

An aerial photograph showing a large dam structure in the foreground, with a reservoir of turquoise water. In the background, a rugged mountain range with steep, rocky slopes and some green vegetation is visible under a blue sky with scattered white clouds. The image is split vertically into two panels: the left panel shows a more distant and hazy view of the same scene, while the right panel is a closer, clearer view.

*Risques
Sismiques*

*U
S
T
H
B*

*2
0
0
9*

Par : ABDELLAOUI Merouane

TABLE DE MATIERES

Introduction	1
PARTIE 1 : Généralités	
1-1-Qu'est-ce qu'un séisme ?	2
1-2-Comment se manifeste-t-il ?	2
1-3-Les conséquences sur les personnes et les biens	3
1-4-Définition de 4 notions fondamentales	3
1-4-1-Aléa sismique	3
1-4-2-Vulnérabilité	3
1-4-3-Le risque sismique	3
1-4-4-Prévention	4
PARTIE 2 : Risque sismique et développement	
2-1-Sismicité, risque sismique et prédiction	6
2-2-Sismicité et destruction	7
2-3-Les priorités	10
PARTIE 3 : Vulnérabilité sismique des constructions	
3-1-Réponse d'une structure à une sollicitation sismique	12
3-2-Les apports récents de la recherche en matière d'analyse de vulnérabilité	13
PARTIE 4 : Les barrages et le risque sismique	
4-1-Accidents liés à des séismes	15
4-2-Incidences sur l'exploitation	15
conclusion	18

Introduction

Le tremblement de terre est la catastrophe naturelle la plus meurtrière et la plus destructrice. Chaque année plus de cent mille séismes, dont la magnitude sur l'échelle de Richter est comprise entre 3 à 4, et un à deux séisme de magnitude supérieur à 8 secouent la terre

Les risques font l'objet d'études depuis de nombreuses années. Pendant longtemps, ils ont été considérés sous l'angle du phénomène dangereux, et ce n'est qu'après quelques décennies que des chercheurs se sont davantage interrogés sur les éléments exposés. Si l'on considère le risque comme le résultat de la combinaison entre un aléa et des éléments vulnérables, il est important de l'aborder dans une démarche intégrée prenant en compte ces deux composantes.

A cause de la multiplicité des études sur les risques, on a souhaité de faire un travail qui regroupe trois exemples sur les risques sismiques :

- ✓ Risque sismique et développement*
- ✓ Vulnérabilité sismique des constructions*
- ✓ Les barrages et le risque sismique*



PARTIE 1 : Généralités

1-1-Qu'est-ce qu'un séisme ?

Un séisme est une vibration du sol transmise aux bâtiments, causée par le frottement et le choc brutal, en profondeur, de plaques rocheuses coulissant entre elles le long de failles de l'écorce terrestre, et libérant de ce fait une énergie considérable.

Les séismes sont, avec le volcanisme, l'une des manifestations de la tectonique des plaques. L'activité sismique est concentrée le long de failles, en général à proximité des frontières entre ces plaques. Lorsque les frottements au niveau d'une de ces failles sont importants, le mouvement entre les deux plaques est bloqué. De l'énergie est alors stockée le long de la faille. La libération brutale de cette énergie permet de rattraper le retard du mouvement des plaques. Le déplacement instantané qui en résulte est la cause des séismes. Après la secousse principale, il y a des répliques, parfois meurtrières, qui correspondent à des petits réajustements des blocs au voisinage de la faille.

1-2-Comment se manifeste-t-il ?

Un séisme est caractérisé par :

Son foyer (ou hypocentre) : *c'est la région de la faille où se produit la rupture et d'où partent les ondes sismiques.*

Son épïcentre : *point situé à la surface terrestre à la verticale du foyer et où l'intensité est la plus importante.*

Sa magnitude : *identique pour un même séisme, elle traduit l'énergie libérée par le séisme. Elle est généralement mesurée par l'échelle ouverte de Richter. Cette échelle variant en pratique entre 1 et 9 est de type logarithmique et augmenter la magnitude d'un degré revient à multiplier l'amplitude des ondes par 10 et l'énergie libérée par 30.*

Son intensité : *qui mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné. Ce n'est pas une mesure objective, mais une appréciation de la manière dont le séisme se traduit en surface et dont il est perçu. On utilise habituellement l'échelle MSK, qui comporte douze degrés. Le premier degré correspond à un séisme non perceptible, le douzième à un changement total du paysage. L'intensité n'est donc pas, contrairement à la magnitude, fonction uniquement du séisme, mais également du lieu où la mesure est prise. En effet, les conditions topographiques ou géologiques locales (particulièrement des terrains sédimentaires reposant sur des roches plus dures) peuvent créer des effets de site qui amplifient l'intensité d'un séisme. Sans effet de site, l'intensité d'un séisme est maximale à l'épïcentre et décroît avec la distance.*

La fréquence et la durée des vibrations : *ces 2 paramètres ont une incidence fondamentale sur les effets en surface.*

La faille provoquée (verticale ou inclinée) : *elle peut se propager en surface.*

Un séisme peut se traduire à la surface terrestre par la dégradation ou la ruine des bâtiments, des décalages de la surface du sol de part et d'autre des failles, mais peut également provoquer des phénomènes annexes tels que des glissements de terrain, des chutes de blocs, une liquéfaction des sols meubles imbibés d'eau, des avalanches, des



incendies ou des raz-de-marée (tsunamis : vague sismique pouvant se propager à travers un océan entier et frapper des côtes situées à des milliers de kilomètres de l'épicentre de manière meurtrière et dévastatrice).

1-3-Les conséquences sur les personnes et les biens :

D'une manière générale les séismes peuvent avoir des conséquences sur la vie humaine, l'économie et l'environnement.

