

# Influence des propriétés des bâtiments en maçonnerie sur les tassements différentiels admissibles

Jamil SERHAL<sup>1</sup> – Olivier DECK<sup>2</sup> – Marwan AL HEIB<sup>3</sup> – Fadi HAGE CHEHADE<sup>4</sup> - Dalia ABDELMASSIH<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, CREGU, laboratoire GéoRessources, Ville, F-54042, France & Centre de Modélisation, EDST, Université Libanaise – ingénieur civil, phone: 0033624202877 – email; jamil.serhal@univ-lorraine.fr

<sup>2</sup> Ecole des Mines de Nancy, Université de Lorraine, CNRS, CREGU, laboratoire GéoRessources, Ville, F-54042, France; e-mail : olivier.deck@mines-nancy.univ-lorraine.fr

<sup>3</sup> INERIS - Direction de Risques du Sol et du Sous-Sol, CAMPUS ARTEM, Ecole des Mines de Nancy, Nancy, F54042; e-mail : Marwan.ALHEIB@ineris.fr

<sup>4</sup> Université Libanaise, Centre de Modélisation, Ecole Doctorale des Sciences et Technologies, Beyrouth & IUT, Saïda – Liban ; e-mail : fchehade@ul.edu.lb

<sup>5</sup> Professeure associée - Université Libanaise, Faculté de Génie Branche II, Roumieh – Liban; e-mail: dalia.abdelmassih@ul.edu.lb

**RÉSUMÉ.** L'objectif de ce papier est d'étudier l'effet des propriétés mécaniques et géométriques des bâtiments en maçonnerie sur les valeurs seuils du ratio de déflexion utilisées pour évaluer leur dommage. Une analyse de sensibilité réalisée avec la méthode analytique développée par Burland (1995) basée sur la théorie des poutres, est présentée dans ce papier. Cette méthode permet d'établir une relation entre la déformation d'extension maximale dans la structure et son ratio de déflexion en fonction des propriétés de la structure. Cette déformation maximale est alors comparée à des valeurs seuils pour évaluer le degré de dommage. L'analyse de sensibilité présentée dans ce papier concerne l'effet des propriétés du bâti (géométrie, rigidité, position de l'axe neutre dans la section de la poutre (dépendante de l'interaction sol-structure) sur l'évaluation des dommages. Les résultats montrent que les propriétés des bâtiments en maçonnerie peuvent modifier les seuils du ratio de déflexion. Des plages de variation des valeurs seuils du ratio de déflexion associée à différentes catégories de dommages en fonction des propriétés des bâtiments apparaissent.

**ABSTRACT.** The objective of this paper is to study the effect of mechanical and geometrical properties of masonry buildings on the threshold values of the deflection ratio used to assess their damage. A sensibility analysis using an analytical method developed by Burland (1995), based on the beam theory, is presented in this paper. This method allows establishing a relationship between the maximum deformation in the structure and its deflection ratio relative to the mechanical properties and the geometry of the structure. The maximum deformation is then compared to threshold values to assess the degree of damage. The sensibility analysis presented herein concerns the effect of the building properties (geometry, stiffness, position of the neutral axis in the beam section (dependent on the soil-structure interaction) on the damage assessment. The results show that the properties of masonry buildings can modify the thresholds of the deflection ratio. Ranges of variation of the deflection ratio threshold values associated to different categories of damages, relative to the building properties appear.

**MOTS-CLÉS:** maçonnerie, dommage, seuils, ratio de déflexion, poutre, sensibilité.

**KEYWORDS:** masonry, damage, thresholds, deflection ratio, beam, sensibility.

## 1. Introduction

Les mouvements de terrains, surtout dus aux effondrements des cavités souterraines puis l'affaissement des terrains en surface, sont une évolution naturelle, résultant de l'activité de la gravité. Ces mouvements présentent des conséquences en surface. Les bâtiments en surface sont alors endommagés. On s'intéresse dans ce papier à étudier les prévisions du dommage des bâtiments en maçonnerie causé par un tassement différentiel.

