



RAPPORT

de la mission post-sismique sur le séisme du Mexique
du 19 septembre 2017

Février 2018



Association Française du Génie Parasismique
French Association for Earthquake Engineering

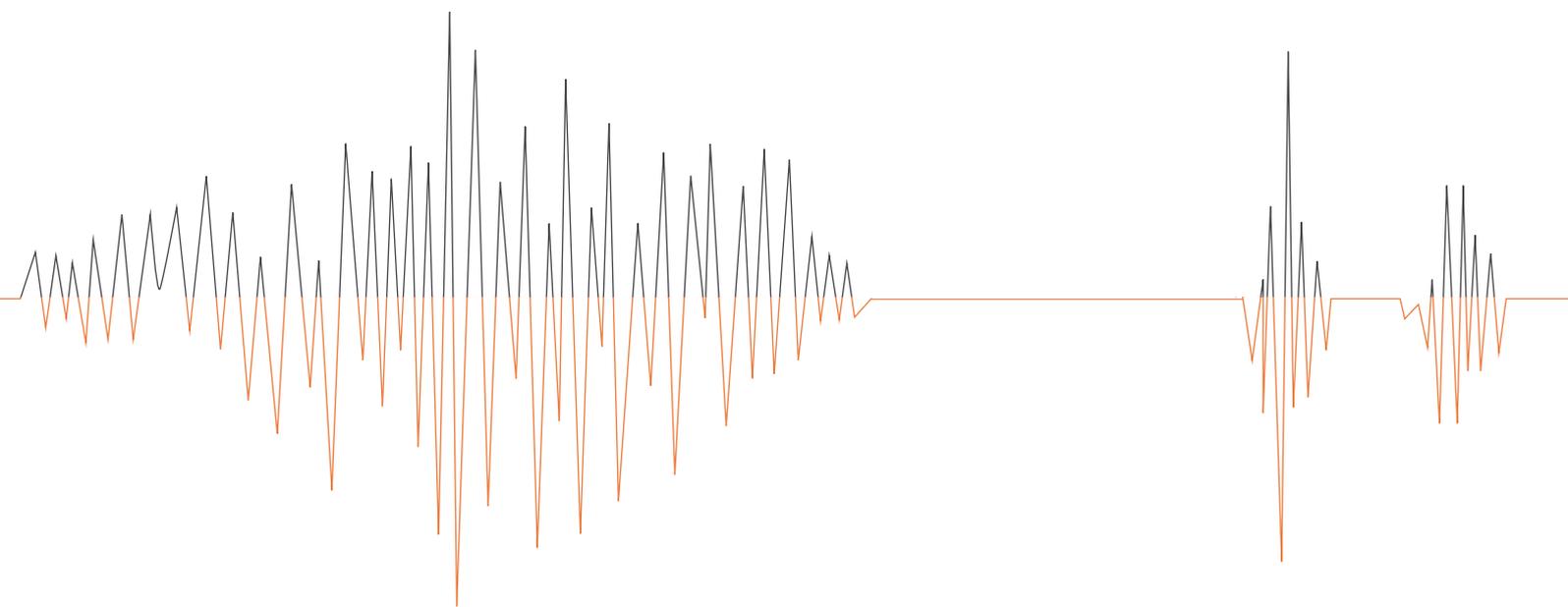


Photo de couverture :

Mexico, modernisation et renforcement
de la tour du Secrétariat de l'Économie.



CDMX : logo de la ciudad de México 2017 : centenaire de la Constitution mexicaine

Sommaire

| | | |
|----|---|----|
| 0 | Introduction | 2 |
| 1 | Présentation de la mission..... | 3 |
| 2 | Sismologie | 6 |
| 3 | Réglementation..... | 15 |
| 4 | Sol et géotechnique | 20 |
| 5 | Fondations..... | 25 |
| 6 | Bâtiments endommagés | 29 |
| 7 | Bâtiments confortés | 40 |
| 8 | Réseaux d'utilité publique..... | 48 |
| 9 | Simulacro | 51 |
| 10 | Gestion de crise | 53 |
| 11 | Diagnostics d'urgence..... | 56 |
| 12 | Système d'information géographique..... | 59 |
| 13 | Le séisme vu à travers les médias..... | 61 |
| 14 | Architecture | 63 |
| 15 | Bâtiments historiques | 69 |
| 16 | Les bâtiments français de Mexico | 72 |
| 17 | Réflexions d'urbanisme | 74 |
| 18 | Conclusions | 78 |
| 19 | Remerciements..... | 80 |

0 Introduction

Le 19 septembre 1985 à 7h17, la Ville de Mexico subissait un séisme très important occasionnant des dégâts considérables et plus de 10 000 victimes.

A l'époque l'AFPS, l'Association Française du Génie Parasismique, avait envoyé sur place une mission composée de Victor Davidovici, Christian Duretz, Bernard Etchepare, Alain Pecker et Pierre Sollogoub.

Les enseignements de cette mission avaient été très importants. Comme dans la plupart des pays soumis au risque sismique, la réglementation parasismique française avait été changée : les recommandations AFPS 92, puis les règles PS 92, remplaçant après 1992 les règles PS 69 qui datait de 1969.

Depuis dans la communauté du génie parasismique, le séisme de Mexico de 1985 est devenu un événement de référence.

Lorsque trente deux ans après, jour pour jour, le 19 septembre 2017 à 13h34, un important séisme a de nouveau frappé la cité de Mexico et que les médias ont donné des images de dégâts importants, la communauté française du génie parasismique n'a pas hésité longtemps et l'AFPS a décidé d'envoyer une nouvelle mission pour s'efforcer de répondre à quatre interrogations principales :

- le séisme de 2017 a-t-il été plus ou moins impactant pour la cité de Mexico que celui de 1985 ?
- les bâtiments récents, construits après 1985, se sont-ils bien comportés ?
- les bâtiments confortés depuis 1985 se sont-ils bien comportés ?
- les bâtiments français de Mexico, reconstruits ou renforcés depuis 1985, se sont-ils bien comportés ?

Le présent rapport, avec quatre-vingts pages en vingt séquences, s'efforce de répondre à ces interrogations¹.

Il s'efforce aussi de présenter la richesse de toutes les problématiques qui ont pu être abordées lors de la mission.

De la même taille que le rapport AFPS de 1985, ce rapport général est volontairement concis et synthétique. Il souhaiterait pouvoir être lu par un vaste public pas nécessairement initié aux problématiques du risque sismique. A l'usage des spécialistes, il sera complété par plusieurs annexes qui seront disponibles sur le site de l'AFPS (www.afps-seisme.org).

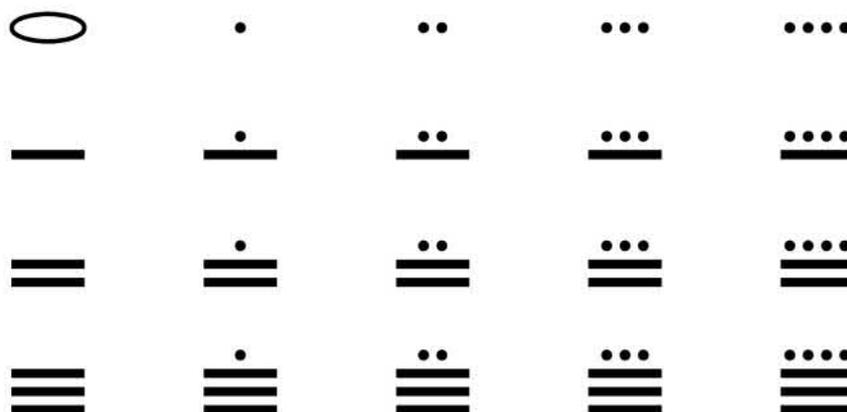


Figure 0.1 – Les vingt premiers chiffres de 0 à 19 en écriture maya

¹ Les Romains comptaient en système décimal (en base 10). Les Celtes comme les Mayas comptaient en système vicésimal (en base 20). Au Moyen Age, en France, le système vicésimal était plus usité que le système décimal. On disait "vins et dis" pour trente, "deux vins" pour quarante, "deux vins et dis" pour cinquante... Et nous avons gardé quatre-vingts au lieu de huitante ou d'octante.

