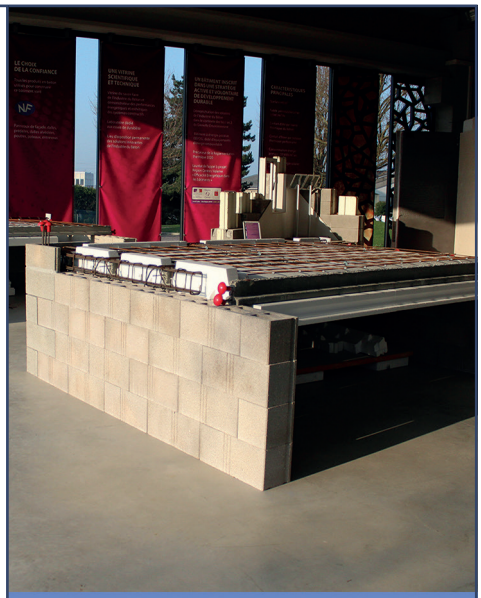
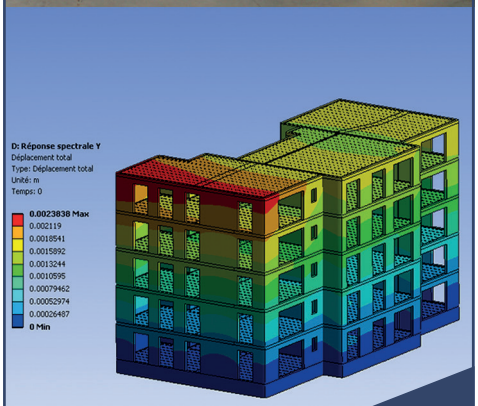




MODÉLISATION NUMÉRIQUE d'un bâtiment comportant des PLANCHERS à POUTRELLES avec rupteurs de ponts thermiques

Armand Leroux - Matthieu Scalliet

RAPPORT D'ÉTUDES ET RECHERCHES

CERIB
Expertise concrète

Études et Recherches
ALX
2104DS002 / Dimensionnement des structures

Modélisation numérique d'un bâtiment comportant des planchers à poutrelles avec rupteurs de ponts thermiques

362.E

par
Armand LEROUX
Matthieu SCALLIET

© 2015 CERIB – CS 10010 – 28233 Epernon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857552543

362.E – novembre 2015

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Sommaire

INTRODUCTION 5

1. Mise en données de la modélisation 7
   1.1. Le modèle 7
   1.2. Types de calculs réalisés 8
   1.3. Les matériaux 8
   1.4. Les types d'éléments finis 8
   1.5. Conditions limites et chargements 10
2. Types de résultats et critères utilisés 13
3. Conclusion 15

Bibliographie 17

Index des figures 19

INTRODUCTION

Il peut s'avérer nécessaire de modéliser les bâtiments pour justifier leur résistance aux sollicitations sismiques. Ce rapport traite du cas particulier d'ouvrages dans lesquels les planchers à poutrelles et entrevous sont équipés de rupteurs de ponts thermiques.

Les caractéristiques physiques en cisaillement (raideur, capacité résistante et coefficient de comportement) des nervures (transversales et longitudinales, cf. Figure 1) sont déterminées par des essais. Ce rapport présente la méthodologie de modélisation des structures composées de planchers à poutrelles équipés de rupteurs thermiques à utiliser. Cette méthode permet notamment de prendre en compte la souplesse, introduite par les rupteurs, dans la liaison traditionnelle plancher/mur de contreventement et ainsi observer son influence sur la distribution des efforts repris par les murs. Une modélisation correcte de ces liaisons (nervures) avec leur vraie identité (raideur…) permettra de réaliser un dimensionnement adapté (murs et nervures mur/plancher) à la réponse sismique de la structure.