On trouve dans la littérature de nombreuses études des valeurs seuils sur certains paramètres des mouvements du terrain transmis aux bâtiments afin de caractériser les catégories des dommages de ces bâtiments. Ces différentes valeurs seuils ne sont pas toujours identiques ce qui soulève la question de la sévérité du dommage pour une valeur donnée du mouvement. Les différents paramètres du mouvement utilisés pour étudier la sévérité du dommage sont la déflexion du bâti, sa pente, sa distorsion, etc. Le paramètre utilisé dans ce papier pour étudier le dommage des bâtiments en maçonnerie est le ratio de déflexion ou encore déflexion relative. Le ratio de déflexion est le rapport entre la déflexion maximale de la structure et sa longueur, en prenant comme ligne de référence la droite joignant les deux extrémités de la structure. Analytiquement, [BUR 1977] a relié ce paramètre à la déformation maximale d'extension de la structure. Il a considéré des valeurs seuils de cette déformation, en notant que chaque valeur seuil caractérise une catégorie de dommage. Les équations développées par Burland permettent donc de relier ces trois paramètres : le ratio de déflexion du bâti, la déformation d'extension dans le bâti et la catégorie de dommage. En partant de cette méthode analytique détaillée dans la partie suivante et en considérant fixées les valeurs seuils relatives à la déformation d'extension dans le bâti, ce papier présente une étude de sensibilité sur l'effet des propriétés des bâtis sur les valeurs seuils équivalentes du ratio de déflexion. Ces plages de variation de ce seuil peuvent ainsi être identifiées signifiant que le dommage d'un bâti n'est pas seulement fonction de ce qu'il subit comme tassement, mais encore fonction de ses propriétés mécaniques et géométriques.

## 2. Méthode de Burland

[BUR 1974] et [BUR 1977] ont considéré que la déformation principal d'extension est le paramètre fondamental pour décrire la catégorie de dommage d'un bâti. Plusieurs essais à grande échelle sur des panneaux de maçonnerie et des murs menés au Royaume-Uni Building Research Establishment ont montré que, pour un matériau donné, l'apparition des fissures visibles est associée à une valeur bien définie des déformations de traction moyenne non sensible au mode de déformation. Ils la définissent comme une déformation critique de traction  $\epsilon_{cr}$ .

[BUR 1995] utilise la théorie des poutres en modélisant un bâtiment par une poutre homogène, élastique, linéaire isotrope, définie par une longueur  $L$ , une hauteur  $H$ , et des propriétés mécaniques équivalentes: module de Young  $E$  et module de cisaillement  $G$ . En considérant cette poutre sur deux appuis simples situés en ses extrémités et chargée par son poids propre, il impose une déflexion  $\Delta$  au bâtiment pour traduire l'influence des mouvements du terrain et une déformation horizontale additionnelle  $\epsilon_h$  afin de tenir compte d'une éventuelle déformation horizontale du terrain associée à la déflexion. Le calcul prend en compte deux modes de déformation de la poutre, en flexion et en cisaillement. Pour une valeur donnée de  $\Delta$  imposée, il obtient une relation entre les différents paramètres de l'ouvrage: déformation maximale d'extension  $\epsilon_b$  et  $\epsilon_d$  associée respectivement à la flexion ou au cisaillement, module d'Young  $E$ , module de cisaillement  $G$ , longueur  $L$ , hauteur  $H$ , charge  $q$ , inertie  $I$  et déflexion  $\Delta$  (Figure 1).

