

Conférence « Concevoir et construire parasismique »
Lyon - 10 mars 2010

CONCEPTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS

Milan ZACEK

1. LA FRANCE EST-ELLE SISMIQUE ?

La réponse est positive. En métropole, la période de retour des séismes d'intensité macrosismique VIII (effondrement partiel ou total des bâtiments en maçonnerie) est de 65 ans et d'intensité IX (effondrements total des bâtiments en maçonnerie) de 175 ans. La carte de sismicité historique ci-dessous montre les principaux épicentres depuis 1000 ans.



En termes de magnitude (échelle de Richter), en métropole, les séismes les plus importants peuvent atteindre le degré 6

Dans les départements d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique), les séismes destructeurs sont plus violents et plus fréquents

2. STRATEGIES DE PREVENTION DU RISQUE SISMIQUE

2.1. IMPACT DES SEISMES

Les tremblements de terre sont inévitables

Ils entraînent trop souvent:

- pertes de vies humaines
- destruction du patrimoine bâti
- arrêt ou ralentissement de l'activité économique



L'Aquila, Italie 2009

Photo mircosim

Or l'effondrement des bâtiments n'est pas inévitable

Milan ZACEK

2.2. QUELLE STRATEGIE DE PREVENTION ?

- **Prédiction des séismes :**
 - non opérationnelle
 - limitée à la sauvegarde des vies humaines
- **Résistance des ouvrages aux séismes :**
seule stratégie efficace, d'où la réglementation parasismique

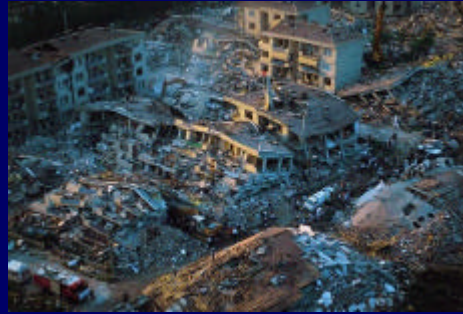
On ne « commande pas » aux séismes, mais l'homme est entièrement responsable des constructions qu'il édifie
Or plus de 90% de pertes en vies humaines sont dues à l'effondrements de constructions, alors que
la construction de bâtiments résistant à tous les séismes est possible

Milan ZACEK

De nombreuses constructions qui résistent aux charges habituelles (charges gravitaires, vent, neige,...) s'effondrent quand elles sont secouées (cf. photos)...alors que d'autres résistent



Kalamata, Grèce 1987



Izmit, Turquie 1999

Milan ZACEK

2.3. CARACTERISTIQUES DES CONSTRUCTIONS RESISTANT AUX SEISMES

- **Conception d'ensemble** qui optimise les oscillations et limite les concentrations de contraintes
- **Matériaux** supportant naturellement les secousses (acier, bois)
- **Confinement des matériaux « fragiles »**, qui se disloquent sous l'effet des secousses (maçonnerie, béton)
- **Capacité à se déformer** plutôt que rompre (ductilité des éléments porteurs et des assemblages)
- **Dimensionnement** suffisant pour résister aux charges sismiques

Milan ZACEK

3. QUAND UNE CONSTRUCTION EST-ELLE PARASISMIQUE ?

Trois conditions doivent être remplies :

Conception architecturale parasismique

- Implantation tenant compte des effets de site
- Architecture favorable à la résistance aux séismes

+

Application des règles parasismiques

- Dispositions constructives
- Dimensionnement

+

Mise en œuvre soignée

- Matériaux de qualité
- Exécution dans les règles de l'art

Une étroite collaboration entre l'architecte, l'ingénieur et l'entrepreneur est donc souhaitable

