

DEMARCHES DE CALCUL DES EFFETS DE LA TORSION SUR LES CONTREVENTEMENTS D'UNE STRUCTURE EN BOIS EN SITUATION SISMIQUE

VU T.K. — FUENTES S. — FOURNELY E. — BOUCHAÏR A.

Clermont Université, Université Blaise Pascal, LaMI, BP 206, F-63000 Clermont-Ferrand, France
thanh.kien.vu@polytech.univ-bpclermont.fr

Résumé

Le présent travail expose une démarche pour prendre en compte le phénomène de la torsion d'axe vertical qui est plus difficile à maîtriser que les modes de flexion pour les situations sismiques. Une analyse typologique de bâtiments courants est conduite et une classification originale, basée sur la distribution des implantations des contreventements et leur degré de symétrie, est proposée. Une étude paramétrique est menée avec la méthode de combinaison multi-2D pour analyser l'influence de différentes configurations de contreventement sur la sensibilité de l'ouvrage étudié aux phénomènes de torsion. L'ensemble de ces résultats conduit à la réalisation d'une base de données qui pourra servir de référence pour l'analyse de l'influence de la semi-rigidité des diaphragmes ou de la non-linéarité réelle des contreventements sur la répartition des sollicitations.

MOTS-CLÉS : situation sismique, torsion, distribution des contreventements.

1. Introduction

L'évolution de la réglementation parasismique (Eurocode 8 et annexes nationales) et du zonage sismique de la France fait évoluer de manière significative la nécessité d'intégrer l'action sismique dans la conception des bâtiments. La prise en compte d'un fonctionnement réaliste des plans de diaphragmes horizontaux et de toiture est un point de départ dans la modélisation des structures. Le présent travail illustre une étude novatrice permettant d'intégrer de manière simplifiée et optimisée le dimensionnement et la vérification parasismique pour des bâtiments simples ou courants, en respectant les exigences de la NF EN 1998-1 (Eurocode 8, 2005), y compris la torsion d'axe vertical. La NF EN 1998-1 distingue deux origines de la torsion d'axe vertical, une naturelle ou structurale liée à la plus ou moins grande régularité en plan de la structure et une autre d'origine accidentelle intégrant notamment la variabilité associée à la réalisation et à l'occupation. Ces excentricités interviennent l'une et l'autre dans la combinaison des composantes horizontales et verticale de l'action sismique. Les étapes d'une telle étude globale permettent de déterminer les efforts sur chaque élément de contreventement.

Une approche par simple méthode de la force latérale est utilisée dans un premier temps pour évaluer les effets des choix d'implantation des contreventements sur la distribution des efforts dans ces contreventements en situation sismique. Cette approche s'appuie sur des configurations usuelles de bâtiments en bois. Ainsi, dans un premier temps sont présentés successivement la prise en compte de la torsion associée à l'utilisation de la méthode de la force latérale appliquée pour deux directions de séismes, la typologie des bâtiments, et les résultats et analyses d'une telle étude. Dans un deuxième temps, des simulations numériques sont conduites sur différentes structures génériques avec plusieurs niveaux de description de la structure, de l'action et des effets mécaniques sur les contreventements. Les calculs sont réalisés avec le logiciel Cast3m. Des analyses modales et modales spectrales sont conduites sur des modèles 3D à grand nombre de degrés de liberté.

2. Bâtiments courants, étude paramétrique

2.1. Etude sismique – Méthode de la force latérale

Parmi les catastrophes naturelles, le séisme est un événement qui peut conduire à des conséquences graves, en termes de dommages affectant les ouvrages de génie civil. La NF EN 1998-1 propose de nombreuses possibilités pour aborder la vérification d'un ouvrage en situation sismique (figure 1). La linéarisation équivalente proposée, est basée sur la prise en compte de coefficients de comportement, traduisant la ductilité globale de la structure. L'Eurocode 8 exige du concepteur l'utilisation de modèles et analyses en fonction de la régularité en plan et en élévation du bâtiment (tableau 1). Pour le cas de bâtiments réguliers en élévation et irréguliers en plan, la NF EN 1998-1 autorise l'utilisation d'un modèle spatial et d'une analyse par la méthode de la force latérale. Cette démarche conduit à une interprétation spécifique d'un « modèle spatial ».

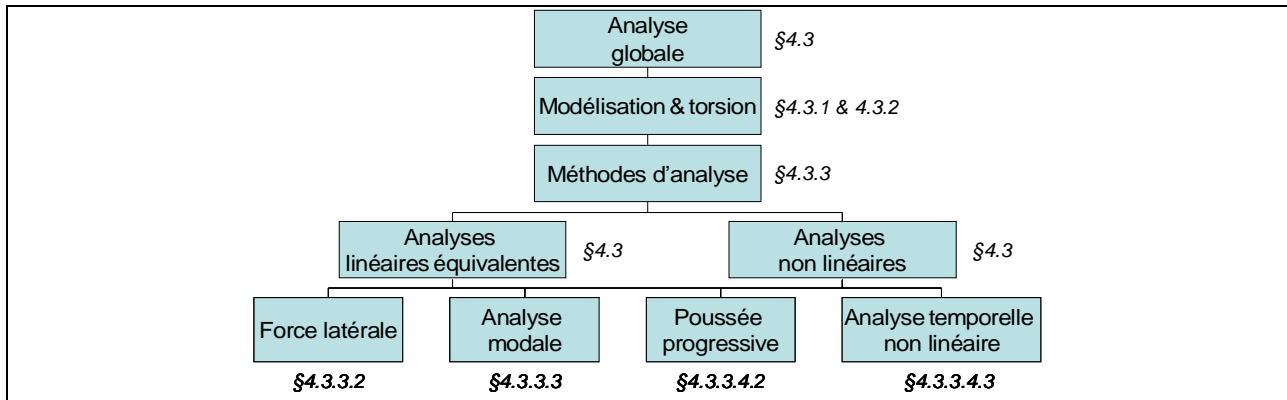


Figure 1. Différentes approches de vérification en situation sismique (NF EN 1998-1)

