

CONSEILS TECHNIQUES POUR L'INGÉNIEUR

Notice explicative

Notice explicative: conseils techniques pour l'ingénieur en matière parasismique

Ce document regroupe des recommandations à l'intention de l'ingénieur civil responsable de la structure porteuse pour apporter une aide à l'application des méthodes d'analyse et de calcul visant à assurer la sécurité sismique de l'ouvrage. Ces recommandations sont valables pour des bâtiments courants. En présence de bâtiments exceptionnels, il appartient à l'ingénieur responsable de l'étude d'adapter les recommandations à son cas particulier. Bien qu'elles aient une portée générale, les recommandations sont séparées dans ce document pour des raisons de clarté entre recommandations pour ouvrages neufs et recommandations pour ouvrages existants.

1. Ouvrages neufs

1.1 Conception parasismique

Pour les ouvrages neufs, tout se joue du point de vue parasismique au stade de la conception. Si les aspects parasismiques sont pris en compte dès les premiers stades de la conception d'un bâtiment, un comportement favorable peut être assuré sans surcoût notable. Une bonne conception parasismique consiste à respecter les quelques principes de base suivants :

- forme simple et compacte
- régularité et symétrie
- pas de changement brusque de résistance et de rigidité
- résistance et rigidité vis-à-vis de la torsion

Les principes de base de la conception parasismique en plan sont résumés à la figure 1. Les formes en plan compactes, symétriques et régulières doivent être privilégiées. Il faut éviter les parties saillantes et les angles rentrants, car ils entraînent des concentrations d'efforts. Les formes asymétriques engendrent de la torsion et il est préférable de les fragmenter en formes simples en introduisant des joints parasismiques. La fragmentation est également recommandée pour les formes allongées qui sont sujettes à des oscillations différentielles. Les éléments de la stabilisation horizontale doivent être disposés de manière symétrique et près de la périphérie pour conférer ainsi au bâtiment une grande rigidité à la torsion.

Les principes de base de la conception parasismique en élévation sont résumés à la figure 2. Les formes en élévation régulières et sans discontinuités brusques doivent être privilégiées. La fragmentation en formes simples permet de remédier aux irrégularités de la forme en élévation. Il est primordial

que les éléments de la stabilisation horizontale soient continus du sommet de la structure jusqu'à ses fondations. Par ailleurs, il faut proscrire les changements brusques des caractéristiques des éléments.









À privilégier	À éviter	Commentaires
		<ul style="list-style-type: none"> - forme idéale compacte - parties saillantes et angles rentrants concentrent les efforts
		<ul style="list-style-type: none"> - formes asymétriques engendrent oscillations différentielles et torsion - fragmentation en formes simples avec des joints parasismiques
		<ul style="list-style-type: none"> - formes allongées sujettes à des oscillations différentielles aux extr.
		<ul style="list-style-type: none"> - disposition symétrique des éléments de contreventement contre la torsion - disposition près de la périphérie des éléments de contreventement pour une grande rigidité de la torsion

Fig. 1: Principes de base de la conception parasismique en plan.



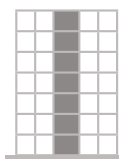
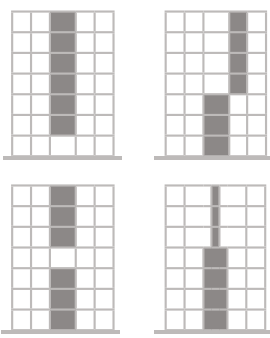
À privilégier	À éviter	Commentaires
		<ul style="list-style-type: none"> - forme idéale régulière - fragmentation en formes simples avec des joints parasismiques
		<ul style="list-style-type: none"> - éléments de contreventement continus jusqu'aux fondations - interruption au 1^{er} étage conduit inévitablement au phénomène de « soft-storey » - pas de décalage des éléments de contreventement - sauts de rigidité provoquent des concentrations d'efforts : étage souple ou diminution des éléments

Fig. 2: Principes de base de la conception parasismique en élévation.