1 Présentation de la mission

1.1 Objectifs

La lettre de mission de l'AFPS avait donné à l'équipe les 4 axes suivants :

1- **Aléa sismique et Géotechnique** : l'étude couvrira l'analyse du contexte sismotectonique de la région et des mécanismes associés à l'événement considéré. Une synthèse des mesures (réseaux accélérométriques, GPS, satellitaire, etc.) et des observations *in situ* sera effectuée. Les effets de site seront également analysés avec les informations recueillies lors de cette mission ;

2- **Comportement des structures** : les observations sur le comportement des structures en béton armé, charpente métallique, maçonnerie, ouvrages d'art et réseaux enterrés et aériens seront synthétisées en identifiant notamment des cas d'étude pédagogiques qui pourront faire l'objet d'études après la mission. Une attention particulière sera portée sur les techniques de renforcement et le comportement des structures ayant fait l'objet de renforcements avant le séisme ;

3- **Urgence, gestion de crise** : un retour d'expérience sur les procédures de diagnostic d'urgence et les outils utilisés au Mexique sera effectué en vue d'améliorer les protocoles en place en France (travaux de la cellule Urgence de l'AFPS pour la Protection Civile) ;

4- **Reconstruction/recomposition** : les retours d'expérience associés à la reconstruction/recomposition territoriale après le séisme de Mexico de 1985 (règles parasismiques et règles d'urbanisme) seront appréhendés en visitant des lieux qui avaient déjà été touchés par ce séisme.

En plus de ces 4 axes qui sont les fondamentaux des missions d'observation post-sismique réalisées sous l'égide de l'AFPS, la mission pouvait à son initiative s'ouvrir à d'autres problématiques, d'autant plus que pour la première fois dans l'histoire de l'AFPS, le chef de la mission était un architecte.

L'équipe s'est donc aussi donné comme objectifs d'aborder les domaines de l'architecture, des bâtiments historiques, des bâtiments français de Mexico, de la prévention, des exercices d'alerte ou des systèmes d'information géographique, un domaine sans doute très prometteur.

Par ailleurs et comme pour toutes les missions AFPS, un des objectifs importants était la formation des jeunes membres de l'association. En matière de formation au génie parasismique, rien ne vaut en effet la prise de conscience sur place des effets d'un séisme.

1.2 Composition de l'équipe

L'équipe qui s'est rendue à Mexico était composée de 8 personnes, par ordre alphabétique :

| Nom | Organisme d'origine | Thématiques |
|-------------------|-----------------------------------|---|
| Stéphane BRULE | MENARD | Aléa, Géotechnique |
| Cédric DESPREZ | IFSTTAR | Structures, Urgence |
| Charles FERNANDEZ | GRTgaz | Structures, Géotechnique, Réseaux |
| Marc GIVRY | Marc Givry Architecte | Chef de mission, Architecture, Urbanisme, Urgence |
| Kevin MANCHUEL | EDF | Aléa et effets de site |
| Gustavo MENDOZA | Géodynamique & Structure | Structures |
| Benjamin RICHARD | CEA Saclay | Structures |
| Carlos TAYLOR | Bureau d'Études Structures TAYLOR | Structures |

A distance, Agathe ROULLE, du BRGM, a pu assister la mission de ses conseils et de ses indications².

Sur place Carlos CARAMES et Javier IBANEZ, de DYNAMIS ASSOCIATES, qui étaient présents à Mexico les jours qui ont suivi le séisme, ont pu se joindre ponctuellement à la mission.

² Agathe ROULLE a passé 2 ans à l'UNAM à Mexico et a soutenu en 2004 une thèse de sismologie sur l'Étude du mouvement sismique dans la vallée de Mexico. La mission a regretté que des contraintes professionnelles ne lui ait pas permis de se joindre à la mission sur place. A distance toutefois, ses apports ont été précieux.

1.3 Déroulement de la mission

La mission s'est déroulée sur place sur une période de 10 jours, avec le déroulement suivant :

| Jour | Date | Equipe | Actions |
|------|------------|--|---|
| 1 | 07-11-2017 | Tous | - Arrivée à Mexico, transport à l'hôtel, rencontre avec l'équipe locale d'accueil - Briefing de la mission |
| 2 | 08-11-2017 | Équipe 1 | - Rencontre avec le Pr Mario Ordaz (UNAM) |
| | | Équipe 2 | - Conférence sur les événements sismiques de septembre 1985 et 2017 |
| | | Tous | - Visite à l'UNAM - Visite du Laboratoire d'instrumentation sismique - Visite de l'Institut d'Ingénierie Sismique (Dr Silvia Raquel Garcia Benitez) - Visite du Centre National des Désastres et du Laboratoire d'Essais Structuraux - Rencontre avec le Pr Gabriel Auvinet (UNAM) – contexte sismologique et géologique de la ville de Mexico – systèmes de fondations |
| 3 | 09-11-2017 | Équipe 1 | - Campagne de mesure H/V - Rencontre avec le Pr Ovando-Shelley (UNAM) – discussions autour du contexte géotechnique de la ville de Mexico |
| | | Équipe 2 | - Visite des sites les plus touchés suite au séisme de 1985 |
| | | Équipe 3 | - Visite de l'entreprise BalOndeo (réseaux d'eau) – visite d'un gestionnaire de réseau de transport de gaz naturel (ENGIE Mexico, Antoine Olivier) – Rencontre avec le Pr Efrain Ovando Shelley |
| 4 | 10-11-2017 | Équipe 1 | - Campagne de mesure H/V |
| | | Équipe 2 | - Rencontre avec les Pr Meli et Pr Ramirez à l'UNAM – évolution des codes et normes de la ville de Mexico – ouvrages instrumentés |
| | | Équipe 3 | - Rencontre à l'Ambassade du responsable des Services de gestion et des Attachés de Sécurité intérieure - Rencontre avec la Directrice de la Casa del Arquitecto |
| | | Équipe 4 | - Visite du Centre National de Contrôle du Gaz Naturel (CENAGAS) |
| 5 | 11-11-2017 | Équipe 1 | - Campagne de mesure H/V - Rencontre des représentants locaux de la société Menard |
| | | Équipe 2 | - Visite des sites les plus touchés suite au séisme de 2017 |
| 6 | 12-11-2017 | Équipe 1 | - Débriefing des informations recueillies et début de structuration du rapport |
| | | Équipe 2 | - Campagne de mesure H/V |
| 7 | 13-11-2017 | Équipe 1 | - Campagne de mesure H/V - Rencontre des représentants de la société Menard associés au chantier du nouvel aéroport de la ville de Mexico |
| | | Équipe 2 | - Visite de la ville de Puebla (zone épiscopale) - Rencontre avec le Conservateur des monuments historiques de l'état de Puebla - Rencontre avec le Directeur de la protection Civile de la ville de Puebla - Rencontre avec Victor Jimenez, ENGIE Mexico (ENGIE Mexico) - Rencontre avec Gas de Morelos |
| 8 | 14-11-2017 | Équipe 1 | - Campagne de mesure H/V |
| | | Équipe 2 | - Rencontre avec le Directeur de l'AFP et une journaliste française indépendante |
| | | Équipe 3 | - Visite de "l'Instituto Francés de America Latina" et de "la Casa de Francia" - Rencontre avec le Coordinateur National des Monuments Historiques |
| | | | Départ de trois des membres de l'équipe |
| 9 | 15-11-2017 | Équipe 1 | - Visite à Cuernavaca sur un site de glissement de terrain + visite de diagnostic avec le Pr Efrain Ovando Shelley |
| | | Équipe 2 | - Rencontre avec les chargés de coopération scientifique de l'Ambassade - Rencontre avec le Consul adjoint, Chef de Chancellerie - Visite technique de l'Ambassade - Visite des Monuments historiques endommagés de Mexico |
| 10 | 16-11-2017 | Équipe 1 | - Rencontre avec le Directeur adjoint de l'Agence Française de Développement |
| | | Départ du reste des membres de l'équipe | |

