

Logiciel ÉPICENTRE

Série Théorie & Pratique

**Contreventement des bâtiments
constitués de murs
reliés par des linteaux**

Michel Hénin

Janvier 2019

Les notes techniques de la série « Théorie & Pratique » présentent sous une forme simple et concrète les connaissances de base nécessaires pour aborder rapidement le calcul sismique des bâtiments avec le logiciel ÉPICENTRE.

Sommaire

Le but de la présente note, succincte et facile à lire, est de présenter de manière concrète les mécanismes de base intervenant dans le fonctionnement d'un bâtiment contreventé par des murs en béton ou en maçonnerie et soumis à des actions horizontales (vent ou séisme).

Je vous remercie par avance pour toutes les suggestions que vous voudrez bien me faire pour améliorer ce document.

Introduction

1. Éléments structuraux concernés, définitions et vocabulaire1
2. Charges appliquées (vent ou séismes).....2

Flexion d'ensemble

1. Les murs travaillent conjointement du fait de l'action d'entretoisement des planchers3
2. Action résistante des linteaux, effort axial résultant dans les murs4
3. Action résistante des poteaux supports de murs4

Torsion d'ensemble

1. Analyse des mécanismes5
2. Centres de torsion des murs6
3. Torsion et flexion des murs8
4. Torsion et flexion des bâtiments9
5. Action résistante des linteaux internes à un mur gauchi.....9

Introduction

1. Éléments structuraux concernés, définitions et vocabulaire

Les murs

Ce sont des murs en béton banché, généralement peu armés, ou en maçonnerie.

Vus en plan, les murs ont la plupart du temps une géométrie basée sur des assemblages de panneaux rectilignes. Par exemple, un mur en forme de L (en plan) est constitué de deux panneaux rectilignes solidaires au niveau de l'arête du L. Dans la pratique, ces panneaux travaillent ensemble, de façon monolithique (comme les deux ailes d'une cornière métallique en L).

On appellera « mur » non pas chaque panneau mais chaque ensemble monolithique de panneaux.

Généralement, un mur est fondé en pied de bâtiment et monte verticalement dans le bâtiment, avec éventuellement des changements de section à certains niveaux : c'est toute cette structure verticale que nous appellerons « mur ».

Les planchers d'étage

En pratique, on considère que les planchers d'étage sont infiniment souples perpendiculairement à leur plan et infiniment raides dans leur plan : ils se comportent donc comme des diaphragmes indéformables.

Cette hypothèse se justifie du fait de l'ordre de grandeur relatif des inerties des murs par rapport à celles des planchers, parallèlement ou perpendiculairement à leur plan.

Les linteaux

Un linteau est une poutre horizontale reliant deux murs voisins et généralement située dans leur plan.

L'exemple le plus courant est celui de linteaux répétés à chaque étage au-dessus d'ouvertures superposées (portes ou fenêtres).

Notons que des linteaux peuvent aussi relier deux bords d'un même mur (par exemple les linteaux d'une cage d'ascenseur en forme de U).

Les linteaux sont encastrés à leurs extrémités sur les bords des deux murs d'appui.

De ce fait, ils peuvent jouer un rôle résistant non négligeable dans le fonctionnement en contreventement des bâtiments (nous verrons plus loin comment) : c'est pourquoi on parle souvent de systèmes de contreventement « murs + linteaux ».

Les poteaux supports de murs

Il arrive que des murs s'appuient sur des poteaux (poteaux en RDC, transparences en étage).

Ces poteaux vont ainsi reprendre en compression-traction les efforts axiaux et les moments transmis par les murs.

Les appuis entre murs

Il arrive aussi que des murs s'appuient les uns sur les autres : par exemple, une partie en encorbellement de l'un des murs repose sur une partie en débord de l'autre mur.

2. Charges appliquées (vent ou séismes)

Charges de vent

L'Eurocode 1 remplace les pressions dynamiques de vent appliquées sur les façades par des pressions statiques de calcul. Il indique aussi comment calculer ces pressions statiques de vent suivant l'orientation des façades par rapport au vent et suivant leur hauteur par rapport au sol environnant.

Les charges de vent à appliquer au bâtiment sont les résultantes (statiques) de ces pressions de calcul appliquées aux façades : on les qualifie de « chargements statiques équivalents ».

Les logiciels de calcul permettent d'entrer ces charges externes de vent soit comme des densités linéaires de charges, appliquées de façon continue sur la hauteur du bâtiment, soit comme des charges ponctuelles, appliquées au niveau des planchers d'étage.

