

# Mise à jour numérique d'un modèle de pont par éléments finis basée sur une analyse modale expérimentale

Nicolas TURCOTTE, Olivier GAURON, Charles-Philippe LAMARCHE, Patrick PAULTRE

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

## Résumé

L'étude présentée s'inscrit dans un projet de recherche global de détection de l'endommagement par des mesures de vibrations ambiantes sur un pont routier en service. La méthode s'appuie sur la mesure expérimentale des fréquences et modes propres de la structure et sur leur évolution dans le temps, symptôme d'un endommagement structural. Les nouvelles propriétés dynamiques de la structure permettent d'actualiser les propriétés physiques d'un modèle du pont par éléments finis via des algorithmes de mise à jour automatique implémentés dans certains logiciels. Pour cette étude le logiciel commercial FEMtools a été utilisé.

L'ouvrage ciblé dans cette étude est le pont Est de la Rivière-aux-Mulets situé à Ste-Adèle (Qc) sur l'autoroute 15. La structure, construite en 1964 par encorbellements successifs, a subi plusieurs mesures de réhabilitation et requiert un suivi particulier. Des essais d'analyse modale effectués sous vibrations ambiantes ont été menés par l'Université de Sherbrooke en novembre 2013 et sont présentés.

L'objectif de cette étude est de vérifier la fiabilité, la pertinence et l'utilité de la méthode de mise à jour de modèles assistée numériquement pour les ingénieurs de pont. L'étude se concentre d'abord sur la calibration du modèle initial du pont de la Rivière-aux-Mulets sur les données expérimentales les plus récentes. Cette étape est la plupart du temps la plus délicate à accomplir, car les algorithmes de calcul sont sensibles à divers paramètres choisis par l'utilisateur et à la validité du modèle. Une méthodologie par étapes adaptée aux problématiques de pont est donc proposée pour effectuer un recalage du modèle par éléments finis qui limite les risques d'erreurs et de divergence dans les résultats : (1) paramétrage du problème ; (2) choix des modes expérimentaux utilisés pour le recalage; (3) recalage préliminaire des appuis et connexions; (4) réduction du nombre de paramètres de recalage par une analyse de sensibilité; (5) recalage final du modèle. Le développement de la précédente méthodologie a mis en évidence la forte sensibilité des algorithmes de recalage au choix des paramètres de recalage, à leur nombre, ainsi qu'aux valeurs initiales que l'utilisateur leur attribue. Deux cas d'étude illustrent ces problématiques. L'étude a également permis de mettre en relief la capacité de la méthode de mise à jour automatique des modèles à détecter des erreurs importantes de modélisation, ce qui constitue un atout significatif de l'outil. Finalement, les capacités de l'outil à détecter, localiser et quantifier un endommagement sont évaluées en simulant numériquement des dommages sur le modèle recalé et en effectuant la mise à jour du modèle à partir des propriétés dynamiques de la structure endommagée. Deux cas d'endommagement typiques de pont sont présentés : endommagement du tablier au centre d'une travée et endommagement à la base d'une pile. Les résultats montrent une capacité de détection de la méthode qui s'améliore grandement avec l'augmentation du nombre de modes de vibration considérés dans le recalage. En ce sens l'utilisation de données expérimentales issues de mesures sous vibrations ambiantes - bien qu'adaptée au problème - peut être un facteur limitant en raison des erreurs expérimentales qui limitent parfois le nombre de modes expérimentaux utilisables.

**Mots-clés** : ponts, recalage de modèles numériques, éléments finis, détection de l'endommagement, essais dynamiques sous vibrations ambiantes, analyse modale.

# 1. INTRODUCTION

- L'étude présentée s'inscrit dans un projet de recherche global du MTQ sur la détection de l'endommagement par des mesures de vibrations ambiantes sur un pont routier en service.
- La méthode de détection s'appuie sur la mesure expérimentale des fréquences et modes propres de la structure et sur leur évolution dans le temps, symptôme d'un endommagement structural.
- Les nouvelles propriétés dynamiques de la structure permettent d'actualiser les propriétés physiques d'un modèle numérique du pont par éléments finis via des algorithmes de mise à jour automatique implémentés dans certains logiciels.
  - ⇒ Recalage fin de modèles EF
  - ⇒ Correction des erreurs de modélisation
  - ⇒ Détection d'endommagement
- Objectifs de l'étude présentée:
  - Évaluer la fiabilité, la pertinence et l'utilité de ce type d'outils pour les ingénieurs de pont.
  - Proposer une méthodologie étape par étape pour l'utilisation pertinente de tels outils.

# 1. INTRODUCTION

- Principe des algorithmes de mise à jour automatique d'un modèle numérique basée sur la sensibilité:

*Modèle EF initial:  $[M]$  et  $[K_0]$*

*Évaluation des différences entre les modes numériques et les modes expérimentaux:  
Fréquences  $f_{i,num} \neq f_{i,XP}$  et déformées  $\phi_{i,num} \neq \phi_{i,XP}$*



*Calcul itératif des coefficients de correction de la rigidité  $\alpha_i$  basé sur la matrice de sensibilité  $S^*$*



$$[M] \text{ et } [K] = [K_0] + \sum_1^p \alpha_i [k_i]$$

*tels que  $f_{i,num} = f_{i,XP}$  et  $\phi_{i,num} = \phi_{i,XP}$*

*\* La mise à jour fait intervenir la sensibilité des modes sur  $f_i$  et  $\phi_i$  par rapport aux  $\alpha_i$ :*

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial \phi_i^T}{\partial \alpha_1} & \dots \\ \frac{\partial f_i}{\partial \alpha_p} & \frac{\partial \phi_i^T}{\partial \alpha_p} & \dots \end{bmatrix}^T$$

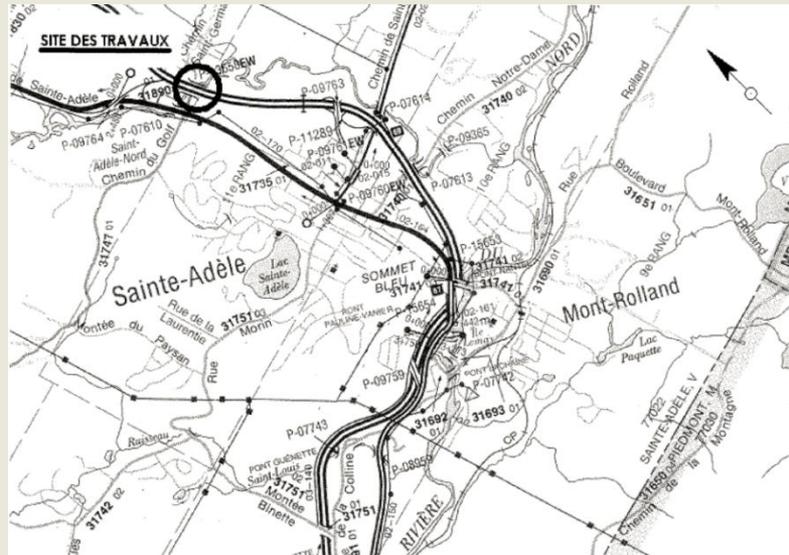
- Pour cette étude le logiciel commercial FEMtools a été utilisé.



# 2. PONT DE LA RIVIÈRE-AUX-MULETS

## a) Historique

- L'ouvrage ciblé est le pont Est de la Rivière-aux-Mulets situé à Ste-Adèle (Qc) sur l'autoroute 15.
- La structure, construite en 1964 par encorbellements successifs, a subi plusieurs mesures de réhabilitation et requiert un suivi particulier.
- Le remplacement de son pont jumeau a été effectué en 2006.



Emplacement du pont de la Rivière-aux-Mulets

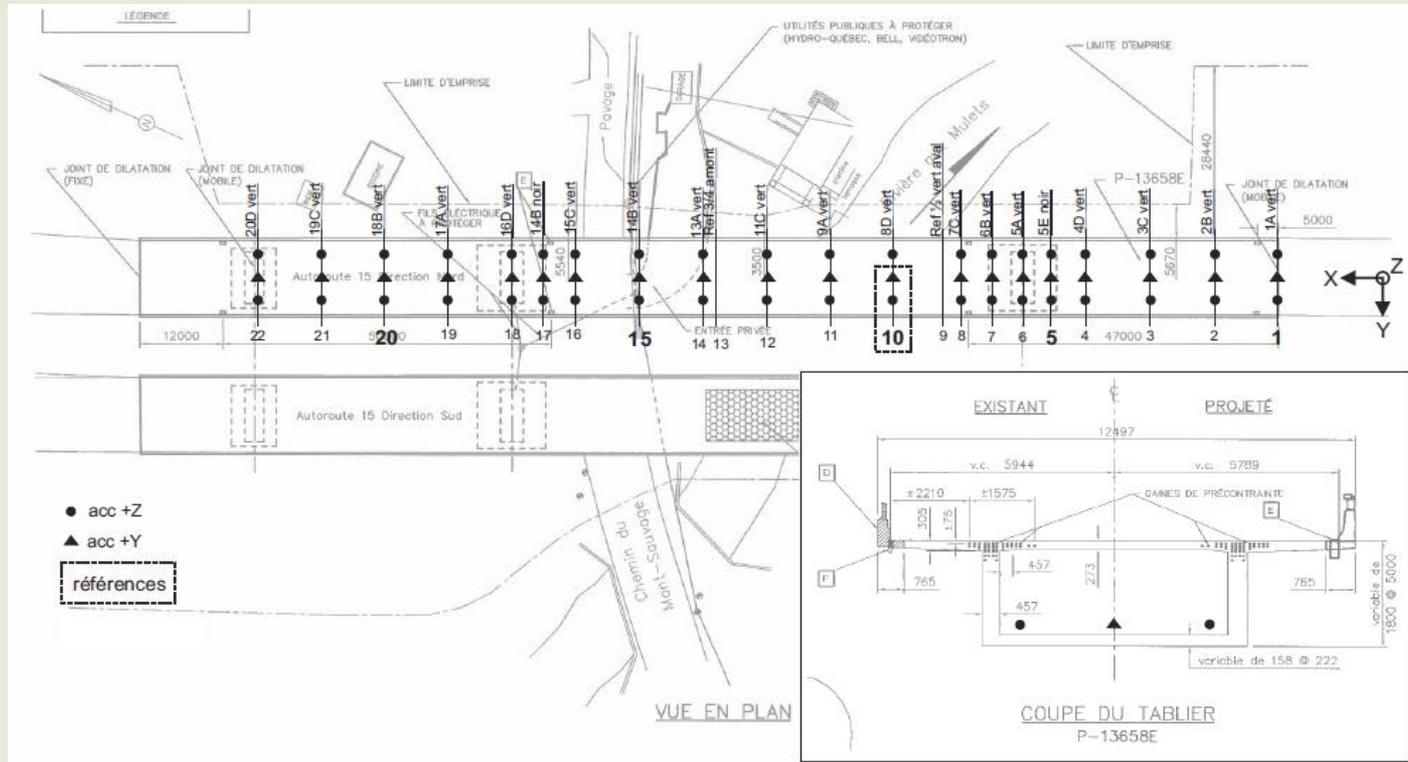


Vue de profil – in situ

# 2. PONT DE LA RIVIÈRE-AUX-MULETS

## b) Essais d'analyse modale

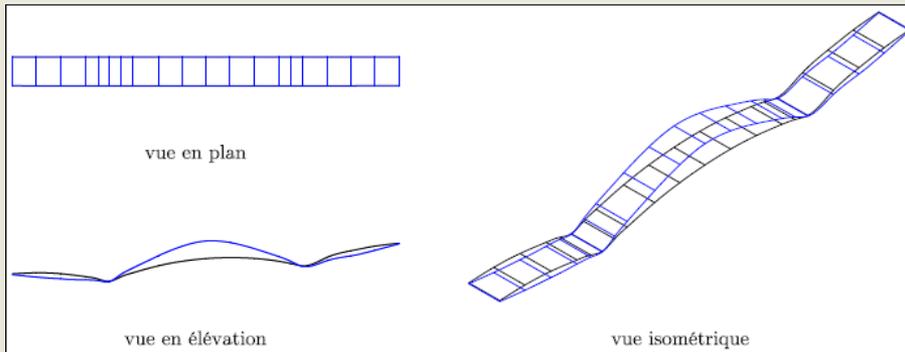
- Des essais d'analyse modale effectués sous vibrations ambiantes ont été menés par l'Université de Sherbrooke en novembre 2013.
- Les analyses ont été faite par la méthode FDD (*Frequency Domain Decomposition*).