Milan ZACEK

4. SITE D'IMPLANTATION

4.1. PRISE EN COMPTE DU SITE

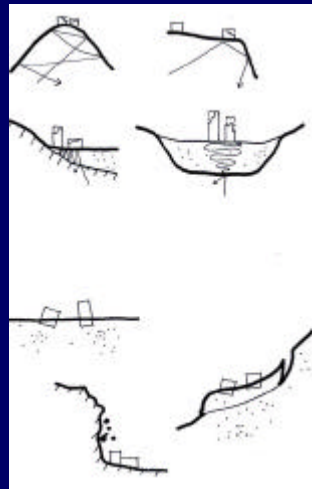
Effets de site

- effets topographiques
- effets lithologiques
 - piégeage d'ondes entre roche et sols mous
 - amplification des secousses dans de fortes épaisseurs de sols mous

Effets induits

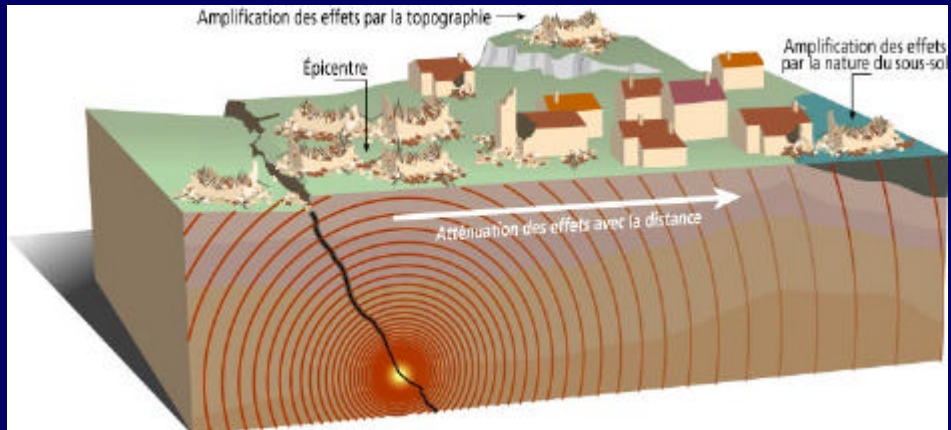
- liquéfaction des sols
- glissement de terrain
- éboulement rocheux

Failles actives



Milan ZACEK

4.2. EFFETS DE SITE



Effet de site topographique



Rognes, France 1909



4.3. EFFETS INDUITS

4.3.1. Liquéfaction du sol



Séismes de Niigata, Japon 1964 et d'Izmit, Turquie 1999

Milan ZACEK

Prise en compte de la liquéfaction des sols par l'Eurocode 8

- L'identification des sols liquéfiables est obligatoire
Sont liquéfiables les sables fins lâches et certaines argiles saturés d'eau
- Démarches en cas de sol liquéfiable :
 - . traitement du sol, p. ex. par vibroflottation
 - . substitution du sol
 - . fondation de l'ouvrage au-dessous des couches liquéfiables, en tenant compte de l'action du sol liquéfié (à > 15 m de profondeur)



Vibroflotation group



Colonnes ballastées mises en place par vibroflottation

Milan ZACEK

Glissement de terrain

L'Eurocode 8 interdit de construire sur les pentes instables



Kobé, Japon 1995



NISEE

Alaska, USA 1964

Milan ZACEK

Eboulement rocheux

L'Eurocode 8 interdit de construire sur les pentes instables



NISEE

Californie, USA 1971

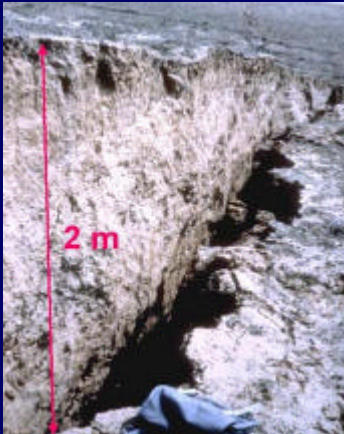


Balandier

Guadeloupe, France

Milan ZACEK

4.4. JEU DE FAILLE



P. Mouroux

Rejet vertical
Séisme d'El Asnam 1980



R. H. Ressmeyer, Starlight

Rejet et décrochement
Séisme de Landers, USA 1992

Milan ZACEK

Immeubles sur faille

Les constructions ne devraient pas être implantées à proximité des failles actives



