



COMPORTEMENT DES ISOLATEURS SISMIQUES SOUS BASSETEMPERATURES: ÉTUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES

Émilie HUDON, ing., Ph.D.,
Ingénieure structure, Goodco Z-Tech
emilie.hudon@groupecanam.com

Lotfi GUIZANI, ing., Ph.D.,
Professeur, dép. génie de la Construction, École de technologie supérieure
Lotfi.guizani@etsmtl.ca

Ahmed BOUBAKER, ing. jr, M.Sc.A.,
Assistant de recherche, dép. génie de la Construction, École de technologie supérieure
ahmedboubaker11@yahoo.fr

Résumé

L'isolation sismique de la base est de plus en plus utilisée sur les ponts au Québec à cause d'une meilleure maîtrise par les concepteurs et surtout de ses nombreux avantages par rapport à une conception conventionnelle. Les propriétés hystérétiques des isolateurs sismiques sous basses températures sont d'un intérêt particulier, vu les conditions climatiques prévalant au Canada, le manque de connaissances et leur impact majeur sur la performance des systèmes d'isolation par temps froid.

Cette communication vise donc à faire un survol des recherches expérimentales et numériques effectuées récemment par Goodco Z-Tech et par l'ÉTS sur le comportement des appuis isolateurs sismiques typiquement utilisés au Québec sous de basses températures.

Sur le plan expérimental, Goodco Z-Tech a effectué plusieurs essais à basses températures sur des isolateurs pleine-grandeur dissipant l'énergie par friction (système Izolotech), sur des isolateurs en élastomère fretté à noyau de plomb ainsi que sur des isolateurs en élastomère fretté. Bien que l'intensité de la rigidification diffère selon le type d'isolateur, tous les isolateurs étudiés se rigidifient à basse température. Pour les isolateurs à base d'élastomère, cette rigidification dépend également de la durée d'exposition au froid. Des essais de caractérisation de l'élastomère sous un conditionnement prolongé à de basses températures sont en cours afin de déterminer l'effet de la durée d'exposition (cristallisation).

Sur le plan numérique, des modèles de simulation du comportement couplé (transfert de chaleur et mécanique) ont été développés et utilisés avec succès à l'ETS pour prédire la température effective dans les isolateurs sous un conditionnement et des conditions d'essais donnés, l'effet de la génération de la chaleur interne et la dégradation de la réponse avec les cycles. Les données expérimentales fournies par Goodco Z-Tech sont incorporées dans les modèles numériques en vue de calibrer les modèles numériques et de déterminer certaines caractéristiques thermodynamiques et hystérétiques des matériaux locaux utilisés.

1. Introduction

L'isolation sismique de la base est de plus en plus utilisée sur les ponts au Québec à cause d'une meilleure maîtrise par les concepteurs et surtout de ses nombreux avantages par rapport à une conception conventionnelle. En effet, particulièrement efficace dans le cas des ponts essentiels, elle permet de réduire les forces transmises aux unités de fondation des ouvrages d'art tout en minimisant les dommages en cas de séisme.

Les propriétés hystérétiques des isolateurs sismiques gouvernent le rendement sismique des ponts isolés à la base. Or, ces propriétés sont affectées par plusieurs paramètres les faisant varier, soit le vieillissement, la vitesse, la contamination, l'usure, la température et le scragging (AASHTO, 2014). Des facteurs de modification des propriétés des isolateurs sont présentés dans le code de conception américain (AASHTO, 2014) pour tenir compte de ces variations. Ces facteurs de modification pour la température peuvent être particulièrement mal adaptés aux basses températures et durées d'exposition présentes au Québec. Le code de conception européen (CEN, 2009) demande quant à lui d'effectuer des essais sur les matériaux utilisés afin d'obtenir ces facteurs de modification.

La nouvelle norme de canadienne (S6-14) propose d'adopter la procédure de l'AASHTO et des essais sur prototypes et matériaux pour déterminer les facteurs de modification des propriétés hystérétiques des isolateurs. L'analyse de la structure doit être basée minimalement sur les valeurs maximales et minimales d'hystérésis des isolateurs ainsi déterminées. Pour des fins de vérification et validation, la norme canadienne exige également que des essais de qualification sous basse température sur deux prototypes pleine-grandeur (par modèle) soient complétés après un conditionnement de 3 ou 14 jours à la température de service minimale, selon le type d'isolateur utilisé (CSA, 2014).

2. Facteurs de modification

L'AASHTO propose des facteurs de modification pour la température pour les isolateurs à friction et les isolateurs à base d'élastomère (Figure 1). Pour les isolateurs à base de friction, la durée d'exposition aux basses températures ne devrait pas avoir d'effet. Les valeurs proposées par l'AASHTO peuvent donc être comparées aux résultats des essais.