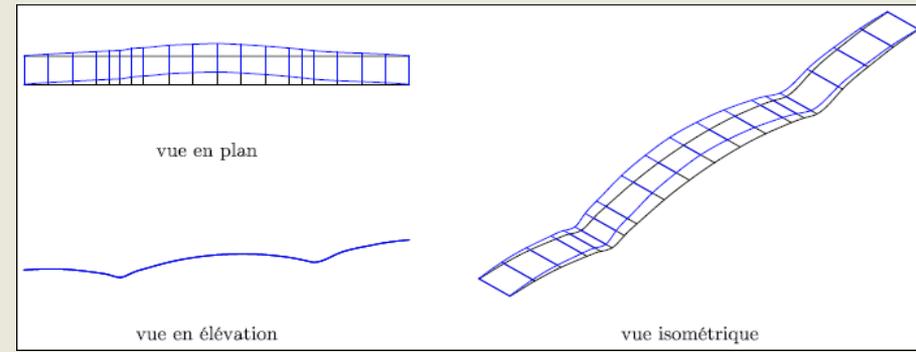
Positions des accéléromètres utilisés pour les essais : 20 pos. Y + 40 pos. Z

# 2. PONT DE LA RIVIÈRE-AUX-MULETS

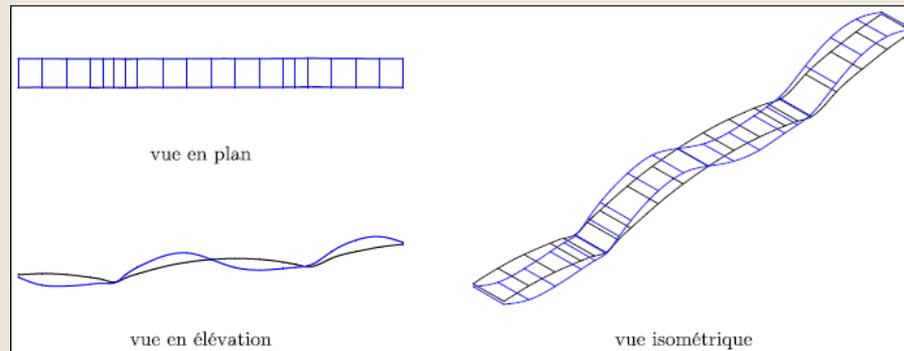
## b) Essais d'analyse modale



**Mode 1 : 1<sup>er</sup> mode de flexion – 1.563 Hz (complexité: 0.29% )**



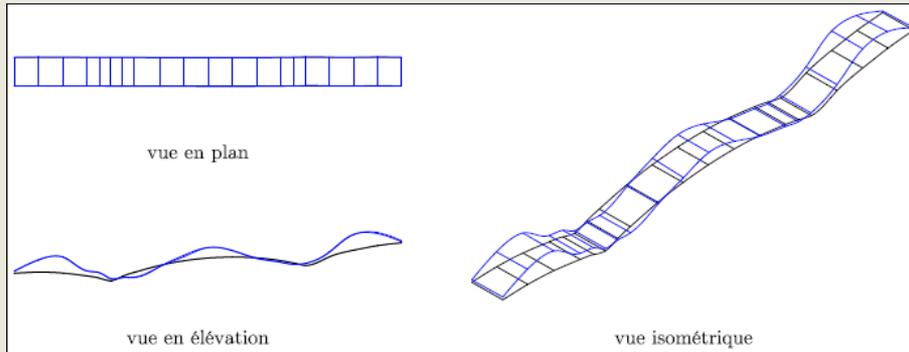
**Mode 2 : 1<sup>er</sup> mode latéral – 2.036 Hz (complexité: 0.32% )**



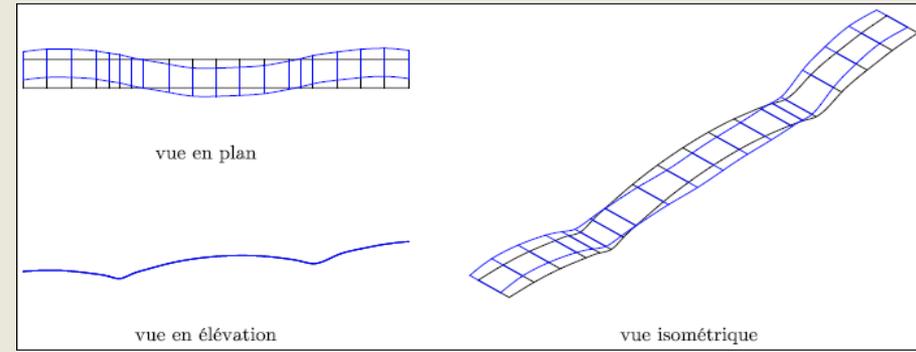
**Mode 3 : 2<sup>e</sup> mode de flexion – 3.330 Hz (complexité: 6.54% )**

# 2. PONT DE LA RIVIÈRE-AUX-MULETS

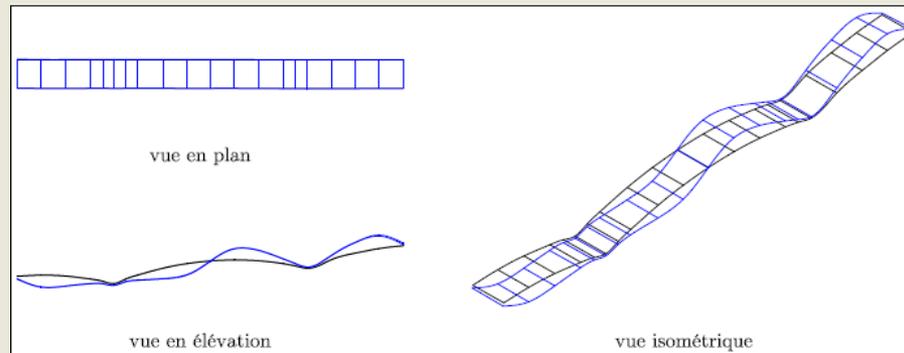
## b) Essais d'analyse modale



**Mode 4 : 3<sup>e</sup> mode de flexion – 4.616 Hz (complexité: 11.28% )**



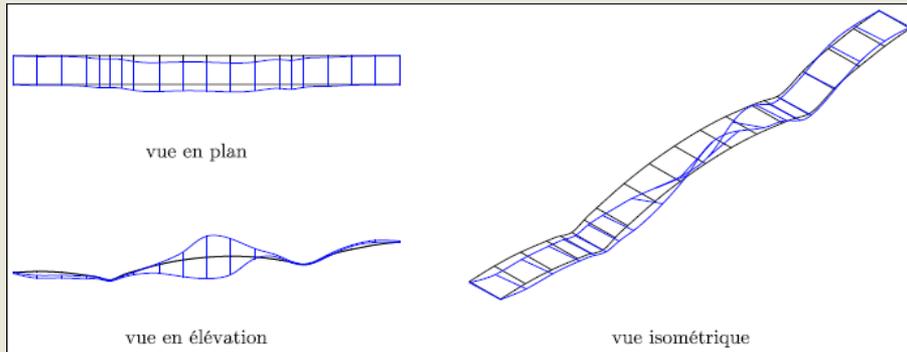
**Mode 5 : 2<sup>e</sup> mode latéral – 5.209 Hz (complexité: 3.08% )**



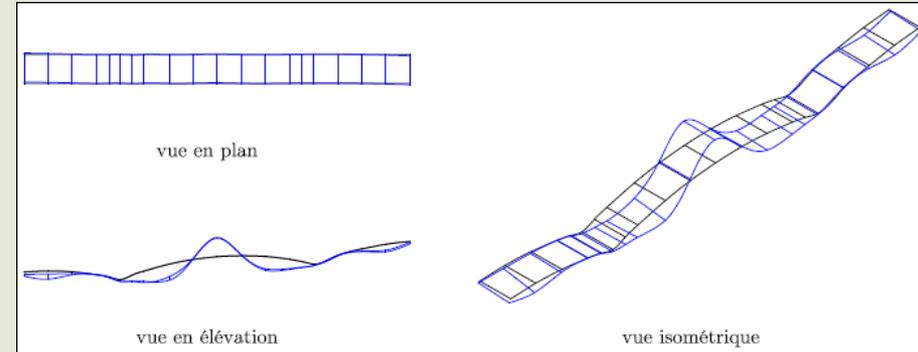
**Mode 6 : 4<sup>e</sup> mode de flexion – 5.644 Hz (complexité: 5.31% )**

# 2. PONT DE LA RIVIÈRE-AUX-MULETS

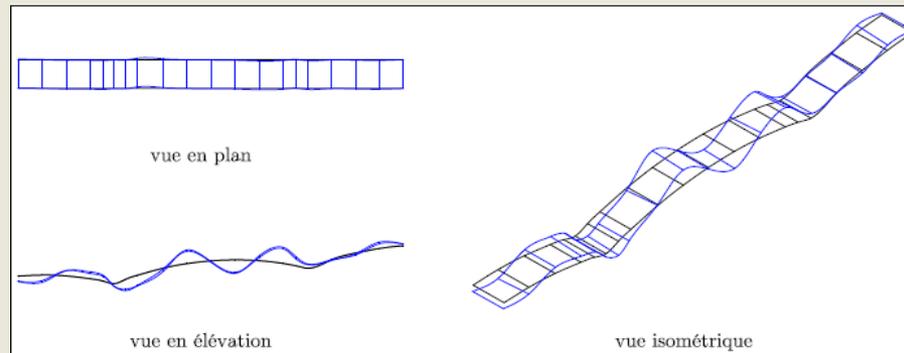
## b) Essais d'analyse modale



**Mode 7 : 1<sup>er</sup> mode de torsion – 6.185 Hz (complexité: 21.54%)**



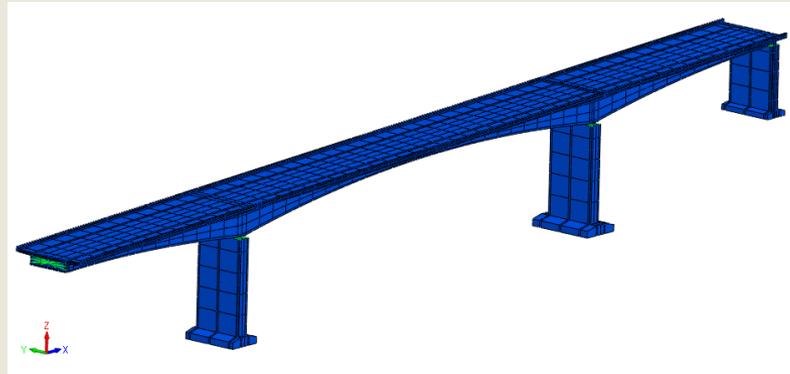
**Mode 8 : 5<sup>e</sup> mode flexion – 8.182 Hz (complexité: 9.47%)**