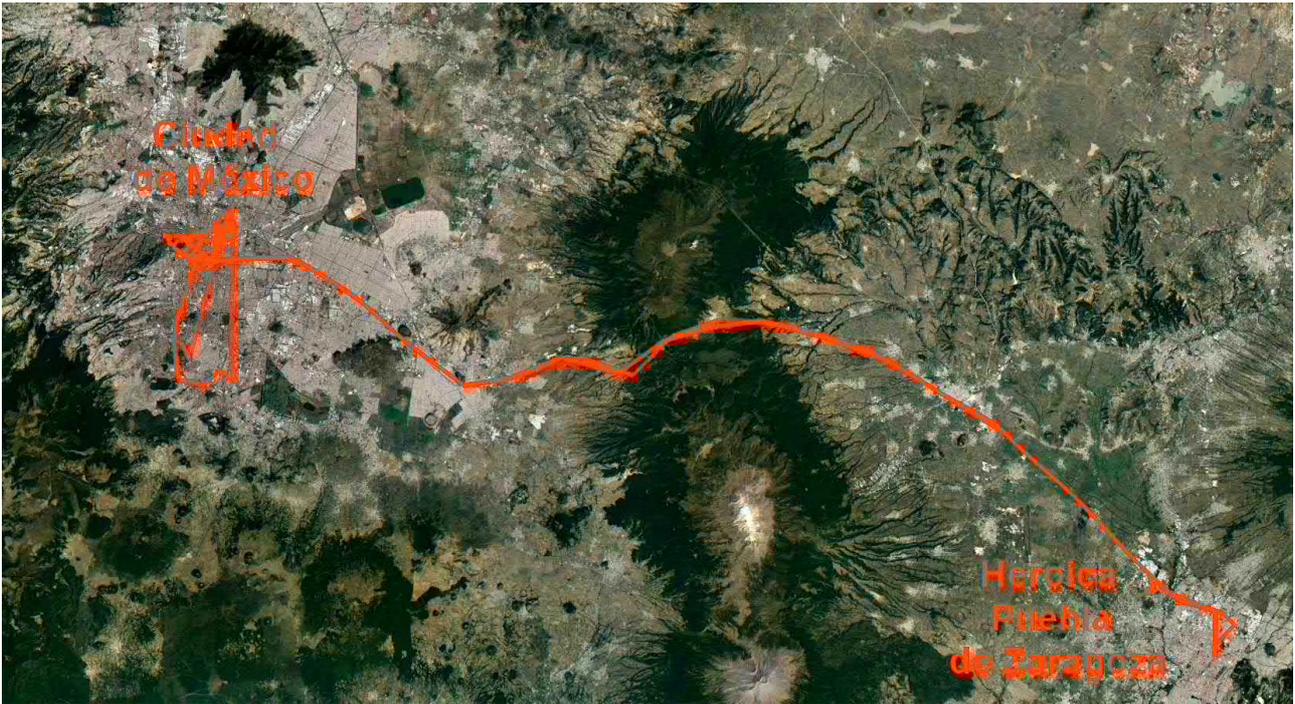


Figure 1.1 – Tracé GPS de la mission entre Mexico et Puebla



Figure 1.2 – Tracé GPS de la mission dans Mexico

2 Sismologie

2.1 Contexte tectonique

Le Mexique est situé au sein de l'une des régions les plus sismiquement actives du monde car il est localisé à l'interface de 5 plaques tectoniques (Figure 2-1): la plaque Cocos, la plaque Amérique du Nord, la plaque Pacifique, la plaque Caraïbes et la plaque Rivera. Une grande partie de la sismicité touchant le Mexique se produit en lien avec la zone de subduction dans la région Sud du pays, où la plaque Cocos plonge sous la plaque Amérique du Nord, avec une vitesse d'environ 6 cm/an (Figure 2-2).

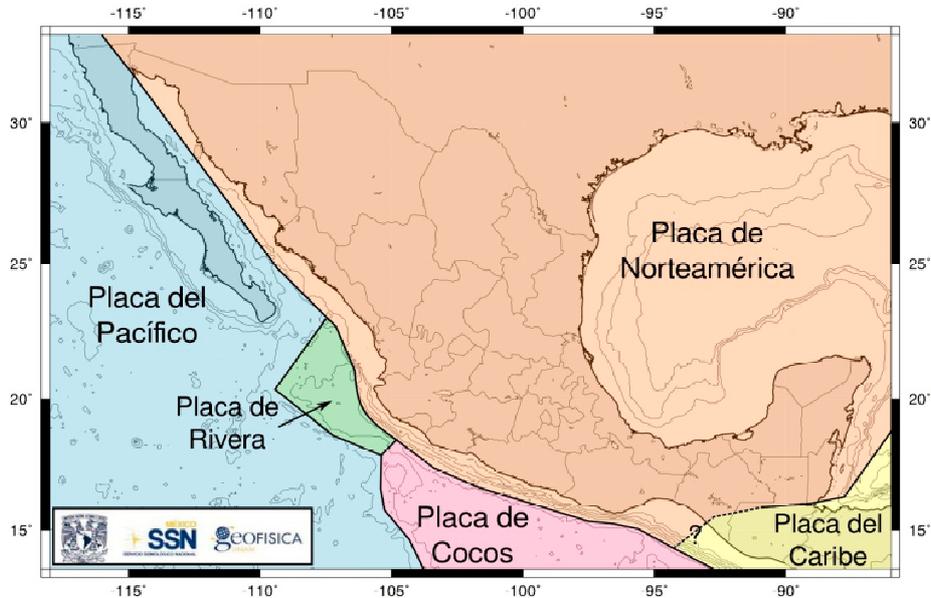


Figure 2-1 - Plaques lithosphériques en jeu dans le contexte tectonique du Mexique [1].

Au sein d'une zone de subduction les séismes peuvent être de nature différente en fonction de l'endroit où ils se produisent. On distingue :

- les séismes de subduction, qui se produisent au niveau de la zone de contact entre la plaque dite supérieure et la plaque dite plongeante. Il s'agit de séismes présentant un mécanisme en faille inverse. La localisation des séismes de subduction majeurs depuis le début du XXème siècle est représentée par les zones colorées sur la Figure 2-2 ;
- les séismes intraplaques, qui se produisent au sein de la plaque plongeante. Ce sont des mécanismes en faille normale dus au fait que la plaque qui s'enfonce dans le manteau s'étire sous son poids. Les principaux séismes intraplaques connus pour le Mexique sont les étoiles rouges et jaunes sur la Figure 2-2 ;
- les séismes continentaux, localisés dans la plaque supérieure. Ils peuvent être de nature variée (inverse, normal ou décrochant), et résultent des contraintes transmises dans la plaque supérieure par l'intermédiaire du couplage avec la plaque plongeante. Les plus importants sont indiqués par les étoiles bleues.

Le séisme du 19 septembre 2017 ($M_w=7.1$) est un séisme intraplaque. Sa localisation épiscopentrale est présentée sur la Figure 2-2 et sa position en profondeur est indiquée sur la coupe schématique de la zone de subduction au niveau de Mexico présentée en Figure 2-3. On retrouve la plaque Cocos (en mauve) qui plonge sous la plaque Amérique du Nord (en jaune). Au niveau de la portion de la zone de subduction, la plaque Cocos, après s'être enfoncée sous la plaque Amérique du Nord s'horizontalise sur environ 200 km avant de plonger complètement dans le manteau. C'est au sein de la plaque plongeante que s'est produit le séisme du 19 septembre 2017, au niveau de la flexure entre la partie horizontale et le plongement dans le manteau, où sont favorisées les contraintes en extension et donc l'occurrence de séismes en faille normale.

Plusieurs autres séismes intraplaques sont recensés au cours du XXème siècle dans la zone du séisme du 19 septembre 2017 [2], à des profondeurs pouvant varier fortement. On notera parmi ceux-ci les séismes du 03/02/1911 ($M_s=7,2$), du 10/02/1928 ($M_s=7,7$), du 15/01/1931 ($M_s=7,8$), du 26/07/1937 ($M_s=7,2$), du 28/08/1973 ($M_s=7,3$), du 10/10/1980 ($M_w=7,1$) et du 30/09/1999 ($M_w=7,4$). Enfin, le séisme du 07 septembre 2017 ($M_w=8,2$), survenu plus au sud, dans la zone Tehuantepec, était également un séisme intraplaque.

Un des séismes de subduction majeurs ayant affecté le Mexique est le séisme du 19 septembre 1985, au niveau de l'état de Michoacan (on notera également le séisme du 28/07/1957, $M_s=7,5$, qui a vu la chute de l'Ange qui couronne la Colonne de l'Indépendance à Mexico). Concernant les séismes continentaux, on peut citer le séisme d'Acambay en 1912 [3].