Il faut relever que tous ces principes n'ont pas la même importance, surtout dans le contexte d'une sismicité modérée comme celle de la Suisse. Certains principes sont impératifs alors que d'autres peuvent être considérés comme des recommandations à suivre plus ou moins fidèlement, voire à ne pas appliquer si elles engendrent des problèmes de réalisation ou de maintenance, comme les joints parasismiques par exemple. La continuité verticale des éléments de la stabilisation latérale est l'exemple type de principes à suivre impérativement. La disposition symétrique en plan des éléments de stabilisation est souhaitable, mais on peut déroger à ce principe en étant conscient des efforts supplémentaires qui y sont liés. La fragmentation en formes simples par des joints parasismiques est, elle, généralement source de difficultés accrues de réalisation qui ne sont souvent pas vraiment compensées par une amélioration suffisamment importante du comportement sismique pour justifier son application.

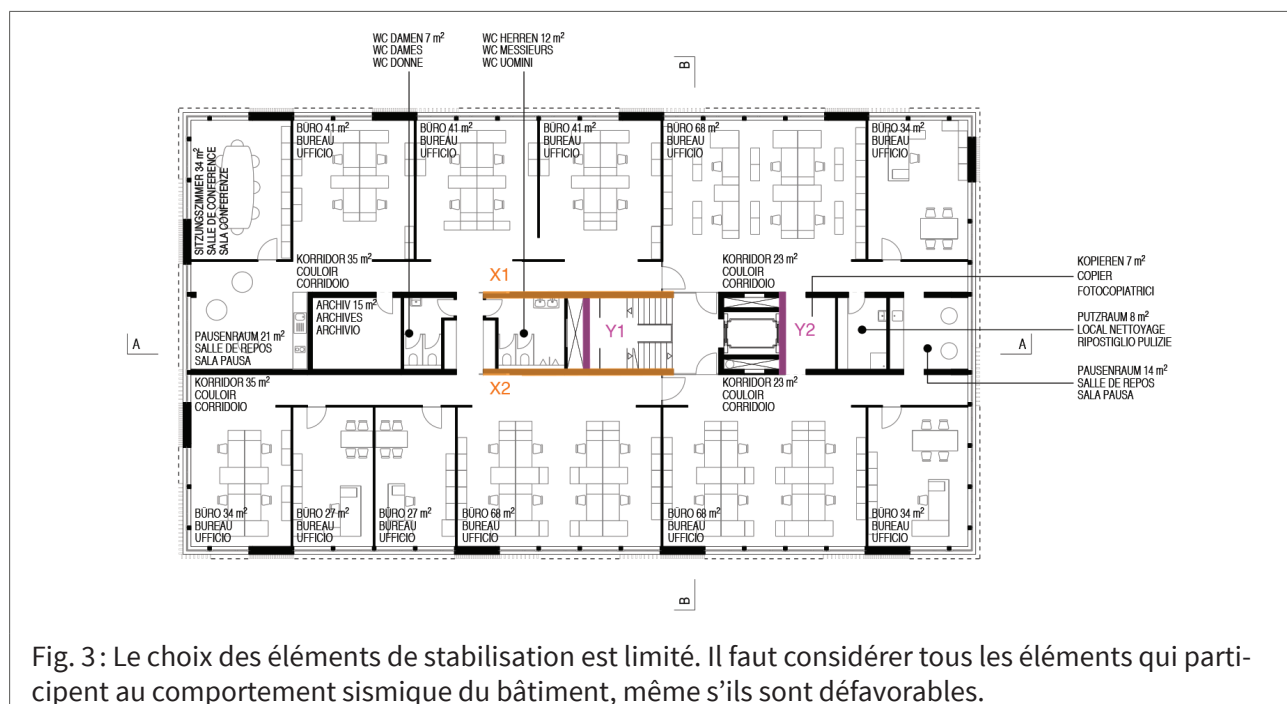
1.2 Erreurs à éviter

Dans l'application concrète des principes de base de conception parasismique, les erreurs fréquentes suivantes sont à éviter, en particulier pour les bâtiments en béton armé :

- choix des éléments de stabilisation horizontale
- prise en compte des sections monolithiques
- sections problématiques

1.2.1 Choix des éléments de stabilisation horizontale

L'analyse parasismique doit tenir compte de tous les éléments qui participent au comportement dynamique du bâtiment. Il arrive fréquemment qu'il y ait « trop » de murs à disposition par rapport à ce qui serait strictement nécessaire pour reprendre les sollicitations sismiques, particulièrement pour les zones sismiques Z1 et Z2. Cependant, l'ingénieur ne peut pas simplement ignorer la présence des éléments « en surplus » et ne choisir que les murs qui l'arrangent pour effectuer le dimensionnement parasismique. En effet, ces éléments influencent de manière potentiellement « néfaste » le comportement sismique du bâtiment en rigidifiant le bâtiment (période plus courte) et en engendrant de la torsion. A moins de prendre des mesures particulières constructives de désolidarisation, mesures non souhaitées à d'autres point de vue, tous les éléments doivent être pris en compte. En contrepartie, les éléments « en surplus » amènent une résistance supplémentaire généralement largement suffisante par rapport aux sollicitations sismiques supplémentaires à considérer.



