

Journée « La construction parasismique dans l'Ain »

CONCEPTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS

Milan ZACEK

21 janvier 2009

1. PERTINENCE DE LA PROTECTION PARASISMIQUE DES BATIMENTS

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



Kalamata, Grèce 1987



Izmit, Turquie 1999

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

2. PROTECTION PARASISMIQUE REGLEMENTAIRE

Les pertes et les destructions provoquées par les tremblements de terre sont dues à plus de 90 % à l'effondrement des constructions

Obligation de construire « parasismique »

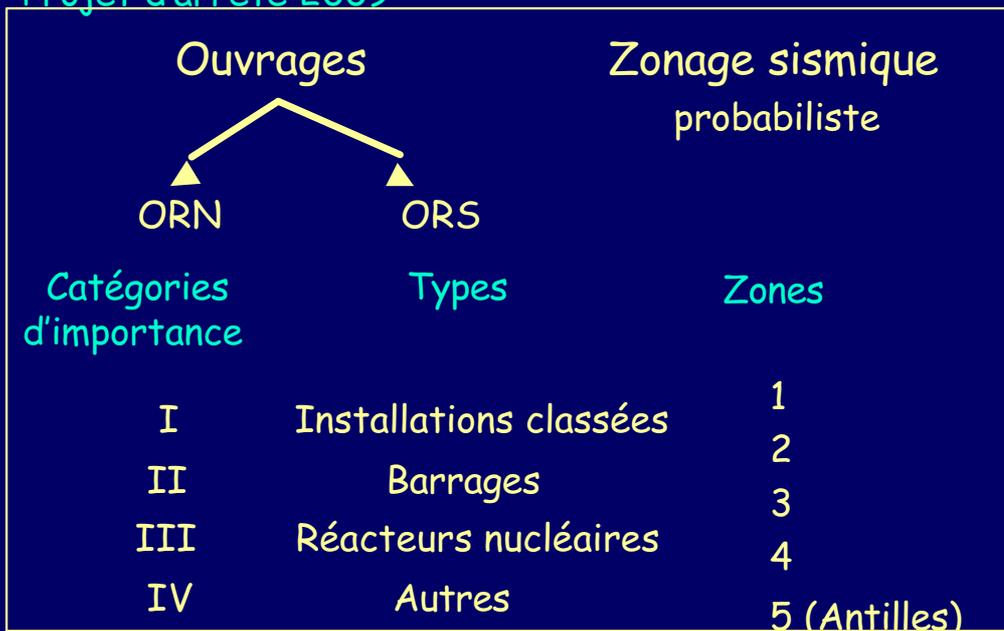
Réglementation précisant les modalités de la protection :

- Où : zonage réglementaire
- Quoi : catégories de bâtiment
- Jusqu'où : agression sismique de calcul
- Comment : règles parasismiques à appliquer

Milan ZACEK

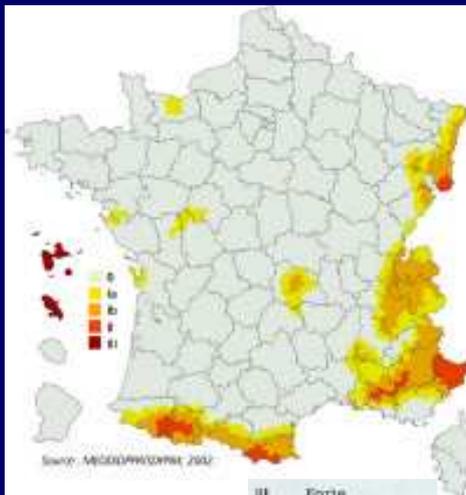
Définitions

Projet d'arrêté 2009



Milan ZACEK

Zonage sismique de la France



Zonage réglementaire actuel (1991)



Base du nouveau zonage (2009)

Milan ZACEK

Classification des ouvrages à risque normal

CATEGORIE D'IMPORTANCE I

Bâtiments dont la défaillance présente un risque minime pour les personnes ou l'activité économique. Activité de longue durée exclue

CATEGORIE D'IMPORTANCE II

Bâtiments dont la défaillance présente un risque moyen pour les personnes :