C'est par les planchers d'étage que ces charges externes sont ensuite distribuées à l'intérieur du bâtiment vers les murs de contreventement.

Actions sismiques

Les séismes se traduisent par des mouvements désordonnés au niveau des fondations du bâtiment : le bâtiment est « secoué » à sa base, horizontalement et verticalement.

Les mouvements horizontaux du sol engendrent les « composantes sismiques horizontales ».

Du fait de la raideur horizontale des murs, ces déplacements en pied de bâtiment sont répercutés dans les étages : le bâtiment se met à osciller, entraîné dans un mouvement vibratoire résultant à la fois des secousses appliquées en pied de bâtiment et de l'action des forces d'inertie générées au niveau des planchers d'étage en mouvement.

La note de la série « Théorie & Pratique » intitulée « calcul sismique dynamique avec ÉPICENTRE », expose comment cette situation complexe est traitée au niveau du calcul. Disons simplement pour le moment que les composantes sismiques horizontales dynamiques sont remplacées pour le calcul par des efforts horizontaux statiques appliqués au niveau des planchers d'étage.

NB : même dans le cas de la méthode de l'analyse modale spectrale, dont on peut dire qu'il s'agit d'une méthode de calcul dynamique, les efforts appliqués sont bien des efforts statiques équivalents (déterminés à partir de considérations et de raisonnements dynamiques).

Flexion d'ensemble

1. Les murs travaillent conjointement du fait de l'action d'entretoisement des planchers

Action des planchers

Nous avons vu que les planchers se comportent comme des diaphragmes indéformables dans leur plan. Ils vont de ce fait obliger les murs à travailler conjointement, en leur imposant de se déplacer d'un même mouvement à chaque étage.

Conséquences pour les déformées des murs

Cela signifie, par exemple, qu'un groupe de murs disposés en file vont avoir, à chaque étage, des flèches rigoureusement identiques suivant la direction de cette file.

Du fait du peu de flexibilité des murs, cette égalité des flèches sera encore quasiment vérifiée entre les planchers d'étages : on peut donc considérer que les murs d'une même file ont une déformée identique dans la direction de cette file, sur toute la hauteur du bâtiment.

Répartition des efforts horizontaux entre les murs : proportionnellement aux inerties ?

Cette identité des déformées pour les murs d'une même file fait qu'il est couramment admis que la répartition des efforts horizontaux externes entre les murs d'un bâtiment fléchi va se faire « proportionnellement aux inerties ».

Cette règle peut aider à fixer des ordres de grandeurs lors de l'étude d'un bâtiment.

En effet, imaginons deux murs plans voisins, alignés et de même épaisseur, l'un deux fois plus long que l'autre : le premier reprendra environ 8 fois plus d'efforts que le second (inerties en $bh^3/12$!), alors que son « poids visuel » sur le plan de coffrage est dans un rapport de 2 à 1.

En fait, cette règle simplificatrice de la répartition des efforts « proportionnellement aux inerties » n'est valable que pour les bâtiments élevés. Elle n'est plus vérifiée pour les bâtiments bas comprenant de nombreux murs très peu élancés. En effet, pour ces murs, les déformations de distorsion sont du même ordre que celles dues à la flexion et jouent de ce fait un rôle important dans la répartition des efforts horizontaux entre les murs.

Pour les murs très peu élancés, la répartition se fait plutôt proportionnellement aux surfaces des sections : un mur deux fois plus long qu'un mur voisin parallèle a une surface 2 fois plus grande et la répartition des efforts entre les deux murs se rapproche de ce fait du rapport 1 pour 2, au lieu de 1 pour 8 pour les murs élancés.

Conséquences pour la modélisation

En tous cas, il est utile d'avoir en tête que dans le fonctionnement en contreventement d'un bâtiment certains murs vont jouer un rôle essentiel et d'autres un rôle mineur.

Lors de l'étude du contreventement d'un bâtiment, il est utile de repérer les murs déterminants. C'est sur eux qu'il faudra agir si la résistance du bâtiment apparaît insuffisante.

Les murs de très petites dimensions peuvent par contre être écartés lors de la modélisation : leur contribution à la résistance générale sera négligeable (mais ils alourdissent les fichiers de résultats).

Aide visuelle fournie par ÉPICENTRE

Afin de faciliter cette analyse de la contribution relative des murs, ÉPICENTRE permet d'afficher à l'écran les plans d'étages avec la représentation des inerties principales de chaque mur.