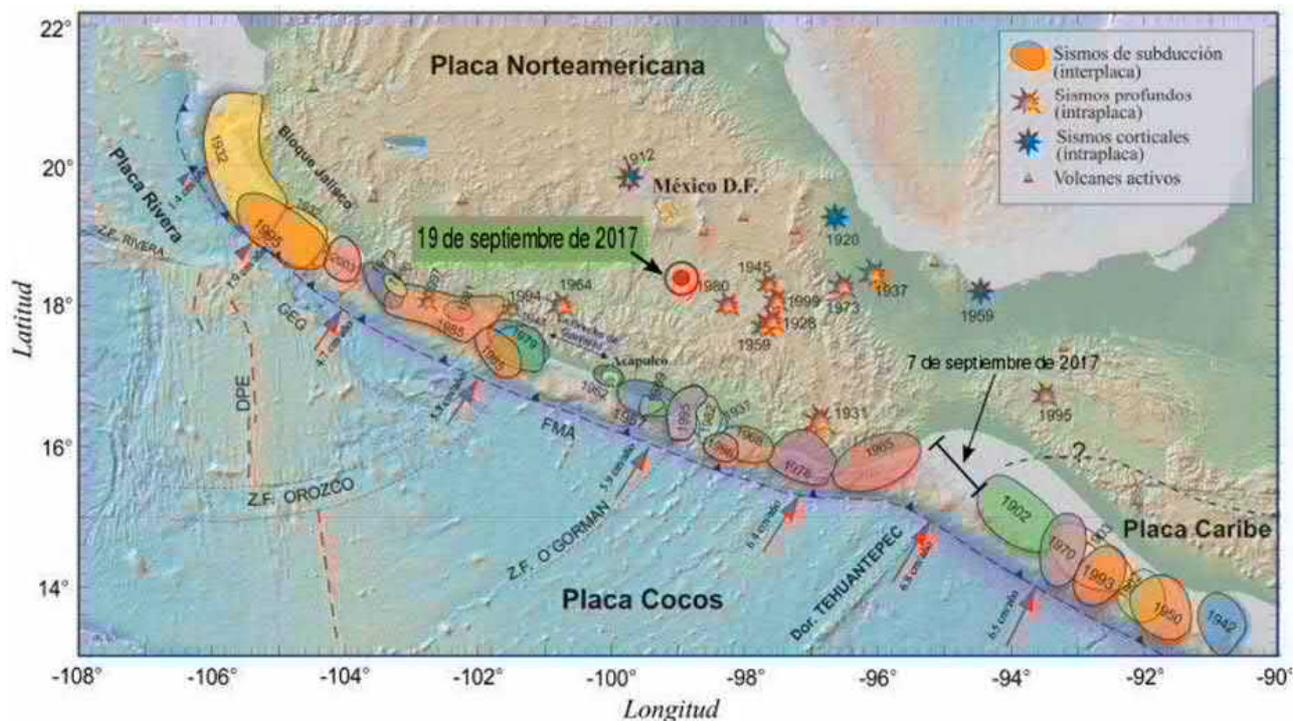


Figure 2-2 - Localisation des séismes majeurs connus au Mexique [4]. Les zones de couleur représentent les surfaces de rupture des séismes de subduction, les étoiles rouges les séismes intraplaques et les bleues les séismes dans la plaque continentale. La cible rouge montre l'emplacement de l'épicentre du séisme du 19 septembre 2017. Le trait associé au séisme du 07 septembre 2017 représente la zone de rupture du séisme, identifiée à l'aide des répliques. Les flèches rouges indiquent la direction de convergence entre la plaque Cocos et la plaque Amérique du Nord

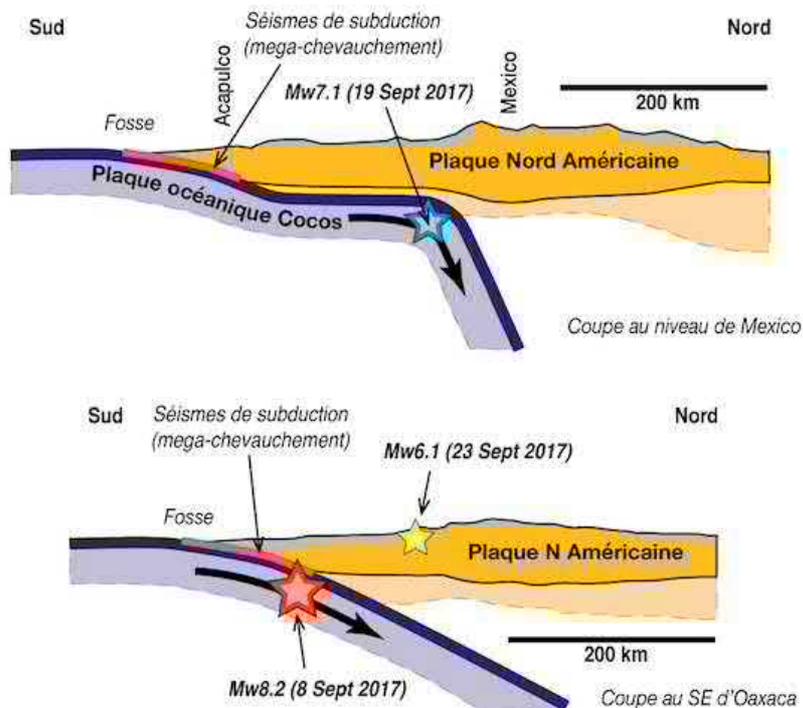


Figure 2-3 - Coupes schématiques au niveau de Mexico (haut) et au SE d'Oaxaca (bas), illustrant la géométrie de la subduction ainsi que la localisation des séismes majeurs de septembre 2017 (Source IPGP - <http://www.ipgp.fr/fr/seismes-mexique-mois-de-septembre-2017> - dernière visite le 25/01/2018).

2.2 Les réseaux d'observation de la sismicité

Plusieurs organismes possèdent, sur l'ensemble du pays, des réseaux sismologiques afin d'enregistrer les ondes sismiques générés par les tremblements de terre. Parmi eux, on distingue :

- El Servicio Sismológico Nacional (SSN) de Mexico (<http://www.ssn.unam.mx/>), qui possède un réseau de 61 stations large bande (i.e. stations d'enregistrement sismologique couvrant une large gamme de fréquences – ici 0,1 à 30 Hz).

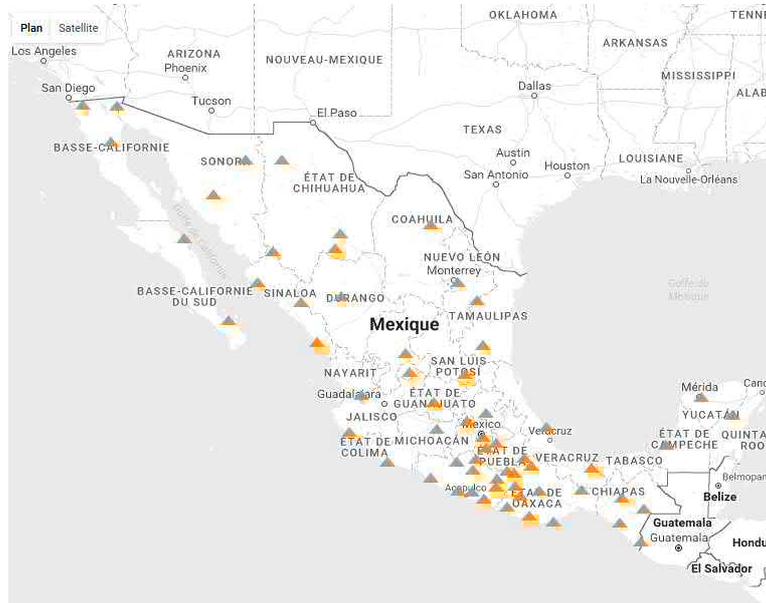


Figure 2-4 - Carte du réseau de stations large bandes du SSN (triangles oranges) (<http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/estaciones/>).

- La coordination de Ingeniería Sismológica del Instituto de Ingeniería (UNAM), qui est en charge notamment du Réseau Sismique de la Vallée de Mexico (RSVM – 31 stations) et d'un réseau d'accéléromètres dans la ville de Mexico.



Figure 2-5 - Centre de traitement des données sismologiques del Instituto de Ingeniería

- Le Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), qui s'occupe notamment de la surveillance des volcans, et principalement du Popocatepetl, possède également un réseau accélérométrique (5 stations en entre Acapulco et Mexico et 11 stations à México).



Figure 2-6 - Réseau de stations accélérométriques du CENAPRED (gauche - https://www.iris.edu/hq/files/workshops/2015/05/gro_chile/docs/networks/Mexico/Estaciones_Cenapred.pdf - le 23/01/2018). Centre d'acquisition et de traitement du CENAPRED (droite - photo prise lors de la visite de l'observatoire par le mission le 08/11/2017).

- El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), qui possède un réseau conséquent de stations accélérométriques dans la Vallée de Mexico (Red Acelerográfica de la Ciudad de México - RACM) et qui est surtout en charge du SASMEX (Sistema de Alerta Sísmica Mexicano), le système d'alerte sismique. Lors du séisme du 19 septembre 2017 l'alerte sismique a fonctionné mais n'a pu être efficace car l'épicentre du séisme était proche de Mexico et l'alarme s'est déclenchée approximativement à l'arrivée des ondes sismiques.