- habitations individuelles
- habitations collectives, bureaux, $h = \leq 28$ m
- établissements recevant du public de 4^o et 5^o catégories
- parcs publics de stationnement
- autres bâtiments accueillant ≤ 300 personnes (1 personne/12 m² SHON ou déclaration dans les ERP)

Milan ZACEK

CATEGORIE D'IMPORTANCE III

Bâtiments à risque élevé pour les personnes ou les activités :

- bâtiments d'habitation collectifs, bureaux, h > 28 m
- établissements recevant du public de 1ère à 3ème catégories
- autres bâtiments accueillant > 300 personnes
- établissements sanitaires et sociaux sauf exception
- bâtiments de production collective d'énergie
- tous les établissements d'enseignement (projet d'arrêté)

CATEGORIE D'IMPORTANCE IV

Bâtiments dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou l'ordre public :

- bâtiments abritant les moyens de secours
- bâtiments définis par le ministère de la défense
- bâtiments assurant les communications
- établissements recevant du public de de santé spécialisés en affectations graves
- production et stockage d'eau potable
- distribution publique de l'énergie
- centres de météorologie

Milan ZACEK

Obligation de protection parasismique

Projet d'arrêté 2009

	ORN	ORS
Quelle catégorie ? Où ?	II, III, IV dans les zones 2, 3, 4, 5	Tous dans toutes zones y compris zone 1
Quelle protection ?	Protection statistique et probabiliste	Protection déterministe
Quelle règles ?	Cas général Eurocode 8 Facultatif Zone 2 : Disp. constructives Zones 3 et 4 : Règles PS-MI 89/92 (lorsque applicables)	SMHV séisme maximum historiquement vraisemblable SMS séisme majoré de sécurité

Dispositions constructives en zone de sismicité faible

Emploi facultatif pour la catégorie II en zone 2

Ce document porte sur les ouvrages suivants :

- revêtements en pierre agrafée
- garde-corps
- acrotères
- balcons
- cheminées
- murs de clôture
- cloisons
- plafonds suspendus
- fixation des équipements lourds
- planchers surélevés
- canalisations

Milan ZACEK

Règles PS-MI 89/92 (règles forfaitaires)

Emploi facultatif pour la catégorie II en zones 3 et 4

Observation des dispositions constructives des règles dispense de dimensionner aux séismes

Domaine d'application limité :

- R + 1 au plus
- hauteur niveaux $\leq 3,30$ m
- construction traditionnelle
- décrochements \leq côté/4
- porte-à-faux $\leq 1,50$ m
- masse à l'extrémité ≤ 200 kg/m
- portance ultime du sol ≤ 250 kN/m²
- etc.

Milan ZACEK

	ORN	ORS
Obligation pour:		
• Constr. neuve :	Toujours	Toujours
• Intervention sur l'existant :		
- préventive	Non	Non
- à l'occasion de travaux	Surélévation : II, III, IV Remplacement tous les planchers : II, III, IV Création niveau intermédiaire: III, IV Juxtaposition :	L'ensemble
	- sans joint de séparation : extension + existant : III, IV extension seulement : II	
	- avec joint de séparation : extension seulement : II, III, IV	

Milan ZACEK

Projet d'arrêt :

$$\text{agression sismique de calcul} = \gamma_1 \times a_{gr} \times S$$

Catégorie d'importance de bâtiment	Coefficient d'importance γ_1	Zone de sismicité	Accélération de référence a_{gr} au rocher
I	0,8	2	0,7
II	1	3	1,1
III	1,2	4	1,6
IV	1,4	5	3

Classes de sol	Paramètre de sol S pour les zones de sismicité 1 à 4	Paramètre de sol S pour la zone de sismicité 5
A	1	1
B	1,35	1,2
C	2,0	1,75
D	2,0	1,35
E	1,8	1,4

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

RAPPEL

Il n'y a pas d'obligation de conception architecturale parasismique. Seuls le calcul et des dispositions constructives font l'objet de « contraintes » réglementaires

