POLYTECH ANGERS

Rapport de Projet Tutoré - PeiP2

Renforcement sismique des murs en maçonnerie

Par:

Valentine Loeul Nathan Colliou Louise Garnier Encadré par : Mme. Chahine

2021 - 2022







Table des matières

1	2Av	ant-propos	3
2	Ren	nerciements	3
3	Intr	oduction au sujet	4
	3.1	La maçonnerie	4
	3.2	Les domaines d'application	5
	3.3	Séisme	5
	3.4	Les murs porteurs	6
4	Con	aportement d'un mur face aux séismes	7
	4.1	Résistance et ductilité des matériaux	7
	4.2	Loi de comportement	8
	4.3	Actions exercées sur la structure	9
	4.4	Energies exercées sur la structure	11
	4.5	Conséquences des séismes	12
5	Rés	istance mécanique d'un mur porteur	15
•	5.1	Introduction	15
	5.2	Contraintes	15
	5.3	Forces et modes de déformation général	17
	5.4	Actions permanentes	20
	5.5	Actions variables	23
	5.6	Combinaison de charges	$\frac{25}{25}$
	5.7	La descente de charges	26
	5.8	Réglementations de construction face aux risques sismiques	28
	5.9	Conséquences d'une résistance parasismique	34
	0.5	Consequences a une resistance parasismique	01
6	Diff	érentes solutions de renforcement pour un mur porteur	35
	6.1	Modification des contreventements	36
	6.2	Chemisage en béton armé des murs	37
	6.3	Chaînage horizontal et vertical	38
	6.4	Injection de résine (Wall restoring)	40
	6.5	Polymères Renforcés de Fibres (PRF)	41
	6.6	Autres méthodes	43
7	App	proche expérimentale	45
	7.1	Choix de la méthode	45
	7.2	Modélisation Revit	47
	7.3	Dimensionnement et réalisation de la maison	47
	7.4	Etude des actions appliquées	49
	7.5	Calcul des charges permanentes et d'exploitation	49
	7.6	Combinaisons de charges	52

8	Problèmes rencontrés et organisation du temps de travail	57
9	Conclusion	59
10	Résumé	61
11	Bibliographie	63





1 Avant-propos

Ce rapport est le résultat de cinq mois de recherches, dans le cadre de notre projet tutoré de deuxième année de cycle préparatoire intégré à l'école d'ingénieur Polytech Angers.

Ce projet a pour but d'étudier les différents types de renforcement qui existent, de manière à ce que les murs en maçonneries soient résistants aux effets sismiques.

Le choix du sujet est dû à notre intérêt au milieu du génie civil, et nous souhaitons tous les trois nous orienter dans ce domaine l'année prochaine.

Ce rapport a ainsi pour objectif de mettre en évidence la méthode de renforcement la plus adéquate et la plus performante, puis de modéliser ce mur renforcé à l'aide du logiciel Revit. C'est pourquoi nous pouvons dégager la problématique suivante : quelle méthode de renforcement est la plus adéquate de manière à ce que le mur en maçonneries soit résistant face aux tremblements de terre? Ce rapport combine un travail théorique, mais aussi un travail expérimental. En effet, nous avons dû réaliser des maquettes sur le logiciel Revit.

Le rassemblement d'informations n'a pas été des plus simples, car nous avons rencontré de nombreuses difficultés dans la compréhension des concepts complexes, des termes techniques mais aussi dans l'utilisation du logiciel Revit.

2 Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre tutrice de projet, Mme. Stéphanie Chahine, pour son aide, ses conseils et ses directives, ayant permis le bon déroulement de celui-ci.

Nous voudrions aussi remercier M. Lagrange, pour la mise en place de ces projets de deuxième année, et notamment pour la bonne et complexe répartition des sujets ainsi que l'accès au blog.

Pour finir, nous désirons également adresser nos profonds remerciements aux responsables et au personnel de l'école Polytech Angers, qui nous ont fourni les outils nécessaires au bon déroulement de ce projet de deuxième année.





3 Introduction au sujet

3.1 La maçonnerie



FIGURE 1 – Maçonnerie

La maçonnerie est une technique de construction d'assemblage de matériaux, effectuée par les maçons. En France, la maçonnerie traditionnelle est appelée limousinage. Elle est au cœur de l'ouvrage.

Par exemple, les blocs de béton, les parpaings, les briques, le béton banché et les pierres naturelles unies par un liant comme le mortier, le ciment ou le plâtre, font partie de la maçonnerie.

Tous les matériaux utilisés dans l'élaboration d'un mur sont anisotropes, ce qui signifie qu'ils possèdent des caractéristiques différentes selon la direction des sollicitations. La maçonnerie nécessite peu de moyens de manutention sur les chantiers. Elle est applicable pour toutes les tailles d'entreprise.

La maçonnerie permet une prise en charge satisfaisante des charges et des sollicitations. De plus, elle permet une bonne isolation phonique. La maçonnerie regroupe aussi l'habillage, c'est-à-dire par exemple la pose d'enduit ou de carrelages. Ceux-ci permettent la tenue de l'ensemble face aux agressions externes, comme l'humidité, le gel, ou encore les effets sismiques. L'emploi de matériaux de maçonnerie permet d'augmenter la masse thermique d'une structure. De plus, ils n'exigent pas d'être peints et peuvent fournir une structure ayant un coût de cycle de vie réduit.

Les constructions réalisées en maçonnerie sont constituées de différents matériaux :

- Les éléments corps : matériaux minéraux (pierre, brique, bloc de béton), matériaux organiques (terre, pisé) et matériaux végétaux (paille, tourbe).
- Les liants : matériaux servant à réaliser un mortier (chaux, ciment, plâtre).
- Le mortier : matériau constitué soit de chaux, de sable (ou terre) et d'eau, ou soit de ciment, de sable et d'eau.

Les maçonneries constituent un ensemble très divers en Europe et il est difficile de trouver une formule unique qui puisse représenter valablement la relation entre la résistance du matériau composite qu'est la maçonnerie et la résistance des matériaux élémentaires constitutifs.



3.2 Les domaines d'application



FIGURE 2 – Les domaines d'application

La maçonnerie est très présente dans le milieu de la construction. Ainsi, les domaines d'application sont très variés : de la maison individuelle aux ouvrages complexes et techniques comme les ouvrages d'art, au génie civil ou encore aux silos de stockage.

En effet, la maçonnerie est présente dans tous les domaines liés à l'élaboration et la construction d'un bâtiment. Dans le cadre d'une maison individuelle, la maçonnerie est présente du sol (dalles en béton) au plafond, mais aussi dans l'aménagement des planchers, des terrasses, ou encore des piscines.

Le génie civil est un secteur très vaste : il englobe les travaux publics mais aussi le bâtiment. Il comprend notamment le gros œuvre et fondations des bâtiments, l'ossature porteuse de construction industrielle, la canalisation et le réservoir.

Ensuite, les ouvrages d'art désignent les constructions de grande importance entraînées par l'établissement d'une voie de communication (route, voie ferrée, canal, etc.) : soit un dispositif de protection contre l'action de la terre ou de l'eau, soit un dispositif de retenue des eaux (digue, barrage).

3.3 Séisme

Un séisme, aussi appelé tremblement de terre, se traduit par des vibrations du sol en surface, dû à la fracturation des roches en profondeur. Celle-ci est elle-même due à la libération d'une grande accumulation d'énergie, ainsi qu'à la création de failles, au moment où le seuil de rupture mécanique des roches est atteint.

Plusieurs grandes plaques constituent la croûte terrestre et évoluent en fonction des autres : elles s'écartent, convergent, ou coulissent. C'est aux limites de ces plaques qu'environ 90~% des séismes ont lieu.

Au contraire, en profondeur, les plaques tectoniques se déplacent seulement de quelques millimètres ou centimètres par an. Dans la partie supérieure de la croûte terrestre (c'est-à-dire les 30 premiers kilomètres), le mouvement de ces plaques n'est pas continu. Les failles peuvent rester bloquées pendant de longues périodes de temps, pendant que le mouvement régulier des plaques (convergence ou divergence) continue. Le séisme se manifeste par des mouvements verticaux et horizontaux, un va-et-vient qu'il transmet aux bâtiments (forces alternées dans toutes les directions).





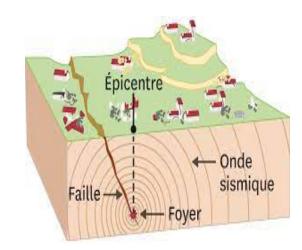


Figure 3 – Séisme

FIGURE 4 – Schéma séisme

Pour mesurer la force des séismes, deux paramètres sont utilisés : la magnitude et l'intensité. Un séisme est associé à une seule magnitude et à une gamme de valeurs d'intensité.

- La magnitude caractérise l'énergie libérée par la rupture de faille à l'origine des secousses
- L'intensité est liée à l'effet des secousses à un endroit donné (par exemple : ressenti des habitants, chute d'objets, dégâts, etc.)

3.4 Les murs porteurs

Tout d'abord, on entend par "mur" un ouvrage vertical en béton ou en maçonneries. Les murs ou voiles sont des éléments structuraux sollicités avec une épaisseur faible par rapport aux autres éléments des bâtiments.



Figure 5 – Mur porteur 1

On peut distinguer plusieurs types de murs, comme les poutres cloisons (liteaux), les murs de contreventement, ou encore les voiles périphériques par exemple.

Dans le cadre de notre projet, nous nous intéressont aux murs porteurs. Les murs porteurs sont sollicités par les efforts normaux qui découlent de la descente de charge, ce type de mur peut être dimensionné et conçu comme un poteau.

Ainsi, le mur porteur a pour rôle d'assurer la solidité d'un ouvrage. Il a plusieurs fonctions comme supporter les murs et les planchers des étages au-dessus du premier niveau d'un logement, ou encore éviter la déformation d'une habitation par l'effet de la poussée





horizontale et porter la toiture.

Ensuite, les murs et parois, en particulier ceux réalisés en maçonnerie, doivent répondre à de nombreuses fonctions telles que :



FIGURE 6 – Mur porteur 2

- La résistance aux différentes charges permanentes et variables.
- La stabilité mécanique sous les sollicitations normales : les murs subissent des charges appliquées ou des déformations imposées par de nombreux facteurs, comme les phénomènes thermiques ou climatiques.
- La sécurité en cas de phénomène sismique, lors d'incendie ou encore d'autres sollicitations exceptionnelles.
- L'étanchéité aux intempéries (pluie, neige, tempête, etc.).
- Les exigences acoustiques.
- Les aspects esthétiques extérieurs et/ou intérieurs.

4 Comportement d'un mur face aux séismes

4.1 Résistance et ductilité des matériaux

Pour la construction d'un bâtiment qui doit résister aux ondes sismiques, le choix des matériaux est important. Il faut être vigilant sur les propriétés des matériaux. En effet, on observe que certains matériaux ont une très bonne ductilité sur un cycle, mais leur résistance se dégrade très rapidement.

La ductilité est une propriété qui décrit la capacité des matériaux à résister plus ou moins à l'étirement. Un matériau ne possédant pas cette capacité est dit fragile. La déformation liée à la ductilité est une propriété essentielle pour les matériaux de construction. Pour déterminer la ductilité, on effectue 2 mesures principales : les essais de traction qui mesurent l'allongement avant la rupture et les essais monton de Charpy, qui mesurent l'énergie dépensée jusqu'à la rupture.

Pour la construction d'un bâtiment qui doit résister aux ondes sismiques, le choix des matériaux est important. Il faut être vigilant sur les propriétés des matériaux. En effet, on observe que certains matériaux ont une très bonne ductilité sur un cycle, mais leur résistance se dégrade très rapidement.



Les matériaux employés dans la construction d'un bâtiment sont divers, donc la ductilité d'un bâtiment n'est pas la même. Lors d'un séisme, tous les éléments sont soumis à une force identique mais chaque partie ne se déforme pas de la même manière. Chaque élément ne peut supporter qu'une seule force limite fixée selon les propriétés du matériau et les caractéristiques de l'élément soumis aux pressions. Au-delà de cette force limitée, les déformations cessent d'être élastiques (limite d'élasticité). Lors d'un séisme, la force des ondes dépasse cette limite. Les dommages causés par la déformation plastique sont permanents.

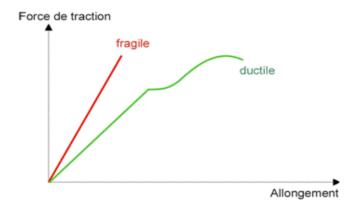


FIGURE 7 – Fonction d'un mur porteur

Les structures en maçonnerie ont une faible ductilité car elles s'effondrent rapidement à partir d'un certain effort. Elles ne supportent pas les cisaillements mais résistent bien à la traction. Ce type de matériau peut rapidement devenir "plastique", c'est-à-dire présenter une déformation permanente.

4.2 Loi de comportement

En sciences des matériaux, la loi de comportement étudie et modélise les comportements des solides et des fluides soumis à des contraintes de déformation. On distingue 3 modèles de déformations pouvant s'appliquer à un mur : Déformation élastique, plastique et fluage/relaxation de contraintes. Ces trois phénomènes sont étroitement liés.

Tout d'abord, le cas le plus simple est celui de la déformation élastique : le matériau revient à son état initial lorsque l'on met fin aux contraintes qui le déforment.

La déformation est proportionnelle à la force appliquée :

$$F = K\Delta l \tag{1}$$

Cette déformation suit la loi de Hooke ci-dessous :

$$\sigma = E\varepsilon \tag{2}$$

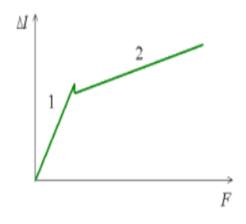
avec :





- σ , la contrainte en Pascals;
- E, le module d'Young (propre à chaque matière) en Pascals;
- et ϵ , l'allongement relatif.

Ensuite, la déformation plastique est une déformation définitive du matériau sans rupture de celui-ci. La déformation plastique s'applique dès que la résistance élastique est dépassée. On peut la modéliser comme un frottement solide : ainsi, elle correspond à l'ajout d'une force constante lors du "glissement".



