



---

## Apports de la méthode basée sur les déformations dans l'évaluation sismique des bâtiments existants.

Pierino Lestuzzi\*,\*\* — Martin G. Koller\*\*

\* Laboratoire d'Informatique et de Mécanique Appliquées à la Construction, ENAC-IIC-IMAC  
EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Bâtiment GC, Station 18, CH – 1015 Lausanne, Suisse  
pierino.lestuzzi@epfl.ch

\*\* Résonance Ingénieurs-Conseils SA  
21 rue Jacques Grosselin, CH – 1227 Carouge, Suisse

---

**RÉSUMÉ.** L'appréciation de l'évaluation sismique des bâtiments existants est problématique car ces derniers ont été généralement construits sans tenir compte de ce type de sollicitations et une grande majorité d'entre eux devrait être renforcée s'ils étaient évalués selon les mêmes critères que les bâtiments neufs. Afin de limiter raisonnablement les investissements nécessaires, une approche différente, basée sur le risque, a été introduite dans les normes suisses de construction SIA. En plus de cette approche novatrice, les éléments nécessaires à l'application de la méthode basée sur les déformations ont été proposés. La méthode basée sur les déformations est une méthode élaborée qui conduit en général à des résultats plus favorables que les méthodes classiques basées sur les forces, d'où l'intérêt de son application dans ce contexte. En Suisse, depuis 2004, plusieurs bâtiments ont fait l'objet d'une évaluation par cette méthode élaborée. L'article présente des exemples concrets d'application de la méthode basée sur les déformations et compare les résultats obtenus avec ceux des méthodes classiques basées sur les forces afin de mettre en évidence l'avantage de l'application de cette méthode.

**ABSTRACT.** Seismic assessment of existing buildings is a challenging task because they were generally build without seismic considerations and a vast majority of them should therefore be upgraded if they are evaluated according to the criteria used for new buildings. In order to reasonably limit the related costs in case of existing buildings, an approach different from the one for new constructions, based on risk, was introduced in the Swiss standards SIA. Beside this innovative approach, the elements for the application of the displacement-based method were proposed. Displacement-based method is an elaborate method which generally leads to more favourable results than usual forced-based method. In Switzerland, since 2004, several buildings were assessed by this elaborate method. The paper presents real cases of application of the displacement-based method and compares the results with the obtained results of usual forced-based method in order to show the advantage of its application.

**MOTS-CLÉS :** évaluation sismique, bâtiments existants, méthode basée sur les déformations, méthode basée sur les forces, facteur de conformité, évaluation basée sur le risque.

**KEYWORDS:** seismic assessment, existing buildings, displacement-based analysis, force-based analysis, compliance factor, risk based analysis.

---

## 1. Introduction

Sur le plan sismique, l'élément essentiel qui distingue les ouvrages neufs des ouvrages existants concerne le coût des mesures. Pour les constructions neuves, le coût de l'application des prescriptions des nouvelles normes de construction est quasiment négligeable. Le surcoût se monte au plus à quelques pour cent du montant du gros-œuvre. Par ailleurs, ce coût peut être notablement réduit avec une conception adéquate de la structure porteuse. Pour les constructions existantes, c'est un tout autre problème. Contrairement aux constructions neuves, aucun choix bénéfique quant à la conception de la structure ne peut évidemment être effectué. En outre, leur assainissement sismique est très coûteux, pouvant atteindre plusieurs dizaines de pour cent de la valeur de l'objet. Par conséquent, des approches différentes sont nécessaires pour les constructions nouvelles et pour les constructions existantes. La Société Suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA) a donc chargé un groupe de travail d'élaborer les bases des réflexions supplémentaires nécessaires à l'application des nouvelles normes avec des constructions existantes. Le résultat a été publié dans un document complémentaire des normes suisses de construction, le cahier technique (CT) SIA 2018 (2004) : «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants». L'optique retenue dans le CT SIA 2018 est une approche basée sur les notions de risque. Ce document novateur dissocie le risque individuel du risque collectif et définit le niveau de sécurité minimum exigé en relation avec l'acceptation du risque individuel.

A côté de cette approche novatrice, le CT SIA 2018 contient les éléments nécessaires à l'application de la méthode basée sur les déformations pour l'évaluation sismique des bâtiments existants. La méthode basée sur les déformations est une méthode élaborée qui conduit en général à des résultats plus favorables que les méthodes classiques basées sur les forces, d'où l'intérêt de son application dans ce contexte. Depuis l'entrée en vigueur du CT SIA 2018 en 2004, plusieurs bâtiments ont fait l'objet d'une évaluation par cette méthode élaborée. L'article présente des exemples concrets d'application de la méthode basée sur les déformations et compare les résultats obtenus avec ceux des méthodes classiques basées sur les forces afin de mettre en évidence l'avantage de l'application de cette méthode.

