

417.E - AOÛT 2018

ÉTUDES ET RECHERCHES

JUSTIFICATIONS POUR UTILISER
UN MATÉRIAU VISCOÉLASTIQUE
DANS LES ASSEMBLAGES
BROCHÉS EN ZONES SISMIQUES

ARMAND LEROUX - NADER LACHIHEB
MATTHIEU SCALLIET

CERIB
Expertise concrète



Justifications pour utiliser un matériau viscoélastique dans les assemblages brochés en zones sismiques

417.E

© 2018 CERIB – CS 10010 – 28233 Epernon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857552802

417.E – Août 2018

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Sommaire

1. Contexte général	5
2. Dossier de l'étude	7
2.1. Contexte de l'étude et objectifs	7
2.1.1. Contexte normatif	7
2.1.2. Contexte du terrain : objections des contrôleurs	7
2.1.3. Objectifs	8
2.2. Domaine d'application	9
2.3. Quelques définitions	10
2.3.1. Joints parasismiques et de dilatations	10
2.3.2. Comportement viscoélastique	11
2.4. Etude d'un cas particulier	13
2.4.1. Analyse des rapports d'essais [4], [5], [6]	13
2.4.2. Modélisation numérique	21
3. Démarche et justifications à apporter	34
Annexe 1 – Avis de Monsieur Philippe BISCH expert sismique et Président du CEN/TC250/SC8	37
Bibliographie	41
Index des figures	43
Index des tableaux	43

1. Contexte général

Le DTU 23.3 « Ossatures en éléments industrialisés en béton » [3] indique la possibilité, sur justifications spéciales, d'utiliser des matériaux de remplissage viscoélastiques de type bitume dans des assemblages brochés pour réaliser un joint de dilatation sans création de joint sismique. Toutefois, ce même document ne définit ni le type ni le contenu des justifications spéciales à apporter pour valider l'utilisation de ce procédé.

Cette étude définit les justifications nécessaires à apporter afin de pouvoir utiliser en zone sismique un matériau viscoélastique dans un assemblage broché de bâtiments avec ossature à un niveau avec ou sans mezzanine.

Un cas pratique d'un chantier traitant un bâtiment avec ossature à un niveau intégrant un matériau viscoélastique appelé matériau [®] dans une liaison poteau-poutre a permis d'alimenter cette étude et de définir une démarche répétable pour tout type de chantiers et de matériaux.

M. BISCH, expert sismique et Président du CEN/TC250/SC8 (en charge de la rédaction de l'Eurocode 8) a analysé ce rapport et validé la démarche et les justifications à apporter dans la partie 3. (cf. avis de l'annexe 1).

2. Dossier de l'étude

2.1. Contexte de l'étude et objectifs

2.1.1. Contexte normatif

Le § 10.2.5.3 du DTU 23.3 [3] « Ossatures en éléments industrialisés en béton » indique la possibilité, sur justifications spéciales, d'utiliser des matériaux de remplissage viscoélastiques de type bitume dans des assemblages brochés pour réaliser un joint de dilatation (pour des déformations gênées de type thermique, retrait et fluage assimilables à une action statique au sens de l'Eurocode) sans création de joint sismique (pour une action dynamique avec une fréquence élevée). Toutefois, ce même document ne définit ni le type ni le contenu des justifications spéciales à apporter pour valider l'utilisation de ce procédé.

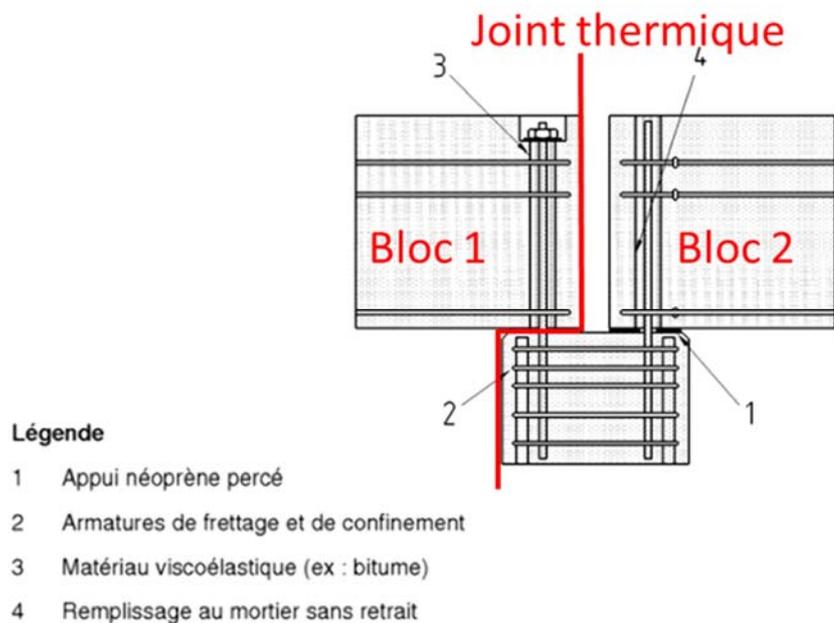


Figure 1 – Exemple d'un détail d'assemblage poteau-poutre sur joint de dilatation

2.1.2. Contexte du terrain : objections des contrôleurs

L'utilisation d'un assemblage avec un matériau viscoélastique (répondant à la problématique thermique et sismique) appelé \textcircled{M} a été adoptée pour un chantier de base logistique, de dimensions en plan 600 m * 150 m (structures de poteaux-poutres divisées en quatre blocs de 150 m * 150 m). La trame des travées est de 24 m * 12 m composées de poutres porteuses (24 m) et de pannes (12 m). Les poutres reposent sur des poteaux de section 50 cm * 50 cm et de hauteur 13 m. Les poteaux sont considérés comme encastrés en pied et articulés en tête. Tous les éléments sont en béton armé ou précontraint.

Le bureau de contrôle qui suivait l'affaire a souhaité obtenir des justifications pour valider l'utilisation du matériau viscoélastique de type bitume proposé par l'industriel dans les assemblages brochés en zone sismique. Des essais de chargements dynamiques cycliques ont alors été réalisés en laboratoire afin de valider le comportement du matériau et son adéquation avec l'usage en zone sismique.

2.1.3. Objectifs

L'objectif de cette étude est de définir les justifications nécessaires à apporter afin de pouvoir utiliser un matériau viscoélastique (cf. Figure 2 a.) dans un assemblage broché en zone sismique de bâtiments avec ossature à un niveau avec ou sans mezzanine.

L'objectif de l'utilisation d'un tel matériau est double selon la fréquence d'application d'un chargement :

- soit en laissant la possibilité à la broche du poteau de se déplacer librement à l'intérieur du fourreau de la poutre pour des charges de longues durées (ou instantanées mais de faibles fréquences leur permettant d'être assimilables à un chargement statique équivalent) permettant ainsi la libre dilatation des différentes parties de bâtiments (comme l'exemple des blocs 1 et 2 de la Figure 2 b. et c.) ;
- soit en bloquant le déplacement de la broche afin d'obtenir un fonctionnement d'ensemble (effet diaphragme) des différentes parties du bâtiments dans le cas d'actions dynamiques (avec des fréquences élevées) telles que le séisme (cf. exemples Figure 2 d. et Figure 2 e.).

La notion de faible fréquence d'un chargement comme celle du vent, du retrait, du fluage et de la température sous-entend que la période équivaut à plusieurs heures ou jours suivant le chargement. Ce n'est pas le cas d'un séisme où la période est faible (de l'ordre de la seconde) et donc la fréquence est élevée.

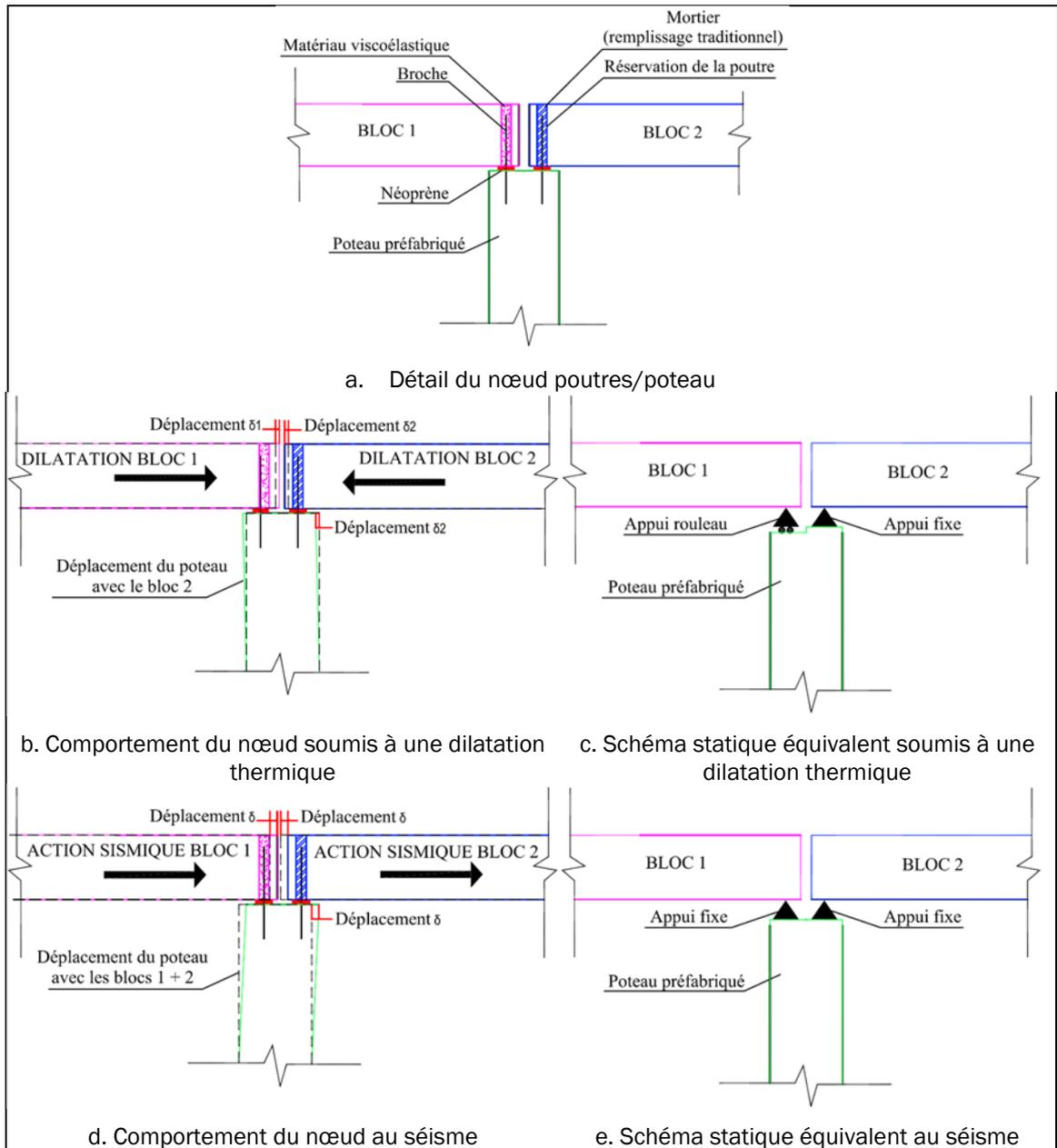


Figure 2 - Comportement du nœud poutres/poteau soumis à une dilatation thermique (ou toute autre déformation gênée) ou à un séisme

2.2. Domaine d'application

Le domaine d'application de la présente étude vise les bâtiments à un niveau dont le contreventement est assuré par des poteaux encastrés rigidement en pied dans des fondations. Les têtes de poteau sont liaisonnées à des poutres porteuses par des articulations linéaires ou des rotules. Le fonctionnement des bâtiments vis-à-vis des actions sismiques horizontales est schématisé Figure 3.

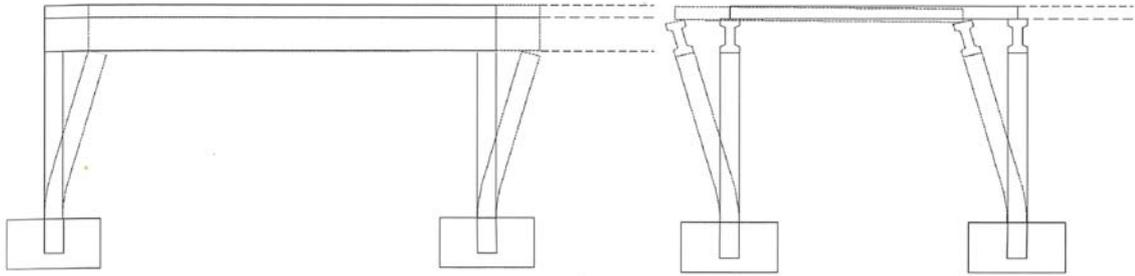


Figure 3 – Fonctionnement des bâtiments vis-à-vis des actions sismiques horizontales

Des mezzanines peuvent être créées sur une partie de la surface du bâtiment : elles reposent sur un système de poutres liaisonnées aux poteaux par des articulations ou des rotules.

Les poteaux participant au contreventement ne comportent pas de changement de section dans leur hauteur et sont continus depuis la fondation jusqu'à la toiture. Les bâtiments peuvent ainsi être considérés réguliers en élévation au sens de l'EN 1998-1 [1].