1-3-1-Les conséquences sur l'homme :

Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier, tant par ses effets directs (chutes d'objets, effondrements de bâtiments) que par les phénomènes qu'il peut engendrer (mouvements de terrain, raz-de-marée, etc.). De plus, outre les victimes possibles, un très grand nombre de personnes peuvent se retrouver blessées, déplacées ou sans abri.

1-3-2-Les conséquences économiques :

Un séisme et ses éventuels phénomènes annexes peuvent engendrer la destruction, la détérioration ou l'endommagement des habitations, des usines, des ouvrages (ponts, routes, voies ferrées, etc.), ainsi que la rupture des conduites de gaz qui peut provoquer des incendies ou des explosions. Ce phénomène est la plus grave des conséquences indirectes d'un séisme.

1-3-3-Les conséquences environnementales :

Un séisme peut se traduire en surface par des modifications du paysage, généralement modérées mais qui peuvent dans les cas extrêmes occasionner un changement total de paysage.

1-4-Définition de 4 notions fondamentales :

1-4-1-Aléa sismique :

L'aléa sismique d'une région ou d'un site donné définit les caractéristiques des mouvements sismiques susceptibles de s'y produire dans le futur en tenant compte de la durée de vie des constructions concernées et des types d'activité qui y sont réalisées.

1-4-2-Vulnérabilité :

La vulnérabilité d'une construction définit la sensibilité d'une construction à l'action sismique; on la caractérise par un indice lié à la géométrie (dimensions, hauteur, forme en plan, caractéristiques architecturales) et aux matériaux de la construction. Cette notion de vulnérabilité inclut l'importance des bâtiments en termes de coût, mais aussi en termes de valeur immatérielle et de vies humaines menacées.

1-4-3-Le risque sismique :

Le risque sismique lié à l'impact sur les constructions définit l'importance et le coût des dégâts que peut faire un séisme d'un niveau donné dans une construction donnée.

Ce « risque sismique » est d'autant plus grand que l'aléa sismique et la vulnérabilité sont grands et on a :

$$\text{Risque sismique} = \text{aléa sismique} \times \text{vulnérabilités}$$



De manière plus générale, on parle des risques sismiques, parce que lors d'un tremblement de terre, les conséquences ne se calculent pas uniquement en termes de dégâts aux constructions. Les enjeux concernent également l'impact en termes de vies humaines et du nombre de personnes blessées, du coût économique lié à la perturbation ou l'arrêt de l'activité de certaines entreprises, du coût social résultant des populations ayant perdu leur logement,...

1-4-4-Prévention :

La prévention concerne les actions à mener, connaissant les risques sismiques, de manière à diminuer l'impact des tremblements de terre futurs. Diminuer le risque ne peut se faire qu'en diminuant la vulnérabilité, parce que l'aléa découle des contraintes de notre environnement naturel et ne peut être modifié. Le scientifique essaie de l'évaluer au mieux. Le rôle de l'ingénieur est de fournir des procédés de construction ou de réhabilitation qui permettent de réduire la vulnérabilité des nouvelles constructions ainsi que du bâti existant.

Les actions de prévention sont basées sur :

- La connaissance du risque
- La surveillance et prévision des phénomènes
- Les travaux de mitigation
- La prise en compte du risque dans l'aménagement

A) La connaissance du risque :

Analyse de la sismicité historique avec zonage sismique ; enquêtes macrosismiques après séisme réalisées avec collecte des données concernant la perception par la population des secousses, les dégâts éventuels. Études locales microsismiques dans le cadre de l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques sismiques.

Ces enquêtes sont fondamentales pour une analyse statistique du risque sismique et pour identifier les effets de site.

B) La surveillance et la prévision des phénomènes :

La prévision à court terme :

Il n'existe malheureusement à l'heure actuelle aucun moyen fiable de prévoir où, quand et avec quelle puissance se produira un séisme. En effet, les signes précurseurs d'un séisme ne sont pas toujours identifiables. Des recherches mondiales sont cependant entreprises afin de mieux comprendre les séismes et de les prévoir.

La prévision à long terme :

A défaut de prévision à court terme, la prévision des séismes se fonde sur le probabilisme et la statistique. Elle se base sur l'étude des événements passés à partir desquels on calcule la probabilité d'occurrence d'un phénomène donné (méthode probabiliste).

En d'autres termes, le passé est la clé du futur.



C) La surveillance sismique

Le suivi de la sismicité en temps réel se fait à partir d'observatoires (comme RéNass) ou de stations sismologiques répartir sur l'ensemble du territoire national. Les données collectées par les sismomètres sont centralisées. Ce suivi de la sismicité permet d'améliorer la connaissance de l'aléa, en appréciant notamment les effets de site.

D) Les travaux de mitigation :

Parmi les mesures prises ou à prendre pour réduire la vulnérabilité des enjeux (mitigation) on peut citer :

La réduction de la vulnérabilité des bâtiments et infrastructures existants :

-Diagnostic puis renforcement parasismique, consolidation des structures, réhabilitation ou démolition et reconstruction.

La construction parasismique

Le zonage sismique impose l'application de règles parasismiques pour les constructions neuves. Ces règles sont définies dans des normes, qui a pour but d'assurer la protection des personnes et des biens contre les effets des secousses sismiques. Elles définissent les conditions auxquelles doivent satisfaire les constructions nouvelles pour atteindre ce but.

En cas de secousse " nominale ", c'est-à-dire avec une intensité théorique maximale fixée selon chaque zone, la construction peut subir des dommages irréparables, mais elle ne doit pas s'effondrer sur ses occupants.

En cas de secousse plus modérée, l'application des dispositions définies dans les règles parasismiques doit aussi permettre de limiter les destructions et, ainsi, les pertes économiques.

Les grandes lignes de ces règles de construction parasismique sont :

- ☐ La prise en compte de la nature du sol,
- ☐ La qualité des matériaux utilisés,
- ☐ La conception générale de l'ouvrage (qui doit allier résistance et déformabilité),
- ☐ L'assemblage des différents éléments qui composent le bâtiment (chaînages),
- ☐ La bonne exécution des travaux.