**Mode 9 : 6<sup>e</sup> mode flexion – 11.58 Hz (complexité: 26.35%)**

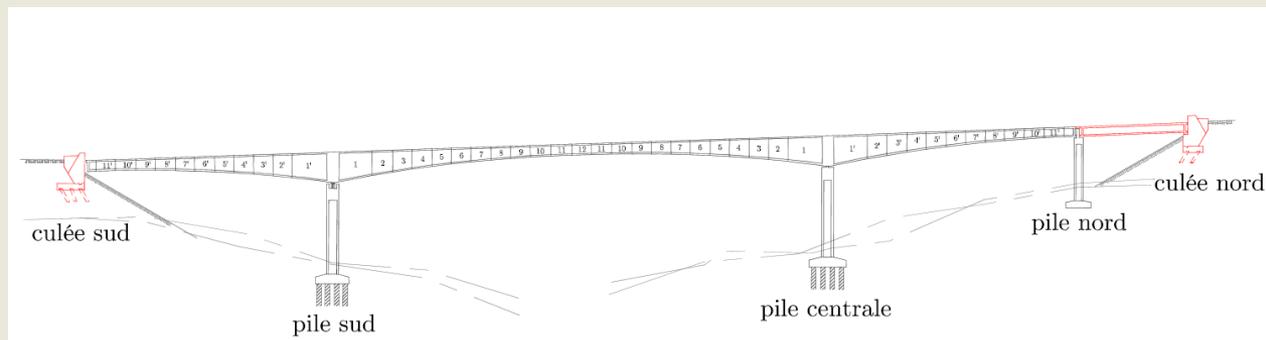
# 3. ASSEMBLAGE DU MODÈLE NUMÉRIQUE

- Une géométrie volumique fournie par le MTQ a été assemblée et maillée sous ABAQUS.
- La géométrie est conforme aux plans de construction et de réfection de l'ouvrage.



Modèle volumique assemblé avec ABAQUS

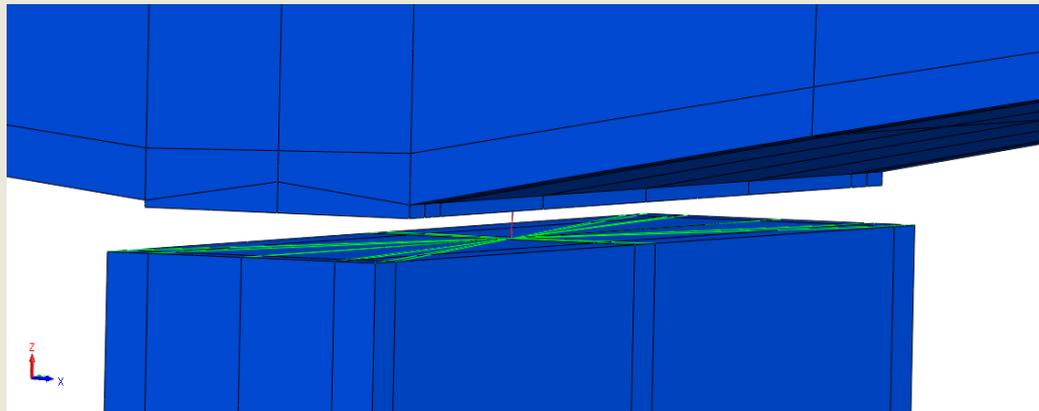
- Les culées Nord et Sud et la travée d'approche Nord n'ont pas été modélisées:



Sections non modélisées du pont (en rouge)

# 3. ASSEMBLAGE DU MODÈLE NUMÉRIQUE

- Le module d'élasticité du béton a été pris conformément aux plans de construction avec les coefficients de majoration suivants:
  - x 1.15 pour prendre en compte les effets dynamiques ;
  - x 1.2 supplémentaire pour les zones précontraintes du tablier.
- Les connexions tablier-culées et tablier-piles sont modélisées par un élément ressort à 5 ddl.
  - Les valeurs initiales sont des valeurs usuelles de la littérature (erreur importante probable).



Connexion typ. tablier – pile / culée

- Les fondations des piles sont considérées comme encastrées.

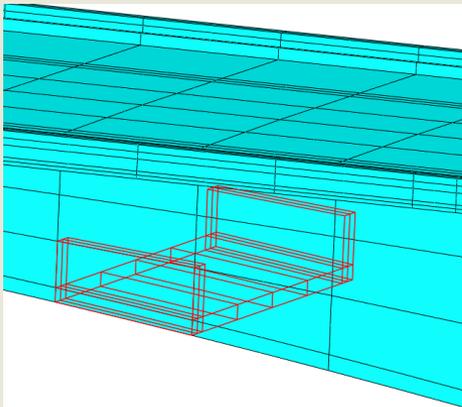
# 4. RECALAGE DU MODÈLE

- Bien que la mise à jour des paramètres soit automatisée, l'algorithme de calcul est très sensible à de multiples variables qu'il faut convenablement choisir :
  - définition et nombre des paramètres de recalage;
  - valeurs initiales des paramètres;
  - modes de vibration cibles (expérimentaux et numériques) ;
  - critère de convergence des itérations de recalage ;
  - fiabilité du modèle (conditions aux limites surtout).
- Une méthodologie rigoureuse et adaptée aux problématiques de modélisation des ponts est nécessaire pour éviter l'obtention de résultats incohérents.
- **La méthode de mise à jour numérique de modèles n'a rien de magique !**
  - En tout temps, l'ingénieur doit conserver un regard critique sur les résultats générés.

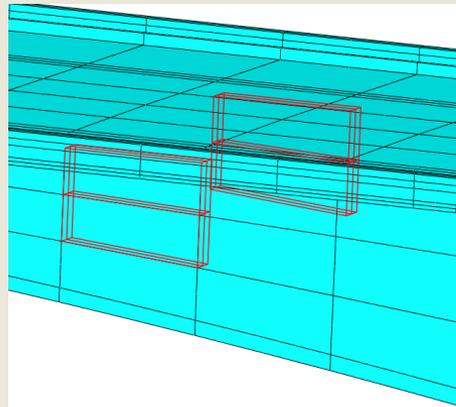
# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## a) Étape 1 – Paramétrage du modèle

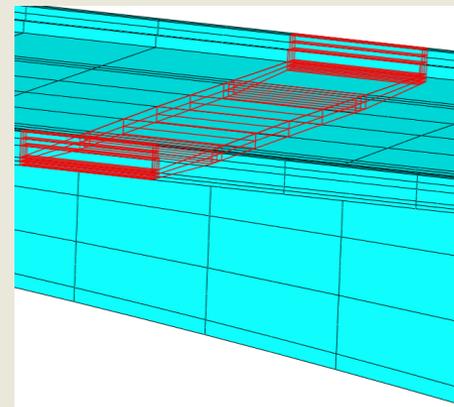
- Le modèle complet comprend 4898 éléments hexaédriques en béton pouvant être calibrés individuellement en fonction de leur module d'élasticité.
- Il est important d'établir un rapport raisonnable entre le nombre d'inconnues et le nombre d'équations venant des données expérimentales en regroupant des éléments.
- Le tablier et les piles ont été segmentés en sections, réduisant à 179 le nombre de paramètres portant sur le module d'élasticité  $E_c$  qui s'ajoutent aux 20 ressorts d'appui.



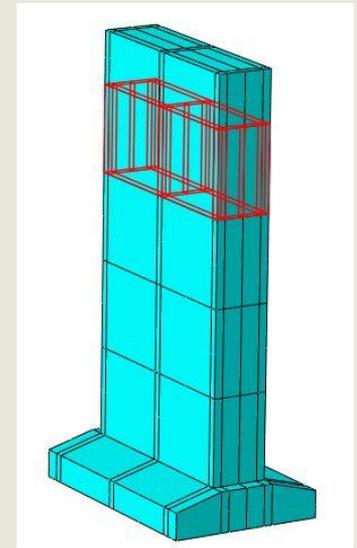
Section – bas tablier (typ.)



Section– milieu tablier (typ.)



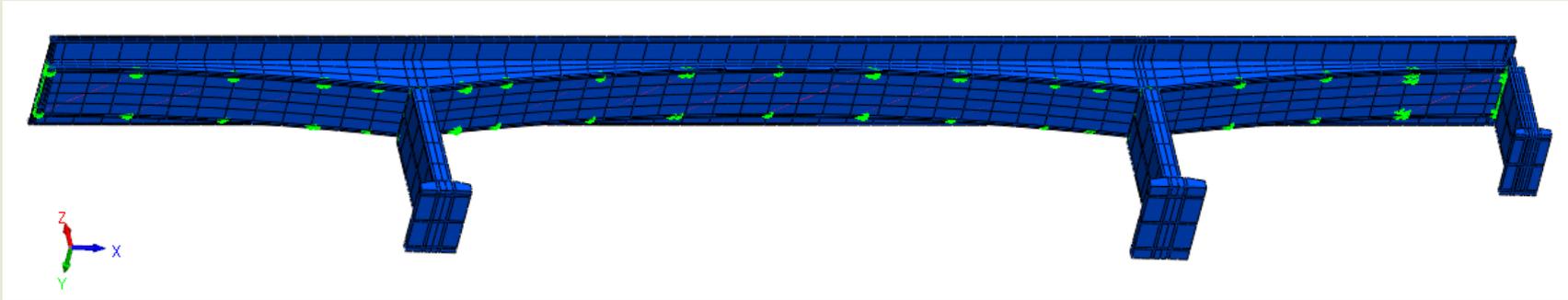
Section – haut tablier (typ.)



Section– pile (typ.)

# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## b) Étape 2 – Choix des modes expérimentaux



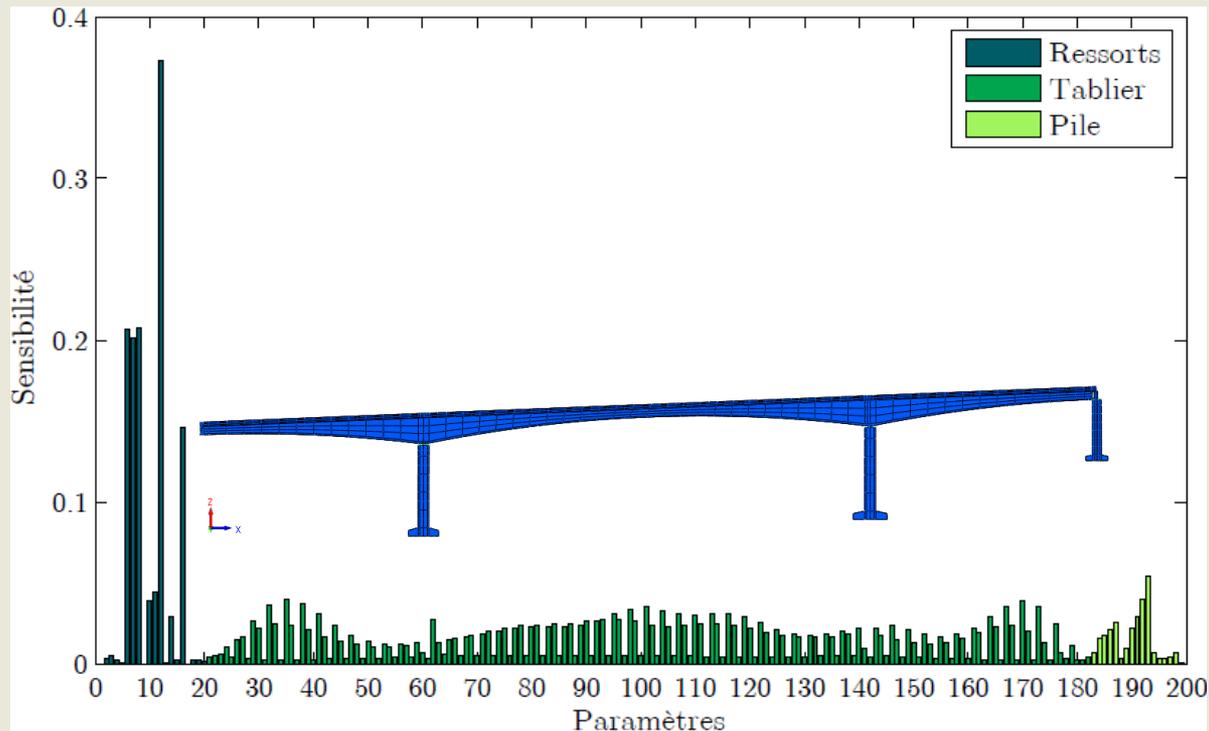
Appariement des points expérimentaux aux nœuds du modèle numérique

- L'algorithme de recalage associe les 9 modes de vibration expérimentaux aux modes du modèle numérique en comparant une à une leur déformée (*pairing*).
- Les modes les moins bien définis ont été écartés de l'analyse en se basant sur la complexité de la déformée expérimentale (modes 7 – torsion – et mode 9 – flexion).
- En début d'analyse, il est important de s'assurer que les modes numériques sont associés aux bons modes expérimentaux. Des confusions sont possibles lors de l'association.

# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## c) Étape 3 – Recalage préliminaire des appuis

- L'algorithme est très sensible aux valeurs des conditions aux limites (ressorts) :
  - étant donné la grande influence des conditions aux limites sur la rigidité globale du pont;
  - étant donné les faibles valeurs initiales de rigidité utilisées dans le modèle.



Analyse de sensibilité sur les 9 premières fréquences avec 199 paramètres (avant recalage préliminaire des appuis).

# 4. RECALAGE DU MODÈLE

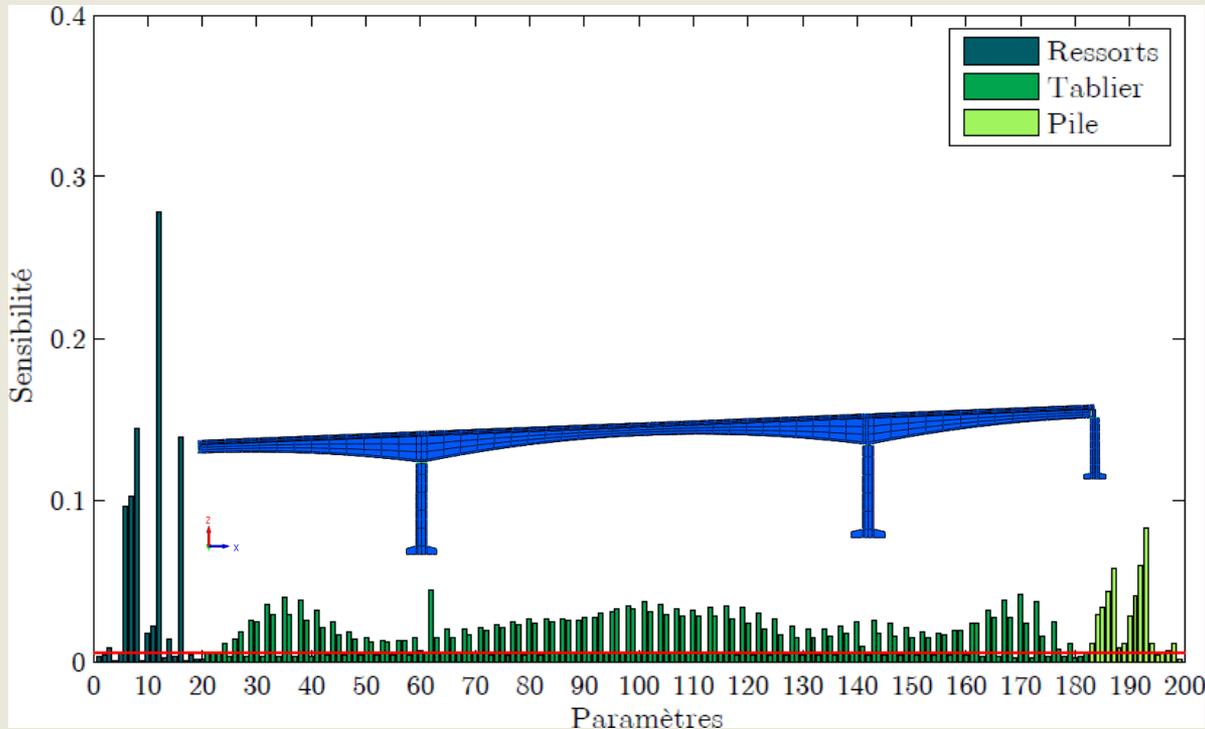
## c) Étape 3 – Recalage préliminaire des appuis

- L'algorithme est très sensible aux valeurs des conditions aux limites (ressorts).
- Un recalage préliminaire des appuis est nécessaire pour établir un ordre de grandeur convenable des rigidités des ressorts avant la calibration finale du modèle.
- Trois recalages avec un critère de convergence grossier ont été effectués, portant uniquement sur les valeurs des ressorts:
  - Corrélation sur la fréquence des deux modes latéraux  $\rightarrow K_x = K_y$
  - Corrélation sur la fréquence des cinq modes de flexion  $\rightarrow K_z$
  - Corrélation sur la fréquence du mode de torsion  $\rightarrow K_{\theta,x}$

# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## d) Étape 4 – Choix des paramètres de recalage

- Une analyse de sensibilité indique l'influence de chaque paramètre dans le processus de recalage.



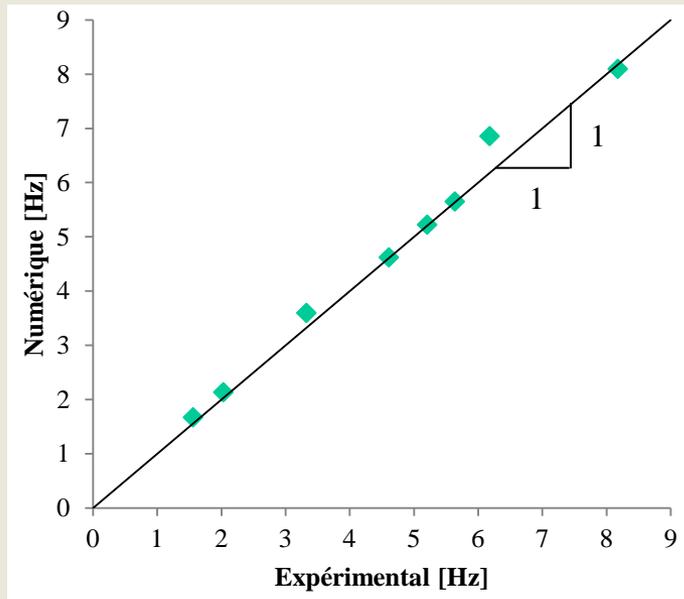
Analyse de sensibilité sur les 9 premières fréquences avec 199 paramètres

- Les paramètres ayant une sensibilité négligeable peuvent être écartés pour réduire le nombre d'inconnues (paramètres dits “non détectables”).
  - ⇒ Réduction de l'analyse à 133 paramètres de recalage après suppression des paramètres non détectables.

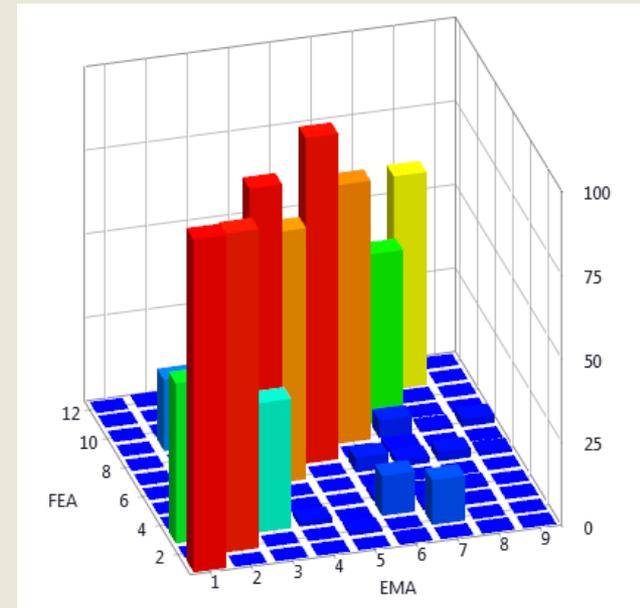
# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## e) Résultats

- Les résultats avant calibration montrent une différence moyenne de +5% sur les fréquences et une moyenne des MAC sur les déformées modales d'environ 80%.
  - Le 9<sup>e</sup> mode (6<sup>e</sup> mode de flexion) a été exclu de l'analyse à l'étape 2 de même que la déformée du mode 7 (torsion).



Différences sur les fréquences – avant recalage

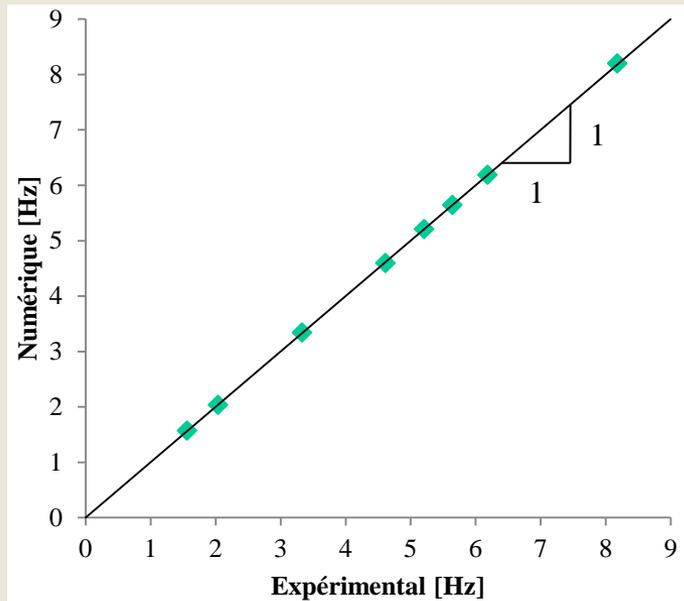


MAC - avant recalage

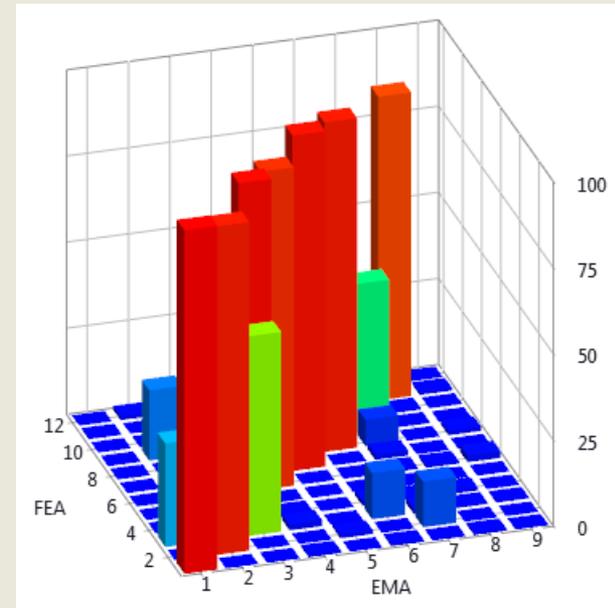
# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## e) Résultats

- Après quatre itérations, l'erreur cumulative totale sur les fréquences et les déformées est  $< 5\%$ .
  - Le MAC du mode numérique associé au mode de torsion est faible, car seule sa fréquence a été considérée pour le recalage.
- Durée de l'analyse : 3 minutes.