La régularité des bâtiments doit être recherchée dans la mesure du possible. Il convient que les structures aient des formes régulières en plan et en élévation.

Le déplacement des poteaux est identique par file de poutres ou par file de pannes. La vérification des éléments de contreventement s'effectue par file de poteaux dans les deux directions horizontales.

2.3. Quelques définitions

2.3.1. Joints parasismiques et de dilatations

Un joint parasismique a pour but d'éviter tout entrechoquement entre les corps de bâtiment qu'il sépare. Un joint de dilatation est un joint permettant les déplacements dus aux déformations thermiques sous des gradients de température, ou toute autre déformation gênée. L'espacement, vide de tout matériau, est en général plus important pour un joint parasismique que pour un joint de dilatation.

Un joint parasismique est un espace vide de tout matériau, présent sur toute la hauteur de la superstructure des bâtiments ou des parties de bâtiments qu'il sépare. Ses dimensions sont calculées en fonction des déformations possibles des constructions avec un minimum réglementaire recommandé de 4 cm (Clause 4.4.2.7 (2) NF EN 1998-1/NA) [2] de façon à permettre le déplacement des blocs voisins sans qu'ils rentrent en contact.

Dans la suite de l'étude, nous adoptons les simplifications suivantes :

- L'assemblage broché rempli avec un matériau viscoélastique de type bitume sera dit « assemblage avec joint viscoélastique » ;
- L'assemblage broché rempli avec du mortier anti-retrait sera dit « assemblage traditionnel ».

2.3.2. Comportement viscoélastique

D'un point de vue rhéologique, différents comportements pour un solide sont identifiables. Certains exemples sont présentés dans la Figure 4.

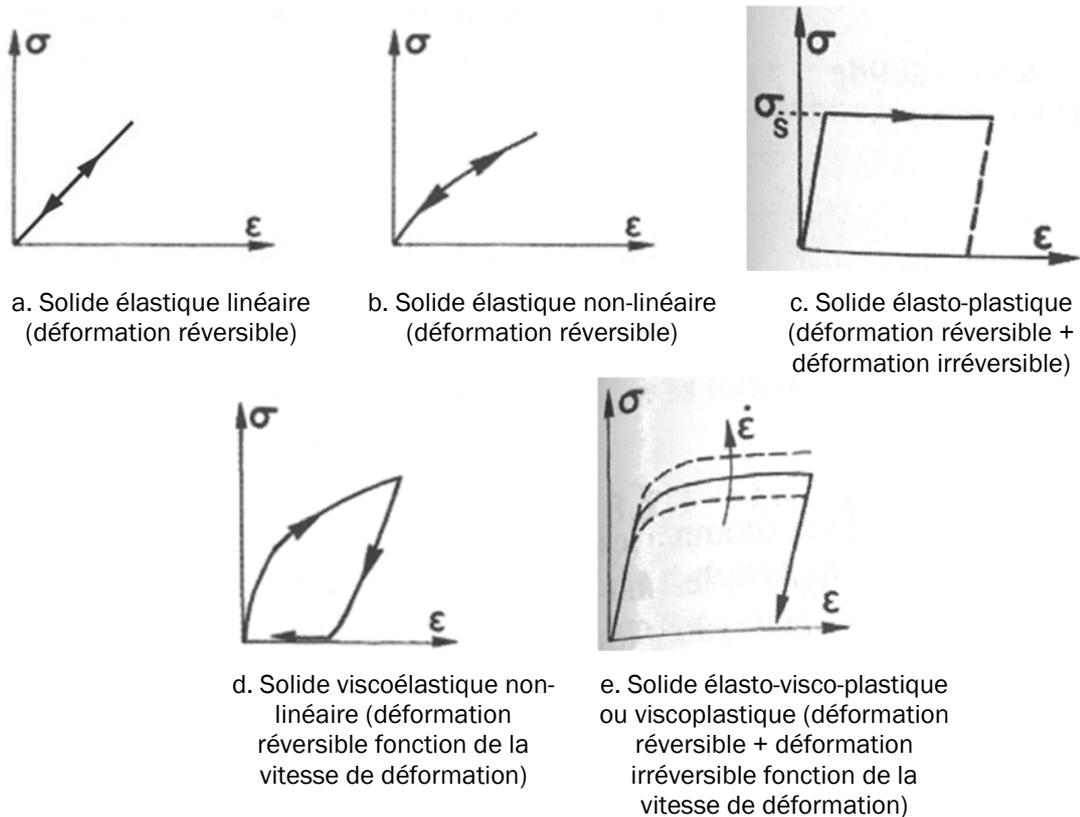


Figure 4 – Schémas rhéologiques d'un solide

En rhéologie, le comportement d'un matériau viscoélastique est l'intermédiaire entre celui d'un solide élastique de Hooke idéal symbolisé par un ressort de module d'élasticité E et celui d'un liquide visqueux pur de Newton symbolisé par un amortisseur de viscosité η (cf. Figure 5).

Le module d'élasticité E est la constante qui relie la contrainte (traction ou compression) σ et la déformation ϵ d'un matériau élastique. Le rapport entre la contrainte appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. La déformation élastique est réversible jusqu'à la limite d'élasticité, le matériau retrouve sa position initiale lorsque les forces qui lui sont appliquées ne s'exercent plus. Au-delà de cette limite, le matériau se plastifie et les déformations ne sont plus réversibles.

Un fluide de Newton est un fluide dont la contrainte de cisaillement τ suit une loi linéaire par rapport à la vitesse de déformation $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$. La constante de proportionnalité est appelée viscosité dynamique η . Un fluide parfaitement visqueux se déforme progressivement et linéairement en fonction du temps, la déformation visqueuse est irréversible, cela signifie que le fluide continue de s'écouler indépendamment des forces extérieures qui agissent sur lui. La viscosité peut être vue comme la résistance à l'écoulement des différentes couches d'un fluide les unes sur les autres. Lorsque la viscosité augmente, la capacité d'un fluide à s'écouler diminue. Plus la viscosité est faible (ou proche de zéro), plus la force pour faire déplacer le fluide est faible.

A noter que la différence de comportement entre un solide de Hooke et un fluide de Newton est illustrée sur la Figure 5. L'application d'une force constante sur un solide de Hooke conduit à un état de déformation et de contrainte constant alors que l'application de cette même force sur un fluide de Newton conduit à une vitesse de déformation constante.

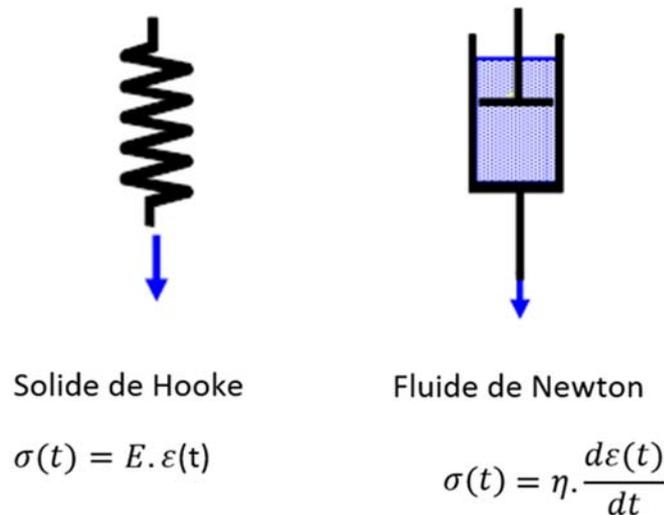


Figure 5 - Lois de comportements d'un solide de Hooke et d'un liquide de Newton

- σ : contrainte (Pa)
- E : module d'élasticité (Pa)
- ε : déformation (sans unité)
- η : viscosité dynamique (Pa.s)
- $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$: gradient de vitesse (s⁻¹)

L'élasticité d'un matériau pour un solide traduit sa capacité à conserver et restituer de l'énergie après déformation. La plasticité d'un matériau traduit sa capacité à dissiper de l'énergie.

Le comportement viscoélastique d'un solide est la combinaison du comportement élastique d'un solide et celui visqueux d'un fluide. La réponse d'un matériau viscoélastique dépend de l'intensité de la contrainte ou de la déformation imposée, de la température ainsi que de la vitesse de sollicitation ou d'application de la charge (fréquence ou période de la sollicitation).

2.4. Etude d'un cas particulier

2.4.1. Analyse des rapports d'essais [4], [1], [6]

2.4.1.1. Description des essais

Des essais de chargements dynamiques ont été réalisés en laboratoire permettant de caractériser le comportement du matériau viscoélastique en lui imposant une sollicitation sinusoïdale (force ou déplacement), et en mesurant une réponse (déplacement ou force).

Ci-dessous un détail d'une liaison brochée poteau-poutre où la réservation présente dans la poutre est remplie avec du matériau viscoélastique pour être solidaire de la broche ancrée dans le poteau.

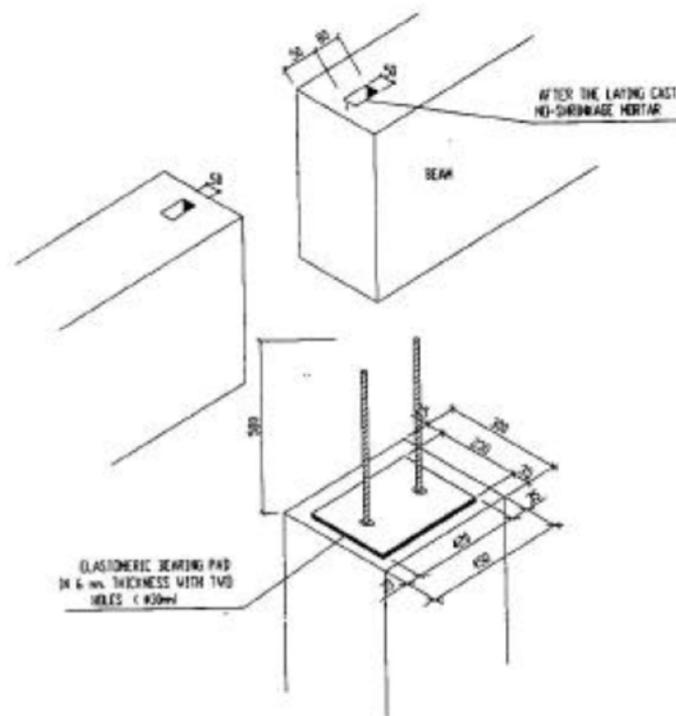


Figure 6 – Détails d'une liaison poteau-poutre sur une structure préfabriquée en béton armé [7]

Pour chaque essai, il a été effectué préalablement le remplissage en bitume des boîtes de fixation prévues pour l'assemblage poteau-poutre.

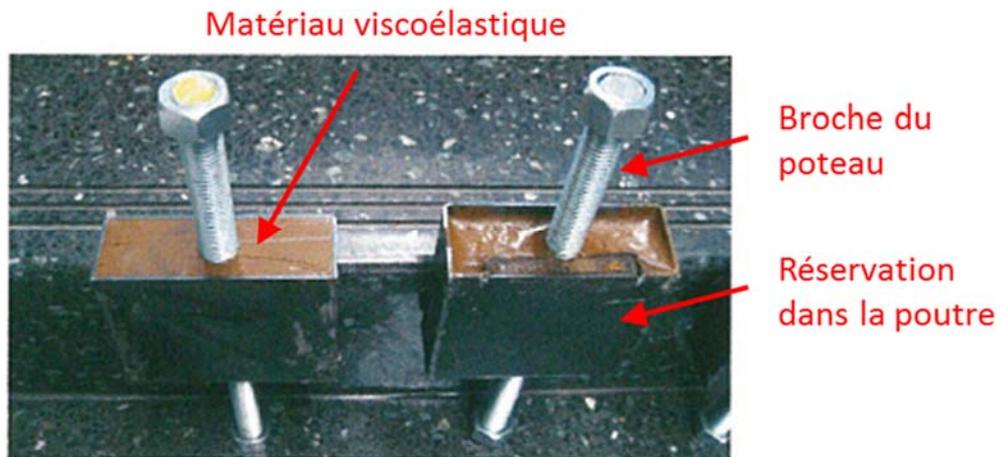


Figure 7 – Boîte de fixation remplie de bitume

Une tige filetée est centrée sur la boîte et dépasse de part et d'autre. La boîte est maintenue dans le sens d'application de la sollicitation et subit des sollicitations sinusoïdales pendant 60 secondes en faisant varier la fréquence.



