

Évaluation d'endommagement par essais dynamiques

Alireza Alvandi¹, Josée Bastien², Christian Cremona³ et Marc Jolin⁴

Résumé: Au cours des 30 dernières années, la détection d'endommagement des structures basée sur les changements des propriétés dynamiques a fait l'objet de plusieurs recherches. L'idée générale est que les caractéristiques dynamiques de la structure (fréquences propres, déformées propres, coefficients d'amortissement) sont fonction des propriétés physiques de la structure (rigidité, masse, amortissement) et que leur modification correspond à un changement des caractéristiques physiques de la structure. Les propriétés telles que la courbure des déformées propres, la matrice de flexibilité, la courbure de flexibilité et l'énergie de déformation obtenues à partir des paramètres modaux de la structure peuvent être utilisées pour détecter des dommages structuraux.

Cet article présente l'évaluation structurale d'un pont en béton armé âgé de 60 ans. Ce pont de travée simple fait partie des 76 ponts en béton armé d'une seule portée dans la province du Québec au Canada. L'évaluation du pont est basée sur les paramètres modaux obtenus par un essai dynamique in situ et un modèle numérique pour construire l'état intact (ou original) du pont. Pour l'évaluation d'intégrité du pont, plusieurs techniques vibratoires de détection d'endommagement peuvent être appliquées aux paramètres modaux de la structure, obtenus à partir de l'état actuel (essai dynamique) et de l'état intact (modèle numérique). D'après les résultats obtenus, la méthode basée sur l'énergie de déformation et la courbure de flexibilité sont les méthodes convenables pour l'évaluation de dommage de ce type de pont. Cette conclusion peut être généralisée à l'ensemble des ponts en béton armé du Québec présentant des endommagements.

1. INTRODUCTION

L'intérêt de suivre le comportement d'une structure et de détecter de façon précoce un endommagement quelconque est un souci permanent, ceci quel que soit le domaine d'ingénierie. En génie civil, les méthodes courantes d'identification d'endommagement (détection acoustique, ultrasons, méthodes magnétiques...) exigent que le voisinage de la zone endommagée et la portion de la structure inspectée soient aisément accessibles. Ces méthodes sont très utiles dans le cadre de l'évaluation d'un ouvrage, mais parfois inadaptées pour la surveillance continue. Des approches plus pertinentes de diagnostic de l'état des ouvrages restent donc à considérer afin de constituer une assise fiable et efficace pour une surveillance périodique ou continue d'un ouvrage sur la base d'indicateurs globaux. Ce besoin a ainsi conduit au développement et à la recherche de méthodes examinant les changements des caractéristiques vibratoires. Une telle démarche, appelée *évaluation dynamique*, a été déjà utilisée depuis plusieurs années dans d'autres domaines comme la construction automobile, aéronautique et mécanique. Elle repose sur la relation entre les paramètres modaux (fréquences propres, déformées propres et taux d'amortissement) et les propriétés de rigidité, de dissipation d'énergie et de répartition des masses d'une structure. Ainsi, une modification de ces propriétés mécaniques par endommagement pourrait être suivie par l'étude de la variation des paramètres modaux.

À ce jour diverses méthodes, plus ou moins sophistiquées ont été développées: la méthode de flexibilité (Pandey et Biswas 1994), la méthode de l'indicateur d'endommagement basée sur l'énergie de déformation (Cornwell et al. 1999), la méthode de la courbure de déformées propres (Pandey et al. 1991) et la méthode de la courbure de flexibilité (Zhang et Aktan 1995). Mazurek (Mazurek, 1997), Doebling et Farrar (Doebling et Farrar, 1998) sont les pionniers dans l'étude statistique des résultats de détection de dommages par essais dynamiques. Depuis, les différents aspects de ces méthodes ont été étudiés et validés par des résultats expérimentaux, la plupart du temps obtenus sur des ponts existants (Alvandi 2003).