Figure 2-7 - Système d'alerte sismique du Mexique. Les triangles représentent les stations du réseau d'alerte et les cercles concentriques le temps de propagation des ondes depuis l'épicentre (triangle rouge).

2.3 Comparaison avec le séisme de 1985

Le séisme le plus destructeur survenu au Mexique s'est produit le 19 septembre 1985, soit 32 ans jour pour jour avant le tremblement de terre du 19 septembre 2017. Il a provoqué la mort de plus de 10 000 personnes (à noter que ce chiffre est très approximatif puisque face au nombre important de victimes, le recensement avait été arrêté). Les deux séismes sont ici comparés afin de comprendre la différence d'impact qu'ils ont eu sur la ville de Mexico.

Le tableau 2-1 synthétise les paramètres sismologiques caractérisant les deux séismes précités. Les mécanismes au foyer traduisent la différence de nature de ces deux séismes, avec un mécanisme en faille inverse, généré au niveau du contact entre la plaque Cocos et la plaque Amérique du Nord, pour le séisme du 19/09/1985 et un mécanisme en faille normale, généré à l'intérieur de la plaque Cocos, pour le séisme du 19/09/2017.

| | 19 septembre 1985 ³ | 19 septembre 2017 ⁴ |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Temps origine (heure locale) | 07h17 | 13h14 |
| Latitude | 18.19°N | 18.40°N |
| Longitude | 102.53°W | 98.72°W |
| Distance par rapport à Mexico | ≈ 400 km | ≈ 120 km |
| Profondeur | 28 km (±3.8) | 57 km |
| Magnitude | Mw= 8.0 | Mw= 7.1 |
| Strike (Plan Nodal 1/Plan Nodal 2) | 301/105 | 112/296 |
| Dip (Plan Nodal 1/Plan Nodal 2) | 18/73 | -93/-87 |
| Rake (Plan Nodal 1/Plan Nodal 2) | 105/85 | 46/44 |

Mécanisme au foyer

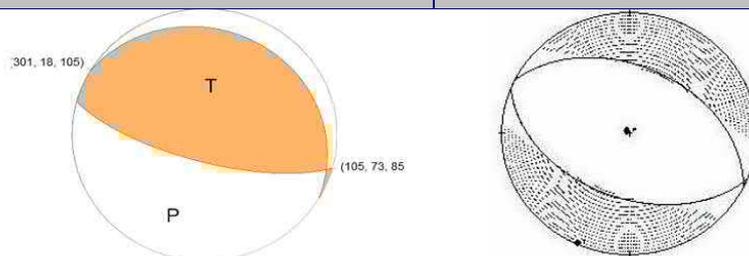


Tableau 2-1 : Caractéristiques des séismes du 19/09/1985 et du 19/09/2017.

Certaines stations sismologiques à Mexico sont en place depuis suffisamment longtemps pour avoir enregistré à la fois les séismes du 19/09/1985 et celui du 19/09/2017. C'est le cas notamment des stations CU et SCT. Sur la Figure 2-8 (gauche), leur localisation est indiquée. La station CU est installée au cœur de l'UNAM, sur les roches volcaniques affleurantes, alors que la station SCT est installée sur le remplissage sédimentaire constituant le sous-sol pour la majorité de la ville. Ceci se traduit, sur les spectres, par des accélérations maximales beaucoup plus importantes à la station SCT, imputables à l'effet de site lithologique sous la station.

En comparant les spectres au rocher des séismes du 19/09/1985 et du 19/09/2017 on observe directement la signature spectrale des séismes (Figure 2-8 en haut à droite). On note une nette différence entre les deux séismes, avec le séisme de 2017 qui apparaît beaucoup plus énergétique pour les périodes inférieures à une seconde. Les spectres réalisés pour la station SCT (Figure 2-8 en bas à droite) intègrent la réponse de sol et montrent des accélérations plus importantes lors du séisme de 1985, ce qui est cohérent avec le fait que la station SCT soit localisée dans la zone la plus affectée par le séisme de 1985.

En utilisant l'ensemble des enregistrements accélérométriques disponibles dans la ville de Mexico, les accélérations spectrales à 1 s et 2 s ont été déterminées pour les séismes du 19/09/1985 et du 19/09/2017. Les résultats sont présentés sous forme de cartes sur la Figure 2-9, où sont également reportés les bâtiments écroulés ou fortement affectés (points bleus à blanc, en dégradé de couleur). Plusieurs enseignements peuvent être tirés à partir de ces cartes :

- l'accélération spectrale maximale pour le séisme du 19/09/1985 se situe à des périodes de 2 secondes, alors que pour le séisme du 19/09/2017 c'est autour d'1 seconde ;
- en réponse à la signature spectrale différente entre les 2 séismes et à la variation latérale des épaisseurs sédimentaires au travers de la ville, les zones affectées par les plus fortes accélérations ne sont pas les mêmes. La zone qui a subi les plus fortes accélérations en 2017 se situe sur les bords de l'ancien lac, au niveau de la zone dite de transition où les épaisseurs de sédiments sont comprises entre 15 et 35 mètres. Pour le séisme de 1985 il s'agit d'une zone immédiatement à l'est, vers l'intérieur du bassin, où les sédiments présentent une épaisseur supérieure à 30 m ;
- les dégâts sont localisés au niveau des zones d'accélérations maximales ;
- la typologie des bâtiments affectés par les séismes de 1985 et de 2017 est différente. En effet, les désordres structuraux survenus suite à l'événement de 1985 ont été observés sur des bâtiments plutôt hauts tandis que ceux observés en 2017 l'ont été sur des bâtiments de hauteur moyenne. Ce constat peut être expliqué directement par les périodes auxquelles sont observées les accélérations maximales. L'accélération maximale pour le séisme de 1985 s'étant produite pour des périodes plus importantes (2 s) que pour le séisme de 2017 (1 s), des bâtiments plus élevés ont été affectés en 1985 par rapport à 2017.

³ USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0002jwe#executive> – dernière visite le 24/01/2017)

⁴ Servicio Sismologico Nacional (SSN), 2017. Reporte Especial, Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)

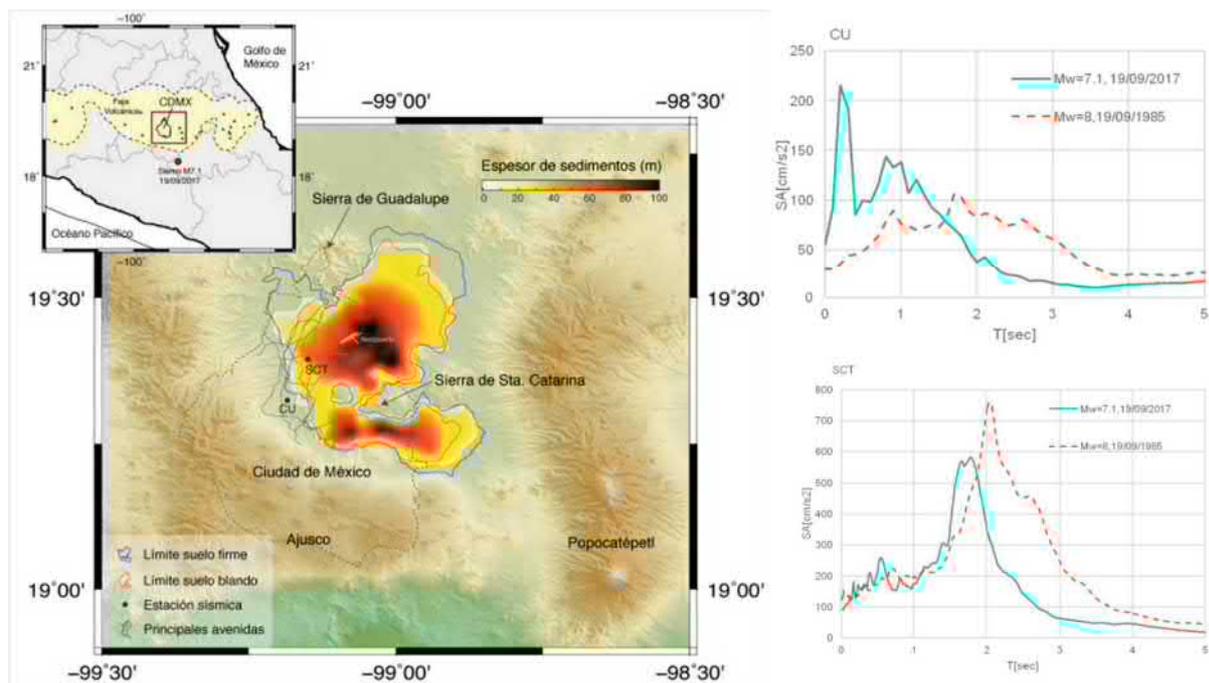


Figure 2-8 - Localisation des stations CU (au rocher) et SCT (sur les sédiments) sur fond de cartographie d'isovaleurs de sédiments (carte de gauche) [5]. Les spectres des enregistrements, par chacune de ces stations, des séismes du 19/09/1985 et du 19/09/2017, sont présentés sur la droite (Pr M. Ordaz Schroeder, communication personnelle). La courbe bleue caractérise le séisme de 2017 et celle en pointillés rouges caractérise celui de 1985.