Analyse linéaire avec q										
Tous types de bâtiments					Bâtiments H<10 m + conditions					
Régularité		Simplifications de modèle et type d'analyse			valeurs de q	Régularité		Simplifications de modèle et type d'analyse		valeurs de q
plan	élévation				plan	élévation				
oui	oui	plan	force latérale	référence	oui	oui	plan	force latérale	référence	
oui	non	plan	modale	minorée	oui	non	plan	modale	minorée	
non	oui	spatial	force latérale	référence	non	oui	plan	force latérale	référence	
non	non	spatial	modale	minorée	non	non	spatial	modale	minorée	

Tableau 1. Associations prescrites par la NF EN 1998-1 entre régularités, analyse globale, modélisation et coefficients de comportement de structures

Pour pouvoir appliquer la méthode de la force latérale, il convient de considérer le modèle 3D comme un couplage et une succession de trois modèles 2D, deux modèles 2D verticaux perpendiculaires et un modèle 2D horizontal pour chaque niveau de masse. Les interactions interviennent en termes de couplage des actions sismiques suivant les deux axes horizontaux perpendiculaires considérés. C'est la méthode retenue pour les études globales des structures des bâtiments de l'étude paramétrique présentée dans la partie 2.3 ci-après. Cette méthode a été présentée par Priestley et Paulay, (Paulay, Priestley 1992). Les étapes d'une telle étude globale pour la détermination des efforts sur chaque système de contreventement sont explicitées en figure 2. Après la définition des caractéristiques mécaniques et géométriques des contreventements et planchers, les forces et couples de torsion par niveau sont calculés. Ensuite, les efforts sur chaque contreventement sont déterminés en valeur enveloppe, prenant ainsi en compte la combinaison des actions sismiques suivant X et Y et la partie aléatoire de l'excentricité entre centres de gravité et centres de torsion.

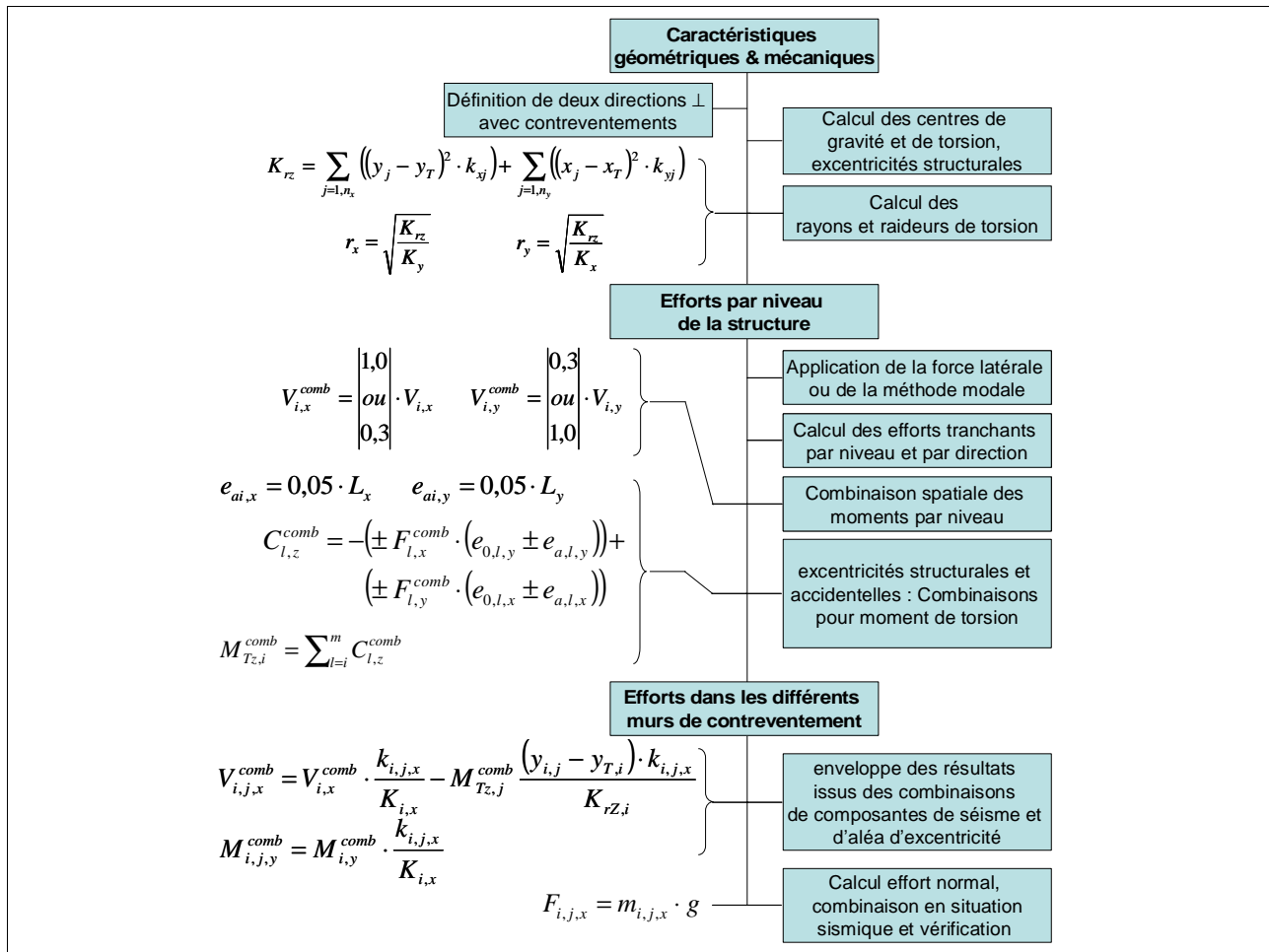


Figure 2. Juxtaposition de modèles 2D, avec prise en compte de la torsion structurale et accidentelle et de la combinaison de l'action sismique suivant X et Y

2.2. Typologie des bâtiments étudiés

Dans cette étude, la méthode pseudo dynamique, usuelle en Nouvelle-Zélande, est largement utilisée. L'étude porte sur des bâtiments d'au maximum 3 étages (R+2) à destination d'habitation, dont la distribution horizontale des contreventements s'inscrit dans la trame illustrée en figure 3.