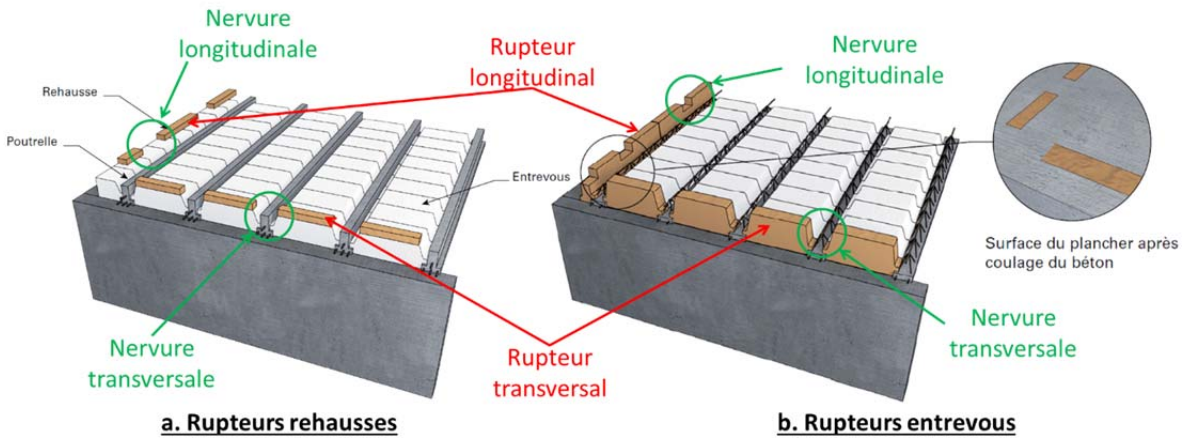


Figure 1 – Schématisation d'un plancher à poutrelles en présence de rupteurs longitudinaux et transversaux avant coulage de la table de compression

1. Mise en données de la modélisation

1.1. Le modèle

A partir de plans béton armé (cf. Figure 2) ou plans d'architectes et de plans de pose (cf. Figure 3), le bâtiment peut être modélisé et étudié sous sollicitations sismiques.