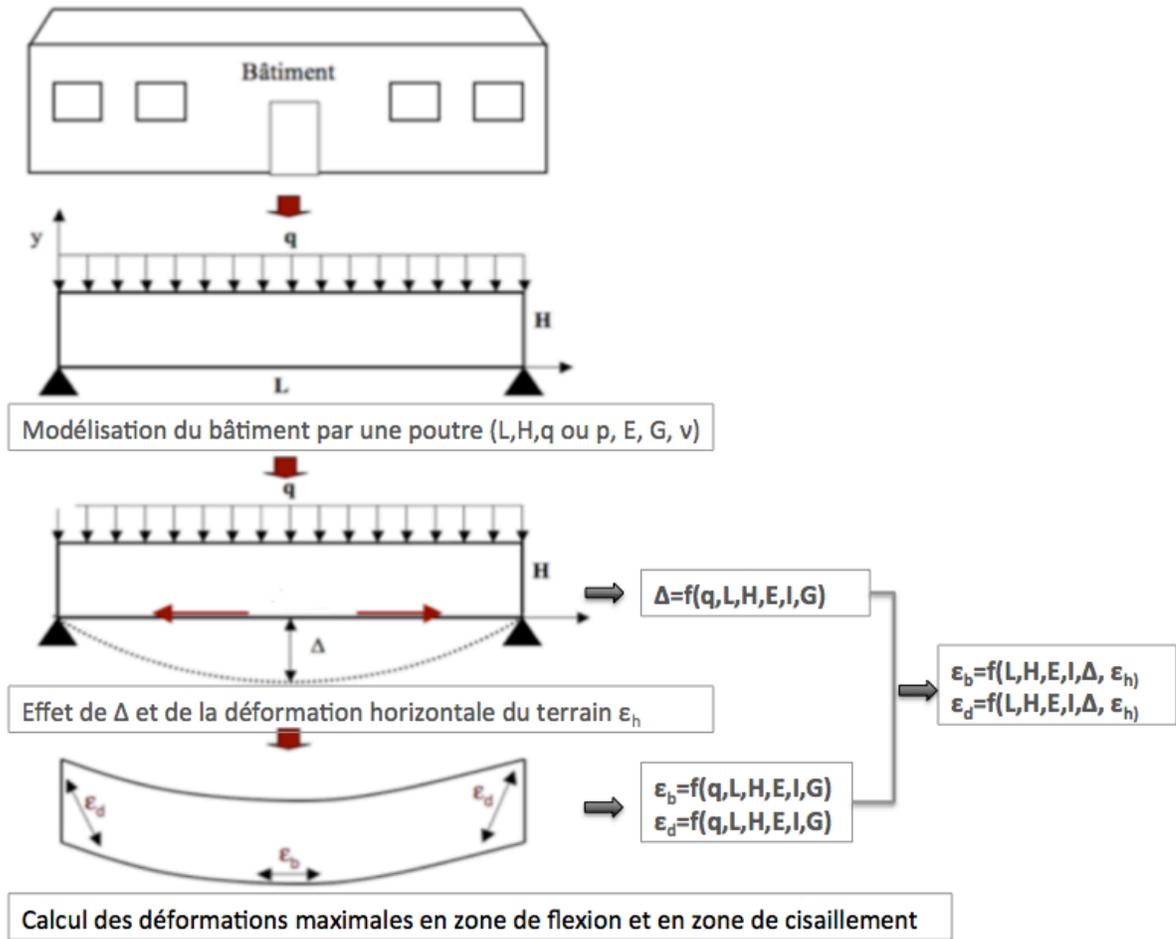


Figure 1. Principe de la méthode de Burland – d’après Saeidi (2010)

Les relations ainsi utilisées par Burland sont les suivantes (cas d’une charge répartie) :

$$\text{Ratio de déflexion } \frac{\Delta}{L} = \left[ \frac{5L}{48H} + \frac{3I}{2yLH} \cdot \frac{E}{G} \right] (\epsilon_{cr} - \epsilon_h) \quad (\text{Cas zone de flexion critique}) \quad [1]$$

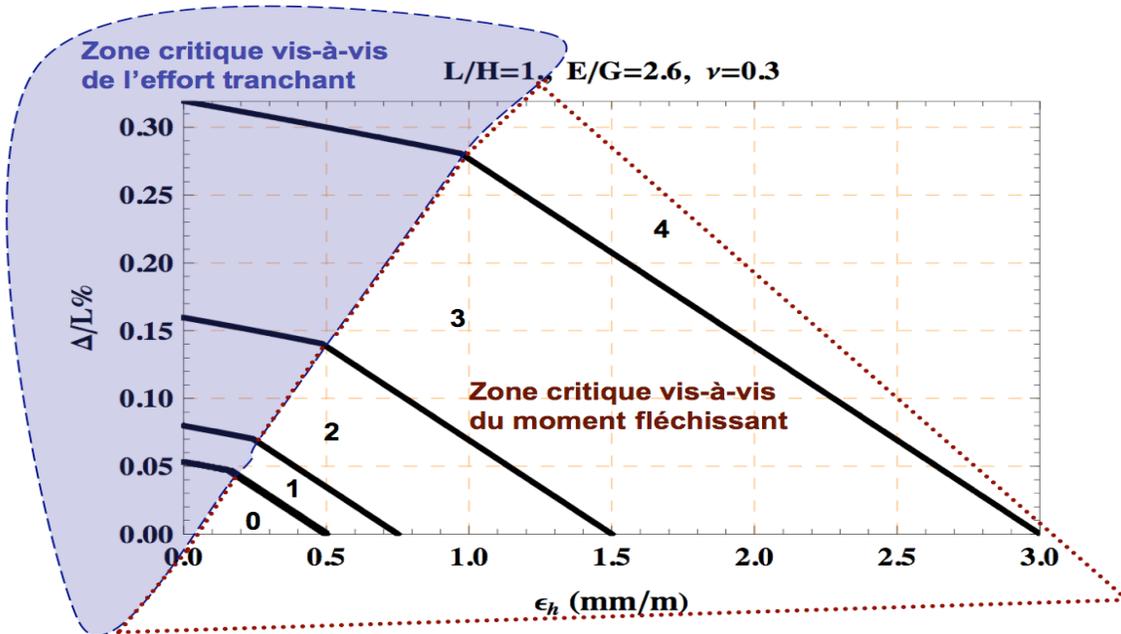
$$\text{Ratio de déflexion } \frac{\Delta}{L} = \left[ \frac{1}{2} + \frac{5HL^2G}{144IE} \right] \sqrt{[\epsilon_{cr} - \epsilon_h \left( \frac{1-\nu}{2} \right)]^2 - \epsilon_h^2 \left( \frac{1+\nu}{2} \right)^2} \quad (\text{Cas zone de cisaillement critique}) \quad [2]$$

