

Détermination des états limites des appuis et isolateurs de ponts dans une approche basée sur la performance sismique

Arnaud BUSSON, Olivier GAURON, Adamou SAIDOU, Patrick PAULTRE

Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc, Canada, J1K 2R1

Résumé

L'article présente un projet de recherche visant à améliorer l'évaluation de la fragilité sismique des ponts du réseau routier québécois et à optimiser le dimensionnement sismique des structures isolées selon l'approche de la performance sismique. L'objectif global du projet est de déterminer qualitativement et quantitativement les états limites ultimes des isolateurs sismiques et des simples appuis de ponts en matériaux élastomères. Les isolateurs sismiques représentent un moyen efficace de réduire la vulnérabilité sismique des structures. Ils présentent toutefois un risque d'instabilité ou de déchirement du fait des déplacements importants auxquels ils sont soumis durant un tremblement de terre et des charges verticales importantes qu'ils doivent supporter en tout temps.

Dans ce projet, une étude expérimentale a été effectuée au laboratoire de structures de l'Université de Sherbrooke sur des spécimens d'isolateurs et d'appuis de ponts à échelle réduite et à échelle réelle. Après plusieurs séries d'essais de caractérisation du matériau, des essais pour la recherche des états limites ultimes ont permis de caractériser le phénomène d'instabilité à l'état déplacé et de rupture par déchirement. La campagne d'essais a mis en évidence que les appareils d'appui et d'isolation sismique ne témoignent d'aucun endommagement graduel intermédiaire entre leur état sain et leur état limite ultime. L'ensemble des essais a permis de valider un modèle numérique d'isolateurs, développé sur le logiciel d'éléments finis ADINA et de mettre en place des méthodes numériques prédictives d'instabilité et de rupture des appareils d'appui et d'isolation sismique.

Le modèle numérique a finalement été utilisé de manière intensive pour définir plusieurs états limites statistiques dans une approche basée sur la performance sismique. Ces états limites sont basés sur la probabilité qu'un appareil ayant certaines caractéristiques géométriques ait atteint son état limite ultime à une valeur de déformation donnée. Quatre niveaux d'états limites statistiques ont ainsi pu être définis pour les appuis, et cinq pour les isolateurs sismiques, pouvant être utilisés dans le cadre d'études de la performance sismique des ponts.

1 Introduction

Le concept de dimensionnement des ponts selon la performance sismique occupe actuellement une place grandissante dans la pratique d'ingénierie et tend à devenir le nouveau standard de conception [1]. Il consiste à définir la performance de la structure selon 5 échelons graduels d'endommagement et de fonctionnalité post-séisme :

- I. Occupation immédiate
- II. Dommages modérés
- III. Sécurité essentielle
- IV. Sécurité limitée
- V. Stabilité structurale

L'évaluation de la performance sismique d'un pont consiste à déterminer numériquement son niveau de performance suite à un séisme d'une intensité donnée. L'évaluation globale du pont

passer par l'évaluation de l'endommagement de chacune de ses composantes structurales associée à un niveau de réponse précisément quantifié. Aux États-Unis, la Federal Emergency Management Agency (FEMA) a associé à la précédente description générale des performances sismiques des états limites d'endommagement pour les composantes structurales de ponts [2]. Plusieurs études ont récemment été menées au Québec, en collaboration avec le Ministère des Transports, pour le développement de courbes de fragilité pour les ponts du réseau routier québécois, qui sont des outils statistiques visant à prédire le niveau d'endommagement de certains types de ponts suite à un séisme [3,4]. Cependant, toutes ces études ont pour faiblesse de ne pas définir précisément d'états limites pour les isolateurs sismiques et les simples appuis de ponts, ou bien de ne pas les justifier par une étude rigoureuse. Cet article présente une étude visant à combler ce défaut d'information.

Les deux principaux états limites ultimes des appareils d'appuis sont la rupture par déchirement et l'instabilité par flambement, qui peuvent être atteints lors d'un séisme majeur pour des combinaisons de déplacement latéral et de charges verticales excessives. Le phénomène d'instabilité a déjà souvent été étudié, de façon analytique [5,6] et expérimentale [6,7,8,9]. L'état limite de rupture, lui, est peu documenté dans la littérature, avec seulement quelques références relatives à la rupture d'appareil en caoutchouc [10,11]. Les travaux de Hamdi [12] abordent, eux, d'une façon générale la rupture des élastomères sous grandes déformations et proposent plusieurs critères de rupture, basés sur des combinaisons d'élongations et de contraintes ou sur l'énergie de déformation.

Dans la présente étude, une campagne d'essais expérimentaux a été menée afin de déterminer qualitativement les états limites d'endommagement d'isolateurs et d'appuis de ponts en caoutchouc. Ces essais ont permis de valider un modèle numérique d'isolateurs par éléments finis, présenté dans l'article, capable de prédire les états limites ultimes de flambement et de déchirement. Ce modèle a finalement été utilisé de façon intensive pour de larges plages de géométries d'appareils en caoutchouc et de charges axiales, de manière à définir statistiquement des états limites intermédiaires, basés sur la probabilité qu'un isolateur ait atteint son état limite ultime sous certaines conditions de chargement et de géométrie.

2 Étude expérimentale

Une campagne d'essais expérimentaux d'appuis élastomères en compression-cisaillement a d'abord été effectuée pour répondre à un double objectif : l'observation et la compréhension des phénomènes mis en jeu pour les deux états limites (par rupture ou instabilité), puis la calibration d'un modèle par éléments finis à partir des résultats expérimentaux. Deux principaux montages ont été utilisés pour, au total, étudier dix-huit appareils à échelle réduite et douze à échelle réelle.

2.1 Spécimens

Tous les spécimens étudiés sont de section carrée, composés de caoutchouc naturel de type NR Duro 55 Shore A, et ont été fabriqués par Produits Hévéa Inc. (Richmond, Qc). Le tableau 1 recense la liste complète des spécimens étudiés ainsi que leurs caractéristiques géométriques : la largeur b , l'épaisseur des couches de caoutchouc t_c , le nombre de couches N_c , l'épaisseur totale de caoutchouc t_r , la hauteur totale du spécimen h (incluant les plaques d'acier de renfort interne, mais pas les plaques d'ancrage externes), le facteur de forme $S = b/(4t_c)$ et l'élancement $el = t_r/b$. Les spécimens ont été choisis de façon à balayer suffisamment les plages de valeurs de b , S et el , paramètres définissant entièrement leur géométrie. Les séries de spécimens A et B correspondent

à des modèles à échelle réelle, les autres étant à échelle réduite. La figure 1 illustre les architectures des spécimens d'isolateurs étudiés à échelle réelle (fig.1a) et à échelle réduite (fig.1b). Dans le cas des isolateurs réduits, le montage expérimental nécessite d'assembler les spécimens par paire pour être testés en parallèle.