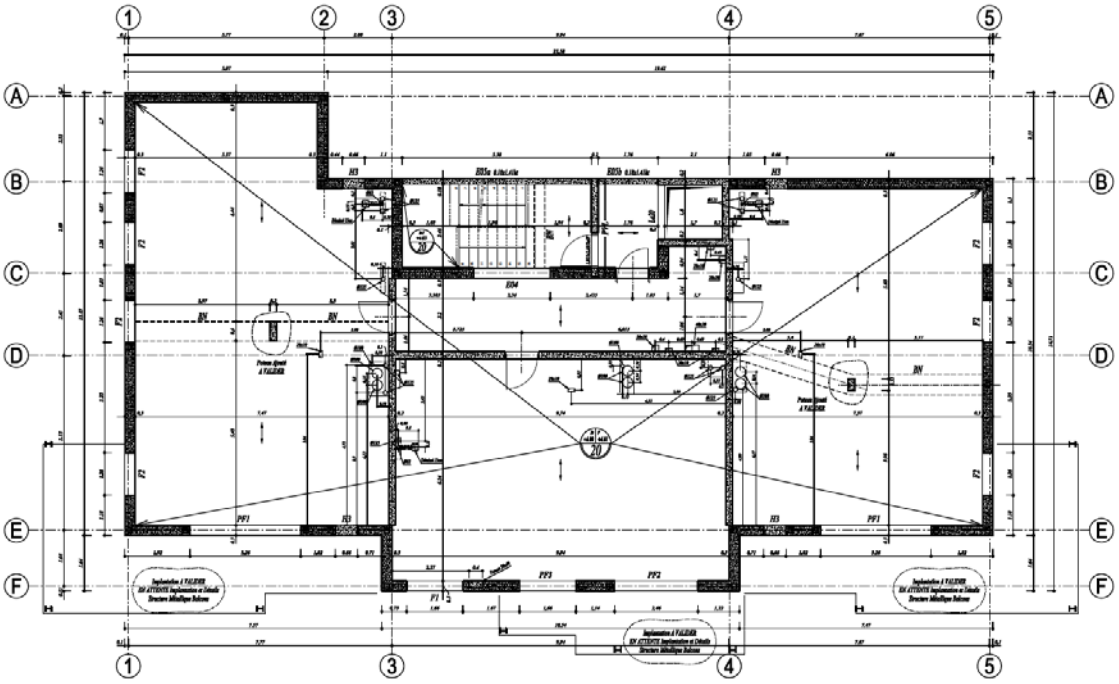


Figure 2 – Exemple de plan béton armé - Vue en plan

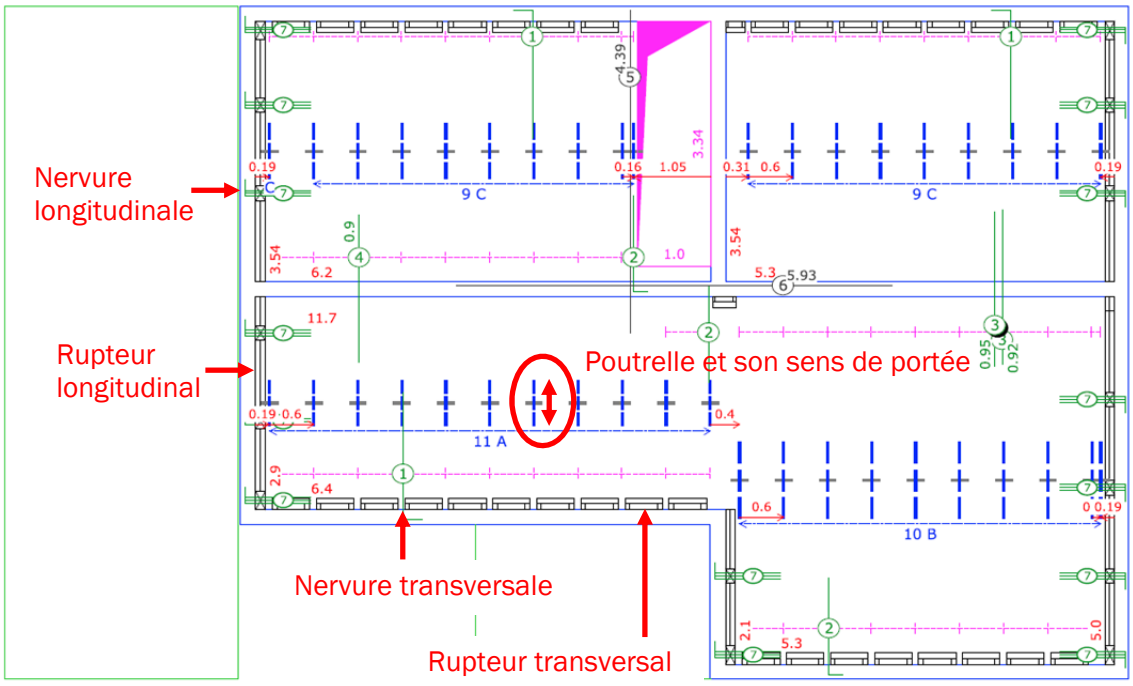


Figure 3 – Exemple de plan de pose - Vue en plan indiquant la position des poutrelles et des rupteurs

1.2. Types de calculs réalisés

Un premier calcul modal est réalisé pour lequel la somme des masses modales effectives du bâtiment doit permettre d'atteindre au minimum :

- 90 % de la masse totale de la structure ;
- ou 70 % de la masse totale de la structure, à condition de prendre en compte les modes résiduels.

Dans ce cas, un calcul spectral peut ensuite être réalisé avec la combinaison quadratique complète des modes propres, appelée méthode CQC (Complete Quadratic Combination).

1.3. Les matériaux

Etant donné les types de calculs réalisés, l'ensemble des lois de comportement utilisées dans cette étude sont élastiques linéaires.

Les différents éléments pris en compte dans cette modélisation avec les particularités de leur matériau sont :

- Les murs : module d'élasticité divisé par deux pour tenir compte de la fissuration (NF EN 1998-1 4.3.1(7)) et prise en compte du poids propre via la masse volumique (exemples : murs en béton de classe C25/30 avec un module d'élasticité à considérer de 15.5 GPa ou des murs en maçonnerie chaînée avec un module d'élasticité à considérer de 2 GPa) ;

- Les tables de compression des planchers (exemple : béton de classe C25/30 avec E_{cm}=31 GPa) où les différentes charges, comme les charges permanentes, les surcharges d'exploitation (affectées d'un coefficient $\psi 2$ =0.30 pour l'action sismique dans le cas de bâtiment à usage d'habitation) et le poids propre des planchers (poids propre des poutrelles, de la dalle de répartition et des entrevous), sont pris en compte via la masse volumique ;

- Les poutrelles et le béton de clavetage (exemple : béton de classe C30/37 avec E_{cm}=33 GPa) ;

- Les chaînages (exemple : béton de classe C25/30 avec E_{cm}=31 GPa) ;

- La toiture légère (diaphragme rigide) : le poids propre de celle-ci est considéré au travers de la masse volumique d'un plancher infiniment rigide (cf. Figure 4) ;

- Ne contribuant pas mécaniquement, les entrevous ne sont pas modélisés, seul leur poids a été considéré ci-avant dans la table de compression.

