# CONSTRUCTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS

Milan ZACEK Conseil en génie parasismique

# 1. PROTECTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS

### 1.1. 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

#### 1.2. 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

Or l'effondrement des bâtiments n'est pas inévitable Une construction parasismique sûre est possible

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







Izmit, Turquie 1999

# 1.3. CARACTERISTIQUES DES CONSTRUCTIONS RESISTANT AUX SEISMES

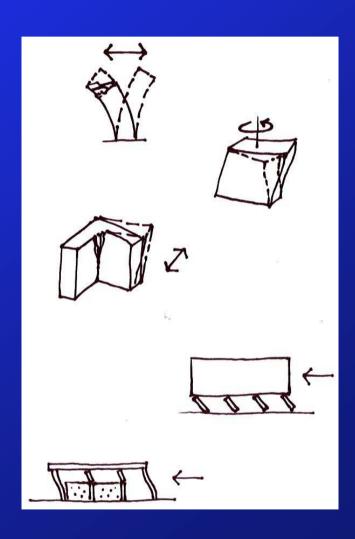
- Conception d'ensemble qui optimise les oscillations et limite les concentrations de contraintes
- Capacité à se déformer plutôt que rompre (ductilité des éléments porteurs et des assemblages)
   Cette capacité dépend :
  - . de l'architecture
  - . des dispositions constructives
- Sections suffisantes pour résister aux charges sismiques
- Matériaux de qualité, mise en œuvre dans les règles de l'art

La résistance aux séismes ne dépend pas que du dimensionnement

## 2. CONCEPTION D'ENSEMBLE

#### 2.1. EFFETS DESTRUCTEURS MAJEURS

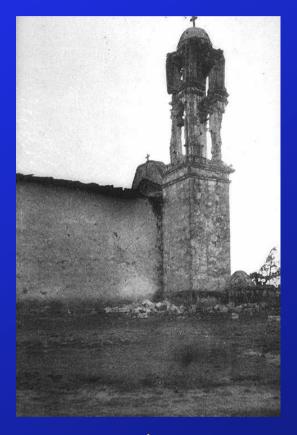
- Résonance du bâtiment avec le sol
- Torsion d'ensemble
- Oscillations différentielles
- Effet de niveau souple
- Effet de poteau court

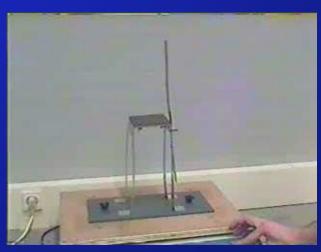


#### 2.2. RESONANCE DU BATIMENT AVEC LE SOL

Résonance = « réponse » amplifiée Situation de résonance :  $T_{\text{bâtiment}} = T_{\text{sol}}$  (T = période propre)







Rocher

Sol mou

## Dommages dus à la résonance avec le sol





Séisme du Mexique, Mexico 1985

## Tour **MEXICO** 1985 Latinoamericana 45 niveaux Aucun dommage Bâtiments de 10 à 30 étages Beaucoup de destructions Bâtiments peu élevés Peu de dégâts Gérald Hivin

### Séisme du Mexique, Mexico 1985



NISEE



EERI

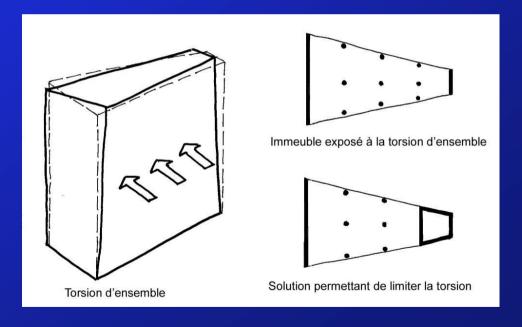
Résonance avec le sol

Absence de résonance

#### 2.3. TORSION D'ENSEMBLE

La torsion se produit sous l'action des charges horizontales lorsque la rigidité d'un ou plusieurs niveaux est répartie d'une manière asymétrique par rapport à au moins un axe principal passant par le centre de gravité d'un niveau Le bâtiment vrille, alors même que le sol ne vrille pas