Pour les isolateurs à base d'élastomère, la situation est plus complexe. Lorsqu'un élastomère est refroidi, deux types de rigidification ont lieu. Une première rigidification est due au refroidissement de l'élastomère (rigidification instantanée) alors qu'une deuxième rigidification est reliée au phénomène de cristallisation et est fonction de la durée d'exposition à la basse température. Cette cristallisation est causée par la modification de la structure moléculaire du caoutchouc pendant son exposition au froid à long terme. Lorsque le caoutchouc se réchauffe, il reprend ses caractéristiques initiales (Constantinou et al., 2007). Ces deux types de rigidification ne sont pas bien quantifiés et peuvent être très différents d'un type de caoutchouc à l'autre.

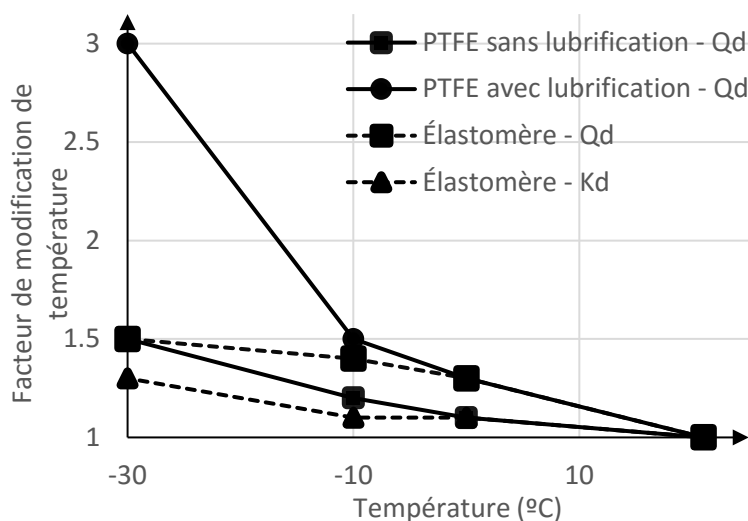


Figure 1. Facteurs λ proposés par AASHTO GSID (Annexe A, AASHTO, 2014)

De plus, le commentaire de la norme AASHTO met bien en garde contre l'utilisation de ces facteurs et note que certains facteurs doivent être déterminés par des essais (AASHTO, 2014). En effet, les valeurs proposées par l'AASHTO ne sont basées que sur des essais très limités qui ne mentionnent pas tous la durée du refroidissement. Il n'y a tout simplement pas assez d'études qui ont été effectués sur le sujet pour pouvoir présenter avec certitude des facteurs de modifications pour ce type d'isolateur.

Il n'y a donc pas ou peu d'information disponible pour guider les concepteurs quant aux facteurs à utiliser pour la rigidification des isolateurs. Comme plusieurs isolateurs sismiques pour des ponts au Québec ont été fournis par Goodco Z-Tech, cette présentation vise donc premièrement à partager l'expérience acquise au fil des projets avec le comportement des isolateurs sous basses températures. Dans un deuxième lieu, cette présentation vise à partager les études numériques complétées à l'ÉTS permettant de modéliser le comportement hystérétique d'isolateurs exposés à de basses températures.

3. Essais expérimentaux

Goodco Z-Tech a effectué plusieurs essais à basses températures sur des isolateurs pleine-grandeur dissipant l'énergie par friction (système Izolatech), sur des isolateurs en élastomère fretté à noyau de plomb ainsi que sur des isolateurs en élastomère fretté, selon les protocoles d'essais décrits au devis des projets (Tableau 1). Comme la norme S6-06 ne décrivait pas les essais à compléter à basse température, les protocoles d'essais sont établis par les ingénieurs du projet et sont souvent légèrement différents d'un projet à l'autre. Il est à noter qu'aucun projet n'a encore été complété avec toutes les exigences de la nouvelle norme S6-14.

Tableau 1. Température et durée du conditionnement sur cinq projets récents d'isolation sismique

Type d'isolateur	Température et durée du conditionnement	
À friction (IZT)	-30°C	1 heure après température cible atteinte
À friction (IZT)	-30°C	1 heure après température cible atteinte
Élastomère fretté	-30°C	Température cible atteinte
Noyau de plomb	-30°C	72 heures
Noyau de plomb	-30°C	72 heures après température cible atteinte

3.1 *Isolateurs à friction*

Dans le cas des isolateurs à friction, les basses températures ont un effet sur la force caractéristique seulement, tel que prédit par les facteurs de prédiction de l'AASHTO. La rigidité latérale de l'isolateur n'est pas ou peu affectée par les basses températures. En effet, le système Izolatech (IZT) utilise des ressorts hélicoïdaux en acier. Pour la plage de température étudiée ici, le module d'élasticité de l'acier et par conséquent la rigidité du ressort ne varie pas de manière significative. Par contre, en utilisant d'autres types de ressort, en polyuréthane par exemple, la rigidité latérale d'un isolateur pourrait être grandement influencée par l'exposition à des basses températures.

Il est à noter que ces isolateurs ont été refroidis in situ dans l'équipement d'essai. Les essais ont donc été complétés à une température très près de -30°C.