## 2. Bâtiments typiques en Suisse

En Suisse, une bonne partie du parc immobilier est constituée de bâtiments en maçonnerie non armée. Ce type se compose à parts grosso modo semblables de maçonnerie de briques et de maçonnerie de pierres naturelles. Cependant, du point de vue de l'analyse sismique, la nature des planchers constitue le paramètre déterminant et il faut distinguer entre planchers rigides (dalles en béton armé) et planchers souples (poutres en bois). Pour les bâtiments en maçonnerie, la méthode basée sur les déformations s'applique essentiellement au cas des planchers rigides. En effet, dans le cas des planchers souples aucun effet diaphragme ne peut être pris en compte et, le comportement étant plus complexe, chaque élément doit être analysé séparément selon la méthode basée sur les forces, en admettant généralement la valeur du plateau comme accélération spectrale. De plus, en raison de la faiblesse, voire de l'absence de connexion entre les murs et les planchers, la rupture hors plan est souvent le mode de rupture déterminant dans le cas de planchers souples, supplantant alors l'analyse de la résistance dans le plan pour le diagnostic sismique. Par conséquent, cet article se concentre sur les bâtiments munis de planchers rigides. Principalement construits entre les années cinquante et soixante-dix, ces bâtiments sont généralement très réguliers, tant en plan qu'en élévation. On peut cependant regrouper ces bâtiments en deux catégories qui présentent un comportement sismique sensiblement différent :

- bâtiments isolés de 3 à 5 étages, rarement 6 étages, avec des voiles dans les deux directions ;
- bâtiments de barres de 5 à 7 étages, avec de grands voiles presque seulement dans la direction transversale.

Pour ces deux catégories, la direction longitudinale est généralement déterminante, mais la seconde catégorie est surtout caractérisée par un nombre très restreint de petits voiles orientés dans ce sens, souvent constitués de la seule partie arrière des noyaux. Par conséquent, les bâtiments de la première catégorie sont plutôt rigides avec des périodes fondamentales se situant dans la gamme des fréquences du plateau du spectre de réponse alors que

ceux de la seconde sont très souples, dans la direction longitudinale, avec des périodes fondamentales se situant proche du domaine de déplacement constant du spectre de réponse. Il faut encore relever que les bâtiments de la seconde catégorie se trouvent principalement dans les grandes agglomérations et que leur analyse sismique est souvent réalisée dans le cadre d'un projet de surélévation de quelques étages. Par ailleurs, il faut signaler que cet article ne traite pas des bâtiments dans lesquels les transformations successives ont abouti à une transparence au rez-de-chaussée car cette configuration très défavorable conduit au phénomène d'étage souple ou « soft-storey », bien connu pour être rédhitoire sur le plan sismique et pour lequel l'application de la méthode basée sur les déformations ne saurait apporter un avantage significatif pour le diagnostique sismique.

A côté des bâtiments en maçonnerie, les bâtiments en béton armé représentent une partie importante du parc immobilier en Suisse. Sur ce point, le bâti suisse se distingue par une très forte proportion de bâtiments stabilisés par des voiles en béton armé. Contrairement aux pays voisins, les portiques en béton armé ne sont pas très répandus en Suisse. Par conséquent, en ce qui concerne le béton armé, cet article se concentre sur la catégorie des bâtiments stabilisés par des voiles. Egalement construits pour l'essentiel entre les années cinquante et soixante-dix, ces bâtiments sont caractérisés par des éléments avec de faibles taux d'armature, tant verticalement qu'horizontalement et par la présence quasi systématique de recouvrement d'armature à leur base. Il faut remarquer que de manière plus prononcée que pour les bâtiments en maçonnerie, un bon nombre de bâtiments en béton armé présentent des interruptions des éléments de stabilisation conduisant au phénomène néfaste d'étage souple. Pour les raisons évoquées ci-dessus, cet article ne traite pas de ce type de bâtiments.

D'une manière générale, il faut enfin signaler qu'en Suisse la présence de sous-sol en béton armé est la règle habituelle. Cette particularité du bâti est principalement due aux prescriptions fédérales concernant l'obligation de procurer des abris anti-atomique pour l'ensemble de la population.