Figure 8 – Photo du dispositif d'assemblage broché dans la machine d'essai

Différents types d'essais ont été réalisés en modifiant notamment le type de chargement (déplacement imposé ou force imposée) ainsi que la fréquence (0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz) comme par exemple :

- Déplacement imposé ± 15 mm / fréquence 0,5 Hz
- Déplacement imposé ± 15 mm / fréquence 1,0 Hz
- Déplacement imposé ± 15 mm / fréquence 2,0 Hz
- Force imposée ± 7 kN / fréquence 0,5 Hz
- Force imposée ± 7 kN / fréquence 5 Hz

2.4.1.2. Extrait des résultats d'essais

Fréquence	Pic de force	Force stabilisée	Déplacement résiduel
0,5 Hz	15,2 kN	+4,25 kN/-2,45 kN	5 mm
1,0 Hz	17,6 kN	+2,70 kN / 3,20 kN	6 mm
2 Hz	21,7 kN	+2,65 kN / 2,60 kN	7 mm

Tableau 1 – Résultats des essais avec déplacement imposé ± 15 mm

Fréquence	Déplacement stabilisé	Déplacement résiduel
0,5 Hz	+17,50 mm/-19,06 mm	10 mm + détérioration du matériau
5 Hz	+6,24 mm/-6,26 mm	-

Tableau 2 – Résultats des essais avec force imposée ± 7 kN

2.4.1.3. Analyse des résultats d'essais

Pour les essais menés en déplacements imposés, la réponse du matériau pour la fréquence 0,5 Hz présente une cassure juste après la phase élastique linéaire (cf. cercle rouge Figure 9). Cette cassure manifeste l'effet viscoélastique du matériau. La pente en traits pointillés jaunes de la Figure 9 représente la raideur globale du matériau viscoélastique pour le premier cycle (phase élastique linéaire puis viscoélastique).

L'application de la sollicitation (déplacement) étant plus lente que pour les essais avec une fréquence de 1 Hz ou 2 Hz, le matériau a eu le temps de « réagir ». La rupture de la pente n'est pas attribuée à la plastification du matériau puisque la rigidité reste constante pour tous les cycles au cours du temps (cf. la pente en vert Figure 9).

A noter sur la Figure 10 que la viscoélasticité est observable via le déphasage entre les amplitudes maximales du déplacement et de la force.

Pour 1 Hz, la cassure décrite précédemment est moins prononcée (Figure 11). Pour 2 Hz, on ne distingue pas de cassure sur la phase ascendante du chargement du matériau (Figure 12) et on remarque que très peu le comportement visqueux du matériau, il s'agit d'un comportement élastique. Cependant, sur la phase descente, on distingue une cassure qui manifeste l'effet viscoélastique.

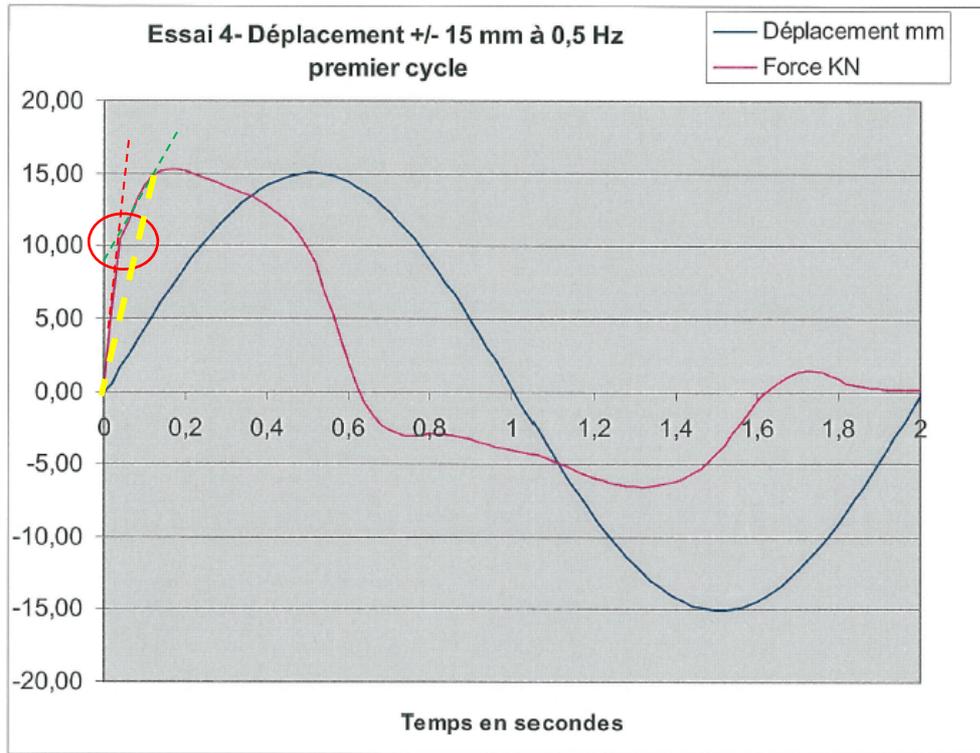


Figure 9 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 0,5 Hz

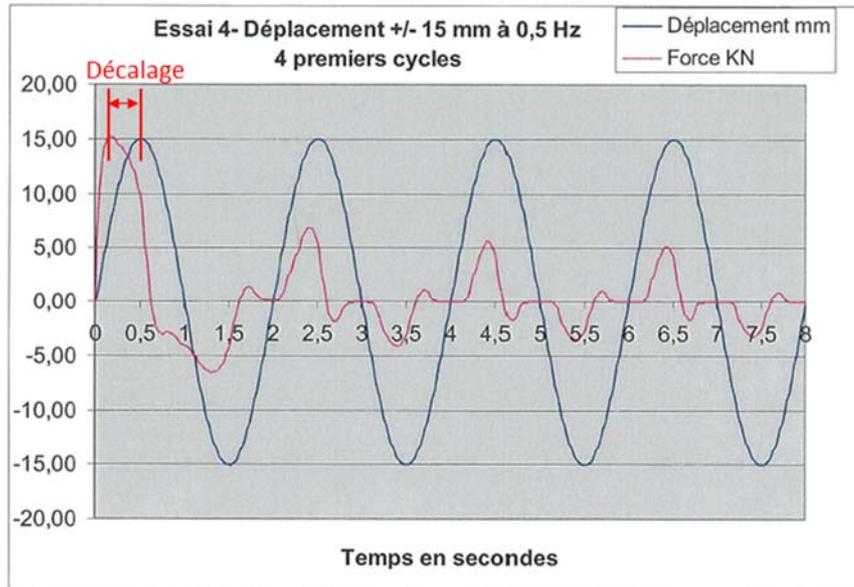


Figure 10 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 0,5 Hz – mise en évidence de la raideur au cours des cycles

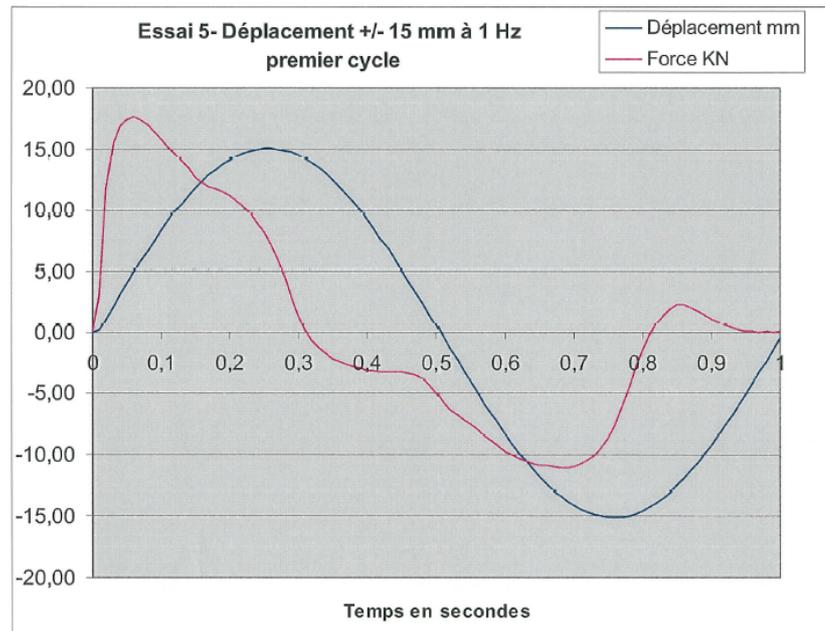


Figure 11 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 1,0 Hz

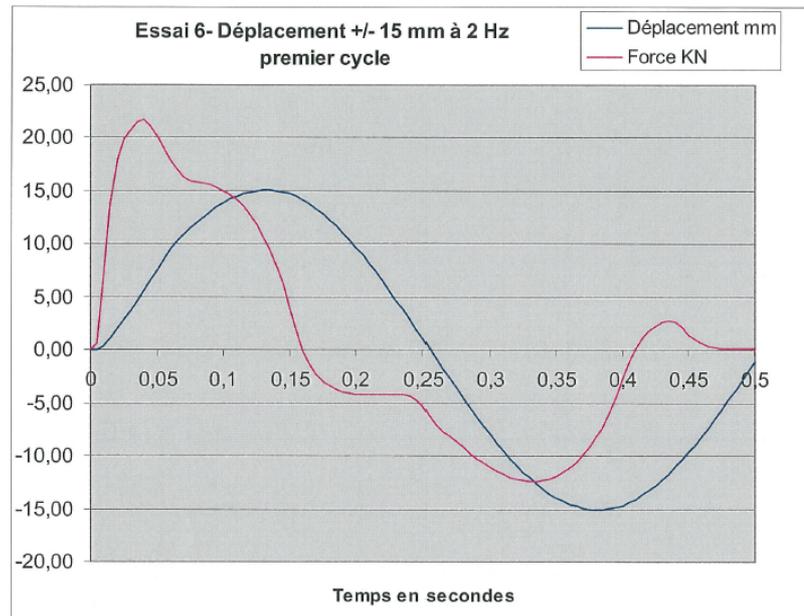


Figure 12 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 2 Hz

Les observations post essais ont pour but de vérifier le caractère viscoélastique du matériau. Sous l'intensité de la charge que doit reprendre la broche et avec une fréquence d'excitation représentative de la fréquence propre du bâtiment, le matériau doit se comporter comme un matériau viscoélastique parfait, sans intrusion dans le domaine plastique (absence de déformation irréversible). Ce dernier doit donc revenir à sa position initiale après l'essai. Un vide entre la broche et le matériau peut se créer pendant l'essai mais il doit disparaître quelque temps après la fin de l'essai (sous un délai de 24h). Il ne devrait pas y avoir de déformation résiduelle, synonyme de plastification du matériau.

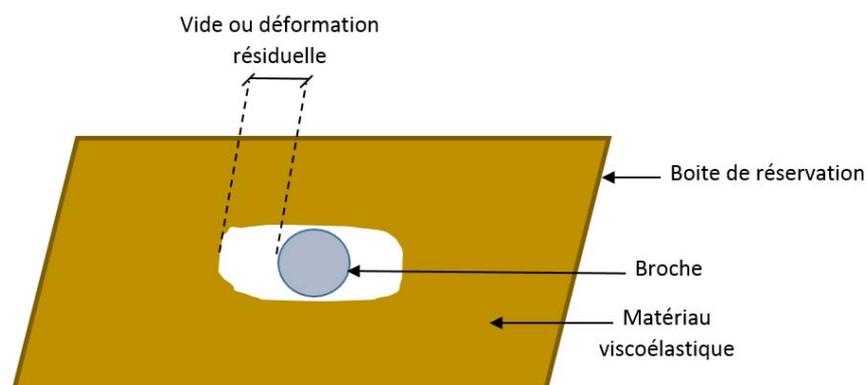


Figure 13 – Schématisation du vide créé entre la broche et le matériau

Les observations ont pour but également de vérifier la non plastification du matériau viscoélastique. Il ne devrait pas y avoir de forte différence de raideur dans la réponse du matériau entre le début et la fin des cycles de sollicitations (Figure 10). Une différence de raideur serait le signe d'une plastification du matériau. A noter que dans le cadre d'une action accidentelle de type sismique, une légère introduction du comportement du matériau viscoélastique dans le domaine plastique pourrait être autorisée. Toutefois, la difficulté de borner cette introduction nous a conduit sécuritairement à ne pas la prendre en compte dans la suite du rapport. Par contre, pour des sollicitations de types thermique ou vent avec des fréquences relativement faibles, aucune plastification ne doit être acceptée pendant des essais complémentaires à mettre en place pour ce type de justification.

En effet, l'absence de plastification constatée lors des essais pour des charges appliquées à fréquences élevées permet d'élargir cette conclusion à des charges thermiques à fréquences relativement faibles pour lesquelles aucune plastification ne peut être acceptée (au moins à l'ELS).

