} = \begin{Bmatrix} x_{n_j} \\ y_{n_j} \\ z_{n_j} \end{Bmatrix} \quad [1]$$

On considère que les translations sont satisfaites en moyenne par rapport aux déplacements de la face de la jonction adjacente. On considère, sur la base des analyses des déformations dans la jonction et dans son voisinage immédiat, que les faces de la jonction restent planes. Etant en Hypothèse des Petites Perturbations, on estime la rotation par approximation à l'ordre 1 de la tangente de l'angle de la face, hypothèse également consolidée par le profil des champs de déformations membranaires.

Ce qui conduit à écrire, par exemple, pour le nœud de plancher 6 et la jonction :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{n_6} = \frac{x_{n_1} + x_{n_2}}{2} \\ y_{n_6} = \frac{y_{n_1} + y_{n_2}}{2} \\ z_{n_6} = \frac{z_{n_1} + z_{n_2}}{2} \\ r_{x_{n_6}} \text{ et } r_{y_{n_6}} \text{ ne sont pas contraints} \\ r_{z_{n_6}} = \frac{y_{n_2} - y_{n_1}}{e_x} \end{array} \right. \quad [2]$$

Ces relations interviennent pour enrichir la matrice de rigidité globale au travers de multiplicateurs de Lagrange reliant comme exposé en [2] les degrés de liberté des plaques/coques représentant les planchers et voiles aux degrés de liberté des éléments volumiques par le biais de l'opérateur LIAISON_DDL.

3 Essais numériques de validation

De façon à valider le modèle élastique, une comparaison est effectuée avec un modèle de référence, qui est un modèle volumique 3D de l'ensemble de la zone de structure. Un plan d'expérience est mis en place pour évaluer l'influence des paramètres et valider le modèle dans un domaine d'utilisation compatible avec les besoins d'ingénierie usuels. On considère deux types de modélisations pour la zone de jonction : isotrope élastique sans acier et élastique orthotrope en homogénéisant la rigidité intégrant celle du béton et des aciers.

Les paramètres qui sont pris en compte en élasticité isotrope (sans aciers) sont les suivants :

- 9 géométries prenant en compte des épaisseurs de planchers variant de 10 à 60cm, et des épaisseurs de voile variant de 30 à 80cm ;
- 7 modes de chargement unitaires de la jonction.

La portée des éléments connectés, pour être respectivement représentative des cas industriels et satisfaire les hypothèses de la théorie des plaques et coques est au minimum de 3m et 10 fois l'épaisseur de l'élément

Les paramètres pris en compte en élasticité orthotrope englobent deux ratios d'acier variables pour les planchers et voiles variant respectivement dans une plage de 75 à 300kg/m³. Le taux de ferrailage longitudinal du chaînage est également un paramètre variable entre 0,5 et 1% de la section du nœud.



Figure 5. Représentation schématique des 7 modes de chargement unitaires pris en compte

La comparaison entre le modèle hybride et le modèle de référence volumique est faite par comparaison de la raideur macroscopique de l'ensemble de la zone structurale (calcul de la réaction aux points auxquels on impose un déplacement unitaire) et comparaison des déformées en projetant celles-ci sur le maillage du modèle hybride, au niveau du plan médian du modèle. Dans cet article, à des fins de concision, seule est exposée la première comparaison. De façon à évaluer l'apport du modèle proposé, on étudie également la comparaison de la modélisation usuelle en ingénierie, composée entièrement de plaques prolongées jusqu'à l'axe de la jonction, avec la modélisation de référence.

		H1	V2	V3	V4	H5	H6	H7
Modèle hybride VS référence	Médiane	3,8%	-0,5%	1,5%	4,7%	4,6%	0,9%	-1,8%
	Ecart type	2%	1%	1%	2%	2%	0%	2%
Modèle plaque VS référence	Médiane	-4,1%	-0,5%	-10,2%	-6,0%	-3,3%	-2,1%	-1,9%
	Ecart type	4%	1%	10%	9%	4%	2%	2%

Tableau 2. Comparaison des rigidités des zones de jonctions entre les différentes modélisations – les valeurs négatives correspondent à un assouplissement.

En comparaison au modèle 3D de référence, les résultats du modèle de jonction proposé sont en médiane légèrement plus raides mais peu dispersés, car la cinématique est plus contrainte. Néanmoins, dans l'ensemble les résultats sont nettement améliorés par rapport à la modélisation usuelle actuelle (encastrement parfait des plaques prolongées jusqu'à l'axe de la jonction) qui est en médiane plus souple et plus dispersée. Les résultats en flexion marquent la différence la plus significative entre le modèle proposé et la modélisation plaque usuelle. Les résultats sont extrêmement voisins pour le modèle orthotrope, étant donné la faible contribution des aciers à la raideur globale élastique de la structure, qui est de l'ordre de 10^{-2} .