Différences sur les fréquences – après recalage

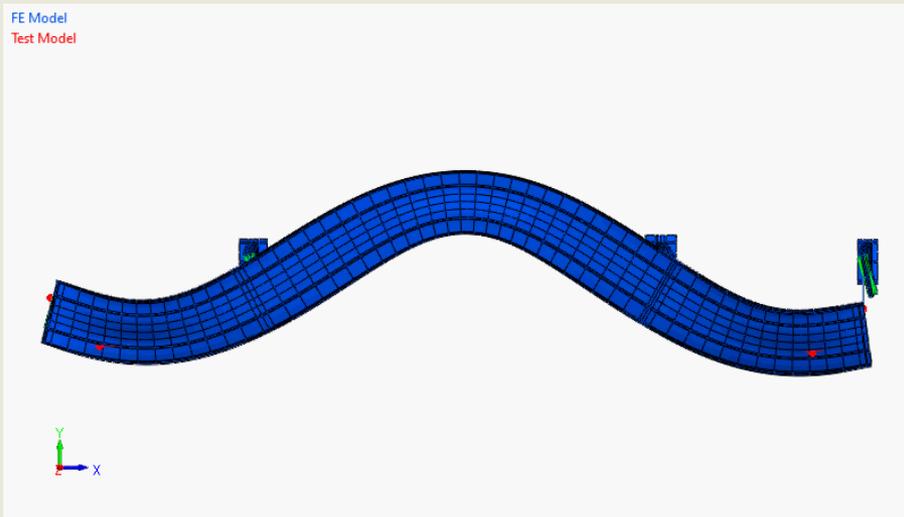


MAC – après recalage

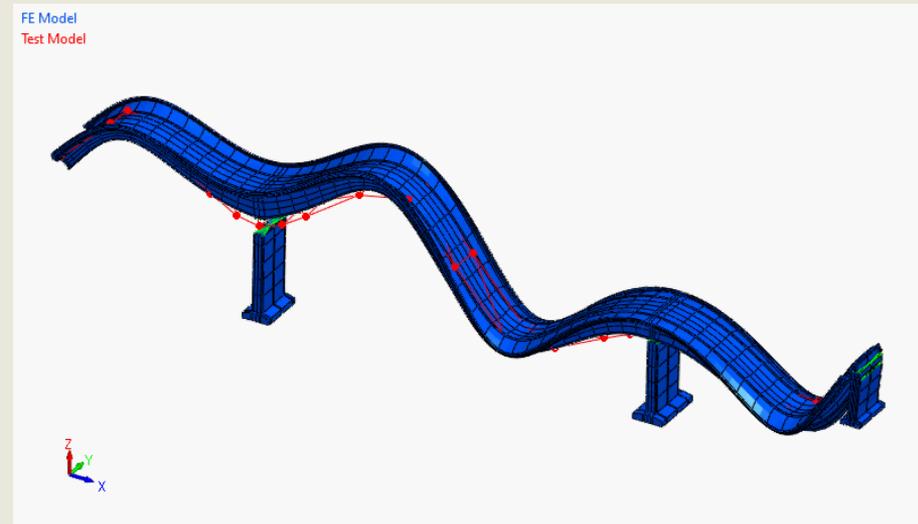
# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## e) Résultats

- Comparaisons des déformées modales expérimentales et numériques



2<sup>e</sup> mode latéral



4<sup>e</sup> mode de flexion

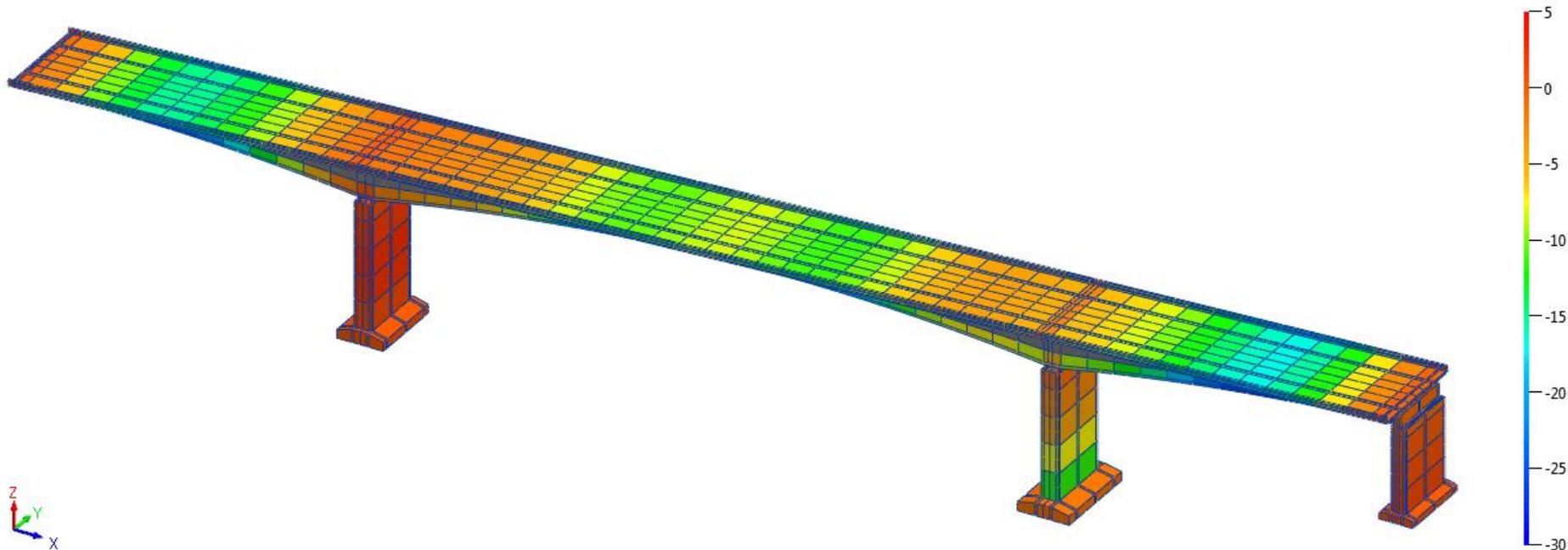
# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## e) Résultats

■ Calibration des modules d'élasticité  $E_c$  après 4 itérations :

- Réduction de -18% à la fibre supérieure en zone de moment positif – travée nord et sud;
- Réduction de -12% à la base de la pile centrale (pourrait être attribuable à la flexibilité de la fondation).

FE Model



Réduction du module d'élasticité  $E_c$  – vue de profil

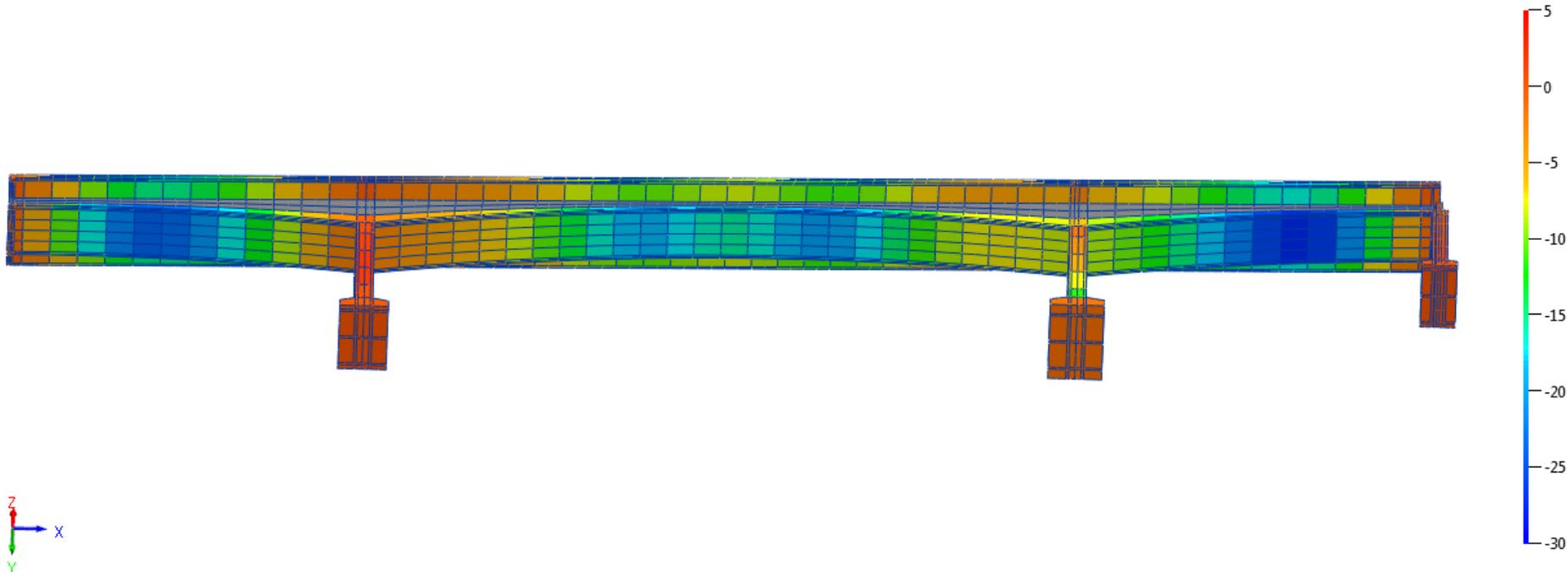
# 4. RECALAGE DU MODÈLE

## e) Résultats

■ Calibration des modules d'élasticité  $E_c$  après 4 itérations :

- Réduction de -30% à la fibre inférieure en zone de moment positif – travée nord et sud;
- Réduction de -20% à la fibre inférieure en zone de moment positif – travée centrale.