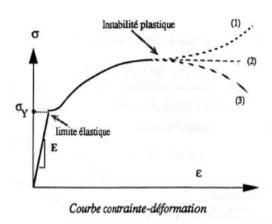


FIGURE 8 – Graphe loi de Hooke

FIGURE 9 – Graphe contrainte-déformation

4.3 Actions exercées sur la structure

Sous l'effet d'un séisme, les bâtiments peuvent se déformer, se dégrader ou encore se casser jusqu'à la destruction.

Pour faire face à cela, il faut prévoir les déformations des constructions sous des secousses et maîtriser l'importance des déformations. De plus, la résistance des matériaux utilisés doit répondre aux sollicitations d'origine sismique. En effet, les structures absorbent et dissipent l'énergie qui leur est transmise lors du séisme. La structure du bâtiment va osciller : une partie de celle-ci va se retrouver en compression, et l'autre va se retrouver en traction, pendant que les forces d'inertie maintiennent la structure à leur position d'origine. C'est pourquoi les bâtiments se déforment, s'endommagent et peuvent s'effondrer.

Tant que les matériaux ne reçoivent que les charges verticales liées à la descente de charge et liées aux charges permanentes et variables, ils peuvent présenter certains défauts qui restent cachés. Mais lors d'un phénomène sismique, ces défauts sont les causes de dégradations accélérées : ces désagrégations se propagent parfois jusqu'à la ruine. On peut prendre comme exemple le béton armé qui peut se dégrader rapidement lors d'un séisme, faute de la cohésion du béton et des armatures.



Les bâtiments réagissent de plusieurs manières aux séismes. On peut observer ces différences grâce aux différents types de ruines sur un même type de structure.





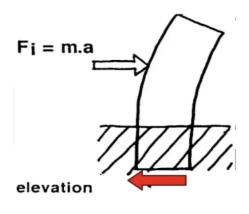




Figure 10 – Comportement des murs

Lors de la propagation des secousses, les bâtiments subissent des déformations de leurs éléments de construction selon leur forme, leur masse (force d'inertie), leurs matériaux, et la nature des liaisons entre les éléments. Les séismes génèrent des forces alternées dans toutes les directions, ce qui provoque des déformations aléatoires.

Tout d'abord, la masse d'un bâtiment soumis aux accélérations désordonnées du sol tend à rester là où elle se trouve au début de chaque accélération. La force qui retient le bâtiment au sol est la force d'inertie : plus la masse du bâtiment est grande, plus elle est élevée. Ce comportement entraîne le retard du haut du bâtiment sur les fondations : ce retard est d'autant plus important que la force d'inertie est élevée. Ce comportement provoque des déformations sur les fondations du bâtiment.



(Accélération du sol)

FIGURE 11 – Comportement des murs face à l'accélaration du sol



Ensuite, lors d'un séisme, les fondations d'une structure sous soumises à la force des ondes. Lorsque leur amplitude est maximale, elles entrent en contact avec les fondations. Quand un objet rencontre une force dont la fréquence est identique à la sienne, son amplitude est maximale : on dit alors que le bâtiment entre en résonance.

La force provoquée par les ondes se répercute sur la structure du bâtiment. Si le bâtiment est trop rigide, il va bouger de la même façon que le sol.

Ce phénomène est lié à la deuxième loi de Newton suivante :

$$F = masse * accélération$$
 (3)

Par ailleurs, si le bâtiment est trop flexible et souple, la fondation va subir des déformations : il s'agit donc de construire un bâtiment dont la structure est souple et résistante à la fois. Les éléments comme la période de vibration, la déformation, la résistance et la capacité à absorber l'énergie sismique définissent la réponse du bâtiment aux mouvements du sol.

4.4 Energies exercées sur la structure

Étude des forces exercées sur un bâtiment lors d'un séisme

Les structures des bâtiments sont soumises à 4 énergies :

- E, l'énergie exercée sur le bâtiment par le séisme;
- Es, l'énergie temporairement stockée;
- Ed, l'énergie dissipée;
- et Ec, l'énergie cinétique.

Lors du mouvement produit par les secousses, on a :

$$E = Es + Ed + Ec \tag{4}$$

Cependant, lorsque le bâtiment est à sa position initiale, Ep = 0 et Ed = 0, donc E = Ec. En effet, la structure n'est pas déformée, mais la vitesse est maximale car Ec est à son maximum. De plus, lorsque les oscillations du bâtiment atteignent leur amplitude maximum, Ec = 0 puisque le bâtiment va répartir Ec dans l'autre sens, donc E = Es + Ed.

De plus, on peut noter que l'énergie cinétique seule ne peut pas détruire un bâtiment, contrairement à l'énergie stockée et dissipée. Ainsi, le moment le plus dangereux pour une structure est lorsque l'oscillation atteint son amplitude maximum : on a alors E=Es+Ed. Pour réduire les risques, il faut donc réduire l'énergie stockée, car si elle est supérieure à la capacité maximale de stockage du bâtiment, la structure perd son équilibre et certains éléments se détruisent.



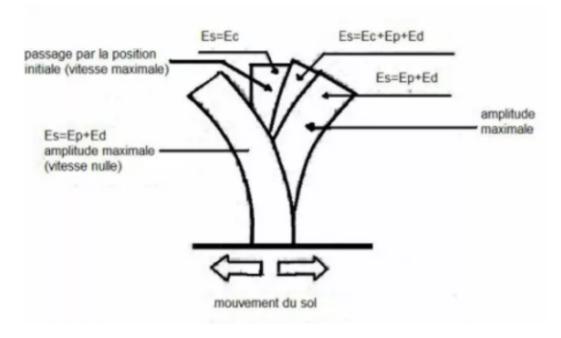


FIGURE 12 – Schéma des énergies liées à la déformation d'un mur

4.5 Conséquences des séismes

La réaction des bâtiments lors d'un séisme est différente pour chaque structure. Les principales conséquences sont les suivantes :

- Les éléments porteurs (poutres, murs) subissent plus d'énergie que les autres éléments : ils font le lien avec les autres éléments qui n'ont pas la même vitesse qu'eux. Si ces éléments tombent, le bâtiment s'effondre.
- Les éléments fragiles comme les fenêtres ou d'autres types d'ouverture sont exposés aux conséquences des secousses. Lorsque le mouvement des ondes entraîne les murs dans des directions opposées à l'horizontale, cela crée des fissures en croix à 45° qui partent des angles des ouvertures.

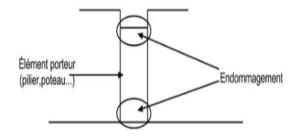


FIGURE 13 – Schéma du comportement des éléments porteurs

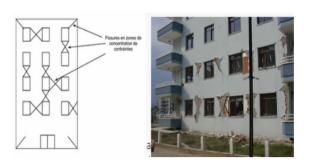


FIGURE 14 – Schéma du comportement des ouvertures







FIGURE 15 – Conséquences d'un séisme La destruction d'un bâtiment est provoquée parfois par la différence de rigidité des éléments entre les différents étages. De plus, on retire parfois des éléments porteurs, en général au rez-de-chaussée pour augmenter l'espace.

Ce phénomène favorise les déformations, puisque le rez-de-chaussée est souvent la première partie, et cause en général l'effondrement du bâtiment entier.

Phénomènes de rupture les plus courants

On distingue 3 phénomènes fréquents qui causent la rupture d'un mur, énumérés cidessous :

— Les malfaçons de construction

Les murs en blocs de maçonneries peuvent se fissurer très rapidement après leur assemblage, à cause du retrait différentiel. En effet, le mortier qui lie les différents blocs perd son eau en séchant et se rétracte, tandis que les blocs gardent leurs dimensions. Le mur peut aussi se fissurer à cause de l'hétérogénéité des matériaux face à l'humidité et la chaleur. Ainsi leurs réactions physiques sont différentes, ce qui peut entraîner des fissures au niveau des jonctions.

Les forces appliquées aux poutres-hourdis (planchers) entraînent une flexion de ces dernières en leurs milieux, entraînant la formation de fissures horizontales sur les murs.

— Les mouvements de terrain

Les glissements de terrain sont bien évidemment propices à la formation de fissures sur les murs. La nature du sol sur lequel le mur a été construit a aussi un impact. Zones argileuses, remblais et zones inondables sont plus propices aux mouvements de terrains. Ces phénomènes sont accentués par les changements climatiques (sécheresse, fortes intempéries, etc.).

L'infiltration d'eau

Ce phénomène est dû à un défaut de perméabilité de la toiture ou de la façade. L'alternance des périodes de gel et de dégel détériore les éléments de la maçonnerie, et entraîne des fissures à moyen terme.



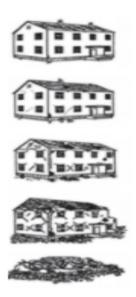






FIGURE 17 – Mouvement de terrain

Les dégâts causés par un séisme peuvent être divisés en 5 degrés :



- 1 : Des dégâts légers, aucun dégâts liés au bâtiment en lui-même, quelques dommages sur les objets extérieurs.
- 2 : Des dégâts modérés, certains dommages du bâtiment et des dégâts plus importants sur les objets extérieurs.
- 3 : Des dégâts importants, dégâts structuraux modérés et des important dommages non structuraux (fissures importantes, cloisons séparées des murs)
- 4 : Des dégâts très importants, défauts sérieux des murs, et défauts partiels du toit et du sol.
- 5 : Effondrement total ou presque du bâtiment.



5 Résistance mécanique d'un mur porteur

5.1 Introduction

Durant un séisme, les ondes sismiques produites entraînent des forces latérales au sol, qui engendrent une déformation de la structure du bâtiment. Ces forces peuvent abîmer, déformer, voire briser les éléments porteurs d'un bâtiment. Pour résister au séisme, les matériaux utilisés lors de la construction doivent avoir des capacités de déformation et des capacités élastiques ou d'étirement. Cette dernière capacité est appelée la "ductilité" pour les matériaux. Le choix des matériaux des murs porteurs est donc un facteur considérable à prendre en compte.

Les murs en maçonnerie, et plus précisément les murs porteurs, sont des ouvrages verticaux. La descente des charges appliquées sur ceux-ci engendrent des efforts normaux quasi centrés. Des contraintes normales de compression en résultent. Ces murs sont composés d'éléments de petites dimensions, montés en lits horizontaux et à joints croisés, liés entre eux par joints de mortier, par collage ou encore par emboîtement. L'imbrication des différentes pièces le constituant permet la cohésion du mur. Elle nécessite aussi un décalage des joints d'une assise sur l'autre. Lors du calcul des efforts sur un mur, on se limite aux forces verticales qui résultent de la pesanteur (charges permanentes, charges d'exploitation, ou encore charge de neige) et aux forces horizontales résultant du vent (non étudié dans ce projet).

Ainsi, la résistance de la maçonnerie est appréciée sous les sollicitations verticales appliquées au mur. En effet, elle est considérée comme une fonction directe de la résistance des éléments de maçonnerie. Ces dernières sont caractérisées par leur valeur normalisée. Les éléments sont définis par leur valeur de résistance. Elle est représentée par la contrainte admissible, égale au coefficient global de réduction N (spécifique pour chaque famille d'élément), divisé par la valeur normalisée de la résistance de l'élément de maçonnerie utilisé.

Les murs ont un rôle de portance ou de contreventement, mais ils assurent aussi le confort et la sécurité des personnes et des biens. C'est pour cela que la résistance d'un mur est une caractéristique indispensable, d'autant plus dans les zones à haut risque sismique. Un mur en béton peut être considéré comme un élément voile lorsque sa longueur est au moins égale à 4 fois son épaisseur. Dans le cas contraire, l'élément structural est classé comme un poteau.

5.2 Contraintes

En présence de contrainte sismique, les bâtiments sont soumis à un effort tranchant dans le plan du mur. La résistance au cisaillement d'un mur est liée à l'existence d'un effort normal suffisamment grand pour empêcher l'apparition de contraintes de traction.

Les maçonneries ne doivent subir que des compressions. L'épaisseur des blocs à utiliser et leur classe de résistance dépendent :



- du type de maçonnerie;
- de ses dimensions;
- et des sollicitations mécaniques (descente de charge).

On calcule la contrainte réelle dans le mur que l'on compare à la contrainte admissible.

La contrainte dans le mur se réparti de manière uniforme. La contrainte normale réelle de compression en partie courante d'un mur en maçonneries, est égale à la charge Nu (obtenue grâce une descente des charges), divisée par la surface horizontale S du mur chargé par Nu (avec S = épaisseur du mur e * longueur du mur l). Pour une charge uniformément répartie, cette contrainte normale réelle à mi-hauteur du mur doit être inférieure ou égale à la contrainte normale admissible à la compression C, c'est-à-dire :

$$\frac{Nu}{S} < C$$

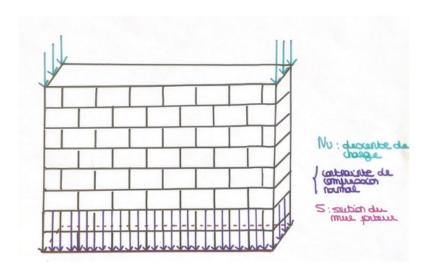


FIGURE 18 – Schéma des contraintes appliquées sur un mur

La stabilité mécanique dépend :

— de l'élancement L, limité à 20 pour les murs porteurs et à 30 pour les cloisons et les murs de remplissage :

$$L = \frac{H}{e}$$

avec H, la hauteur libre entre planchers; et e, l'épaisseur brute du mur.

— et de la nature du cas de charges appliquées au mur, centré (mur de refend) ou excentré (généralement, mur de façade sous plancher ou poutre avec appui ne se faisant pas sur toute l'épaisseur du mur). La contrainte normale admissible de compression est :

$$C = \frac{R}{N}$$

Afin d'éviter à la maçonnerie de travailler en traction, il faut que les poutres, dalles et linteaux prennent suffisamment appui sur le mur.



5.3 Forces et modes de déformation général

Lors de la conception d'un bâtiment, les personnes qui conçoivent les structures doivent tenir compte de toutes les forces qui agissent sur les éléments. Tout d'abord, on a les forces externes, qui sont les forces qui agissent de l'extérieur sur la structure. Les forces qui agissent entre deux parties à l'intérieur d'une structure sont à l'inverse appelées les forces internes. Ces forces deviennent des modes de déformation lorsqu'un séisme rentre en contact avec la structure du bâtiment. Ainsi les caractéristiques de chaque élément et leurs types de liaisons vont conditionner les modes de déformations en fonction des caractéristiques vibratoires du sol d'implantation.