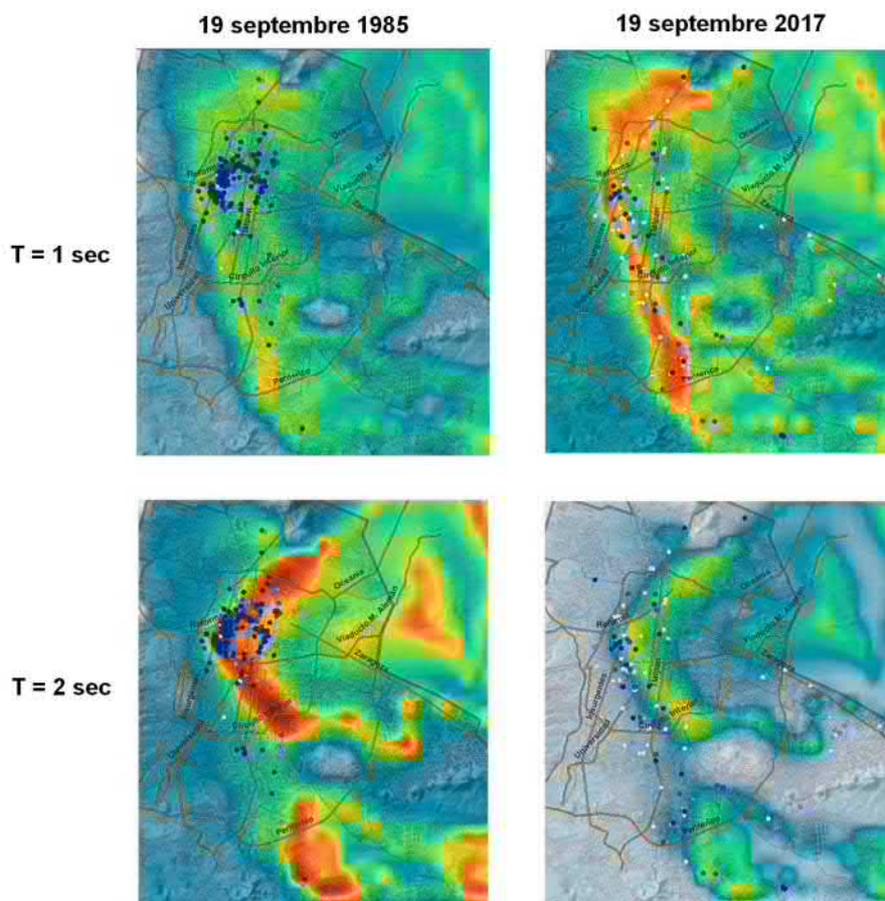


Figure 2-9 - Cartes d'accélération spectrale calculées à 1 s (haut) et 2 s (bas) pour les séismes du 19/09/1985 (gauche) et du 19/09/2017 (droite) (Pr M. Ordaz Schroeder – communication personnelle). Les couleurs rouges représentent les accélérations les plus fortes et les couleurs bleues les moins importantes. Les cercles bleus à blancs indiquent les bâtiments effondrés/endommagés.

2.4 Définition de l'aléa sismique au Mexique

Au regard des informations collectées, lesquelles ne sont pas exhaustives, il ne semble pas exister de carte de zonage sismique réglementaire à l'échelle de l'ensemble du territoire mexicain, qui serait l'équivalent de la carte du zonage sismique de la France (approche probabiliste à 475 ans de période de retour).

Les codes de construction sont de la responsabilité des municipalités et nombreuses sont celles qui n'en possèdent pas. Comme alternative, beaucoup d'entre elles utilisent, pour le dimensionnement des ouvrages civils "el manual de diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo)" de la Comisión Federal d'Electricidad [6]. Dans ce dernier, un zonage sismique du Mexique est proposé et utilisé (Figure 2-10, basée sur l'histoire sismique de la région et les accélérations prédites via une approche probabiliste).

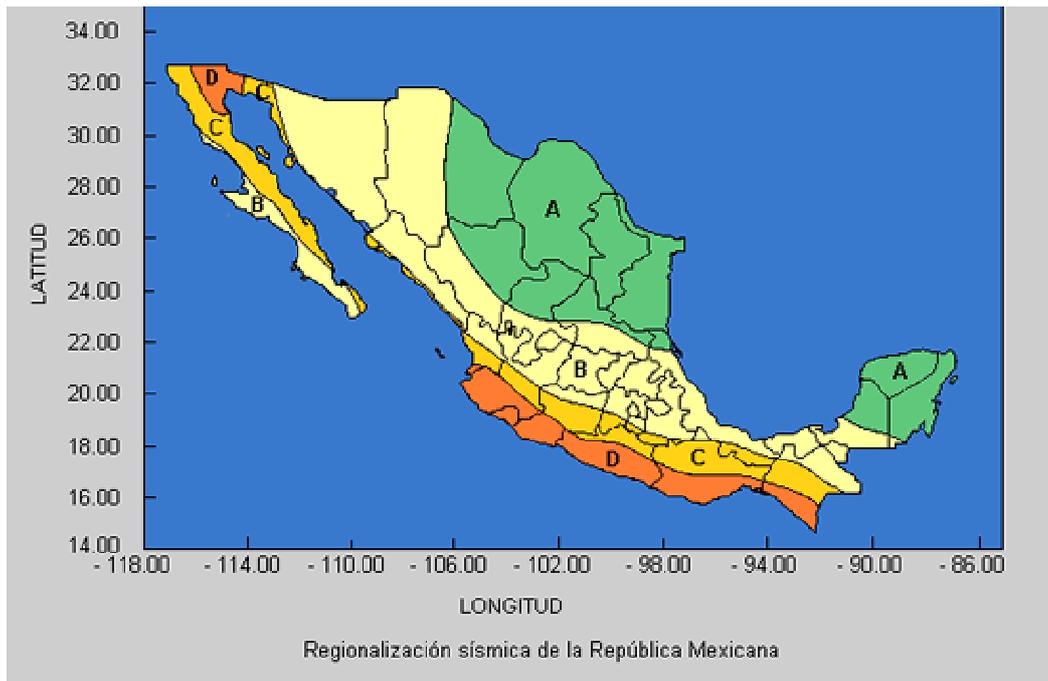


Figure 2-10 - Zonage sismique du Mexique (Manual de diseño de Obras Civiles [Diseño por Sismo] de la Comisión Federal de Electricidad - <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html> - dernière visite le 25/01/2018).

Par ailleurs, des travaux ont été publiés ces dernières années afin de fournir des données d'entrée robustes pour la réalisation d'un zonage d'aléa sismique probabilistes pour le Mexique. Parmi elles notons les travaux de [2], qui proposent notamment un zonage sismotectonique de l'ensemble du pays et [7] qui ont développé des modèles d'atténuation spécifiques aux séismes de subduction mexicains.