E) La prise en compte dans l'aménagement :

Les schémas d'aménagements et d'urbanisme appropriés avec des interdictions de construire dans les zones les plus exposées

Le plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) sismique, établi par l'Etat, définit des zones d'interdiction et des zones de prescription ou sous réserve.

Le PPR comporte notamment deux séries de cartes : les cartes d'études préalables, carte des aléas (intégrant les effets de site géologique et topographique, les failles actives, les risques de liquéfaction et de mouvements de terrain), et carte des enjeux, ainsi que la carte du zonage réglementaire.



PARTIE 2 : Risque sismique et développement

Résumé :

Le séisme contribue à environ 50% des 65.000 morts/annuels provoqués par les catastrophes naturelles. Les régions sismiques sont localisées en grande partie sur le pourtour de l'Océan Pacifique et le long de la chaîne Alpine Himalayenne, mais les séismes ayant provoqué plus de 100.000 morts sont tous situés en Asie. La répartition des morts et des dégâts est donc différente de l'activité sismique ainsi que de la densité de population et de la concentration urbaine. Il apparaît donc très clair qu'une disparité existe dans la « Vulnérabilité » des pays face au risque sismique.

Les séismes sont beaucoup plus meurtriers dans les pays pauvres que dans les pays développés qui ont appris progressivement à s'en protéger. On sait que le doublement de la population mondiale depuis les années 60 a eu lieu principalement par accréation urbaine dans les pays pauvres. Il faut donc tenter de protéger ces populations du séisme par souci humanitaire. Il faut le faire de manière adaptée au niveau de connaissance et de construction locale.

2-1-Sismicité, risque sismique et prédiction :

Depuis 1900 la moyenne des décès lors de séismes est de l'ordre de 25.000 personnes/an. Cette valeur n'est pas constante dans le temps et il y a eu des séismes plus particulièrement meurtriers faisant plus de 100.000 morts : à Messine (1908), en Chine (1920, 1927, 1976), au Japon (1923) et en Union soviétique (1949). Ces séismes ne signifient pas une augmentation du nombre des séismes de magnitude élevée car il y a, en moyenne chaque année, un seul séisme de magnitude supérieure à 8 et environ 150 séismes de magnitude supérieure à 6. On pourrait penser que ces catastrophes, qui avaient eues lieu avant les années 1950, étaient révolues dans un monde plus moderne à la technique mieux contrôlée. On constate au contraire une augmentation du nombre de morts avec le temps.

Dans les décennies 1950-60, l'ambition des scientifiques a été de travailler sur les précurseurs des séismes. Le but était de mettre en évidence des phénomènes permettant de générer une alerte. Il a fallu revoir cette ambition à la baisse ; s'il y a eu quelques très rares alertes couronnées de succès, elles n'ont jamais pu être répétées, et devaient beaucoup au hasard et à la chance. La raison de cet échec tient beaucoup à la très grande complexité de la physique des milieux dans lesquels se produisent les séismes, physique qu'on ne peut étudier en laboratoire dans des conditions d'expérience contrôlée.

Plus modestement, les scientifiques ont travaillé sur l'identification des zones sismiques et la prédiction à long terme (de l'ordre du siècle). Les résultats ont été bien meilleurs et la plupart des zones à risques sont maintenant connues, bien que quelques séismes arrivent aussi dans des régions considérées comme stables. Les scientifiques ont aussi travaillé, a posteriori, sur les séismes destructeurs pour mieux les connaître, analysant les détails de la faille, de la rupture et de sa propagation. La question qui se pose donc



est de savoir si les scientifiques qui étudient les problèmes, le législateur qui établit la réglementation, le constructeur qui l'applique, travaillent de manière synchrone et équilibrée pour réduire le nombre de morts et de sans-abris.

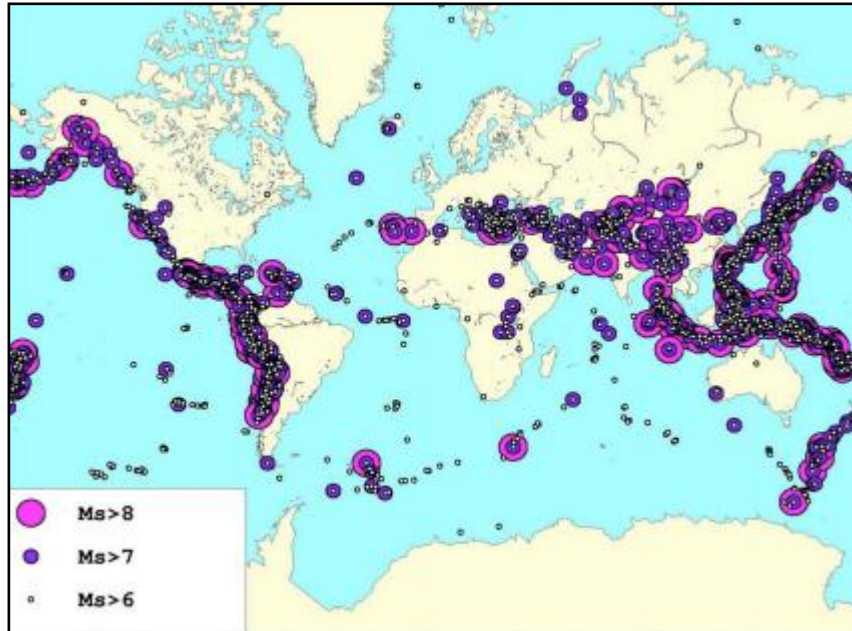


Figure 1 : « Sismicité mondiale depuis 1900 »

2-2-Sismicité et destruction:

Une carte des séismes mondiaux depuis le début du siècle est le meilleur document pour cartographier les régions à risque élevé. Ces régions sismiques sont localisées en grande partie sur le pourtour de l'Océan Pacifique et le long de la chaîne Alpine-Himalayenne. Mais une carte de la mortalité sismique montre que les séismes ayant provoqué plus de 10.000 morts sont principalement en Asie et en Amérique Latine, et ceux ayant provoqué plus de 100.000 morts sont tous situés en Asie. La répartition des morts est donc différente de l'activité sismique. On constate qu'il n'y a pas de corrélation directe entre le nombre de morts et la densité de population.