NISEE



NISEE

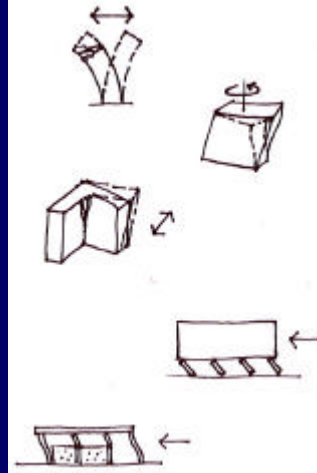
Séisme de Chi-Chi, Taiwan 1999

Milan ZACEK

5. CHOIX DE L'ARCHITECTURE

5.1. COMMENT PREVENIR LES EFFETS DESTRUCTEURS MAJEURS

- Résonance du bâtiment avec le sol
- Torsion d'ensemble
- Oscillations différentielles
- Effet de niveau souple
- Effet de poteau court



Milan ZACEK

5.2. RESONANCE DU BATIMENT AVEC LE SOL

Résonance = oscillations amplifiées

Situation de résonance : $T_{\text{bâtiment}} = T_{\text{sol}}$



Rocher



Sol mou

Milan ZACEK

Illustration de la résonance sur table vibrante



Gérald HIVIN

Dommmages sismiques dus à la résonance du bâtiment avec le sol



NISEE



NISEE

Séisme du Mexique, Mexico 1985

Milan ZACEK

5.3. TORSION D'ENSEMBLE

Localisation incorrecte des murs assurant le contreventement du rez-de-chaussée d'une maison en Martinique (zone de forte sismicité)



M. Zacek

Avant le séisme



Pendant le séisme

Milan ZACEK

Dommages sismiques dus à la torsion d'ensemble



Wakabayashi



Wakabayashi



NISEE



Milan ZACEK

Bâtiments exposés à la torsion d'ensemble



M. Zacek

Maison en Grèce

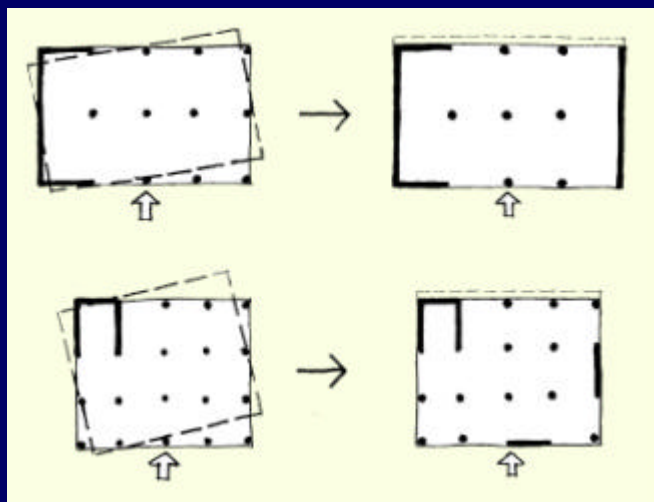


P. Balandier

Bâtiment public
en Guadeloupe

Milan ZACEK

Limitation de la torsion d'ensemble



Torsion importante

Torsion corrigée

Milan ZACEK

5.4. OSCILLATIONS ASYNCHRONES



B. Weliachew



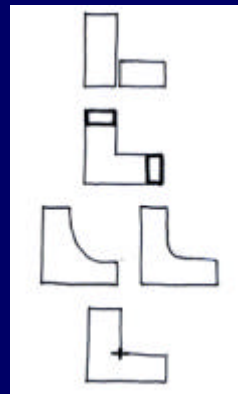
B. Weliachew

Séisme de Kobé, Japon 1995

Milan ZACEK

Solutions supprimant ou limitant les effets des oscillations asynchrones (différentielles)

- Joints parasismiques
- Rigidifier les zones flexibles
- Variation progressive de la rigidité
- Renforcement de l'angle rentrant