Les efforts d'inertie engendrés par l'action sismique sont transmis aux contreventements par l'intermédiaire des diaphragmes horizontaux (planchers, charpentes). Pour cette étude ces diaphragmes seront considérés comme ayant une résistance et une rigidité supérieures à celles des murs de contreventement. L'ancrage des contreventements est également considéré comme étant plus rigide et plus résistant que le contreventement lui-même (Eurocode 5, 2004 – Fournely et Lamadon, 2006). Cette démarche, d'un point de vue conception, est basée sur le principe de dimensionnement en capacité, conformément à la NF EN 1998-1.

Les bâtiments abordés dans cette étude ont une surface d'étage inférieure à 360 m² pour un rapport longueur sur largeur compris entre 1 et 2. La hauteur d'étage est de 2,75 m, le système de contreventement n'est pas prédéfini, mais doit s'inscrire dans une des quatre classes de distribution définies ci-après. Le pourcentage de contreventement ne peut être inférieur à 20% en façade suivant une direction.

Un des principaux aspects novateurs de cette approche consiste à définir un découpage des plans de diaphragmes de plancher en zones et à considérer une variation de la distribution des pourcentages des contreventements à l'intérieur de ces zones. Ces zones sont définies de la manière suivante :

- Zone A : espace périphérique du rectangle dans lequel s'inscrit l'ouvrage. Sa largeur est égale à 5% de la longueur ou de la largeur de ce rectangle. Cette zone correspond à l'appellation « en facade » dans le texte.
- Zone BC : espace compris entre 90 et 50% de la longueur ou de la largeur du rectangle de base.
- Zone D : espace central limité à 50% du rectangle de base.

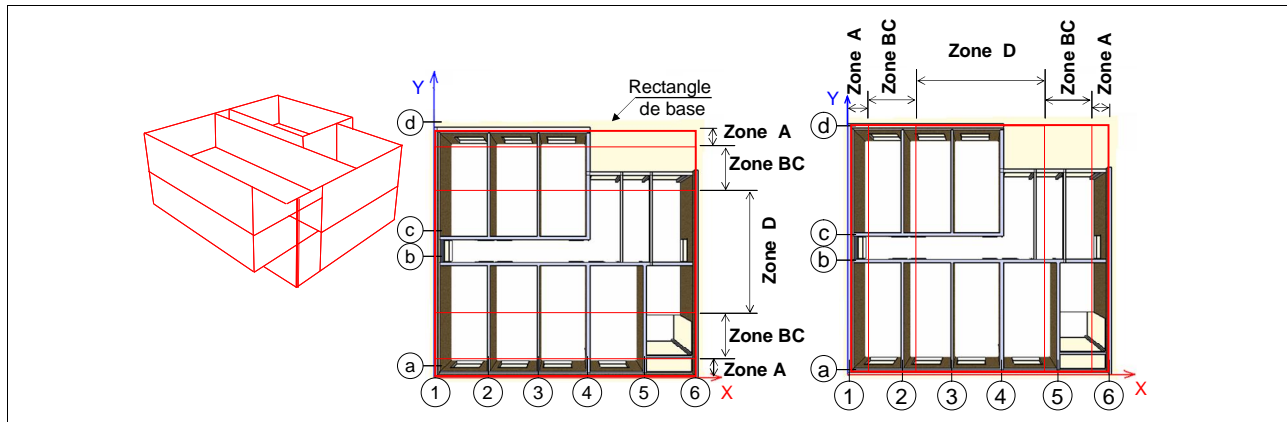


Figure 3. Illustration de zones de positions de contreventements sur un bâtiment en R+1

Les classes de distribution sont basées sur la symétrie de contreventement et sur la position de ces contreventements par zone :

- distribution I : $\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$ (parfaitement symétrique pour toutes les zones dans les deux directions)
- distribution II : $\frac{2}{3} - \frac{1}{3}$ pour une des zones dans une direction et le reste en $\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$,
- distribution III : $\frac{3}{4} - \frac{1}{4}$ pour une zone, hors zone A, et dans une direction et le reste en $\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$, ou 2 fois $\frac{2}{3} - \frac{1}{3}$ et 2 fois $\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$,
- distribution IV : 4 fois $\frac{2}{3} - \frac{1}{3}$

L'étude de l'effet de la torsion s'appuie sur une étude paramétrique. Les cas étudiés sont synthétisés dans le tableau 2. Pour chacun de ces cas de position de contreventement, différentes distributions en symétries sont considérées, de $\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$ à $\frac{4}{5} - \frac{1}{5}$ en zone A et de $\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$ à $\frac{1}{1} - \frac{0}{1}$ pour les autres zones d'implantation. C'est sur la base de ces configurations structurales qu'un coefficient d'incidence de torsion et qu'un classement ont été construits.