Dans la plupart du temps, deux mesures dynamiques sont disponibles (avant et après endommagement) et les techniques vibratoires de détection d'endommagement sont appliqués aux paramètres modaux obtenus dans ces deux intervalles de temps. En fait, en Amérique du Nord il est généralement reconnu qu'un nombre significatif de ponts sont âgés et exigent réparation ou renforcement. Dans la plupart des cas, les propriétés dynamiques de l'état actuel de ces ponts peuvent être enregistrés par des essais dynamiques, mais rarement un tel essai dynamique a été effectué antérieurement. Autrement dit, l'état intact des ponts existants est rarement disponible, puisqu'il n'est pas pratique courante d'évaluer les propriétés dynamiques des nouvelles structures.

Dans ce contexte, l'utilisation des méthodes numériques devient inévitable. En effet, les méthodes numériques représentent un moyen simple de simuler les paramètres modaux intacts (originaux) de la structure (cas de référence). C'est l'intention de cet article d'évaluer les modifications structurales d'un pont existant au cours du temps, en utilisant un modèle numérique de référence et en effectuant un essai dynamique in situ. Les paragraphes suivants donnent une courte description du pont et présentent les deux approches (méthodologie expérimentale et modèle numérique) utilisées pour obtenir les paramètres modaux de la structure. Dans cette étude, deux techniques pertinentes d'évaluation d'endommagement seront appliquées aux paramètres modaux identifiés et les résultats de détection de dommages seront présentés et discutés.

2. DESCRIPTION DU PONT

Le pont Saint-Marcel a été construit en 1944 dans la municipalité de Saint-Marcel dans la province du Québec au Canada (Fig. 1). Ce pont en béton armé, constitué de deux poutres en T liées par deux diaphragmes et une dalle de 190 mm d'épaisseur (Fig. 2). Le pont d'une seule portée, a une longueur totale de 22,86 m et une largeur de 7 m avec un important biais de 56°. Les deux diaphragmes de 350 mm de largeur et 350 mm de hauteur sont situés à chaque extrémité des deux poutres. Les deux poutres possèdent trois rangs d'armature longitudinale lisse et carrée. Les culées du pont sont de type gravitaire et leur longueur longitudinale est respectivement de 2675 et 1233 mm aux côtés Est et Ouest. L'inspection visuelle du pont a montré des fissures de cisaillement près des appuis, des fissures de flexion près du centre des poutres et une grande fissure longitudinale sous le tablier entre les poutres. Bien que des signes de la détérioration importante à certains endroits ont été observés, la structure était relativement en bon état.

D'après l'évaluation effectuée par la méthode d'analyse proposée par le Code Canadien de Conception de Pont (CHBDC 2000), il a été constaté que ce pont peut seulement porter environ 30% de la charge maximale envisagée (Jolin et al. 2003). Il est à noter que, la méthode utilisée pour l'évaluation est conservatrice et elle n'est rigoureusement valide que pour des ponts de biais maximal de 25°. En raison de la capacité du pont et autres considérations, les autorités avait placé le pont sous télésurveillance et décidé de le remplacer.

3. ESSAIS DYNAMIQUES IN SITU

Afin de caractériser l'état actuel du pont, une série d'essais dynamiques a été effectuée en juillet 2004 par le Ministère des Transports du Québec. La source d'excitation a été le passage successif de deux camions. La réponse du pont aux points de mesure choisis a été enregistrée par huit accéléromètres verticaux et quatre horizontaux (transversaux) placés sous les poutres et le tablier du pont. La Fig. 3 présente l'une des trois compagnes de mesure effectuée, où les lettres Z et Y signifient respectivement la composante verticale et horizontale de l'accélération. La fréquence d'échantillonnage a été de 500 Hz avec une fréquence de coupure de 35 Hz. En utilisant la méthode de décomposition de fréquence appliquée par le programme d'ARTeMIS (Brincker et al. 2001), les paramètres modaux du pont ont été extraits. Les deux premières déformées propres (en torsion et en flexion) sont présentées à la Fig. 4.