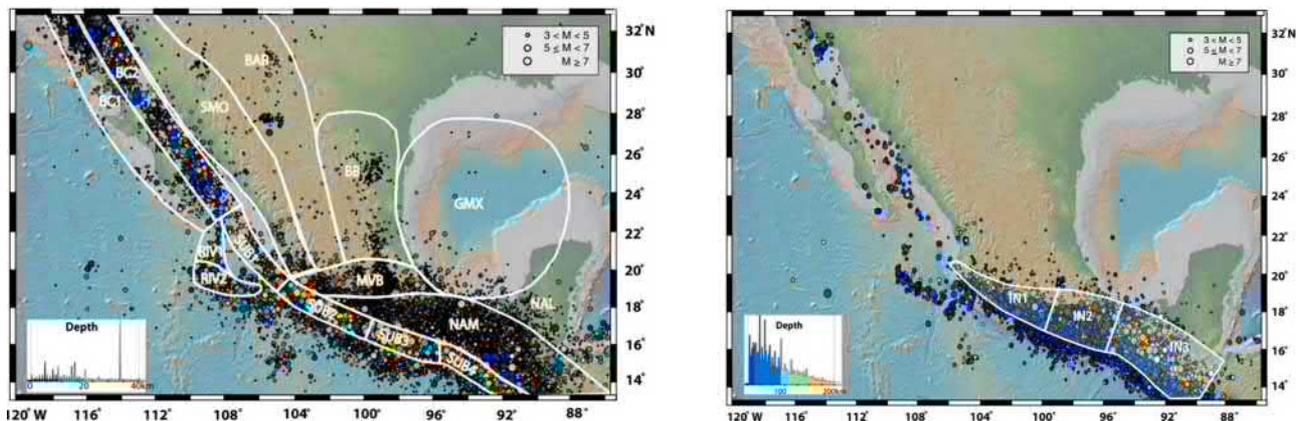


Figure 2-11 - Zonage sismotectonique du Mexique proposé par [2]. A gauche le zonage en rapport avec la sismicité superficielle ($h \leq 40$ km) et à droite celui en lien avec la sismicité intermédiaire ($h > 40$ km).

2.5 La France et la subduction

Les Antilles sont la seule région française située au niveau d'une zone de subduction, celle dite des Petites Antilles. Dans cette zone, la plaque Amérique du Nord plonge sous la plaque Caraïbes à une vitesse d'environ 2 cm/an, et l'activité sismique y est plus importante que partout ailleurs sur le territoire français. Les catalogues de sismicité montrent qu'au niveau de la zone de subduction des Petites Antilles on retrouve les grands types de séismes pouvant se produire dans les zones de subduction : les séismes de subduction (exemple du séisme de 1843 – magnitude estimée entre 7,5 et 8,0), les séismes intraplaques (exemples des séismes de 2007 – M = 7,3 et de 2014 – M = 6,5) et les séismes continentaux (exemple du séisme des Saintes en 2004 – M = 6,3).

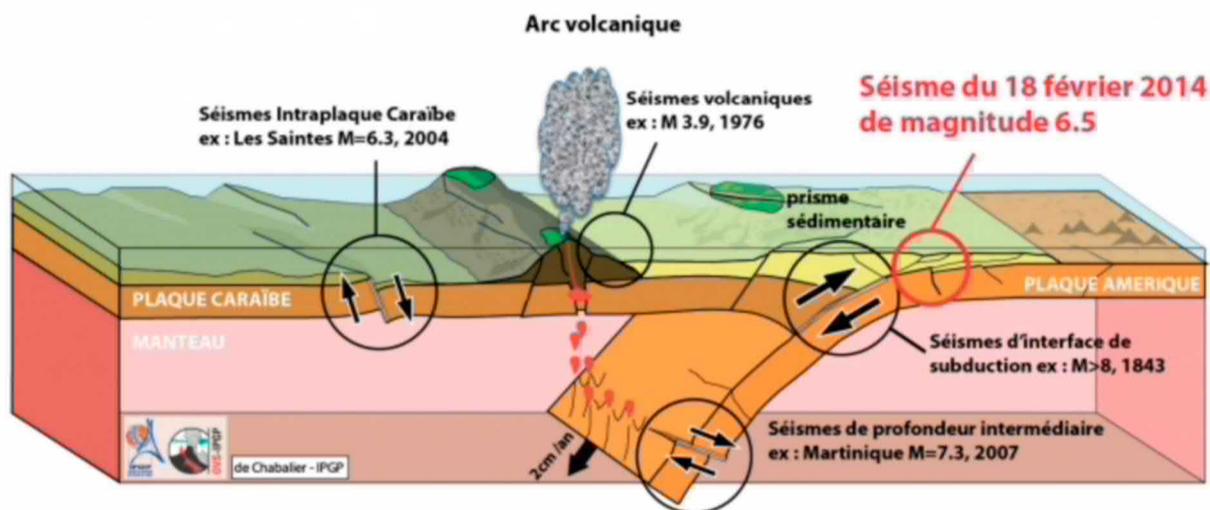


Figure 2-12 - Schéma de la zone de subduction des Petites Antilles. Les plus forts séismes recensés dans la zone sont indiqués. (<http://www.ipgp.fr/fr/seisme-a-lest-de-martinique> - dernière visite le 25/01/2018).

Dans un tel contexte, le rôle des Observatoires Volcanologiques et Sismologiques de la Martinique et de la Guadeloupe (OVSM et OVSG respectivement) sont de première importance pour suivre et mieux connaître la sismicité de la région. Par ailleurs, le constat d'un aléa sismique élevé dans cette région a conduit à la mise en place, en 2007, du "Plan séisme Antilles", avec pour objectif la réalisation de constructions ou de renforcements parasismiques (<http://www.planseisme.fr/-Espace-Plan-Seisme-Antilles-.html> – dernière visite le 25/01/2018). Ce plan, prévu sur 30 ans, en est à sa deuxième phase, avec le "Plan séisme Antilles – Horizon 2020".

2.6 Principaux enseignements

Le Mexique est situé au sein d'une zone de subduction. Il s'agit d'une des régions les plus sismiquement actives du monde, avec de forts séismes s'y produisant régulièrement. Le séisme du 19 septembre 2017 est un séisme intraplaque de magnitude 7,1, localisé à 57 km de profondeur, à environ 120 km de la ville de Mexico. En comparaison, le séisme du 19 septembre 1985 était un séisme de subduction (interplaque), de magnitude 8,0 à 28 km de profondeur, et dont l'épicentre se situait à 400 km environ de la ville de Mexico.

Les spectres associés à ces deux séismes sont différents. Le séisme du 19 septembre 2017 est plus énergétique en deçà d'une seconde. Les cartes d'accélération spectrales réalisées pour chacun des séismes montrent que l'accélération est maximale i) à 1 s et localisée dans la zone de transition du lac pour le séisme de 2017 et ii) à 2 s et localisée plus vers l'intérieur du bassin pour le séisme de 1985. Les dommages principaux associés à ces deux séismes sont localisés dans les zones où l'accélération du sol a été maximale. La différence entre les valeurs des accélérations spectrales calculées explique pourquoi des ouvrages ayant des typologies différentes ont été affectés.

Références

- [1] Servicio Sismologico Nacional (SSN), 2017. Reporte especial, Sismo de Tehuantepec (2017-09-07 23 :49 M 8.2).
- [2] Zuniga F. -R., Suarez, G., Figueroa-Soto, A. and Mendoza, A., 2017. A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. Journal of Seismology, vol. 21, pp. 1295-1322.
- [3] Rosenblueth, E., M. EERI, Ordaz, M., Sanchez-Sesma F. -J. and S. -K. Singh, 1989. The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – Design Spectra for Mexico’s Federal District. Earthquake Spectra, vol. 5, N° 1.
- [4] Servicio Sismologico Nacional (SSN), 2017. Reporte especial, sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)
- [5] Grupos de Sismología et Ingeniería de la UNAM, 23 septiembre 2017. Nota Informativa, Que ocurrió el 19 Septiembre de 2017 en Mexico ?
- [6] Comision Federal de Electricidad, 2008. Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo. Mexico.
- [7] Arroyo , D., Garcia, D., Ordaz, D., Mora, M. -A., Singh, S. -K., 2010. Strong motion relations for Mexican interplate earthquakes. Journal of Seismology, vol. 14, pp.769-785, DOI 10.1007/s10950-010-9200-0.

Liens internet :

<http://www.ipgp.fr/fr/seismes-mexique-mois-de-septembre-2017>

<http://www.ssn.unam.mx/>

<http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/estaciones/>

<http://www.iingen.unam.mx/esmx/Investigacion/Coordinacion/IngenieriaSismologica/Paginas/default.aspx>

https://www.iris.edu/hq/files/workshops/2015/05/gro_chile/docs/networks/Mexico/Estaciones_Cenapred.pdf

http://www.cires.org.mx/cires_es.php

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0002jwe#executive>

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0002jwe#focal-mechanism>

<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>

<http://www.ipgp.fr/fr/seisme-a-lest-de-martinique>

<http://www.planseisme.fr/-Espace-Plan-Seisme-Antilles-.html>

3 Réglementation

3.1 Rétrospective et enjeux actuels

Du fait de l'autonomie accordée par la constitution mexicaine aux municipalités pour la gestion de leur territoire, il n'existe pas de règles de construction communes à l'échelle du Pays. Cependant, la volonté d'aboutir à des textes homogènes existe et il faut noter que les règlements de la ville de Mexico servent souvent de références pour les autres municipalités. Dans la suite, une rétrospective des principaux textes réglementaires est présentée.