Depuis le 1900, il y a eu environ 2.500.000 morts dus aux séismes. La Chine a eu la moitié de ces morts, avec la contribution exceptionnelle de 650.000 victimes lors du séisme de Tangshan en 1976. Viennent ensuite l'Iran avec près de 200.000 victimes, le Japon, le Pakistan, l'Italie. Par contre les Etats sismiques de l'Amérique du Nord (Californie, Alaska, Washington), situés sur la bordure Pacifique, ont eu moins de 5.000 morts en un siècle. Il apparaît donc très clair qu'une disparité existe dans la « vulnérabilité » des pays face au risque sismique.



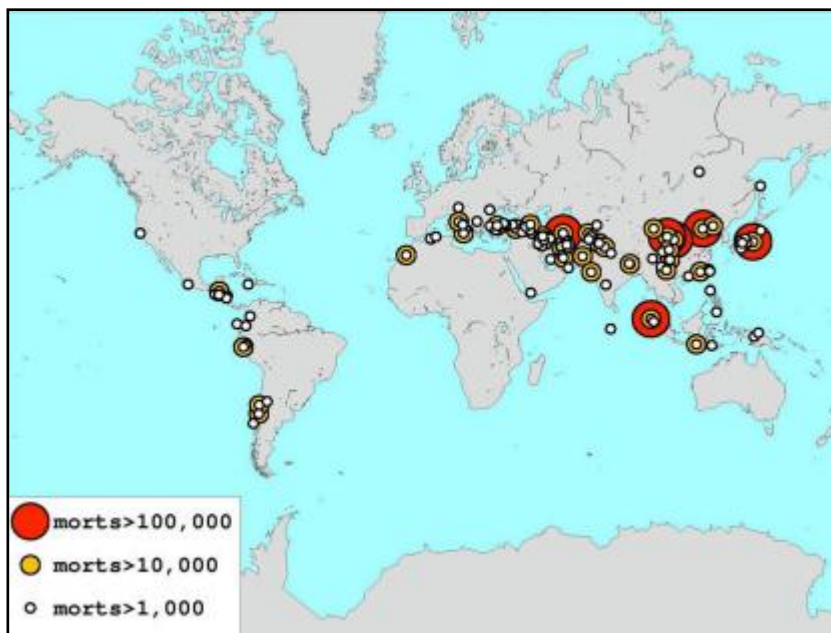


Figure 2 : « Séismes destructeurs depuis 1900 »

Dans l'étude faite par **Denis Hatzfeld** ils ont choisi de le faire en fonction du Produit Domestique.

Ils ont normalisé le nombre de victimes depuis 1900, en divisant celui-ci par la population pour avoir le risque annuel de mort par séisme et par million d'habitants. Ce nombre est de 92 en Arménie, de 41 au Turkménistan, de 29 en Iran, de 25 au Pérou, mais seulement de 0.008 en France et de 0.6 en Californie.

Ensuite ils ont normalisé leurs résultats, en tenant compte du nombre de séismes de magnitude supérieure à 6, souvent considérée comme seuil de destruction. Ils obtiennent 2300 morts/ million/ magnitude 6 en Arménie, 1300 au Turkménistan, 300 au Tadjikistan, mais seulement 2 en Californie et 0.8 en France. Les pays qui ont plus de 100 morts par séisme de magnitude 6 sont des pays dont le PNB/habitant est inférieur à 1.500 \$/an (à l'exception de l'Italie dont la grande majorité des morts a été dû au séisme de Messine de 1909). La plupart des pays qui arrivent à se « protéger » des séismes (moins de 10 morts) ont bien souvent un PNB/habitant supérieur à 5.000 \$.

Les séismes sont donc plus meurtriers dans les pays pauvres que dans les pays développés. Les pays riches ont appris à se protéger des séismes. En effet, l'analyse des victimes dans les pays développés montre clairement une diminution du nombre de victime au cours du temps.



En Italie, trois séismes antérieurs à 1915 ont fait plus de 120.000 victimes et, depuis, il n'y a eu moins de 10.000 morts. En Californie, depuis le séisme de San Francisco de 1906 qui a fait 3.000 victimes, il n'y a eu que 350 morts. Au Japon, depuis le séisme de 1923 qui a fait près de 120.000 morts, il n'y a eu que 30.000 morts malgré un nombre de séismes très élevé (190 séismes de magnitude supérieure à 6). Il semble donc que le 20 siècle a été profitable à la protection antisismique pour les pays développés.