4. MODÈLE NUMÉRIQUE

Afin d'obtenir des paramètres modaux de la structure intacte, un modèle d'éléments finis du pont a été construit à l'aide du programme d'ANSYS. Le tablier, les poutres et les diaphragmes ont été modélisés à l'aide d'éléments de type SOLID45 qui sont des éléments « brique » de huit noeuds (ANSYS 2004). Les déformées propres numériques correspondantes à celles obtenues par des essais dynamiques sont présentées à la Fig. 5.

5. ÉVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT

5.1 Changement des paramètres modaux

Le Tableau 1 présente une comparaison des fréquences numériques et expérimentales obtenues par l'essai dynamique et le modèle numérique. La variation des fréquences (20.72% et 29.06%) dans ce tableau signifie que des modifications structurales ont eu lieu au cours du temps. Il est toutefois possible que, dans le cas du deuxième mode, une portion de la variation soit attribuée au modèle numérique lui-même.

La Fig. 6 présente une comparaison des déformées propres numériques et expérimentales pour chaque voie de mesure. D'après cette figure, dans le cas du premier et du deuxième mode, quelques modifications sont constatées du côté Est et Ouest du tablier.

Le degré de corrélation entre les modes numériques et expérimentaux est donné par le coefficient de MAC (Modal Assurance Criterion) (Allemang et Brown 1982). Ces pourcentages sont présentés dans le Tableau 2. D'après ce tableau, la valeur moyenne de la corrélation des trois voies de mesure (ligne 1-3) pour le premier et le deuxième mode sont respectivement de 96.60% et 80.17%. La comparaison de déformées propres et coefficients de MAC montrent que les modifications principales des modes (intacts et actuels) sont plutôt au niveau des deux extrémités du pont.

5.2 Méthodes d'évaluation de l'endommagement

Une fois l'essai dynamique et l'analyse numérique réalisés, les résultats obtenus peuvent être traités par des méthodes d'évaluation de l'endommagement pour évaluer et localiser les modifications. Plusieurs indicateurs de l'endommagement sont basés sur les propriétés modales identifiées: la courbure de déformées propres, la matrice de flexibilité, la courbure de flexibilité et la méthode de l'indicateur de l'endommagement basée sur l'énergie de déformation. Les détails de ces méthodes peuvent être trouvés dans Doebling et al. (1996) et Alvandi (2003).

Les méthodes de flexibilité, la courbure de déformées propres et la courbure de flexibilité sont des méthodes quantitatives. Ces méthodes présentent les quantités du changement des paramètres comparés, ainsi, une augmentation des modifications structurales se traduit par une augmentation de leur valeur.

Par ailleurs, la méthode de l'indicateur d'endommagement ne présente pas la quantité de l'endommagement; elle fournit plutôt une probabilité d'occurrence de dommage. C'est ainsi que la question de la distinction entre « élément endommagé » et « non endommagé » se pose en regard de la valeur de l'indice de l'endommagement obtenu (z). Plusieurs techniques peuvent être utilisées, comme le test statistique de Neyman-Pearson (Gibson et Melsa 1975) qui demande quelques hypothèses statistiques qui sont parfois difficile à valider. Dans cette étude, pour le classement, on utilise les probabilités de détection et de fausse alarme (Alvandi et Cremona 2002).

Selon cette approche, la probabilité de détection et de fausse alarme pour différents niveaux de bruit et de dommage ont été calculées et la stabilité de cet indicateur a été évaluée. Les résultats de l'étude effectuée montrent que le niveau de seuil (z) dépend de la qualité des données; en augmentant le niveau de bruit le niveau de seuil doit être diminué. Selon cette étude, la gamme du seuil (z) pour détecter les modifications structurales concernant différents niveaux de bruit (0.1% à 3% signal/bruit) est entre 2.2 à 0.5 (Alvandi et Crémone 2004).