1.2.2 Sections monolithiques

En présence de sections composées de plusieurs segments, l'hypothèse habituelle est de les considérer comme monolithiques s'il s'agit de béton armé et comme «éclatées», c'est-à-dire de prendre en compte les segments individuellement s'il s'agit de maçonnerie non armée. Il faut donc prêter une attention particulière pour les noyaux en béton armé, par exemple.

1.2.3 Sections problématiques

Les sections monolithiques en «L» ou en «T» sont problématiques parce qu'elles sont susceptibles de subir une rupture fragile en flexion. En effet, leur configuration peut amener à une rupture du béton en compression avant la plastification de l'armature en traction. C'est un problème connu du béton armé lorsque l'axe neutre pénètre trop «profondément» dans la section. Il faut donc proscrire les sections en «L» en les transformant par exemple en section en «C» moins problématiques de ce point de vue. Pour les sections en «T», on peut les améliorer en élargissant leur base pour «reprendre» les forces de traction des armatures de la barre du «T».

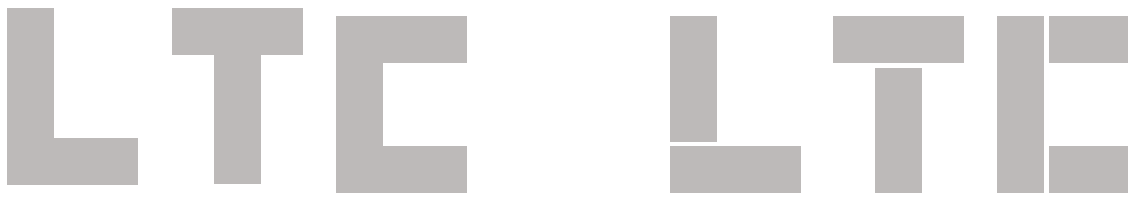


Fig. 4: Les sections composées sont à considérer comme monolithiques pour le béton armé et comme «éclatées» pour la maçonnerie non armée.