Tableau 1- Géométrie des spécimens expérimentaux

ID	Qté	b (mm)	t_c (mm)	N_c	t_r (mm)	h (mm)	S	el
A1	1	450	18	10	180	207	6,25	0,40
A2	1	450	13,5	13	175,5	211,5	8,33	0,39
B1	1	300	12	15	180	222	6,25	0,60
B2	1	300	9	20	180	237	8,33	0,60
B4	1	300	12	15	180	222	6,25	0,60
B5	1	300	6	30	180	267	12,5	0,60
B6-1 / B6-2	2	300	12	9	108	132	6,25	0,36
B7-1 / B7-2	2	300	9	12	108	141	8,33	0,36
B8	1	300	6	36	216	321	12,5	0,72
C1-1 / C1-2	2	100	9	4	36	40,8	2,78	0,36
C2-1 / C2-2	2	100	6	6	36	44,0	4,17	0,36
C3-1 / C3-2	2	100	4	8	32	43,2	6,25	0,32
C4	1	80	10	4	40	44,8	2,00	0,50
C5	1	80	5	7	35	44,6	4,00	0,44
CS-2008 / CS-2012	2	100	10	1	10	10	2,50	0,10
CP1-2 à CP9-10	5	40	6	1	6	6	1,67	0,15

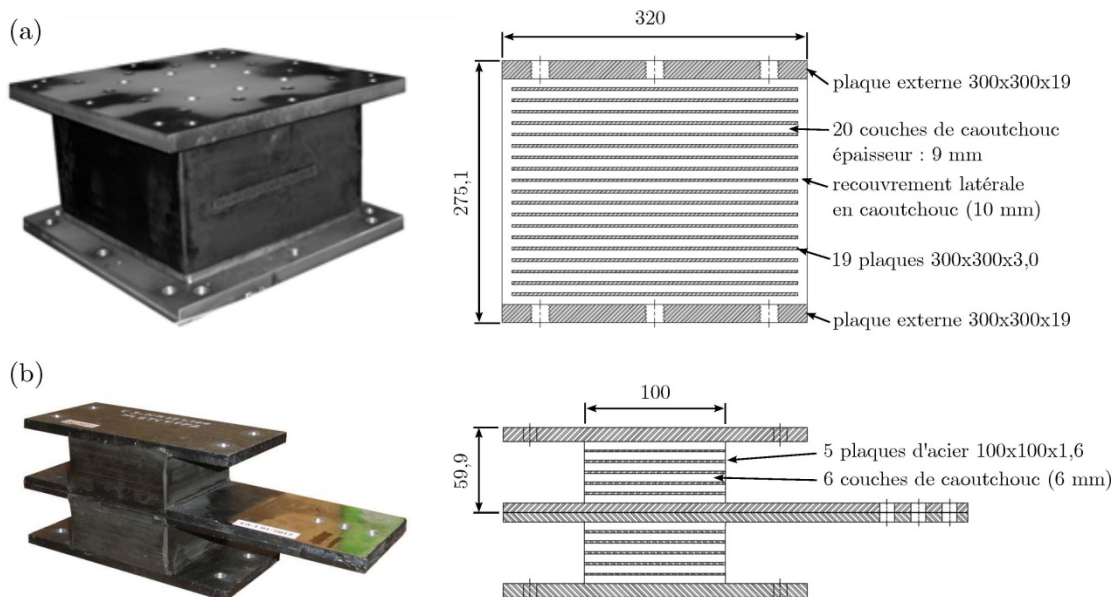


Figure 1 : Illustration des spécimens : (a) B2 (échelle réelle) et (b) C2 (échelle réduite)

2.2 Programme expérimental

Les spécimens ont tous été testés au laboratoire de structures de l'Université de Sherbrooke à l'aide de deux montages distincts, chacun adapté à une géométrie : réduite ou réelle. La figure 2

présente le montage utilisé pour les spécimens réduits (séries C, CS, CP). Il comprend deux vérins de 100 kN chacun, l'un appliquant la charge verticale de compression et l'autre déformant les spécimens (assemblés par paire) en cisaillement.

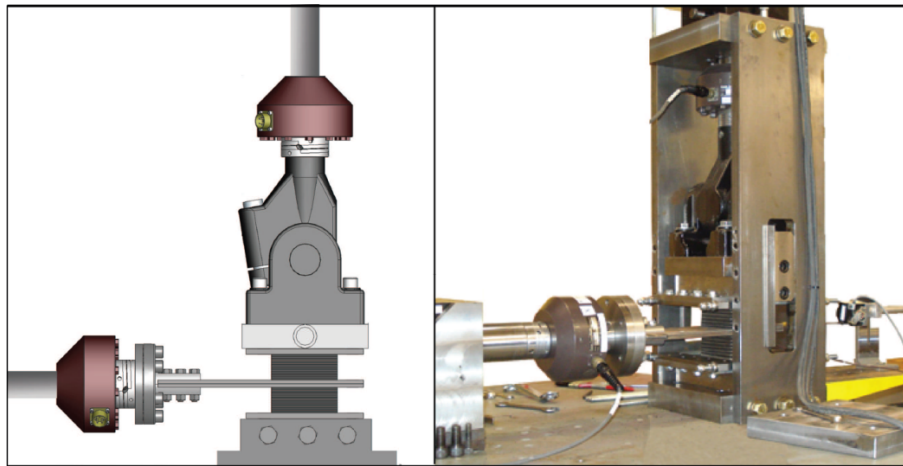


Figure 2 : Montage expérimental pour les appareils à échelle réduite

La figure 3 présente le montage utilisé pour les spécimens à échelle réelle (séries A et B). Des roulements linéaires de précision permettent l'application simultanée des charges de compression et de cisaillement sur un spécimen unique avec un frottement quasiment nul à l'interface. Le montage assure le parallélisme des plaques d'ancrage inférieures et supérieures, limitant les phénomènes de rotation dans le spécimen. La force axiale est exercée par une presse de capacité maximale de 12 000 kN, tandis qu'un vérin de 500 kN et de 750 mm de course permet d'appliquer le chargement latéral.



Figure 3 : Montage expérimental pour les appareils à échelle réelle

Indépendamment de l'échelle du spécimen ou du montage, le protocole expérimental reste le même. Les appareils sont d'abord soumis à une série d'essais dynamiques de caractérisation en cisaillement sous une charge verticale constante, qui ont pour but de déterminer les propriétés mécaniques des spécimens (rigidité latérale effective et taux d'amortissement visqueux équivalent). Suite à cela, ils sont soumis à des essais caractérisant a priori un des états limites, par rupture ou instabilité, avec des essais respectivement direct ou par méthode MDC. Le premier consiste à simplement charger l'appareil verticalement, puis à appliquer un déplacement latéral

jusqu'à la rupture par déchirement ou l'instabilité. Les observations ont montré que ce type d'essai conduit généralement à la ruine du spécimen, qu'il s'agisse de rupture ou d'instabilité. Ainsi, il est préférable d'étudier l'instabilité par la méthode des déplacements constants (MDC) [6], qui permet de déterminer la courbe d'instabilité complète d'un isolateur à partir d'un seul spécimen. Cette méthode consiste à appliquer un déplacement constant à l'isolateur (de $0,1b$ à $1,0b$), puis à appliquer une charge axiale jusqu'à l'annulation de la force horizontale. De ces données, un simple changement de repère des valeurs permet de tracer, indirectement, les courbes de comportement en cisaillement de l'appareil. La figure 4 présente ces courbes indirectes, déterminées ici pour l'isolateur B1, ainsi qu'une courbe obtenue par essai direct à 5MPa sur l'isolateur B4 (géométriquement identique à B1). La figure permet de valider l'utilisation de la méthode indirecte MDC pour la détermination des points d'instabilité, qui correspondent au point où la rigidité tangente du spécimen devient nulle.