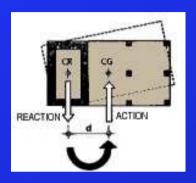
Torsion d'ensemble et solutions

### Exemple de dommages dus à la torsion d'ensemble



Séisme du Mexique, 1985

## Dommages dus à la torsion d'ensemble



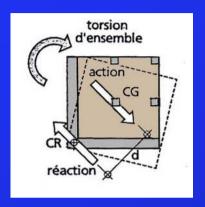




K. Takeyama K. Takeyama

Séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968

### Dommages dus à la torsion d'ensemble (suite)











Séisme de Kobé, Japon 1995 et du Mexique 1985

Milan ZACEK

### Bâtiments exposés à la torsion





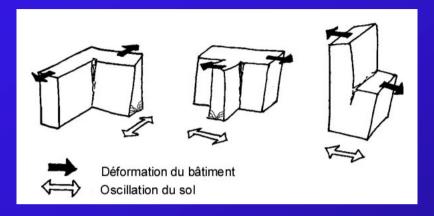
M. Zacek

P. Balandier

Maison en Grèce

Bâtiment public en Guadeloupe

### 2.4. OSCILLATIONS DIFFERENTIELLES









Essais sur table vibrante

Séisme de Kobé, Japon 1995

# Solutions supprimant ou limitant les effets des oscillations différentielles en plan

- Joints sismiques
- Rigidifier les zones flexibles

- Variation progressive de la rigidité
- Isolation parasismique



Photo Michel









Photos M Zacel

### Largeur de joint insuffisante : entrechoquement





NISEE

Séisme d'Izmit, Turquie 1999 et de San Fernando, Californie 1971

# Solutions supprimant ou limitant les inconvénients des retraits d'étage

- Joints sismiques
- Variation progressive de la forme
- Isolation parasismique





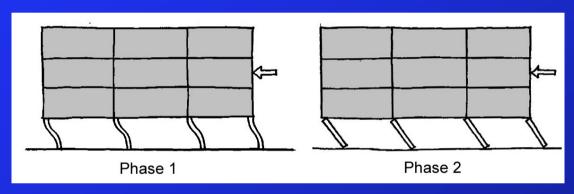


Photos M. Zacek

### 2.5. 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

### Dommages dus à l'effet de niveau souple





B. Weliachew

Séisme de Kobé, Japon 1995

Séisme de Boumerdès, Algérie 2003

### Effondrements dus à l'effet de niveau souple





NISEE

K. Takeyama

Séisme de Chi-Chi, Taïwan 1999

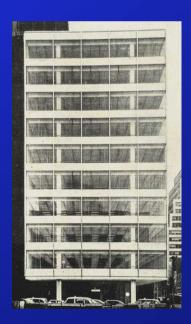
Séisme de Tokachi-Oki, Japon 1968

### Solutions visant à éviter l'effet de niveau souple

 Contreventement en façade ou à l'intérieur du bâtiment



- Variation progressive de la rigidité horizontale
- Généralisation de la souplesse
- Isolation parasismique





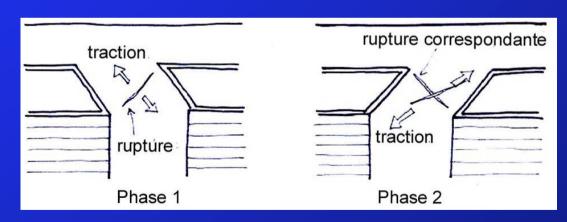


### 2.6. EFFET DE POTEAU COURT

Cas: poteaux de faible hauteurs ou « bridés » par d'autres éléments, faisant partie de la structure principale