$L$  étant la longueur de la poutre,  $H$  la hauteur,  $E$  le module d’Young,  $G$  le module de cisaillement,  $\nu$  le coefficient de poisson,  $\epsilon_{cr}$  la déformation critique,  $\epsilon_h$  la déformation horizontale du terrain,  $\epsilon_b$  en flexion,  $\epsilon_d$  en cisaillement. Le paramètre  $y$  représente la position de l’axe neutre. La valeur  $y=H$  correspond à un axe neutre en bas de la poutre, et  $y=H/2$  représente un axe neutre en fibre moyenne.

En se basant sur les valeurs seuils de la déformation critique d’extension du Tableau 1, [BUR1995] met en évidence des zones d’iso-dommages selon des droites représentant les limites des niveaux de dommages, pour les deux zones de rupture soit de flexion soit de cisaillement. Il a présenté les courbes pour un matériau isotrope où  $E/G=2.6$  et  $L/H=1$  (Figure 2).

**Tableau 1.** Relations entre les catégories de dommage et les valeurs seuils de déformation critique d'extension [BUR 1995].

Catégorie du dommage	Description	Valeur seuil de déformation de traction %
0	Négligeable	0-0.05
1	Très léger	0.05-0.075
2	Léger	0.075-0.15
3	Appréciable	0.15-0.3
4,5	Sévère à très sévère	>0.3

**Figure 2.** Détermination des catégories de dommage pour un bâtiment ( $E/G=2.6$ ,  $L/H=1$ ) – d'après [SAE 2010].

Le papier suivant, utilise la méthode de Burland, en considérant une déformation horizontale  $\epsilon_h$  nulle du terrain. L'objectif principal de l'utilisation de cette méthode est de visualiser l'effet des paramètres utilisés pour le calcul des seuils de ratio de déflexion. D'après la figure 2, pour une déformation horizontale nulle, on peut identifier les valeurs seuils du ratio de déflexion pour chaque catégorie de dommage (Tableau 2). Les paramètres importants sont le ratio  $E/G$ , le rapport de la longueur du bâtiment sur sa hauteur,  $L/H$  et la position de la fibre neutre. Le ratio  $E/G$  caractérise le comportement anisotrope de l'ouvrage. Une faible valeur de ce ratio (2,6 par exemple pour un comportement élastique isotrope) correspond à une rigidité en flexion supérieure à la rigidité en cisaillement. Inversement, un ratio élevé caractérise une rigidité en cisaillement supérieure à la rigidité en flexion (uniquement possible en supposant un comportement anisotrope transverse de la maçonnerie). On part donc d'une valeur seuil connue de la déformation de traction (Tableau 1), associée à une catégorie de dommage. Par suite les ratios de déflexion associés sont calculés sur la base des équations 1 et 2 pour une gamme de valeur de  $E/G$  et de  $L/H$ , et pour deux positions de la fibre neutre, en bas de la poutre et en fibre moyenne.