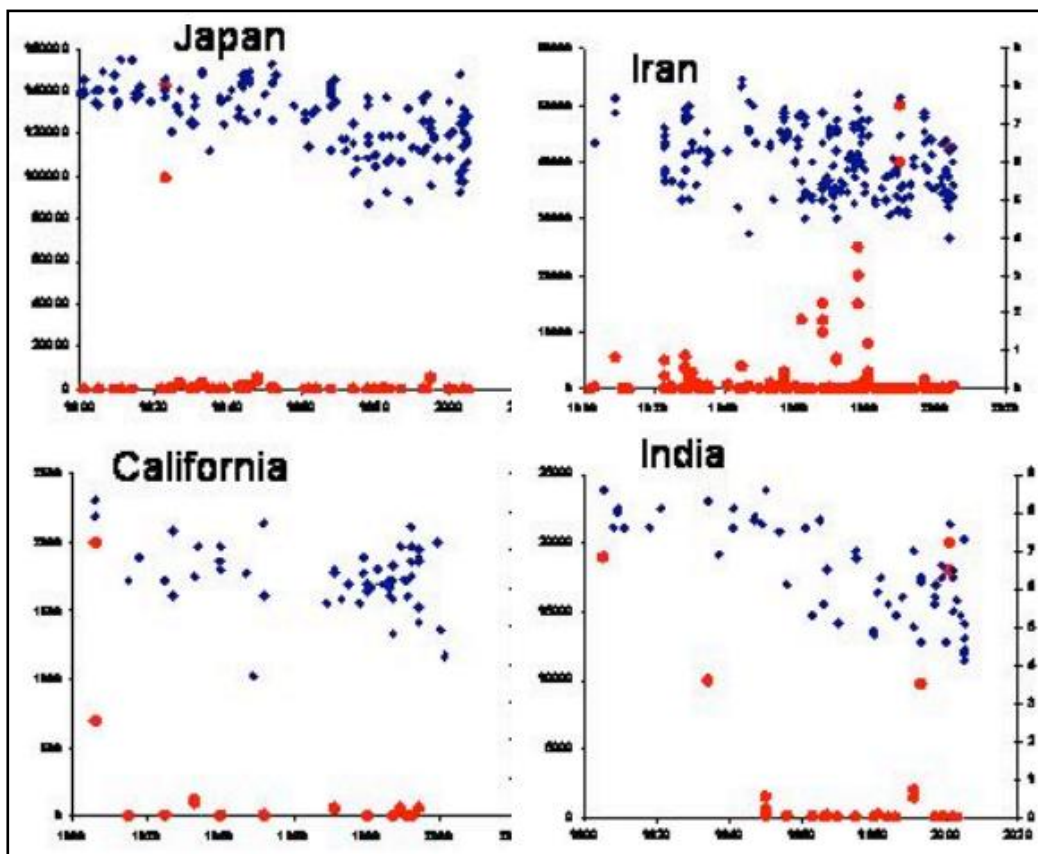


Figure 3 : « Evolution de la mortalité depuis 1900 pour 4 pays. En bleu magnitude des séismes, en rouge nombre de morts. A gauche 2 pays développés (peu de morts depuis 1920), à droite 2 pays en voie de développement (augmentation au cours du temps) »



Par la suite **Denis Hatzfeld** a constaté que le coût économique donne une évidence que les pays riches payent, en absolu, un tribut beaucoup plus important que les pays pauvres. Le Japon, la Californie, l'Italie ont eu à faire face à des dégâts de 139 à 33 milliards de \$US.

C'est la raison pour laquelle ils essaient de se protéger au mieux du risque sismique. Mais si on ramène ce coût au PNB de chacun de ces pays, il constate que ces séismes destructeurs n'ont coûté que 3-4% du PNB de ces pays, alors cela correspondait à 7 fois le PNB de l'Arménie et 30% du PNB pour le Nicaragua.

La solidarité internationale ne suffit pas à rétablir l'équilibre. Les économies de ces pays déjà pauvres mettent alors du temps à se rétablir. Il est choquant de constater le déséquilibre entre les pays pauvres et les pays riches, déséquilibre qui ne peut que freiner leur développement. On peut donc essayer de comprendre les raisons de cette différence pour estimer si certaines actions sont possibles de manière à réduire cette inégalité.

2-3-Les priorités :

Les pays riches ont progressivement appris à se protéger des séismes. Pour cela, ils ont développé une recherche concernant l'identification des zones à risques, l'évaluation du mouvement du sol lors de séisme, le comportement des ouvrages. Ils ont aussi mis en place une réglementation adaptée et vérifié qu'elle était appliquée. Enfin, ils ont mis en place des structures de gestion de crise de manière à minimiser les pertes (souvent très importantes) dues à la désorganisation conjoncturelle des structures. Toute la démarche s'est progressivement adaptée aux modes de construction, à la technicité, et aux traditions des pays concernés. Tout cela a été accompagné des budgets nécessaires. Dans le cas des pays pauvres, nous constatons plusieurs problèmes d'origines différentes.

L'identification des zones à risques, de même que celui concernant le mouvement du sol, peut être traité de la même manière que dans les pays riches. Il ne s'agit donc que de sensibilisation et d'argent. Il faut donc aider tous (et pas seulement ceux qui ont notre faveur) ces pays à effectuer les études nécessaires, là où cela est utile pour eux, et non pas seulement là où l'action des organisations internationales est la plus visible.

Il faut le faire de manière adaptée au niveau de connaissance et de construction locale. Trop souvent notre recherche s'intéresse au développement des techniques sophistiquées. Nous transmettons notre connaissance de plus en plus complexe, par le biais d'articles scientifiques et de colloques, utilisant un langage ésotérique difficilement compréhensible par des ingénieurs ne possédant pas notre code de communication. Cette sophistication est bien souvent inutile aux pays pauvres.



Nous devons le faire en tenant compte de la technologie des constructions en place et à venir. Dans l'amélioration de la réglementation des pays riches, nous avons investi principalement dans l'amélioration de techniques modernes de construction. La priorité peut être différente dans les pays pauvres et l'aide sera d'autant plus efficace qu'elle sera plus proche des techniques massivement utilisées localement. Seule une faible fraction des constructions des pays pauvres utilise des techniques sophistiquées alors que beaucoup de constructions locales pourraient être renforcées par des améliorations simples à mettre en œuvre. Il faut donc travailler à adapter la construction antisismique à la tradition locale et diffuser une réglementation simple à ceux qui construisent la plus grande partie de l'habitat, c'est-à-dire les maçons locaux.