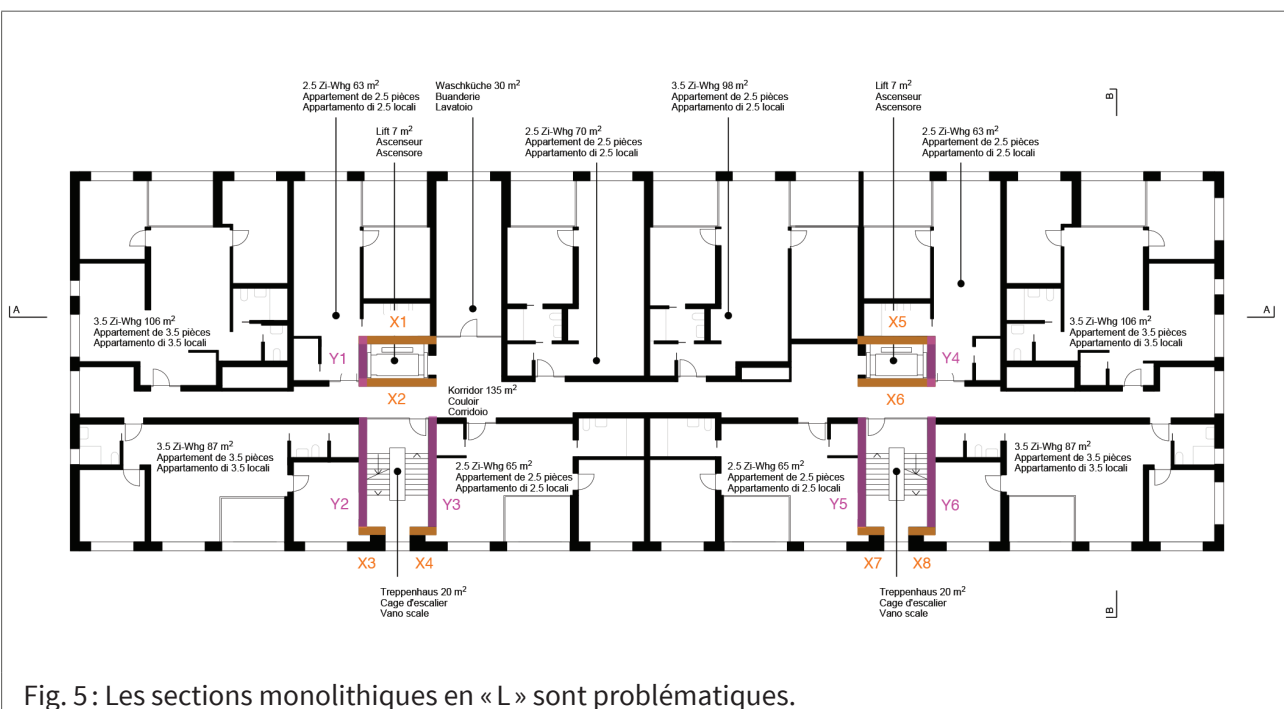


Fig. 5: Les sections monolithiques en «L» sont problématiques.

1.3 Dimensionnement parasismique

Avec une bonne conception parasismique, un comportement sismique favorable de la structure est assuré et les calculs passent au second plan. Il n'y a pas besoin de méthodes de calcul élaborées et la méthode des forces de remplacement est amplement suffisante pour le dimensionnement. Il faut toutefois relever les points suivants :

- rigidité des éléments de la stabilisation horizontale
- quotient de Rayleigh
- dimensionnement des fondations

1.3.1 Rigidité des éléments de la stabilisation horizontale

La période propre étant le paramètre central du dimensionnement parasismique, il faut considérer une rigidité « réaliste » de la structure porteuse dans la détermination des sollicitations sismiques associées. Par rapport à l'état non fissuré, on peut prendre sans autres une rigidité correspondant à 50% de la valeur correspondante pour considérer l'effet de la fissuration. Cette valeur est valable pour le béton armé et pour la maçonnerie non armée. Des valeurs plus précises sont proposées dans la norme SIA 269/8.

1.3.2 Quotient de Rayleigh

Pour un calcul sans logiciel d'éléments finis (ou pour vérifier les résultats d'un logiciel), la période propre peut avantageusement être déterminée de manière suffisamment précise à l'aide du « quotient de Rayleigh ». Pour ce faire, il faut utiliser la formule complète et éviter la formule simplifiée qui se trouve dans la norme SIA 261, car elle ne donne pas de bons résultats.

1.3.3 Dimensionnement des fondations

Le dimensionnement des fondations fait partie intégrante du dimensionnement parasismique. C'est souvent à ce niveau que se situe les difficultés. Il faut donc suivre et vérifier la transmission des efforts jusqu'au sol de fondation.

2. Ouvrages existants

Dans la vérification sismique des ouvrages existants, il importe d'avoir rapidement une estimation de l'ordre de grandeur du facteur de conformité, car la suite de l'étude dépend du niveau du facteur de conformité par rapport à celui du seuil correspondant (α_{min}). Par conséquent, les premiers pas de l'appréciation sismique s'effectuent généralement au moyen de la méthode simplifiée des forces de remplacement. Cependant, comme il s'agit d'évaluer approximativement le niveau de sécurité sismique, les restrictions d'application sont moins strictes que celles de la norme SIA 261 pour le dimensionnement de bâtiments neufs. En particulier, les effets de la torsion peuvent être estimés de manière simplifiée.

2.1 Bâtiment en maçonnerie non armée

2.1.1 Bâtiments en maçonnerie avec planchers rigides

Dans le cas de bâtiments en maçonnerie avec planchers rigides (béton armé, hourdis avec couche supérieure de béton armé, p. ex.), la résistance dans le plan des refends est généralement déterminante. L'effet diaphragme permet de répartir les forces d'étage dans les refends. Cependant, il est recommandé d'effectuer la répartition au prorata des résistances des refends au lieu de la répartition habituelle au prorata des inerties. En effet, cette hypothèse de répartition plastique des efforts conduit à des résultats moins défavorables et plus réalistes que l'hypothèse de répartition élastique liée, aux inerties. Par ailleurs, il y a lieu de tenir compte d'un effet cadre pour considérer l'interaction des refends par l'intermédiaire des linteaux et des planchers. Selon les recommandations de la documentation SIA D 0237 (2011), une hauteur de point de moment nul correspondant à une hauteur comprise entre une fois et deux fois la hauteur d'étage au rez-de-chaussée est appropriée.