Milan ZACEK

Largeur de joint insuffisante : entrechoquement



NISEE

Séisme d'Izmit, Turquie
1999



NISEE

Séisme de San Fernando
Californie, 1971

Milan ZACEK



M. Zacek

Variation progressive
de la rigidité



M. Zacek

Rigidification des pignons

Milan ZACEK

Solutions pour les retraits d'étage



M. Zacek



M. Zacek

Tokyo, Japon

Milan ZACEK

5.5. EFFET DE NIVEAU SOUPLE

Niveaux ouverts ou largement vitrés

Préjudiciables lorsqu'il y a une grande différence de rigidité entre le niveau transparent et les autres niveaux (effet de niveau souple)

Conséquence de la présence d'un niveau souple : effondrement



P. Balandier

Ceyhan-Misis, Turquie 1998

Milan ZACEK

Dommmages dus à l'effet de niveau souple



B. Weliachew



NISEE



Séisme de Kobé, Japon 1995

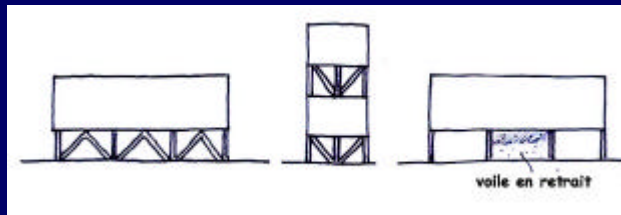


Séisme de San Fernando, USA 1971
et de Boumerdès, Algérie 2003

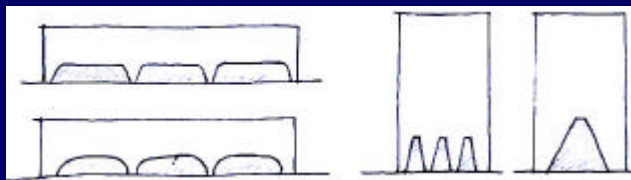
Milan ZACEK

Solutions visant à éviter l'effet de niveau souple

- Contreventement en façade ou en retrait



- Variation progressive de la rigidité horizontale



Milan ZACEK

Exemple : le mur en rez-de-chaussée a empêché l'effondrement d'une partie du bâtiment



P. Balandier

Séisme de Ceyhan-Misis, Turquie 1998

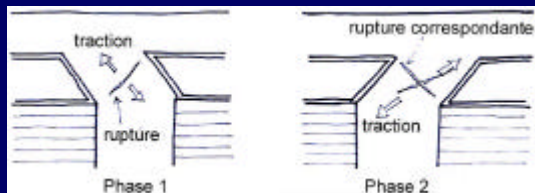
Milan ZACEK

5.6. EFFET DE POTEAU COURT

Cas : poteaux de faible hauteur ou « bridés » par d'autres éléments

Rupture brutale ayant pour cause :

- faible déformabilité
- comportement fragile
- charge importante (proportionnelle à la rigidité latérale)



Rupture par cisaillement des poteaux bridés

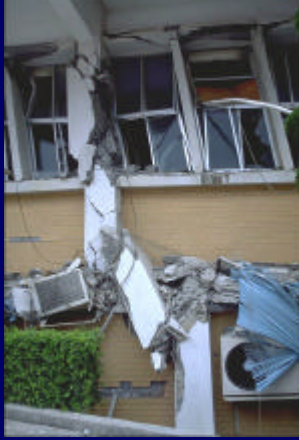


Wakabayashi

Séisme de Tokachi-Oki
Japon 1968

Milan ZACEK

Allèges rigides : effet de poteau court



NISEE



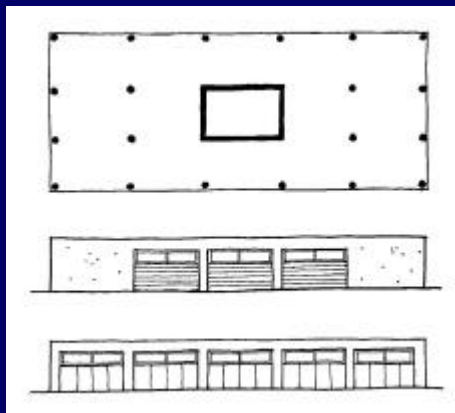
NISEE

Séisme de Chi-Chi, Taiwan 1999

Milan ZACEK

Solutions visant à éviter l'effet de poteau court dû à la présence d'allèges rigides