6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

En appliquant les méthodes de détection d'endommagement, l'état actuel d'un pont peut être évalué. Afin de vérifier l'influence de la nature des modes sur les résultats de détection (Alvandi 2003), le premier et les deux premiers modes ont été utilisés séparément. Dans le cas de la méthode de l'indicateur d'endommagement, des éléments de type plaque ont été utilisés. Concernant les méthodes quantitatives (courbure de déformées propres, flexibilité et courbure de flexibilité), seuls les résultats obtenus par la méthode de la courbure de flexibilité sont présentés. La Fig.7 présente les résultats obtenus par la méthode de l'indicateur de l'endommagement. Selon cette figure, dans tous les deux cas (le premier et les deux premiers modes), la partie Est du pont a été détectée avec une probabilité élevée (niveau de seuil 4). La même figure montre que le risque de dommage dans la partie Nord est plus grand que dans la partie Sud (niveau 4 contre 2). Quelques dommages sont également identifiés au centre et à l'Ouest du tablier. Les résultats de la méthode de la courbure de flexibilité sont présentés dans la Fig. 8. Ces résultats confirment les zones détectées par la méthode de l'indicateur de l'endommagement. Les zones détectées sont bien cohérentes avec celles localisées par l'inspection visuelle et des essais statiques (Jolin et al. 2003, Perron 2004), où des fissures importantes du côté Est de deux poutres et une fissure diagonale au centre des poutres au-dessus du tablier ont été mentionnées.

7. CONCLUSION

Cet article a présenté une procédure complète d'évaluation globale structurale d'un pont en béton armé sans historique d'essais dynamiques prédéfinis. Dans le cas présent tout comme pour la majorité des ponts existants, sans historique dynamique, les données de référence doivent être construites et, dans ce cas, une approche numérique semble la méthode la plus appropriée.

En ce qui concerne le pont Saint Marcel, la méthode de l'indicateur d'endommagement et la courbure de flexibilité se sont révélées tout à fait aptes pour l'évaluation des dommages. Puisque la méthode de l'indicateur de l'endommagement ne fournit pas la quantité de dommage, il est essentiel qu'avant d'émettre le jugement final sur l'état du pont, les résultats de cette méthode soient comparés avec ceux de la courbure de flexibilité comme cela a été réalisé ici.

Les résultats obtenus montrent clairement que les modifications structurales de ponts existants en béton armé peuvent être évaluées par des techniques appropriées de détection d'endommagement. Ces résultats confirment aussi la faisabilité de ces techniques pour des ouvrages sans historique d'essais dynamiques prédéfinis.

8. REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier sincèrement le Ministère des Transports du Québec et principalement messieurs Marc Savard ing. et Jean-François Laflamme ing. pour leur implication lors des essais statiques et dynamiques sur cet ouvrage.