### 3. CT SIA 2018 : évaluation basée sur le risque

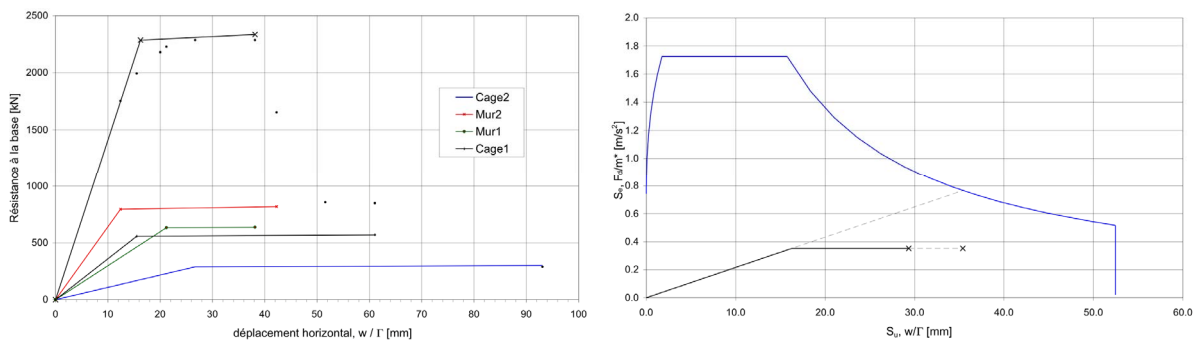
Le séisme n'a pas toujours été considéré dans les normes suisses de construction SIA. Avant 1970, les actions sismiques étaient tout simplement ignorées. En 2003, les normes SIA ont subi une importante évolution pour les rendre compatibles avec les Eurocodes. L'évolution la plus marquée concerne incontestablement les aspects sismiques. Pour les constructions existantes, le relèvement de l'aléa sismique de cette dernière édition des normes SIA pose un sérieux problème. En plus de l'augmentation significative des sollicitations à considérer, plusieurs régions ont été classées dans une zone de danger sismique supérieure. Par ailleurs, l'immense majorité du bâti existant en Suisse a été construite avant 1989, date de l'entrée en vigueur de considérations sismiques convenables. Par conséquent, une grande partie du bâti existant devrait certainement faire l'objet d'un confortement, si elle était évaluée dans le cadre d'une application stricte des nouvelles normes. Dans ce contexte, l'approche différente, basée sur le risque, du CT SIA 2018 (2004) permet de limiter raisonnablement les investissements nécessaires (Lestuzzi, 2008).

Le CT SIA 2018 propose une évaluation basée sur le risque en déterminant le facteur de conformité ( $\alpha$ ) qui correspond au rapport entre la résistance de la structure et la résistance prescrite pour un bâtiment neuf. Une structure qui résiste aux prescriptions de la norme SIA 261 (2003) a un facteur de conformité de 1. Conformément au CT SIA 2018, des interventions sont nécessaires si le facteur de conformité est inférieur à une valeur seuil de  $\alpha$ , fixée à  $\alpha_{\min} = 1/4$ . Le risque individuel est alors inacceptable. Si le facteur de conformité est supérieur à  $\alpha_{\min}$ , les interventions doivent être réalisées si elles sont proportionnelles. Une mesure peut être considérée comme proportionnelle si les coûts associés ne dépassent pas 10 millions de CHF (environ 8 millions d'€) par vie humaine sauvée. Ce montant correspond à ce que la société est prête, en Suisse, à investir pour sauver une vie humaine.

#### 4. Méthode basée sur les déformations

La méthode basée sur les déformations est une méthode statique - non linéaire, qui conduit en général à des résultats plus favorables (facteurs de conformité plus élevés) que les méthodes classiques basées sur les forces. Pour l'essentiel, il s'agit d'une méthode en poussée progressive ou « push-over ».

Dans la méthode, une courbe de capacité est d'abord établie pour chaque élément de stabilisation, un voile par exemple. La courbe de capacité est définie par trois points : la résistance latérale de l'élément (résistance dans le plan), le déplacement de plastification et le déplacement ultime, pour lequel la capacité d'allongement de l'acier d'armature ou la capacité en compression du béton est atteinte à la base (dans le cas du béton armé) ou bien pour lequel la résistance latérale chute ou ne peut plus être garantie sans que l'élément correspondant perde sa capacité portante en compression (dans le cas de la maçonnerie). La courbe de capacité globale du bâtiment est ensuite obtenue par l'addition des courbes de capacité des voiles individuels. Elle permet de déterminer la capacité de déplacement (déplacement ultime) du bâtiment (Fig. 1, à gauche). La sécurité sismique est alors évaluée en comparant la capacité de déplacement du bâtiment avec la demande en déplacement selon le spectre de réponse approprié. Cette comparaison est généralement illustrée graphiquement sur un diagramme appelé spectre ADRS, pour « Acceleration Displacement Response Spectrum » (Fig. 1, à droite).