- contreventement par voiles en façade ou à l'intérieur du bâtiment
- allèges non rigides en bois ou métal



Milan ZACEK

Effet de poteau court en soubassement et au droit des paliers d'escalier



A. Hadj Hamou



A. Hadj Hamou



NISEE

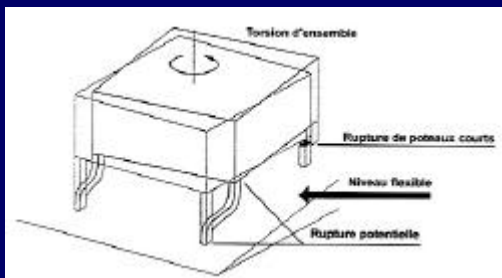
Séisme d'El Asnam, Algérie 1980

Milan ZACEK

5.7. CAS PARTICULIER DES CONSTRUCTIONS SUR VERSANT

Phénomènes destructeurs potentiels :

- torsion
- effet de niveau souple
- effet de poteau court
- effets induits : glissement de terrain, éboulement



Comportement dynamique



M. Zacek

Conception défavorable

Milan ZACEK

Constructions sur versants



M. Zacek

Maison vulnérable à la torsion



NISEE

Solution : contreventement

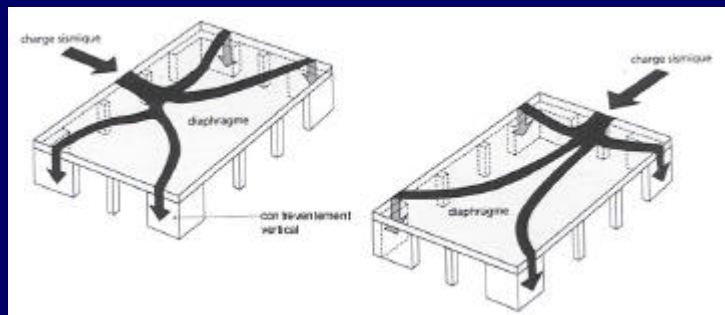
Milan ZACEK

6. CONSTRUCTION PARASISMIQUE

6.1. CONTREVENTEMENT

PRINCIPE

Solution obligatoire : contreventement horizontal (diaphragmes)
+ contreventement vertical

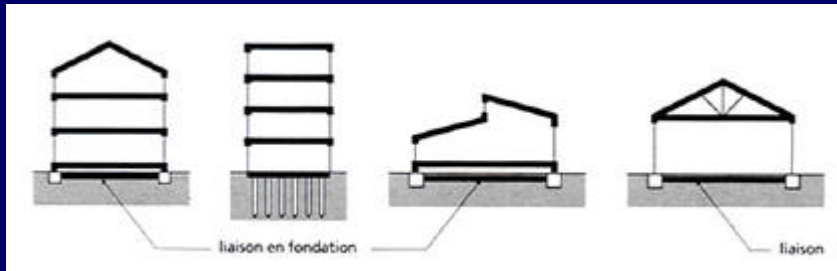


Milan ZACEK

DIAPHRAGMES

Localisation :

- planchers de tous les niveaux
- versants des toitures
- plans des entrails (charpentes)



Milan ZACEK

La fonction diaphragme implique :

- Ancrage périphérique : tous les éléments constitutifs doivent être ancrés en rive
- Continuité mécanique sur appuis intermédiaires
- Solidarisation des composants juxtaposés et superposés

Ces exigences sont obtenues par des dispositions constructives propres à chaque type d'ouvrage