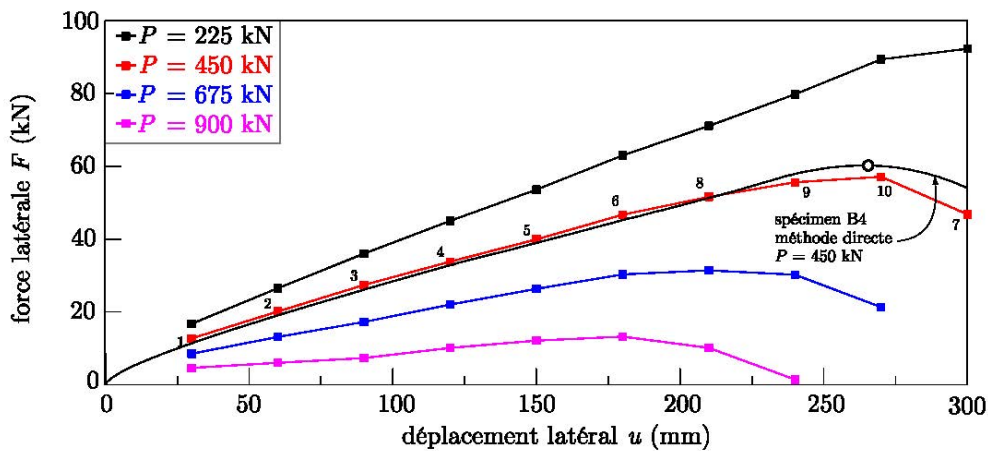


Figure 4 : Illustration pour B1 et B4 des courbes de comportement directes et indirectes (MDC)

2.3 Résultats sur les états limites ultimes

La figure 5a superpose les courbes de stabilité obtenues sur les spécimens B1, B2, B5 et B8, qui ont tous atteint un état limite de flambement suite aux essais par la méthode MDC.

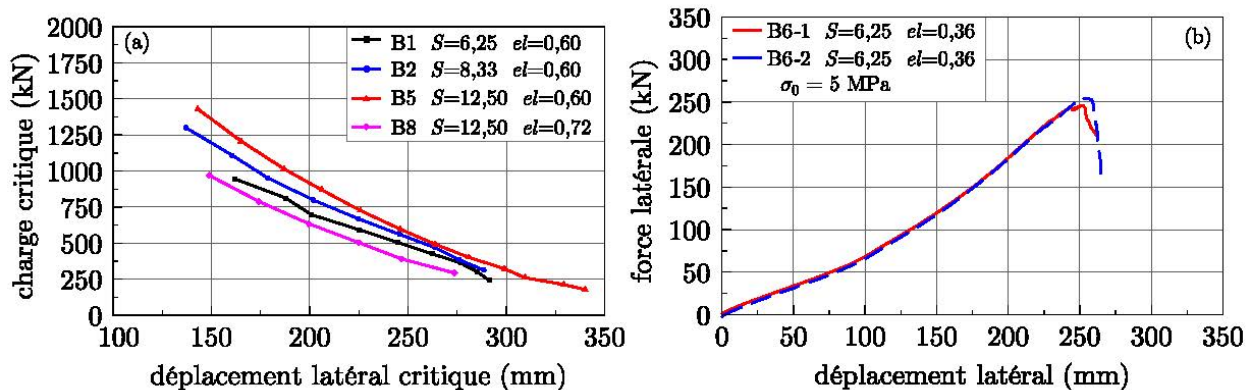


Figure 5 : Résultats expérimentaux : (a) courbes de stabilité et (b) rupture des spécimens B6

On remarque d'abord qu'une augmentation du facteur de forme semble améliorer la capacité des isolateurs face à l'instabilité. Cette conclusion apparente a cependant été mise en défaut par une étude paramétrique numérique plus poussée durant le projet, montrant que le facteur de forme a

une influence négligeable sur le comportement des isolateurs face au flambement [13]. La comparaison des courbes des spécimens B5 et B8 permet de relever que l'élancement, lui, peut réduire considérablement la capacité du spécimen en stabilité. Cette conclusion est logique puisque l'instabilité est directement liée à un effet P- Δ et donc à l'élancement de l'isolateur.

Les essais sur les spécimens réduits C1, C2 et C3 et sur les séries CS et CP ont menés à des états limites ultimes par déchirement. Parmi les spécimens à échelle réelle, seuls les isolateurs B6 et B7 ont atteint un état limite de rupture par déchirement en raison d'un élancement relativement faible ($el = 0,36$). Les déplacements critiques à la rupture de tous les spécimens ayant subi un déchirement en cisaillement d'une couche de caoutchouc sont récapitulés dans la deuxième colonne du tableau 2 et seront utilisés dans la suite de l'étude pour la définition d'un critère de rupture numérique. La figure 5b illustre les courbes de comportement expérimentales (force latérale-déplacement latéral) obtenues pour les spécimens B6-1 et B6-2 sous une charge verticale de 5MPa. On observe en premier lieu l'excellente répétabilité des essais entre deux spécimens identiques, autant en termes de rigidité que de comportement ultime à la rupture. La rupture des spécimens B6-1 et B6-2 a eu lieu de manière soudaine à un déplacement critique u_{cr} de 250 mm, soit une déformation $u_{cr}/t_r=231\%$. La figure 6 illustre la rupture du spécimen B6-1 (fig.6a et 6b) et les fasciés de rupture du B6-2 (fig.6c et 6d) qui témoignent de cette rupture fragile suite à la propagation d'une fissure en cisaillement à travers une couche de caoutchouc.