Références

- Allemang, R.J., Brown, D.L. (1982). "A correlation coefficient for modal vector analysis". *Proc. IMAC 1*, Orlando, Florida, USA.110-116.
- Alvandi, A. (2003). "Contribution à l'utilisation pratique de l'évaluation dynamique pour la détection d'endommagements dans les ponts", PhD thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France (in French).
- ANSYS 6.0 documentation (2004), "ANSYS : Element Description, Solid45".
- Alvandi, A., Cremona, C. (2004). "Assessment of vibration-based damage identification techniques". *Journal of sound and vibration*, submitted.
- Alvandi, A., Cremona, C. (2002). "Reliability of bridge integrity assessment by dynamic testing". *Proc. First European Workshop on Structural Health Monitoring*, Cachan (Paris), France 125-137.
- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2001). "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition". *Smart materials and structures*, (10), 441-445.
- CHBDC, Canadian Highway Bridge Design Code (2000). "A National standard of Canada", CAN/CSA-S6-00.
- Cornwell, P.J., Doebling, S.W., Farrar, C.R. (1999). "Application of the Strain Energy Damage Detection Method to Plate-Like Structures". *Journal of Sound and Vibration*, 224(2), 359-374.
- Doebling, S.W., Farrar, C.R. (1998). "Statistical damage identification techniques applied to the I-40 Bridge over the Rio Grande River". *Proc. IMAC 16*, Santa Barbara, USA, 1717-1724.
- Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W. (1996). "Damage identification and health monitoring on structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review". Report LA-13070-Ms, Los Alamos National Laboratory, USA.
- Gibson, J.D., Melsa, J.L. (1975). "Introduction to nonparametric detection with applications". Academic Press, New-York.
- Jolin, M., Bastien, J., Perron, J.P. (2003). "Load test and assessment of a concrete bridge: case study". *Proc. Second Workshop on Life Prediction*, Paris, France. Edited by D. J. Naus, (RILEM Publications).
- Mazurek, D.F. (1997). "Modal sensitivity to damage in multigirder bridges". *Proc. IMAC 15*, Orlando, Florida, USA, 1898-1982.
- Pandey, A.K., Biswas, M. (1994). "Damage detection in structures using changes in flexibility". *Journal of Sound and Vibration*, 169(1), 3-7.
- Pandey, A.K., Biswas, M., Samman, M.M. (1991). "Damage detection from changes in curvature mode shapes". *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), 321-332.
- Perron, J.P., (2004). "Essais de chargement et télésurveillance sur un pont en béton armé". M.Sc thesis, Université Laval, Québec, Canada, (in French).
- Zhang, Z., Aktan, A.E. (1995). "The damage indices for constructed facilities". *Proc. IMAC 13*, Nashville, 1520-1529.

Tableau 1. Changement de fréquence

Mode	Fréquence (Hz)		
	Numérique	Expérimentale	Changement (%)
1	9.75	7.73	20.72
2	17.48	12.40	29.06

Tableau 2. Coefficient de MAC

Voie de mesure	MAC (%)	
	Mode1	Mode2
Ligne1	98.25	80.57
Ligne2	92.80	86.53
Ligne3	98.74	73.42
Moyenne	96.60	80.17



Fig. 1. Vue du pont Saint Marcel

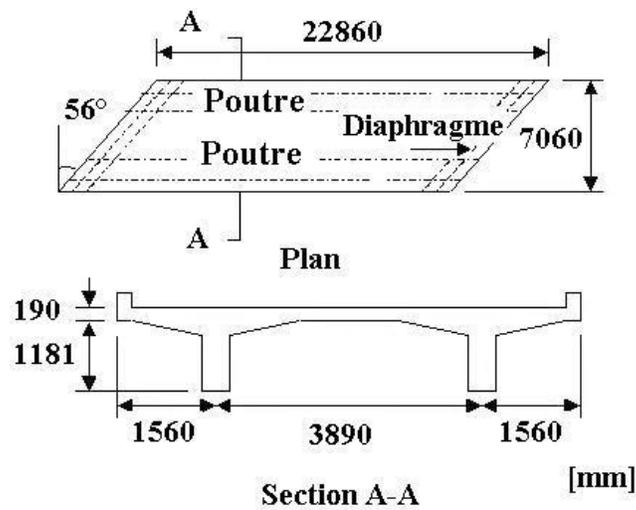


Fig. 2. Géométrie et section transversale du pont Saint Marcel

Position :	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distance :	2290	4570	6860	9140	11430	13720	16000	18290	20570
	(mm)								