Rien ne s'oppose donc à ce qu'un projet mal conçu soit calculé aux séismes et satisfasse ainsi à la réglementation en vigueur. Or l'architecture parasismique permet :

- de minimiser les charges sismiques
- de créer une réserve de résistance vis-à-vis des charges plus sévères que le séisme de calcul
- d'abaisser le coût de la protection parasismique

Milan ZACEK

4. SITE D'IMPLANTATION

4.1. PRISE EN COMPTE DU SITE

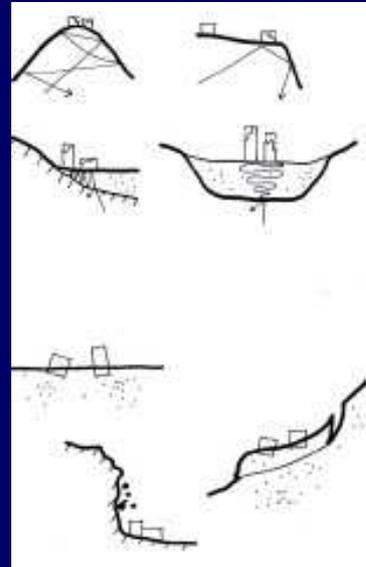
Limitier les effets de site

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

Eviter les effets induits

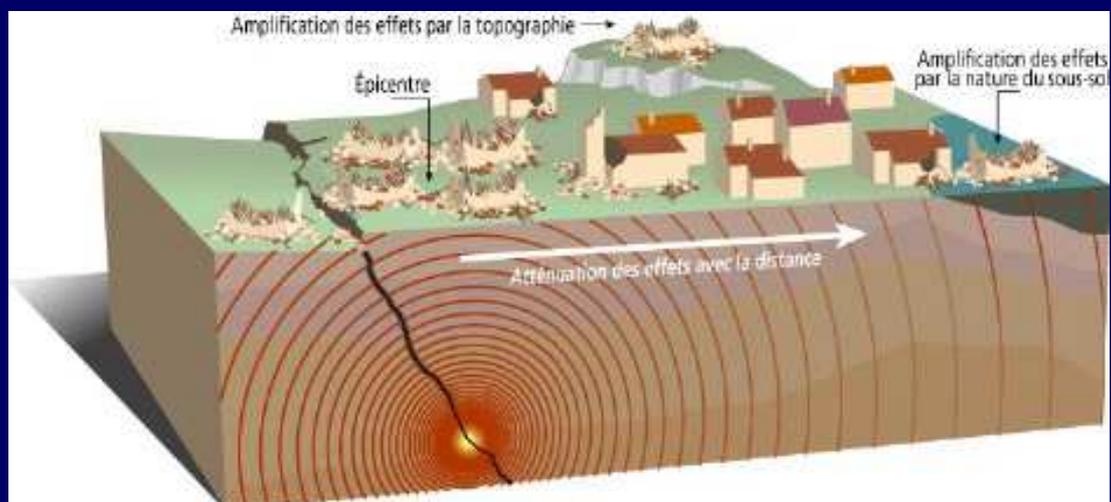
- liquéfaction des sols
- glissement de terrain
- éboulement rocheux

S'éloigner des failles actives



Milan ZACEK

4.2. EFFETS DE SITE



Effet de site topographique



Rognes, France 1909



Milan ZACEK

4.3. EFFETS INDUITS

4.3.1. Liquéfaction du sol

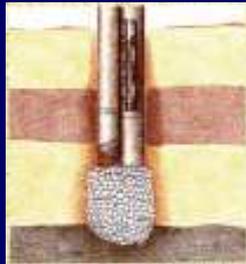


Séismes de Niigata, Japon 1964 et d'Izmit, Turquie 1999

Milan ZACEK

Prise en compte de la liquéfaction des sols

- L'identification des sols liquéfiables est obligatoire
Sont liquéfiables principalement les sables fins lâches saturés d'eau
- Démarches en cas de sol liquéfiable :
 - . traitement du sol, p. ex. par vibroflottation
 - . fondation de l'ouvrage au-dessous des couches liquéfiables, en tenant compte du sol liquéfié