**Tableau 2.** Valeurs du ratio de déflexion pour une déformation horizontale nulle

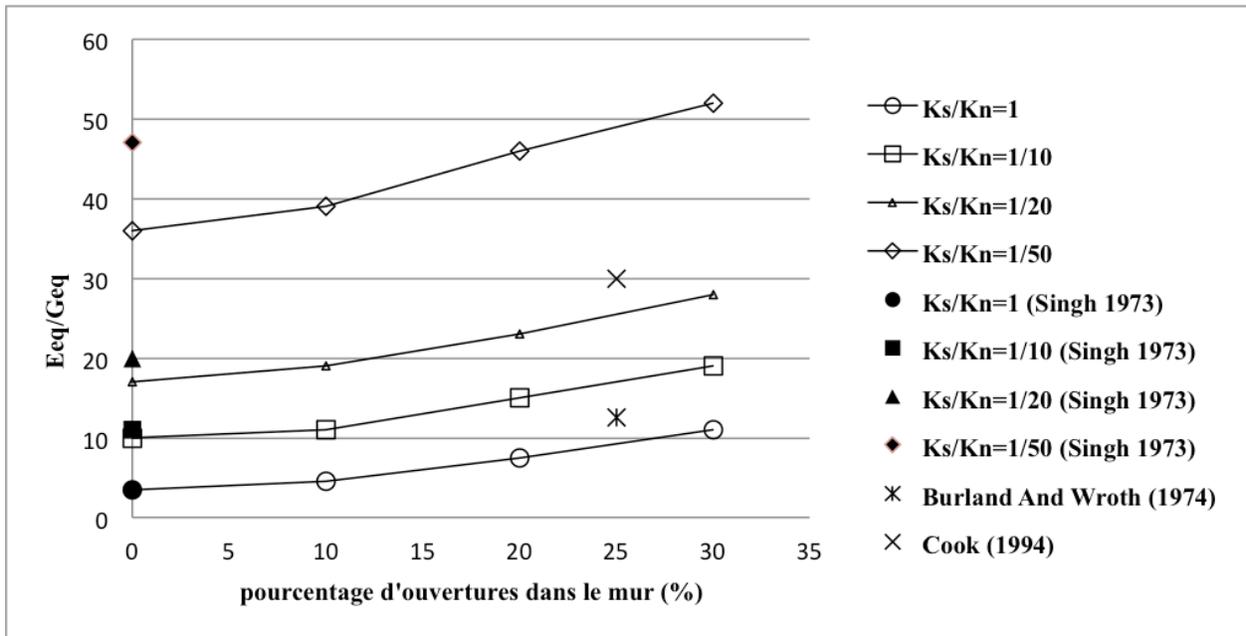
Dommage	$\Delta/L$ pour $\epsilon_h=0$
D0	0.0005
D1	0.0008

D2	0.0016
D3	0.0033

### 3. Intervalles choisis de E/G, L/H et position de la fibre neutre – justification du choix

Le choix des intervalles L/H est étudié est fonction des valeurs fréquemment observées pour des bâtiments usuels. [SAE 2010] a par exemple développé une typologie des bâtiments en zone d'affaissement minier (Lorraine). Les bâtiments ont été divisés en cinq catégories selon leur longueur : petite (<10m), moyenne (11 à 20), grande (21 à 30m), très grande (31 à 40m) et exceptionnelle (> 41m). Pour la hauteur des bâtiments, il a noté que la plupart des bâtiments ont un ou deux étages, ce qui peut correspondre à une hauteur entre 5 et 9m. Cela conduit à des ratios de L/H variant de 1 à 8.

Le ratio E/G est également susceptible de prendre des valeurs très variables afin de tenir compte de l'influence du comportement réel d'ouvrages en maçonneries (milieu discontinu : pierres et joints de mortier) et l'existence d'ouvertures dans l'ouvrage (portes, fenêtres). Pour justifier les valeurs du ratio E/G, [SON 2007] ont calculé numériquement, en utilisant le logiciel UDEC, le module d'Young équivalent et le module de cisaillement équivalent d'une structure en maçonnerie. Le critère d'équivalence utilisé était la déflexion due au moment fléchissant et la déflexion due à un effort de cisaillement. Les résultats obtenus étaient partiellement validés en les comparant avec des équations analytiques de Singh (1973) qui permettent de calculer les modules d'Young et de cisaillement de la maçonnerie en fonction des propriétés des blocs et des joints. Son et Cording ont donné alors un graphique représentant les valeurs de  $E_{eq}/G_{eq}$  en fonction du pourcentage d'ouverture dans la structure pour différentes valeurs du rapport entre la raideur tangentielle et normale  $K_s/K_n$  du joint (Figure 3).



**Figure 3.** Variation du ratio E/G en fonction du ratio  $K_s/K_n$  et du pourcentage d'ouvertures dans le bâtiment – d'après [SON 2007]

D'après ce graphe, on observe que le rapport E/G pour des structures en maçonnerie sans chaînage peut prendre des valeurs très variables pouvant atteindre 52.

En ce qui concerne la position de l'axe neutre, [BUR 1974] et [BOS 1989]) considèrent que si le bâtiment est en zone convexe, l'axe neutre peut être considéré en bas de la poutre en raison de la faible résistance à la traction des niveaux supérieurs du bâtiment et de sa grande valeur aux niveaux des fondations. [BOO 1996] note l'influence des étages et du toit, pouvant donc augmenter la résistance à la traction aux niveaux supérieurs et donc augmenter la

position de la fibre neutre jusqu'à la fibre moyenne. En zone concave, la fibre neutre est traditionnellement supposée en même position que la fibre moyenne. Dans la suite, on étudiera l'influence de ce choix.