3.2 *Isolateurs à base d'élastomère*

Tel que prédit par les facteurs de l'AASHTO, le conditionnement à basse température pour les isolateurs à base d'élastomère augmente la force caractéristique et la rigidité latérale de l'isolateur. Par contre, les facteurs proposés ne concordent pas avec les résultats d'essais de prototype pleine-grandeur. Tel que mentionné précédemment, les facteurs de modification de l'AASHTO sont basés sur de l'information partielle et ne tiennent pas compte des durées de

refroidissement. Le fait que les facteurs ne concordent pas avec les résultats des essais pleine-grandeur n'est donc pas surprenant.

L'analyse des résultats des essais pleine-grandeur afin d'en tirer des facteurs de modification est difficile étant donné le changement de température des isolateurs durant les essais. En effet, les isolateurs à base d'élastomère discutés ici ont été conditionnés dans des congélateurs avant d'être installés sous l'équipement d'essai. La température des isolateurs a donc augmenté durant la manutention entre le congélateur et le début des essais. Lors des essais, les isolateurs vont également dissiper de l'énergie, ce qui les réchauffe encore plus. Cette dissipation d'énergie sous forme de chaleur est particulièrement notable dans les cas d'isolateurs à noyau de plomb. Lors de la plastification du noyau de plomb, celui-ci peut atteindre une température assez élevée, qui viendra également réchauffer le caoutchouc avoisinant. Au fur et à mesure des cycles d'hystérésis, la force caractéristique et la rigidité latérale d'un isolateur à noyau de plomb diminue à cause du changement de température (Figure 2).

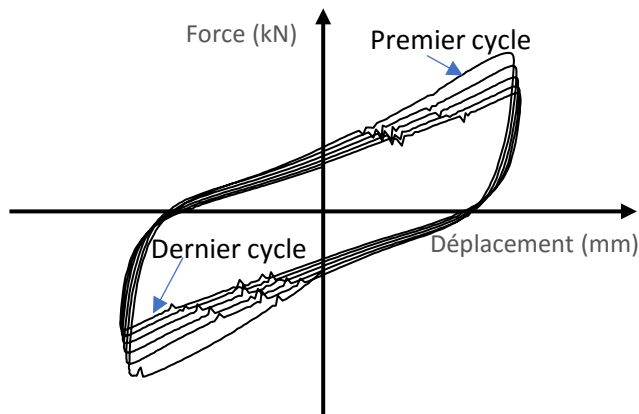


Figure 2. Courbe d'hystérésis pour un isolateur à noyau de plomb conditionné 72 heures à -30°C et testé à température pièce.

Ces phénomènes de modification de température sont difficiles à isoler lors d'essais pleine-grandeur mais peuvent être modélisés numériquement. La prochaine section présente donc un survol des recherches effectuées et/ou en cours à l'ÉTS afin d'étudier le comportement hystérétique couplé (mécanique et transfert de chaleur) des isolateurs sismiques.

4. Simulations numériques

Les essais sur prototypes sous basses températures sont très dispendieux et plusieurs problématiques peuvent être étudiées de manière plus efficace au moyen de simulations numériques, beaucoup moins coûteuses et qui peuvent donc être effectuées en plus grand nombre. Des données expérimentales minimales sont tout de même requises pour calibrer ces modèles numériques et

pour leur fournir les caractéristiques thermomécaniques des composants des isolateurs étudiés

4.1 Exemples de problématiques

A l'heure actuelle, plusieurs problématiques liées au comportement des systèmes d'isolation et des ponts isolés à la base, sous basses températures demeurent mal comprises. Parmi celles-ci, on peut citer :

- Comment le couplage thermique et mécanique affecte la réponse hystérétique des isolateurs sismiques et pour quels types d'isolateurs sismiques ce couplage est important ?
- Comment les conditions d'essais (détails du montage) ou le conditionnement préalable sous basses températures peuvent affecter la réponse hystérétique mesurée sous basses températures et quels sont les durées de conditionnement optimales pour différents types d'isolateurs sismiques ?
- Comment la cristallisation peut affecter la réponse hystérétique des isolateurs sismiques à base d'élastomère ?
- Comment varie la température effective de différents types d'isolateurs sismiques en fonction de la température de l'air et en fonction de la température effective des autres composants du pont ?

4.2 Types de modèles numériques développés

Des modèles numériques permettant de simuler le comportement hystérétique sous basses températures des isolateurs sismiques ont été développés et utilisés avec succès à l'École de technologie supérieure (ETS). Ces modèles ont été utilisés pour effectuer deux types de simulations:

- Simulations de transfert de chaleur linéaire :
 - o Évolution, avec le temps, de la température en tout point d'un isolateur sismique à base d'élastomère avec ou sans noyau de plomb soumis à un conditionnement à basse température ;
 - o Effet des conditions d'essai (montage et température de l'essai) sur la température effective au sein des isolateurs sismiques à base d'élastomère.
- Simulations de comportement thermomécanique couplé
 - o Comportement thermomécanique couplé des isolateurs sismiques à base d'élastomère sous chargement cyclique et basses températures. Ces simulations permettent de reproduire et/ou prédire la réponse hystérétique cyclique et sa dégradation avec les cycles pour des isolateurs sismiques sous basses températures. L'énergie dissipée par hystérésis est émise sous forme de chaleur interne, laquelle fait augmenter la température des matériaux et affectant leurs propriétés, lesquelles à leur tour affectent l'énergie dissipée et l'hystérésis (qui se dégrade), jusqu'à ce qu'un équilibre se produise entre les deux.