La première force externe à agir sur la structure est la gravité : celle-ci agit vers le bas sur Terre. La gravité est une force qui agit sans contact. Ensuite, les autres forces externes qui agissent sur les bâtiments sont le vent, les tremblements de terre, le poids des personnes présentes dans le bâtiment. La structure du bâtiment est conçue pour que les forces externes ne le brise pas et ne le renverse pas. Les forces externes s'appliquent sur un point d'application situé sur un plan d'application. Un point d'application est l'endroit d'un objet où une force externe est appliquée ou concentrée, et son plan d'application est la surface plane imaginaire traversée par la force appliquée.

Ensuite, les forces internes agissent entre différentes parties d'une même structure. Il existe quatre types de forces internes différentes : la tension, la compression, la torsion et le cisaillement, expliquées ci-dessous :

- La tension : force interne qui provient d'une force externe (par exemple, lorsque l'on tire sur un élastique, la force des doigts sur l'élastique est une force externe et cette force produit une force interne nommée la tension).
- La compression: force interne qui agit lorsqu'un objet subit une compression, autrement dit une force qui presse les particules de cet objet les unes contre les autres.
- La torsion : force interne qui agit sur des objets lorsqu'ils sont tordus. Elle se produit lorsque les deux extrémités d'un objet effectue une rotation dans des sens contraires.
- Le cisaillement : force interne qui agit lorsque des forces poussent ou tirent sur un même objet, mais dans des directions opposées. Les forces de cisaillement produisent généralement une flexion, un étirement ou une coupure de l'objet.





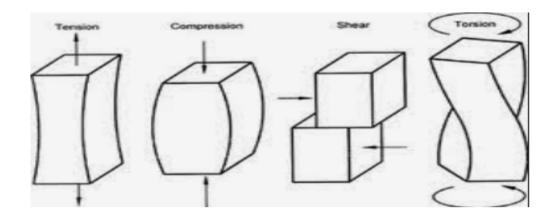


FIGURE 19 – Schéma des forces internes générales

Toutes ces forces apparaissent lorsqu'un bâtiment subit des charges et des forces provenant d'un séisme. Ces forces agissent différemment sur la structure et les fondations du bâtiment.

Méthode de calcul

A partir des ces forces internes, il existe une méthode de calcul nommée la méthode des forces latérales.

A partir de ces modes de déformation, une analyse peut être appliquée aux bâtiments. Cette méthode d'analyse se nomme la méthode des forces latérales, et nécessite de valider deux conditions : tout d'abord, abord, $T_1 <= Min(4*T_c)$, avec T_1 , la période de vib, ration et T_c la période lue sur les spectre de référence. Cette méthode consiste à calculer l'effort tranchant à la base du bâtiment, la distribution des efforts et les les effets de torsion.

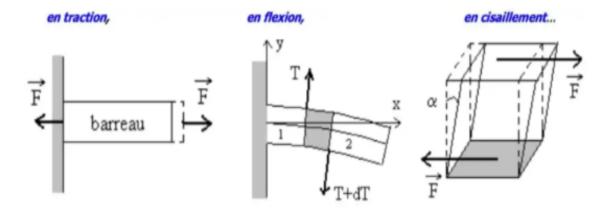


FIGURE 20 – Schéma des forces internes générales



Pour les efforts tranchants sismiques à la base, on cherche tout d'abord

$$F_b = S_d(T_1)m\lambda \tag{5}$$

avec $S_d(T_1)$ l'ordonnée du spectre de calcul pour la période T_1 , avec m, la masse totale du bâtiment au dessus des fondations, et λ , le coefficient de correction (0.85 si $T_1 \leq 2 * T_c$ ou que le bâtiment a plus de 2 étages, sinon 1).

Ensuite, pour calculer la distribution des forces sismiques horizontales, on calcule les forces horizontales F_i à tous les étages.

$$F_i = F_b \frac{s_i m_i}{\sigma s_j m_j} \tag{6}$$

avec F_i la force horizontale agissant à chaque niveau i, F_b l'effort tranchant à la base, s_i et s_j les déplacements des masses m_i et m_j dans le mode fondamental et m_i et m_j les masses des niveaux.

Distribution des moments

De plus, pour tenir compte des incertitudes sur la localisation des masses et la variation spatiale du mouvement sismique, on déplace le centre de gravité calculé de chaque plancher d'une excentricité additionnelle (plus ou moins $0.05 L_i$, avec L_i , la dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique). Les effets de torsion accidentels peuvent être déterminés comme l'enveloppe des effets résultants de la prise en compte de charges statiques en un mouvement de torsion vertical.

$$M_{ai} = e_{ai}F_i \tag{7}$$

avec F_i la force horizontale agissant au niveau i et e_{ai} l'excentricité accidentelle.

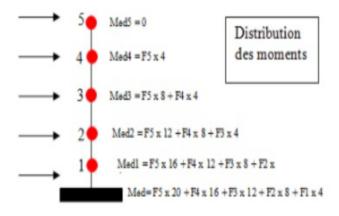


Figure 21 – Schéma de la distribution des moments



5.4 Actions permanentes

Les actions et les sollicitations dans les bâtiments sont soit directes comme les charges permanentes, d'exploitation, climatique et les actions sismiques, ou indirectes comme l'effet de la température et du déplacement d'appuis par exemple. Les sollicitations sont les efforts internes tels que la flexion, l'effort tranchant, ou encore l'effort normal induit dans la structure par les différentes actions. Ce calcul de force et de sollicitation est obligatoire pour le dimensionnement des structures. Ces calculs sont possibles grâce aux méthodes de calcul dérivés de la résistance des matériaux.

Les murs des bâtiments subissent des actions permanentes, qui ont pour symbole G. Les charges permanentes comprennent les poids des parties porteuses telles que les poutres et les poteaux, mais aussi le poids des parties non porteuses telles que les isolants et les revêtements. Généralement, la majeure partie de la charge permanente est le poids propre de la structure.

Le poids propre des éléments constituants la structure du bâtiment

Le poids propre de la structure prend en compte des éléments comme les murs, les poteaux, les poutres, ou encore les planchers. Mais il prend de plus, le poids des équipements fixes comme les revêtements de sols, des plafonds et des cloisons. Le calcul des charges permanentes se fait à partir du poids propre P en Newton.

Le poids propre comprend :

— le poids volumique en kN.m⁻³ donné pour les matériaux, en utilisant la formule suivante :

$$P = \gamma . V \tag{8}$$

avec V le volume de la paroi en m³.

— le poids surfacique en $kN.m_{-2}$ donné pour des épaisseurs définies, en utilisant la formule suivante :

$$P = \gamma S \tag{9}$$

avec S, la surface de la paroi en m².

— la masse volumique ρ du matériau en kg.m⁻³, en utilisant la formule suivante :

$$P = \rho V g \tag{10}$$

avec V, le volume de la paroi en m^3 et $g = 9.81 \text{ N.kg}^{-1}$.

— la densité d sans unité du matériau considéré, en utilisant la formule suivante :

$$P = d\rho_o v g \tag{11}$$

avec $\rho_o=1000~{\rm kg.m^{-3}}$ la masse volumique d'eau, v le volume de la paroi en m³, et g l'accélération de la pesanteur.



Poussée active "la terre pousse"



FIGURE 22 – Poussées de terre

Les poussées de terre

Ce phénomène est courant pour les murs de soutènement. Lors du dimensionnement d'un mur, il est indispensable de connaître la valeur de la composante latérale de la poussée des terres. La pression des terrains sur une paroi est proportionnelle à la profondeur. Le coefficient de poussées des terres varie en fonction de la qualité du terrain. Il varie en moyenne de 0.3 à 0.5 lorsque le terrain pousse sur une paroi; il s'agit alors d'une poussée active.

Les déplacements différentiels d'appuis

Ce phénomène survient lors d'un séisme. Les différents points à la surface terrestre ne subissent pas à un instant donné les mêmes effets de déplacement ou d'accélération. Pour une structure fondée sur le sol, ce phénomène se traduit par des déplacements différentiels entre les différents points de fondation de la structure.

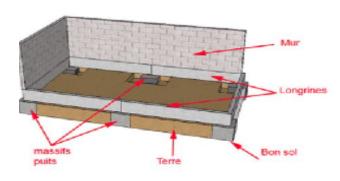


FIGURE 23 – Poussées de terre

Les effets induits par les déplacements horizontaux au niveau de la fondation doivent être évalués et pris en compte pour le dimensionnement parasismique de l'ouvrage.

Pour remédier aux effets de déplacements différentiels, les clauses précisent de mettre en place une disposition où les points de fondation disposés dans le même plan horizontal doivent être reliés entre eux par des longrines ou par un radier. Si les points ne sont pas reliés, il faut prendre en compte les effets de déplacement entre les points de fondation par une méthode de calcul.

Pour le traitement des déplacements relatifs, la méthode simplifié de calcul se distingue en deux ensembles : les ensemble A et B.



L'ensemble A : Tous les points de fondation se déplacent dans la même direction par rapport au point choisi arbitrairement comme point de référence. Le déplacement relatif d'un point de fondation i par rapport à un point fixe peut s'obtenir d'après la relation suivante :

$$d_i = \gamma_i \varepsilon_{gr} x_i \tag{12}$$

avec γ_i le coefficient d'importance du bâtiment, \mathbf{x}_i la distance entre le point de fondation i et le point de référence, et ϵ_{gr} le déplacement relatif donné par la formule suivante :

$$\epsilon_{gr} = 0.025 a_{gr} \frac{ST_c T_D}{L_g} \sqrt{2} \tag{13}$$

avec S le coefficient de sol, T_c et T_d deux périodes définissant le spectre de réponse, a_{gr} l'accélération maximum du sol dans la direction horizontale (définie réglementairement), L_g la distance au-delà de laquelle les mouvements du sol peuvent être considérés comme indépendant (définie par un tableau) ε_{gr} (donné par un tableau).

	Classe de sol	Α	В	С	D
	L _g (m)	600	500	400	300
	S	1,00	1,35	1,50	1,60
	T _C (s)	0,20	0,25	0,40	0,60
	T _D (s)	2,50	2,50	2,00	1,50
Zone 2 ($a_{gr} = 0.7 \text{ m/s}^2$)	ε _{gr} (mm/m)	0,021	0,042	0,074	0,119
Zone 3 ($a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$)	ε _{gr} (mm/m)	0,032	0,066	0,117	0,187
Zone 4 ($a_{gr} = 1,6 \text{ m/s}^2$)	ε _{gr} (mm/m)	0,047	0,095	0,170	0,272

	Classe de sol	Α	В	С	D	E
	L _g (m)	600	500	400	300	500
	S	1,00	1,20	1,15	1,35	1,40
	T _C (s)	0,20	0,50	0,60	0,80	0,50
	T _D (s)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Zone 5 ($a_{gr} = 3.0 \text{ m/s}^2$)	ε _{gr} (mm/m)	0,141	0,255	0,366	0,764	0,297

FIGURE 24 – Tableau valeur a_{qr} [1]

FIGURE 25 – Tableau valeur a_{gr} [2]

L'ensemble ${\bf B}$: le point de fondation étudié se déplace dans la direction opposée à celle des deux points adjacents. Le déplacement relatif d'un point de fondation i par rapport à sa position initiale s'obtient avec le calcul suivant :

$$d_i = \pm \frac{1}{4} \varepsilon_{gr} x_{mi} \tag{14}$$

avec \mathbf{x}_{mi} la moyenne des distances des poteaux adjacents pour un poteau intermédiaire où \mathbf{x}_{mi} est la distance au premier poteau adjacent. Le signe de \mathbf{d}_i est alterné entre chaque poteau voisin.

Forces induites par des déformations (retraits ou des fluages par exemple)

Ces déformations différées du béton sont d'origine physico-chimiques (retraits) ou d'origine mécanique (fluage). Ses contraintes peuvent remettre en cause la durabilité des ouvrages avec des risques de fissuration qui favorisent la corrosion des armatures. Ces deux principaux mécanismes différés modifient l'état du matériau dans un laps de temps sous sollicitations (chargement mécanique, hydrique, etc.).



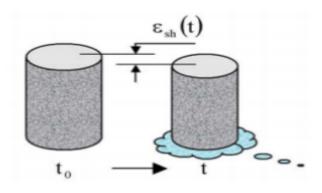


FIGURE 26 – Poussées de terre

Les propriétés du béton permettent ces comportements qui dépendent principalement de la présence d'eau au sein du béton. Le fluage correspond à l'augmentation des déformations d'un élément de structure sous charge maintenue constante dans le temps.

Ce phénomène dépend des mouvements de l'eau contenu dans le ciment. Les déformation de fluage peuvent entraîner des flèches (déformations différées), des redistributions de charge dont l'évaluation est indispensable pour sécuriser la structure.

Le mécanisme de retrait du béton interagit avec le fluage en modifiant le comportement du béton. Le retrait est une réduction de volume liée au départ ou à la consommation d'eau au sein du béton. Plusieurs types de retrait se succèdent à partir de la fabrication du béton : retrait au très jeune âge, retrait endogène, retrait thermique, ou encore retrait de dessiccation.

5.5 Actions variables

Les structures subissent des actions variables, notées Q. Les charges variables sont les actions reliées aux charges d'exploitation ou charges vives.

— Les charges d'exploitation liées à l'exploitation propre de l'ouvrage concerné :

Les charges d'exploitation d'un bâtiment sont celles provoquées par l'occupation des locaux. Les valeurs reliées aux charges tiennent compte de l'usage normal que les personnes font des locaux, des meubles et objets mobiles, des véhicules et des événements rares prévus tels que des concentrations de personnes ou de mobilier. Ces charges d'exploitation peuvent être modélisées par des charges uniformément réparties, par des charges linéiques, par des charges concentrées ou par des combinaisons de charges.

On peut les calculer à l'aide de la formule suivante :

$$Q = q_k \text{surface d'influence}$$
 (15)

La disposition des charges d'exploitation pour la vérification de la structure dépend du caractère de l'élément.

— Les planchers, les poutres et les toitures :

La charge d'exploitation doit être considérée comme une action libre appliquée sur la partie la plus défavorable de la surface d'influence des effets de l'action considérée. Les charges des autres niveaux peuvent être considérées comme uniformément réparties.



— Les charges d'exploitation q appliquées sur la surface du dessus de la poutre principale :

Elles ont pour unité le kN.m⁻¹ et sont calculées à partir de la charge d'exploitation du tableau multipliée par la largeur de la poutre.