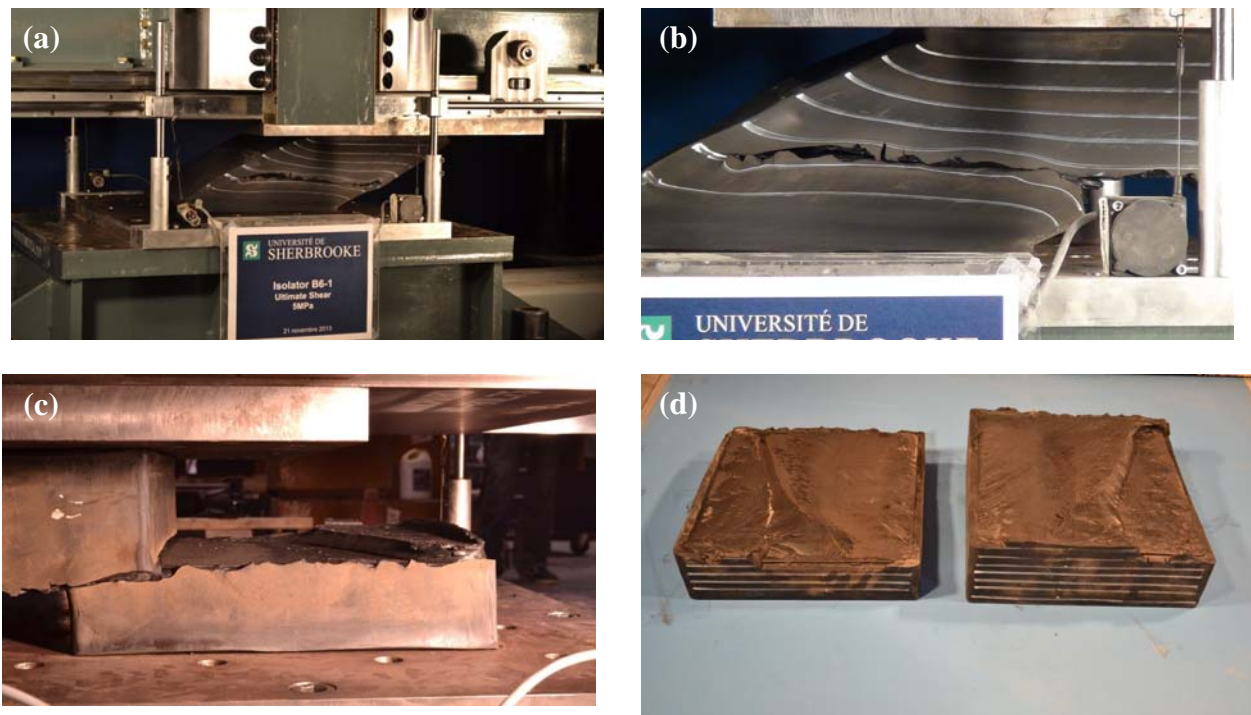


Figure 6 : Photos des spécimens B6 après rupture par déchirement

Une observation majeure de la campagne d'essais expérimentaux sur la recherche des états limites ultimes des isolateurs et appuis de pont est l'aspect fragile de ces appareils en caoutchouc. En effet, dans le cas des appareils d'appuis ayant rompu, comme l'ont montré les figures 5b et 6, il n'y a pas aucun signe avant-coureur de la rupture. Une conclusion similaire peut être tirée des essais de stabilité. La figure 4 montre en effet qu'il n'y a pas de perte de rigidité prévenante de l'instabilité hormis dans les derniers instants. Aussi, sur l'ensemble des essais expérimentaux

menés, aucun endommagement intermédiaire ou graduel n'a pu être détecté visuellement ou dans les courbes de comportement entre l'état initial et l'atteinte de l'état limite ultime des spécimens. Dans une approche basée sur la performance sismique, il ne semble donc pas possible de définir des états limites d'endommagement intermédiaires basés sur des critères physiques pour les isolateurs et appuis de ponts.

3 Étude numérique

Plusieurs paramètres peuvent influencer le type d'état limites ultime d'un isolateur sismique élastomère et les valeurs du couple charge axiale-déplacement critiques ($P_{cr}-u_{cr}$): sa largeur b , son facteur de forme S , son élancement el , son déplacement latéral u et son niveau de charge axiale P . Puisqu'il n'est pas raisonnable d'étudier expérimentalement l'influence de chacun de ces paramètres sur leurs plages de valeurs usuelles, un modèle par éléments finis a été développé dans le but de prédire numériquement les états limites ultimes d'appareils élastomères de toutes géométries et sous toutes conditions de chargement vertical. Le modèle sera ensuite utilisé de façon intensive pour la détermination statistique d'états limites intermédiaires (section 4).

3.1 Définition du modèle par éléments finis

Un modèle d'isolateurs sismiques et d'appuis de ponts par éléments finis a été développé, en 3D, à l'aide du logiciel ADINA [14]. Puisque l'étude numérique est paramétrique et compte un grand nombre de spécimens d'analyse (section 4.1), une étude de maillage détaillée a été menée pour optimiser le compromis entre temps de calcul, précision des résultats et convergence du modèle. La figure 7 illustre le modèle numérique créé. La définition des matériaux est le cœur du modèle numérique, notamment la formulation du caoutchouc. Le modèle d'Ogden [15] compressible à 6 paramètres, le plus courant dans la littérature et adapté pour des déformations allant jusqu'à 700%, a été choisi pour modéliser le caoutchouc. Les constantes du modèle ont été déterminées à partir des résultats d'une série d'essais de caractérisation du matériau, consistant en des essais de traction uniaxiale, de cisaillement pur et de cisaillement simple sur de petites éprouvettes de matériau.

Les analyses effectuées avec le modèle consistent en un essai numérique par méthode directe en compression-cisaillement. Le modèle est d'abord soumis à une charge axiale constante, puis est déplacé latéralement en rampe jusqu'au déplacement latéral cible. Les analyses ont toutes été conduites jusqu'à des déformations latérales maximales u/t_r de 350% en 100 pas de calculs. Certains spécimens ont pu nécessiter des calculs jusqu'à 400% de déformation latérale pour atteindre un état limite ultime de rupture par déchirement ou par instabilité.

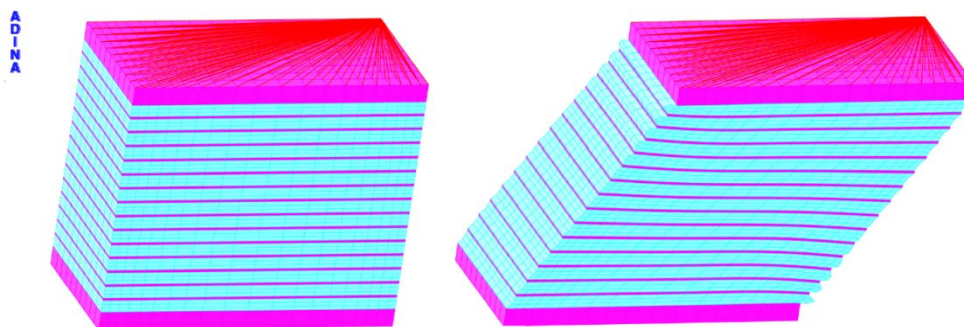


Figure 7 : Modèle d'isolateur par élément finis (illustration pour le spécimen B1)

3.2 Validation du modèle

À des fins de validation, tous les essais expérimentaux menés sur des spécimens d'isolateurs réduits et à échelle réelle ont été modélisés numériquement pour valider le modèle par éléments finis. La figure 8 présente cette validation pour les spécimens C1, C2, B1 et B6 sous un chargement de 5MPa, ainsi que pour B2 sous 5MPa et 7,5MPa. Pour chaque spécimen, l'erreur numérique a été estimée par comparaison des normes des vecteurs définissant les courbes de comportement expérimentales et numérique. Le modèle numérique présente ainsi une erreur moyenne de 11,2% sur la reproduction numérique de la totalité des données expérimentales.