4.3 Outils et données requis

Pour effectuer ces simulations numériques, un outil de calcul par éléments finis avec un module de transfert de chaleur et un module de comportement mécanique non-linéaire est requis. De plus, pour le 2^{ème} type de simulations, l'outil doit permettre des analyses multi-physiques, soit un couplage fort entre le transfert de chaleur et le module mécanique. De nos jours, plusieurs outils commerciaux sont disponibles à cet effet, comme Ansys, Adina, Comsol (Mutliphysics, A.N.S.Y.S. (2011), Adina (2017), Mutliphysics, C.O.M.S.O.L. (2015)). Ce dernier a été utilisé dans le cadre des simulations réalisées.

Outre la géométrie des appuis, les modèles numériques requièrent les propriétés thermiques (capacité thermique massique, conductivité, densité) et mécaniques des matériaux composants (courbes d'hystérésis : relation contrainte déformation sous chargement cyclique). Pour pouvoir coupler les comportements mécaniques et thermiques, il est requis de définir l'évolution des propriétés mécaniques avec la température et de définir une relation entre l'énergie dissipée par hystérésis et la chaleur interne dégagée.

Les simulations effectuées sont basées sur les relations disponibles dans la littérature. Des relations spécifiques pour les produits locaux sont en voie de développement via les essais de caractérisation des matériaux.

4.4 Exemples de simulations numériques en transfert de chaleur

A titre d'exemple, des simulations du conditionnement thermique à des basses températures des isolateurs sismiques cylindriques à base d'élastomère avec noyau de plomb (LRB), mis à l'essai par Takaoka et al. (2008) ont été réalisés (Takaoka et al. 2008, Maret 2016). Dans ces simulations, le transfert de chaleur s'effectue par conduction (la convection et le rayonnement sont négligés). Les propriétés thermiques des matériaux sont supposées constantes (indépendantes de la température : problème linéaire). La figure 3 définit la géométrie du modèle axisymétrique ainsi que l'emplacement des deux sondes. La figure 4 montre l'évolution de la température en deux points de l'isolateur en fonction du temps alors que la figure 5 montre la distribution de la température au centre l'isolateur sismique à différentes stations de temps pour un conditionnement à -21°C.

L'analyse des résultats de conditionnement thermique de l'isolateur LRB permet de tirer les constatations suivantes:

- Le noyau de plomb refroidit plus rapidement que l'élastomère (Voir figure 4) ;
- La température de conditionnement est pratiquement atteinte au bout de 24h (durée de conditionnement requise) ;
- Le front froid progresse par le noyau de plomb, lequel refroidit les frettes en acier, lesquelles à leur tour refroidissent l'élastomère. (Voir figure 5).

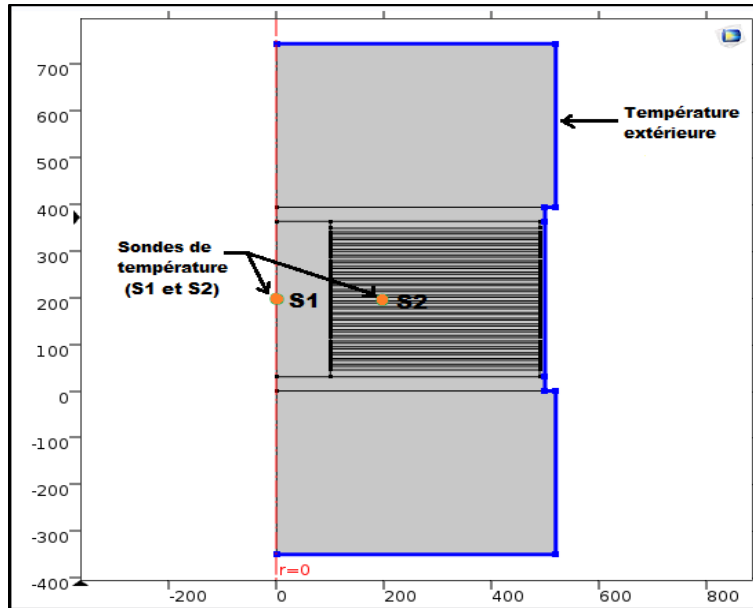


Figure 3. Paramètres de simulation axisymétrique pour l'analyse thermique d'un isolateur LRB (Source: Maret 2016)