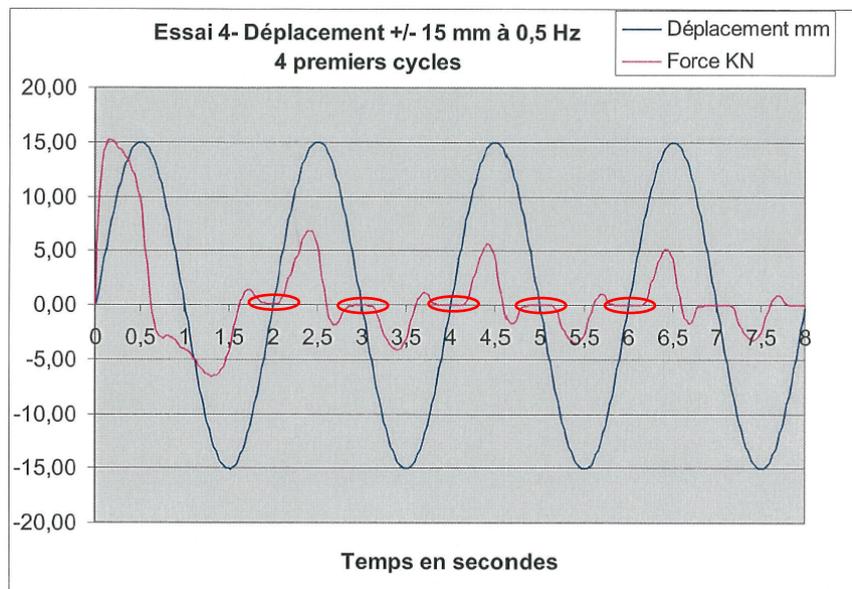


Figure 14 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 0,5 Hz – mise en évidence du vide

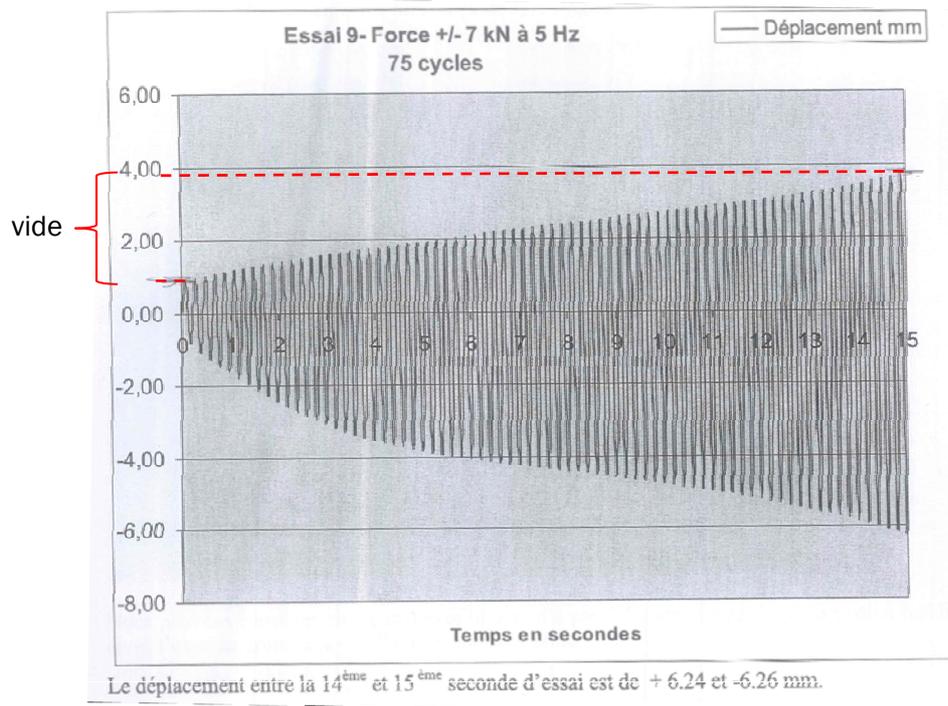


Figure 15 - Essai avec force imposée +/- 7 kN - fréquence 5 Hz - mise en évidence du vide

L'oscillation de la broche dans le matériau viscoélastique crée un certain vide (entre le matériau et la broche). Plus le vide est important, plus la broche peut se déplacer librement dans la réservation. Les zones entourées en rouge de la Figure 14, correspondent aux temps où l'effort repris par la broche est nul. Le vide peut également être matérialisé dans les essais pilotés en force. La différence entre le déplacement du premier et le dernier cycle nous donne la valeur du vide ainsi créé (cf. Figure 15).

Il y a donc une forte influence de la fréquence ou période propre d'excitation de la broche dans la réponse du matériau viscoélastique. Pour des cycles thermiques, la fréquence de la sollicitation est très faible et la charge est assimilée selon l'Eurocode à une charge statique équivalente.

Si la fréquence de la sollicitation est très forte (supérieure à 2 Hz), il y a peu d'effet viscoélastique ressenti dans la réponse du matériau dans la phase ascendante. Le caractère viscoélastique « freine » légèrement le retour à la situation initiale ou de repos de la broche. Comme les cycles sont plus rapides pour la fréquence 2 Hz, le matériau se retrouve rapidement de nouveau sollicité par un cycle, ce qui peut justifier plus de vide créé pour cette fréquence (cf. Tableau 1).

Si le vide créé (cf. Figure 13) devient conséquent (de l'ordre de 4 cm) pour des faibles fréquences représentatives du bâtiment étudié au séisme, le joint viscoélastique devient pratiquement un joint parasismique après la première excitation. Le système d'assemblage avec joint viscoélastique qui devait rendre solidaires les deux blocs ne fonctionne plus. Les deux blocs se comportent alors de manière indépendante.

Tout dépendra donc du rapport entre le vide (entre la broche et le matériau viscoélastique) créé à la fin des cycles par l'essai et le déplacement en tête des poteaux calculé dans un modèle numérique ou analytique de la structure ne prenant pas en compte l'assemblage avec joint viscoélastique (structure calculée sans joint parasismique). Cette donnée est fournie par le bureau d'études qui est en charge de concevoir l'ouvrage.

L'utilisation du matériau viscoélastique doit permettre soit le libre déplacement de la poutre pour une sollicitation de faible fréquence ou à basse fréquence (thermique) ou soit de bloquer celle-ci pour une charge instantanée à haute fréquence (de type sismique ou de vent).

Pour cela, il faut vérifier expérimentalement que le caractère viscoélastique se manifeste très peu pour une intensité de charge et une fréquence d'application représentatives du bâtiment étudié et qu'il n'y ait pas de dégradation du matériau (absence de plastification du matériau à la fin des cycles, signe de plastification) ni un vide trop important créé entre la broche et le matériau viscoélastique.

L'importance du vide se quantifiera en comparant ce vide obtenu à la fin des essais avec les déplacements en tête des poteaux du modèle numérique global (sans assemblage avec joint viscoélastique). Si le vide est supérieur au déplacement des poteaux, il pourra être assimilé à un joint sismique.

Dans l'étude DS002 « Étude sismique sur les planchers à poutrelles avec rupteurs thermiques – Exploitation des résultats et étude numérique de la maison simple – 330.l » [9] réalisée par le CERIB et le CSTB, l'influence de l'introduction de rupteurs dans la répartition des efforts sismiques sur les murs de contreventement par rapport à un plancher traditionnel a été étudiée et le critère de 10 % d'écart entre les deux modèles (structure avec rupteurs et structure traditionnelle sans rupteurs) utilisé. Ce critère trouve sa source au § 4.3.1(4) de la NF EN 1998-1.

Ainsi, si la distribution des efforts en pied de poteaux est inférieure à 10 % entre le modèle traditionnel et le modèle avec joint viscoélastique, le dimensionnement initial du bâtiment n'est pas remis en cause.

2.4.2. Modélisation numérique

Toujours dans la continuité de ce cas pratique et pour mieux comprendre le comportement de la structure en présence d'un joint viscoélastique, une étude numérique est menée. Elle va permettre d'évaluer l'influence du déplacement résiduel créé à la fin des cycles sur la répartition des efforts dans les poteaux d'une structure contenant un assemblage rempli avec le matériau viscoélastique [®] (précédemment testé) par rapport à une structure avec un assemblage traditionnel. Plusieurs modèles numériques réalisés avec le logiciel ANSYS ont permis d'étudier l'impact de l'existence d'un tel assemblage sur la répartition des efforts au niveau des poteaux de la structure.

2.4.2.1. Hypothèses

2.4.2.1.1. Les caractéristiques de la structure

Les données de cet exercice sont un cas d'école. La structure principale est constituée d'un portique hyperstatique de quatre portées de 25 m chacune. Les poutres, de section carrée 50 * 50 cm reposent sur cinq poteaux (de gauche à droite sur la Figure 16, P1 à P5) carrés de section 50 * 50 cm. Les poteaux modélisés par des éléments finis de type poutre sont encastés en pied et articulés en tête. L'articulation correspond à l'assemblage broché classique, sans matériau viscoélastique. Les poutres sont modélisées comme des barres avec une raideur en traction/compression de :

$$k_{poutre} = \frac{E.S}{L} = \frac{37000 \times 500^2 \times 1000}{25000} = 3,8.10^8 N.m^{-1}$$

Avec :

- E : le module d'Young du béton
- S : la section de la poutre
- L : la longueur de la poutre

Le béton est de classe C50/60 avec $E_{cm} = 37 \text{ GPa}$ pour les structures préfabriquées de ce type. Comme le préconise la NF EN 1998-1, la rigidité des poteaux en béton armé est divisée par deux ($E_{cm}/2$) pour prendre en compte la fissuration. Dans l'hypothèse de poteaux précontraints, la rigidité aurait été égale à $0.75 \times E_{cm}$.

Chaque poutre est affectée d'une masse ponctuelle de 42 151 kg (16.54 kN/ml).

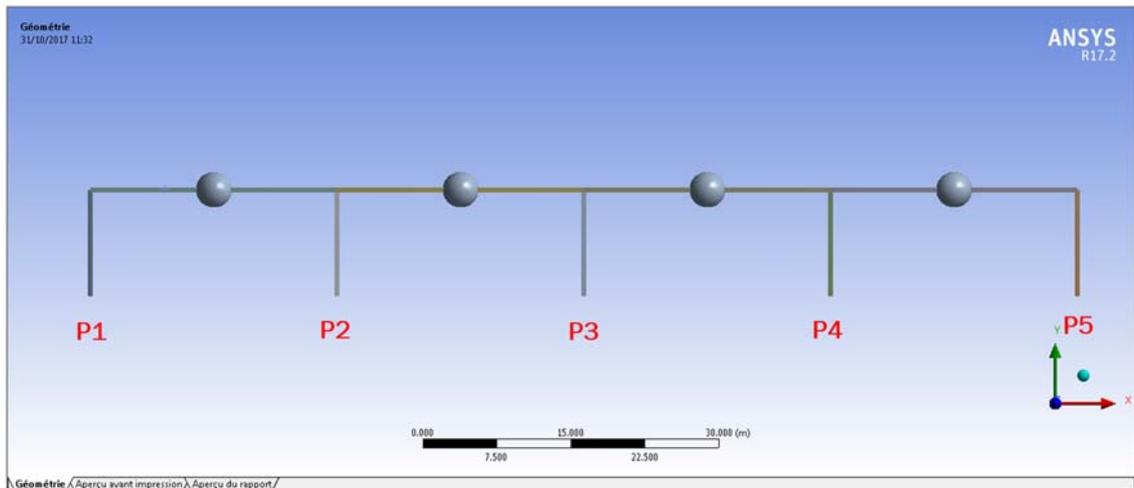


Figure 16 – Schéma de la structure étudiée et modèle de référence

Pour étudier cette structure au séisme, différents calculs modaux-spectraux conformes à la NF EN 1998-1 ont été réalisés.

2.4.2.1.2. Le spectre de réponse

Le spectre de réponse qui est utilisé est basé sur la NF EN 1998-1 [1] accompagné de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié [8].

Les différentes hypothèses pour construire ce spectre (Figure 17) sont les suivantes :

- Zone de sismicité : 2 ;
- Accélération au sol : $a_g = 0,70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- Catégorie d'importance du bâtiment : II ;
- Coefficient d'importance du bâtiment : $\gamma_I = 1,0$;
- Classe de sol : C ;
- Coefficient de sol : $S = 1,50$;
- $T_B = 0,06 \text{ s}$;
- $T_C = 0,40 \text{ s}$;
- $T_D = 2,00 \text{ s}$.

Note : Ce cas théorique (zone de sismicité 2 et catégorie d'importance du bâtiment II) selon la réglementation française actuelle n'aurait besoin d'aucune exigence parasismique.

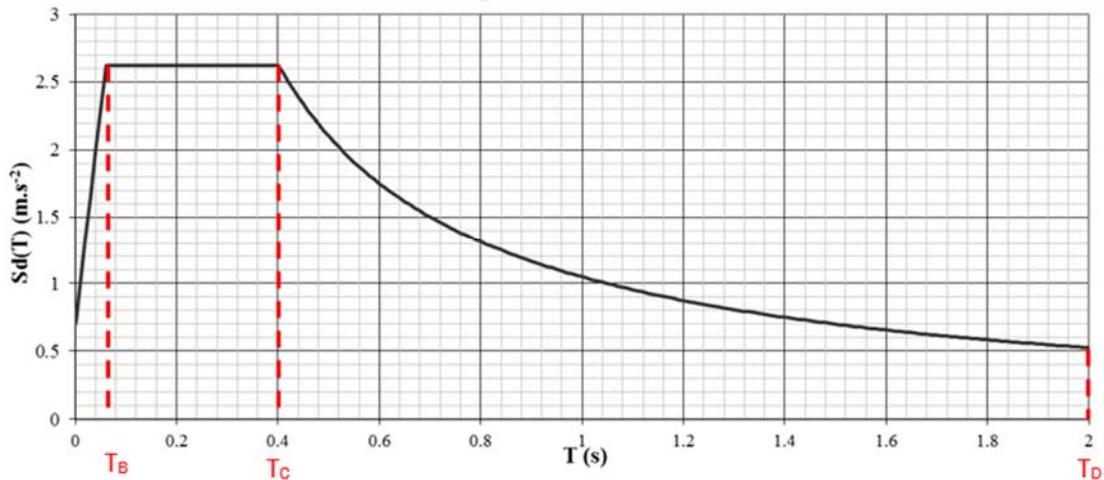


Figure 17 – Spectre réglementaire de réponse utilisé

2.4.2.2. Les différents modèles étudiés

2.4.2.2.1. Modèle 1 ou modèle de référence

Dans ce premier modèle, la structure est composée des quatre travées de poutres reposant sur les cinq poteaux (cf. Figure 16). Ce premier assemblage ne dispose pas de joint viscoélastique. Cette configuration sans joint va servir de base pour de futures comparaisons avec les modèles suivants plus élaborés. Comme présenté par la suite, l’effort en pied de chaque poteau pour ce modèle est égal à 11,5 kN et sa fréquence propre de 0,4 Hz (2,47 s.).