4 Application à un cas industriel

Pour tester l'apport du modèle de jonction élastique sur le dimensionnement au séisme d'un bâtiment nucléaire, un bâtiment-type a été défini, suffisamment simple pour permettre une visualisation du cheminement des efforts suivant les chargements, mais intégrant quelques caractéristiques représentatives des bâtiments nucléaires étudiés, et en particulier : de fortes différences d'épaisseur d'un élément de structure à l'autre, des décalages de files parfois inévitables du fait des contraintes d'installation, un radier particulièrement épais.

4.1 Description du bâtiment et du chargement

Le bâtiment type retenu est un bâtiment de 5 étages, chaque étage étant d'une hauteur moyenne de 5m, avec un radier de 1,5m d'épaisseur et des voiles et planchers d'épaisseur variable suivant les niveaux et les files, comprise entre 0,2 et 0,6m. L'emprise au sol du bâtiment est de 10,6m par 6,6m.

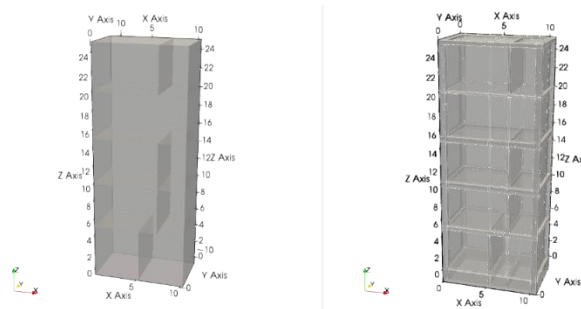


Figure 6. Vues des modélisations – à gauche le modèle plaques (209 772 DDL), à droite le modèle optimisé proposé avec modélisation des jonctions et un radier volumique (259 292 DDL).

Le sol est un sol dur (sol HA au sens des EUR, avec un module de cisaillement $G=6\text{GPa}$, un coefficient de Poisson de 0,3 et une vitesse de propagation des ondes de cisaillement $V_S=1550\text{m/s}$), représenté par un tapis de ressorts de sol en translation dans les 3 directions (opérateur RIGI_PARASOL de code_aster). Un calcul

d'impédance par la méthode de Deleuze a été utilisé pour déterminer les caractéristiques des ressorts, et un calage d'impédance a été effectué.

Les charges permanentes et variables sur les planchers sont comprises entre 10 et 20kN/m². Le séisme est représenté par un spectre EUR sol dur large bande, avec la ZPA (Zero Period Acceleration) calée à 0,4g. Les combinaisons de chargements considérées sont les 24 combinaisons de Newmark correspondant à l'ELU accidentel de séisme. Les charges variables sont pondérées d'un coefficient 0.3 dans ces combinaisons.

4.2 Résultats

4.2.1 Comportement statique et dynamique de la structure

Les déformées sous poids propre des deux modélisations sont comparées. Les ordres de grandeurs sont comparables, la masse étant égale aux jonctions près (comptabilisées deux fois dans le modèle plaque). Néanmoins on constate un léger impact sur la flèche au centre des planchers, supérieure dans le cas du modèle plaque. Cela s'explique par la différence de portée, qui comprend la partie de plancher incluse dans le voile dans le cas du modèle plaques.

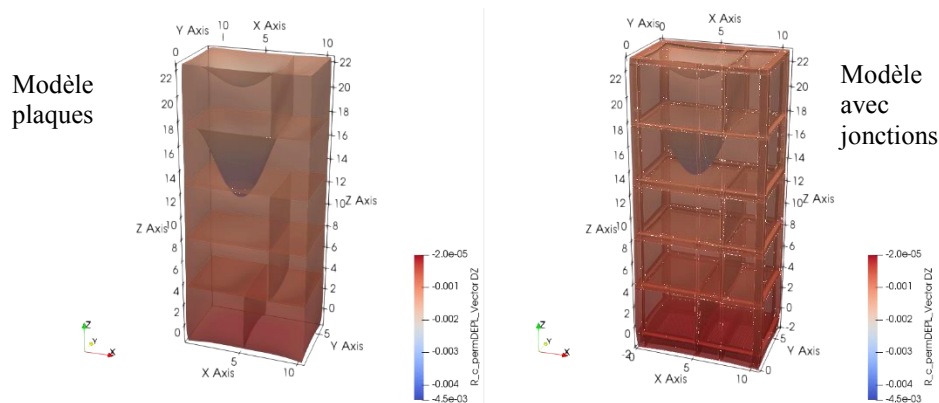


Figure 7. Déformées sous poids propre des deux modèles (amplifiées d'un facteur 2000)

Les modes propres des deux modèles, sur base encastree, sont très proches : quelques dixièmes de Hertz d'écart pour les modes globaux (flexion, torsion) et jusqu'à quelques Hertz d'écart pour les modes locaux (flexion d'un ou plusieurs éléments de structure).