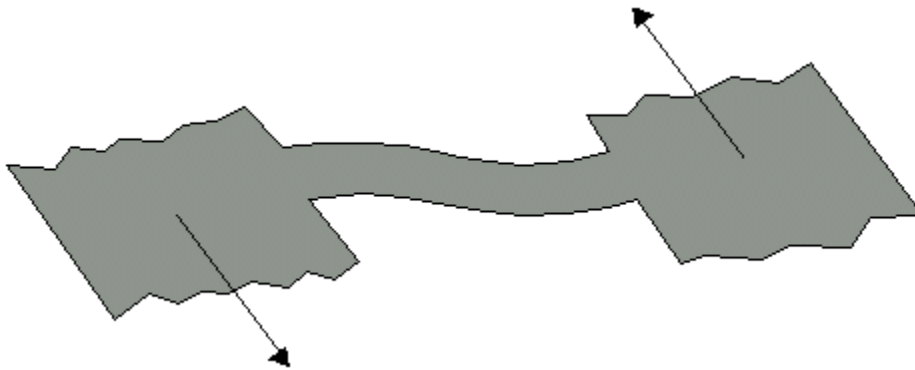
2. Action résistante des linteaux, effort axial résultant dans les murs

Action résistante des linteaux

Considérons deux murs plans alignés reliés par un linteau à un certain étage et mis en flexion par une action horizontale de vent ou de séisme.

Nous avons vu dans la rubrique précédente que les déformées des deux murs (parallèlement à leur plan) sont identiques : les bords des deux murs au droit du linteaux restent donc parallèles entre eux malgré leur inclinaison.

Le linteau est de ce fait déformé comme indiqué dans le schéma ci-dessous :



La déformée du linteau est symétrique, avec un point d'inflexion à mi-portée.

Cette déformée génère dans le linteau un effort tranchant T et deux moments d'encastrement de signes opposés au droit des appuis (si l est la portée du linteau, les moments d'encastrement sont égaux en valeur à $0,5 T \times l$).

Effort axial résultant dans les murs

Le linteau exerce un effort vertical ascendant sur l'un de ses murs d'appui, descendant sur l'autre.

Les murs d'un bâtiment bordés par des linteaux et mis en flexion par des actions de vent ou de séisme sont donc soumis à un effort vertical axial additionnel du à l'action résistante des linteaux adjacents.

Les murs non bordés par des linteaux fonctionneront en flexion simple, sans effort axial.

3. Action résistante des poteaux supports de murs

L'inertie des poteaux est négligeable devant celle des murs

L'ordre de grandeur des inerties de poteaux est en effet très inférieur à celui des inerties de murs (inerties en $bh^3/12$, variant comme le cube des dimensions en plan).

Les poteaux travaillent essentiellement en compression-traction

L'action résistante des poteaux supports de mur se limite donc en pratique à un fonctionnement en compression-traction, qui équilibre les efforts axiaux et les moments à la base des murs supportés.

Conséquences pour la saisie dans ÉPICENTRE

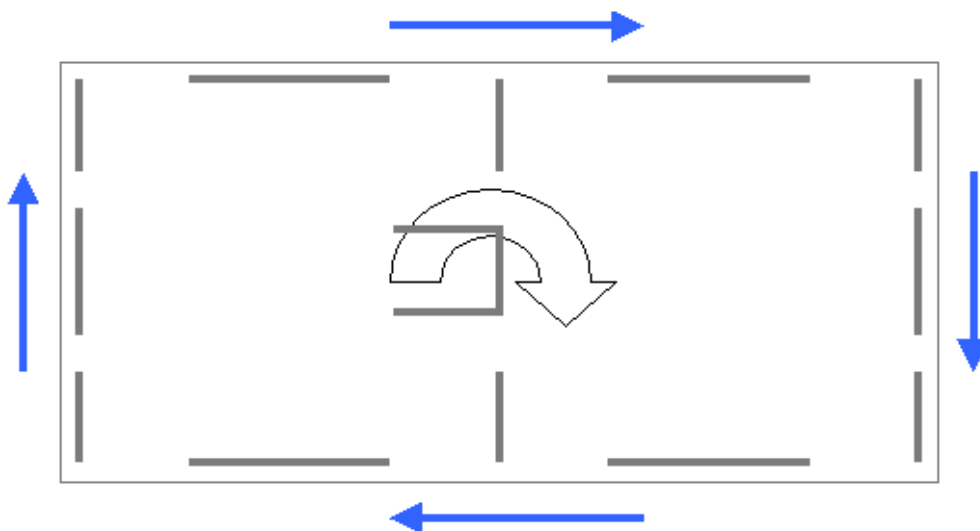
C'est pourquoi, dans ÉPICENTRE, on saisit la section (l'aire) des poteaux supports de murs, mais pas leurs inerties.