2.4.2.2.2. Modèle 2

Dans ce deuxième modèle, la structure est composée seulement de deux poutres reposant sur deux poteaux P1 et P2 (cf. Figure 18) et d’un appui simple supportant le poids de la deuxième poutre. Cette configuration représente la partie gauche du bâtiment (cf. Figure 16) qui sera séparée de la partie de droite par le joint viscoélastique. Elle permet d’aider à la compréhension du système en se plaçant dans la situation où le joint viscoélastique serait remplacé par du vide, comme dans le cas d’un joint parasismique.

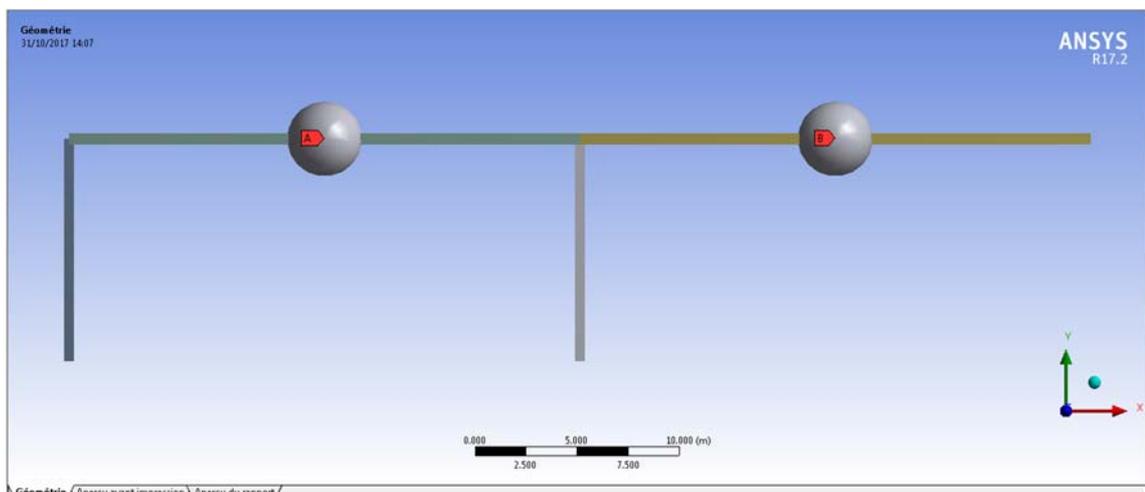


Figure 18 – Modèle 2 avec P1, P2

2.4.2.2.3. Modèle 2 bis

Ce modèle (Figure 19) a été défini pour les mêmes raisons que le modèle 2. Il permet d'étudier la partie de droite du bâtiment composée des 2 dernières poutres et des trois poteaux P3, P4, P5 (cf. Figure 16).

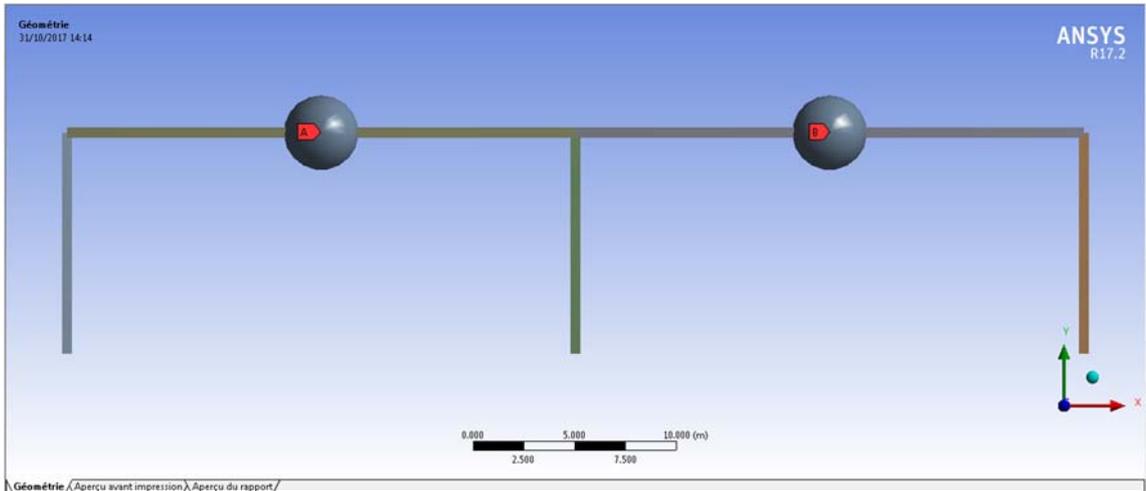


Figure 19 – Modèle 2 bis avec P3, P4, P5

2.4.2.2.4. Modèle 3

Ce modèle reprend l'ensemble de la structure (4 poutres et 5 poteaux) en rajoutant des raideurs ponctuelles (représentées par les rectangles rouges sur la Figure 20) simulant des réservations remplies de mortier C90/105 d'une dimension de 40*80*120 mm (assemblage traditionnel). La raideur de ces réservations (2 réservations par liaison) agissant sur la tige filetée centrée, calculée à partir de l'exemple de la Figure 21, est de :

$$k = \frac{ES}{L} = \frac{44000 * 40 * 120}{(80/2)} * 2 = 10.56 \text{ e9 N/m}$$

Ce modèle va permettre notamment d'observer si il est nécessaire ou non de modéliser localement ces réservations par rapport au modèle de référence.

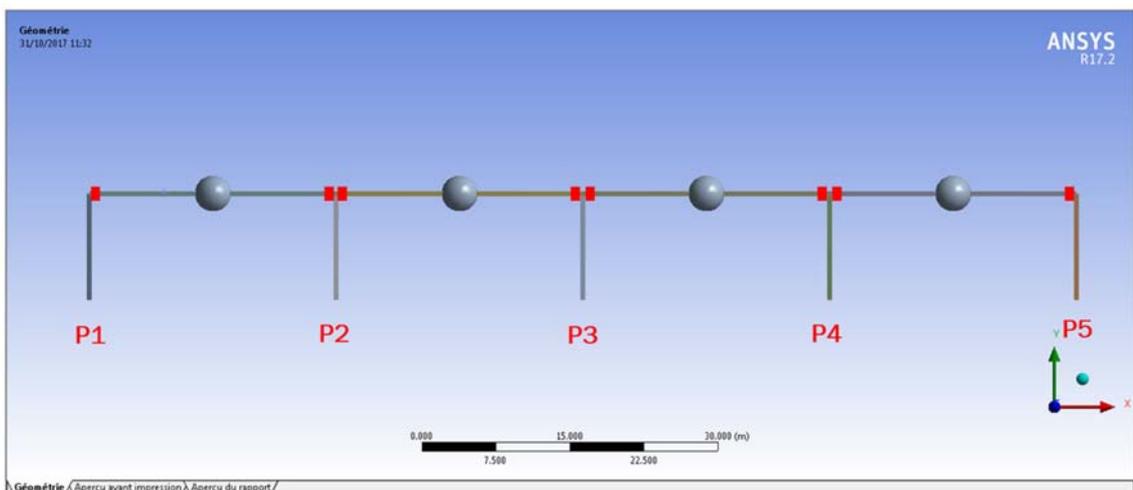


Figure 20 – Modèle 3

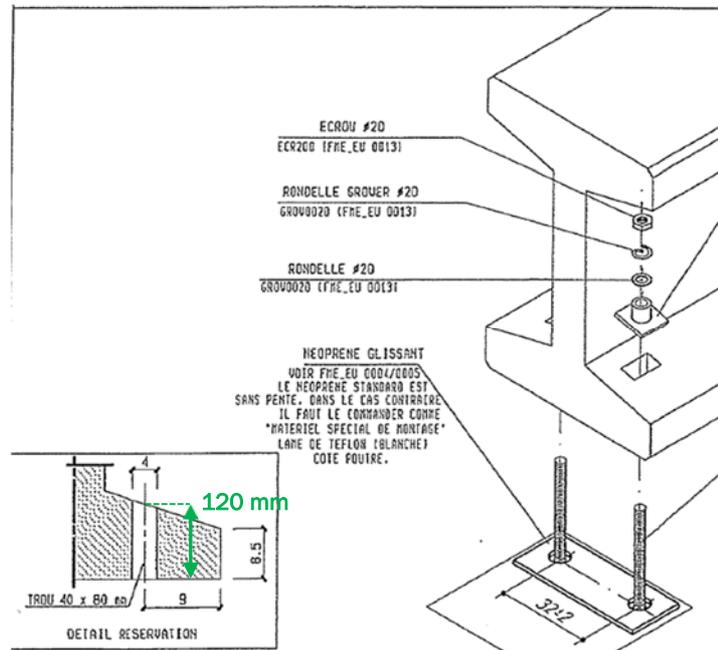


Figure 21 – Exemple de réservation pour une liaison poteau-poutre (2 réservations par liaison)

2.4.2.2.5. Modèle 4

Ce modèle est quasi-identique au modèle 3. La différence se fait au niveau du poteau 3 où la réservation précédemment remplie de mortier est remplacée par du bitume (représenté par un rectangle vert sur la Figure 22) afin d'intégrer le fonctionnement d'un joint viscoélastique dans la structure.

La raideur de ce joint en bitume a été calculée à partir de l'essai, Figure 23, où une force imposée de +/- 7 kN est appliquée à une fréquence de 0,5 Hz (fréquence correspondante quasiment à la fréquence propre du modèle de référence 0,4 Hz). A la fin de cet essai de 60 s., un déplacement moyen de 18,28 mm $((17.5+19.06)/2)$, cf. Figure 23) de la tige filetée dans la réservation est obtenu, soit une raideur du bitume calculée en fin de cycle de $k=7e^3/0.01828=382932$ N/m.

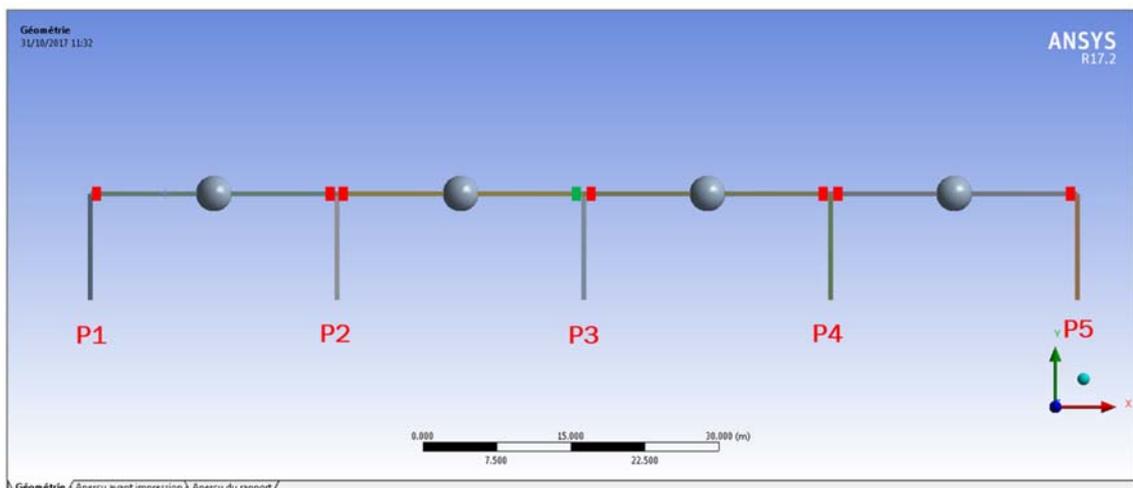


Figure 22 – Modèle 4

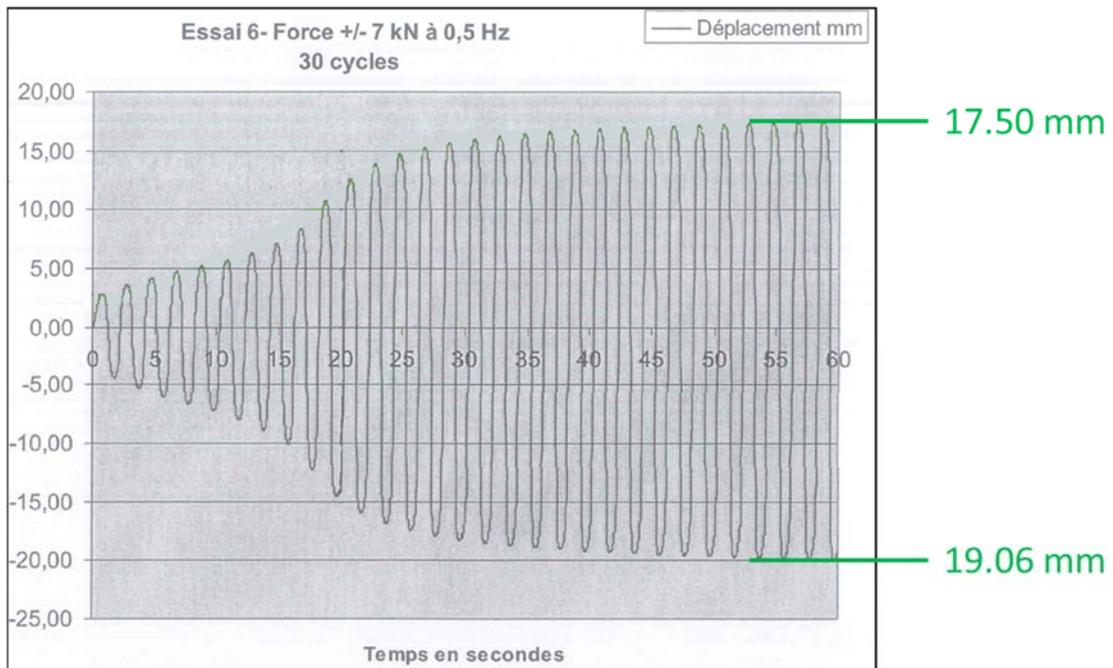


Figure 23 - Essai avec force imposée +/- 7 kN - fréquence 0.5 Hz

2.4.2.2.6. Modèle 5

Ce modèle est quasi-identique au modèle de référence avec comme seule différence, l'introduction d'un joint viscoélastique au niveau du poteau 3 (représenté par un rectangle vert sur la Figure 24). Ce joint a la même raideur que celui introduit dans le modèle 4 ($k=382932$ N/m).