confi gura tions	direction X position des contreventements				direction Y position des contreventements				confi gura tions	direction X position des contreventements				direction Y position des contreventements			
	A	B	C	D	A	B	C	D		A	B	C	D	A	B	C	D
A8	60	40			60	40			A31	50		50		80	20		
A9	60	40			70	30			A32	40		60		60	40		
A10	60	40			80	20			A33	40		60		70	30		
A11	70	30			60	40			A34	40		60		80	20		
A12	70	30			70	30			A35	30		70		60	40		
A13	70	30			80	20			A36	30		70		70	30		
A14	80	20			60	40			A37	30		70		80	20		
A15	80	20			70	30			A38	20		80		60	40		
A16	80	20			80	20			A39	20		80		70	30		
A17	50	50			60	40			A40	20		80		80	20		
A18	50	50			70	30			A41	50			50	60	40		
A19	50	50			80	20			A42	50			50	70	30		
A20	40	60			60	40			A43	50			50	80	20		
A21	40	60			70	30			A44	40			60	60	40		
A22	40	60			80	20			A45	40			60	70	30		
A23	30	70			60	40			A46	40			60	80	20		
A24	30	70			70	30			A47	30			70	60	40		
A25	30	70			80	20			A48	30			70	70	30		
A26	20	80			60	40			A49	30			70	80	20		
A27	20	80			70	30			A50	20			80	60	40		
A28	20	80			80	20			A51	20			80	70	30		
A29	50		50		60	40			A52	20			80	80	20		
A30	50		50		70	30											

Tableau 2. Configurations de contreventements étudiés dans cette étude

2.3. Influence des différentes configurations de contreventement

L'étude globale des structures est conduite en utilisant la méthode de la force latérale. Seuls les premiers modes de translation sont considérés et la torsion est intégrée par couplage en rigidité globale et combinaison des actions sismiques suivant X et Y par la méthode développée par Priestley et Paulay.

Pour chacune des distributions présentées dans le tableau 2, plusieurs configurations de symétrie sont étudiées. La figure 4 présente un exemple de cas de configurations en symétrie étudiées pour une distribution spatiale donnée. L'incidence de la torsion est plus importante pour des cas de non régularité en plan que pour celle des configurations respectant ces critères de régularité. Cependant le coefficient d'incidence de la torsion, sur cet exemple peut atteindre 1,45 et le calcul des critères reste complexe, même pour des bâtiments relativement simples. 5900 configurations ont été testées. Pour chacune d'entre elles, les efforts sismiques ont été calculés pour chaque mur de contreventement. La figure 5 rapporte la distribution de l'incidence de la torsion d'axe vertical pour les murs périphériques suivant X et Y pour cet échantillon global. La figure 6 présente quant-à-elle la distribution de l'incidence de torsion pour un échantillon réduit (1750 configurations) correspondant aux exigences de configuration de contreventement précitées. En imposant un minimum de 20% de contreventement en façade dans une direction et le complément en pourcentage en façade dans l'autre direction, de l'ensemble des résultats obtenus, il ressort que les conditions de symétrie sont plus discriminantes que celles d'implantation.

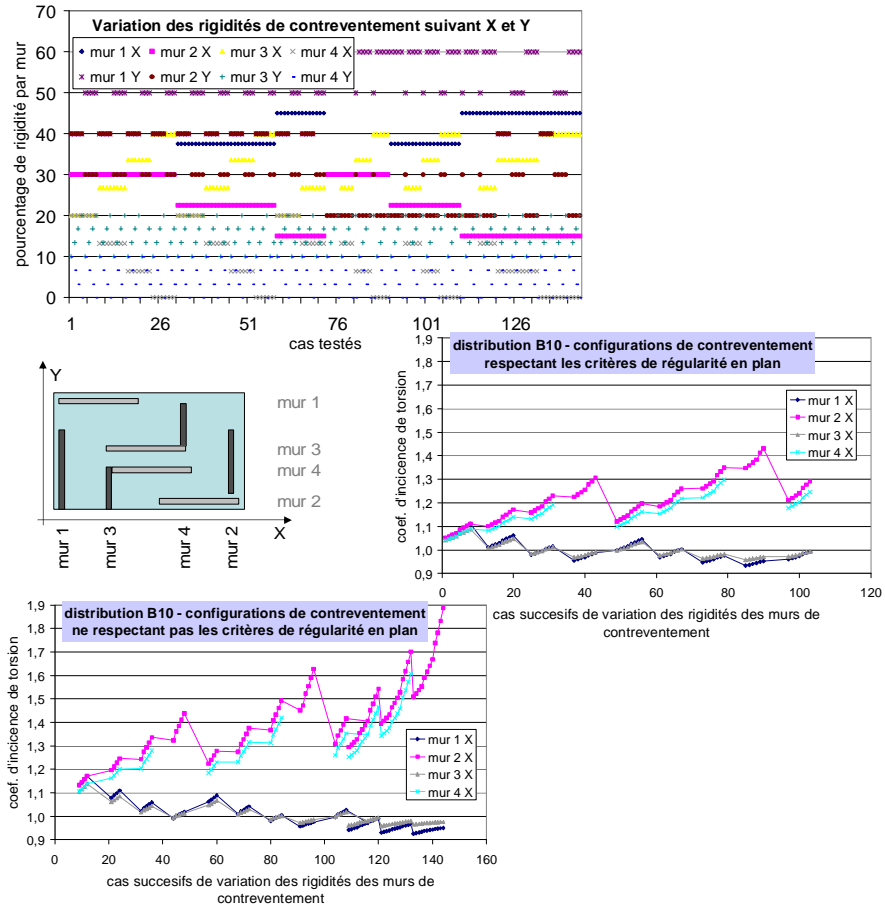


Figure 4 . Incidence de la torsion sur l'effort sismique repris par les murs orientés suivant X et Y pour une distribution 60-40 suivant X respectivement en zones A et B et 80-20 suivant Y respectivement en zones A et B