Colonnes ballastées mises en place par vibroflottation

Milan ZACEK

4.3.2. Glissement de terrain



Kobé, Japon 1995



Alaska, USA 1964

Milan ZACEK

4.3.3. Eboulement rocheux (chute de blocs)



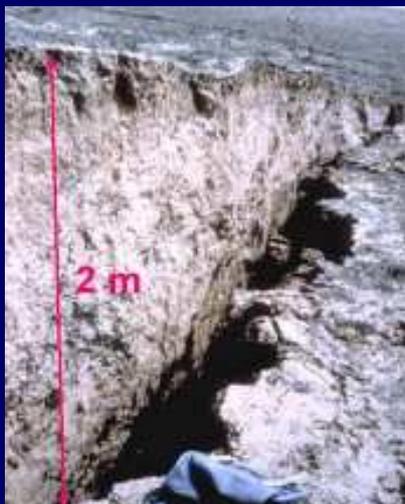
Californie, USA 1971



Sennoz, France

Milan ZACEK

4.4. JEU DE FAILLE



Rejet vertical
Séisme d'El Asnam 1980



Rejet et décrochement
Séisme de Landers, USA 1992

Milan ZACEK

Immeubles sur faille



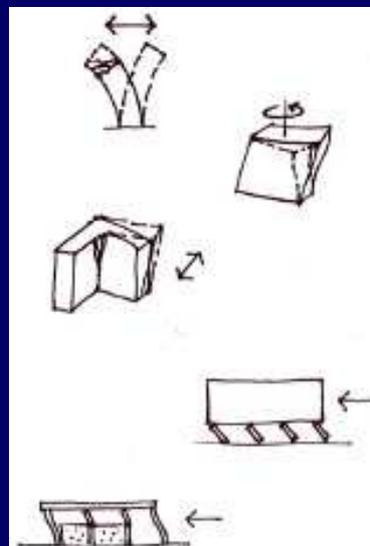
Séisme de Chi-Chi, Taiwan 1999

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 HUVIN

Dommmages sismiques dus à la résonance du bâtiment avec le sol



Séisme du Mexique, Mexico 1985

Milan ZACEK

5.3. TORSION D'ENSEMBLE



Avant le séisme



Pendant le séisme

Localisation incorrecte des murs assurant la stabilité horizontale
Martinique (zone de forte sismicité)