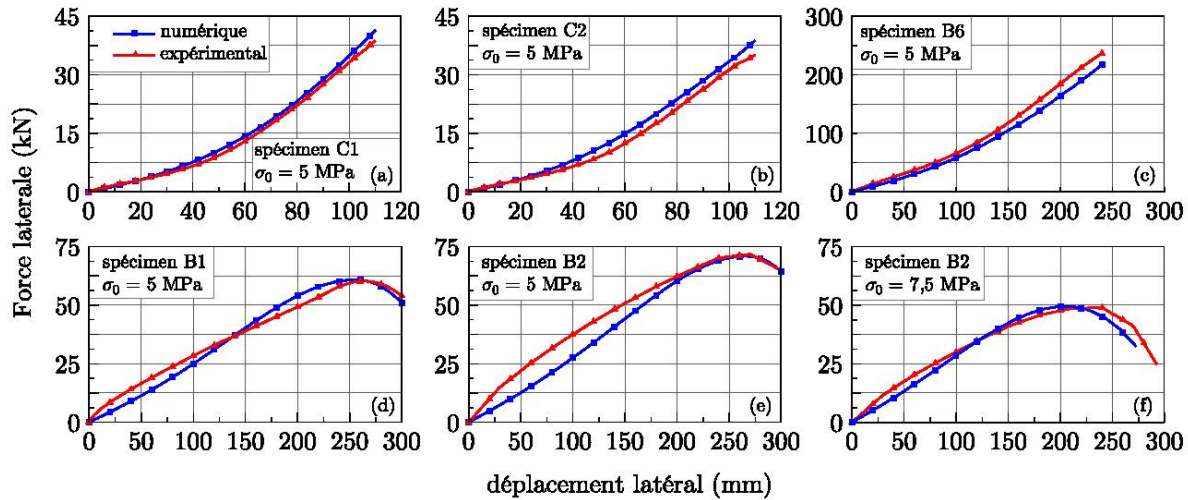


Figure 8 : Comparaison des courbes de comportement expérimentales et numériques

3.3 Détermination numérique des états limites d'un spécimen

Pour réaliser l'étude numérique, les deux états limites ultimes observés expérimentalement doivent être détectables numériquement pour n'importe quelle géométrie d'appareil simulé. Des critères numériques définissant ces états limites ultimes doivent donc être définis.

3.3.1 Instabilité par flambement

Numériquement, la stabilité des isolateurs suite à un essai direct en cisaillement sous une charge axiale donnée se définit de la même manière que lors d'un essai direct expérimental. Le point d'instabilité correspond donc au déplacement pour lequel la rigidité tangente du spécimen devient nulle, c'est-à-dire le point maximum de la courbe force déplacement. La figure 9 présente les courbes de stabilité complètes déterminées numériquement par cette méthode ainsi qu'une comparaison avec les résultats expérimentaux. Ces résultats valident l'utilisation du modèle numérique pour la détermination des états limites de flambement des isolateurs.

3.3.2 Rupture par déchirement

En raison d'un nombre trop faible de spécimens expérimentaux ayant rompu par déchirement, la définition de critères de rupture numériques basés sur des quantités macroscopiques (déformation u/t_r , par exemple) présentait des écarts-type trop élevés pour en assurer la fiabilité. Un critère de rupture numérique microscopique a donc été envisagé en s'appuyant sur les travaux de Hamdi [12]. Le critère le plus efficace à prédire les résultats expérimentaux, mais aussi le plus simple d'application, est basé sur la valeur limite de la déformation principale λ_l . Il est important de

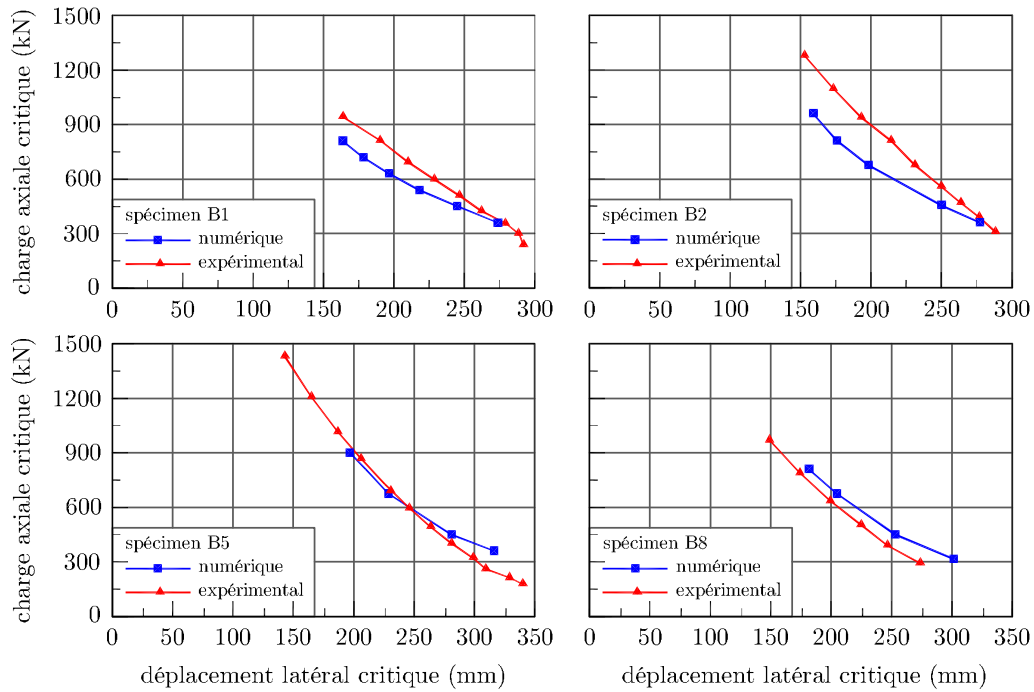


Figure 9 : Courbes de stabilité expérimentales et numériques des spécimens de la série B

noter que ce critère n'est pas universel. Il n'est valable que dans un cas de chargement en cisaillement simple et pour le modèle de matériau ici utilisé.

La troisième colonne du tableau 2 présente, pour chaque spécimen expérimental, la déformation principale maximale λ_1 mesurée numériquement dans les modèles numériques au déplacement u_{cr} ayant entraîné la rupture expérimentale (colonne 2). Cette valeur reste relativement constante sur l'ensemble des spécimens. La moyenne de ces valeurs permet alors de définir un critère de rupture tel que :

$$\lambda_1 = I_2 = 4,03 \quad (1)$$

Pour validation du critère retenu, les colonnes 4 et 5 du tableau 2 présentent respectivement le déplacement numérique critique $u_{cr,num}$ correspondant au critère de rupture et l'erreur commise avec le déplacement critique expérimental. Le critère de rupture a aussi été validé en vérifiant que les zones de rupture des spécimens expérimentaux correspondent bien à celles où se concentrent les élongations maximales dans les modèles numériques. La figure 10 illustre ces deux zones dans le cas du spécimen B6-2.