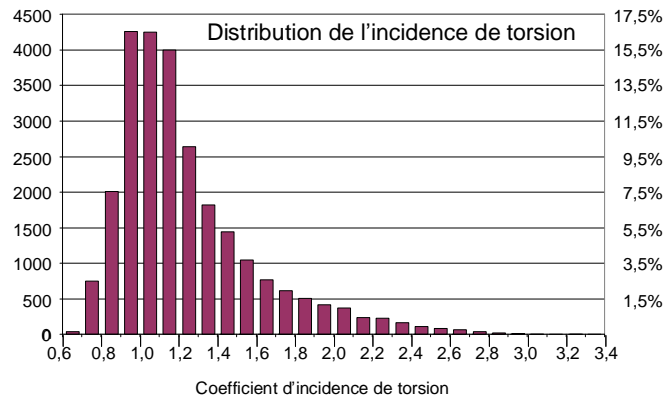


Figure 5 . Incidence de la torsion sur l'effort sismique repris par les murs périphériques orientés suivant X et Y pour l'ensemble des configurations étudiées

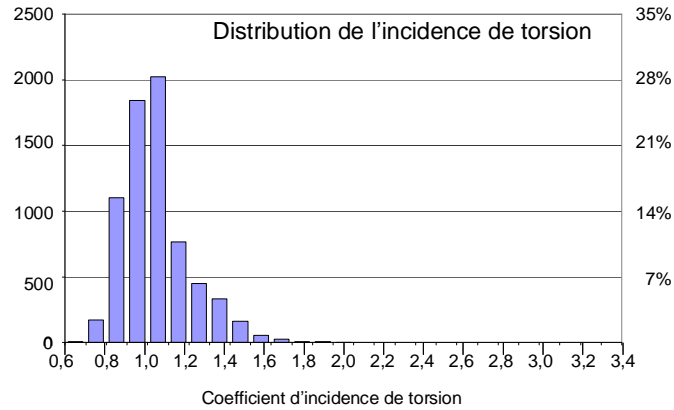


Figure 6 . Incidence de la torsion sur l'effort sismique repris par les murs périphériques orientés suivant X et Y pour les configurations I, II, III & IV

Plutôt que de se limiter à ces calculs de critères de régularité, l'option retenue dans cette étude est de définir des classes de distributions et donner pour ces 4 classes un coefficient d'incidence de torsion, correspondant à la valeur enveloppe des coefficients obtenus par les calculs. Le tableau 3 synthétise ces coefficients.

Longueur/largeur : L/l		distribution	distribution	distribution	distribution
min	Max	I	II	III	IV
1	2	1,15	1,43	1,56	1,58

Tableau 3 . Incidence de la torsion par distribution en symétrie

3. Analyse modale sur un modèle 3D

Pour la modélisation sur le logiciel Cast3m, la géométrie et les dimensions du maillage dépendent de la géométrie de la structure, c'est-à-dire, de la disposition de contreventements, des types de matériaux, et des types de liaisons entre les différents éléments structuraux. Pour cela, toutes les caractéristiques géométriques ont été paramétrées pour pouvoir être facilement modifiées.

Dans une première partie nous allons considérer la structure et la découper en « blocs » : rez-de-chaussée, premier étage et structure de charpente. D'ailleurs, on réalise le maillage de chacune de ces parties séparément, pour ensuite effectuer la connexion entre elles. De la même façon, nous divisons les différentes parties énoncées précédemment (RDC, R+1, charpente) en « motifs élémentaires ». Chaque motif va représenter une partie du système de contreventement du « bloc », c'est le cas de mur par exemple.

3.1 Motif pour voile de contreventement

Chaque voile de contreventement est modélisé comme un portique composé de deux poteaux, de deux poutres et d'une diagonale (Figure 7). En conséquence, pour pouvoir rattacher cette modélisation à la réalité, on va donner à la diagonale la rigidité nécessaire.

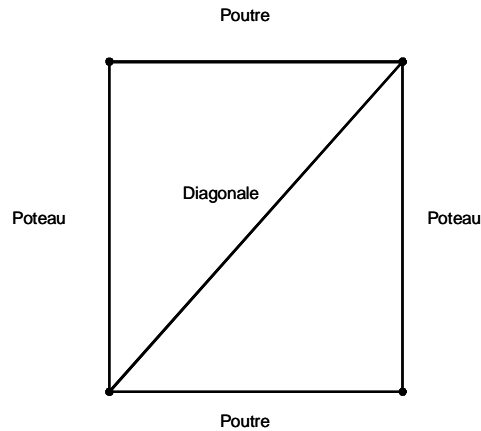


Figure 7. Motif pour voile de contreventement

Dans cette procédure on fait un treillis, avec des poteaux, des poutres et une diagonale. En effet, on définit les coordonnées des 4 points d'angle à partir des abscisses et des coordonnées des extrémités de la diagonale. Les poteaux et poutres sont encastrés entre eux, l'assemblage entre la diagonale et les poteaux et les poutres dans la même articulation.