Milan ZACEK

Dommmages sismiques dus à la torsion d'ensemble



Milan ZACEK

Immeubles exposés à la torsion d'ensemble



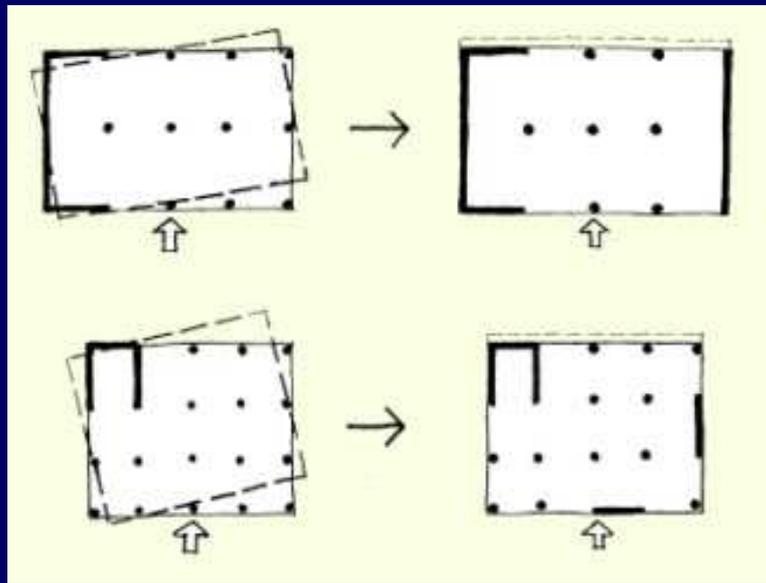
Bâtiment public en Guadeloupe



Maison individuelle en Grèce

Milan ZACEK

Limitation de la torsion d'ensemble



Torsion importante

Torsion corrigée

Milan ZACEK

5.4. OSCILLATIONS ASYNCHRONES

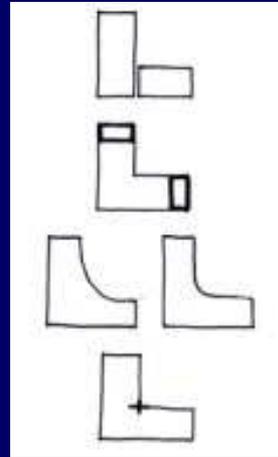


Séisme de Kobé, Japon 1995

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



Séisme d'Izmit, Turquie
1999



Séisme de San Fernando
Californie, 1971

Milan ZACEK



Variation progressive
de la rigidité



Rigidification des pignons

Milan ZACEK

Solutions pour les retraits d'étage



Tokyo, Japon

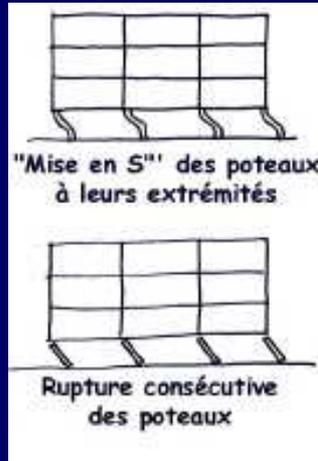
Milan ZACEK

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



Ceyhan-Misis, Turquie 1998

Milan ZACEK

Dommmages dus à l'effet de niveau souple



Séisme de Kobé
Japon 1995



Séisme de San Fernando
Californie 1971

Milan ZACEK

Effondrements dus à l'effet de niveau souple



Séisme de Boumerdès, Algérie 2003

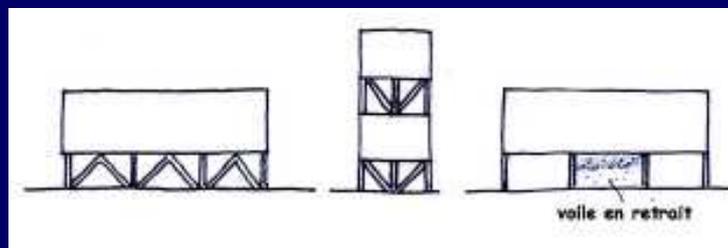