FE Model



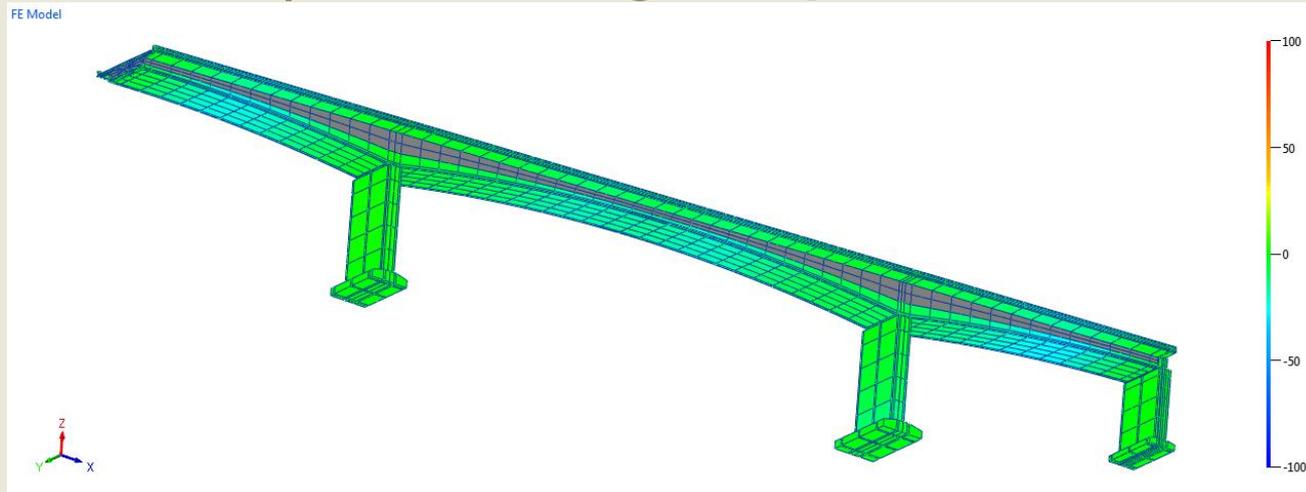
Réduction du module d'élasticité  $E_c$  – vue de dessous

# 5. SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODE

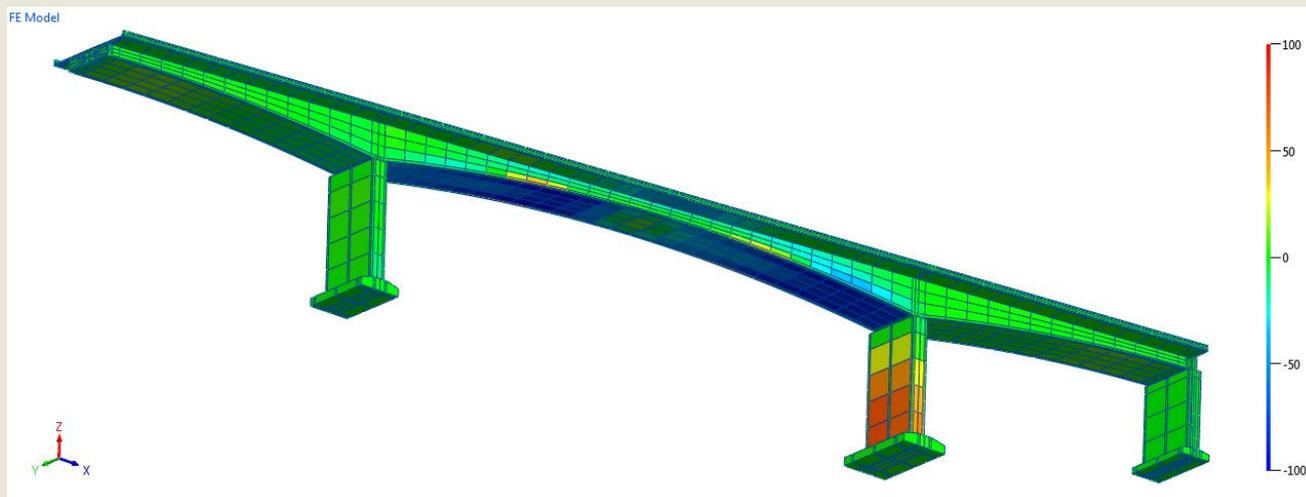
- L'utilisation de la méthode de mise à jour assistée de modèles numériques est rendue délicate par la sensibilité importante de l'algorithme par rapport à plusieurs choix relevant strictement de l'ingénieur :
  - le paramétrage du modèle ;
  - les valeurs initiales choisies des paramètres de recalage.
- Deux cas d'étude ont été effectués qui le démontrent:
  - Utilisation d'un paramétrage complet du modèle d'éléments finis (4918 paramètres) rendant le problème fortement sous-déterminé.
  - Recalage du modèle sans calibration préliminaire des appuis (ressorts).

# 5. SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODE

## a) Paramétrage du problème



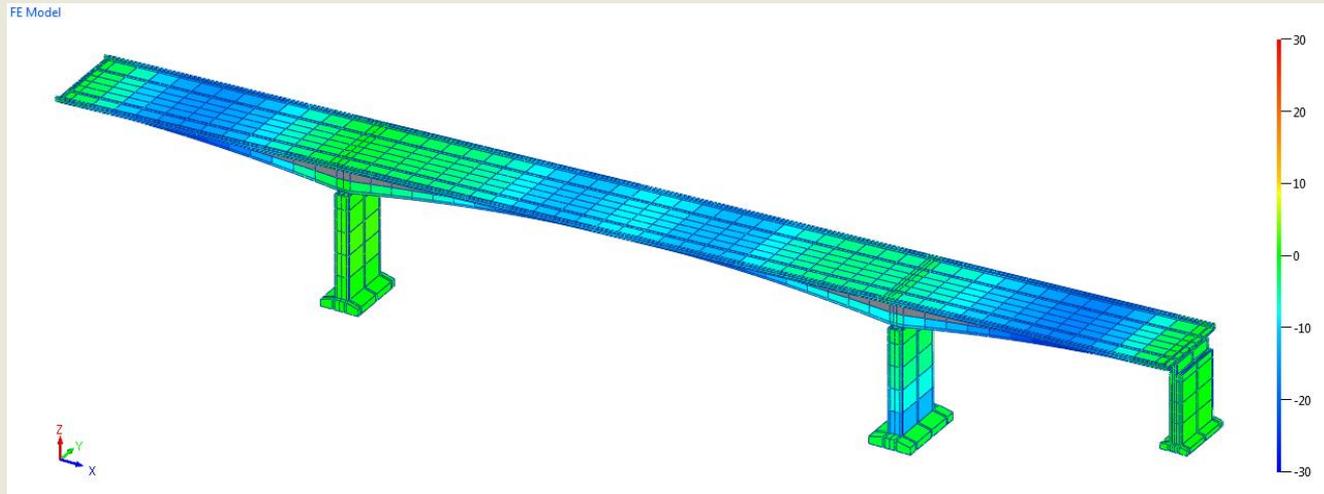
Modèle recalé selon la méthodologie proposée – 133 paramètres



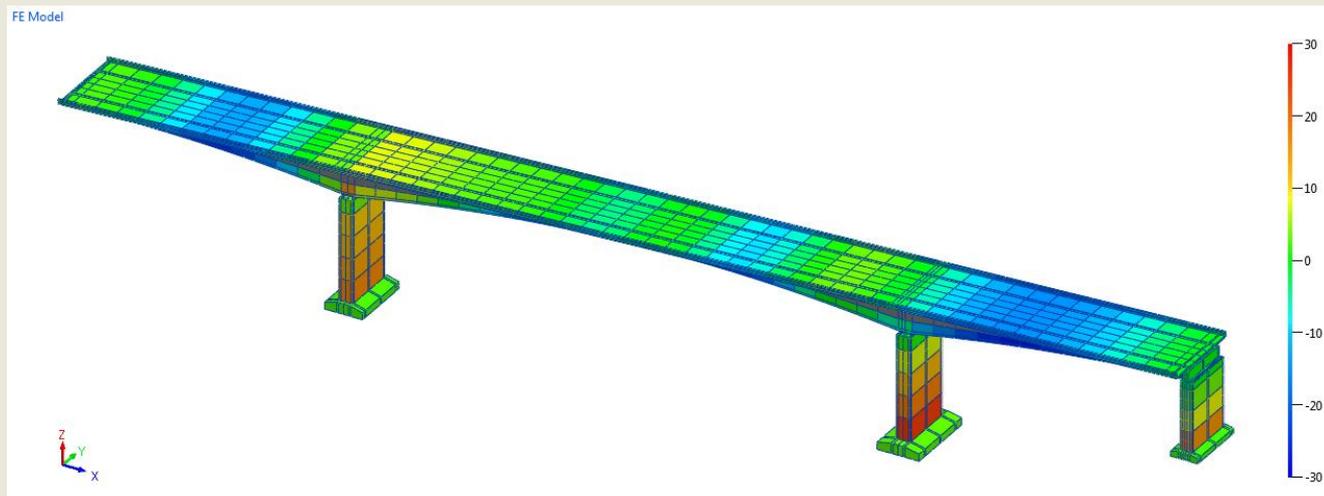
Modèle recalé avec tous les éléments locaux – 4918 paramètres

# 5. SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODE

## b) Valeurs initiales des paramètres



Modèle recalé selon la méthodologie proposée

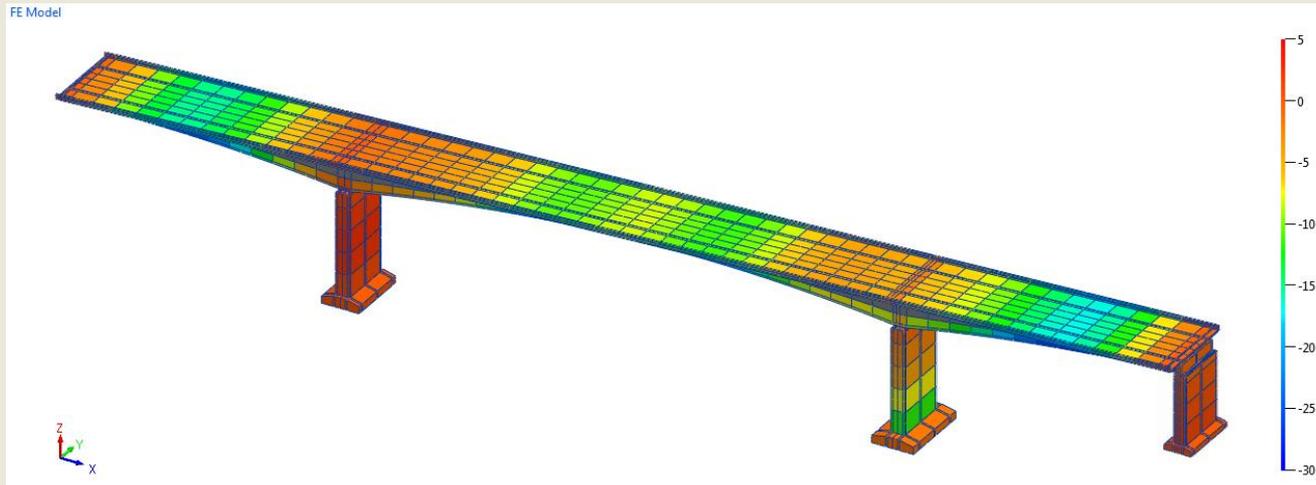


Modèle recalé sans calibration préliminaire des appuis

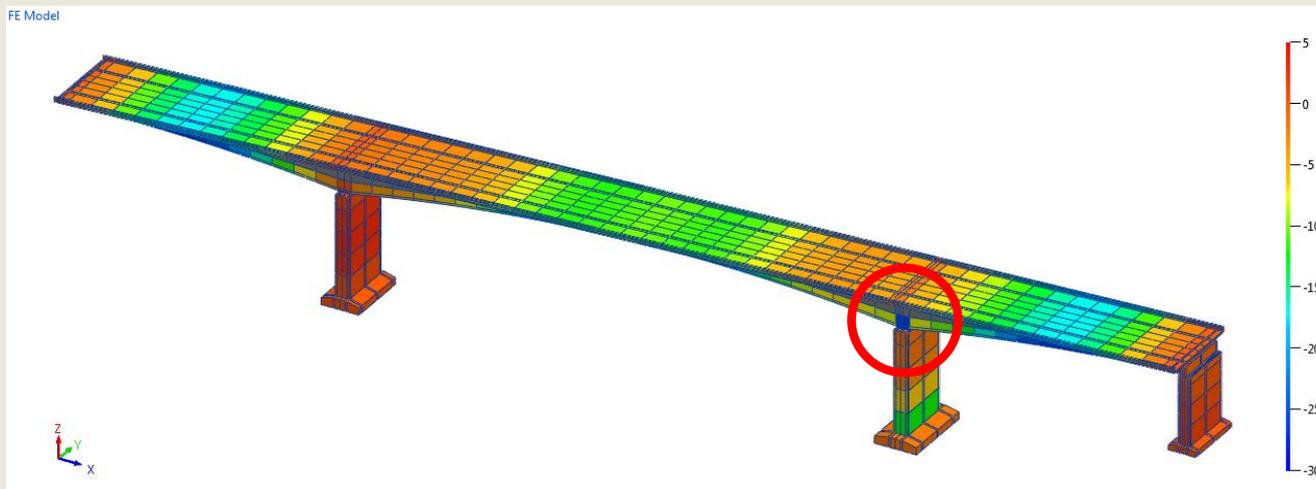
# 6. CORRECTION DE MODÈLE

- La méthode de mise à jour assistée de modèle numérique permet de vérifier la validité de certaines hypothèses de modélisation ou d'en détecter des erreurs.
- En exerçant un bon jugement, des résultats de calibration incohérents ou sans explication rationnelle peuvent être interprétés pour détecter des erreurs dans le modèle structural.
  - Cas d'étude: erreur de modélisation des conditions d'appui à la pile centrale.