**Figure 1.** Analyse d'un bâtiment avec la méthode basée sur les déformations. La courbe de capacité est d'abord établie (à gauche). La sécurité sismique est ensuite évaluée sur la base du diagramme ADRS (à droite).

##### 4.1. Principales hypothèses dans le cas de la maçonnerie

Dans le cas de la maçonnerie, la vérification est effectuée selon la méthode analytique simplifiée de Bachmann&Lang (2002). Conformément à l'Eurocode 8 (EC 8, 2005), les valeurs de la capacité de déformation des voiles en maçonnerie sont distinguées en fonction du mode de rupture de l'élément considéré. Une valeur d'inclinaison ultime d'étage de 0,4 % est considérée en cas de rupture en cisaillement et une valeur plus élevée de 0,8 % en cas de rupture en balancement.

Les caractéristiques de la maçonnerie mise en place dans les bâtiments ne sont généralement pas connues. Par conséquent, les propriétés mécaniques sont également inconnues. Les calculs sont habituellement effectués avec les valeurs usuelles des résistances à la compression de  $f_{xd} = 3,5$  MPa et de  $f_{yd} = 0,5 \cdot f_{xd} = 1,75$  MPa correspondant à celles des normes suisses actuelles de la maçonnerie d'agglomérés de béton. Il faut cependant

relever que, dans l'analyse des constructions en maçonnerie par la méthode basée sur les déformations, les résistances mécaniques n'influencent que faiblement les résultats; la capacité de déformation est prépondérante. Par ailleurs, des valeurs de  $E_{xd} = 1000 \cdot f_{xd} = 3'500 \text{ MPa}$  et de  $G_{xd} = 0,4 \cdot E_{xd} = 1'400 \text{ MPa}$  sont habituellement admises pour les modules d'élasticité. De plus, les rigidités des voiles en maçonnerie sont réduites à 50 % pour considérer la fissuration.

L'effet portique provenant de l'interaction des voiles avec les planchers est habituellement considéré pour les voiles en maçonnerie. Cet effet est usuellement inclus dans la prise en compte d'une hauteur de point de moment nul correspondant à une valeur comprise entre une et deux fois la hauteur d'étage (SIA D 0237, 2011).

#### **4.2. Principales hypothèses dans le cas du béton armé**

Dans le cas du béton armé, avec la méthode basée sur les déformations, les calculs sont effectués avec les valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques des matériaux afin de se rapprocher du comportement réel des éléments de structure. Un facteur partiel de réduction compense ensuite ces hypothèses favorables. Conformément au CT SIA 2018, le facteur partiel pour le béton armé est de  $\gamma_R = 1,3$ .

Selon le CT SIA 2018, les capacités des éléments sont déterminées sur la base de la rotation de la corde. Souvent, l'acier d'armature appartient à la classe de ductilité B. L'allongement spécifique de rupture correspondant est de  $\epsilon_{uk} = 50 \%$ . Cependant, la valeur de l'allongement spécifique est généralement diminuée de 50 % pour tenir compte de la réduction de la capacité de déformation due à la présence de recouvrement de l'armature longitudinale à la base des éléments de stabilisation.

### **5. Exemples concrets**

Cette section présente des exemples concrets d'analyse de bâtiments existants par la méthode basée sur les déformations. Sur cette base, une généralisation des résultats est discutée.

#### **5.1. Bâtiments isolés en maçonnerie de 3 à 6 étages avec des voiles dans les deux directions**

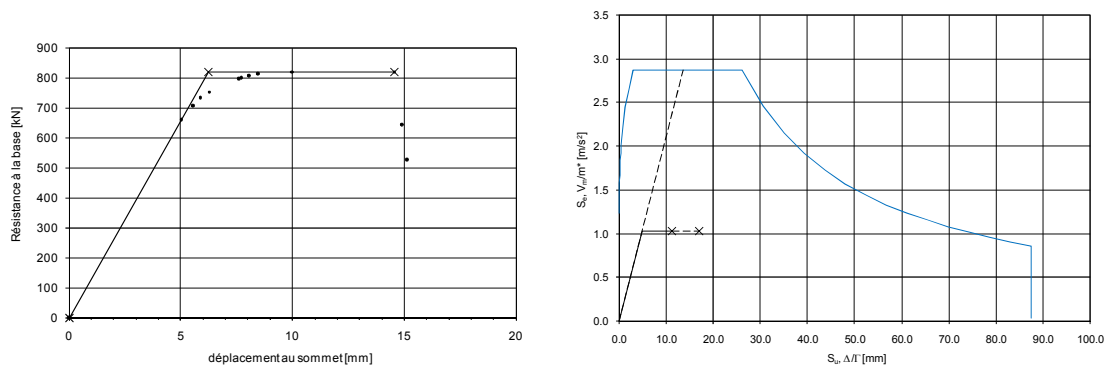
Comme expliqué ci-dessus, ces bâtiments sont plutôt rigides avec des périodes fondamentales se situant dans la gamme des fréquences du plateau du spectre de réponse. Les voiles sont disposés dans les deux directions en respectant la symétrie. Par conséquent, aucune torsion significative n'intervient dans la réponse sismique. La torsion peut donc être négligée. Cependant, la direction longitudinale est généralement déterminante.