Tableau 2 : Déformations principales et déplacements critiques des spécimens expérimentaux

Spécimen	$u_{cr, xp}$ (mm)	λ_1	$u_{cr, num}$ (mm)	erreur
B6	250,0	3,173	317,4	21,2 %
B7	293,0	3,370	325,0	9,8 %
C1	115,0	4,114	11,5	3,1 %
C2	110,0	4,113	106,6	3,1 %
C3	113,0	4,688	96,6	16,9 %
CS	36,6	4,124	35,6	2,9 %
CP	22,2	4,260	20,6	7,6 %

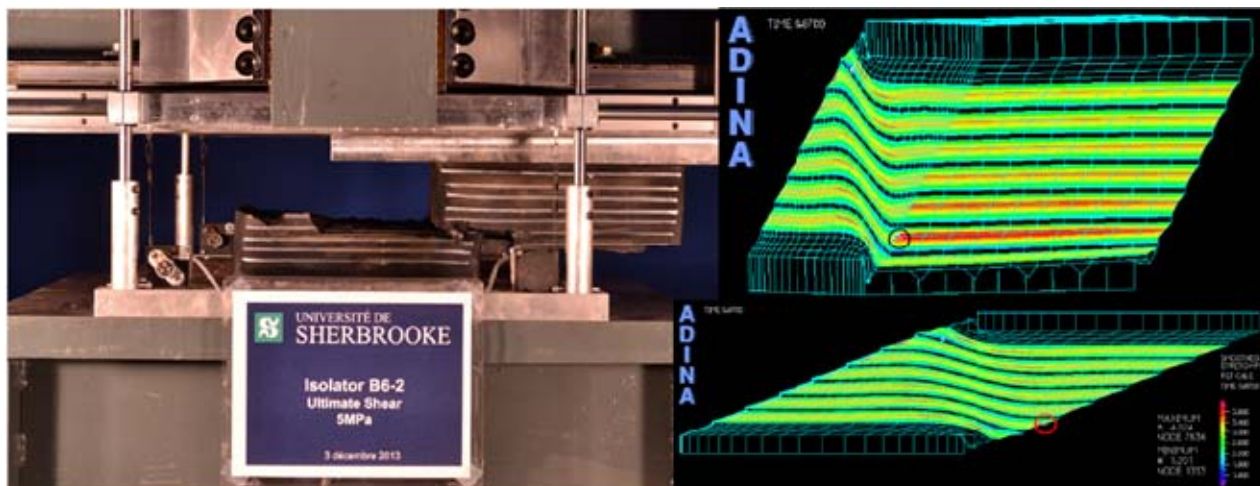


Figure 10 : Localisation des ruptures expérimentales et numériques du spécimen B6-2

4 Définition numérique d'états limites statistiques

La campagne expérimentale a montré qu'il n'était pas possible de définir physiquement des états limites intermédiaires, avant l'état limite ultime, pour les isolateurs et les appuis de ponts. Une approche statistique numérique a donc été utilisée pour définir des états limites intermédiaires étant donné la disponibilité d'un modèle par éléments finis capable de prédire fidèlement les états limites ultimes de flambement et de déchirement et étant donné le grand nombre de paramètres pouvant influencer le type d'état limite ultime et les valeurs des déplacements critiques : paramètres géométriques (largeur b , facteur de forme S et élancement el) et niveau de charge axiale. Les états limites proposés dans cette étude à des fins d'analyse de la fragilité sismique des ponts sont donc formulés en terme de probabilité qu'un appareil élastomère appartenant à une population de géométrie donnée et travaillant sous une plage de charge axiale donnée ait atteint son état limite ultime pour un certain déplacement latéral.

4.1 Population d'étude

Un nombre important de cas d'étude numériques a été considéré, basés sur les trois paramètres principaux que sont le facteur de forme S , l'élancement el et la charge axiale. La figure 11 illustre la population complète d'appareils étudiés numériquement, définis par leur géométrie. Les zones bleue et rouge délimitent respectivement les populations d'appareils d'isolateurs sismiques et d'appuis simples de ponts. La figure 11 présente aussi, à titre indicatif, des illustrations des appareils aux limites des zones géométriques considérées. Les facteurs de forme considérés s'étendent de 1 à 20 et les élancements de 0,025 à 0,75, pour un total de 1029 spécimens. Le choix de ces plages de valeurs est subjectif et repose sur le jugement des auteurs et sur les valeurs usuelles connues de la pratique, dans la mesure où aucune étude statistique n'a été trouvée sur le sujet. Pour chaque spécimen numérique, les charges axiales P considérées prennent les valeurs entières comprises entre 0MPa et 10MPa, pour un total de 11 319 cas d'étude numériques. Enfin, une étude préliminaire a montré que la largeur b des spécimens est également un facteur influent à considérer pour les valeurs de déplacements critiques atteints. Cependant, son influence peut être déterminée mathématiquement [13], sans avoir besoin d'augmenter le nombre d'analyses numériques, si les résultats sont adimensionnés et présentés en termes de déformation

critique $\frac{V_{cr}}{A}$ et de contrainte axiale critique $\frac{R_{cr}}{A}$, où A est l'aire en cisaillement du spécimen. Ainsi, tous les calculs numériques ont été effectués pour une largeur de 900mm, mais les résultats statistiques présentés prennent en considération des largeurs comprises entre 300mm et 900mm.