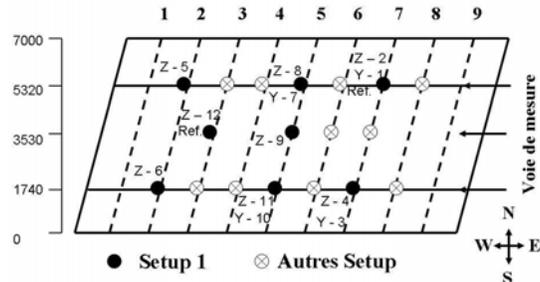


Fig. 3. Implantation des accéléromètres

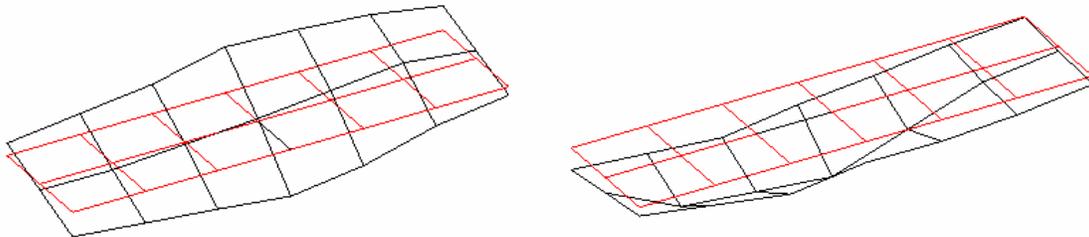


Fig. 4. Déformées propres expérimentales en torsion et en flexion

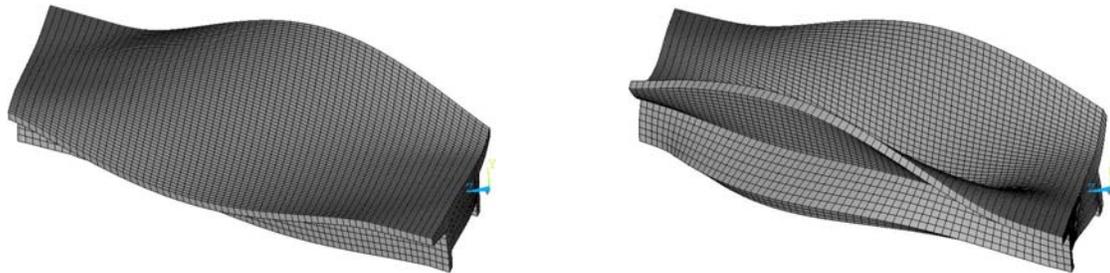


Fig. 5. Déformées propres numériques correspondantes

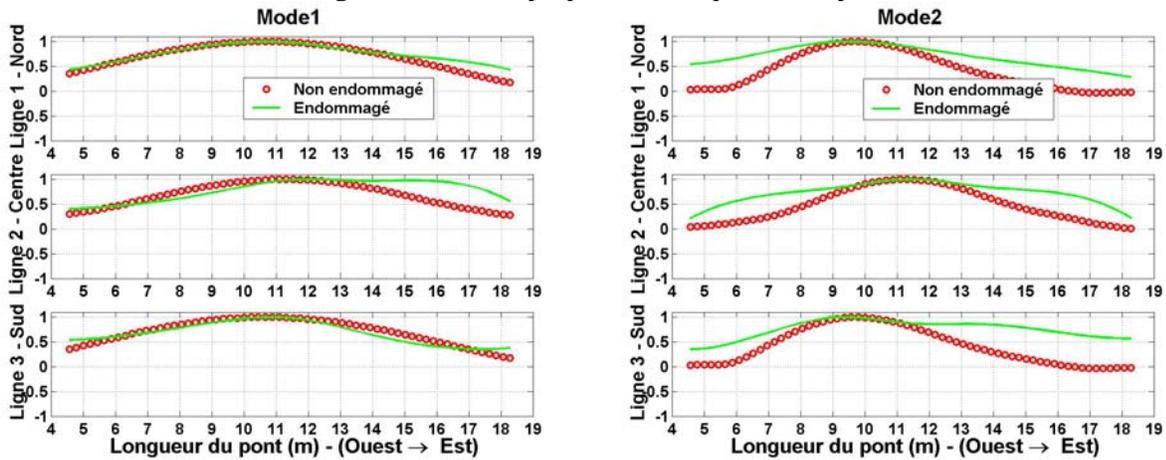


Fig. 6. Modes endommagés et non endommagés (numériques et expérimentaux)