#### 4. Résultats de l'étude de sensibilité

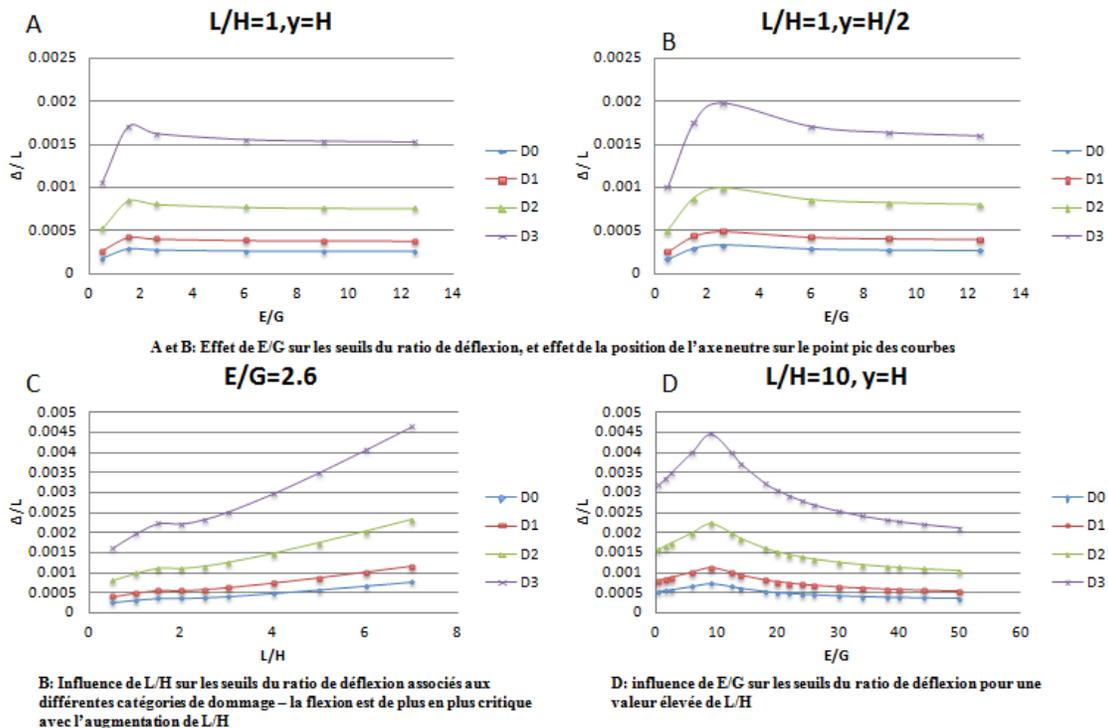
La Figure 4 permet de visualiser les résultats. Les courbes présentent les seuils du ratio de déflexion pour chaque catégorie de dommage, en fonctions des paramètres utilisés dans cette étude de sensibilité. A noter que  $y=H$  représente une fibre neutre en bas de la poutre, et  $y=H/2$  représente une fibre neutre en fibre moyenne.

L'étude de sensibilité faite sur l'effet de  $E/G$  montre qu'au delà d'une valeur seuil précise de  $E/G$ , ce ratio n'a aucune influence sur les seuils du ratio de déflexion associée pour chaque catégorie de dommage, c.à.d. qu'au delà de cette valeur de  $E/G$ , un plateau horizontale du ratio de déflexion en fonction de  $E/G$  apparaît. Mais cette valeur spécifique de  $E/G$ , est dépendante de  $L/H$ . Plus le ratio  $L/H$  est grand, plus la valeur de  $E/G$  -au delà de laquelle le ratio de déflexion devient invariant avec  $E/G$ - est grande. Ceci indique que l'influence du ratio  $E/G$  sur les seuils du ratio de déflexion est plus importante pour les ratios  $L/H$  importants (figure 4, A, B et D).

La variation du ratio  $L/H$  a montré que la géométrie du bâtiment joue un rôle important sur les valeurs seuils de son ratio de déflexion, surtout pour les catégories relatives aux dommages importants et sévères (D2, D3). Ceci indique que plus  $L/H$  est élevé, plus son influence est grande sur les valeurs seuils du ratio de déflexion (figure 4, C).

La majorité des courbes présentent un extrémum qui représente le passage entre les deux situations critiques en flexion ou en cisaillement selon que la déformation principale maximale soit  $\varepsilon_b$  ou  $\varepsilon_d$ . Dans les figures 4 (A, B et D), il représente le passage d'une situation critique en flexion à une situation critique en cisaillement, en augmentant  $E/G$ . Dans la figure 4D, il représente le passage d'une situation critique en cisaillement à une situation critique en flexion, en augmentant  $L/H$ .