Figure 4 : « Iran, à gauche maison traditionnelle à vulnérabilité élevée, à droite tentative locale de diminuer la vulnérabilité »

Nous devons le faire vite, car c'est dans les années à venir que l'expansion urbaine des pays pauvres va avoir lieu. Ces pays vont avoir à construire les maisons, écoles et usines pour 2 milliards d'humains. L'enjeu est donc majeur pour ces pays. On sait que le surcoût antisismique est mineur (5-10%) lors de la construction, alors que la réhabilitation d'ouvrages existants est souvent plus chère qu'une construction neuve.

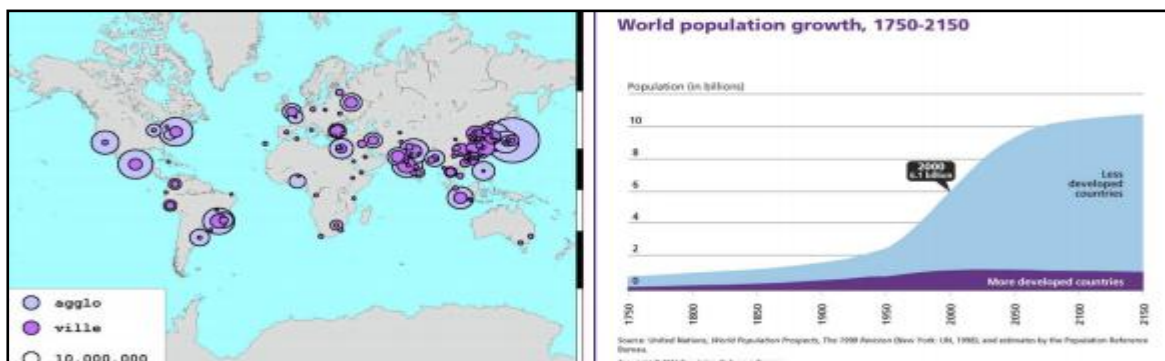


Figure 5 : « A gauche concentration urbaine, a droite évolution de la population »



PARTIE 3 : Vulnérabilité sismique des constructions

3-1-Réponse d'une structure à une sollicitation sismique :

Les mouvements de la croûte terrestre génèrent des ruptures en son sein ayant pour conséquence la mise en vibration du sol. Après avoir parcouru la distance nécessaire depuis le foyer du séisme, au cours de laquelle il y a eu atténuation et transformation des signaux transmis, ceux-ci génèrent des ondes de surface qui mettent en vibration les constructions se trouvant dans l'environnement proche de l'épicentre.

Une construction est composée d'une ossature porteuse, la structure, et d'équipements secondaires permettant d'en assurer les fonctions principales (couverture, fermeture, séparations, circulations, matériels techniques divers,...). Ainsi la structure reliée au sol par les fondations qui doit assurer la stabilité sous l'effet de la gravité (les masses résultant de l'ensemble des équipements sont supportées par la structure), les effets associés au climat (vent, neige, variations de température) et en zone sismique les tremblements de terre.

✚ Selon les grands principes de la mécanique, lorsqu'une structure est sollicitée par une action dynamique, tel l'effet des ondes sismiques, sa réaction fait intervenir :

- *La distribution des masses au sein de la structure. De ce point de vue l'effet des masses en hauteur est plus difficile à maîtriser que celui des mêmes masses en partie basses (figure6 : l'exemple d'un pont ruiné par ce phénomène à Kobé –17/01/95).*



Figure 6 : « la ruine d'un pont lors du séisme de Kobé par effet de pendule inversé »



- La rigidité locale et globale de la structure.
- La possibilité de dissiper de l'énergie, par frottements et interactions entre différents éléments de la structure ou entre le sol et la structure (des appareils spéciaux peuvent être disposés pour jouer ce rôle).
- ✚ Un certain nombre de règles doivent présider à la conception des structures parasismiques :
 - ✓ Conditionner des zones fusibles. Les matériaux ne pouvant résister sans dommage aux sollicitations importantes auxquels ils sont soumis, la disposition de zones susceptibles de s'assouplir sans compromettre la stabilité d'ensemble s'avère très efficace pour éviter une ruine incontrôlée.
 - ✓ Assurer le respect des volumes. Dans un bâtiment par exemple, une ruine de poteaux peut générer l'écrasement de tout un étage dont on imagine les conséquences pour les personnes et les biens qui s'y trouvent.
 - ✓ Dans le cas de constructions de type industriel, contenir les phénomènes potentiellement dangereux (échappement de fluides, de gaz, de rayonnements,...).

3-2-Les apports récents de la recherche en matière d'analyse de vulnérabilité :

La majorité du parc des constructions n'a pas été construit en utilisant les règles parasismiques, ce qui ne veut pas dire que ces constructions ne sont pas en mesure de résister aux séismes.

L'analyse de leur vulnérabilité est un souci très actuel, elle permet d'estimer un niveau de résistance et peut conduire à des décisions relatives à leur confortement pour faire face à des niveaux de sécurité supérieurs.

Dans ce sens citons l'exemple de travaux dont **Jacky Mazars** assure la responsabilité scientifique, conduits ces dernières années vis à vis de la vulnérabilité de structures à murs porteurs en béton, très répandues en France. La **figure 7** montre un essai d'une maquette échelle 1/3 réalisé sur la table sismique du CEA à Saclay.