— Les charges non permanentes appliquées au cours de la réalisation de l'ouvrage :

Par exemple : les équipements de chantier, les engins, ou encore les dépôts de matériaux de construction.

— Les actions naturelles :

Par exemple : la neige, le vent, ou encore la température. Ces charges variables se nomment S pour les charges de neige, W pour le vent, E pour les séismes.

Les structures subissent des actions accidentelles qui comprennent par exemple les catastrophes naturelles (séismes, cyclones, tempêtes tropicales, crue exceptionnelle, les glissements de terrain, etc.), les chocs accidentels sur des éléments de la structure, ou encore les explosions accidentelles.

Bâtiments à usage d'habitation	daN/m²
Logement y compris combles aménageables	150
Balcons	350
Escaliers à l'exclusion des marches isolées, halls d'entrée	250
Combles non aménageables dont l'utilisation n'est pas prévue à priori, non accessible normalement	100
Greniers proprement dits	250
Etage des caves	250
Partie accessible pour l'entretien : 100 daN concentré en un point quelconque des éléments de structure sur lesquels on peut se déplacer	

Bâtiments de bureaux	daN/m²
Bureaux proprement dits	250
Bureaux paysagers	350
Circulations et escaliers	250
Halls de réception	250
Halls à guichet	400
Salle de projection et de conférence à nombre de places limité (<50 m²)	350
Cantines	250 à 300
Salles de réunion avec tables	250
Zône de dépôts	350
Salles d'ordinateurs et de reprographie	250

Figure 27 – Tableau charge d'exploitation [1]

FIGURE 28 – Tableau charge d'exploitation [2]



5.6 Combinaison de charges

Construire des ouvrages qui résistent à toutes les actions appliquées sur la structure (permanentes, variables et accidentelles) quelle que soit la probabilité de leur apparition, ne serait pas économique. Il est courant que des bâtiments ne soient pas édifiés pour résister à l'impact d'avion, même si la probabilité de l'occurrence d'un tel événement n'est pas nul.

La question qui se pose est la suivante : comment combiner les différentes actions pouvant agir sur les structures afin de produire les effets les plus défavorables tout en garantissant la sécurité et un coût abordable? Pour trouver les actions agissant sur la structure, on utilise les méthodes mathématiques dérivées du calcul des probabilités qui définissent les combinaisons à prendre en compte lors du calcul d'un ouvrage. Il existe deux combinaisons pour définir les actions qui agissent sur une structure.

— États limites ultimes (cas extrêmes):

$$1.35G + 1.5Q \tag{16}$$

Ces coefficients tiennent compte de la variation probable de l'intensité des forces appliquées. Ce cas est utilisé pour le dimensionnement (ELU)

— États limites de service (cas courants) (ELS) :

$$G + Q \tag{17}$$

Dans la réalité, les actions sur les bâtiments dépassent parfois les actions prescrites, les matériaux sont parfois de moins bonne qualité que les matériaux prescrits et la sanction ne pourra bien entendu pas être la ruine de la structure. Pour éviter cela on introduit des « sécurités ».

On tiendra compte des « sécurités » en majorant les actions, et en minorant les résistances des matériaux. Faisant cela on aura vérifié la structure à la ruine, à l'état ultime, ou pour utiliser le terme des Eurocodes à l'État Limite Ultime. C'est ce qu'on appelle le calcul à l'ELU. Mais pour qu'une structure soit apte à être utilisée, il ne suffit pas qu'elle satisfasse à l'ELU, il faut également qu'elle ne soit pas trop souple, pas trop déformable.

Pour cela on devra vérifier notamment la déformation des éléments qui la composent (suspentes, planchers, dalles et poutres) sous les actions auxquelles elles sont soumises. En service, cette déformation ne pourra pas dépasser une certaine limite. En faisant cela, on vérifie la structure en service, ou pour utiliser le terme des Eurocodes, à un État Limite de Service. C'est ce qu'on appelle le calcul à l'ELS.



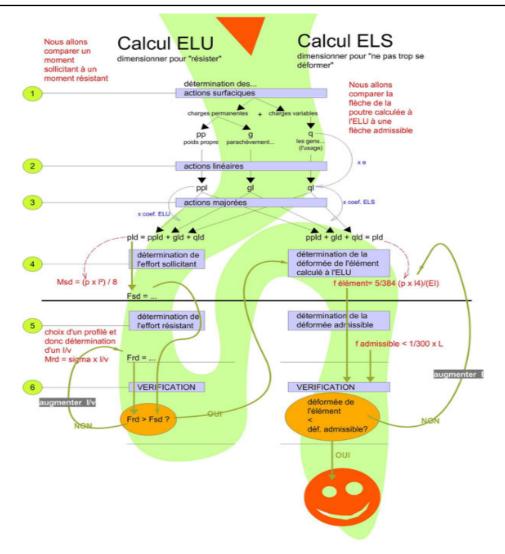


FIGURE 29 – Organigramme pour le calcul ELU et ELS

5.7 La descente de charges

Un ouvrage résiste aux actions auxquelles il est soumis, ce qui implique que ce dernier reçoit sur le premier étage ces mêmes actions puis les transmet dans une seconde étape ou les décharge au sol de fondation. Les charges sont récupérées par les différents éléments structuraux qui sont chargés de les faire cheminer de proche en proche vers le sol de fondation. Ce phénomène se nomme la descente de charge.



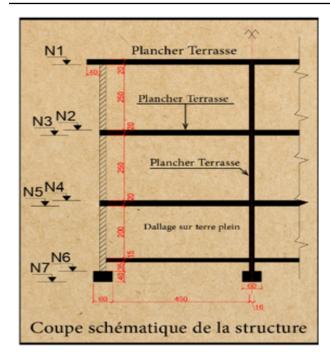


FIGURE 30 – Coupe schématique de la structure

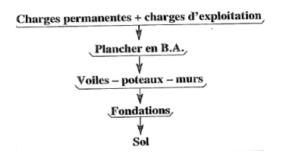


FIGURE 31 – Schéma descente de charges

Principe de la descente de charge :

Ce mécanisme a pour objectif d'étudier le transfert des charges dans la structure et d'évaluer les actions de pesanteur (charges permanentes) et les charges variables.

La descente des charges est l'opération qui consiste à calculer pour chaque élément porteur, les charges qu'il supporte au niveau de chaque étage jusqu'aux fondations. Le principe est de distribuer les charges sur les différents éléments qui composent la structure d'un bâtiment.

L'objectif est de connaître la répartition et les cheminements des charges sur l'ensemble des éléments porteurs de la structure depuis le haut jusqu'aux fondations.

Les valeurs obtenues permettent le dimensionnement des éléments porteurs. Ces calculs sont réglementés par les Eurocodes.

Un ouvrage résiste aux actions auxquelles il est soumis, ce qui implique que ce dernier reçoit sur le premier étage ces mêmes actions puis les transmet dans une seconde étape ou les décharge au sol de fondation. Les charges sont récupérées par les différents éléments structuraux qui sont chargés de les faire cheminer de proche en proche vers le sol de fondation. Ce phénomène se nomme la descente de charge.

Pour effectuer les différents calculs des descentes de charges, on commence par le niveau le plus haut (charpente ou toiture terrasse) et on descend au niveau inférieur et celà jusqu'au niveau le plus bas (les fondations). Tout d'abord, pour commencer le calcul de la descente de charge il est nécessaire d'établir un principe de structure niveau par niveau avec le sens de portée de la charpente et des planchers, des balcons, des poteaux, des poutres, etc. Puis, on détermine les caractéristiques des éléments porteurs : le type de plancher, le revêtement de sol (épaisseur et nature), le type de toiture (tuile, ardoise, possibilité de



neige, etc.), les cloisons, le type et l'épaisseur des murs (briques, parpaing, béton).

Ces éléments correspondent aux charges permanentes. Ensuite, on définit le type d'utilisation des pièces (logement, circulation, bureaux, etc.) pour choisir les surcharges d'exploitation à appliquer au plancher. Ces éléments correspondent aux charges variables. Ce sont des charges qui prennent en compte les mobiliers, les utilisateurs, etc.

En général, une structure de bâtiment est donc chargée en chaque niveau, mais aussi chargée simultanément par des charges permanentes et des surcharges d'exploitation.

5.8 Réglementations de construction face aux risques sismiques

Les normes parasismiques sont faites pour prévenir des risques sismiques et épargner un maximum de vies humaines. Les maîtres d'œuvre sont responsables des dispositions et des précautions à prendre pour respecter les règles. Nous avons donc l'obligation, depuis le 1er janvier 1998, de nous assurer que les règles de construction parasismiques sont bien prises en compte par les constructeurs.

Les Eurocodes sont les normes européennes de conception, de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil. Les Eurocodes ont pour but d'harmoniser les techniques de construction en Europe afin de permettre le libre accès des entreprises de travaux ou des bureaux d'études techniques aux marchés des autres États membres.

L'Eurocode 8 divise la France en 5 zones de sismicité croissantes. Seuls les territoires d'Outre-Mer sont classés en catégorie 5, tandis que l'on retrouve quelques territoires en Zone 4 dans les Pyrénées et les Alpes. La ville d'Angers se situe quant à elle dans une zone 2, c'est-à-dire une zone à très faible sismicité. La réglementation varie donc dans chaque zone.

De plus, l'Eurocode classe les bâtiments en 4 catégories. Les bâtiments les plus importants (classe IV : bâtiments indispensables à la sécurité civile, à la défense nationale et au maintien de l'ordre public, assurant la communication, la sécurité aérienne, les centres météorologiques, ou encore les établissements de santé indispensables à la gestion de crise) bénéficient d'un meilleur renforcement. Les écoles et autres lieux pouvant accueillir plus de 300 personnes sont de classe 3. Dans une zone 2 comme à Angers, les bâtiments de classe 1 et 2 (habitations individuelles par exemple) ne sont pas soumis à l'Eurocode 8.



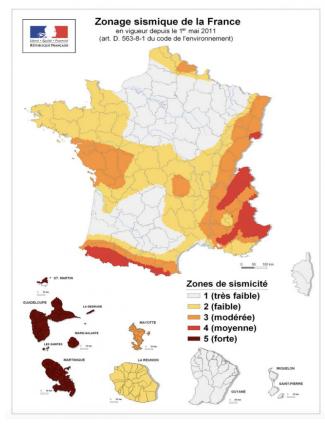


FIGURE 32 – Carte des zones sismiques en France

En France, la réglementation parasismique respecte les normes européennes de l'Eurocode 8, entrées en vigueur en 2011 pour remplacer les règles PS92.

Ces normes régissent la conception, la rénovation et le dimensionnement des ouvrages en maçonnerie pour limiter au maximum les risques d'effondrement des bâtiments (1re cause de mortalité lors des séismes).

Les règles doivent respecter les 5 piliers indissociables de la construction parasismique : le choix du site d'implantation, la conception architecturale, le respect des règles parasismiques, la qualité d'exécution et la maintenance des bâtiments.

La réglementation concerne les bâtiments à risque normal, pour lesquels les conséquences d'un séisme sont limitées à la structure même du bâtiment et à ses occupants.

L'Eurocode 8 fournit les informations nécessaires sur le bâtiment pour son dimensionnement et sa construction. Ainsi, pour effectuer le renforcement des bâtiments sujets aux risques parasismiques, les territoires sont divisés selon le niveau de danger des séismes. Ce dernier est pris en compte par un seul paramètre a(gr), qui est l'accélération de référence au niveau du sol.

$$a_q = \gamma_1 a_{qr} \tag{18}$$

Pour une zone de faible sismicité, on prend $a_g < 0.78 m.s^{-2}$. Dans l'Eurocode 8, le mouvement sismique d'un point du sol est représenté par un spectre de réponse élastique en accélération. L'action sismique est multipliée par un facteur d'importance γ_1 , égal à 0.8 pour la classe I, 1 pour la classe II, 1.2 pour la classe III, et à 1.4 pour la classe IV.



Catégorie d'importance	Bâtiments	
I	Bâtiments d'importance mineure pour la sécurité des personnes.	
	Par exemple : bâtiments agricoles, etc.	
II	Bâtiments courants n'appartenant pas aux autres catégories	
III	Bâtiments dont la résistance aux séismes est importante, compte	
	tenu des conséquences d'un effort. Par exemple : écoles, salles de	
	réunion, institutions culturelles, etc.	
IV	Bâtiments dont l'intégrité en cas de séisme est d'importance vitale	
	pour la protection civile. Par exemple : hôpitaux, casernes de por	
	piers, etc.	

Table 1 – Tableau des classes de bâtiments

Par ailleurs, il est nécessaire de connaître la classe du sol décrivant les profils stratigraphiques qui prennent en compte l'influence des conditions locales de sol sur l'action sismique. Les sols sont classés en 5 catégories : A, B, C, D et E. Ce classement permet de connaître les paramètres S, TB, TC et TD qui permettent de décrire la réponse élastique horizontale des séismes.

Classe de sol	S	TB (s)	TC (s)	TD (s)
A	1	0.15	0.4	2
В	1.2	0.15	0.5	2
С	1.15	0.2	0.6	2
D	1.35	0.2	0.8	2
Е	1.4	0.15	0.5	2

Table 2 – Tableau décrivant le spectre de réponse élastique

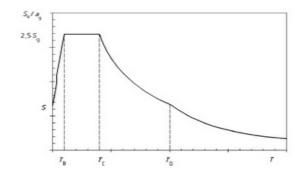


FIGURE 33 – Graphique décrivant le spectre de réponse élastique

$$0 \le T \le T_{B}: \qquad S_{e}(T) = a_{g} \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_{B}} \cdot \left(\eta \cdot 2, 5 - 1\right)\right]$$

$$T_{B} \le T \le T_{C}: \qquad S_{e}(T) = a_{g} \cdot S \cdot \eta \cdot 2, 5$$

$$T_{C} \le T \le T_{D}: \qquad S_{e}(T) = a_{g} \cdot S \cdot \eta \cdot 2, 5 \left[\frac{T_{C}}{T}\right]$$

$$T_{D} \le T \le 4s: \qquad S_{e}(T) = a_{g} \cdot S \cdot \eta \cdot 2, 5 \left[\frac{T_{C}T_{D}}{T^{2}}\right]$$

FIGURE 34 – Equation décrivant le spectre de réponse élastique



Dans ces équations, on a :

- S_e (T), le spectre de réponse élastique;
- T_B , la période de vibration d'un système linéaire à un seul degré de liberté;
- T, la limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante :
- T_C , la limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante;
- T_D , la valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral constant;
- S, le paramètre du sol;
- η , le coefficient de correction de l'amortissement, avec la valeur de référence 1 pour 5% d'amortissement visqueux (avec ζ l'amortissement).