La position de l'axe neutre a affecté la position de ce point extrémum. Ce point pic apparaît est positionné pour  $E/G$  égale à  $L/H$  pour un axe neutre situé en bas de la poutre (figure 4, A), et pour une valeur de  $E/G$  valant le double de  $L/H$  pour un axe neutre situé en fibre moyenne de la poutre (figure 4, B).



**Figure 4.** Résultats de l'étude de sensibilité – effet de  $E/G$ ,  $L/H$  et de la position de la fibre neutre sur les courbes des seuils du ratio de déflexion

### 5. Intersection des catégories de dommages – plages de variation du ratio de déflexion

Les courbes précédentes ont montré que plusieurs paramètres peuvent affecter les valeurs seuils du ratio de déflexion relatives aux différentes catégories de dommage. La Figure 5 présente en superposition les courbes seuils du ratio de déflexion pour différentes catégories de dommages. Cette figure présente les courbes relatives à trois choix de E/G : 0.5, 2.6 et 12.5. Notons que le ratio 2.6 représente un matériau isotrope conservant la relation  $E/G=2(1+\nu)$  avec  $\nu$  le coefficient de poisson égale à 0.3. D'après ces courbes, on remarque que pour une même valeur du ratio L/H, on peut avoir différentes valeurs seuils du ratio de déflexion selon les propriétés mécaniques et géométriques du bâti.

Des plages de variation de ce ratio de déflexion peuvent alors être présentées pour chaque catégorie de dommage. La Figure 6 montre les valeurs minimales et maximales des seuils du ratio de déflexion obtenue par l'étude de sensibilité présentée dans ce papier. D'après ce tableau, on remarque que les seuils de ratio de déflexion présentent des plages de variation pour les catégories de dommages. En plus, comme noté précédemment, un même seuil de ratio de déflexion peut faire référence à différentes catégories de dommage.

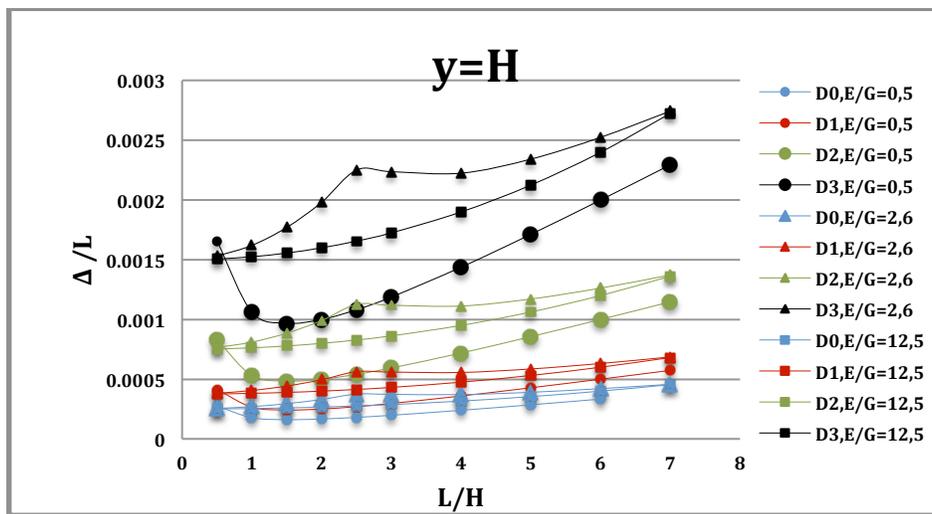


Figure 5. Intersection des catégories de dommage – seuils du ratio de déflexion en fonction de E/G et de L/H