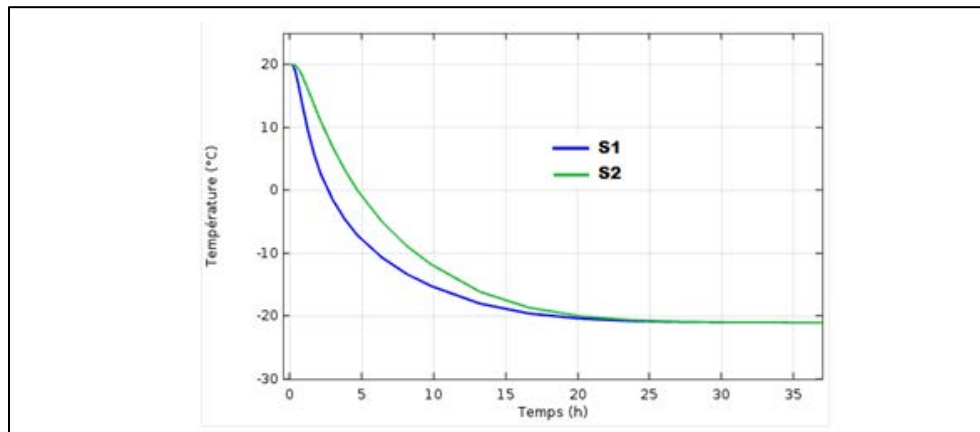


Figure 4. Évolution dans le temps des températures internes de l'isolateur (LRB), à l'endroit des deux sondes S1 et S2, pour une température de conditionnement, $T_{\text{ext}} = -21^\circ\text{C}$. (Source: Maret 2016)

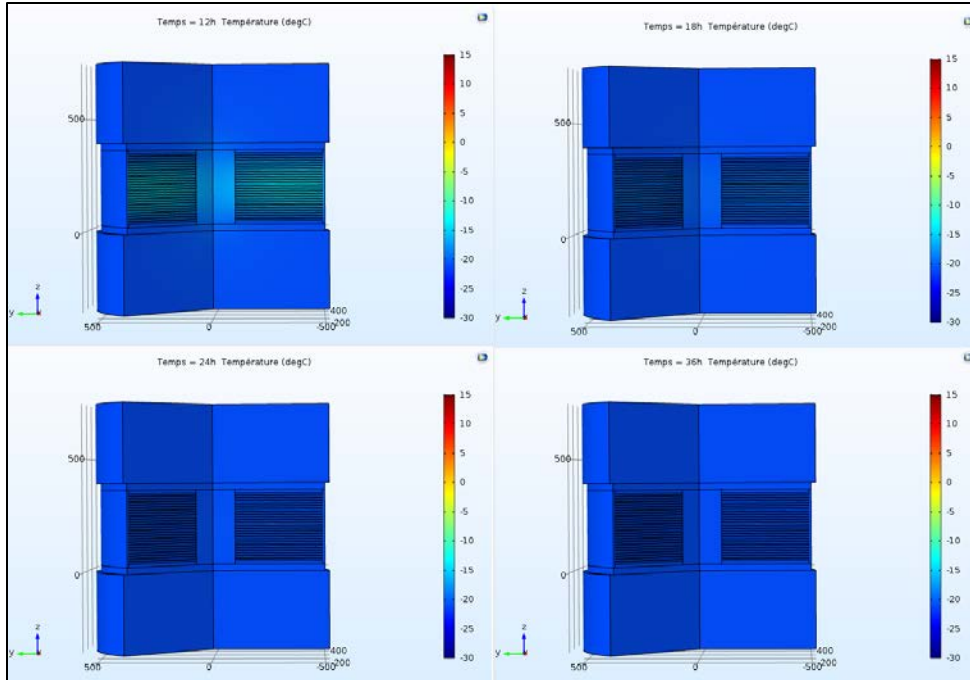


Figure 5. Température interne au sein de l'isolateur (LRB) pour $T_{\text{ext}} = -21^{\circ}\text{C}$ à $t = 12\text{h}$, 18h , 24h et 36h . (Source: Maret 2016)

Des simulations numériques ont été effectuées sur les mêmes isolateurs, mais en substituant le noyau de plomb par de l'élastomère à amortissement élevé pour en faire un isolateur en élastomère fretté à amortissement élevé (HRB). Ceci est dans le but de mieux comprendre les différences dans le comportement thermique de ces deux types d'appui sismique à base d'élastomère. Les figures 6 et 7 montrent respectivement l'évolution de la température dans le temps en deux endroits de l'isolateur et la distribution de la température à différentes stations de temps pour un même conditionnement à -21°C .