2.1.2 Bâtiments en maçonnerie avec planchers souples

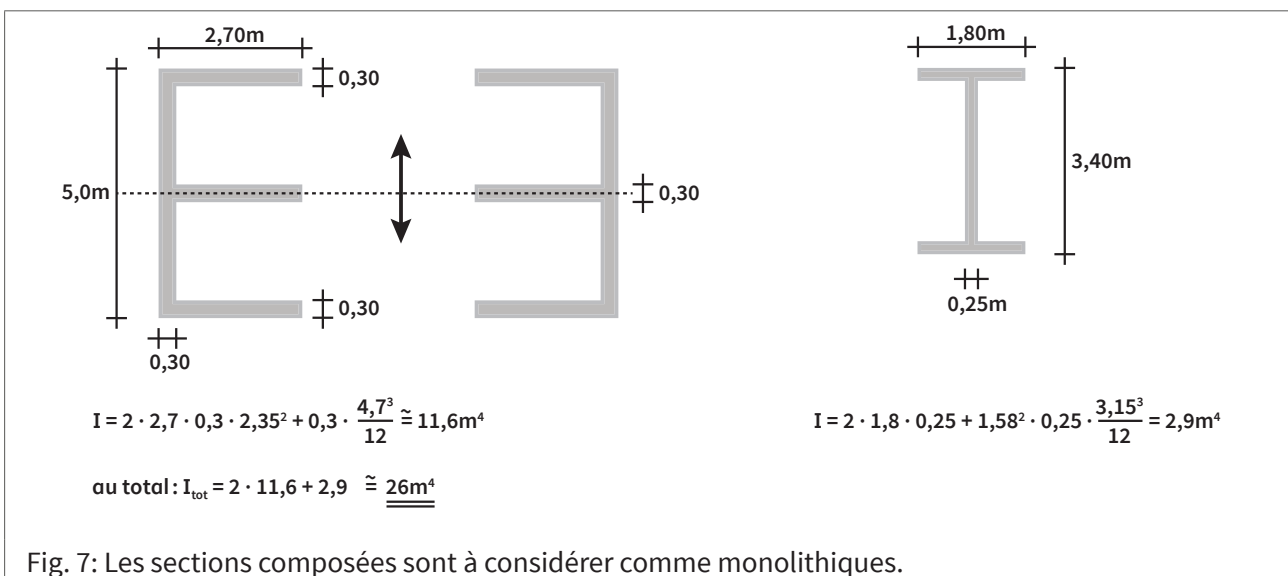
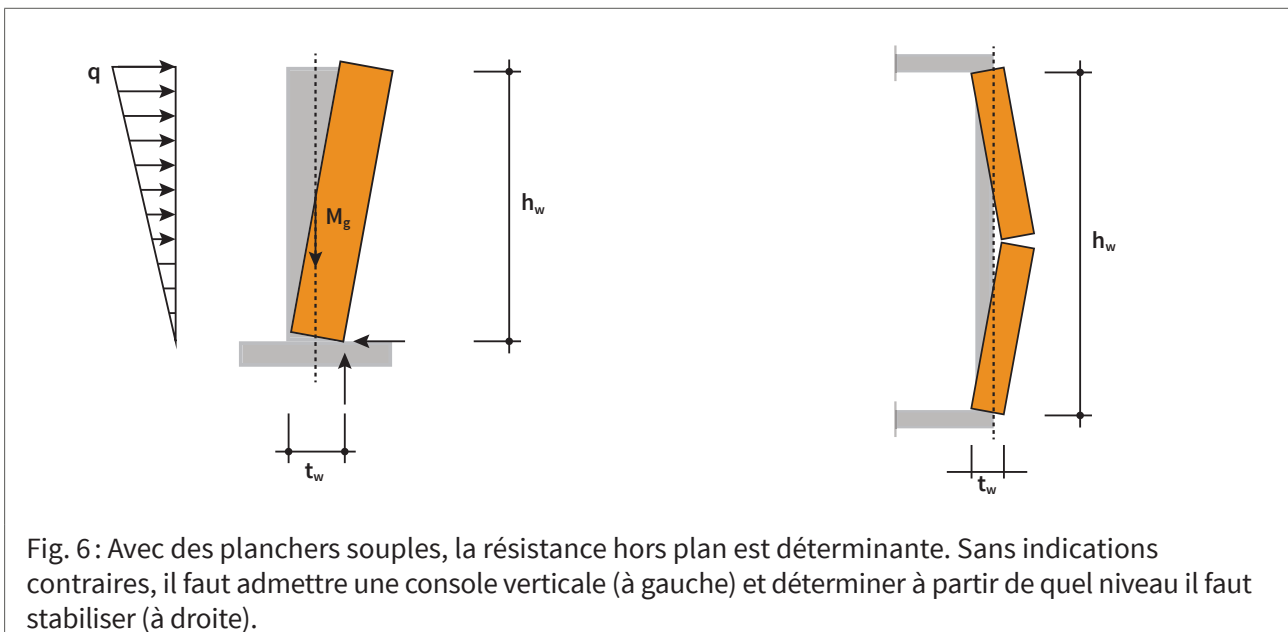
Dans le cas de bâtiments en maçonnerie avec planchers souples (solives en bois, p. ex.), la résistance hors plan des refends est généralement déterminante. Sans information contraire, il faut admettre l'absence de points d'appui sur la hauteur et considérer un modèle en console verticale (Figure 6 à gauche). Souvent, la sécurité sismique hors plan est déficiente et la question cruciale associée est de déterminer le nombre de niveaux sur lesquels il faudrait intervenir pour garantir la sécurité hors plan. En général, une intervention au niveau supérieur est suffisante (Figure 6 à droite). La détermination de la sécurité sismique hors plan peut être analysée en admettant un comportement en corps rigide. La norme italienne (NTC) a formalisé une telle approche en se basant sur le modèle proposé par Griffith (2006).