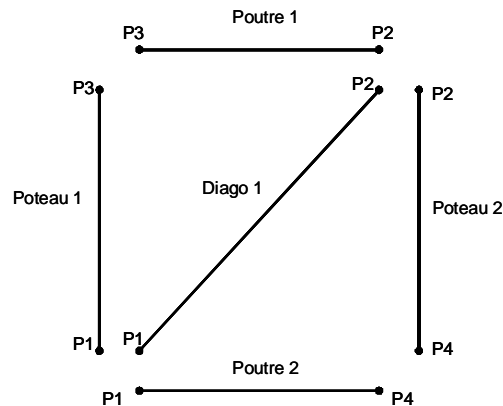


Figure8: Différents éléments du motif pour voile de contreventement

Par la suite, dans le programme général, pour modéliser chaque treillis on appelle la procédure en donnant des coordonnées de points extrêmes de chaque diagonale. Ensuite, dans le programme général, on donne le modèle et les propriétés matérielles et géométriques associées aux différents éléments du motif, avec :

- Poutre 1 et Poutre 2 = éléments poutre
- Poteau 1 et Poteau2 = éléments poutre
- Diago 1 = élément barre

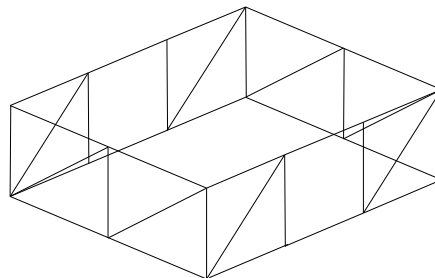


Figure 9 : Plan schématique de modélisation de rez-de-chaussée et 1^{er} étage

3.2 Motif pour plancher et diaphragme sous entrain

De la même façon que pour la partie précédente, on réalise une procédure, dans laquelle on construit un treillis générique. Puis, à partir de différentes données d'entrée, on obtient les différents motifs constituant ou représentant la structure. On calque la dimension et le nombre des motifs sur la position des contreventements et sur la distribution en plan des fermes de charpente. Le motif élémentaire est le même que précédemment :

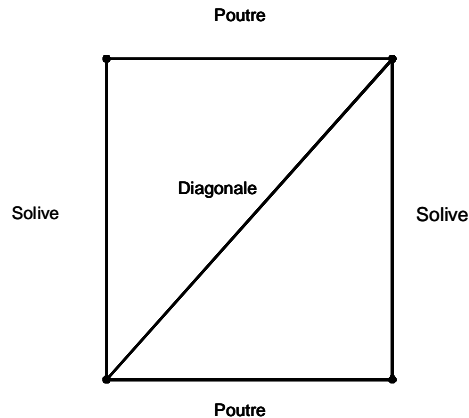


Figure 10 : Motif pour plancher ou diaphragme sous entrain

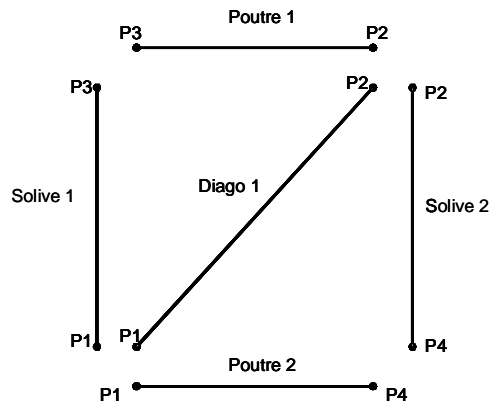


Figure 11: Différents éléments du motif pour plancher ou diaphragme sous entrain

Avec :
 Poutre 1 et Poutre 2 = éléments poutre
 Solive 1 et Solive 2 = éléments poutre
 Diago 1 = élément barre

Ensuite, dans le programme général, pour modéliser le diaphragme sous entrain on appelle la procédure en donnant des coordonnées de points extrêmes des diagonales de chaque triangulation (Figure 12).

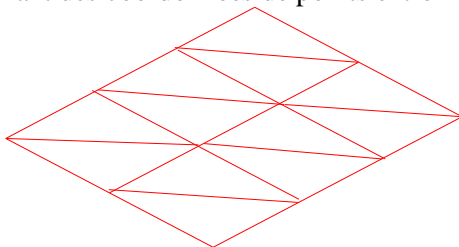


Figure 12: Plancher ou Diaphragme sous entrain

3.3 Motif pour charpente

Pour le motif de la charpente on fait une fermette générique, avec des arbalétriers, des entrails et des diagonales (Figure 13). On introduit en premier lieu les coordonnées génériques de 11 points pour former les lignes qui vont ensuite être des éléments structuraux ; et finalement on donne les relations entre les points créés.

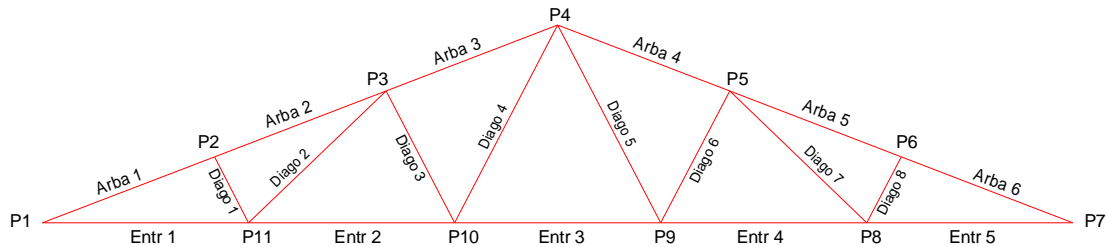


Figure 13 : Motif charpente avec différents éléments

Avec : Arba 1 à Arba 6 et Entr1 à Entr 5 ce sont des éléments de poutre.
 Diago 1 à Diago 8 ce sont des éléments de barre.

Pour modéliser la totalité de la charpente on répète la fermette générique en donnant la quantité des fermettes et leur espacement (Figure 14). Le maillage de la charpente est complété par la matérialisation de contreventements dans les plans de toiture.