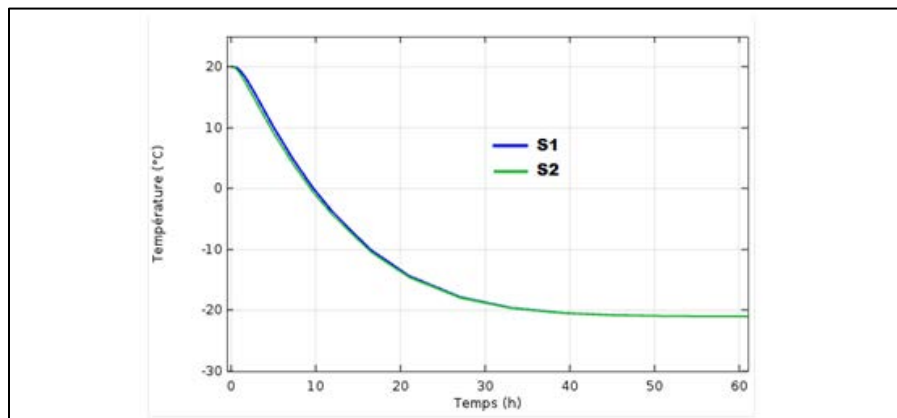


Figure 6. Évolution dans le temps des températures internes de l'isolateur (HRB), à l'endroit des deux sondes S1 et S2, pour une température de conditionnement, $T_{\text{ext}} = -21^{\circ}\text{C}$. (Source : Maret 2016)

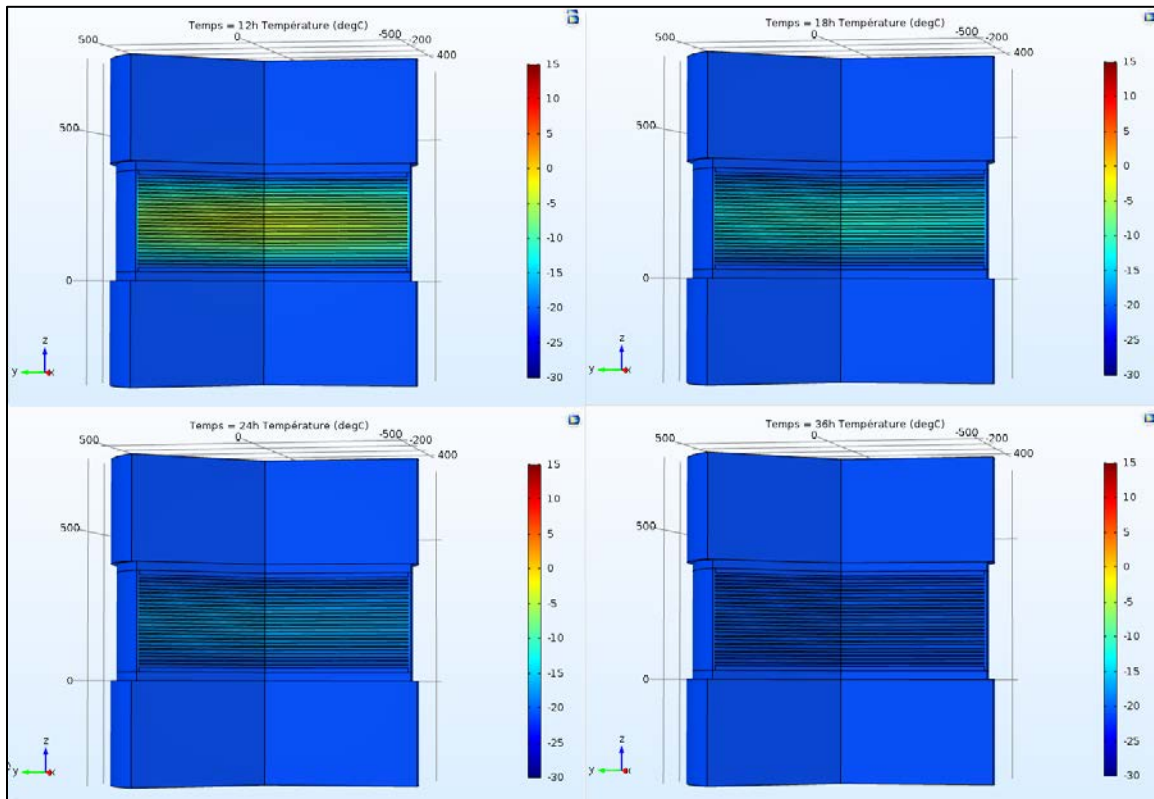


Figure 7. Température interne au sein de l'isolateur (HRB) pour $T_{\text{ext}} = -21^{\circ}\text{C}$ à $t = 12\text{h}$, 18h , 24h et 36h . (Source : Maret 2016)

En comparant les résultats des deux appuis, il est possible de constater notamment que :

- La progression du front de froid se fait différemment pour un HRB que pour un LRB. Tandis que pour ce dernier, le front froid progresse d'abord verticalement (noyau de plomb refroidit rapidement) puis horizontalement (le noyau de plomb refroidit et entraîne le refroidissement des frettes puis de l'élastomère), dans le cas du HRB, le front progresse verticalement;
- Les appuis HRB se refroidissent plus lentement que les appuis LRB. Leur température intérieure se stabilise, à la température de conditionnement de -21°C , au bout d'environ 48 heures versus environ 24h pour le LRB (2 fois plus rapide).