1.4. Les types d'éléments finis

Les différents éléments finis utilisés dans la modélisation de ce bâtiment sont :

- Les murs : éléments finis de type coque ;

- Les tables de compression des planchers : éléments de type coque ;

- Les poutrelles et le béton de clavetage : éléments finis de type poutre avec les vraies sections ou par simplicité une section équivalente ;

- Les chaînages : éléments finis de type poutre ;

- La toiture légère : un plancher avec des éléments de type coque où les déplacements sont liés afin d'empêcher la déformation de ce plancher dans son plan (diaphragme rigide) ;

- Les rupteurs : pour ces bâtiments équipés de rupteurs transversaux et longitudinaux, des liaisons discontinues en béton armé appelées nervures dans ce rapport (cf. Figure 1) permettent de relier les murs à la dalle de compression.
  Numériquement, les nervures en béton armé sont modélisées avec comme représentation des rupteurs, des réservations (pas de contribution mécanique du polystyrène). Chaque liaison (nervure) peut être, par exemple, modélisée par trois ressorts reprenant les trois degrés de liberté en translation.
  Pour chacun de ces ressorts et ceci pour chaque type de rupteurs, une raideur doit être renseignée. La raideur en traction et en compression sera celle du béton d'un plancher avec comme section celle de chaque type de nervure ($k_{traction}=k_{compression}=E_{cm}S_{transversale}/L_{transversale}$), ($k_{traction}=k_{compression}=E_{cm}S_{longitudinale}/L_{longitudinale}$), tandis que les raideurs en cisaillement (horizontale et verticale) seront celles définies expérimentalement.

La prise en compte de l'ensemble de ces éléments permet d'obtenir une modélisation comme représentée dans l'exemple de la Figure 4.

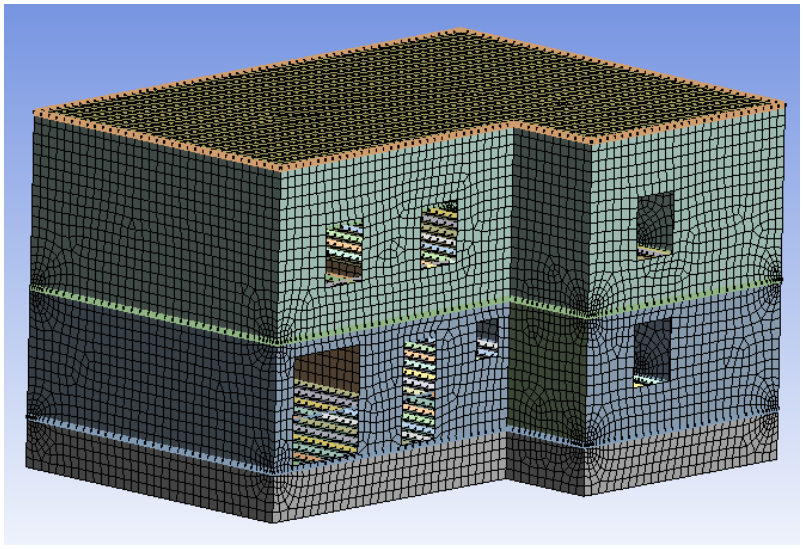


Figure 4 – Géométrie et maillage du bâtiment

1.5. Conditions limites et chargements

Les murs de la structure sont considérés encastrés en pied comme sur la Figure 5.