Quant à la résistance dans le plan, elle peut être déterminée par éléments (une façade par exemple) et elle doit normalement se baser sur l'accélération spectrale du plateau du spectre de réponse.

2.2 Bâtiment en béton armé

2.2.1 Sections non rectangulaires

Dans le cas de sections non rectangulaires en béton armé, il est important de rappeler qu'il faut absolument considérer une section monolithique et ne pas « éclater » la section en rectangles comme on le voit parfois. Toutefois, une simplification raisonnable de sections complexes, de noyaux par exemple, en « C », en « E », en « T » ou en « I » est admise (Figures 7 et 8).



2.2.2 Vérification à l'effort tranchant

La vérification des éléments en béton armé avec le modèle en treillis multiple doit être effectuée avec un angle d'inclinaison des bielles de compression adapté. Souvent, la borne inférieure de 25° est judicieuse. L'angle habituel de 45° est généralement trop défavorable en présence d'une faible armature transversale.

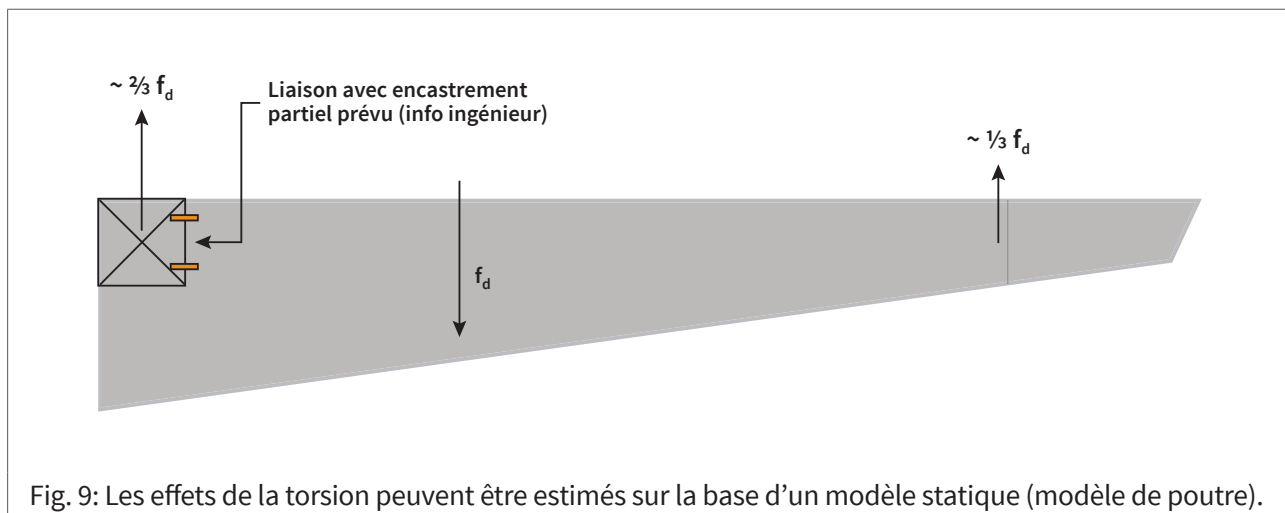
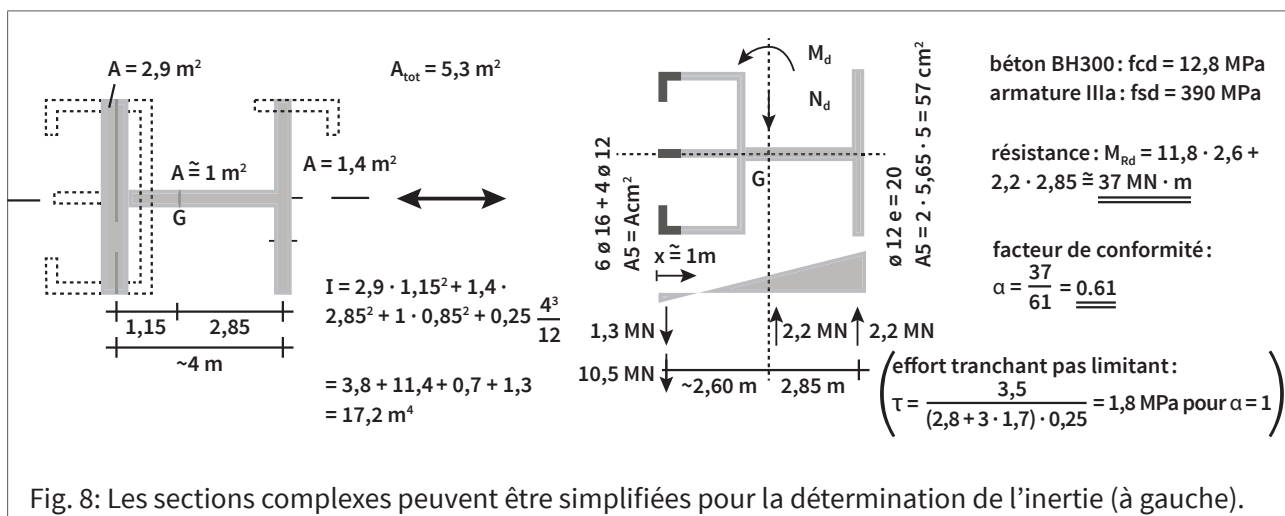
2.3 Immeuble séparé par des joints de dilatation

Conformément aux directives de l'étape 2 de l'OFEV, dans le cas d'immeubles séparés par des joints de dilatation, il faut considérer chaque partie comme un bâtiment indépendant. Cependant, la connaissance du facteur de conformité de toutes les parties n'est généralement pas nécessaire. En présence de nombreuses parties (plus de deux), il est plus judicieux de donner les bornes des facteurs de conformité en

déterminant les valeurs de la partie la plus vulnérable et de la partie la moins vulnérable a priori et d'estimer ensuite le facteur de conformité obtenu en clavant les joints de dilatation. En effet, cette mesure logique est susceptible d'être facilement intégrée dans un projet de rénovation et améliore généralement de manière très sensible le comportement d'ensemble de l'immeuble.

2.4 Estimation des effets de la torsion

Selon les conditions, les effets de la torsion peuvent être estimés de manière suffisamment fiable en répartissant les forces d'étage sur la base d'un modèle statique dont les refends représentent les appuis (Figure 9).



3. Références

SIA 261 (2014), Norme de construction, «Actions sur les structures porteuses», Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zurich.

SIA 269/8 (2017), Maintenance des structures porteuses - Séismes, SIA, Zurich.

Griffith et al. (2006), Displacement-based Assessment of the Seismic Capacity of Unreinforced Masonry Walls in Bending, Australian Journal of Structural Engineering, Vol. 6 No. 2, 2006.

Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Concept et directive pour l'étape 2 (2^e édition)», Ittigen, 2006.

SIA D 0237 (2011), documentation, «Evaluation de la sécurité parasismique des bâtiments en maçonnerie», SIA, Zurich.