Séisme de Kobé, Japon 1995

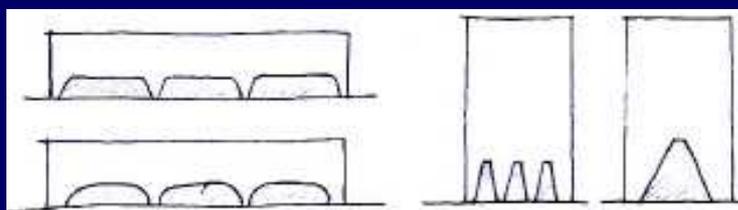
Milan ZACEK

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



Séisme de Ceyhan-Misis, Turquie 1998

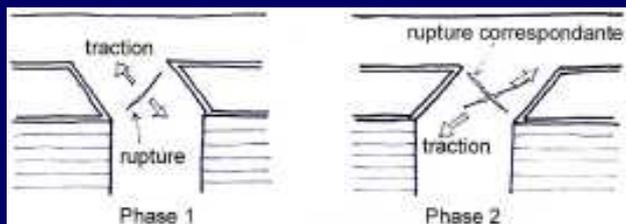
Milan ZACEK

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



Séisme de Tokachi-Oki Japon 1968

Milan ZACEK

Allèges rigides : effet de poteau court

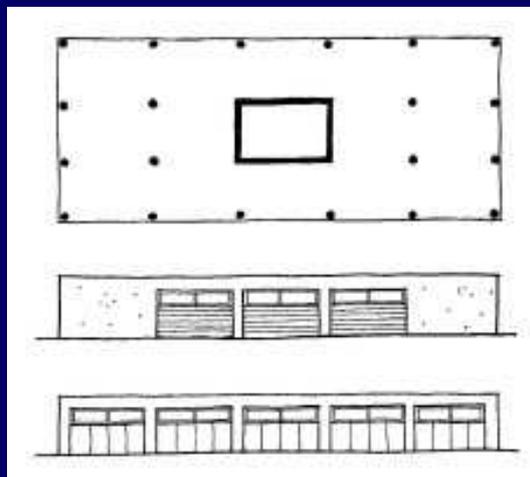


Séisme de Chi-Chi, Taïwan 1999

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



Séisme d'El Asnam, Algérie 1980

Milan ZACEK

Effet de poteau court



Séisme d'El Asnam, Algérie 1980



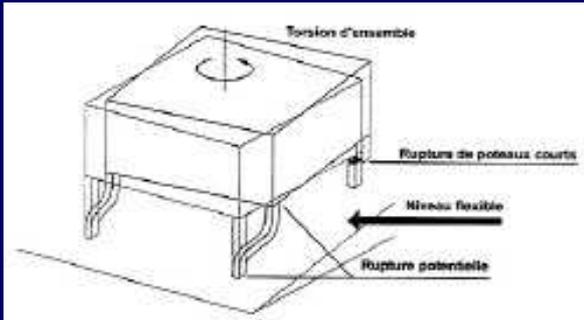
Maison en construction
en zone de forte sismicité

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



Conception défavorable

Milan ZACEK

Constructions sur versants



Maison vulnérable à la torsion



Solution : contreventement

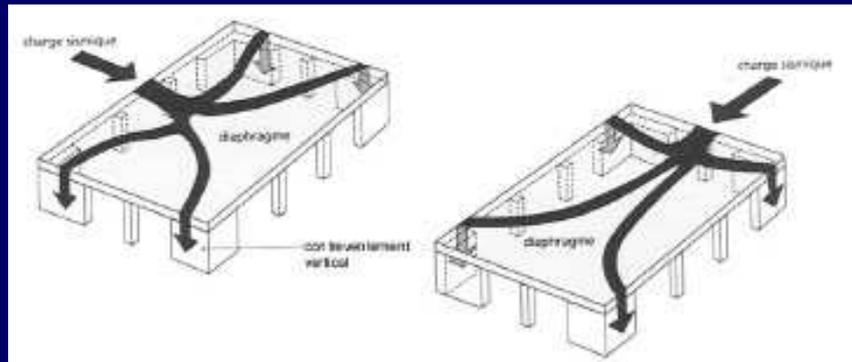
Milan ZACEK

6. CONSTRUCTION PARASISMIQUE

6.1. CONTREVENTEMENT

PRINCIPE

Solution obligatoire : contreventement horizontal (diaphragmes)
+ contreventement vertical