##### *5.1.1. Exemple : bâtiment de 3 étages*

Comme exemple de cette catégorie, la courbe de capacité d'un bâtiment stabilisé dans sa direction longitudinale par 6 voiles en maçonnerie de 15 cm d'épaisseur est représentée à la figure 2, à gauche. Ce bâtiment comporte 3 niveaux et un sous-sol pour une hauteur d'approximativement 8 m à partir du niveau du terrain. Il est très régulier. La hauteur d'étage a une valeur constante de 2,80 m. La masse d'étage est également constante et vaut 320 t. La masse totale est donc de 960 t. Le déplacement élastique au sommet est d'approximativement 6 mm et la capacité de déplacement au sommet de 15 mm environ. La résistance à la base s'élève à environ 820 kN.

Ce bâtiment est situé en zone sismique Z2, selon la norme SIA 261 (2003) et l'accélération nominale du sol vaut donc  $a_{gd} = 1,0 \text{ m/s}^2$ . L'emplacement est caractérisé par une classe de sol de fondation C (spectre de type I, selon EC8,  $S = 1,15$ ;  $T_B = 0,2 \text{ s}$ ;  $T_C = 0,6 \text{ s}$ ;  $T_D = 2,0 \text{ s}$ ). La période fondamentale est voisine de 0.45 s. L'appréciation de la sécurité sismique selon le diagramme ADRS est représentée à la figure 2, à droite. La demande en déplacement au sommet est d'approximativement 22 mm. L'élément déterminant est un voile de plus

de 4 m de long qui présente une rupture dominée par le cisaillement. Le facteur de conformité est proche de  $\alpha = 2/3$ . Il correspond au rapport de la capacité de déplacement du bâtiment par la demande en déplacement ( $\alpha = 15/22 \approx 2/3$ ). Il faut noter que, sur le diagramme ADRS (Fig. 2 à droite), les valeurs de déplacement au sommet sont réduites par le facteur de participation modal (env. 1,3). Clairement au-dessus de la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018, ce facteur de conformité indique une sécurité sismique satisfaisante. Le facteur de conformité est plus grand dans la direction transversale car la résistance et la rigidité sont plus élevées, due à la présence de nombreux voiles orientés dans ce sens.



**Figure 2.** Analyse d'un bâtiment isolé en maçonnerie de 3 étages avec la méthode basée sur les déformations. La courbe de capacité montre que la capacité de déplacement au sommet est de 15 mm environ (à gauche). La demande en déplacement est déterminée selon la procédure de l'EC 8 pour les courtes périodes et le diagramme ADRS illustre une sécurité sismique satisfaisante avec un facteur de conformité proche de  $\alpha = 2/3$  (à droite).

Une évaluation selon la méthode basée sur les forces mène à un facteur de conformité beaucoup plus petit, au-dessous de la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018, car la rupture est admise dès qu'un élément atteint sa capacité de résistance. Si l'appréciation sismique était effectuée sur la base des résultats de la méthode basée sur les forces, des mesures de renforcement seraient alors indispensables.

### 5.1.2. Discussion et généralisation

Comme les bâtiments de cette catégorie sont plutôt rigides avec une période fondamentale se situant généralement dans la gamme des fréquences du plateau du spectre de réponse, une borne inférieure du facteur de conformité correspondant à l'utilisation de la méthode basée sur les déformations peut être estimée, moyennant quelques hypothèses simplificatrices raisonnables.

La capacité de déplacement atteint au moins une valeur correspondant à une inclinaison ultime d'étage au rez-de-chaussée de 0,4 % pour une rupture en cisaillement d'un des éléments de stabilisation. La demande en déplacement maximale sur le plateau du spectre est atteinte sur le bord du plateau. Pour considérer ces deux déplacements au sommet du bâtiment, il faut d'une part ajouter la partie élastique à la capacité de déplacement et, d'autre part, multiplier le déplacement spectral du bord du plateau par le facteur de participation modal. Ces deux corrections sont du même ordre de grandeur et on peut faire l'hypothèse qu'elles sont égales. Par

conséquent, l'estimation de la borne inférieure du facteur de conformité consiste à déterminer le rapport du produit de la hauteur d'étage par l'inclinaison ultime de 0,4 % divisé par le déplacement spectral du bord du plateau du spectre de réponse élastique.