Rupture brutale ayant pour cause:

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



Rupture par cisaillement des poteaux bridés





Séisme de Tokachi-Oki Japon 1968

### Effet de poteau court : démonstration



G. Hivin

### Allèges rigides : effet de poteau court





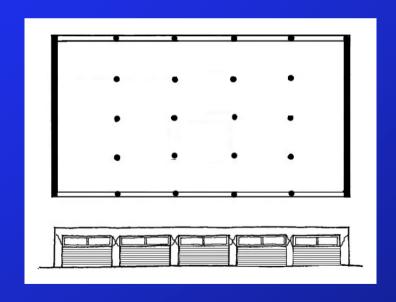
NISEE

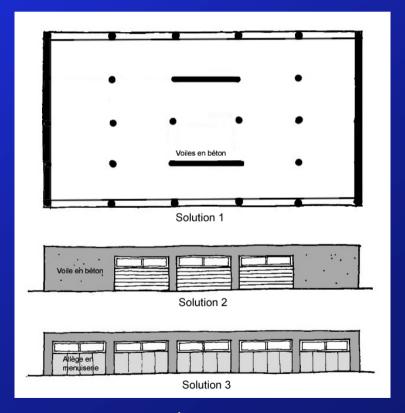
NISE

Séisme de Chi-Chi, Taïwan 1999

# 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, dans les deux directions principales
- Allèges non rigides en bois ou métal





A éviter

Solutions

### Effet de poteau court en soubassement





Séisme de Grèce, 1999



Séisme d'El Asnam, Algérie 1980



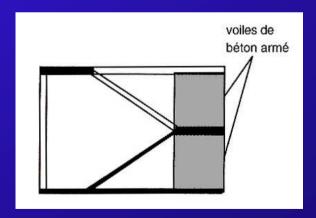
Immeuble en zone 4, Provence

# Effet de poteau court dans les cages d'escalier et solutions



Séisme d'El Asnam, Algérie 1980

NISEE



Solution : escalier porté par des voiles en béton armé

# 3. CONSTRUCTIONS EN MACONNERIE

### Dommages sismiques typiques

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





Olycom-Sipa

ΔFP

Séismes Italie, 2009 (L'Aquila) et 2016 (Amatrice)

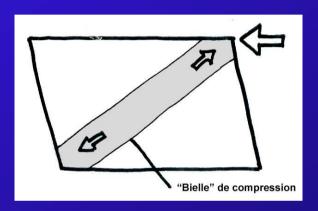
# Dislocation des maçonneries sous l'effet de secousses

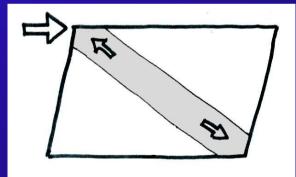


Essai sur table vibrante d'une maison en maçonnerie non chaînée

#### Fissuration en croix des panneaux de maçonnerie







NISEE

Fissures inclinées (diagonales) dues à la rupture des maçonneries par cisaillement (séisme de Tokyo 1923 et principe)

# Fissuration en croix des panneaux de maçonnerie et dislocation consécutive





Séisme des Saintes, Guadeloupe 2004



Séisme de San Giuliano Italie 2002

## Dislocation des maçonneries sous l'effet de secousses



Essai sur table vibrante d'une maison en maçonnerie confinée

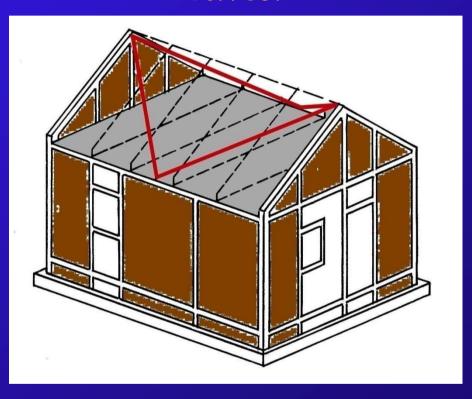
### Contreventement des maisons en maçonnerie