A noter dans cette étude qu'un seul joint viscoélastique (une réservation) a été introduit dans ce modèle. Or dans certains cas, il existe deux réservations (donc 2 broches) par liaison poteau-poutre comme le montre l'exemple de la Figure 21. La valeur de l'effort dans chaque poteau du modèle de référence étant connue tout comme la fréquence propre du bâtiment (cf. § 2.4.2.2.1), des essais sismiques sur le joint viscoélastique avec une force imposée de 2,88 kN (11,5 kN divisé par quatre réservations présentes dans chaque poteau) à la fréquence propre du bâtiment (0,4 Hz) devront être réalisés pour connaître la raideur du matériau.

Le but de cette étude n'étant pas de caractériser un matériau mais de définir un protocole de caractérisation du matériau et de validation d'une structure composée de ce joint viscoélastique en zone sismique, il est décidé d'exploiter les essais présentés dans le paragraphe 2.4.1.

Toutefois cette décision d'exploiter ces essais est sécuritaire car la réponse du matériau, et notamment sa raideur, est fortement dépendante de la force imposée lors des essais. Dans le cas d'une validation réelle de ce bâtiment avec ce matériau M , il serait judicieux de réaliser de nouveaux essais avec les bonnes données (fréquence propre et force) afin de ne pas pénaliser excessivement la réponse du matériau et donc son utilisation pour un nouveau projet.

Dans la suite, l'essai n°6 a donc été conservé comme base se rapprochant le plus des caractéristiques de ce bâtiment (force imposée de 7 kN à 0,5 Hz). Ainsi une version de ce modèle avec une raideur du joint numérique multipliée par deux ($k=382\ 932*2=765864$ N/m) a également été étudiée par la suite pour tenir compte de l'existence de 2 broches (raideur multipliée par deux) dans la réalité.

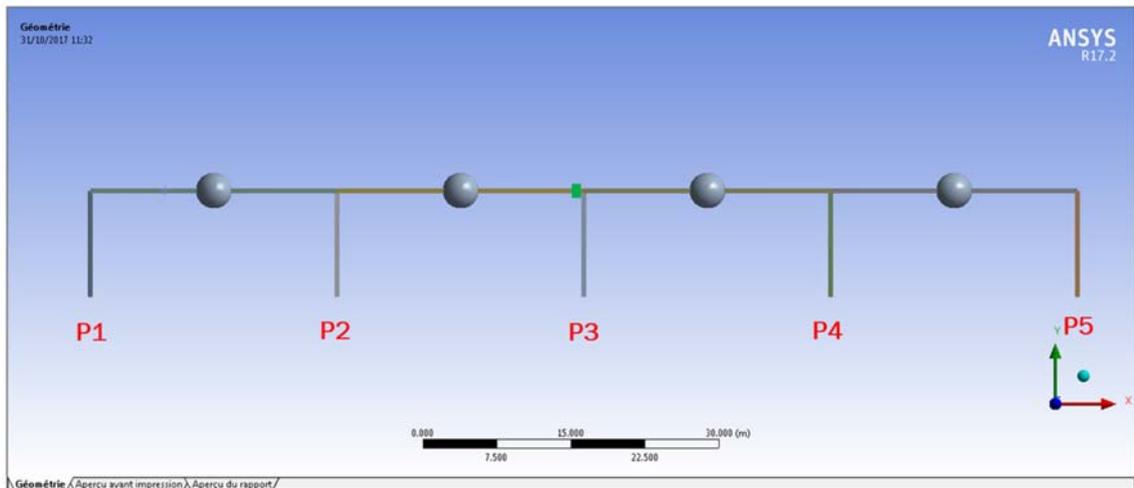


Figure 24 - Modèle 5

2.4.2.3. Résultats et interprétation

L'ensemble des modèles présentés précédemment a été étudié via un calcul modal (plus de 99,9 % de la masse a été sollicitée pour chaque calcul) puis un calcul spectral permettant de combiner les modes via la méthode CQC (Complete Quadratic Combination).

Différents résultats ont été réunis dans le Tableau 3 :

- 1^{ère} colonne : Indique le numéro du modèle étudié en relation direct avec les modèles présentés dans les paragraphes 2.4.2.2.1 à 2.4.2.2.6.
- 2^{ème} colonne : Indique la valeur de raideur du joint utilisée dans ce calcul. Cette colonne concerne uniquement les modèles n° 4 et n° 5.
- 3^{ème} colonne : Dans cette étude nous nous intéressons à un portique de référence du bâtiment (structure 2D, cf. Figure 16) où les modes prépondérants seront des modes de translations d'ensemble ou de sous ensemble suivant la direction X. Cette colonne indique donc le nombre de modes prépondérants obtenus lors de l'analyse modale suivant la direction X.
- 4^{ème} colonne : Chaque mode obtenu suivant la direction X est rattaché à un pourcentage de masse effective. Cette colonne indique sa valeur.
- 5^{ème} colonne : Chaque mode obtenu suivant la direction X est rattaché à une période propre. Cette colonne indique sa valeur.
- 6^{ème} colonne : A partir de l'analyse modale et du spectre de réponse définis au paragraphe 2.4.2.1.2, un calcul spectral est réalisé en combinant les modes. Cette colonne précise le résultat de la force obtenue dans le joint viscoélastique (numériquement modélisé par un ressort). Cette colonne concerne uniquement les modèles n° 4 et n° 5.
- 7^{ème} colonne : L'allongement ou le raccourcissement (un calcul spectral perd le signe de tous les résultats obtenus) est déduit de la force obtenue colonne n° 6 et de la raideur du joint utilisée colonne n° 2. Cette colonne concerne uniquement les modèles n° 4 et n° 5.

- 8^{ème} colonne : Elle précise le type de résultats pour chaque ligne des colonnes 9 à 13. Deux types de résultats sont présentés :
 - La force obtenue en pied de chaque poteau ;
 - Le déplacement obtenu en tête de chaque poteau ;
 - Pour chaque force et déplacement de chaque modèle, un écart en pourcent est calculé par rapport aux résultats de référence du modèle 1. Un écart positif signifie que la grandeur observée du modèle étudié est supérieure à celle du modèle référence, tandis qu'un écart négatif signifie que la grandeur observée du modèle étudié est inférieure à celle du modèle référence.

- 9^{ème} à 13^{ème} colonnes : Comme indiqué dans le paragraphe ci-dessus (8^{ème} colonne), des informations sur les efforts et les déplacements dans chaque poteau numéroté de P1 à P5 (cf. Figure 16) sont renseignées dans ces 5 colonnes.

N° Modèle	Raideur du joint en N/m	Résultats calculs modaux			Résultats calculs spectraux CQC							
		Nbre modes fondamen- taux direction X	% de masse effective par mode	Période en s.	Force dans le joint [N]	Allonge- ment ou raccourcis- sement [cm]	Type de résultats	P1	P2	P3	P4	P5
1		1	99.99%	2.47			Force [N]	11536 0.0%	11536 0.0%	11536 0.0%	11536 0.0%	11536 0.0%
							Déplacement [m]	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%
2		1	99.99%	2.77			Force [N]	11536 0.0%	11536 0.0%	-100.0%	-100.0%	-100.0%
							Déplacement [m]	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	-100.0%	-100.0%
2bis		1	99.99%	2.26			Force [N]	-100.0%	-100.0%	11536 0.0%	11536 0.0%	11536 0.0%
							Déplacement [m]	-100.0%	-100.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%
3		1	99.99%	2.47			Force [N]	11535 0.0%	11535 0.0%	11536 0.0%	11535 0.0%	11535 0.0%
							Déplacement [m]	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%
4	382 932	2	98.10%	2.51	6931	1.8	Force [N]	12886 11.7%	12887 11.7%	9909 -14.1%	9909 -14.1%	9909 -14.1%
			1.89%	1.59			Déplacement [m]	0.059 11.7%	0.059 11.7%	0.046 -14.1%	0.046 -14.1%	0.046 -14.1%
5	382 932	2	98.10%	2.51	6932	1.8	Force [N]	12887 11.7%	12887 11.7%	9909 -14.1%	9909 -14.1%	9909 -14.1%
			1.89%	1.59			Déplacement [m]	0.059 11.7%	0.059 11.7%	0.046 -14.1%	0.046 -14.1%	0.046 -14.1%
5	225 000	2	95.04%	2.54	6726	3.0	Force [N]	13444 16.5%	13444 16.5%	9111 -21.0%	9111 -21.0%	9111 -21.0%
			4.96%	1.81			Déplacement [m]	0.062 16.5%	0.062 16.5%	0.042 -21.1%	0.042 -21.1%	0.042 -21.1%
5	100	2	50.04%	2.77	6.8	6.8	Force [N]	11540 0.0%	11540 0.0%	11531 0.0%	11531 0.0%	11531 0.0%
			49.95%	2.26			Déplacement [m]	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%	0.053 0.0%
5	470 000	2	98.71%	2.51	6897	1.5	Force [N]	12685 10.0%	12685 10.0%	10185 -11.7%	10185 -11.7%	10185 -11.7%
			1.28%	1.49			Déplacement [m]	0.059 10.0%	0.059 10.0%	0.047 -11.7%	0.047 -11.7%	0.047 -11.7%
5	382 932 x 2 = 765 864	2	99.50%	2.5	6697	1.4	Force [N]	12287 6.5%	12287 6.5%	10695 -7.3%	10695 -7.3%	10695 -7.3%
			0.49%	1.26			Déplacement [m]	0.057 6.4%	0.057 6.4%	0.049 -7.3%	0.049 -7.3%	0.049 -7.3%
5	900 000	2	99.63%	2.49	6617	0.7	Force [N]	12184 5.6%	12184 5.6%	10820 -6.2%	10820 -6.2%	10820 -6.2%
			0.36%	1.19			Déplacement [m]	0.056 5.6%	0.056 5.6%	0.050 -6.2%	0.050 -6.2%	0.050 -6.2%
5	2 800 000	2	99.96%	2.48	6131	0.2	Force [N]	11754 1.9%	11754 1.9%	11309 -2.0%	11309 -2.0%	11309 -2.0%
			0.04%	0.74			Déplacement [m]	0.054 1.9%	0.054 1.9%	0.052 -2.0%	0.052 -2.1%	0.052 -2.1%

Tableau 3 – Distribution des efforts et des déplacements au niveau des poteaux (en N) et écart en % par rapport au modèle 1 de référence

Par rapport au modèle 1 de référence, le modèle 2 et le modèle 2bis montrent dans le cas particulier de cette structure que les résultats en termes d'efforts et de déplacements dans les poteaux sont identiques, que le bâtiment soit uni ou séparé au niveau du poteau 3. Cette explication provient du découpage particulier des modèles 2 et 2bis qui permet d'obtenir 2 périodes propres particulières (autrement dit le rapport masse-raideur) lorsque celles-ci sont reportées sur le spectre de réponse.

Effectivement, celles-ci sur le spectre de réponse se situent sur la branche descendante du spectre et plus précisément après $T_D = 2$ s. (cf. § 2.4.2.1.2). Or, l'équation de cette partie du spectre, c'est-à-dire pour $T \geq T_D$ est égale à une variation quadratique de la période qui provoque des efforts en pied de poteau identiques pour ces modèles présentés précédemment.