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\zeta}} \ge 0.55\tag{19}$$

Cependant, selon l'Eurocode 8, cette méthode de détermination du spectre de réponse élastique d'un séisme n'est pas utilisée. En effet, l'Eurocode 8 intègre la notion de ductilité pour diminuer les spectres élastiques. Les constructeurs recherchent ainsi des matériaux capables de plastifier longtemps, et des structures pouvant plastifier dans un maximum de zones, et ainsi d'absorber un maximum d'énergie (dissipation). Lors de l'étude architecturale du bâtiment, les constructeurs pré-définissent les zones dissipatives (zones critiques), appelées rotules plastiques.

Pour cela, ils effectuent un dimensionnement en capacité : afin de garantir que la structure se plastifiera aux zones prédéfinies (rotules plastiques), garantissant ainsi un comportement maîtrisé (pas de mode de ruine imprévu). Il faut prévoir un maximum de zones plastiques pour étudier des structures trop hyperstatiques et augmenter la possibilité de rotules plastiques.

On définit ainsi des classes de ductilité : la classe L (limitée), la classe M (moyenne) et la classe H (haute). On choisira couramment une classe M.



Type de structure	Classes de ductilité		
	DCM	DCH	
a) Ossatures en portique	4	5 au/ a1	
b) Ossature avec triangulation à barres centrées Entretoises diagonales Entretoises en V	4 2	4 2.5	
c) Ossature avec triangulation à barres excentrées	4	5 au/ a1	
d) Pendule inversé	2	2 au/ a1	
e) Structures avec noyaux ou murs en béton	voir a	rticle 5	
f) Ossature en portique avec triangulation centrée	4	4αu/ α1	
g) Ossature en portique avec remplissages Remplissage en béton ou en maçonnerie non connectés, en contact avec l'ossature Remplissage en béton armé connectés Remplissages isolés de l'ossature en portique (cf ossatures en portique)	2 voir article 7 4	2 voir article 7 5 au/ a1	

FIGURE 35 – Tableau des classes de ductilité

Une fois que l'on connaît la géométrie de la structure et la classe de ductilité, on peut déterminer le coefficient de comportement qui caractérise la capacité de dissipation de l'énergie de la structure. Ce coefficient permet de diviser de manière significative le spectre élastique.

Le coefficient q permet de créer un spectre dit de calcul en divisant les accélérations du spectre élastique par q. A partir de ce spectre, on obtient directement les efforts, mais les déplacements doivent être multipliés par q (dans le cas d'une analyse linéaire, les déplacements produits par l'action sismique de calcul doivent être calculés sur la base des déformations élastiques du système).

Principe de dimensionnement	Classe de ductilité de la structure	Intervalle des valeurs de référence du coef de comportement q
Principe A Comportement de structure faiblement dissipatif	DCL (limitée)	≤ 1.5 - 2
Principe B Comportement de structure dissipatif	DCM (moyenne) uniquement pour sections classe 1 à 3 (3 si q≤2)	≤ 4 et également limité par les valeurs du tableau 6.2
	DCH (haute) uniquement pour sections classe 1	uniquement limité par les valeurs du tableau 6.2

Figure 36 – Tableau du cofficient q



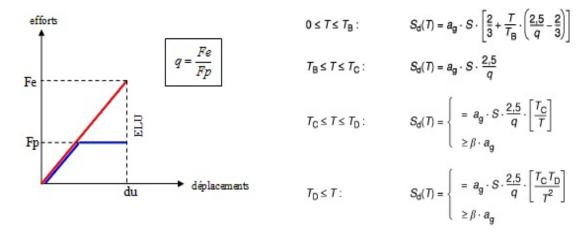


FIGURE 37 – Spectre de calcul Sd avec le coefficient q abattant le spectre élastique

De plus, les structures de bâtiment sont classées en structures régulières et structures irrégulières. Cette distinction a des implications sur les aspects suivants du dimensionnement sismique :

- le modèle de structure peut être un modèle simplifié plan ou spatial;
- la méthode d'analyse peut être soit une analyse spectrale simplifiée (méthode des forces latérales), soit une analyse modale;
- la valeur du coefficient de comportement q, qui doit être minorée pour les bâtiments irréguliers en élévation.

Régularité		Simplifications admises		Coefficient de comportement
Plan	Plan Elévation Modèle Analyse élastique line		Analyse élastique linéaire	(pour l'analyse linéaire)
Oui	Oui	Plan	Force latérale	Valeur de référence
Oui	Non	Plan	Modale	Valeur minorée
Non	Oui	Spatial	Force latérale	Valeur de référence
Non	Non	Spatial	Modale	Valeur minorée

Figure 38 – Tableau des critères de régularité



5.9 Conséquences d'une résistance parasismique

Comme leur nom l'indique, les constructions parasismiques ont pour but de résister aux séismes. Les conséquences de ces derniers peuvent aller de l'ouverture d'une fissure à l'effondrement partiel ou total du bâtiment.



Figure 39 – Conséquences

En effet, le mouvement du sol provoqué par un séisme entraîne lui-même les fondations de la construction à vibrer. Or, sous l'effet de l'inertie, les déformations de la structure entraînent des forces importantes dans les éléments de la construction (les murs, planchers, poteaux, ou encore les poutres). Ainsi, même si les bâtiments sont conçus pour résister aux effets de la gravité, ces forces peuvent déstabiliser la structure et dépasser la résistance initialement prévue des éléments porteurs. De plus, certains types de sols sont très sensibles aux effets dynamiques : ils peuvent perdre leurs propriétés et entraîner l'enfoncement ou le basculement des structures qui reposent sur ceux-ci. C'est donc pour résoudre ces problèmes que les constructions parasismiques existent.





6 Différentes solutions de renforcement pour un mur porteur

En général, la conception d'un bâtiment soumis à un risque de séisme doit permettre à la structure de dissiper de l'énergie et de se comporter de façon à ne pas changer sa résistance globale. Les différentes solutions de renforcement d'un mur permettent d'augmenter sa capacité de résistance et de réduire les effets de sollicitation (par les forces de cisaillement) sur celui-ci.

Dans ce projet, on s'intéresse au renforcement d'un mur porteur uniquement. Il existe plusieurs techniques pour renforcer les éléments le consistuant. Il est aussi important d'améliorer ses caractéristiques mécaniques, pour qu'elles offrent une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.

La conception du projet de renforcement passe tout d'abord par le choix de la technique de renforcement et du type de matériau utilisé. Ce choix dépend de divers facteurs, comme par exemple le niveau d'exigence choisi, le coût du renforcement, les considérations architecturales et d'usage du mur, ou encore la faisabilité des travaux. La technique de renforcement choisie doit répondre à des contraintes de conception et doit permettre une amélioration du comportement du mur, telle que l'augmentation de la capacité de déformation, l'augmentation de la résistance, la modification de la rigidité, l'augmentation de l'amortissement, ou encore la réduction de la masse de la structure.

Aujourd'hui, les voiles en béton armé sont des éléments verticaux obtenus par coulage. Ils sont obligatoires dans les zones sismiques d'après le code parasismique Algérien RPA99/V2003. Ils présentent une grande résistance et une grande rigidité par rapport aux forces horizontales. En effet, les voiles sont très efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales puisqu'elles augmentent la rigidité du mur, éloignent la possibilité d'instabilité du mur porteur, diminuent les dégâts des éléments non-porteurs (dont le coût de réparation est en général plus élevé que celui des éléments porteurs), et enfin rendent le comportement de la structure plus fiable. Mais les voiles en béton armé ne sont pas suffisants pour le renforcement des murs porteurs sous l'effet sismique.

Au contraire, dans la direction perpendiculaire à leur plan, les structures en voiles porteurs sont très peu résistantes par rapport aux forces horizontales, et doivent être renforcées pour prévenir des risques sismiques.



6.1 Modification des contreventements

Lors de la construction d'un bâtiment, le contreventement horizontal et vertical sur les murs est obligatoire dans le cas d'une construction parasismique. Pendant un séisme, une construction reçoit des charges horizontales qui doivent être transmises jusqu'au sol par les éléments de la structure. résistants (travaillant en flexion ou en cisaillement). La technique d'utilisation de contreventements consiste à construire un certain nombre d'éléments qui vont assurer la stabilité et la rigidité du mur.



FIGURE 40 – Coutreventements

Cette méthode permet de répartir les forces de compression et de traction sur différents points, et ainsi de transmettre les charges au sol. Le contreventement d'un mur porteur doit être horizontal (diaphragmes) et vertical (palées de stabilité). Le contreventement par « mur » ou « voiles » est généralement fait en béton ou en béton armé. Pour assurer la résistance du mur face au risque de séisme, on modifie la répartition des contreventements pour assurer une meilleure répartition des forces de sollicitation sur le mur. Les contreventements des plans horizontaux permettent de transmettre et de répartir les actions latérales subies par la construction sur les éléments de contreventement vertical.

Les structures contreventées permettent les descentes de charge dynamique horizontales, elles passent par les mêmes éléments que les charges statiques verticales comme les murs, les coques, ou encore les portiques croisés.

Diaphragmes horizontaux

Les diaphragmes (contreventements horizontaux) rigides permettent de maintenir les angles à 90° et de transférer les forces aux autres éléments de contreventements. Le diaphragme impose le même mouvement à chaque élément vertical. Cette action permet de répartir équitablement toutes les palées de stabilité (contreventement de la façade). Ces éléments assurent la transmission et la répartition des charges horizontales entre les éléments participant au contreventement et donc aux fondations.

Cette fonction dépend de leur comportement et leur rigidité aux forces horizontales. Les diaphragmes horizontaux collectent les forces d'inertie et les transmettent aux éléments structuraux verticaux et rendent ces éléments solidaires pour résister à l'action sismique horizontale.



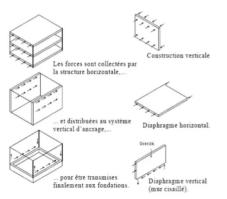


Figure 5.1. Schéma général de fonctionnement en « boite » pour la reprise des actions horizontales de séisme ou de vent

FIGURE 41 – Diaphragmes horizontaux

La transmission des efforts horizontaux des façades vers les composants de stabilité se fait par l'effet diaphragme des planchers et des toits (horizontaux). Les diaphragmes doivent être peu déformables dans leur plan, de manière à assurer une bonne répartition des efforts sur les structures verticales.

Les diaphragmes constituent un aspect essentiel du concept de stabilité des bâtiments préfabriqués. Grâce à l'effet diaphragme, les charges horizontales sont aussi réparties sur les différents composants assurant la stabilité horizontale, et ce, à chaque étage.

6.2 Chemisage en béton armé des murs



FIGURE 42 – Chemisage en béton armé

La méthode du chemisage en béton armé sur les murs consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section, par la mise en œuvre d'une épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément.

Pour remplir les interstices sans mode de vibration, l'utilisation d'un micro-béton sur le mur permet de renforcer sa résistance.

Il existe trois types de chemisage : le chemisage en acier, le chemisage en béton armé et le chemisage BTHP fibré (Béton à Haute Performance).

Cette méthode a pour avantage de ne pas être coûteuse, ne demande pas de main d'œuvre qualifiée et permet l'augmentation de la résistance du mur. Mais cette méthode possède un inconvénient puisque l'augmentation de la section de béton influe directement sur le poids du bâtiment.

L'adhérence représente la résistance au cisaillement, en l'absence d'un effort de compression normale sur cette interface et d'une armature de couture qui la traverserait. Cette adhérence est due essentiellement à une liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton.





La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm.

Les étapes de conception de ce type de renforcement consistent à nettoyer et sabler le support initial du mur, puis d'effectuer un ancrage et placer les chevilles de fixation d'armature. Ensuite, on étale une couche de résine sur la surface de béton primitif puis on coule une enveloppe en béton.

6.3 Chaînage horizontal et vertical

Le chaînage désigne les moyens de liaison mécanique, comme les chaînes en bois ou en fer par exemple, permettant d'augmenter la résistance d'un mur en lui transférant la capacité de résister à des efforts en flexion ou en cisaillement.

Le chaînage consiste à insérer des armatures en acier dans des ouvrages en béton haute adhérence afin de consolider le bâti. Ces armatures sont ensuite reliées entre elles par des équerres ou des boucles. Le coulage du béton doit être parfaitement réalisé pour éviter toute fragilisation locale de la maçonnerie. Le chaînage a donc pour effet de créer une ossature dans le mur de contreventement.

Lors d'un séisme, les bielles en diagonale sont mobilisées dans le panneau de maçonnerie par l'ossature créée. Les parties de maçonnerie prises en compte pour le contreventement doivent être d'épaisseurs brutes minimales de 10 cm pour les murs pleins, et de 20 cm pour les murs creux.

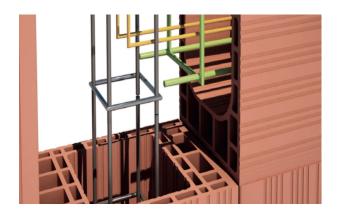


Figure 43 – Chaînage

Les murs porteurs en maçonnerie sont en général fondés sur des semelles (en moellons ou béton) sans chaînage. Celles-ci s'avèrent très souvent sources de désordre structurel du fait du sous dimensionnement de la semelle, de sa dégradation, de la mauvaise qualité du sol sous-jacent, ou encore d'une mauvaise liaison entre elles qui n'offre qu'une mauvaise résistance aux efforts de soulèvement.

Lors du rajout de murs de contreventement, une nouvelle fondation doit être prévue. Celle-ci peut s'avérer coûteuse, dûe aux difficultés d'installation de l'équipement d'exécution, et au côté destructif que peuvent avoir ces interventions.

On distingue 3 types de chaînage : vertical, horizontal, et incliné.



Chaînages verticaux



FIGURE 44 – Chaînage vertical

La direction de chaînage vertical permet d'assurer solidité et verticalité des murs porteurs. Ils sont posés depuis les fondations jusqu'aux combles.