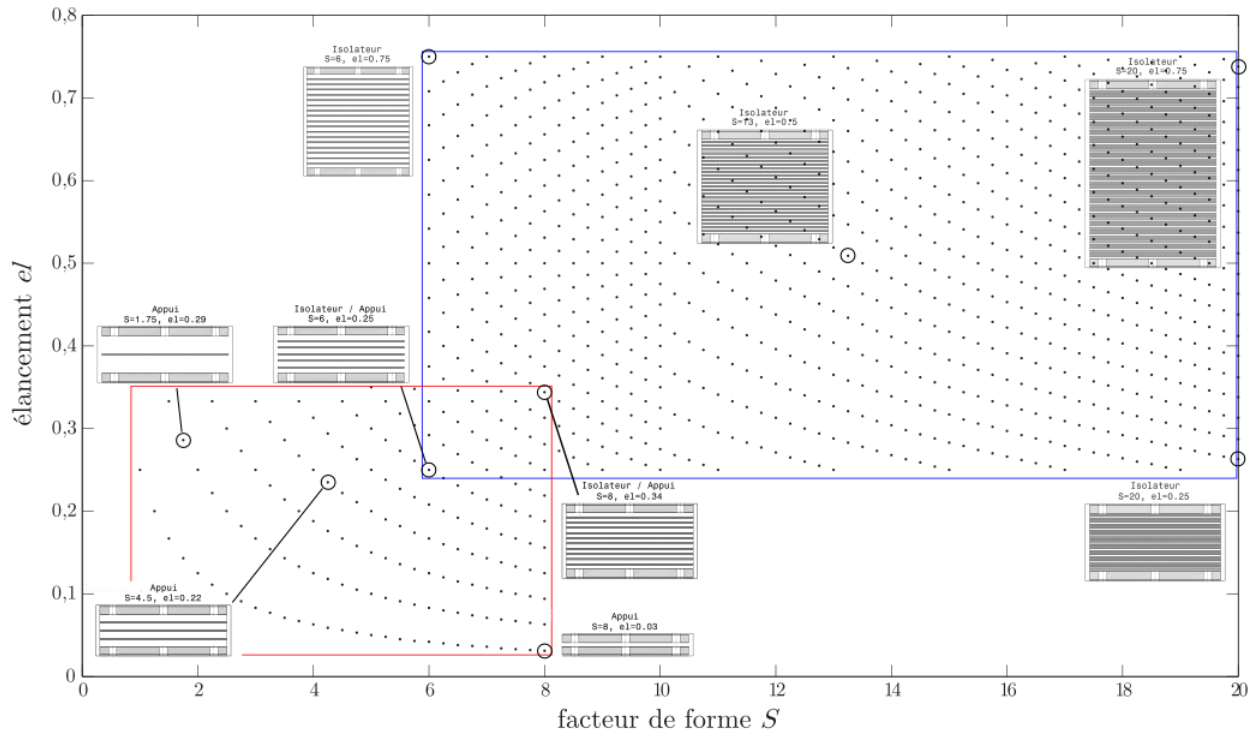


Figure 11 : Matrice des géométries des spécimens numériques de l'étude

Comme l'illustrent les allures parfois singulières des spécimens présentés à la figure 11 aux limites des zones définies, certaines combinaisons des paramètres géométriques S et el ont une probabilité plus faible que d'autres d'être effectivement utilisés dans la pratique. Pour la cohérence de l'étude statistique menée, les résultats de triplets de paramètres (S , el et P) ont été pondérés pour tenir compte de ces différences [13].

4.2 Définition d'états limites statistiques

Dans le cadre d'études basées sur la performance sismique, on cherche en général à définir cinq niveaux d'endommagement progressifs allant d'aucun dommage à la ruine de l'élément. Puisque l'étude expérimentale a montré l'impossibilité de définir des états limites intermédiaires basés sur des critères d'endommagements physiques, les états limites ont été déterminés de façon statistique pour les appareils d'appuis de ponts d'une part, et pour les isolateurs sismiques d'autre part. Ainsi, pour chaque population d'appareils, les déformations critiques obtenues numériquement pour l'ensemble des analyses (incluant les plages complètes correspondantes de facteurs de forme, d'élanements, de largeurs et de charges axiales) ont été représentées sous forme d'histogrammes normalisés (fig.12 et 13) avec la densité spectrale de probabilité correspondante (PSD), qui représente la probabilité que les spécimens de la population aient une déformation critique inférieure ou égale à une certaine valeur. Le tableau 3 présente les valeurs de probabilité choisies pour définir les déformations critiques des différents états limites des

appareils élastomères. Notons que l'état limite ultime (V) correspond au dépassement de la valeur moyenne des déformations critiques de la population.

Tableau 3 : Distribution et valeurs des états limites intermédiaires et ultimes

État limite	E.L. I	E.L. II	E.L. III	E.L. IV	E.L. V
Endommagement	Aucun	Léger	Modéré	Sévère	Complet
Probabilité	< 2%	< 15%	< 30%	< 50%	> 50%

	Déformations limites u_{cr}/t_r (%)					Écart-type (%)
Appuis	279,4	322,7	-	334,2	-	48,2
Isolateurs	113,6	154,4	188,1	241,4	-	71,1
Isolateurs trapus	245,0	273,6	302,9	313,5	-	29,3
Isolateurs élancés	116,3	147,7	166,2	198,7	-	46,5

La figure 12 présente la distribution pondérée des déformations critiques pour les populations d'appuis et d'isolateurs sismiques. Dans le cas des appuis (fig.12a), on observe une forte concentration des valeurs critiques entre 320% et 370%. Cela est dû au type d'état limite ultime quasiment exclusif de rupture par déchirement pour ces appareils. Cette concentration des déformations critiques a empêché la définition raisonnable de l'état limite III, trop proche des états II et IV.

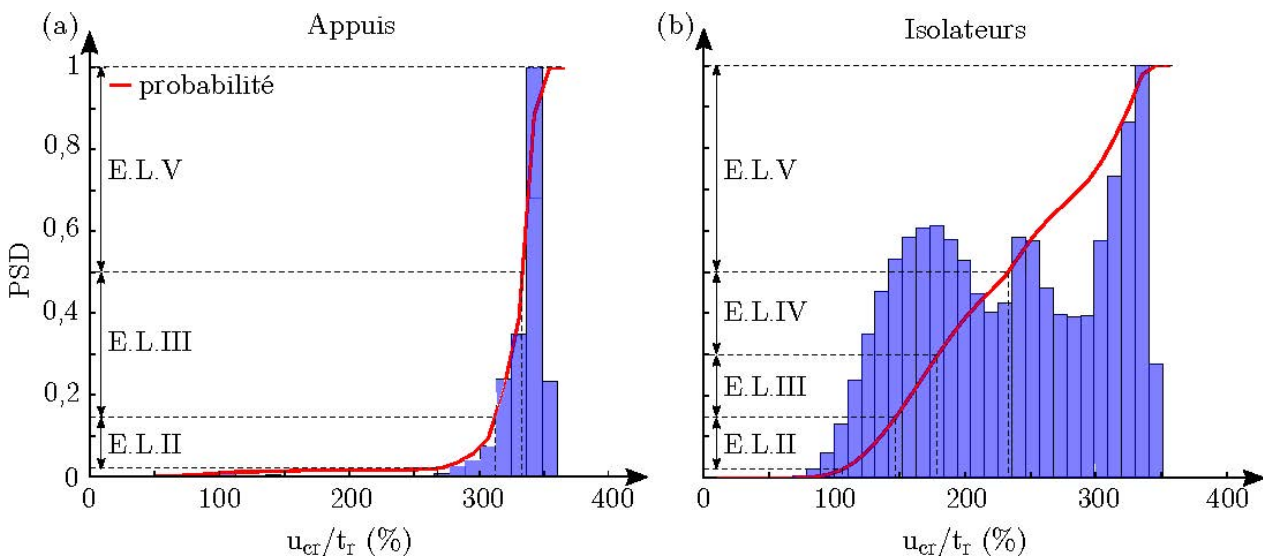


Figure 12 : Distribution des déformations critiques pour les populations d'appuis et d'isolateurs

Dans le cas des isolateurs, le comportement est très différent en raison de la présence combinée des états de rupture et d'instabilité. Les déformations critiques d'instabilité sont souvent beaucoup plus faibles que celles de déchirement, d'où l'existence de deux zones dans l'histogramme (fig.12b). Cette observation a conduit à diviser la population d'isolateurs en deux en fonction de l'élancement des spécimens. Ainsi pour un élancement inférieur à 0,40, les isolateurs dits trapus atteignent majoritairement un état limite de déchirement et pour un élancement supérieur à 0,40, les isolateurs dits élancés connaissent majoritairement le flambement. Cela permet d'obtenir deux distributions plus homogènes (fig.13) et de définir des valeurs plus fiables d'états limites lorsque l'ingénieur les utilisant connaît moins l'ordre de grandeur de l'élancement des appareils. Le tableau 3 compile les valeurs des déformations

critiques de chacun des états limites statistiques pour chacune des populations étudiées. La colonne à 50% ainsi que la dernière fournissent, respectivement, les valeurs moyennes et l'écart-type des déformations critiques de l'ensemble d'une population.