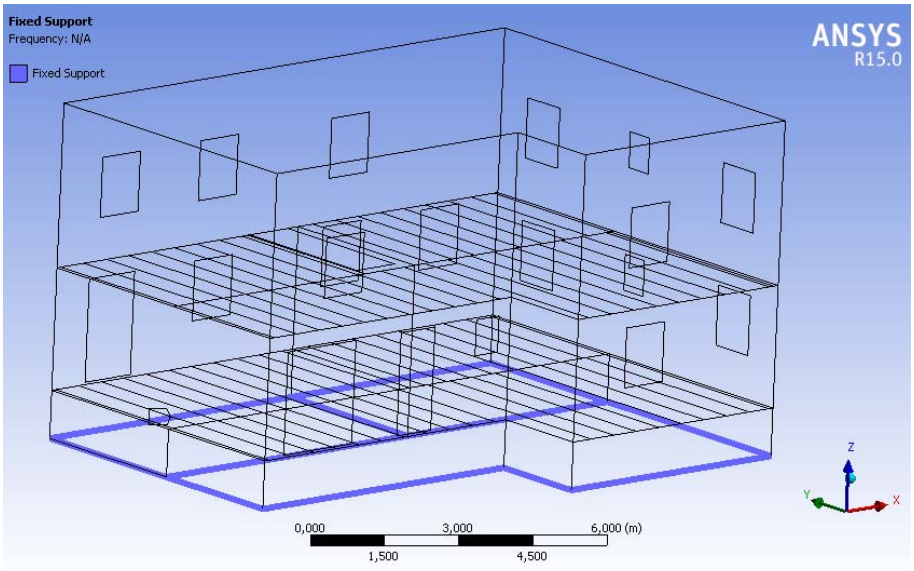


Figure 5 – Conditions limites d'encastrement en pied de murs (traits épais de couleurs)

En complément des charges prises en compte directement via la masse volumique (cf. paragraphe 1.3), des charges additionnelles peuvent être appliquées :

- Si le bâtiment comporte des balcons avec des dimensions raisonnables (porte à faux de 2 m maximum), ceux-ci peuvent être considérés comme des masses rapportées sur les façades ;

- Si le bâtiment comporte une zone de circulation avec cage d'escalier et ascenseur ouverte sur l'extérieur, ces éléments peuvent être considérés comme une masse rapportée sur la longueur de façade.

Le spectre de calcul (Figure 6), qui sera appliqué sur les conditions limites d'encastrement, est basé sur l'Eurocode 8 [1] accompagné de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié [2]. Il est fonction de la zone de sismicité, de la catégorie de bâtiment, de la classe de sol et d'un coefficient de comportement dont sa valeur sera la plus petite entre celle du bâtiment (murs en maçonnerie chaînée ou béton armé par exemple) et celle des nervures transversales ou longitudinales caractérisées expérimentalement. Ce spectre, représenté en période sur la Figure 6, voit son plateau entre T_B et T_C prolongé, de manière sécuritaire, jusqu'à la période T égale à zéro afin de s'assurer que la structure étudiée soit sollicitée par l'accélération maximale du spectre. A noter que ce choix sécuritaire (permettant par exemple de définir un domaine de bâtiment) n'est pas une obligation pour la justification d'un bâtiment particulier.