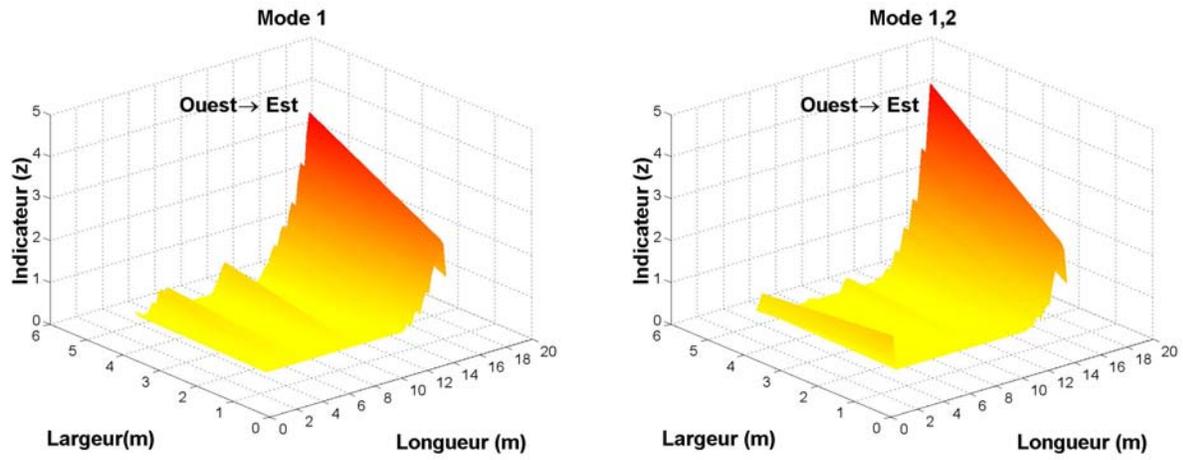


Fig. 7. Méthode de l'indicateur de l'endommagement

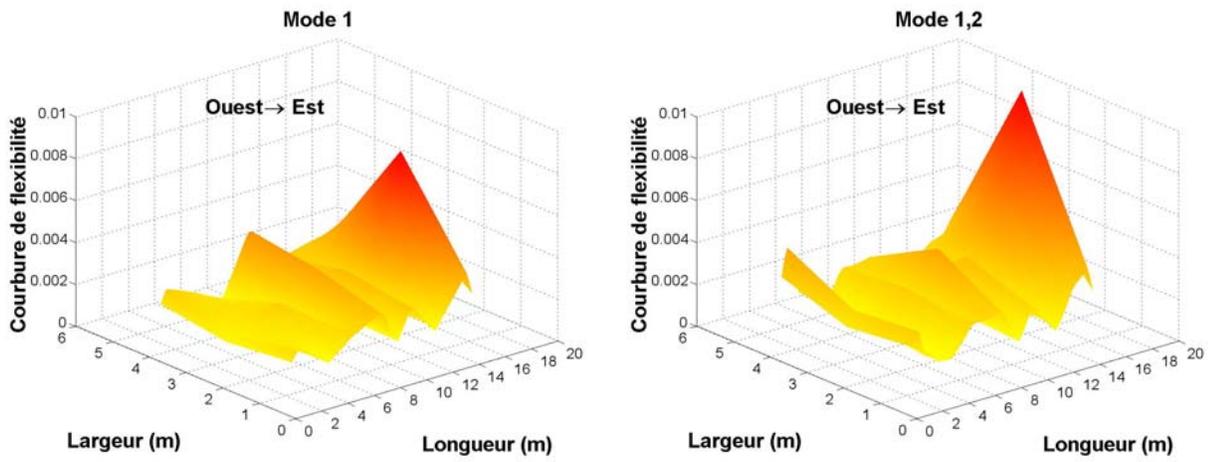


Fig. 8. Méthode de la courbure de flexibilité