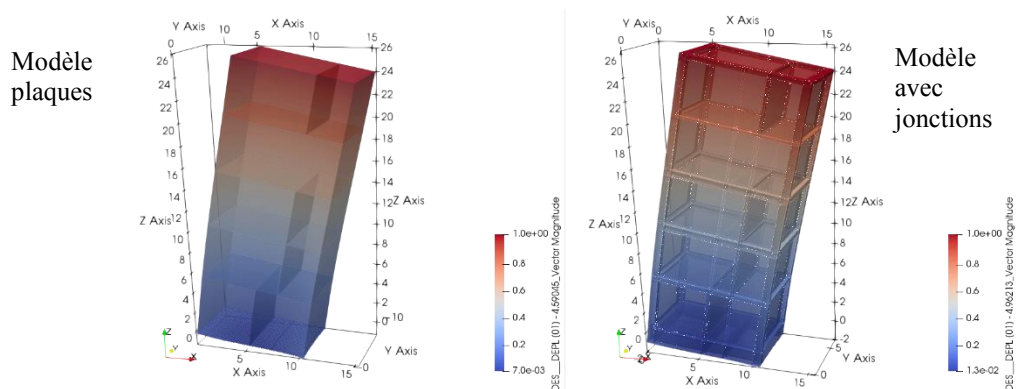


Figure 8. Mode propre principal des deux modèles en flexion en x - 4.59 et 4.96Hz - déformations amplifiées

Avec la prise en compte de la raideur du sol, représentée par les ressorts, l'écart entre les deux modèles est un peu plus important (jusqu'à un Hertz d'écart sur les modes globaux), néanmoins le comportement modal reste relativement similaire entre les deux modèles.

4.2.2 Impact sur l'évaluation du ferrailage nécessaire

La figure ci-dessous présente la demande en ferrailage dans la direction Y (dans la direction verticale pour les voiles, dans la direction de l'axe Y pour les planchers), évaluée sur les deux modèles, pour la face inférieure. Le ferrailage est calculé suivant la méthode en référence (Capra *et al.*, 1978).

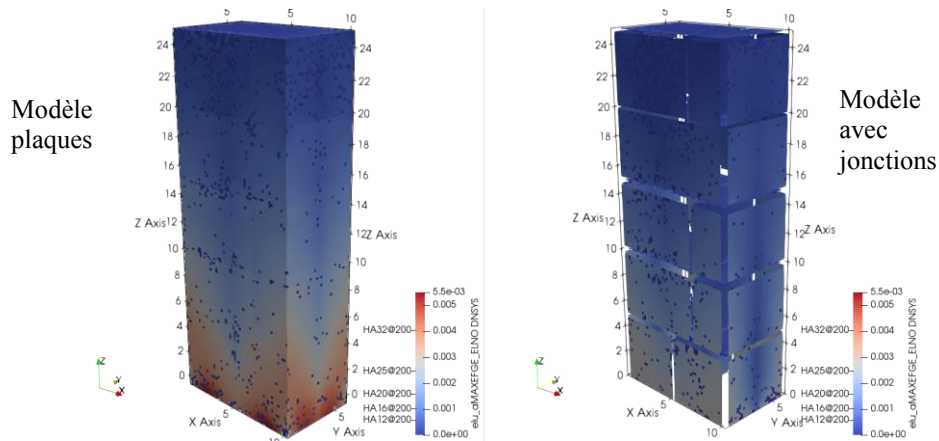


Figure 9. Ferrailage dans la direction verticale des voiles, à l'intrados

De façon à évaluer quantitativement les appels de ferrailage, et à identifier l'impact potentiel sur la constructibilité, la distribution des sections de ferrailage et de la densité de ferrailage est appréciée de manière globale en utilisant une méthode simple de statistique descriptive. On s'est intéressé à la distribution relative des populations de sections d'armature sur 100 classes réparties entre 0 et la valeur maximale du ferrailage considéré pour les deux types de modélisation. Les résultats sont représentés sur les figures ci-après :