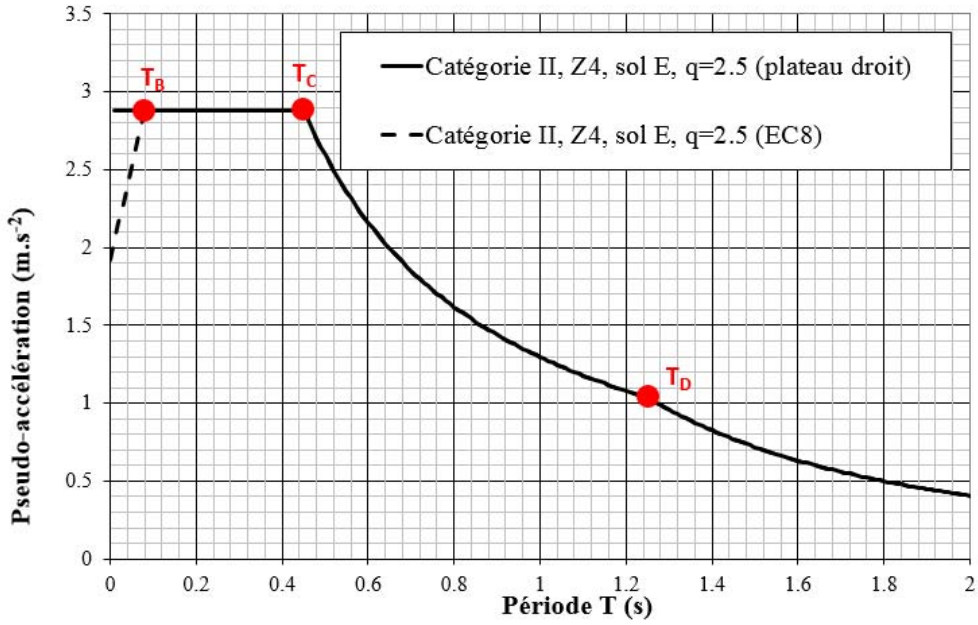


Figure 6 – Exemple de spectre de calcul accélération VS période avec q=2.5

Comme l'indique l'EC8-1 §4.3.3.5.1(3), les effets de l'action dus à la combinaison des composantes horizontales de l'action sismique (directions horizontales X et Y suivant le repère visible sur les Figure 4 et Figure 5 par exemple) sont calculés en utilisant les deux combinaisons suivantes :

- 0.3 E_{Edx} « + » E_{Edy}
- E_{Edx} « + » 0.3 E_{Edy}

Où :
«+» signifie «être combiné avec»

E_{Edx} sont les effets de l'action dus à l'application de l'action sismique le long de l'axe horizontal x choisi pour la structure ;

E_{Edy} sont les effets de l'action dus à l'application de la même action sismique, le long de l'axe horizontal orthogonal y de la structure.

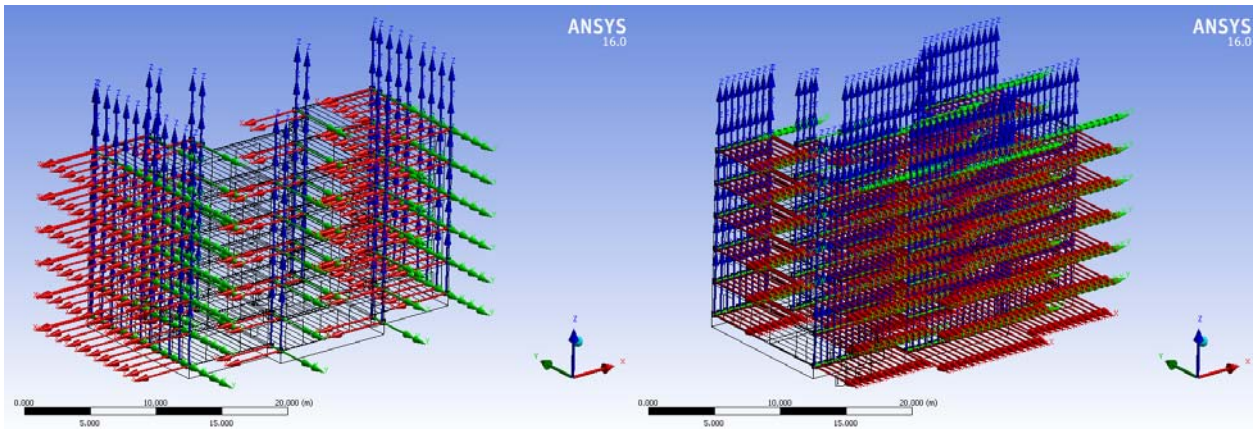
Dans les combinaisons ci-dessus, le signe adopté pour chaque composante doit être le plus défavorable pour l'effet particulier considéré.

Lors de l'analyse des résultats, la combinaison la plus pénalisante est retenue.

2. Types de résultats et critères utilisés

Deux types de résultats sont observés :

- La distribution des efforts dans les murs de contreventement à chaque niveau ;
- Les efforts dans les nervures des rupteurs thermiques transversaux et longitudinaux : la compatibilité des efforts entre ceux obtenus numériquement et ceux déterminés expérimentalement pour chaque type de nervure (transversales et longitudinales, cf. Figure 7, par exemple, où chaque repère est une nervure) est observée.



a. Nervures longitudinales b. Nervures transversales

Figure 7 – Exemple de nervures situées entre deux rupteurs thermiques (un repère = une nervure)

Dans la vérification de la résistance des nervures, un critère de surdimensionnement prévoit la défaillance potentielle d'une nervure. Le coefficient de 1,50 sur l'effort normal suppose un report sur les deux nervures adjacentes. Le coefficient de 1,20 sur l'effort tranchant horizontal fait l'hypothèse d'une redistribution de l'effort sur 5 nervures.