On la retrouve en bordure des panneaux de contreventement, à tous les angles saillants ou rentrants de la construction, ou encore aux jonctions des murs encadrant les ouvertures.

Chaînages horizontaux

Les chaînages verticaux sont ensuite reliés aux chaînages horizontaux, dans le but d'assurer la stabilité du bâtiment et d'éviter le gonflement des murs soumis aux forces verticales.

Les chaînages horizontaux sont placés au niveau des fondations de chaque plancher, et tout en haut de la construction. Ils doivent également être espacés d'au maximum 4m.



Figure 45 – Chaînage horizontal

De plus, un chaînage horizontal continu en béton armé doit ceinturer la construction à chaque étage pour les planchers en béton armé, ou pour couronner les murs. Du côté extérieur d'un mur, et dans le cas de planchers, les murs sont habillés d'une planelle.

Dans le cas d'un couronnement des murs sans plancher, ils sont moulés dans des blocs en forme de U comme pour les linteaux.

Chaînages inclinés

Les chaînages inclinés sont obligatoires pour des constructions dont la hauteur sous pignon dépasse 1m50, c'est-à-dire dans pratiquement tous les murs porteurs. Les liaisons horizontales créées par ce type de chaînage ont pour objectif de contenir les différentes poussées sollicitant les murs, énumérées ci-dessous :

- les poussées horizontales qui contribuent au fléchissement d'un plancher;
- les poussées obliques produites par les charpentes;
- l'effort de traction dû à la dilatation d'un toit terrasse en béton armé;
- les mouvements du bâtiment dûs au tassement du sol ou aux charges portées.



La bonne mise en œuvre du chaînage horizontal permet ainsi d'éviter :

- des fissurations dans les maçonneries;
- des lézardes dans les façades;
- la pénétration de l'humidité et de l'eau de pluie dans la construction;
- l'amoindrissement des résistances mécaniques des maçonneries.

La continuité et le recouvrement entre les différents chaînages concourants en un même nœud doit être assuré dans les trois dimensions.

L'utilisation de précontraintes est réservée aux murs en maçonnerie de pierre, et a pour but de renforcer les murs dégradés tout en évitant qu'ils ne s'écrasent davantage.

Pour cela, l'emploi de tirants de chaînage permet de reprendre les efforts de traction et de compression causés par les contraintes structurelles et naturelles.

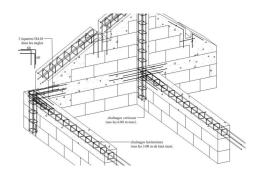


FIGURE 46 – Chaînage incliné

6.4 Injection de résine (Wall restoring)

Le renforcement des murs à l'aide d'injection de résine, procédé appelé wall restoring en anglais, permet d'effectuer une remise en conformité, de redonner au mur ses capacités de résistance ou encore d'anticiper les nouvelles zones sismiques. Ce procédé permet de renforcer la résistance d'un mur de pierres ou de briques et de régénérer les liants déficients. Il consiste à injecter une résine à faible pouvoir d'expansion dans le mur.

Cette technique consiste à faire pénétrer la résine dans les joints endommagés et régénérer les liants. La résine durcit rapidement en collant les blocs ensemble. Ce procédé est très efficace dû à la pression d'expansion de la résine : elle est limitée à 200 KPa en condition de confinement ultime. La résine porte la référence IDRO CP 200.

Pour cette technique, on prend pour acquis que notre mur porteur doit être uniformément distribué dans les deux directions horizontales et doit être de dimensions suffisantes pour résister aux effets sismiques. De plus, les éléments non structurels doivent être sécurisés pour empêcher leur effondrement.



Pour consolider la maçonnerie, on doit d'abord prendre en compte les propriétés physiques de la maçonnerie, comme la dégradation des matériaux, la disparition des liants, ou encore la présence de vides, qui doivent être réparés ou restaurés préalablement. On pourra ensuite renforcer le mur.



FIGURE 47 – Injection de résine

6.5 Polymères Renforcés de Fibres (PRF)

L'efficacité de cette méthode sur des structures en béton armé a été prouvée au fil des années. C'est pour cela que cette technique de renforcement par matériaux composites s'est particulièrement développée ces dernières années, et est toujours en plein essor. La technologie du renforcement par polymères renforcés de fibres (PRF) est l'une des plus efficaces pour l'accroissement de la résistance des éléments structurels porteurs.

En effet, de par ses performances mécaniques élevées et une relative facilité de mise en œuvre, elle permet d'augmenter significativement la ductilité et la résistance de ses éléments, ainsi que la capacité portante de la structure. Le renforcement par PRF peut être réalisé selon différents objectifs : entraver, différer, ou empêcher le glissement et le cisaillement des joints, sous un chargement prioritairement de cisaillement plan. Cette méthode passe tout de même par une connexion entre le système de renfort et la fondation sur laquelle repose le mur renforcé.



FIGURE 48 – Exemple de tissu de carbone

Trois types de composites PRF ont été développés pour le renforcement des structures en béton : les tissus en PRF (sheets), les lamelles en PRF (laminates or plates) et les barres en PRF (rods or bars). Les fibres sont généralement en verre (fibre de verre), en basalte, en carbone, en aramide, ou encore en fibres longues de lin (composites naturels). Le polymère est généralement un plastique thermodurcissable époxy, vinylester ou polyester. Le PRF est un matériau plastique thermodurcissable renforcé de fibres de verre. Sa résine est complétée avec des additifs pour renforcer et améliorer ses propriétés.

Les rôles principaux des fibres sont, d'une part, de mieux contrôler la fissuration du béton en limitant l'ouverture des fissures, et, d'autre part, de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile. Le comportement du béton en flexion est conditionné



par la fissuration de la zone tendue. C'est pour cela que la présence des fibres peut jouer un rôle stabilisateur après rupture de la matrice de béton.

Renforcement par fibre de carbone

Les systèmes de PRF les plus courants pour les applications de renforcement du béton sont à base de fibre de carbone (PRFC). La fibre de carbone possède une résistance à la traction, une rigidité et une durabilité supérieures aux fibres de verre. La principale caractéristique des fibres de carbone est une résistance à la traction spécifique élevée par rapport à leur propre poids.

Renforcement par fibre de verre

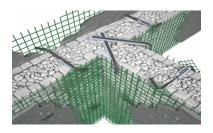


FIGURE 50 – Renforcement par fibre de verre

Renforcement par fibre métallique

Un renforcement par ajout de fibres métalliques est cependant très coûteux, car il demande un ajout de 10 à 50 kg d'acier par mètre cube de béton.

Mais ces méthodes restent peu courantes dans le renfoncement de mur, puisqu'elles présentent certaines difficultés comme le coût élevé, principal inconvénient, ou encore les éventuels décollements de la surface du panneau ou leur aspect inapproprié.



FIGURE 49 – Renforcement par fibre de carbone

Le Polyester Renforcé de Fibres de verre (PRF) est un matériau composite constitué d'une matrice en résine de plastique renforcée avec des fibres de verre et d'autres additifs.



FIGURE 51 – Renforcement par fibre métallique





Le renforcement par fibre de verre présentent de nombreux avantages comme la réduction du risque de fissuration, due au retrait plastique du béton au jeune âge et une meilleure cohésion du béton frais.

6.6 Autres méthodes

Réparation des fissures

Les fissures dans les murs sont très fréquentes, dues aux mouvements de terrain, à l'affaissement d'un mur, à une infiltration d'eau, ou encore d'une légère dégradation.

Pour réparer les fissures d'un mur, il est nécessaire d'avoir les éléments suivants : bâche; une pioche; un grattoir triangulaire; une truelle; une brosse; un pinceau; une spatule; et du béton.



FIGURE 52 – Fissures

Il existe différentes techniques de réparation des fissures, énumérées ci-dessous :

— L'injection :

Cette méthode consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes. L'injection s'applique sur des fissures avec une ouverture comprise entre 0,1 et 0,2 mm. De plus, l'injection par un produit souple permet son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hygrothermiques et l'injection par produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière.

— Le calfeutrement :

Cette méthode permet de colmater définitivement une fissure avec un produit souple comme le mastic ou le mortier. Le calfeutrement consiste à rétablir l'étanchéité à l'air et à l'eau et d'empêcher la pénétration de matière sans bloquer les mouvements des fissures.

— Le pontage :

Cette méthode consiste à recouvrir une fissure avec un produit souple et adhérent à la surface du support (revêtement, feuille préfabriquée, etc.). Le potage permet de rétablir l'étanchéité en laissant libre les mouvements des fissures.

— Le cachetage :

Cette méthode consiste à obturer provisoirement une fissure lors de l'injection pour contenir le liquide injecté dans la fissure.



Contreforts



FIGURE 53 - Contreforts

Les contreforts sont des piliers qui servent d'appui à un mur de soutènement, et permettent ainsi de le raidir. Ils sont utiles dans le cas d'un mur haut ou quand la force de poussée des terres à soutenir est importante. Ceux-ci peuvent être placés à l'avant ou à l'arrière du mur.

Il existe deux types de contreforts : les contreforts simples, ou les contreforts en redans (utiles dans les zones à forts risques de crues ou d'inondation).





7 Approche expérimentale

7.1 Choix de la méthode

Le choix de la méthode de renforcement des murs porteurs, de manière à ce qu'ils fassent face aux séismes, s'effectue sur de multiples critères comme le coût, le niveau d'exigence, les critères architecturaux du mur, ou encore la faisabilité.

Pour déterminer la méthode qui répond au maximum de critères, nous avons réalisé un tableau qui énumère les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de renforcement.

Techniques de renforcement	Avantages	Inconvénients
Contreventements	 Peu coûteux Simple à mettre en œuvre Efficace face aux efforts sismiques 	Seulement pour les bâti- ments à ossature en bois et en acier
Chemisage en béton armé	 Peu coûteux Ne nécessite pas de main d'œuvre qualifiée 	 Difficile à mettre en œuvre (transport des matériaux, travaux, etc.) Détériore relativement l'ésthétique Travaux longs, monopolisant le bâtiment Augmentation considérable du poids de la structure Nécessite des coffrages



Chaînago		
Chaînage	 Fissurations dûes aux charges horizontales limitées Empêche la désolidarisation des murs Ne nécessite pas de calculs préalables Simple de réalisation Prix abordable Forte longévité 	 Uniquement efficace pour les petites constructions Nécessite beaucoup d'armatures métalliques Mauvaises performances thermiques
Injection de résine	 Traitement rapide et efficace immédiatement Permet le traitement de maçonnerie immergée ou enterrée Forte longévité 	
Polymères Renforcés de Fibres (PRF)	 — Grande résistance mécanique — Bonnes performances thermiques — Protège de la corrosion chimique 	 Peu élastique Faible résistance à la température à long terme Faible longévité Faible résistance au cisaillement

 ${\it Tableau \ des \ avantages \ et \ des \ inconvénients \ des \ techniques \ de \ renforcement}$

A partir de cette comparaison, nous avons décidé d'étudier le renforcement à l'aide de chaînage.



7.2 Modélisation Revit



Dans le cadre de ce projet, nous devions utiliser le logiciel de modélisation Revit, disponible pour les étudiants. Revit est un logiciel de conception de bâtiments qui permet de créer un modèle en 3D d'un bâtiment, pour créer divers documents nécessaires à sa construction (plan, perspective, etc.) et étudier les caractéristiques de ces bâtiments.

Tout d'abord, nous nous sommes familiarisés avec le logiciel en regardant des vidéos de tutoriels, fournies par notre tutrice de projet. Nous avons par la suite réalisé une maison, mais nous nous sommes focalisés seulement sur un seul des murs dans l'analyse et l'étude des déformations.

7.3 Dimensionnement et réalisation de la maison

Pour la conception de la maison en forme de L, nous avons utilisé une dalle en béton de 250 mm pour le sol, des murs en briques (maçonneries) et nous avons sélectionné le toit de base proposé par Revit. Nous avons mis deux ouvertures à cette maison : une porte située sur la vue de gauche et une fenêtre sur la vue d'avant.

Pour l'étude d'un seul mur porteur, nous avons choisi d'étudier celui de droite sur la vue de droite.

Carcatéristiques du mur

Surface du mur [m ²]	14.134
Volume du mur [m ³]	3.039
Epaisseur [m]	0.215
Longeur [m]	5
Hauteur [m]	2.8268

Table 4 – Grandeurs choisies



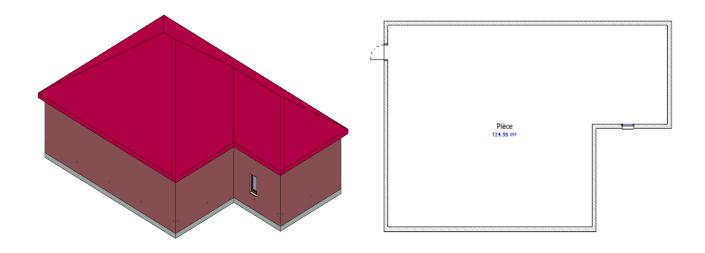


FIGURE 54 – Vue en 3D de la maison

FIGURE 55 – Vue plane de la maison

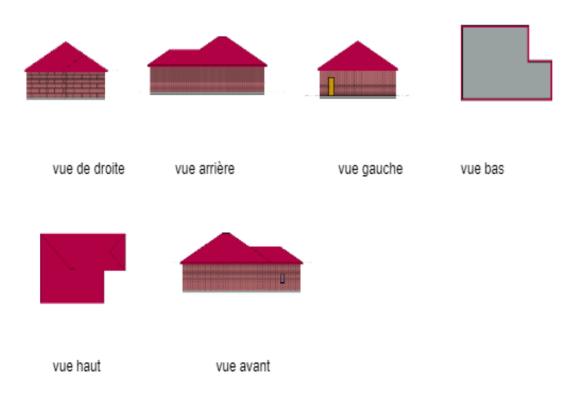


FIGURE 56 – Différentes vues de la maison



7.4 Etude des actions appliquées

Pour étudier l'efficacité de la méthode de renforcement choisie pour le mur en maçonneries sous les effets d'un séisme, nous devons tout d'abord mettre des combinaisons de charges sur les murs. Le logiciel Revit propose de mettre les charges sur les éléments de la structure. Il est possible de mettre des charges concentrées, linéiques, surfaciques, ponctuelles hébergées, linéiques hébergées, ou encore surfaciques hébergées.