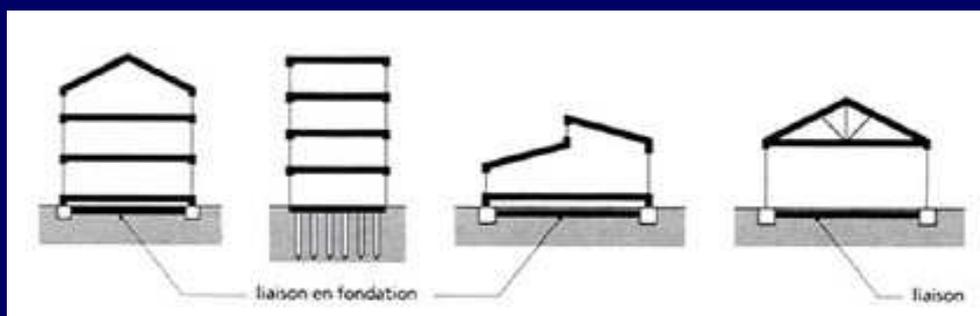


Milan ZACEK

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

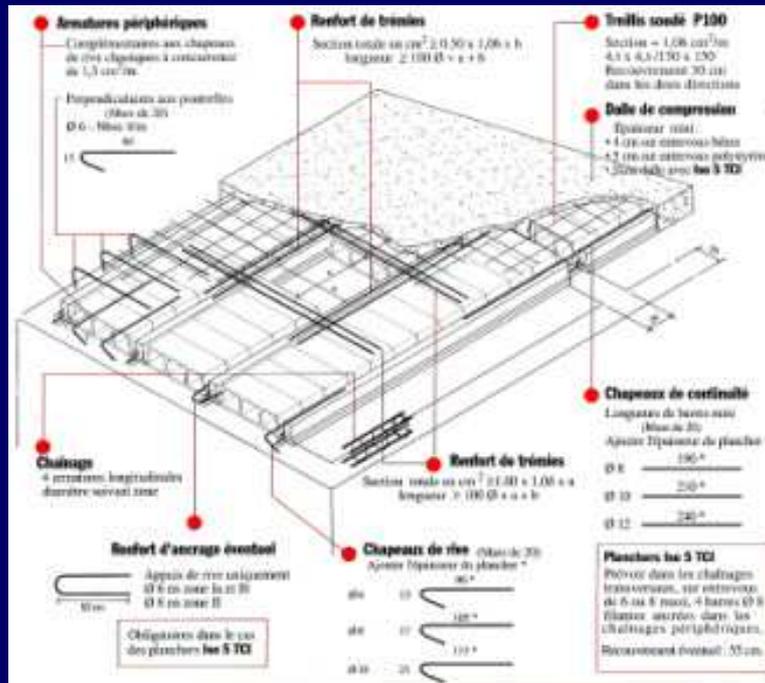
Destruction de diaphragmes non ancrés



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

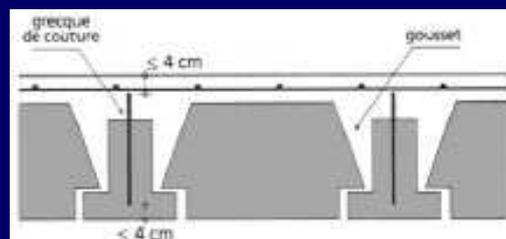
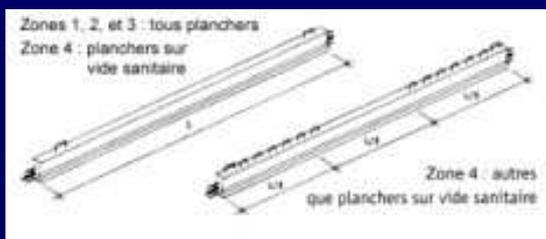
Milan ZACEK

Plancher-diaphragme en poutrelles et entrevous

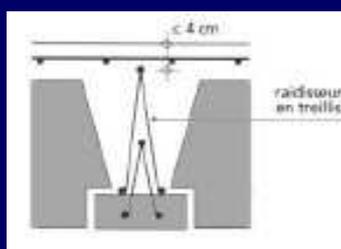


Milan ZACEK

Solidarisation des poutrelles et de la dalle



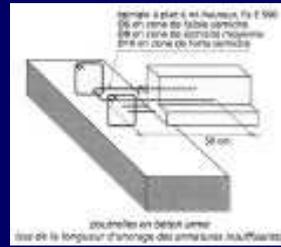
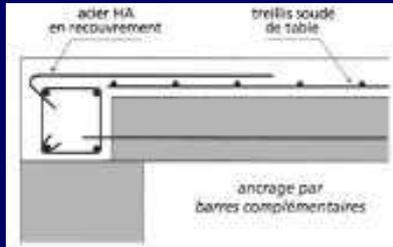
Poutrelles en béton armé ou précontraint



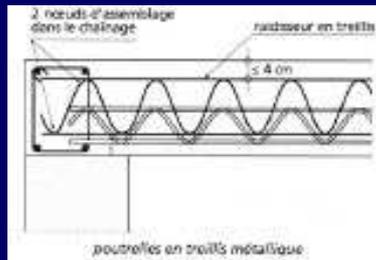
Poutrelles en treillis métalliques avec talon en béton