- Pour les nervures longitudinales :

$$1.5\frac{N^L_{Sd,num.}}{N^L_{Rd,calcul}} + 1.2\frac{V^L_{Sd,num.}}{V^L_{Rd,calcul}} \leq 1$$

Où :

- $V^L_{Sd,num.}$ est l'effort de cisaillement horizontal sollicitant une nervure longitudinale, effort obtenu par étude numérique ;
- $V^L_{Rd,calcul}$ est l'effort résistant de calcul sous cisaillement horizontal, déterminé expérimentalement pour une nervure longitudinale ;
- $N^L_{Sd,num.}$ est l'effort normal sollicitant une nervure longitudinale, effort obtenu par étude numérique ;
- $N^L_{Rd,calcul}$ est l'effort normal résistant de calcul, déterminé analytiquement pour une nervure longitudinale (cf. exemple ci-après).

- Pour les nervures transversales :

$$1.5\frac{N_{Sd,num.}^{T}}{N_{Rd,calcul}^{T}} + 1.2\frac{V_{Sd,num.}^{T}}{V_{Rd,calcul}^{T}} \leq 1$$

Où :

- $V_{Sd,num.}^{T}$ est l'effort de cisaillement horizontal sollicitant une nervure transversale, effort obtenu par étude numérique ;
- $V_{Rd,calcul}^{T}$ est l'effort résistant de calcul sous cisaillement horizontal, déterminé expérimentalement pour une nervure transversale ;
- $N_{Sd,num.}^{T}$ est l'effort normal sollicitant une nervure transversale, effort obtenu par étude numérique ;
- $N_{Rd,calcul}^{T}$ est l'effort normal résistant de calcul, déterminé analytiquement pour une nervure transversale (cf. exemple ci-après).

Exemple de détermination analytique des efforts normaux :

Supposons une nervure composée de trois barres d'acier HA 8 : la limite d'élasticité considérée est de 500 MPa avec la valeur du coefficient partiel retenue γ_s=1 pour l'acier comme l'indique l'annexe nationale NF EN 1998-1/NA clause 5.2.4(3) Note 2. L'effort théorique d'arrachement repris par les barres de cette nervure est : $N_{Arra.}$ = 75.4 kN.

*Concernant l'effort de compression, celui-ci est repris par le béton de classe de résistance C25/30 de la nervure. La section de la nervure est de 0.2*0.05 m² dans cet exemple. Comme l'indique l'annexe nationale NF EN 1998-1/NA clause 5.2.4(3) Note 2, la valeur du coefficient partiel pour le béton retenue est γ_c=1.3. L'effort théorique de compression repris par le béton de la nervure est : $N_{Compr.}$ = 192.3 kN.*

Par sécurité et perdant tout signe des efforts lors des différents calculs (calcul spectral basé sur une combinaison quadratique complète des modes propres), les efforts normaux résistants retenus seront les efforts les plus faibles, c'est-à-dire l'effort d'arrachement dans l'exemple ci-dessous :

$$N_{Rd,calcul} = min\left[N_{Arra.}; N_{Compr.}\right] = N_{Arra.} = 75.4\ kN$$

La résistance verticale n'est pas prise en compte de manière explicite dans le critère proposé. Autrement dit, l'existence d'un cisaillement vertical dans les nervures est indirectement prise en compte dans la vérification du critère car il est supposé que la résistance de cisaillement horizontale a été obtenue expérimentalement en chargeant les deux types de nervures (longitudinale et transversale) afin de reproduire dans celles-ci un taux de cisaillement vertical correspondant à celui observé sous la combinaison sismique dans la situation la plus défavorable.

De ce fait, il n'est pas nécessaire de caractériser la raideur verticale des nervures : étant donné que la raideur au cisaillement est proportionnelle à la section de la nervure S et au module de cisaillement G, il est légitime de prendre comme valeur de raideur verticale, celle de la raideur horizontale déterminée expérimentalement.