Milan ZACEK

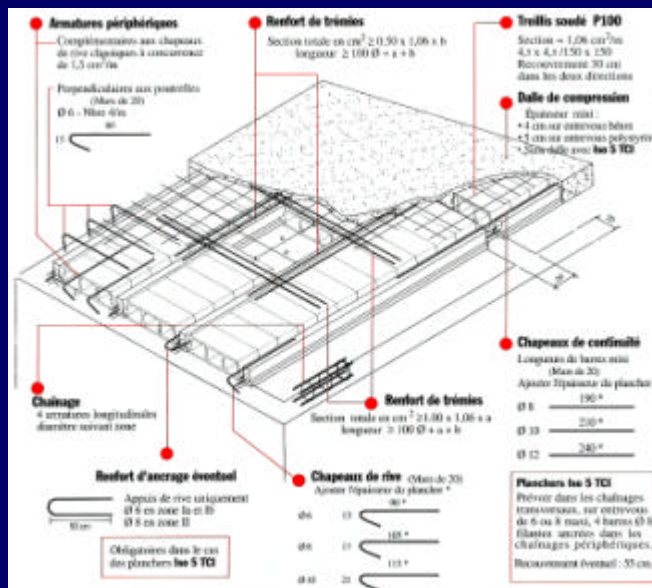
Destruction de diaphragmes non ancrés



Séismes de Tangshan, Chine 1976 et de Spitak, Arménie 1988

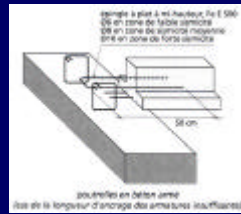
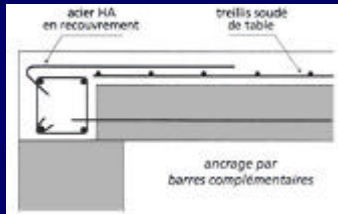
Milan ZACEK

Plancher-diaphragme en poutrelles et entrevous

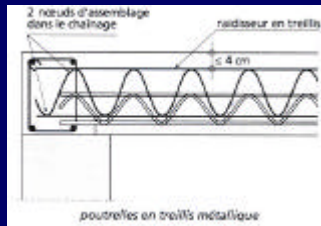


Milan ZACEK

Ancrage du diaphragme, sens porteur



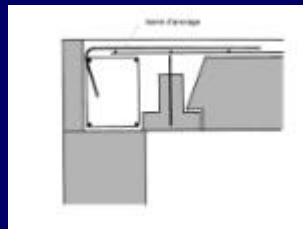
Poutrelles en béton armé ou précontraint



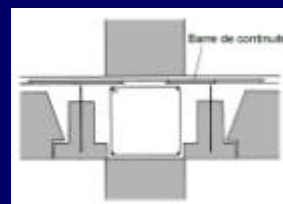
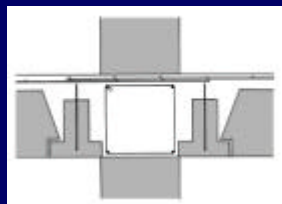
Poutrelles en treillis métalliques avec talon en béton

Milan ZACEK

Ancrage du diaphragme, sens non porteur Continuité du diaphragme



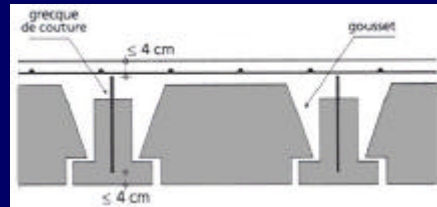
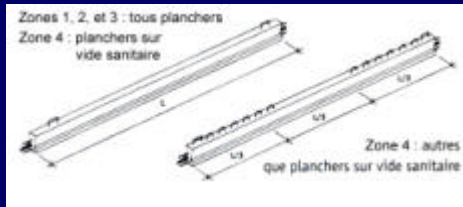
Ancrage des poutrelles en béton armé ou précontraint



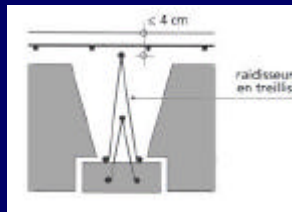
Continuité au droit d'un refend

Milan ZACEK

Solidarisation des poutrelles et de la dalle



Poutrelles en béton armé ou précontraint



Poutrelles en treillis métalliques avec talon en béton

Milan ZACEK

CONTREVENTEMENT VERTICAL

Au moins deux éléments de contreventement verticaux (murs, palées de stabilité ou portiques) doivent être disposés dans chaque direction principale



Domages dus à l'absence de contreventement longitudinal, séismes de San Fernando, Californie 1971 et d'I zmit, Turquie 1999

Milan ZACEK

6.2. CONSTRUCTIONS EN MAÇONNERIE

Les maçonneries réalisées selon les méthodes propres aux zones non sismiques éclatent sous l'effet des séismes et se disloquent, car les joints de mortier constituent des zones faibles. Ils résistent mal à la traction et au cisaillement.