Pour rappel, la partie de l'équation du spectre de réponse nous concernant (cf. §3.2.2.2 de la NF EN 1998-1) est :

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \text{ pour } T \geq T_D$$

Pour des raisons de simplicité, nous poserons l'expression d'une constante appelée :

$$C = a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot T_C T_D = 2.1 \text{ m}$$

Quel que soit le modèle :

- La période propre T peut s'exprimer de la manière suivante :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_{poutre} * n_{poutre}}{k_{poteau} * n_{poteau}}}$$

Avec :

- m_{poutre} la masse ramenée par une poutre
 - n_{poutre} le nombre de poutre dans le modèle
 - k_{poteau} la raideur d'un poteau
 - n_{poteau} le nombre de poteau dans le modèle
- Pour $T \geq T_D$, la force totale en fonction de la période propre T peut s'exprimer de la manière suivante :

$$F_{totale}(T) = m_{totale} * S_d(T) = m_{poutre} * n_{poutre} * \frac{C}{T^2}$$

- La force par poteau en fonction de la période propre T peut s'exprimer de la façon suivante :

$$F_{poteau}(T) = \frac{F_{totale}(T)}{n_{poteau}} = \frac{m_{poutre} * n_{poutre}}{n_{poteau}} * \frac{C}{T^2}$$

Appliquons maintenant cette dernière équation à chacun des 3 trois modèles :

- Modèle 1 avec sa période propre T_1 :

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_{poutre} * 4}{k_{poteau} * 5}}$$

$$F_{poteau}(T_1) = \frac{m_{poutre} * 4}{5} * \frac{C * k_{poteau} * 5}{4\pi^2 * m_{poutre} * 4} = \frac{C * k_{poteau}}{4\pi^2}$$

- Modèle 2 avec sa période propre T_2 :

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m_{poutre} * 2}{k_{poteau} * 2}}$$

$$F_{poteau}(T_2) = \frac{m_{poutre} * 2}{2} * \frac{C * k_{poteau}}{4\pi^2 * m_{poutre}} = \frac{C * k_{poteau}}{4\pi^2}$$

- Modèle 2 bis avec sa période propre T_{2bis} :

$$T_{2bis} = 2\pi \sqrt{\frac{m_{poutre} * 2}{k_{poteau} * 3}}$$

$$F_{poteau}(T_{2bis}) = \frac{m_{poutre} * 2}{3} * \frac{C * k_{poteau} * 3}{4\pi^2 * m_{poutre} * 2} = \frac{C * k_{poteau}}{4\pi^2}$$

- Application numérique :

$$k_{poteau} = \frac{3EI}{h^3} = \frac{3 * 18.5e9 * 0.5^4}{12 * 11^3} = 217\,177 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$F_{poteau}(T_1 \text{ ou } T_2 \text{ ou } T_{2bis}) = \frac{2.1 * 217\,177}{4\pi^2} = 11.5 \text{ kN}$$

Cette démonstration permet de comprendre pourquoi les efforts obtenus numériquement en pied de poteau sont identiques pour les modèles 1, 2, 2bis et de vérifier par la même occasion que nous retrouvons bien la valeur numérique de 11,5 kN.

Toujours d'après ce Tableau 3, le modèle 3 montre des résultats identiques au modèle de référence ce qui signifie que le remplissage de la réservation avec du mortier ne change pas le comportement de la structure d'un point de vue sismique.

Ce constat se vérifie également lorsque l'on compare le modèle 4 et le modèle 5 avec une raideur de joint viscoélastique identique ($k = 382\,932 \text{ N/m}$). On remarque que les résultats sont identiques ce qui confirme à nouveau que le remplissage de la réservation avec du mortier ne modifie pas le comportement de la structure.

Dans la suite de l'étude, il est donc inutile de complexifier le modèle en intégrant la raideur du mortier. La modélisation de la raideur du béton de la poutre est suffisante.

L'introduction d'un joint viscoélastique dans le modèle 4 comme dans le modèle 5 avec $k=382932$ N/m montre des efforts et des déplacements dans les poteaux P1 et P2 supérieurs de 10% par rapport à ceux de référence. De plus un deuxième mode peu significatif fait son apparition. Concernant le déplacement obtenu dans le joint de 1,8 cm, celui-ci est compatible avec celui observé expérimentalement (déplacement moyen de 1,83 cm cf. 2.4.2.2.5).

Si nous nous plaçons maintenant dans l'exemple réaliste (Figure 21), où il y a deux réservations par broche poteau-poutre la raideur du joint sera égale à deux fois 382 932 N/m, c'est-à-dire 765 864 N/m. Dans ce cas, les résultats du Tableau 3 montrent qu'un seul mode est prépondérant, que le déplacement du joint est compatible avec celui expérimental et que les efforts dans les poteaux sont acceptables ($< + 10\%$) par rapport à ceux calculés sans joint (modèle de référence).

Dans ce Tableau 3, de nombreuses variantes du modèle 5 ont été étudiées en faisant varier la raideur du joint viscoélastique. Les points suivants ont pu être observés :

- Plus le joint est raide et plus la différence entre le modèle avec joint et celui de référence est faible ;
- Plus le joint est souple (tend vers une solution avec du vide) et plus la structure se comporte en deux structures distinctes comme le modèle 2 et 2 bis avec l'apparition de deux modes mobilisant chacun 50% de la masse. Les efforts et déplacements sont alors identiques à ceux de référence mais le déplacement numérique de la broche obtenu ($\pm 6,8$ cm pour le modèle 5 avec $k=100$ N/m) est incompatible avec les dimensions de la réservation ($6,8*2 >$ à l'exemple de réservation de 8 cm de long de la Figure 21) conduisant à un impact dynamique lorsque la broche vient en butée contre la réservation de la poutre. De plus, ce cas n'est pas envisageable car le but de l'étude est d'avoir un joint viscoélastique (et non un vide) thermiquement et, pour ce qui nous concerne, sismiquement acceptable. Pour rappel, la raison de l'utilisation du matériau viscoélastique à la place du mortier traditionnel est de garantir justement un fonctionnement d'ensemble de la structure soumise aux actions sismiques et non pas la création d'un joint sismique.

Cette étude de sensibilité de raideur du joint a permis de mettre en évidence deux facteurs importants pour que la solution avec joint viscoélastique fonctionne :

- a. Le mode fondamental (mode de translation du portique dans la direction d'alignement poutre-poteau) du modèle avec joint ne doit pas être très différent du même mode de translation du modèle de référence. Pour respecter ce critère, la règle suivante est établie : *Vérifier que le mode fondamental du modèle avec joint (mode de translation du portique dans la direction d'alignement poutre-poteau) a un pourcentage de masse effective qui ne varie pas de $\pm 5\%$ par rapport au modèle de référence.*
- b. Les efforts (ou déplacements) en pied de poteau ne doivent pas être supérieurs de plus de 10% à ceux du modèle de référence car cela modifierait le dimensionnement initial sans joint réalisé par le Bureau d'Etudes. Pour respecter ce critère, la règle suivante est établie : *Si l'écart entre les deux modèles (avec et sans joint) est inférieur à 10% ou si cet écart conduit à une réduction d'effort en pied de poteau, négliger la contribution du matériau viscoélastique. Le dimensionnement initial du BE (celui utilisé dans l'étape 1) sans prise en compte de l'assemblage broché avec joint viscoélastique n'est pas remis en cause.*

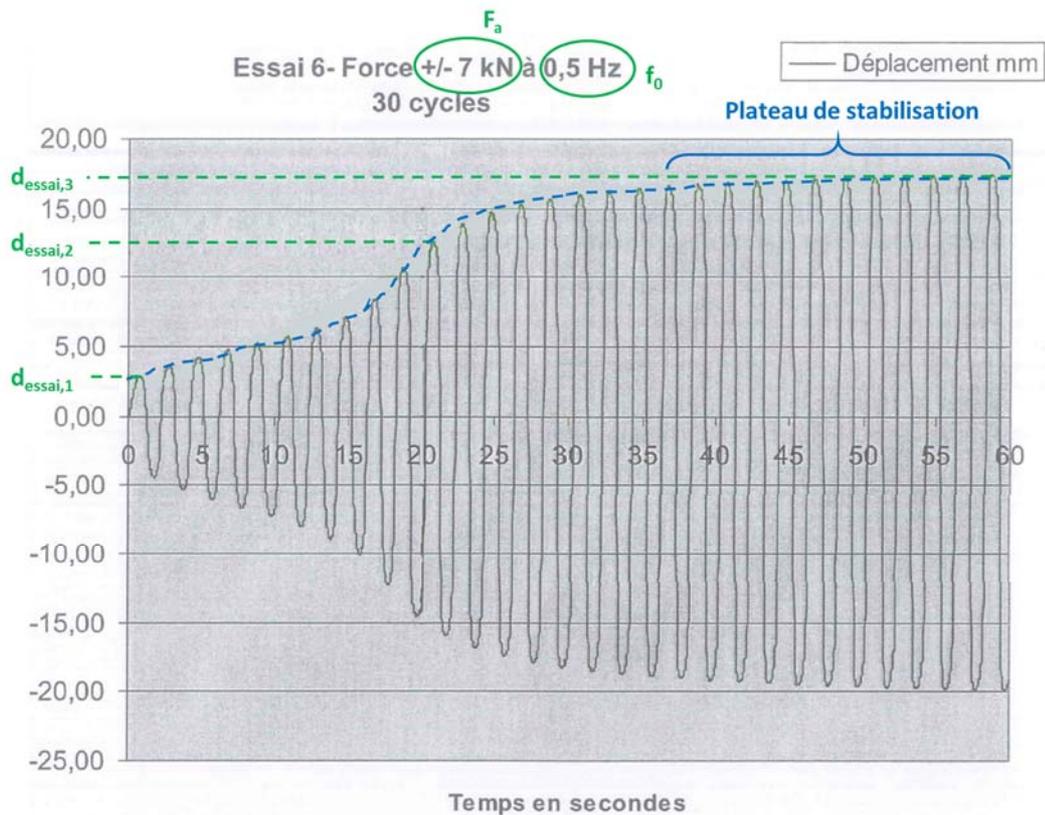
Le respect du critère du point a. permet ainsi d'avoir un comportement similaire avec la structure de référence calculée par le BE de manière traditionnelle, c'est-à-dire un seul mode fondamental embarquant la majorité de la masse en translation. Autrement dit, le respect de ce critère signifie que le déplacement des poteaux de l'ensemble de la structure est identique et qu'il n'y a donc pas de joint sismique (mouvement d'ensemble du bâtiment comme dans le cas de référence).

Le respect du critère du point b., quant à lui, permet de vérifier que les efforts sont similaires au cas de référence, autrement dit que le dimensionnement initial du bâtiment de référence n'est pas remis en cause.

3. Démarche et justifications à apporter

A partir des résultats présentés dans les paragraphes précédents, les justifications nécessaires à apporter et la démarche sont listées ci-après afin de pouvoir utiliser un matériau viscoélastique de type bitume dans un assemblage broché poteau-poutre en zone sismique. Compte tenu de l'analyse des rapports des essais réalisés sur un matériau viscoélastique ainsi que de l'analyse de plusieurs modèles numériques introduisant ce type d'assemblage avec joint viscoélastique, voici ci-dessous les différentes étapes du raisonnement permettant de valider le procédé :

- **Étape 1** : Pour le bâtiment constitué d'une succession de portique, calculer la fréquence propre f_0 du bâtiment dans la direction de l'alignement poutre-poteau (ou bien la demander au BE en charge du dimensionnement du bâtiment) dans l'hypothèse d'une section fissurée des poteaux conformément au paragraphe 4.3.1 (7) de la EN 1998-1 (cas de référence en considérant un assemblage traditionnel sans joint viscoélastique pour tous les nœuds poutres/poteaux) ;
- **Étape 2** : Calculer la force F_a (ou bien la demander au BE en charge du dimensionnement du bâtiment) que doit reprendre chaque broche dans l'hypothèse d'un assemblage traditionnel au niveau du poteau qui sera ensuite rempli avec le matériau viscoélastique (modèle identique à celui utilisé dans l'étape 1 : $F_a = F_{\text{horizontale_poteau}}/\text{nombre de broches}$) ;
- **Étape 3** : Réaliser des essais de chargements dynamiques en imposant à la broche, de façon cyclique et sinusoïdale à une fréquence f_0 , une force maximale d'intensité F_a . Faire des essais sur une boîte de réservation représentative du nœud poutre-poteau (dimensions de la réservation, diamètre de la broche). Le comportement du matériau viscoélastique est caractérisé en mesurant le déplacement obtenu en appliquant l'effort cyclique d'amplitude F_a . Cette caractérisation revient à tracer l'évolution du déplacement au cours du temps en fonction de la force cyclique imposée sur la broche jusqu'à obtenir une stabilisation (faible évolution) du déplacement maximal après plusieurs cycles de charge/décharge. Les essais ont pour but de vérifier le comportement viscoélastique du matériau à la fin des cycles et doivent également vérifier la non plastification du matériau, c'est-à-dire que le matériau doit retourner à sa position initiale sans déformation rémanente après un délai de 24h à partir de la fin de l'essai ;
- **Étape 4** : Calculer les raideurs sécantes du matériau à partir de trois points différents sur la courbe expérimentale déplacement/temps : le premier point au niveau du premier cycle de chargement (raideur K_1 , égale dans la figure ci-après à $7e^3/d_{\text{essai},1}$), le second point (raideur K_2) entre le premier cycle et le plateau de stabilisation obtenu lorsque l'intensité des pics des déplacements des différents cycles devient quasiment constante et pour le troisième point après stabilisation du déplacement (raideur K_3). La figure ci-après permet de visualiser les 3 points évoqués :