Sur Revit, nous devons en premier lieu rentrer les charges à appliquer sur le mur : les charges permanentes (G), les charges d'exploitation (Q) et les charges liées au séisme (S).

	Nom	Numéro de cas	Nature	Catégorie	_ ^
1	DL1	1	Permanente	Charges permanentes	
2	LL1	2	Vivant	Charges d'exploitation	
3	SEIS1	8	Sismique	Charges sismiques	
4	Ra	9	Accidentel	Charges permanentes	

FIGURE 57 – Cas de charges sur Revit

7.5 Calcul des charges permanentes et d'exploitation

— Charges permanentes: poids propre

	Coefficients	Forces [kN]	G totale [kN]
Poids volumique [kN.m ⁻³]	22	66.858	66.858
Poids surfacique [kN.m ⁻²]	0.25	3.5335	

Table 5 – Valeurs des actions permanentes

On trouve les coefficients dans les tableaux ci-dessous :

— Charges d'exploitation :

Table 6 – Valeur de l'action variable



Annexe tableaux des charges permanentes et des charges d'exploitation

Planchers		G (kN/m²)
Dalles pleines en béton armé, par cm		0,25
Planchers préfabriqués à éléments joints alvéolées, à alvéoles de petites dimension	fs de dalles	
and the second of penies annually	- 12 cm	2125
the state of the s	- 16 cm	2.4 1 2 9
	- 20 cm	2.8 à 3.3
	- 24 cm	3,2 à 3,7
Planchers nervurés à poutrelles prétabris		
nervures coulées sur place, avec entrevo - Entraxe 60 cm :	ous en béton.	
montages avec table de compression		
	- 12 + 4 cm	2.5 à 2.6
	- 16 + 4 cm	2,75 à 2,85
	- 20 + 4 cm	3.1 à 3.3
	- 25 + 5 cm	3.6 à 4
montages sans table de compression		
	- 16 cm	22 à 23
	- 20 cm	2.6 à 2.8
	- 24 cm	2,9 à 3,1
Dito avec entrevous en terre cuite - Entraxe 60 cm :		
montages avec table de compression		
	- 12 + 4 cm	22123
	- 16 + 4 cm	2,5 à 2,6
	-20+4 cm	28 8 3
	-25 + 5 cm	3.2 à 3.6
montages sans table de compression		
	- 16 cm	1,9 à 2
	- 20 cm	2,2 8 2,4
	- 24 cm	2,5 à 2,7
Dito avec entrevous très légers (type pol sans entrevous	ystyrène) ou	
montages avec table de compression		
The second secon	-12+4 cm	1.5 à 1.7
	-16 + 4 cm	1.7 3 2
	-20 + 4 cm	1.8 à 2.1
	-25 + 5 cm	2,4 à 2,8

Tableau 3. Poids surfacique G (kN/m²) de planchers (NF P 06-001).

MATÉRIAUX	Poids
and the things	volumique
	kN / m ³
BÉTONS	
Béton non armé	22
Béton armé courant	25
Béton de granulats légers	7.5 à 15.5
Béton bitumineux	22
Beton bitumineux	22
MACONNERIES (sans enduits)	
Briques pleines	19
Briques creuses	9
Briques creuses Briques perforées	13.5
Parpaings pleins	21
	13.5
Parpaings creux porteurs	13,5
Parpaings pleins de pouzzolane	
ou de laitier expansé	15
Parpaings creux de pouzzolane	1
ou de laitier expansé	9,2 à 9,5
Parpaings pleins de béton cellulaire	
autoclavé	8 à 8,2
ENDUITS	
Plâtre	4.0
	10
Mortier aux liants hydrauliques	18
MATÉRIAUX DIVERS	
Acier	78.5
Aluminium	27
Asphalte coulé	18
Avoine en vrac	5.5
	18
Ballast concassé Ballast roulé	18
	18.5
Ballast pour voie de chemin de fer	
Blé, orge, seigle	8
Blocs de liège	4
Bois en bûches, conifères secs	4,5
Bois en bûches, conifères humides	6,5
Bois en bûches feuillus sec	7
Bois en bûches feuillus humide	10
Bois en copeaux en vrac	2
Bois en copeaux compact	3
Bois durs tropicaux	10

FIGURE 58 – Tableau des charges permanentes

Nature du local	Valeur de la charge en kN/m² (1)
— Hébergement en chambres, salles de jeux et repos des crèches	1,5 **
— Hébergement collectif (dortoirs)	2,5 **
— Salles de restaurants, cafés, cantines (nombre de places assises < 100)	2,5 **
— Bureaux proprement dits	2,5 **
— Salles de réunions avec tables de travail	2,5 **
- Halles diverses (gares, etc) où le public se déplace - Salles d'exposition de : moins de 50 m² 50 m² ou plus	4,0 ° 2,5 ° 3,5 °
Salles de réunions et lieux de culte avec assistance debout	5,0
Salles, tribunes et gradins des lieux de spectacles et de sport avec places debout	6,0
— Salles de théâtre, de conférences, amphithéâtre, tribunes avec sièges	4,0

FIGURE 59 – Tableau des charges variables



— Charges sismiques:

On sait que lors d'un tremblement de terre, le sol supporte la structure qui bouge en suivant les ondes sismiques. Cette dernière suit le mouvement donné par les secousses. La structure du bâtiment est alors soumise aux forces d'inertie.

Tous les appuis se déplacent dans toutes les directions, mais seulement les déplacements horizontaux sont pris en compte. En définitive, les responsables de la simulation du séisme peuvent eux-même définir la direction qu'ils considèrent critique pour la structure, de manière à vérifier la résistance du bâtiment face au séisme. La charge sismique correspond à une charge accidentelle.

Pour effectuer les calculs, on détermine avant toute chose les forces d'inertie qui résultent des mouvements, pour les appliquer à la structure. On suppose ainsi un mouvement horizontal de la structure, et on prend alors un mouvement unidirectionnel pour modéliser les charges sismiques.

Les charges sismiques ne sont pas appliquées sur le logiciel Revit : elles sont appliquées comme charges accidentelles dans les combinaisons de charges. Néanmoins, on prend en compte la réaction du sol qui se comporte comme une charge permanente. Sur Revit, elle s'applique comme un charge surfacique.

Pour déterminer la valeur de la réaction du sol R_a , on calcule la densité du sol qui correspond à la charge sismique, représentant la réaction du sol (en kN.m⁻²). On sait que la lithosol possède un poids volumique 13.6 kN.m⁻³, et représente la réaction du sol en partant des fondations. De plus, la surface des fondations est de 124.55 m².

$$R_a = \text{poids volumique du lithosol} * \text{périmètre des fondations}$$
 (20)

La réaction au sol Ra est ajoutée dans les combinaisons de charges lorsqu'apparaissent les charges permanentes.

Table 7 – Valeurs des charges surfaciques





7.6 Combinaisons de charges

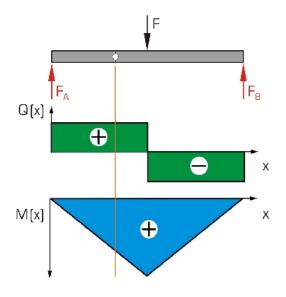


FIGURE 60 – Schéma d'exemple de moment fléchissant et d'effort tranchant

Pour l'étude de la modélisation sur Revit, nous avons étudié différents cas liés aux différentes combinaisons de charges qui existent. L'objectif de cette étude est de trouver les efforts tranchants et les moments fléchissants, de manière à trouver la courbe d'enveloppe qui nous donne les dimensions optimales de la structure.

Tout d'abord, une courbe d'enveloppe est une courbe dont la direction varie progressivement. On l'utilise lorsque plusieurs courbes correspondantes à des paramètres ou à des situations différentes sont superposées dans un même repère plan. Elle correspond à l'ensemble des valeurs extrêmes (valeurs maximum).

Les différents cas sont les suivants :

- 1er cas (sans les forces liées aux séismes) : 1.35G+1.5Q+1.35Ra (combinaisons de charges ELU);
- 2ème cas (sans les charges d'exploitation) : 1.35G+1.35Ra;
- 3ème cas (avec les charges permanentes) : 1.5Q;
- 4ème cas (avec les forces liées aux séismes): 1.35G+1.5Q+1.35S+1.35Ra;
- et 5ème cas (avec les forces liées aux séismes) : 1.35G+1.5Q+1S+1.35Ra.

On rentre sur Revit les différentes combinaisons de charges, comme dans le tableau cidessous :



COMBINAISONS D'ACTIONS

	Combinaisons ELU	Combinaisons ELS	
	Combinaisons fondamentales	Combinaisons accidentelles	Combinaisons caractéristiques
	1,35.G + 1,5.I		G+I
G +	1,35.G + 1,5.S	G + S _a	G+S
action variable	1,35.G + 1,5.W+ (W+ vent en appui)	G+Wa+	G + W+
	G + 1,5.W (W vent en soulèvement)	G + W _a	G + W-
	1,35.G + 1,5.I + 0,75.S si alt. $\leq 1000\mathrm{m}$ ($\psi_{0S} = 0,5$)		G+I+0,5.S si alt. ≤ 1 000 m
	1,35.G + 1,5.I + 1,05.S si alt. > 1 000 m ($\psi_{0S} = 0.7$)		G+I+0,7.S si alt. > 1 000 m
	1,35.G + 1,5.I + 0,9.W* $(\psi_{0W} = 0,6)$		G + I + 0,6.W*
	1,35.G + 1,5.S + 1,5.Ψ ₀₁ .I	$G + S_a + \psi_{21}$. I	$G + S + \psi_{01}$. I
G + actions variables	1,35.G + 1,5.S + 0,9.W*	Sans objet ($\psi_{2W} = 0$)	G + S + 0,6.W+
	1,35.G + 1,5.W* + 1,5.ψ ₀₁ .I	$G + W_a + \psi_{2I}$. I	$G + W^+ + \psi_{01} I$
	1,35.G + 1,5.W* + 0,75.S si altitude ≤ 1 000 m	Sans objet ($\psi_{2S} = 0$)	G + W*+ 0,5.S si alt. ≤ 1 000 n
	1,35.G + 1,5.W*+ 1,05.S si altitude > 1 000 m	G + W _a + 0,2.S si alt. > 1 000 m	G + W+ + 0,7.S si alt. > 1 000 n
	1,35.G + 1,5.W*+ 1,05.S si altitude > 1 000 m	G + W_a + 0,2.S si alt. > 1 000 m	G + W* + 0,7.S si a

Remarques:

Certaines configurations particulières de neige ou de vent relèvent de situations de projet accidentelles (voir EN 1991-1-3 et EN 1991-1-4).

Si mentionné dans le projet, envisager les combinaisons G+3 actions variables (voir tableau précédent).

Les coefficients ψ_{01} et ψ_{21} relatifs à la charge d'exploitation I dépendent de la catégorie de la surface chargée.

Catégorie	A	В	С	D	E	F	G	Н
Ψ_{0}	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	0,7	0,7	0
Ψ_1	0,5	0,5	0,7	0,7	0,9	0,7	0,5	0
Ψ2	0,3	0,3	0,6	0,6	0,8	0,6	0,3	0

Figure 61 – Tableau des combinaisons de charges

Combinaison de charge

	Nom	Formule	Туре	Etat	Utilisatic ^
		(tous) ~	(tous) v	(tous) v	(tous)
1	Nouvelle	1.35*DL1 + 1.35*Ra	Combinaison	Maintenance	
2	Nouvelle	1.5*LL1	Combinaison	Maintenance	
3	Nouvelle	1.35*DL1 + 1.5*DL1 + 1.35*Ra	Combinaison	Maintenance	
4	Nouvelle	1.35*DL1 + 1.5*LL1 + 1.35*SEIS1 + 1.35*Ra	Combinaison	Maintenance	
5	Nouvelle	1.35*DL1 + 1.5*LL1 + 1*SEIS1 + 1.35*Ra	Combinaison	Maintenance	

FIGURE 62 – Tableau des combinaisons de charges sur Revit



Cas numéro 1:

Combinaisons de charges ELU, on a : 1.35G+1.5Q+1.35Ra A partir de ces calculs, on peut rentrer ces valeurs sur Revit. Pour réaliser l'étude de charges, on place des charges surfaciques et linéiques.

— Charges surfacioues :

Ces forces sont appliquées sur les contours intérieurs du niveau 0 de la structure de la maison. On place les actions permanentes et variables.

Fz DL1 [kN.m ⁻²]	0,25
$Fz LL1 [kN.m^{-2}]$	1,5
Fz DL1 [kN]	66,858
Fz LL1 [kN]	21,201
$Ra [kN.m^{-2}]$	1693.88

Table 8 – Valeurs des charges surfaciques

— Charges linéiques :

Ces forces sont appliquées sur le milieu des murs au niveau 0. On place seulement les actions variables.

Fz LL1 [kN.m ⁻²]	1,5
Fz LL1 [kN]	21,201

Table 9 – Valeurs des charges linéiques



Annexe des captures d'écran du logiciel Revit

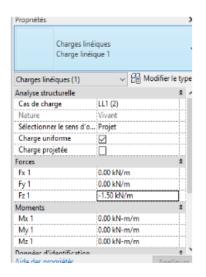


FIGURE 63 – Charges linéiques sur Revit

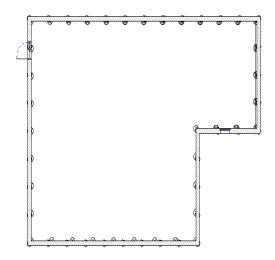
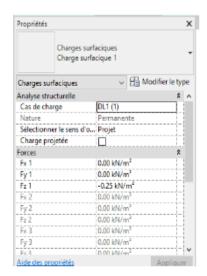


FIGURE 65 – Vue plane des forces



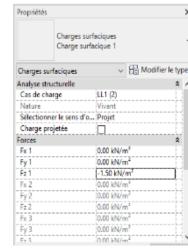


Figure 64 – Charges surfaciques sur Revit

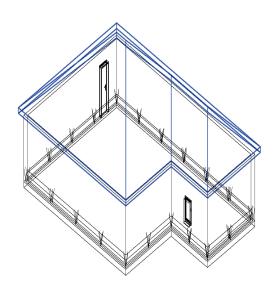


FIGURE 66 – Vue en perpective des forces



Cas numéro 2 et 3:

Sans les charges d'exploitation, on a : 1.35G+1.35Ra.