Photo Miyamoto



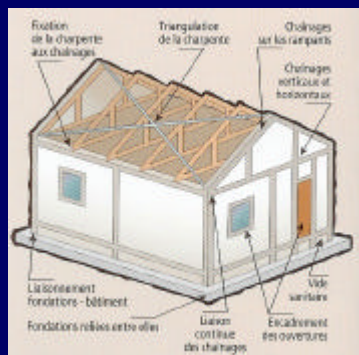
Photo Ouest

Dislocation de la maçonnerie non chaînée, séismes de Kobé, Japon 1995 et de San Giuliano, Italie 2002

Milan ZACEK

Dispositions constructives réglementaires relatives aux constructions en maçonnerie

Aucun bord libre en maçonnerie n'est autorisé. Tous les murs structuraux et non structuraux doivent être confinés par des chaînages et encadrements d'ouvertures en béton armé.



La continuité des armatures aux angles des chaînages et encadrements doit être assurée (recouvrements de $60 \lambda_L$)

Milan ZACEK

Exemples de mise en œuvre d'une construction parasismique en maçonnerie



M. Zacek



C. Michel

Chaînages, couronnements et encadrements réglementaires, maisons en Martinique, zone de forte sismicité

Milan ZACEK

6.3. CONSTRUCTIONS EN BETON ARME

6.3.1. Murs porteurs en béton ou béton armé

- excellente résistance
- chaîner ou armer



NISEE

Mur non chaîné
Anchorage, Etats-Unis 1964



R. Miyamoto

Mur armé, faibles dommages
Kobé, Japon 1995

Milan ZACEK

6.3.2. Ossature en portiques coulée en place

- Le bon comportement sous séisme des portiques dépend étroitement d'un confinement renforcé des zones critiques (zones les plus sollicitées), assurant un comportement ductile
- Les structures à confinement insuffisant s'effondrent fréquemment (photos ci-dessous)
- Les panneaux de remplissages en maçonnerie sont déconseillés



Séismes d'Izmit, Turquie 1999 et de Boumerdes, Algérie 2003

Milan ZACEK

Comparaison des comportements fragile et ductile



Rupture fragile (instantanée)
séisme de Spitak, Arménie 1988



NISEE

Comportement ductile. L'effondrement est dû à une erreur d'architecture et non d'exécution (effet de poteau court à l'intérieur du bâtiment), Northridge, Californie 1994

Milan ZACEK

Confinement correct des poteaux et des poutres

- Barres longitudinales nombreuses et de faible diamètre, maintenues individuellement par des armatures transversales
- Cadres rapprochés dans les zones critiques



M. Zacek



M. Zacek

Milan ZACEK

Eclatement des zones critiques d'une ossature



NISEE

Séisme d'Anchorage, Alaska 1964



NISEE

Séisme du Chili, 1960

Milan ZACEK

Eclatement des nœuds non confinés



NISEE



NISEE

Séisme de Chi-Chi, Taïwan 1999

Milan ZACEK

Eclatement des panneaux de remplissage en maçonnerie (1)



Séisme de Boumerdès, Algérie 2003

Milan ZACEK

Eclatement des panneaux de remplissage en maçonnerie (2)



NISEE



NISEE

Séisme de Caracas, Venezuela 1967

Milan ZACEK

Solutions visant à prévenir l'éclatement des panneaux de remplissage en maçonnerie




Mexico (après le séisme de 1985)



M. Zacek

Grèce

Milan ZACEK



Je vous remercie
pour l'intérêt que vous avez porté à
ma présentation

Milan ZACEK