Figure 7: « un essai de structure à mur en béton sur la table sismique Azalée du CEA Saclay »



*Ce matériel tout à fait exceptionnel (le plus performant en Europe) permet d'imprégner à une structure un véritable séisme et d'en analyser les effets. En parallèle sont conduites des simulations numériques de très haut niveau (intégrant tous les aspects cités plus haut) capables de décrire les phénomènes de ruine locaux et globaux. Ci-joint (**figure 8**) le résultat de la prévision de ruine qui s'est avérée très réaliste (fissuration du béton et rupture locale des armatures).*

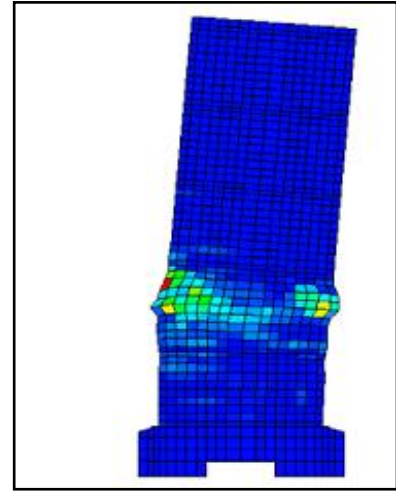


Figure 8: « murs porteurs en béton »

De ces travaux il résulte que les structures à murs en béton apparaissent de bonne qualité parasismique, à la condition que les dispositions constructives, notamment dans l'association des murs et des planchers, dans la régularité de la structure et dans la disposition de murs dans deux directions orthogonales (contreventement), soient bien respectées.

Ces résultats permettent de faire avancer la réglementation parasismique européenne et les outils numériques mis au point deviennent disponibles pour réaliser des analyses sur d'autres types de structures. C'est ainsi que des travaux sont en cours ou en projet sur des installations telles des barrages en France et en Suisse ou des monuments historiques en Italie.

Mais tout ne se règle pas aussi simplement, l'estimation de la vulnérabilité à grande échelle (celle d'un quartier, d'une ville, d'une région) nécessite la mise au point de stratégie dont les développements sont en cours. L'Italie a bien avancé sur ce sujet, mais la France n'est pas en reste, un groupe « vulnérabilité du bâti existant » a été constitué à cet effet sous l'égide de l'Association Française de génie Parasismique. Par ailleurs il faut citer la mise en place à Grenoble d'une plate-forme de recherche associant plusieurs laboratoires de L'INPG de l'UJF, le Cemagref et le LCPC, sur le thème « Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages » (RNVO) au sein de laquelle le risque sismique a sa place.

Les années qui viennent devraient donc permettre d'avancer vers de nouvelles propositions pour prendre en compte ce problème qui n'est pas mineur au sein de celui plus général de la prévention des risques.



PARTIE 4 : Les barrages et le risque sismique

4-1-Accidents liés à des séismes :

Les accidents de barrages liés à des séismes sont rares. Les tableaux (01. 02. 03) extraits de publications de la Commission internationale des grands barrages (CIGB) montrent que les accidents les plus importants concernent les ouvrages en remblai. On retient surtout la rupture très étudiée du barrage en remblai de San-Fernando (9 février 1971).

Lors d'un récent séisme en Californie, le barrage voûte de Pacoima a été soumis à une sollicitation sismique très élevée. Il n'est pas impossible que la rupture du barrage ait été évitée grâce à un niveau bas de la retenue.

Des accidents plus graves, avec rupture complète, se sont produits sur des remblais de stériles lors des séismes, notamment au Chili. Toutefois la technique de montée de ces remblais est une technique minière par voie humide, complètement différente de la technique de génie civil de construction des barrages en terre.

Enfin, on peut noter que certaines secousses sismiques peuvent être imputées à la présence des barrages eux-mêmes (plus exactement au poids de l'eau contenu dans le réservoir). Cet effet n'a été constaté que pour des aménagements de très grosse capacité et de grande hauteur. De plus, la retenue semble plutôt agir comme libérateur de contraintes préexistantes.

4-2-Incidences sur l'exploitation :

Sur certains barrages, ils ont installé, lors de la construction, des sismographes (par exemple à Grand Maison). Ces appareils, généralement propriété de laboratoires de recherche, ne sont pas généralement maintenus sur le site pendant toute la phase d'exploitation.

A la suite d'un séisme, il convient :

- De réaliser une inspection visuelle des barrages.*
- De réaliser une auscultation immédiate et approfondie. Ceci est bien entendu beaucoup plus facile si le barrage est télé ausculté.*



Barrage	Hauteur (m)	Pays	Date	Magnitude M	Dégâts
La Marquesa et La Palma	10 10	Chili	1985	7.8	2 barrages rompus 16 barrages-dégâts importants 16 barrages-faibles dégâts
San Andreas Dam	32	USA Californnie	1906	8.25	Fissure longitudinale – Fissure transversale des appuis
Upper Crystal Springs	26	USA Californnie	1906	8.25	Mouvement du barrage de 2.4 m
Sheffield Dam	8	USA Californnie	1925	6.3	Rupture totale
Hebgen Dam	35	USA Montana	1959	7.5 à 7.8	Tassement du barrage : 1.2 m – Effet de vague
Lower San Fernando	40	USA Californnie	1971	6.6	Tassement de la crête : 8.5 m
Upper San Fernando	24	USA Californnie	1971	6.6	Tassement de crête : 900 mm – Déplacement vers l'aval de 1.5 m
Paiho Main Dam	66	Chine	1976	7.8	Grand glissement : 330 barrages endommagés
Douhe Dam	22	Chine	1976	7.8	Fissure longitudinale
Masiway Dam	25	Philippines	1990	7.7	Tassement de la crête : 1.0 m – Fissure longitudinale
Ono Dam	37	Japon	1923	8.3	Tassement de la crête 250 mm- Fissure profonde adjacente au noyau
74 remblais	1.5 à 18	Japon	1939	6.6	12 barrages détruits, 40 glissements
Chatsworth	11	USA	1930	Non connue	Fissures, fuites
Earlsburn	6	Ecosse	1839	4.8	Rupture totale

Tableau 01: « Effet sur quelques barrages en terre »