# 6. CORRECTION DE MODÈLE



Modèle recalé selon la méthodologie proposée (encastrement partiel à la pile centrale)



Modèle recalé avec un encastrement total au niveau de la pile centrale

# 7. DÉTECTION D'ENDOMMAGEMENT

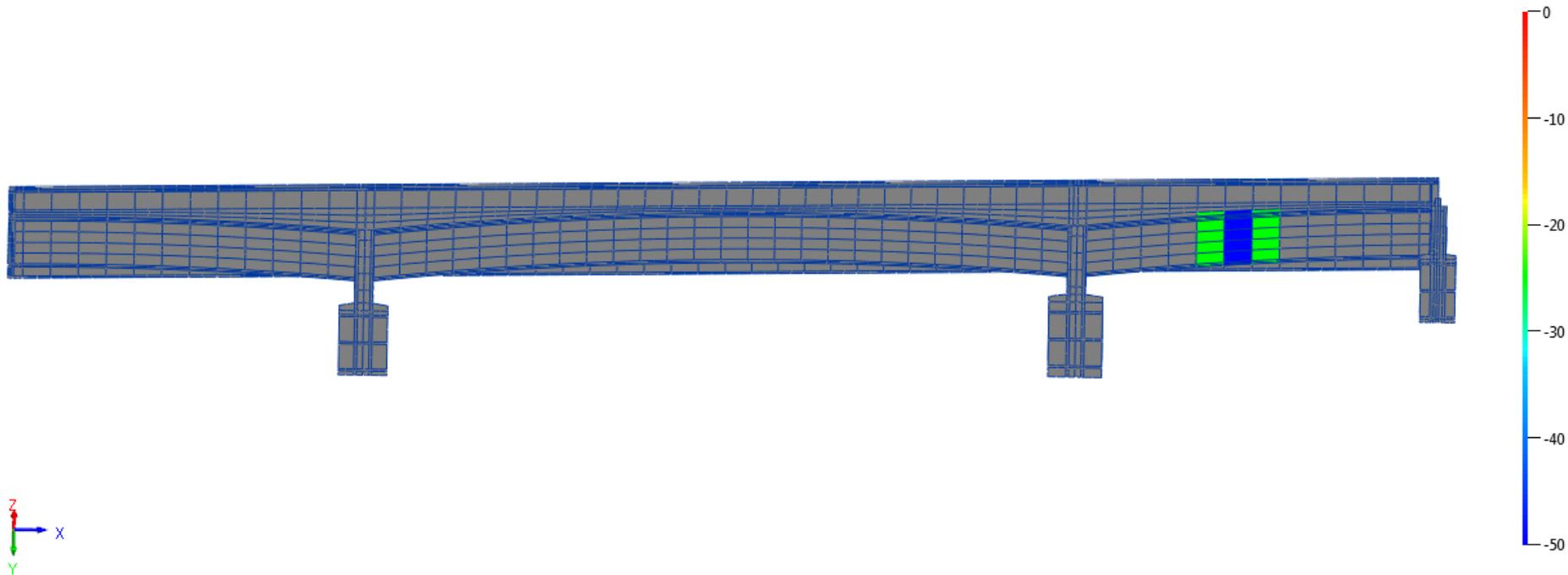
- La méthode permet de détecter, localiser et quantifier un endommagement dans la structure en utilisant pour le recalage des données expérimentales mesurées à deux moments différents.
  - Les premières mesures servent au recalage initial du modèle.
  - Les mesures suivantes permettent de détecter l'évolution des paramètres par rapport à la première mesure.
  
- Un endommagement fictif a été introduit numériquement dans le modèle du pont afin de vérifier la capacité du logiciel à détecter l'endommagement. Les étapes sont :
  - Exportation du modèle recalé et de ses modes ;
  - Simulation numérique d'un endommagement localisé ;
  - Exportation des nouvelles fréquences et des modes correspondant à l'état endommagé ;
  - Mise à jour du modèle ayant pour cible les nouvelles fréquences et modes correspondant à l'état endommagé.
  
- Deux différents scénarios sont présentés:
  - Endommagement sous le tablier au milieu de la travée nord;
  - Endommagement à la base de la pile sud.

# 7. DÉTECTION DE L'ENDOMMAGEMENT

## a) Endommagement du tablier

- Un endommagement diffus de -50% et -25% a été appliqué sur les tranches situées sous le tablier au milieu de la travée nord.

FE Model



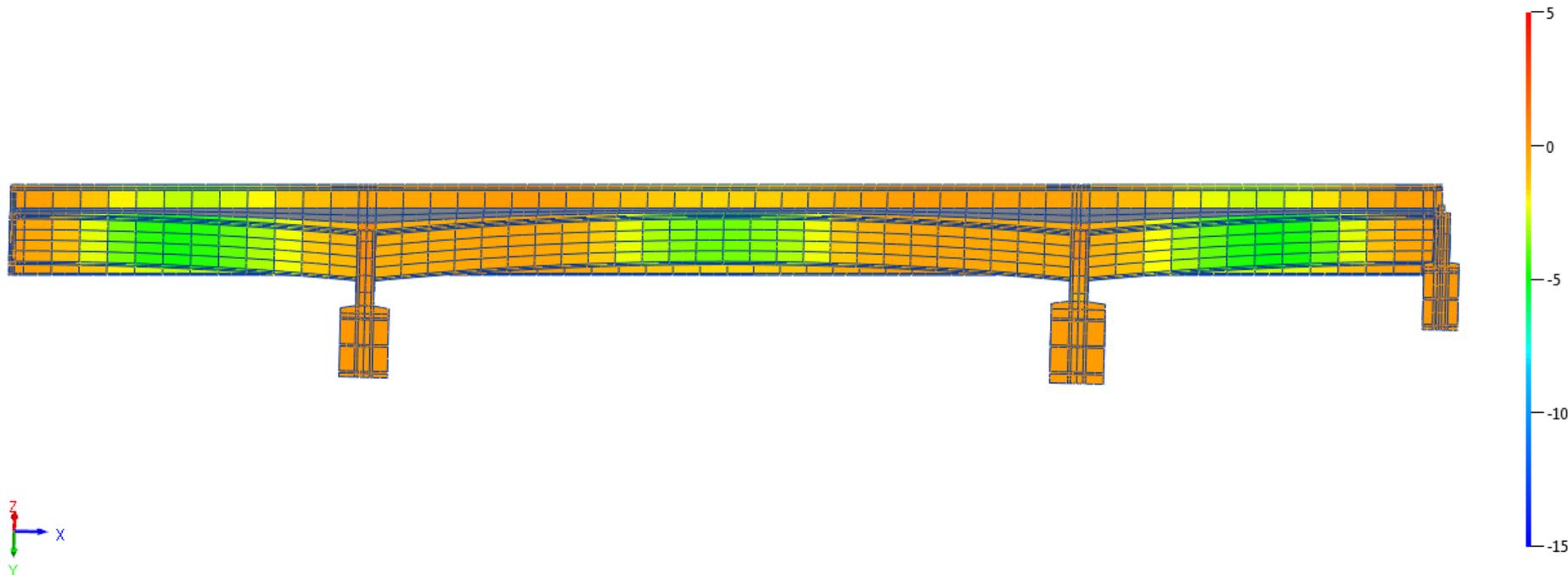
Détection de l'endommagement sous la travée nord – endommagement fictif appliqué

# 7. DÉTECTION DE L'ENDOMMAGEMENT

## a) Endommagement du tablier

- Un endommagement diffus de -50% et -25% a été appliqué sur les tranches situées sous le tablier au milieu de la travée nord.
- Les 8 mêmes modes utilisés lors du recalage du modèle ont été sélectionnés.

FE Model



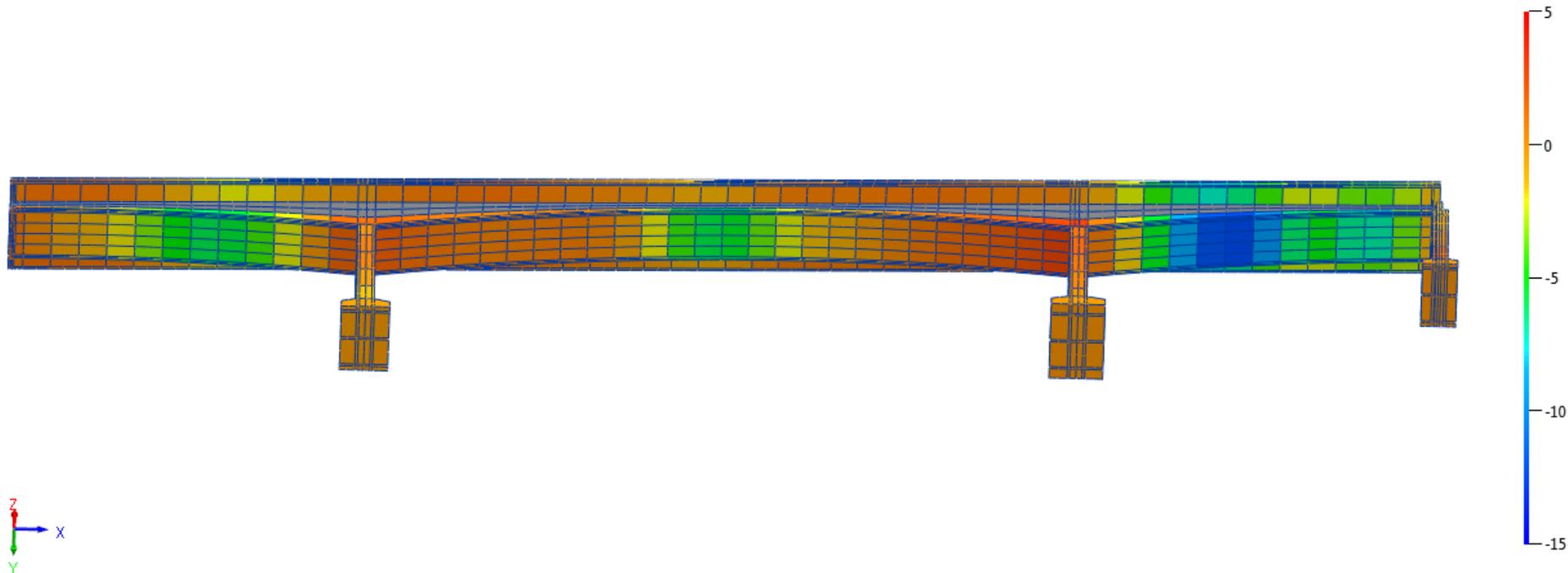
Détection de l'endommagement sous la travée nord – 8 modes utilisés

# 7. DÉTECTION DE L'ENDOMMAGEMENT

## a) Endommagement du tablier

- Un endommagement diffus de -50% et -25% a été appliqué sur les tranches situées sous le tablier au milieu de la travée nord.
- Les 20 premiers modes numériques ont été sélectionnés.