Avec une hauteur d'étage de 2,80 m, le numérateur vaut environ 11 mm. Pour une classe de sol C, le déplacement spectral au bord du plateau varie de 16 mm pour la zone sismique Z1 (la moins exposée avec  $a_{gd} = 0,6 \text{ m/s}^2$ ) à 42 mm pour la zone sismique Z3b (la plus exposée avec  $a_{gd} = 1,6 \text{ m/s}^2$ ). Par conséquent, quelle que soit la zone sismique en Suisse, le facteur de conformité est supérieur à la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018, pour une classe de sol C. Ce constat est valable pour les autres classes de sol de fondation. A ce stade, il faut rappeler que ces résultats se basent sur les hypothèses qu'il n'y a pas d'étage souple et que la torsion peut être négligée.

## **5.2. Bâtiments de barres en maçonnerie de 5 à 7 étages avec des voiles surtout dans la direction transversale**

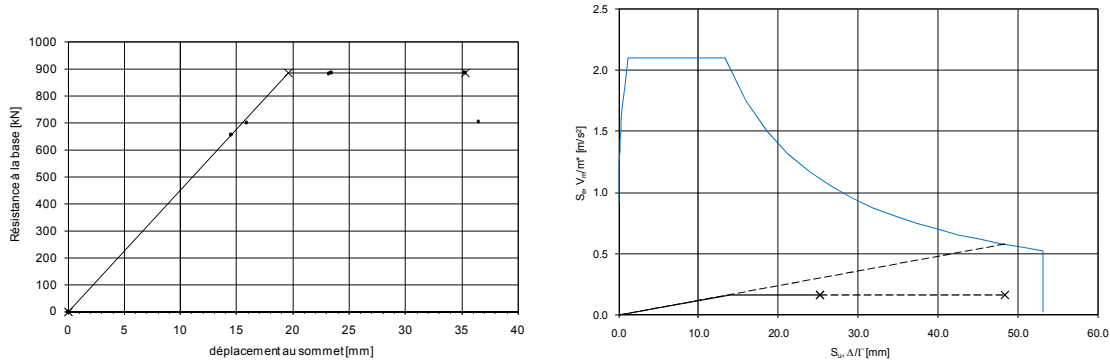
Comme expliqué ci-dessus, ces bâtiments sont très souples dans la direction longitudinale, avec des périodes fondamentales se situant proche du domaine de déplacement constant du spectre de réponse. Les voiles sont disposés principalement dans la direction transversale. De plus, plusieurs sont très longs, s'étirant souvent sur la totalité de la largeur du bâtiment, en particulier aux extrémités latérales pour la séparation des blocs. Par conséquent, ces longs voiles transversaux bloquent en quelque sorte la torsion qui n'intervient pas dans la réponse sismique et peut donc être négligée. En revanche, seul un nombre très restreint de petits voiles sont orientés dans la direction longitudinale. Ces petits voiles sont souvent constitués de la seule partie arrière des noyaux. La direction longitudinale est donc quasiment toujours déterminante.

### *5.2.1. Exemple : bâtiment de 7 étages*

Comme exemple de cette catégorie, la courbe de capacité d'un bâtiment stabilisé dans sa direction longitudinale par 3 voiles en maçonnerie de 15 cm d'épaisseur est représentée à la figure 3, à gauche. Ce bâtiment comporte 7 niveaux et deux sous-sols pour une hauteur d'approximativement 20 m à partir du niveau du terrain. Il est très régulier. La hauteur d'étage a une valeur constante de 2,85 m. La masse d'étage est également constante et vaut 470 t. La masse totale est donc de 3290 t. Le déplacement élastique au sommet est d'approximativement 20 mm et la capacité de déplacement au sommet de 35 mm environ. La résistance à la base s'élève à environ 880 kN.

Ce bâtiment est situé en zone sismique Z1, selon la norme SIA 261 (2003) et l'accélération nominale du sol vaut donc  $a_{gd} = 0,6 \text{ m/s}^2$ . L'emplacement est caractérisé par une classe de sol de fondation E (spectre de type I, selon EC8,  $S = 1,40$  ;  $T_B = 0,15 \text{ s}$  ;  $T_C = 0,5 \text{ s}$  ;  $T_D = 2,0 \text{ s}$ ). La période fondamentale est voisine de 1.8 s. L'appréciation de la sécurité sismique selon le diagramme ADRS est représentée à la figure 3, à droite. La demande en déplacement au sommet est d'approximativement 50 mm. L'élément déterminant est un voile de plus de 5 m de long qui présente une rupture dominée par la flexion. Le facteur de conformité est proche de  $\alpha = 1/2$ . Clairement au-dessus de la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018, ce facteur de conformité indique une sécurité sismique satisfaisante.