#### Incorrect





#### Correct



Séismes des Saintes, Dominique 2004 et d'Iran, 2005

### Chaînages verticaux manquants





M. Zacek

Maisons en Croatie

# Mise en œuvre d'une construction parasismique en maçonnerie



M. Zacek

Maison en Martinique



Maison en Indonésie

# 4. CONSTRUCTIONS EN BETON ARME

# 4.1. OSSATURES EN POTEAUX ET POUTRES COULES EN PLACE

- Le bon comportement sous séisme des ossatures 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 Boumerdès, Algérie 2003

### Début d'effondrement : éclatement des zones critiques d'une ossature



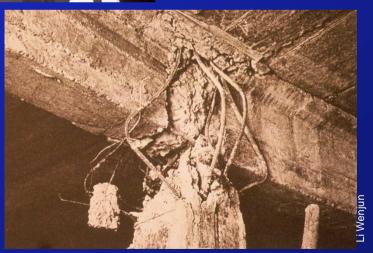
Anchorage, Alaska 1964



Chili 1960

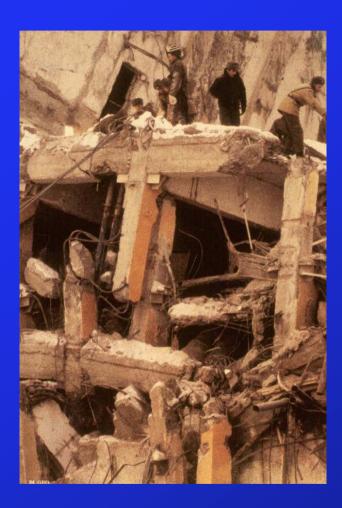


Chi-Chi, Taïwan 1999



Tangshan, Chine 1976

#### 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), séisme de Northridge, USA 1994

### Comparaison des comportements fragile et ductile en torsion



NISEE



NISEE

Comportement fragile Comportement ductile Séisme de Whittier, Etats-Unis 1987

### Confinement des poteaux



G. Hivin



M Zace

Cadres rapprochés, barres maintenues individuellement

## Dommages sismiques aux poteaux incorrectement confinés





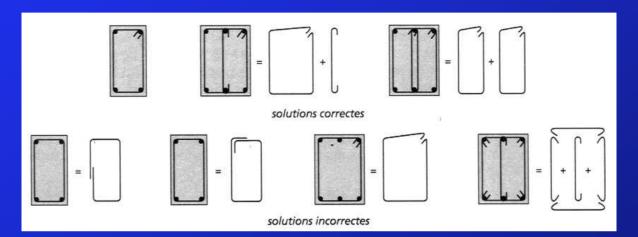
Séisme de San Fernando 1971 et de Kobé 1995, Japon