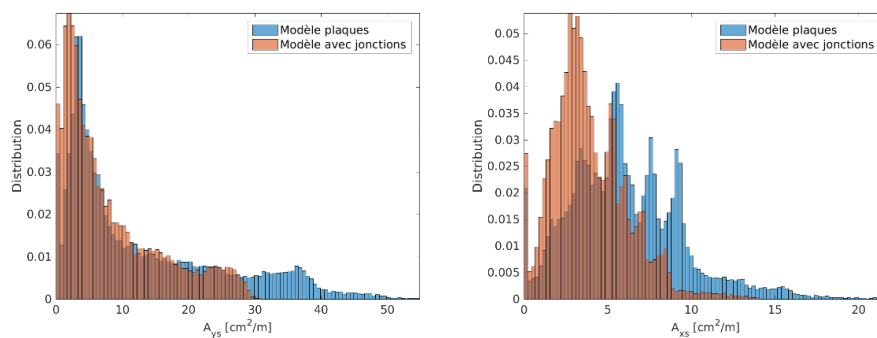


Figure 10. Comparaison de la distribution des sections de ferrailage sur une des faces, dans les deux directions

Pour l'un des voiles externes de la structure, on évalue ci-après les sections d'aciers qui seraient à mettre en place par niveau.

Nivea	Modèle plaques				Modèle avec jonctions			
	Extrados V	Intrados V	Extrados H	Intrados H	Extrados V	Intrados V	Extrados H	Intrados H
1	HA32+HA20@200	HA32@200	HA20@200	HA20@200	HA32/25@200	HA25@200	HA20@200	HA20@200
2	HA32@200	HA32/25@200	HA16@200	HA16@200	HA25@200	HA25@200	HA16@200	HA16@200
3	HA25@200	HA25@200	HA16@200	HA16@200	HA20@200	HA20@200	HA16@200	HA16@200
4	HA20@200	HA20@200	HA16@200	HA16@200	HA16@200	HA16@200	HA16@200	HA16@200
5	HA12@200	HA12@200	HA12@200	HA12@200	HA12@200	HA12@200	HA12@200	HA12@200

Tableau 3. Comparaison des sections de ferrailage longitudinal enveloppes appelées aux différents niveaux du voile VY3 (voile dont l'axe est de coordonnées $x=10,3$) – V = vertical, H = horizontal

Sur l'ensemble du voile considéré, qui travaille principalement en flexion, le modèle optimisé proposé, intégrant une modélisation volumique du radier et le modèle élastique proposé pour les jonctions, permettrait de réduire le ferrailage longitudinal de 25%. L'impact est nettement plus faible, voire quasiment nul, sur des éléments de structure travaillant principalement en traction membranaire (planchers ou voiles intérieurs de plus faible épaisseur). Par ailleurs, aucun critère de ferrailage minimum n'a été pris en compte ici. L'application d'un critère de ferrailage minimum sur le voile considéré réduirait *de facto* l'optimisation qui pourrait être faite des quantités de ferrailage, sous réserve que celles-ci passent sous le seuil correspondant.

5 Conclusion et perspectives

Le modèle élastique de jonction présenté dans cet article a été validé par des essais numériques dans code_aster. Il a été testé sur un cas d'application industriel, où sa mise en œuvre apporte déjà des améliorations dans l'estimation des quantités de ferrailage, proportionnées à ce que l'on pouvait attendre étant donné les erreurs de portées et des charges inhérentes aux modélisations en éléments finis de plaques usuelles.

La poursuite de l'interprétation des essais de jonction voile-plancher en cours au CEA, ainsi que le développement du modèle non linéaire de jonction dans code_aster, qui permettra de représenter les phénomènes associés à la dégradation de la jonction, en particulier sous sollicitations hors plan, viendront compléter les éléments présentés dans cet article.

Remerciements

Le travail présenté dans cette publication s'inscrit dans les activités soutenues par l'Institut SEISM (<http://www.institut-seism.fr>).

6 Bibliographie

- code_aster, 2001. General public licensed structural mechanics finite element software, included in the Salomé-Méca simulation platform. Website <http://www.code-aster.org>.
- Capra A., Maury J.F., Calcul automatique du ferrailage optimal des plaques et coques en béton armé, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des travaux publics, n°367, 12/1978.
- Recchia, G., Identification des mécanismes de dégradation d'une jonction voile-plancher, CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/EMSI/NT/2018-63882/A, 2018.