Le facteur de conformité est un peu plus élevé dans la direction transversale. La différence n'est pas aussi marquée que pour la première catégorie car il y a effectivement plus de voiles orientés dans la direction transversale, mais comme ces derniers sont très longs, la rupture est dominée par l'effort tranchant, limitant ainsi la capacité de déplacement.



**Figure 3.** Analyse d'un bâtiment en maçonnerie de 7 étages, faisant partie d'une barre, avec la méthode basée sur les déformations. La capacité de déplacement au sommet est de 35 mm environ (à gauche). La demande en déplacement est déterminée selon la règle des déplacements égaux (c.f. EC 8). Le diagramme ADRS illustre une sécurité sismique satisfaisante avec un facteur de conformité proche de  $\alpha = 1/2$  (à droite).

Une évaluation selon la méthode basée sur les forces mène à un facteur de conformité beaucoup plus bas, ici également au-dessous de la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018, car la rupture est admise dès qu'un élément atteint sa capacité de résistance. Si l'appréciation sismique était effectuée sur la base des résultats de la méthode basée sur les forces, des mesures de renforcement seraient alors indispensables.

### 5.2.2. Discussion et généralisation

Comme les bâtiments de cette catégorie sont très souples dans la direction longitudinale avec des périodes fondamentales se situant proche du domaine de déplacement constant du spectre de réponse, à nouveau, une borne inférieure du facteur de conformité correspondant à l'utilisation de la méthode basée sur les déformations peut être estimée, moyennant quelques hypothèses simplificatrices raisonnables.

La capacité de déplacement atteint cette fois une valeur correspondant à une inclinaison ultime d'étage au rez-de-chaussée de 0,8 % pour une rupture en flexion d'un des éléments de stabilisation. La demande en déplacement maximale correspond alors au déplacement spectral du domaine de déplacement constant du spectre de réponse élastique. Les deux corrections, pour considérer les déplacements au sommet du bâtiment, c'est-à-dire la partie élastique, et le facteur de participation modal peuvent à nouveau être admises égales. Par conséquent, l'estimation de la borne inférieure du facteur de conformité consiste à déterminer le rapport du produit de la hauteur d'étage par l'inclinaison ultime de 0,8 % divisé par le déplacement spectral maximal du spectre de réponse élastique.

Avec une hauteur d'étage de 2,80 m, le numérateur vaut environ 22 mm. Pour une classe de sol C (spectre de type I, selon EC8,  $S = 1,15$ ;  $T_B = 0,2$  s;  $T_C = 0,6$  s;  $T_D = 2,0$  s), le déplacement spectral maximal varie de 52 mm pour la zone sismique Z1 (la moins exposée avec  $a_{gd} = 0,6$  m/s<sup>2</sup>) à 140 mm pour la zone sismique Z3b (la plus exposée avec  $a_{gd} = 1,6$  m/s<sup>2</sup>). La situation est donc moins favorable que pour la première catégorie de bâtiments. Cependant, pour la classe de sol C, le facteur de conformité est supérieur à la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018, pour les zones sismiques Z1 et Z2 en Suisse. Ce constat est valable pour les autres classes de sol de fondation, à l'exception de la classe de sol D qui devient rapidement plus pénalisante au niveau de la



demande en déplacement et pour laquelle la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  est déjà pratiquement atteinte pour la zone sismique Z1, la moins exposée. A nouveau, il faut rappeler que ces résultats se basent sur les hypothèses qu'il n'y a pas d'étage souple et que la torsion peut être négligée.

Comme mentionné plus haut, l'analyse sismique des bâtiments de cette catégorie est souvent réalisée dans le cadre d'un projet de surélévation de quelques étages. Il faut relever ici que la surélévation n'a pas le même impact dans les deux directions. Dans la direction longitudinale, le facteur de conformité reste à peu près stable car la demande en déplacement et la capacité de déplacement augmentent dans une proportion comparable. En effet, la demande en déplacement augmente relativement peu car elle est constante dès que la période fondamentale est plus élevée que  $T_D$  et la capacité de déplacement augmente légèrement en fonction de l'augmentation de l'effort de compression dans les voiles. En revanche, dans la direction transversale, le facteur de conformité peut diminuer notablement, mais généralement sans devenir déterminant. Par ailleurs, la diminution peut être limitée par le choix d'étages supplémentaires légers, en construction métallique ou en bois par exemple.