Torsion d'ensemble

1. Analyse des mécanismes

La torsion d'ensemble entraîne une flexion individuelle des murs

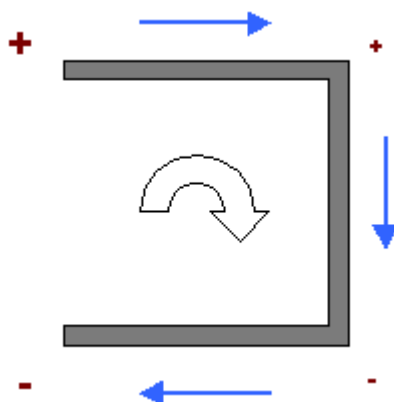
Du fait de la torsion du bâtiment, chaque plancher d'étage subit une rotation dans le plan horizontal, qui provoque la mise en flexion des murs (particulièrement des murs périphériques) autour de la zone centrale du bâtiment :



Ce mécanisme de flexion « antagoniste » des murs, accompagnant la torsion d'ensemble, fournit **la plus grosse part de la résistance à la torsion** des bâtiments courants.

Certains murs apportent en complément une résistance propre à la torsion

C'est le cas par exemple de la cage d'escalier en U du bâtiment précédent :



Lorsque ce mur est soumis à une torsion, ses panneaux constitutifs fléchissent (flèches bleues) : le mur oppose ainsi une résistance propre à la torsion, due à la flexion antagoniste de ses panneaux constitutifs.

Cette résistance propre à la torsion est renforcée par le fait que les panneaux du mur sont liaisonnés entre eux à leurs extrémités : ils s'appuient les uns sur les autres dans leur mouvement de flexion.

Ces murs fonctionnent en « torsion gauchie »

Cette flexion antagoniste des panneaux entraîne une dénivellation verticale des points du mur, vers le haut pour certains points (notés + dans le schéma précédent), vers le bas pour les autres (notés -) : les sections transversales du mur ne restent pas planes, dans leur mouvement de torsion, elles se gauchissent.

C'est pourquoi ce mode de torsion est dénommé **torsion gauchie**.

Il ne concerne que certains murs ayant une section transversale composée d'un assemblage de panneaux non rayonnants (par exemple murs en U, en E, en F, en H, en M, en U, en Z).

On peut vérifier que les murs plans ou composés de panneaux rayonnants (murs en L, en K, en T, en X, en Y) ne peuvent pas fonctionner en torsion gauchie et n'apportent donc aucune contribution individuelle à la résistance globale à la torsion d'un bâtiment.

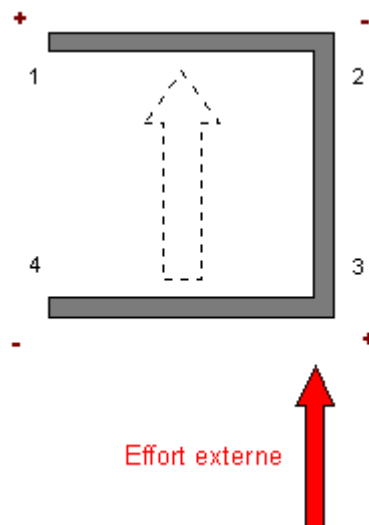
2. Centres de torsion des murs

Centre de torsion d'un mur : approche intuitive

Considérons un mur en forme de U, encastré en pied, libre en tête, non liaisonné à d'autres murs.

Supposons de plus que ce mur a une section transversale constante sur toute sa hauteur.

Appliquons un effort externe horizontal (flèche rouge) dans l'axe du panneau de fond :

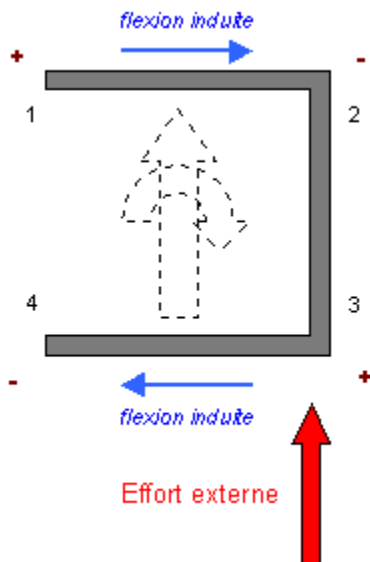


Le mur amorce une flexion d'ensemble dans la direction de l'effort appliqué (flèche pointillée), entraînant le panneau de fond dans ce mouvement : le point 3 monte, le point 2 descend.