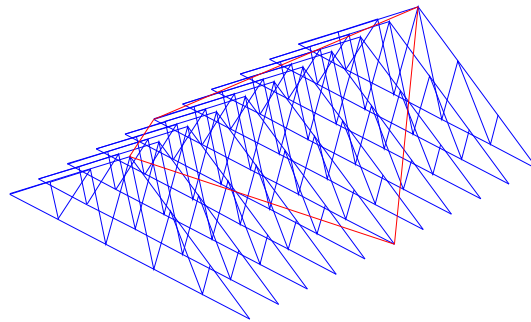


Figure14: Plan de charpente

3.4 Modélisation numérique et résultats

La méthode modale est utilisable, contrairement aux forces latérales, pour tous les bâtiments. Cette méthode consiste à résoudre l'équation générale de la dynamique. Le système à résoudre est constitué de n équations à n inconnues. Les modes propres sont les réponses harmoniques de la structure non amortie soumise à aucun chargement extérieur. Il faut donc trouver les solutions de $[U(t)]$ telles que :

$$[M] \cdot [\ddot{U}(t)] + [K] \cdot [U(t)] = 0$$

$[M]$ est la matrice de masse,

$[K]$ est la matrice de rigidité,

$[U \ddot{u}(t)]$ et $[U (t)]$ sont respectivement les vecteurs d'accélération et de position.

La masse de chaque niveau de la structure est composée, dans le modèle, par des masses ponctuelles distribuées au droit de chaque nœud principal des motifs élémentaires. Finalement, une analyse modale est conduite sur cette structure pour le calcul des fréquences propres et des modes propres en flexion et torsion suivant deux directions horizontales. Les figures 15, 16 et 17 rapportent les trois premiers modes propres de vibration (la structure initiale est en rouge et la structure déformée est en vert). Les deux modes de flexion sont proches, le premier mode de torsion se situe à fréquence encore relativement basse. Le quatrième mode de vibration est également un mode de torsion avec une fréquence propre de 2,582 Hz. Pour ces modes de vibration, les diaphragmes restent rigides et valident l'hypothèse de base de vérification des bâtiments en situation sismique. La rigidité du motif de mur a été calée sur celle d'un mur à ossature en bois courant. Celle du motif de diaphragme est proche de celle observée pour un plancher bois avec panneaux, solives, poutres de chaînage et entretoises.

- Mode de flexion suivant X : **f1 = 0,929 Hz**

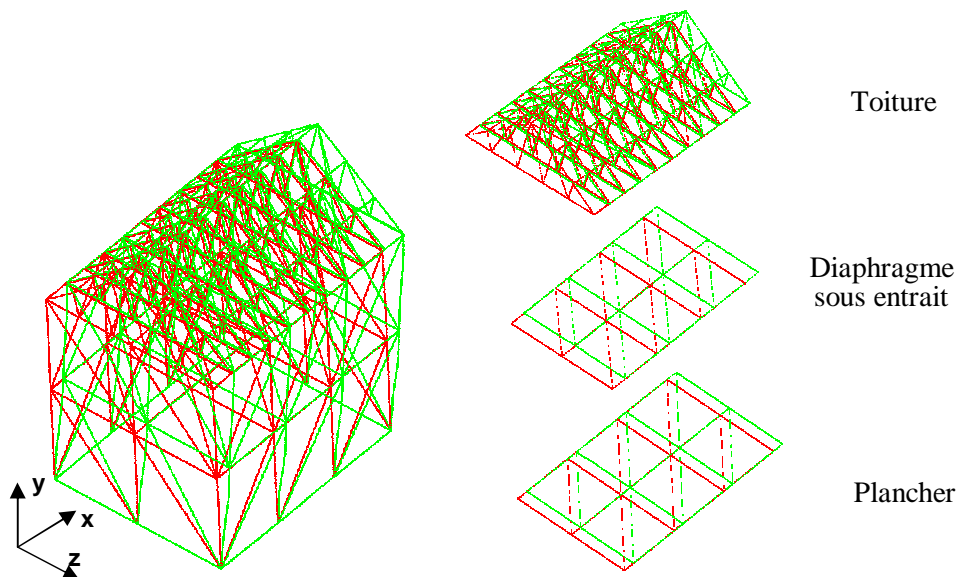


Figure 15 : La déformée de la struture pour la première mode de flexion suivant X

- Mode de flexion suivant Z : $f_2 = 1,070 \text{ Hz}$

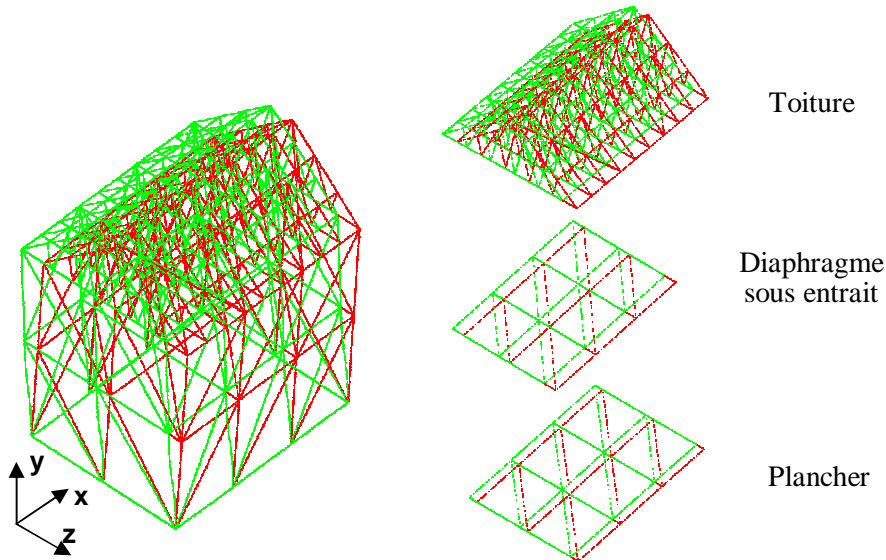


Figure 16 : La déformée de la struture pour la première mode de flexion suivant Z