3. Conclusion

Ce document présente une méthode de modélisation des bâtiments composés de planchers à poutrelles et équipés de rupteurs de ponts thermiques sous sollicitation sismique. Cette méthode a été utilisée dans le cadre d'une étude sismique financée par l'industrie du béton et l'AFIPEB[1] en collaboration avec le CERIB[2] et le CSTB[3] et validée par APAVE, SOCOTEC, BUREAU VERITAS, la FFB[4] et le CSTB.

Cette méthodologie permet de réaliser un dimensionnement adapté en déterminant la répartition des efforts dans les murs de contreventement et en vérifiant, en particulier, la résistance des nervures en béton armé créées par la présence de rupteurs thermiques à partir de résultats expérimentaux sur les nervures et des critères en effort.

[1] Association Française de l'Isolation en Polystyrène Expansé dans le Bâtiment
[2] Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton
[3] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
[4] Fédération Française du Bâtiment

Bibliographie

[1] Eurocode 8, NF EN 1998-1 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments

[2] Arrêté du 25 octobre 2012 modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »

Index des figures

Figure 1 – Schématisation d'un plancher à poutrelles en présence de rupteurs longitudinaux et transversaux avant coulage de la table de compression 5
Figure 2 – Exemple de plan béton armé - Vue en plan 7
Figure 3 – Exemple de plan de pose - Vue en plan indiquant la position des poutrelles et des rupteurs 7
Figure 4 – Géométrie et maillage du bâtiment 9
Figure 5 – Conditions limites d'encastrement en pied de murs (traits épais de couleurs) 10
Figure 6 – Exemple de spectre de calcul accélération VS période avec q=2.5 11
Figure 7 – Exemple de nervures situées entre deux rupteurs thermiques (un repère = une nervure) 13

MODÉLISATION NUMÉRIQUE d'un bâtiment comportant des PLANCHERS à POUTRELLES avec rupteurs de ponts thermiques

Armand Leroux - Matthieu Scalliet

Il peut s'avérer nécessaire de modéliser les bâtiments pour justifier leur résistance aux sollicitations sismiques. Ce rapport traite du cas particulier d'ouvrages dans lesquels les planchers à poutrelles et entrevous sont équipés de rupteurs de ponts thermiques.
Les caractéristiques physiques en cisaillement (raideur, capacité résistante et coefficient de comportement) des nervures (transversales et longitudinales) sont déterminées par des essais. Ce rapport présente la méthodologie de modélisation des structures composées de planchers à poutrelles équipés de rupteurs thermiques à utiliser. Cette méthode permet notamment de prendre en compte la souplesse, introduite par les rupteurs, dans la liaison traditionnelle plancher/mur de contreventement et ainsi observer son influence sur la distribution des efforts repris par les murs. Une modélisation correcte de ces liaisons (nervures) avec leur vraie identité (raideur...) permettra de réaliser un dimensionnement adapté (murs et nervures mur/plancher) à la réponse sismique de la structure.

NUMERICAL ANALYSIS of structures with BLOCK-AND-BEAM FLOORS and thermal breaks

It can be necessary to model with finite elements the global buildings to justify their resistance to seismic loading. This report deals with the case of buildings in which the block-and-beam floors are equipped with thermal breaks.
Shear characteristics (stiffness, resistance and behavior factor) of the ribs (longitudinally and transversally) were determined by testing. This report presents the base to achieve a numerical analysis of structures with block-and-beam floors and thermal breaks. This method take into account the flexibility introduced by thermal breaks in the traditional connection floor /wall and show their influence on the structural response (distribution of the efforts in the walls and checking the resistance of these connection points). A good numerical modeling of these ribs with their true characteristics (stiffness ...) will achieve an appropriate structural design (walls and ribs wall / floor) to the seismic response of the building.

afaq ISO 9001 Qualité AFNOR CERTIFICATION
Études et Recherches

Dimensionnement des structures
362.E

CERIB Expertise concrète
Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton
1 rue des Longs Réages
CS 10010 - 28233 Épernon cedex
Tél. 02 37 18 48 00 - Fax 02 37 83 67 39 - cerib@cerib.com
www.cerib.com