Le mur étant libre de ses mouvements, la montée du point 3 provoque la descente du point 4.

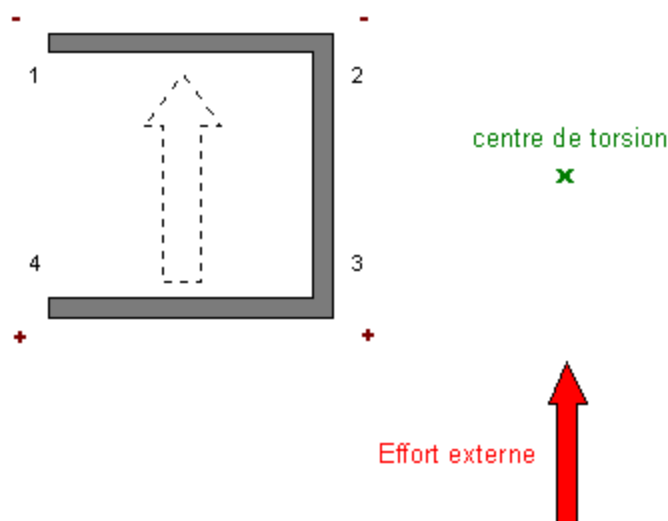
De même, la descente du point 2 entraîne la montée du point 1.

Ces déformations subies par les panneaux latéraux du mur entraînent leur flexion dans le sens des flèches bleues : Le mur pivote selon le sens de la flèche centrale.



Si on excentre vers la droite le point d'application de l'effort externe (flèche rouge), on exerce sur le mur un effet de torsion opposé à celui qui vient d'être décrit.

On peut démontrer mathématiquement que ces deux effets de torsion s'annulent lorsque l'effort externe passe par un point bien précis dénommé **centre de torsion** :



NB : on utilise aussi l'expression **centre de flexion** comme **synonyme de centre de torsion**.

Quelques remarques pratiques sur la position des centres de torsion

- On peut calculer la position du centre de torsion de n'importe quelle section transversale de mur composées de panneaux (ÉPICENTRE le fait pour vous !).
- Dans certains cas, le centre de flexion est extérieur à la section du mur (murs en U par exemple).
- Le centre de torsion d'un mur composé de panneaux rayonnants (K, L, T, X, Y) est situé à l'intersection des panneaux.
- Le centre de torsion d'une section de mur est la plupart du temps distinct de son centre de gravité (une famille d'exceptions : les sections symétriques, parmi lesquelles les sections composées d'un panneau unique).
- La notion de centre de torsion est largement utilisée en charpente métallique (pour les profilés en U, Z, T, L, etc.).

3. Torsion et flexion des murs

Rappel de la signification mécanique des centres de torsion

Considérons un mur encastré en pied, libre en tête, non liaisonné à d'autres murs et de section constante :

- un effort horizontal externe appliqué à un certain niveau au droit du centre de torsion ne provoquera pas de torsion, mais seulement une flexion d'ensemble du mur.
- un couple de torsion d'axe vertical appliqué à un certain niveau au droit du centre de torsion provoquera seulement la torsion du mur (autour de la ligne verticale des centre de torsion), sans flexion.

Attention : ceci n'est plus vrai si la section transversale change sur la hauteur du mur : par exemple, si une portion en L surmonte une portion en U et qu'on applique un effort horizontal sur un point de l'arête du L (le centre de torsion est là), le mur présentera une torsion, due à la torsion de la partie inférieure en U, réagissant à l'excentrement de l'effort par rapport à son propre centre de torsion.

Résistance à la torsion d'un mur : contraintes induites, inertie sectorielle

Nous avons vu précédemment que la résistance en torsion gauchie d'un mur est due à la mise en flexion « antagoniste » de ses panneaux constitutifs.

L'action résistante d'un mur en torsion gauchie va donc se traduire par l'apparition de **contraintes normales** dans la section du mur.

Il est possible de décrire par des équations le fonctionnement en torsion gauchie d'un mur : la grandeur qui intervient dans ces équations pour caractériser la résistance du mur en torsion-gauchie s'appelle l'**inertie sectorielle** (elle est un peu l'équivalent du moment d'inertie d'une section travaillant en flexion).