Barrage	Hauteur (m)	Type	Pays	Date	Magnitude M	Dégâts
Koyna	103	Poids-béton	Inde	1967	6.5	Fissures importante
Sefid Rud	106	Contrefort	Iran	1990	7.3 à 7.7	Fissures importantes
Pacoima	113	Voûte	USA Californnie	1971	6.6	Fissuration de l'appui rive gauche
Lower Crystal Springs	47	Poids incurvé	USA Californnie	1906	8.3	Pas de dégâts
Blackbrook	29	Barrage poids en béton et maçonnerie	UK	1957	5.5	Déplacement de la crête – Fissures
Hsingfengkiang	105	Contrefort	Chine	1962	6.1	Fissures importantes
Honen Ike	30	Voûtes multiples	Japon	1946	Non connue	Fissures de la voûte près des contreforts
Ambiesta	59	Voûte	Italie	1976	6.5	Pas de dégâts
Maina di Sauris	136	Voûte	Italie	1976	6.5	Pas de dégâts
Shenwao	53	Poids-béton	Chine	1975	Non connue	Fissures
Redflag	35	Poids-maçonnerie	Chine	1970	Non connue	Fissures
Rappel	110	Voûte	Chili	1985	7.8	Dégâts à l'évacuateur et à la tour de prise d'eau

Tableau 02: « Effet sur quelques barrages en béton ou maçonnerie »



Barrage	Hauteur (m)	Pays	Date	Magnitude M	Dégâts
Cogoti Dam	85	Chili	1943	7.9	Tassement : 600 mm
Minase Dam	67	Japon	1964	7.5	Tassement : 61 mm – Dommages mineurs au joint
La Calera Dam	30	México	1964	Non connue	Submersion par une vague de 2.5 m de hauteur – Grand glissement sur 120 m
Oroville Dam	230	USA Californie	1975	5.7	Tassement : 10 mm – Déplacement vers l'aval : 150 mm
El Infiemillo	148	México	1979	7.6	Tassement : 130 mm
La Villita	60	México	1979	7.6	Tassement : 50 mm
Austrian Dam	56	USA Californie	1989	7	Tassement : 300 mm – Fissures profondes
Miboro Dam	131	Japon	1961	7	Tassement : 30 mm – Déplacement vers l'aval : 50 mm
Malpase Dam	70	Pérou	1938	Non connue	Tassement : 76 mm Déplacement vers l'aval : 51 mm
Malpase Dam	70	Pérou	1958	Non connue	Tassement : 32 mm Déplacement vers l'aval : 58 mm

Tableau 03:« Effet sur quelques barrages en enrochement »



Conclusions

Les évaluations de l'aléa et du risque sismique sont des activités prioritaires dans tous pays où la menace est jugée réelle. Ces notions liées à la géodynamique sont aujourd'hui en pleine évolution à travers le monde et ceci pour trois raisons majeures :

- 1. Les populations n'acceptent plus les phénomènes naturels comme une fatalité. Ceux-ci ne sont plus considérés comme un fiat divin.*
- 2. Il y a un besoin constant de sécurité qui s'est fait jour dans toutes les sociétés.*
- 3. Avec le temps, les risques vont croissant en raison de l'explosion démographique, les préjudices humains et matériels deviennent par conséquent plus importants.*

L'objectif final est d'assurer la sécurité publique en cas de séisme, c'est-à-dire d'éviter les dégâts structuraux importants et les pertes considérables en vies humaines. Les dégâts sont acceptables, mais ils doivent être limités. La prise en compte d'une telle activité nationale exige naturellement un coût. Il s'agit de trouver le meilleur équilibre entre le coût de la surveillance, la probabilité d'occurrence et la réduction de la vulnérabilité.



TABLE DE FIGURES ET DE TABLEAUX

Les figures

<i>Figure (01):«</i>	<i>Sismicité mondiale depuis 1900 »</i>	<i>7</i>
<i>Figure (02):«</i>	<i>Séismes destructeurs depuis 1900 »</i>	<i>8</i>
<i>Figure (03):«</i>	<i>Evolution de la mortalité depuis 1900 pour..»</i>	<i>9</i>
<i>Figure (04):«</i>	<i>Iran, à gauche maison traditionnelle à ...»</i>	<i>11</i>
<i>Figure (05):«</i>	<i>A gauche concentration urbaine, à droite...»</i>	<i>11</i>
<i>Figure (06):«</i>	<i>la ruine d'un pont lors du séisme de Kobé..»</i>	<i>12</i>
<i>Figure (07):«</i>	<i>un essai de structure à mur en béton sur....»</i>	<i>13</i>
<i>Figure (08):«</i>	<i>murs porteurs en béton »</i>	<i>14</i>

Les tableaux

<i>tableau (01):«</i>	<i>Effet sur quelques barrages en terre »</i>	<i>16</i>
<i>tableau (02):«</i>	<i>Effet sur quelques barrages en béton ou maçonnerie »</i>	<i>16</i>
<i>tableau (03):«</i>	<i>Effet sur quelques barrages en enrochement »</i>	<i>17</i>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Denis Hatzfeld, *Laboratoire de Géophysique et Tectonophysique, CNRS, Université Joseph Fourier « Risque sismique et développement »*

Élise Beck, *Maître de conférences Laboratoire Territoires - UMR PACTE 5194 CNRS « approche multi-risque en milieu urbain- Application l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)-».*

Claude Prépetit, *ingénieur, Conseiller Technique au Bureau des Mines et de l'Energie (BME) « Aléa et risque sismique en Haïti »*

Jacky Mazars, *professeur à l'INPG, responsable de la plate-forme de recherche RNVO : Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages « Vulnérabilité sismique des constructions »*

Patrick Le Delliou, *chef du Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages « Les barrages et le risque sismique ». Extrait du Bulletin du Service Technique de l'Energie et des Grands Barrages n°13.*

PLUMIER André - CAMELBEECK Thierry - BARSZEZ Anne-Marie *« le risque sismique et sa prévention en région wallonne »*