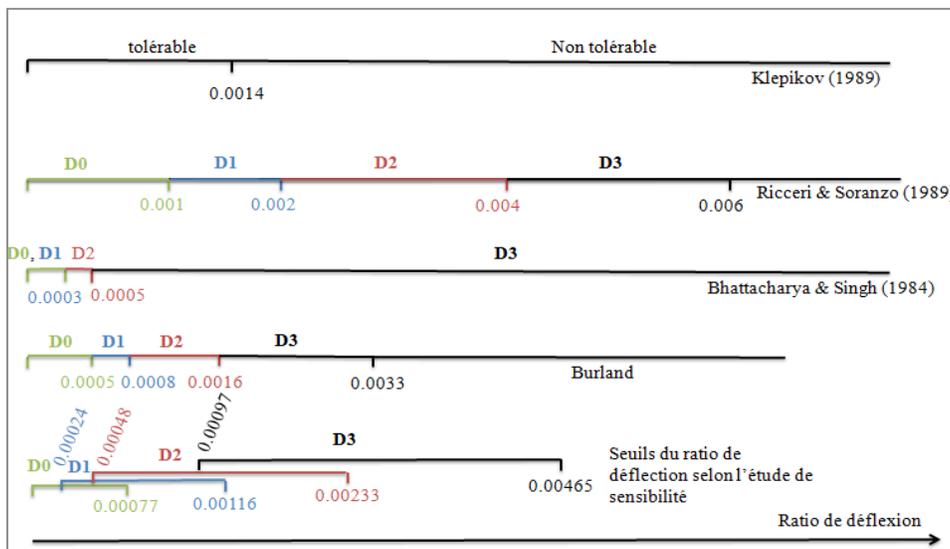


Figure 6. Comparaison des valeurs seuils du ratio de déflexion obtenu par l'étude de sensibilité avec des ratios seuils bibliographiques

## 6. Conclusion :

Ce papier présente l'effet des propriétés des bâtiments en maçonnerie sur les valeurs seuils du ratio de déflexion, utilisées pour catégoriser leur dommage. Le point de départ étant une méthode analytique qui assimile la façade du bâtiment à une poutre, et permet de calculer la relation entre des déformations limites de cette poutre et sa déflexion en fonction de ses propriétés géométriques et mécaniques. L'étude de sensibilité permet de bien visualiser l'effet du ratio E/G permettant de tenir compte de l'anisotropie de la maçonnerie, de l'élancement L/H et de la position de la fibre neutre :

1. Les ratios L/H et E/G ont une influence significative sur les valeurs seuils de la déflexion relative associées à différents niveaux de dommage. En variant les paramètres E/G et L/H, on observe donc que pour un même ratio de déflexion, plusieurs catégories de dommages peuvent exister en fonction des propriétés des bâtiments.
2. Les ratios L/H et E/G ont une influence sur le mode critique de dégradation, associé à la flexion ou au cisaillement. Plus L/H est important, plus la flexion devient critique par rapport au cisaillement. Plus E/G est important plus le cisaillement devient critique par rapport à la flexion. On peut observer que le passage d'un mode à l'autre se fait pour une valeur de E/G approximativement égale à la valeur du ratio L/H.
3. La position de la fibre neutre n'a pas d'influence notable sur les seuils du ratio de déflexion. En fait, son effet apparaît essentiellement sur la position du point pic séparant les deux modes critiques de cisaillement et de flexion.

Finalement, l'étude de sensibilité présentée dans ce papier, a permis de justifier que deux bâtiments, ayant des propriétés différentes, peuvent subir des dommages différents pour un même tassement. Les propriétés géométriques et mécaniques des bâtiments jouent donc un rôle important sur la sévérité du dommage qu'ils subissent. Ces résultats peuvent servir de point de départ pour le développement d'une approche probabiliste d'évaluation des dommages. La définition d'une typologie de bâtis et la prise en compte d'incertitudes sur leurs caractéristiques peut permettre de calculer une gamme de variation du ratio de déflexion associée à chaque catégorie de dommage ou encore une probabilité de dommage pour une valeur particulière de ce ratio.

## 7. Bibliographie

- [BOO 1996] BOONE S.J. (1996). Ground-movement related building damage. *J. Geotech. Engng ASCE* 122, No. 11, 886-896.
- [BOS 1989] BOSCARDIN M.D. et CORDING E.J. (1989). "Building response to excavation-induced settlement", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, N°1.
- [BUR 1974] BURLAND J. B. et WROTH C. P. (1974) "Settlement of buildings and associated damage", *Conf. settlement of structures*, pp. 611-654.
- [BUR 1977] BURLAND J.B., BROMS B.B. et De Mello V.F.B. (1977). "Behaviour of foundations and structures", *9th Int.conf. on soil mechanics and foundations engineering*, pp. 495-546.
- [BUR 1995] BURLAND J. B. (1995). "Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation", *Earthquake geotechnical engineering*, éditions Ishihara, Balkema , pp. 1189-1201.
- [SAE 2010] SAEIDI A. (2010). «La vulnérabilité des ouvrages soumis aux aléas mouvements de terrains; développement d'un simulateur de dommages- thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- [SIN 1973] SINGH. B. (1973). *the response of buildings to excavation-induced ground movements*. Ph.D., thesis, Univ. Of Illinois at Urbana-champaign Urbana, III.
- [SON 2007] SON M. et CORDING E.J. (2007). "Evaluation of building stiffness for building response analysis to excavation-induced ground movements", *J. Geotech. Engng ASCE* 133, No. 8, 995-1002.