FE Model



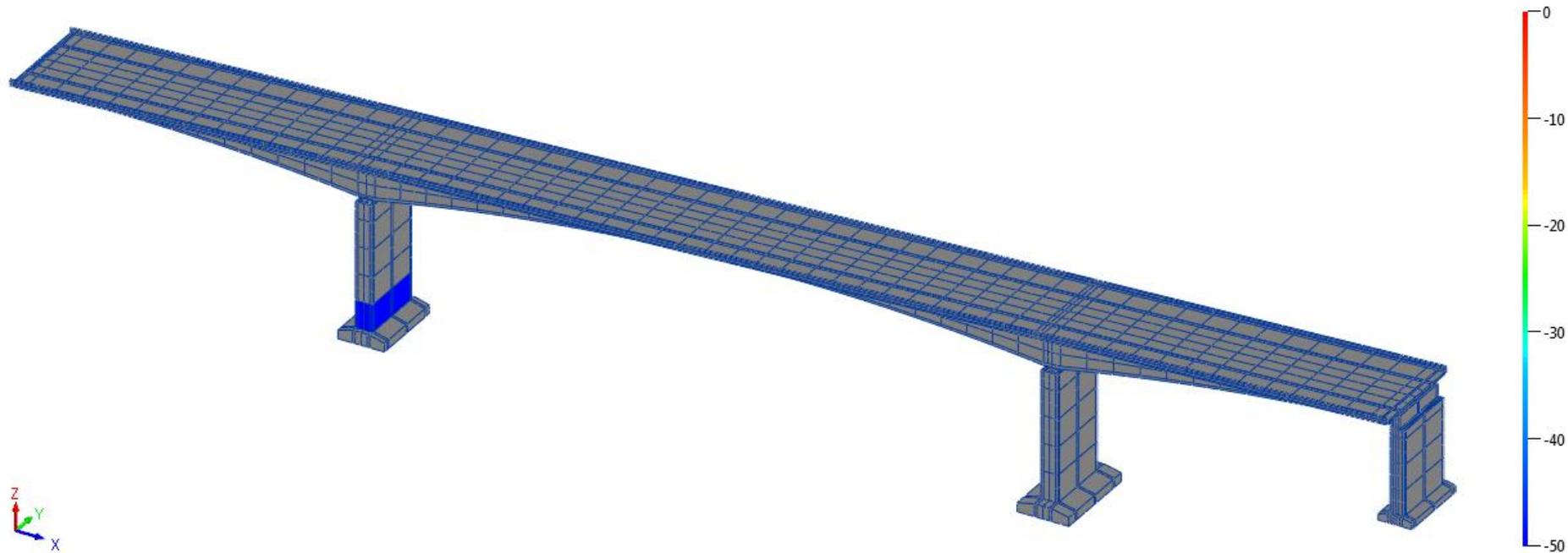
Détection de l'endommagement sous la travée nord – 20 premiers modes utilisés

# 7. DÉTECTION DE L'ENDOMMAGEMENT

## b) Endommagement d'une pile

- Un endommagement de -50% a été appliqué à la base de la pile sud.

FE Model



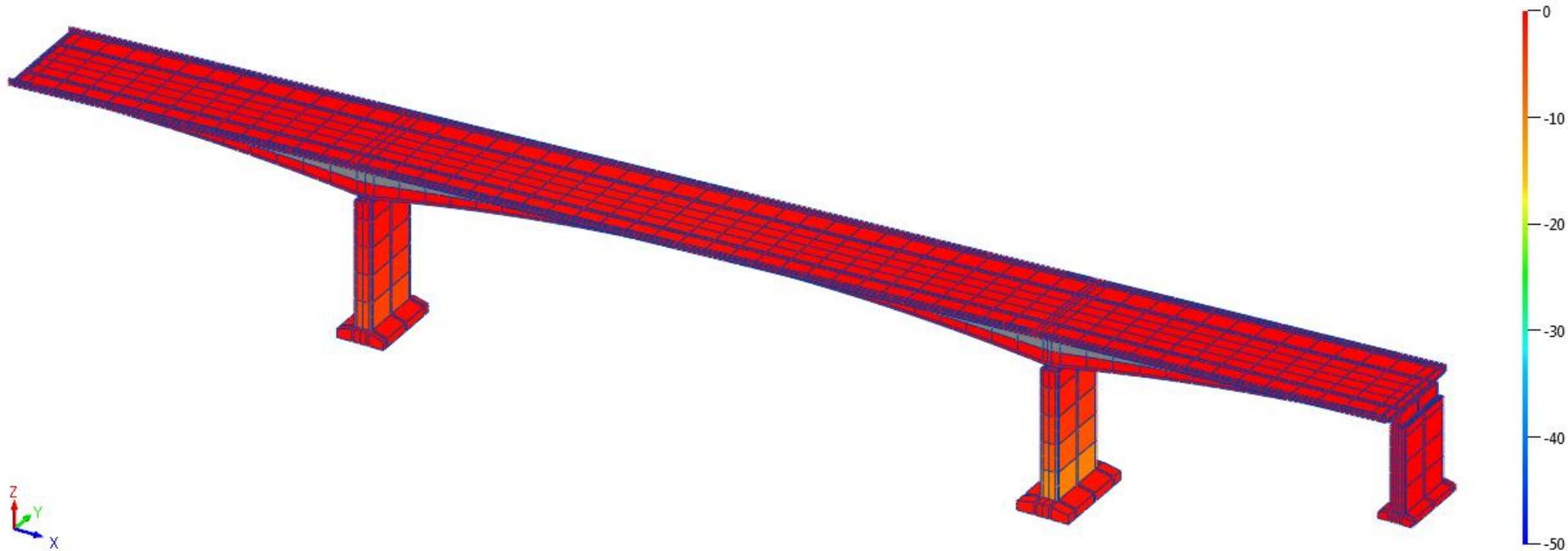
Détection de l'endommagement à la base de la pile sud – endommagement fictif appliqué

# 7. DÉTECTION DE L'ENDOMMAGEMENT

## b) Endommagement d'une pile

- Un endommagement de -50% a été appliqué à la base de la pile sud.
- Les 8 mêmes modes utilisés lors du recalage du modèle ont été sélectionnés.

FE Model



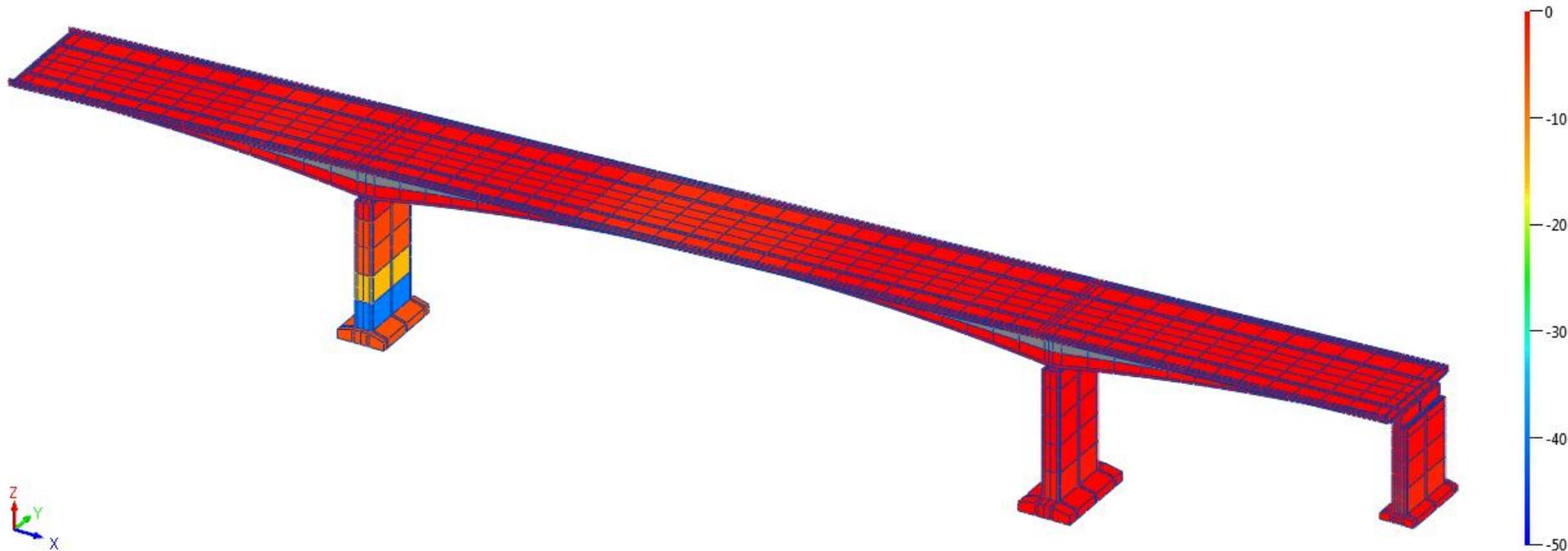
Détection de l'endommagement à la base de la pile sud – 8 modes utilisés

# 7. DÉTECTION DE L'ENDOMMAGEMENT

## b) Endommagement d'une pile

- Un endommagement de -50% a été appliqué à la base de la pile sud.
- Les 20 premiers modes numériques ont été sélectionnés.

FE Model



Détection de l'endommagement à la base de la pile sud – 20 premiers modes utilisés

# 8. CONCLUSIONS

- Les méthodes de mise à jour assistée de modèles numériques implémentés sous certains logiciels commerciaux sont efficaces pour recalibrer adéquatement et rapidement des modèles de pont sur des propriétés dynamiques mesurées expérimentalement.
- Les données issues de mesures sous vibrations ambiantes sont bien adaptées au problème, mais elles peuvent limiter le nombre de modes utilisables en raison des erreurs expérimentales.
- La méthode est très sensible au choix des paramètres de recalage, à leur nombre et à la valeur initiale qui leur est attribuée.
- Une méthodologie adaptée aux structures de pont a été proposée qui limite le risque d'erreurs numériques.
- Les méthodes de mise à jour de modèle ont l'intérêt de permettre la détection d'erreurs importantes de modélisation.
- Les cas d'étude effectués montrent la capacité de ces méthodes à détecter un endommagement survenu sur une structure entre deux mesures expérimentales. La précision de ce processus augmente nettement avec un nombre croissant de modes expérimentaux.

## Remerciements

Les auteurs aimeraient souligner le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) à travers le Réseau canadien pour la recherche parasismique (RCRP). Les auteurs remercient le Fonds du Québec pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour son soutien financier au Centre d'études interuniversitaire des structures sous charges extrêmes (CEISCE). Les auteurs tiennent finalement à souligner la contribution majeure du Ministère des Transports du Québec qui a initié et financé ce projet à travers un contrat de recherche.



**NSERC**  
**CRSNG**

Regroupements stratégiques

*Fonds de recherche  
sur la nature  
et les technologies*

Québec 