Plusieurs autres simulations, sur ces appuis et d'autres essais comme celles réalisées par Goodco Z-Tech à l'université de Sherbrooke et à l'école polytechnique de Montréal, permettent de généraliser ces résultats et d'obtenir d'autres constatations intéressantes.

4.5 Exemples de simulations de comportement hystérétique couplé

A titre d'exemple des simulations du comportement cyclique des isolateurs sismiques à base d'élastomère sous basses températures, ci-après quelques résultats typiques de simulations numériques d'essais cycliques sous basses

températures similaires à des essais sur des isolateurs LRB, retrouvés dans la littérature (Kalpakadis 2008). La variation de la limite élastique du plomb avec la température proposée par Kalpakadis (2008) est adoptée. La variation des propriétés du caoutchouc (module de cisaillement et limite élastique) proposée par Cardone et Gesualdi (2012) est employée. Ces simulations approximent des modèles 3D par des modèles 2D, en déformations planes. La figure 8 montre la géométrie du modèle plan. La figure 9 montre un comportement hystérésis typique obtenu et la figure 10 montre la distribution de la température à la fin de l'essai, effectué après un conditionnement à -26°C .

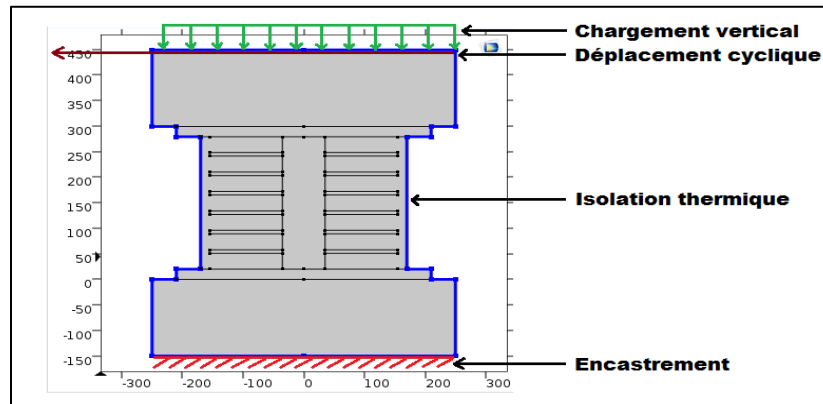


Figure 8. Paramètres de simulation pour l'étude en 2D du LRB. (Source: Maret 2016)

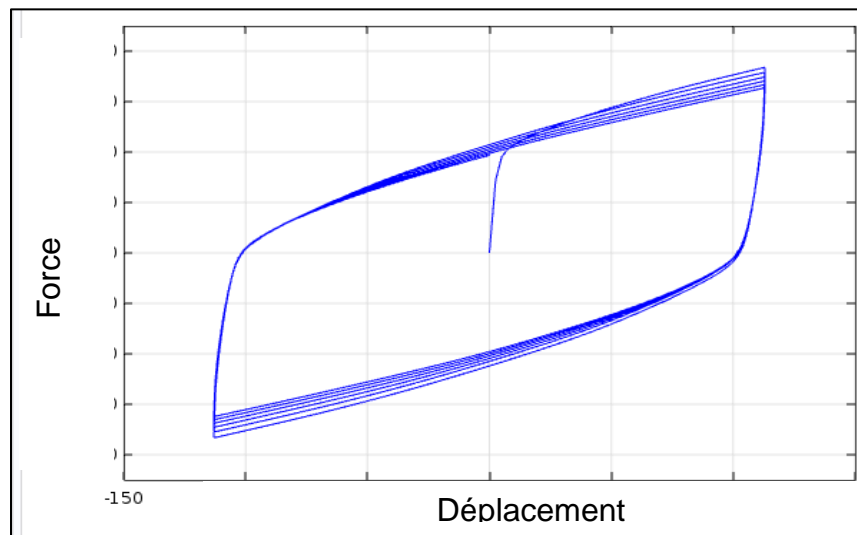


Figure 9. Hystérésis type obtenu numériquement pour des isolateurs en élastomère fretté avec noyau de plomb (LRB) sous basses températures.