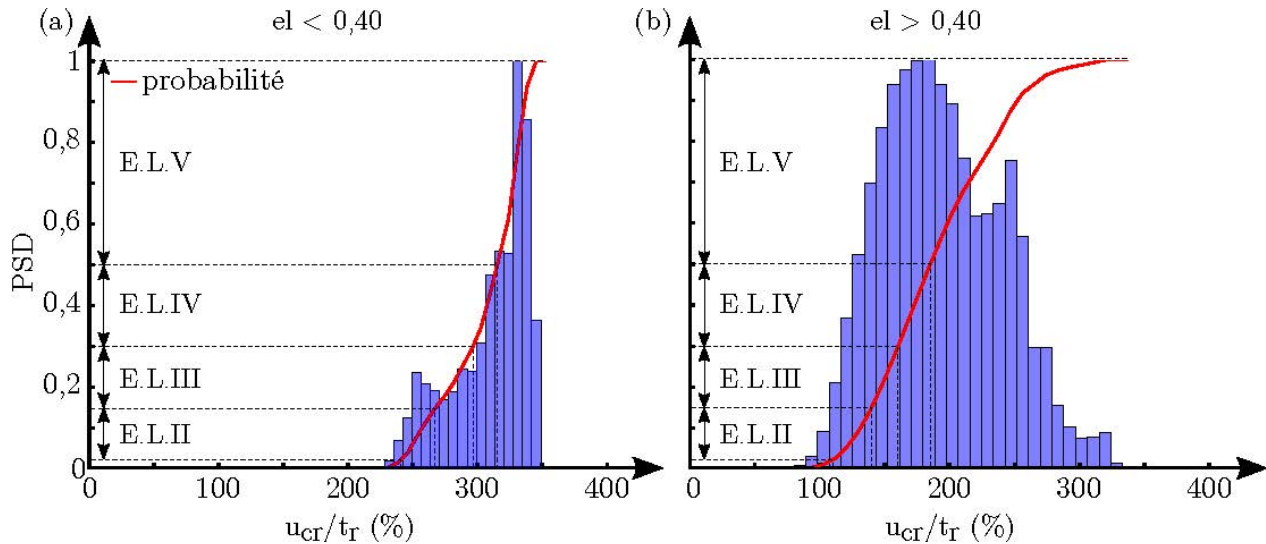


Figure 13 : Distribution des déformations critiques des populations réduites d'isolateurs

5 Conclusion

Les isolateurs sismiques représentent un moyen efficace de réduire la vulnérabilité sismique des structures et sont particulièrement utilisés sur les ponts. Ils présentent toutefois des risques de rupture ou d'instabilité du fait de leur grande flexibilité et des déplacements importants auxquels ils sont soumis durant un tremblement de terre. Cet article a présenté une étude sur les états limites à grandes déformations des isolateurs sismiques en caoutchouc naturel. Une étude expérimentale sur des spécimens à échelles réduites et réelles a permis, dans un premier temps, d'observer les différents types d'états limites ultimes et de conclure à l'absence d'états d'endommagement intermédiaires physiques ainsi qu'à la fragilité des appareils en caoutchouc. La campagne d'essais expérimentaux a aussi permis de valider un modèle numérique d'isolateurs par éléments finis capable de calculer fidèlement les déplacements critiques d'instabilité ou de déchirement d'une large population d'isolateurs ou d'appuis de ponts de dimensions, de facteurs de forme et d'élancements différents sous différentes conditions de chargement axial. La compilation des nombreux résultats numériques a permis de définir statistiquement, après pondération, des états limites intermédiaires et ultimes pour plusieurs types d'appareils : les appuis de ponts, les isolateurs sismiques trapus et les isolateurs élancés. L'étude a aussi montré une différence notable de capacité entre un état limite par déchirement et par instabilité, montrant en particulier l'intérêt d'avoir des appareils peu élancés plutôt sujets au déchirement. Les états limites ainsi définis peuvent être utilisés à des fins d'évaluation de la vulnérabilité sismique de ponts et pour la construction de courbes de fragilité.

Remerciements

Les auteurs aimeraient souligner le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) à travers le Réseau canadien pour la recherche parasismique (RCRP). Les auteurs remercient le Fonds du Québec pour la recherche sur la nature

et les technologies (FQRNT) pour son soutien financier au Centre d'études interuniversitaire des structures sous charges extrêmes (CEISCE). Les auteurs tiennent à souligner la contribution majeure à ce projet du Ministère des Transports du Québec à travers un contrat de recherche. Les auteurs remercient l'entreprise Produits-Hévéa Inc., qui a fourni gracieusement tous les spécimens expérimentaux en caoutchouc naturel de l'étude expérimentale du projet. Enfin, les auteurs remercient les techniciens Laurent Thibodeau, Jeason Desmarais, Claude Aubé et Raphael Prévost pour leur aide dans la réalisation des essais.

Bibliographie

- [1] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. and Kowalsky M.J. 2007, *Direct Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italie.
- [2] FEMA : HAZUS-MH MR1. 2003, Rap. tech., Federal Emergency Management Agency.
- [3] Tavares, D.H. 2012, *Évaluation de la vulnérabilité sismiques des ponts routiers au Québec à l'aide des courbes de fragilité*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada.
- [4] Siqueira, G. 2013, *Évaluation de la vulnérabilité sismiques des ponts routiers au Québec réhabilités avec l'utilisation d'isolateurs en caoutchouc naturel*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada.
- [5] Koh, C. G., Kelly, J. 1988, Simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation, *International Journal of Mechanical Science*, 30:933–943.
- [6] Nagarajaiah, S., and Ferrell, K. 1999, Stability of elastomeric seismic isolation bearings. *Journal of structural engineering New York, N.Y.*, 125(9):946 – 954.
- [7] Buckle, I. and Liu, H. 1994, Experimental determination of critical loads of elastomeric isolators at high shear strain. *NCEER Bulletin*, 8:1–5.
- [8] Sanchez, J., Masroor, A., Mosqueda G. and Ryan, K. 2013, Static and Dynamic Stability of Elastomeric Bearings for Seismic Protection of Structures, *Journal of structural engineering*, 139:1149-1159.
- [9] Vemuru, V.S.M., Nagarajaiah, S., Masroor, A. and Mosqueda, G. 2014, Dynamic Lateral Stability of Elastomeric Seismic Isolation Bearings, *Journal of structural engineering*.
- [10] Kelly, J. M. 1991, *Dynamic and failure characteristics of bridgestone bearings*. UCB/EERC-91/04, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA.
- [11] Civil Engineering Research Foundation (CERF) 1999, *Summary of evaluation findings for the testing of seismic isolation and energy dissipating devices*. Rap. tech. No. 40404, Civil Engineering Research Foundation, Washington, DC.
- [12] Hamdi, A. 2006, *Critère de rupture généralisé pour les élastomères vulcanisables et thermoplastiques*, Thèse de doctorat, Polytech' lille.
- [13] Gauron, O., Saidou, A., Busson, A. and Paultre, P. 2014. *Détermination des états limites ultimes des appuis et des isolateurs de ponts dans une approche base sur la performance sismique*. Rap. tech. CRGP-2014/01, Université de Sherbrooke, CRGP, Sherbrooke, QC.
- [14] ADINA, R&D. 2009, *ADINA, Theory and Modeling Guide*, ADINA RD, inc.

[15] Ogden, R.W. 1972, Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids. *Proceedings of the royal Society of London*, 326:565-584.