### Confinement des poutres



M. Zacek

Chantier à Aix-en-Provence

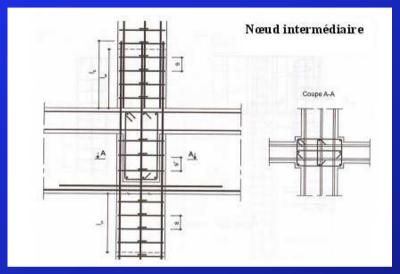


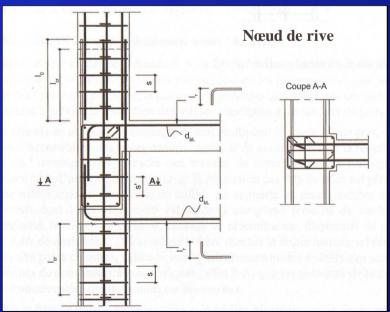


M. Zacek

### Confinement des noeuds

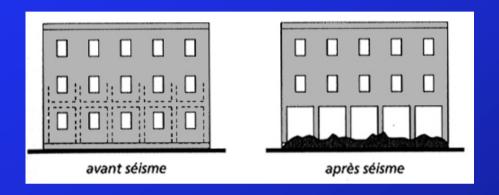






AFPS

# Ossatures avec panneaux de remplissage en maçonnerie







Séisme de Boumerdès, Algérie 2003

# Exemples d'éclatement des panneaux de remplissage non connectés à l'ossature





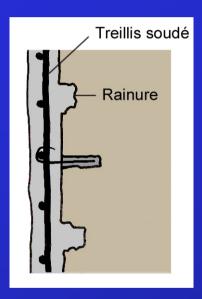
Séisme d'Izmit, Turquie 1999





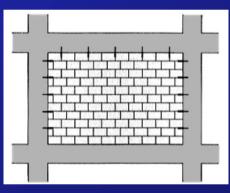
Séisme de Caracas, Venezuela 1967

# Exemples de solutions visant à prévenir l'éclatement des panneaux









Contrevoile

Raidisseurs ancrés dans l'ossature

Connecteurs

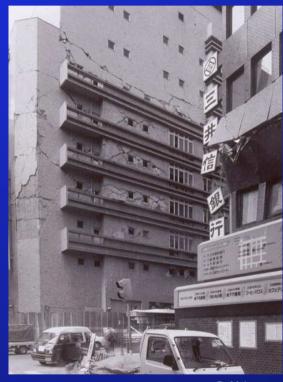
#### 4.2. STRUCTURES EN VOILES COULES EN PLACE

Excellent comportement sous séisme. Pratiquement pas de pertes en vies humaines lors des tremblements de terre majeurs



R Weliachev

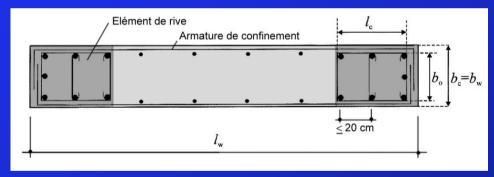
Voile très endommagé, parvient à porter les planchers (séisme de Kobé 1995)



R. Myiamoto

Voile armé, dommages facilement réparables dans une zone où il y a eu 6000 morts (séisme de Kobé 1995)

### Exemple de l'armature d'un voile ductile de classe DCM

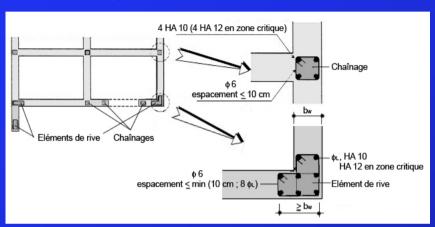


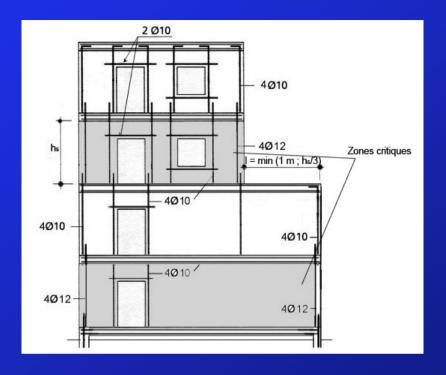
Eurocode 8



#### Zones critiques

- Niveau le plus bas de chaque mur
- Niveau situé au-dessus d'un retrait de min (h<sub>s</sub>/3 et 1 m)





#### Chaînages horizontaux

au niveau des planchers : au moins 4 HA 10 en façade et 2 HA 10 au-dessus des murs intérieurs

#### Chaînages verticaux

4 HA 10 + cadres  $\phi$  6 mm espacés de 10 cm au plus (4 HA 12 en zone critique)

- à toutes les intersections de murs, y compris celles avec les retours
- au droit des ouvertures

Armature des linteaux: minimum 2 \phi10