- Mode de Torsion: $f_3 = 1,787 \text{ Hz}$

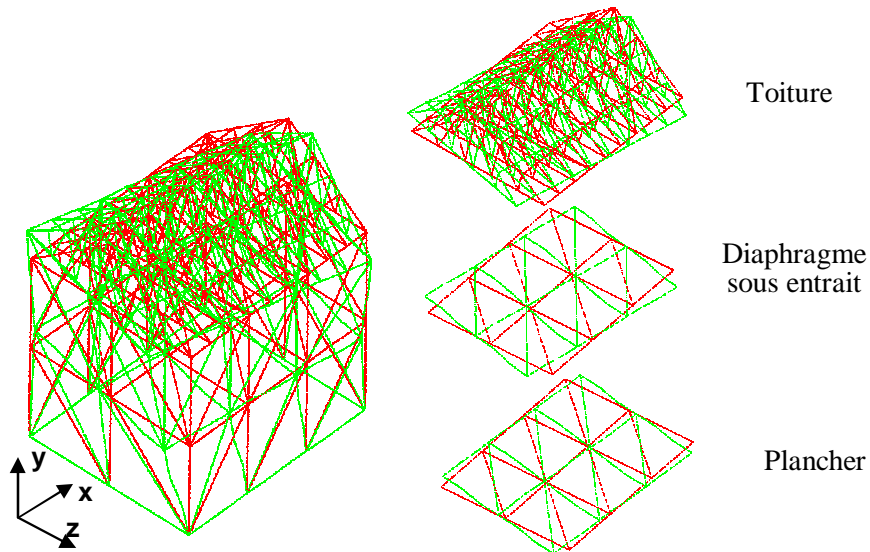


Figure 17 : La déformée de la struture pour la première mode de torsion

Dans le cadre de cette étude, l'étude modale 3D se limite à la seule recherche des modes propres avec vérification des hypothèses de base prises pour le calcul avec la méthode de la force latérale. L'étape suivante consiste à compléter cette étude par une méthode modale spectrale et déterminer les efforts dans chacun des contreventements et ainsi comparer les deux approches.

4. Conclusion

La présente étude a permis d'analyser l'influence des paramètres de « régularité » en plan sur les effets de la torsion d'axe vertical. L'application de cette étude a été conduite sur des bâtiments à ossature en bois contreventée par panneaux de particules, cloués à une ossature en bois massif ou reconstitué. Pour les bâtiments retenus dans le cadre de cette étude, qui sont des bâtiments courants pour habitat individuel ou petits collectifs, l'approche d'analyse globale par la méthode la force latérale est appropriée. Les résultats rapportés dans les parties 2.1 et 2.3 montrent l'efficacité de la méthode de la force latérale. Un des principaux intérêts de cette étude réside dans la démarche de classement de distribution s'appuyant sur la méthode néo-zélandaise qui permet de prendre en compte la torsion, associée à une étude de cas.

L'étude de l'analyse modale constitue la première étape dans l'approche par l'analyse modale spectrale avec utilisation d'un spectre de réponse qui permet de calculer les effets de l'action sismique (des efforts modaux). Une analyse des résultats issus de ces modèles permet de valider la démarche retenue pour prendre en compte les phénomènes de torsion sur des structures.

Ce travail est issu d'une étude qui a fait l'objet d'un contrat entre l'AFPS et le MEEDDAT (Fournely et al. 2008).

5. Bibliographie

- Chen X, Construction parasismique – règles simples pour les petits bâtiments en ossature bois, Mémoire d'ingénieur Polytech' Clermont-Ferrand, 2007.
- Dorca L.G., Influence des diaphragmes semi-rigides sur le comportement sismique des bâtiments courants, Mémoire d'ingénieur Polytech' Clermont-Ferrand, 2007.
- Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments, version EN 1995-1-1
- Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, version EN 1998-1.
- Capra A. et Davidovici V., «Calcul dynamique des structures en zone sismique », Editions EYROLLES, 1982
- Davidovici V., «Génie parasismique – V : Méthodes de calcul dynamique », Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées
- Fournely E., Lamadon T., "Design detailing for earthquake engineering – Application for timber structures", International workshop on earthquake engineering on timber structures, COST actionE29, 10 p Coimbra November 2006
- Fournely E., Lamadon T., « Régularité et comportement sismique de structures en bois pris en compte par l'Eurocode 8 », 7ème colloque national AFPS Ecole Centrale Paris, 8 p, juillet 2007
- Fournely E. et al, Guide de règles parasismiques simplifiées appliquées aux bâtiments courants, Rapport d'étude Plan séisme action 2.2.1.5, version 1.0, 526 p décembre 2008
- Jackson C. P., Booth E. D., Bisch P. et al, Manual for the seismic design of steel and concrete buildings to Eurocode 8, AFPS-SEDED-IstructE, 2008
- Nazé P.A. et al., Méthodes en déplacement : Principe-Codification-Application, Cahier technique AFPS, 2006

- Paulay T., Priestley M. J. N., Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings – Reinforced concrete ductile frames, elastic analysis for lateral forces, Wiley pp168-171, 1992
- Sidaner J.F., Fournely E. et al, Rapport de mission AFPS – Séisme de Chuetsu-Oki 16 juillet 2007 – AFPS – 168 p, octobre 2007
- Mele E., De Luca A., « Modelling and analysis of a basilica under earthquake loading », Journal of Cultural Heritage 4 (2003) 355–367
- Wilkinson S., Thambiratnam D. « Simplified procedure for seismic analysis of asymmetric buildings », Computers and Structures 79 (2001) 2833-2845
- Lui E. M. and Lopes A., «Dynamic analysis and response of semi-rigid frames », Engineering Structures, Vol 19, No 8, pp. 644–654, 1997
- Awkar J.C., Lui E.M., «Seismic analysis and response of multistory semirigid frames», Engineering Structures, Volume 21, Issue 5, Pages 425-442, May 1999.