Milan ZACEK

Ancrage du diaphragme, sens porteur



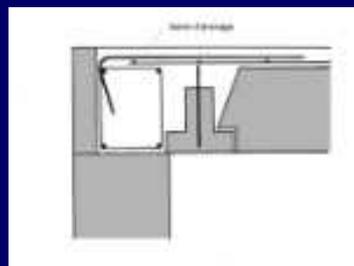
Poutrelles en béton armé ou précontraint



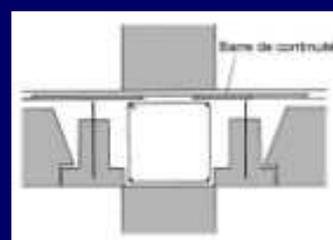
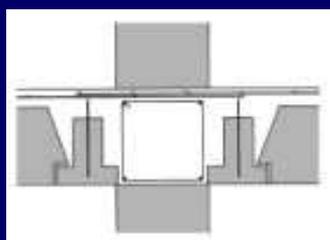
Poutrelles en treillis métallique avec talon en béton

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

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'Izmit, 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



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 $60 \varnothing_L$)

Milan ZACEK

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



Photo Zacek

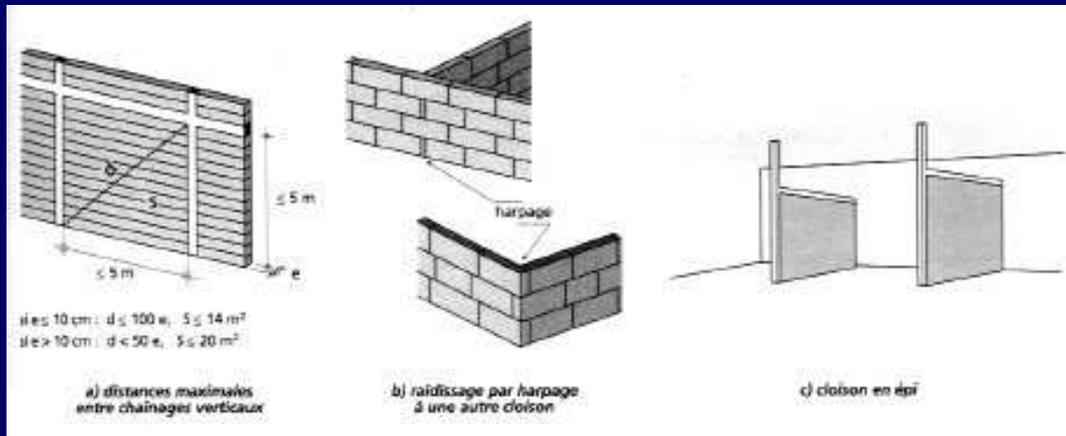


Photo Michel

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

Milan ZACEK

Dispositions constructives réglementaires relatives aux cloisons en maçonnerie



Cloisons solidaires de la structure

Milan ZACEK

Souches de cheminées en maçonnerie

Les souches élancées ne résistent pas aux séismes d'une certaine intensité



Chute de souches non stabilisées

Milan ZACEK

Dispositions constructives réglementaires relatives aux acrotères

PS-MI 89/92 ET DISPOSITIONS POUR LA ZONE 2 :

- $h \leq 120$ cm
- ancrage dans le support
- chaînages verticaux à entraxe ≤ 3 m, 4 barres HA
- lisses de couronnement, 2 barres HA



Chute partielle d'un acrotère sans chaînages verticaux et chute totale d'un acrotère sans couronnement (séisme du Chili, 1960)

Milan ZACEK

6.3. CONSTRUCTIONS EN BETON ARME

6.3.1. Murs porteurs en béton ou béton armé

- excellente résistance
- chaîner ou armer



Mur non chaîné
Anchorage, Etats-Unis 1964



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 Boumerdès, Algérie 2003

Milan ZACEK

Comparaison des comportements fragile et ductile



Rupture fragile (instantanée)
séisme de Spitak, Arménie 1988



Photo 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



Milan ZACEK

Eclatement des zones critiques d'une ossature



Séisme d'Anchorage, Alaska 1964



Séisme du Chili, 1960

Milan ZACEK

Eclatement des nœuds non confinés



Photos 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)



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)



Grèce

Milan ZACEK



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

Milan ZACEK