ÉPICENTRE calcule les inerties sectorielles des murs et les utilise ensuite dans l'analyse statique ou dynamique des murs, en particulier pour calculer les contraintes normales générées dans les murs par la torsion du bâtiment.

Fonctionnement d'un mur en flexion-torsion

Continuons à considérer un mur encastré en pied, libre en tête, non liaisonné à d'autres murs et de section constante. Ce mur possède :

- une ligne des centres de torsion (verticale).
- une ligne des centres de gravité (verticale et généralement distincte de la précédente).
- deux directions principales d'inertie (horizontales et perpendiculaires)
- deux inerties principales de flexion, selon ces deux directions
- une inertie sectorielle de torsion

Appliquons un effort horizontal F en un point du mur, excentré de d par rapport au centre de torsion : il est équivalent de transporter F au centre de torsion en appliquant un couple $F.d$ pour compenser ce transport.

Le mouvement du mur soumis à F peut se décomposer en :

- un mouvement de torsion, autour de la ligne des centres de torsion (du au couple $F.d$)
- un mouvement de flexion, appliqué au droit de la ligne des centres de torsion, et décomposable selon les deux directions principales (du à l'action de F).

Considérons une section transversale du mur, à une hauteur donnée.

Son déplacement horizontal d'ensemble peut se décomposer en :

- une translation (due à la flexion de l'axe des centres de torsion, sous l'action de F)
- une rotation autour du centre de torsion (due à l'action du couple $F.d$)

Le déplacement vertical des points de la section sera la superposition de :

- l'inclinaison de la section **autour du centre de gravité**, du à la flexion
- le gauchissement dû à la torsion

Aspects pratiques

On voit donc que **la ligne des centres de torsion joue un rôle très important pour l'analyse du comportement d'un mur**.

En fait, dans un bâtiment contreventé par des murs, un mur donné est « perçu » par ses voisins comme s'il était situé au droit de la ligne de ses centres de torsion (et non pas au droit de la ligne des centres de gravité).

Il est utile d'avoir ce point en tête lorsqu'on analyse un système de murs, certains d'entre eux pouvant avoir leur centre de torsion complètement en dehors de leur section.

NB : ÉPICENTRE vous permet d'afficher les plans d'étage en faisant figurer les centres de torsion et les inerties principales des murs et de l'étage complet.

4. Torsion et flexion des bâtiments

Comportement d'un bâtiment très régulier

Considérons un bâtiment très simple, contreventé par un ensemble de murs réguliers (pas de changement de section), sans linteaux.

On peut montrer que ce système de murs réguliers travaillant conjointement du fait des planchers se comporte, en flexion et en torsion, exactement comme un mur unique :

- avec une ligne des centres de torsion
- avec des directions principales de flexion,
- avec une inertie sectorielle (résistance à la torsion)

La plupart des remarques faites précédemment à propos du comportement en flexion-torsion des murs isolés peuvent donc être appliquées à de tels bâtiments.

Comportement des bâtiments courants

Les bâtiments courants ne sont pas réguliers ! Les murs changent de section, ils sont reliés par des linteaux, etc.

Le comportement des bâtiments courants, soumis à des actions de vent ou des séismes, est complexe, mais les notions vues précédemment continuent à être utiles pour comprendre leur fonctionnement, surtout si on s'attache à analyser la torsion d'ensemble comme une flexion antagoniste des murs du bâtiments (voir la section précédente sur l'analyse des mécanismes de fonctionnement).

Importance des centres de torsion en calcul sismique

Nous verrons que le calcul sismique simule les séismes réels en appliquant des forces d'inertie au droit des centres de gravité de chacun des planchers d'étages.

C'est l'excentrement de ces forces d'inertie par rapport aux centres de torsion des étages qui va générer des mouvements de torsion dans le bâtiment.

5. Action résistante des linteaux internes à un mur gauchi

Les linteaux internes à un mur résistant à la torsion

Un linteau interne à un murs relie deux bords de ce mur (exemple : les linteaux d'une cage d'ascenseur en U).

La torsion du bâtiment provoque le gauchissement de la section du mur au droit du linteau, ce qui entraîne un déplacement vertical relatif des points d'encastrement : le linteau est donc déformé (exactement comme si il reliait deux murs voisins).

L'action résistante qui en résulte est prise en compte par ÉPICENTRE.

Notons que les linteaux internes à un mur ne génèrent pas d'effort axial dans ce mur : les efforts ascendants et descendants appliqués sur le mur par le linteau s'annulent.