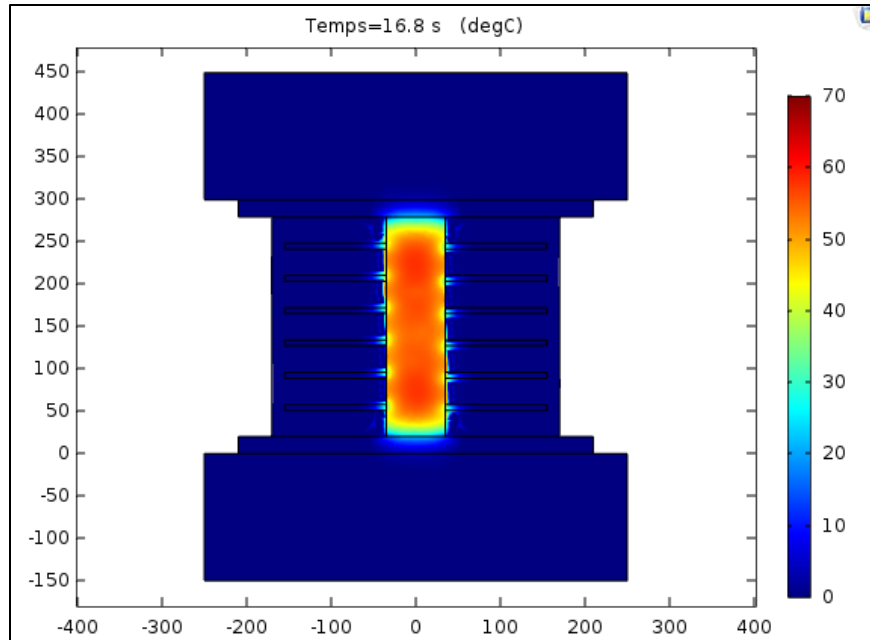


Figure 10. Augmentation de la température interne de l'isolateur (LRB) pour $T_{\text{ext}} = -26^{\circ}\text{C}$ à $t = 16.8\text{s}$ (6 cycles). (Source : Maret 2016)

Il est possible de constater la dégradation de la réponse cyclique due au couplage thermomécanique. La réponse cyclique tend à se stabiliser (la dégradation est plus importante lors des premiers cycles). De plus, la figure 10, montre l'augmentation très importante de la température du noyau du plomb. Le caoutchouc est beaucoup moins affecté et demeure froid. Les résultats obtenus concordent très bien avec les mesures expérimentales lors de ces essais. Ils concordent également avec les résultats cycliques obtenus lors des essais réalisés par Goodco Z-Tech (voir Figure 2), malgré la différence dans la composition du caoutchouc. Ceci est dû au fait que c'est le noyau de plomb qui génère le réchauffement et qui affecte le plus la dégradation de la réponse cyclique pour les appuis LRB. Comme le plomb utilisé dans les LRB est presque pur (99.9% et plus de pureté), des résultats similaires sont obtenus malgré que des différences significatives peuvent exister au niveau de la composition du caoutchouc.

Finalement, d'autres simulations ont été réalisées, y compris les essais réalisés par Goodco Z-Tech sur les appuis à base d'élastomère. Certains résultats de ces simulations seront publiés prochainement dans des revues spécialisées.

Actuellement, des modèles numériques tenant compte de la température et d'autres facteurs pour les appuis à friction sont en cours de développement. Les données expérimentales obtenues via les essais de caractérisation réalisés et en cours de réalisation par Goodco Z-Tech sont graduellement incorporées dans ces modèles.

5. Conclusions

Les essais expérimentaux sur des isolateurs pleine-grandeur ont démontré que les facteurs de modification proposés par l'AASHTO ne peuvent pas être utilisés pour répondre aux exigences du S6 pour la rigidification à basse température. Il est possible de simuler le comportement thermique ainsi que le comportement thermomécanique couplé des isolateurs à base d'élastomère. Ces simulations permettent d'évaluer efficacement les durées de conditionnement requises, les effets de conditions d'essais et la rigidification prévue d'isolateurs avant de procéder aux essais à basse température. Cet outil sera très intéressant pour les concepteurs durant la conception des ponts isolés à la base ainsi que pour proposer de nouveaux facteurs de modification.

6. Références

Adina (2017). <http://www.adina.com/multiphysics.shtml>, consulté avril 2017

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *Guide specifications for seismic isolation design*. Washington, D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Canadian Standards Association., CSA Group., & Canadian Standards Association. (2014). *Canadian highway bridge design code S6*.

Comité européen de normalisation (2009). *Anti-seismic devices EN-15129*.

Cardone, D., & Gesualdi, G. (2012). Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 64(1), 127-143.

Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., & Warn, G. P. (2007). Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading. *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, Technical Report No. MCEER-07-0012*.

Kalpakidis, I. V. 2008. *Effects of heating and load history on the behavior of lead-rubber bearings*, (Thèse de doctorat, Buffalo, State University of New York).

Maret, A. (2016). *Étude du comportement thermodynamique d'appuis isolateurs sismiques sous chargements cycliques à basses températures*, (Mémoire maîtrise, M.Sc.A, École de technologie supérieure).

Multiphysics, A.N.S.Y.S. (2011). Release 14.0 [Computer software]. ANSYS, Canonsburg, PA.

Multiphysics, C.O.M.S.O.L. (2015). The platform for physics-based modeling and simulation. Disponible à: <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics> .

Takaoka, E., Takenaka, Y., Kondo, A., Hikita, M., & Kitamura, H. (2008, October). Heat-mechanics interaction behavior of laminated rubber bearings under large and cyclic lateral deformation. In *Proceedings of the 14th Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China* (pp. 12-17).