Signalons ici une possibilité supplémentaire pour « améliorer » la sécurité sismique. Il s'agit de la réalisation d'une étude de site. En effet, il est reconnu que les spectres de normes peuvent conduire à une forte surestimation des sollicitations sismiques pour les longues périodes, proches de 2 s, ceci étant particulièrement marqué pour la classe de sol E, dans certaines configurations. Une étude de site spectrale permet de préciser les sollicitations à considérer en fonctions des conditions locales du site considéré.

### 5.3. Bâtiments en béton armé

Le cas des bâtiments en béton armé est plus délicat à traiter de manière générale car ce matériau autorise une grande variété de bâtiments et aucun type ne peut véritablement être identifié. La figure 1 présente un exemple d'évaluation sismique de bâtiment en béton armé de 4 étages stabilisé par 2 noyaux et 2 voiles. Ce bâtiment est situé en zone sismique Z3b, la plus exposée en Suisse. Le diagramme ADRS de la partie droite de la figure 1 montre que la sécurité sismique de ce bâtiment est satisfaisante car le facteur de conformité est largement supérieur à la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018.

Globalement, sur la base des résultats de plusieurs bâtiments analysés avec la méthode basée sur les déformations, on peut affirmer que les bâtiments en béton armé ne posent pas de problème particulier pour autant que les éléments soient continus sur la hauteur et qu'il n'y ait pas de lacunes récurrentes comme un étage souple ou une forte torsion, par exemple. Ce constat est valable malgré la prise en compte d'une réduction de moitié de la capacité d'allongement de l'acier d'armature dû à la présence de recouvrement à la base. En bref, ce constat ne fait que confirmer l'effet néfaste bien connu des irrégularités en matière de comportement sismique.

## 6. Conclusions

L'appréciation de l'évaluation sismique des bâtiments existants est problématique car ces derniers ont été généralement construits sans tenir compte de ce type de risque ou bien avec des méthodes inadaptées. Principalement en raison de l'adaptation à la hausse de l'aléa sismique dans les régions à sismicité modérée comme la Suisse, par exemple, une grande majorité d'entre eux devrait être renforcée s'ils étaient évalués selon les mêmes critères et les mêmes méthodes d'analyse que les bâtiments neufs.

Particulièrement pour les bâtiments en maçonnerie avec planchers rigides, l'utilisation de la méthode élaborée, basée sur les déformations, au lieu des méthodes classiques, basées sur les forces, permet de mettre en évidence une sécurité sismique accrue. En effet, la méthode basée sur les déformations exploite avantageusement la capacité de déformation, non négligeable, de la maçonnerie.

Couplée à l'approche basée sur le risque, du CT SIA 2018, l'appréciation de la sécurité sismique permet de montrer que la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  du facteur de conformité est aisément satisfaite pour la catégorie des bâtiments isolés de 3 à 5 étages, quelles que soient la zone sismique et la classe de sol de fondation. Pour les bâtiments en barres de 5 à 7 étages, cette condition est satisfaite pour les zones Z1 et Z2. Il faut cependant préciser que ces résultats ne sont qu'à condition qu'il n'y a pas d'étage souple et que la torsion peut être négligée.

Il faut souligner par ailleurs que pour des facteurs de conformité supérieurs à la valeur seuil de  $\alpha_{\min} = 1/4$  selon le CT SIA 2018, l'expérience montre que peu de mesures de confortement remplissent la condition de proportionnalité. En effet, la période de retour de l'action sismique étant bien plus élevée (env. 500 ans) que la durée d'utilisation restante (de l'ordre de 50 ans) et qu'un bâtiment est rarement occupé en permanence, les interventions ne permettent de sauver statistiquement que des fractions de vies humaines. Ainsi, les montants considérés comme proportionnels n'atteignent également qu'une fraction de la limite des 10 millions de CHF (environ 8 millions d'€).

## 7. Bibliographie

- Bachmann H., Lang K., *Zur Erdbebensicherung von Mauerwerksbauten*, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, Bericht Nr. 274, vdf-Hochschulverlag Zürich, 2002.
- Lestuzzi P., *Séismes et construction. Eléments pour non-spécialistes*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J., *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italy, 2007.
- Eurocode 8 (norme), *Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 3 : Evaluation et renforcement des bâtiments*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2005.
- SIA 2018 (cahier technique), *Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2004.
- SIA 261 (norme), *Actions sur les structures porteuses*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2003.
- SIA D 0237 (documentation), *Evaluation de la sécurité parasismique des bâtiments en maçonnerie*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2011.