Sans les charges permanentes, on a : 1.5Q.

	Cas 2	Cas 3
Fz LL1 $[kN.m^{-2}]$		1.5*1.5
Fz DL1 $[kN.m^{-2}]$	0.25*1.35	
$Ra [kN.m^{-2}]$	1.35*1693.88	

Table 10 – Valeurs des charges cas 2 et 3

Cas numéro 4 et 5

Avec les forces liées aux séismes, on a : 1.35G+1.5Q+1.35S+1.35Ra.

Avec les forces liées aux séismes 2, on a : 1.35G+1.5Q+1S+1.35Ra.

	Cas 4	Cas 5
Fz LL1 [kN.m ⁻²]	1.5*1,5	1.35*1.5
Fz DL1 $[kN.m^{-2}]$	0.25*1.35	0.25*1.35
Ra [kN.m ⁻²]	1.35*1693.88	1.35*1693.88

Table 11 – Valeurs des charges cas 4 et 5

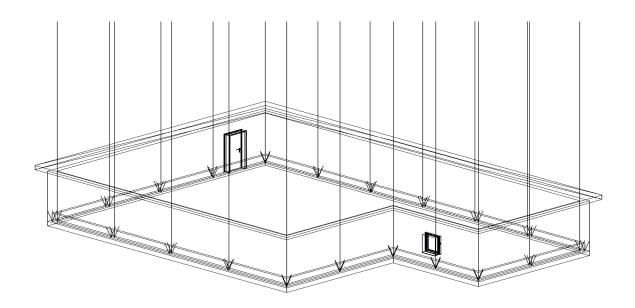


FIGURE 67 – Vue en 3D avec les forces de réaction au sol



8 Problèmes rencontrés et organisation du temps de travail

Problèmes rencontrés

Lors de la partie sur la recherche d'informations à propos de notre projet, nous avons rencontré de nombreuses difficultés : tout d'abord, il a été un peu difficile de définir le projet et de comprendre ce qu'il nous était demandé de faire. Ensuite, nous avons rencontré des concepts complexes lors des recherches sur la résistance mécanique d'un mur. Ces recherches ont nécessité plusieurs sessions de travail pour les comprendre et les vulgariser. Ensuite, la compréhension des termes techniques a été une des plus grosses difficultés rencontrées, puisque nous ne sommes pas des experts dans le domaine du génie civil.

Par la suite, nous avons aussi eu quelques problèmes de compréhension à l'utilisation du logiciel Revit, indispensable pour la partie expérimentale de notre projet. Il nous a fallu plusieurs sessions pour utiliser correctement le logiciel. De plus, l'édition du logiciel n'est pas la dernière, donc on ne dispose pas de toutes les fonctionnalités nécessaires pour utiliser les différentes techniques de renforcement que nous avons trouvé, et notamment la fonctionnalité "Descente de charges", qui est nécessaire pour effectuer les tests.

Organisation du temps de travail

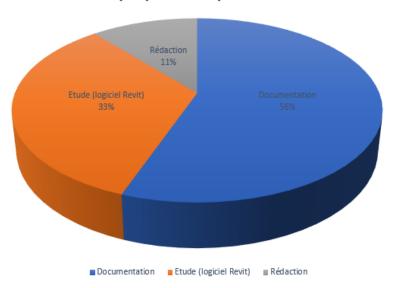
Travail réalisé	Temps passé [h]
Documentation	50
Etude (logiciel Revit)	30
Rédaction	10

Table 12 – Tableau de la répartition du temps de travail

Concernant la répartition du temps de travail, pour la partie documentation nous nous sommes partagé le travail selon les sujets à traiter. Pour la partie étude liée à l'utilisation du logiciel Revit, nous avons tous les trois appris à utiliser le logiciel, puis seulement une personne a réalisé les essais pour la modélisation des renforcements. Et enfin, concernant la rédaction, nous avons tous les trois travaillé dessus.



Graphique du temps de travail



 ${\tt Figure~68-Graphique~de~la~r\'epartition~du~temps~de~travail}$

9 Conclusion

Critique des résultats obtenus

Dans le cadre de notre projet, nous avons réalisé un travail théorique et un travail expérimental.

En premier lieu, nous nous sommes renseignés sur les résistances mécaniques d'un mur et ses propriétés. Puis, nous avons réalisé des recherches précises sur les différents types de renforcement qui existent dans le secteur du Génie Civil. Ceux-ci présentent tous des avantages et des inconvenients que nous avons comparés. A partir de ces comparaisons, nous avons conclu que la manière la plus appropriée de renforcer le mur que nous étudions était d'utiliser des chaînages horizontaux et verticaux ou la technique de renforcement par fibre.

En effet, ces techniques permettent d'augmenter considérablement la résistance d'un mur porteur. Ces types de renforcement présentent le plus d'avantages et répondent le mieux aux différents facteurs et exigences de conception. Ces renforcements respectent les règles de construction et l'Eurocode 8. De plus, ces méthodes permettent une amélioration du comportement du mur, comme l'augmentation de la capacité de déformation et de la résistance du mur porteur. Ces méthodes ont fait leurs preuves dans le domaine du génie parrasismique.

Ensuite, pour valider notre conclusion sur la méthode choisie (qui est l'utilisation de chaînages), nous devions vérifier l'efficacité de celle-ci sur le logiciel de modélisation Revit. En premier lieu, nous avons du réaliser une maquette virtuelle pour y réaliser les essais dessus. Puis, nous avons tout d'abord apliqué les forces sur la struture du bâtiment en calculant préalablement ces charges (charges permanentes, charges d'exploitation et réaction du sol).

Pour réaliser les essais, nous avons utilisé différents cas d'études en fonction des combinaisons de charges. Par la suite, nous avons ajouté les différentes forces linéiques et surfaciques liées aux charges calculées précédement. L'objectif est de déterminer la courbe enveloppe qui permet de trouver les dimensions optimales du bâtiment. Cette courbe enveloppe est déterminée à partir des moments fléchissants et des efforts tranchants liés à la simulation.

Malheureusement, nous n'avons pas pu finaliser le travail de simulation car nous n'avions pas accès à la licence permenttant de réaliser cette manipulation. Nous nous sommes arrétés à la modélisation des charges sur une structure basique. Par conséquent, nous n'avons pas pu déterminer si notre méthode de renfocement était la plus performante ou non.

Conclusions personnelles

Puisque nous nous dirigeons tous les trois vers une filière dans le milieu du génie civil l'année prochaine, ce projet nous est bénéfique dans le sens où il nous a apporté plus de



connaissances sur ce domaine, et plus particulièrement sur ce sujet. De plus, la recherche sur le domaine du génie civil nous a permis de comprendre ce que nous pourrions étudier si nous décidions d'aller dans ce domaine. Nous avons pu en apprendre davantage sur les aspects mécaniques des structures et apprendre à utiliser un nouveau logiciel : Revit, qui est très fréquemment utilisé dans ce secteur.

D'un point de vue personnel, ce projet nous a apporté des compétences en matière de travail en groupe. Nous nous sommes réparti le travail que nous devions faire pour avancer sur les recherches. Mais d'une manière générale, ce projet nous a permis de développer des compétences qui nous seront très utiles dans la suite de nos études et dans le début de notre vie professionnelle : le travail en équipe, l'autonomie, l'organisation et la planification, la synthèse, la simplification de notions complexes, ou encore l'utilisation de différents logiciels.

Malheureusement, ce projet n'a pas pu aboutir puisque nous n'avions pas accès à la licence permettant la modélisation de notre travail. Ce travail nous a laissé l'impression d'être inachevé, puisque nous n'avons pas pu finir le travail expérimental.

— Valentine Locul

Personnellement, ce travail a été très enrichissant tant que sur le plan personnel que sur le plan professionnel. J'ai pu apprendre davantage sur un thème spécifique du génie civil et appréhender les différents sujets que je suis suceptible de rencontrer en première année du cycle ingénieur dans la spécialité Génie Civil. Ensuite, sur le plan personnel, ce travail collaboratif m'a permis d'en apprendre davantage sur les personnes de mon groupe et de développer des compétences utiles pour le début de ma vie professionnelle et la fin de mes études, telles que la synthétisation, l'organisation de travail, ou encore la planification.

— Louise Garnier

Pour ma part, j'ai trouvé ce travail très enrichissant. Hésitant à me tourner vers le domaine du génie civil l'année prochaine, il m'a permis d'en savoir plus sur ce que j'allais être amenée à étudier et si cela pourrait réellement me plaire. Ce projet m'a ainsi permis de conclure que je trouve cette spécialité intéressante, et j'envisage donc de m'orienter vers celle-ci. De plus, ce projet m'a permis comme à mes camarades de poser les bases du génie civil : un avantage pour l'année à venir. D'un point de vue personnel, le travail de groupe m'a permis d'apprendre à m'adapter à mes camarades ainsi qu'au rythme de travail de celui-ci.

— Nathan Colliou

Le projet tutoré a permis de travailler en équipe sur une longue durée, il nous était donc indispensable d'être organisés et consciencieux. De plus, le projet tutoré m'a permis de développer des compétences en recherche, en rédaction et en synthétisation. Il m'a aussi été très bénéfique dans l'approche de mes prochaines années d'études : cela a confirmé mon envie de continuer dans le domaine du génie civil. Nous avons aussi pu commencer à prendre en main un logiciel très utilisé dans ce domaine, ce qui nous sera certainement utile par la suite. Pour conclure, ce travail a été bénéfique en tous points, et me sera utile pour la suite de ma vie.



10 Résumé

— Français:

Nous sommes trois étudiants de deuxième année de cycle préparatoire intégré à l'école d'ingénieur Polytech Angers. Dans le cadre des projets tutorés, nous avons été amenés à travailler sur le renforcement des murs en maçonneries face aux séismes. Encadrés par notre tutrice Mme Chahine, nous avons entrepris des recherches dans le domaine du génie civil et du génie parasismique. Ainsi, nous nous sommes enrichis de connaissances sur les séismes, leurs effets sur les bâtiments, la réglementation dans le BTP, ou encore les différentes techniques de renforcement.

L'objectif de cette étape de notre projet était de déterminer la technique la plus adéquate et la plus performante, permettant de renforcer un mur porteur. Nous avons ainsi conclu sur 2 techniques : les chaînages horizontaux et verticaux; simple et extrêmement répandue, ainsi que le renforcement par fibre; plus moderne et accessible.

Ensuite, nous avons mis à profit ces recherches à travers une modélisation 3D sur un logiciel spécifique au bâtiment (Revit Studio). Le logiciel était difficile à prendre en main et ne proposait pas toutes les fonctionnalités, ce qui a constitué le principal obstacle dans notre travail. Cependant, nous avons pu appliquer des contraintes sur les murs porteurs d'un bâtiment que nous avons créé, et comprendre le principe de descente de charges.

Pour finir, ce projet nous a beaucoup apporté sur le plan personnel. Nous avons développé des compétences en recherche et en organisation, et nous nous sommes enrichi dans le domaine du génie civil dans lequel nous souhaitons travailler plus tard.

— Anglais:

We are three students in the second year of the integrated preparatory cycle at Polytech Angers engineering school. As part of our tutored projects, we were asked to work on the reinforcement of masonry walls against earthquakes.

Supervised by our tutor Mrs Chahine, we undertook research in the field of civil engineering and earthquake engineering. Thus, we gained knowledge on earthquakes, their effects on buildings, the regulations in the building industry, and the different reinforcement techniques. The objective of this stage of our project was to determine the most appropriate and efficient technique to reinforce a load-bearing wall. We concluded on 2 techniques: horizontal and vertical ties; simple and extremely widespread, and fiber reinforcement; more modern and accessible.

We then put this research to good use by means of 3D modeling with a building-specific software (Revit Studio). The software was difficult to learn and did not offer all the features, which was the main obstacle in our work. However, we were able to apply constraints on the load-bearing walls of a building we created, and understand the principle of load descent.



Finally, this project has given us a lot on a personal level. We have developed research and organizational skills, and we have learned about the field of civil engineering in which we would like to work in the future.





11 Bibliographie

- Résistance mécanique d'un mur
- Contreventements
- Renforcement des murs par PRF
- Chemisage béton armé
- Murs porteurs :
 - * Construire un mur en maçonneries
 - * Structures
- Couler un poteau en béton armé
- Séismes
- Maçonnerie
- Murs en maçonneries
- Chaînages verticaux
- Chaînages horizontaux
- Risques sismiques et réglementation en France
- Risques sismiques et constructions neuves
- Réglementation parasismique applicable aux bâtiments (selon le ministère de l'écologie)
- Eurocode-8
- Eurocode 6 pour les murs en maçonneries (béton et béton armé)
- Béton fibré
- Vidéos Youtube :
 - * Murs Revit
 - * Dessiner une maison sur Revit [1]
 - * Dessiner une maison sur Revit [2]
- Généralités sur les forces internes et externes
- Actions et sollicitations de bâtiments
- Bâtiments en maçonneries face aux risques sismiques :
 - * Murs
 - * Sécurité
 - * Solutions pour la réparation et le renforcement
- Wall restoring
- Murs en maçonnerie
- Chaînages verticaux
- Chaînages horizontaux
- Risques sismiques et réglementation en France



- Risques sismiques et constructions neuves
- Réglementation parasismique applicable aux bâtiments (selon le ministère de l'écologie)
- Eurocode-8
- Eurocode 6 pour les murs en maçonneries (béton et béton armé)
- Vidéos Revit :
 - * Vidéo 1
 - * Vidéo 2
 - * Vidéo 3
- Généralités sur les forces internes et externes
- Actions et sollicitations sur un bâtiment
- Déplacements relatifs, action permanente
- Retrait et fluage
- Charges d'exploitation des bâtiments
- Poussées des terres
- Explications des charges sur Revit
- Descente de charges :
 - * Descente de charges [1]
 - * Descente de charges [2]
- \blacksquare Combinaison de charges :
 - * Combinaison de charges (1)
 - * Combinaison de charges (2)
- Effet des séismes sur les bâtiments
- Liaisons entre les chaînages
- Contreforts
- Chemisage en béton armé
- Causes de rupture d'un mur :
 - * Causes [1]
 - * Causes [2]
- Phénomène de fissure
- Energie exercé sur la structure
- Charges permanentes et variables
- Comparaison matériaux de construction