- **Étape 5** : Prendre en considération ces 3 raideurs dans 3 modèles numériques (identiques à la raideur près) en introduisant un ressort au niveau du nœud poutre/poteau réalisé avec joint viscoélastique afin d'évaluer le comportement d'une structure contenant un assemblage avec joint viscoélastique par rapport à une structure qui n'en contient pas. Faire un calcul modal-spectral pour chacun de ces 3 modèles ;
- **Étape 6** : Vérifier que le mode fondamental (mode de translation du portique dans la direction d'alignement poutre-poteau) a un pourcentage de masse effective qui ne varie pas dans les trois modèles de $\pm 5\%$ par rapport au modèle de référence de l'étape 1. Dans le cas contraire, la rigidité doit être revue à la hausse ;
- **Étape 7** : Calculer les efforts repris par les poteaux (effort tranchant en pied de poteau), les déplacements relatifs du ressort (allongement ou raccourcissement) et la force dans le ressort pour les 3 modèles numériques contenant l'assemblage avec le matériau viscoélastique ;
- **Étape 8** : Comparer les déplacements relatifs du ressort pour les 3 modèles numériques ($d_{num,1}$, $d_{num,2}$, $d_{num,3}$) avec les valeurs des déplacements issues des essais ($d_{essai,1}$, $d_{essai,2}$, $d_{essai,3}$) pour la même force imposée d'intensité F_a et identifier parmi les 3 modèles celui qui permet d'avoir un déplacement numérique le plus proche du déplacement expérimental ($d_{num,i} \approx d_{essai,i}$) à condition de respecter l'inégalité suivante $d_{num,j} \leq d_{essai,j}$ avec $1 \leq j \leq i$. Ces vérifications permettent de s'assurer que la force calculée numériquement dans le ressort ne soit pas supérieure à la force F_a . Par exemple, si parmi les 3 modèles, le déplacement numérique $d_{num,2}$ est le plus proche du déplacement expérimental $d_{essai,2}$, il faut vérifier également les 2 inégalités suivantes $d_{num,1} \leq d_{essai,1}$ et $d_{num,2} \leq d_{essai,2}$;

- **Étape 9** : Comparer pour les modèles numériques K_j (avec $1 \leq j \leq i$ comme défini dans l'étape précédente) les distributions des efforts en pied de poteaux par rapport au modèle de référence (défini dans l'étape 1). Si l'écart entre les deux approches est inférieur à 10 % ou si cet écart conduit à une réduction d'effort en pied de poteau, négliger la contribution du matériau viscoélastique. Le dimensionnement initial du BE (celui utilisé dans l'étape 1) sans prise en compte de l'assemblage broché avec joint viscoélastique n'est pas remis en cause. Si cet écart est positif (c'est-à-dire que l'effort tranchant en pied de poteau du modèle avec joint viscoélastique est supérieur à l'effort tranchant mesuré dans le même poteau du modèle de référence sans joint viscoélastique) et dépasse les 10%, le dimensionnement de la structure du BE (broche, poteau, fondation...) devra être adapté aux nouveaux efforts des modèles K_j retenus ;
- **Étape 10** : Vérifier le dimensionnement en capacité de l'assemblage broché :
 - En utilisant comme effort de dimensionnement pour la broche la valeur de l'effort F_a calculée dans la broche multipliée par un coefficient de surdimensionnement de 2 ;
 - En vérifiant expérimentalement le bon comportement du matériau viscoélastique avec la réalisation d'un essai dynamique en appliquant sur la broche à une fréquence f_0 un déplacement de plus ou moins $1,2 * d$ (cf. NF 15129 concernant les dispositifs anti-sismique et notamment le § 8.1 sur les isolateurs) où d représente le déplacement mesuré dans le ressort modélisé avec une raideur K_3 obtenue à la fin des cycles (plateau de stabilisation du déplacement). La non plastification du matériau est vérifiée si le matériau retourne à sa position initiale sans déformation rémanente après un délai de 24h à partir de la fin de l'essai.

A noter que ce protocole vise uniquement l'utilisation de ce matériau visco-élastique par rapport à des sollicitations sismiques. Les justifications complémentaires, comme par exemple celles concernant les déformations gênées, devront être faites par des essais complémentaires à mettre en place.

Annexe 1 – Avis de Monsieur Philippe BISCH expert sismique et Président du CEN/TC250/SC8

CERIB
1 Rue des Longs Réages
28230 Épernon
France
A l'attention de Monsieur Matthieu SCALLIET,
responsable du pôle structures

Montreuil, le 8 Décembre 2017

Objet : Justifications pour utiliser un matériau viscoélastique dans les assemblages brochés en zones sismiques

Messieurs,

vous me demandez mon avis sur le rapport (417.I) de décembre 2017 que vous venez de me faire parvenir, ce que je fais volontiers ci-après.

Cet avis résulte d'échanges approfondis avec le CERIB, ayant abouti à la mise au point du protocole proposé dans le rapport.

Le procédé en question présente l'avantage (compte tenu des propriétés du matériau viscoélastique de type bitume utilisé) d'autoriser les dilatations sans transmission significative d'effort. Il présente donc un avantage opérationnel incontestable.

La question est donc d'en déterminer le comportement sismique et de proposer une procédure de qualification du procédé en situation sismique.

Contrairement à certains procédés qui bloquent le mouvement en cas de séisme, celui proposé met en jeu le comportement du matériau viscoélastique de type bitume, qui ne présente pas ce caractère bloquant. Néanmoins, le procédé peut entrer dans le champ d'application de la norme EN 15129, en adaptant les principes avec une procédure de qualification adaptée, ce que propose le CERIB.

La difficulté de l'exercice est que le procédé cumule deux caractéristiques distinctes de non-linéarité :

- non-linéarité due au comportement du matériau, intermédiaire entre un comportement solide visco-élastoplastique et un comportement fluide très visqueux ;
- non-linéarité géométrique due à l'existence d'un vide formé au voisinage de la broche au bout de quelques cycles et qui influence largement les relations de comportement global reliant l'amplitude de la force cyclique appliquée au déplacement relatif correspondant.

Egis Industries

4 rue Dolorès Ibarruri - TSA 50012 - 93188 Montreuil Cedex – France
Tél + 33 (0) 1 49.20.19.00 - Fax + 33 (0) 1 49 20 19 73 – contact.egis-industries@egis.fr – www.egis.fr
S.A.S. au capital de 500.000 € - SIRET 652 030 677 00221 - SIREN 652 030 677 - R.C.S. Bobigny
N° identification intracommunautaire FR 34 652 030 677 - Code APE 7112 B



Il s'agissait d'offrir au fournisseur et à l'utilisateur du procédé une démarche simple de justification basée d'une part sur l'expérimentation pour cerner la loi de comportement de l'assemblage, d'autre part sur un modèle simple (donc linéaire) de calcul pour justifier des dispositions prises. Cet objectif est ambitieux compte tenu de la forte non-linéarité mentionnée ci-dessus.

La méthode proposée par le CERIB est un bon compromis entre la simplicité souhaitée et la bonne représentation du comportement réel. Elle vise, par un nombre limité de modèles de calcul et d'expérimentations, à trouver le point de concordance entre le comportement physique et le modèle de calcul simplifié, en cherchant les propriétés sécantes appropriées.

Ceci permet en outre d'assurer un dimensionnement adéquat de l'assemblage à partir de règles simples de dimensionnement en capacité.

En conclusion, la méthode de justification proposée correspond à l'objectif recherché et permet d'assurer un dimensionnement sûr de l'assemblage.

Espérant répondre ainsi à votre attente, je vous prie d'agréer mes meilleures salutations



Philippe BISCH

Bibliographie

- [1] NF EN 1998-1
Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- [2] NF EN 1998-1/NA
Annexe nationale à l'Eurocode 8 partie 1
- [3] NF DTU 23.3
Ossatures en éléments industrialisés en béton. Partie 3 : Règles de calcul
- [4] Rapport d'essais bitume Eurobéton 06/06/11
- [5] Rapport d'essais bitume Eurobéton 05/07/11
- [6] Rapport d'essais bitume Eurobéton 27/07/11
- [7] Comportement sismique des ossatures en éléments industrialisés en béton. Justifications pour l'application de l'Eurocode 8
Rapport 145.E CERIB
- [8] Arrêté du 25 octobre 2012 modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de classe dite « à risque normal ».
- [9] Étude sismique sur les planchers à poutrelles avec rupteurs thermiques – Exploitation des résultats et étude numérique de la maison individuelle
Rapport 330.I CERIB

Index des figures

Figure 1 – Exemple d'un détail d'assemblage poteau-poutre sur joint de dilatation	7
Figure 2 – Comportement du nœud poutres/poteau soumis à une dilatation thermique (ou toute autre déformation gênée) ou à un séisme.....	9
Figure 3 – Fonctionnement des bâtiments vis-à-vis des actions sismiques horizontales	10
Figure 4 – Schémas rhéologiques d'un solide.....	11
Figure 5 – Lois de comportements d'un solide de Hooke et d'un liquide de Newton	12
Figure 6 – Détails d'une liaison poteau-poutre sur une structure préfabriquée en béton armé [7]	13
Figure 7 – Boîte de fixation remplie de bitume	14
Figure 8 – Photo du dispositif d'assemblage broché dans la machine d'essai	14
Figure 9 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 0,5 Hz	16
Figure 10 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 0,5 Hz – mise en évidence de la raideur au cours des cycles	17
Figure 11 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 1,0 Hz.....	17
Figure 12 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 2 Hz	18
Figure 13 – Schématisation du vide créé entre la broche et le matériau	18
Figure 14 – Essai avec déplacement imposé +/- 15 mm - fréquence 0,5 Hz – mise en évidence du vide	19
Figure 15 - Essai avec force imposée +/- 7 kN - fréquence 5 Hz - mise en évidence du vide.....	20
Figure 16 – Schéma de la structure étudiée et modèle de référence	22
Figure 17 – Spectre règlementaire de réponse utilisé.....	23
Figure 18 – Modèle 2 avec P1, P2	23
Figure 19 – Modèle 2 bis avec P3, P4, P5.....	24
Figure 20 – Modèle 3	24
Figure 21 – Exemple de réservation pour une liaison poteau-poutre (2 réservations par liaison)	25
Figure 22 – Modèle 4	25
Figure 23 - Essai avec force imposée +/- 7 kN - fréquence 0.5 Hz.....	26
Figure 24 - Modèle 5	27

Index des tableaux

Tableau 1 – Résultats des essais avec déplacement imposé ± 15 mm.....	15
Tableau 2 – Résultats des essais avec force imposée ± 7 kN	15
Tableau 3 – Distribution des efforts et des déplacements au niveau des poteaux (en N) et écart en % par rapport au modèle 1 de référence.....	29

RAPPORT

ÉTUDES ET RECHERCHES

DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES

ARMAND LEROUX
NADER LACHIHEB
MATTHIEU SCALLIET



/ Cerib - CS 10010
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00
cerib@cerib.com

JUSTIFICATIONS POUR UTILISER UN MATÉRIAU VISCOÉLASTIQUE DANS LES ASSEMBLAGES BROCHÉS EN ZONES SISMIQUES

Le DTU 23.3 « Ossatures en éléments industrialisés en béton » indique la possibilité, sur justifications spéciales, d'utiliser des matériaux de remplissage viscoélastiques de type bitume dans des assemblages brochés pour réaliser un joint de dilatation sans création de joint sismique. Toutefois, ce même document ne définit ni le type ni le contenu des justifications spéciales à apporter pour valider l'utilisation de ce procédé.

Cette étude définit les justifications nécessaires à apporter afin de pouvoir utiliser en zone sismique un matériau viscoélastique dans un assemblage broché de bâtiments avec ossature à un niveau avec ou sans mezzanine.

Un cas pratique d'un chantier traitant un bâtiment avec ossature à un niveau intégrant un matériau viscoélastique dans une liaison poteau-poutre a permis d'alimenter cette étude et de définir une démarche répétable pour tout type de chantiers et de matériaux.

Cette étude a été présentée à un expert sismique, M. BISCH (Président du CEN/TC250/SC8 en charge de la rédaction de l'Eurocode 8), et a été validée par ce dernier aussi bien sur le contenu technique que sur la démarche.

JUSTIFICATIONS IN ORDER TO BE ABLE TO USE, IN A SEISMIC ZONE, A VISCOELASTIC MATERIAL IN A BEAM-COLUMN ASSEMBLY

The DTU 23.3 "Structures in concrete industrial elements" indicates the possibility, on special justifications, to use bitumen type viscoelastic filling materials in beam-column connections in order to make an expansion joint without creating a seismic joint. However, this same document does not define the type or content of the special justifications to be used in order to validate the use of this process.

This study defines the necessary justifications to be defined in order to be able to use, in a seismic zone, a viscoelastic material in a beam-column assembly in the case of one level building with or without a mezzanine.

Special case of a construction site treating a building with a framework at a level integrating a viscoelastic material in a beam-column connection allowed to supply this study and to define a general approach for any type of building sites and materials.

This study was presented to an expert in the seismic field, M. BISCH (chairman of the CEN/TC250/SC8 in charge of Eurocode 8 writing). The latter one has validated the technical content as well as the proposed approach.