1920 Les premières règles de construction pour Mexico ont été publiées en 1920. Ces règles, très sommaires, spécifiaient quelques contraintes admissibles selon les matériaux ainsi que des dimensions minimales pour certains éléments structuraux.

1942 La première révision des règles de 1920 date de 1942. Deux concepts essentiels sont introduits pour limiter les conséquences d'un séisme. En premier lieu, la limitation de la hauteur des bâtiments à 35 m et en second lieu, une catégorisation des ouvrages selon leur fonction. Ces éléments permettant de déterminer les efforts de cisaillement en base d'ouvrage. Ces derniers sont calculés comme une certaine proportion (notée C_y) du poids propre de la structure en prenant en compte les charges d'exploitation.

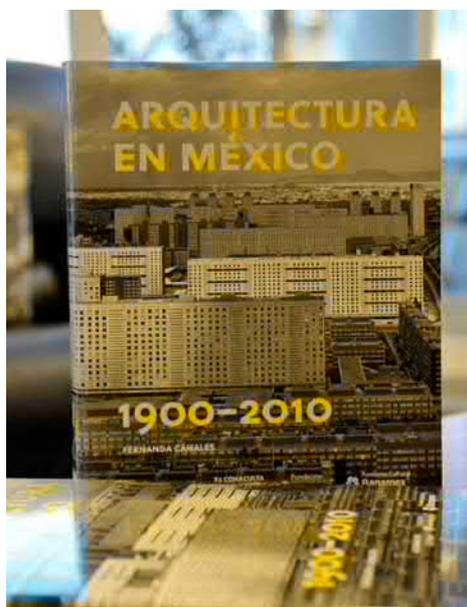


Figure 3-1 - Catalogue de l'exposition *Arquitectura en México 1900-2010*.

1957 Les premières règles d'urgence sont apparues suite au séisme survenu le 28 juillet 1957 de magnitude (M_w) 7,5. En effet, les autorités mexicaines ont observé à cette occasion que l'intensité des dommages était fonction de la nature des sols supports des ouvrages. Ainsi fut introduite une relation entre la classe de sol, la catégorie d'ouvrage et les efforts sismiques de dimensionnement. Les catégories de bâtiment furent également révisées, leur nombre passant de 7 à 3. Enfin, la notion de contrainte admissible fut complétée par des limitations sur le déplacement inter-étages ou encore sur le déplacement en tête.

1966 Les règles de 1966 se substituent aux règles d'urgence de 1957. Les catégories d'ouvrages, de sols et de systèmes structuraux sont légèrement modifiées par rapport à leurs définitions de 1957. Le principal changement porte sur une évaluation plus fine du coefficient C_y . Par ailleurs, des exigences spécifiques aux éléments non structuraux sont intégrées. Les ouvrages ayant une hauteur de plus de 45 m ou une superficie cumulée de plus de 10 000 m² doivent être instrumentés soit par des accéléromètres soit par des jauges de déformations.

1976 Les règles émises en 1976 sont reconnues comme étant le fondement des règles de construction modernes. Elles sont restructurées en un corpus principal, complété par des annexes techniques propres. Par ailleurs, la notion d'exigences de performances apparaît en fonction des matériaux de construction utilisés. Une vision moderne du dimensionnement, intégrant des états limites, apparaît dès 1976. Les principales nouveautés concernent : (i) l'acceptation d'une certaine ductilité de la structure lorsqu'elle est sujette à un séisme, (ii) la montée en puissance de la torsion induite en doublant les excentricités accidentelles et enfin (iii) la paramétrisation des efforts de cisaillement sismiques par les périodes propres des ouvrages (concept de spectres de dimensionnement).

1985 L'année 1985 est marquée par l'événement sismique du 19 septembre de la même année. De nombreux ouvrages s'étant effondrés, de nouvelles règles d'urgence sont promulguées. La principale avancée des règles de 1985 consiste à intégrer le cas des projets de réhabilitation et de renforcement.

1987 La nécessité de remplacer les règles de 1976 en intégrant les règles d'urgence de 1985 conduit à la révision de 1987. La philosophie des règles d'urgence de 1985 est maintenue mais avec de nouvelles exigences, à la hausse sur les valeurs de certains paramètres ou sur les dispositions constructives. En particulier, on peut citer l'augmentation de l'accélération maximale du sol à période nulle, la présence d'espacements minimaux entre bâtiments adjacents, des recommandations visant à prendre en compte l'interaction entre le sol et la structure ou encore la présence de systèmes permettant de dissocier éléments structuraux et non-structuraux. Enfin, la responsabilité des acteurs de la construction est précisée.

2004 Les règles de construction de 2004 remplacent celles de 1987, constituant jusqu'à ce jour les règles en vigueur pour la ville de Mexico. Une évolution de la catégorisation des structures, non seulement selon leur fonction mais aussi selon leur système structural, peut être notée. Les cas de charges sont classés selon leur caractère permanent, variable et accidentel et le dimensionnement est réalisé en les combinant. Les spectres de dimensionnement sont rendus spécifiques au site sur lequel l'ouvrage est construit. Par ailleurs, un principe de rétroactivité est introduit. En cas d'ouvrages endommagés, ces derniers doivent être confortés afin que les exigences de sécurité en vigueur à l'instant où les observations sont réalisées soient respectées. Enfin, on peut noter une amélioration des exigences liées aux systèmes de fondations.

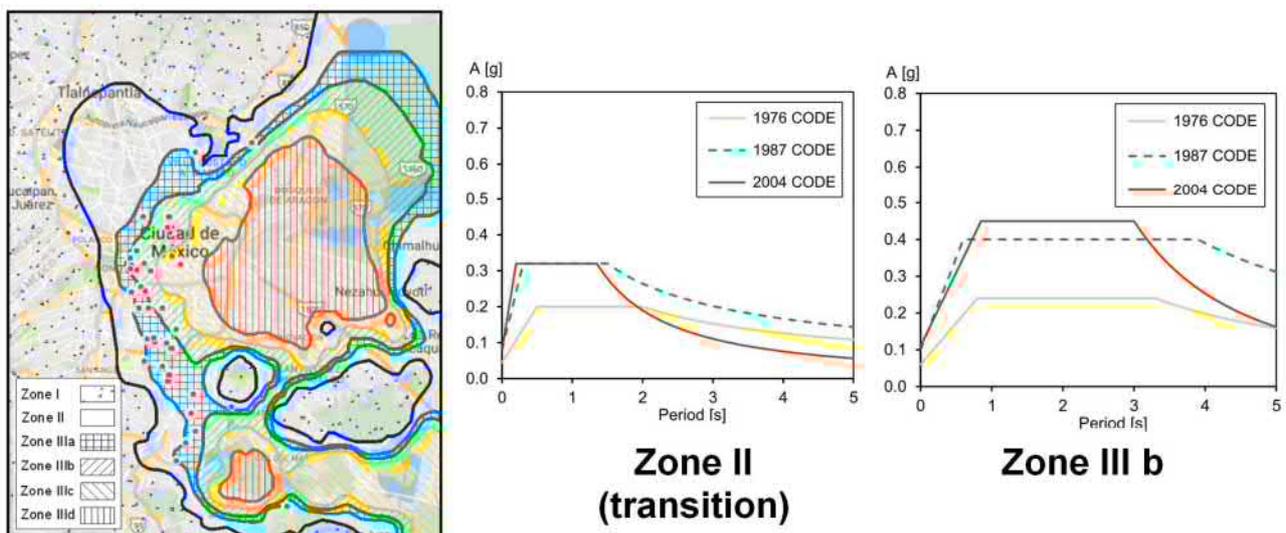


Figure 3-2 - Évolution des spectres de 1976 à 2004 pour 2 types de sol (rapport préliminaire 2017 - Stanford University)

De plusieurs témoignages recueillis pendant la mission nous avons retenu :

- que si les règles de construction établies en 2004 avaient été respectées, il n'y aurait pas dû y avoir de dommages importants ;
- qu'assurer la vérification de l'application des règles requiert des moyens humains et techniques importants ;
- qu'il existe des difficultés d'application liées à l'interprétation des règles par la profession.

Pour surmonter ces difficultés, les autorités de la ville de Mexico ont entamé un travail conséquent pour faire émerger des règles de construction simplifiées avec un objectif de diffusion large. En effet, près de 40 % des bâtiments d'habitation ne sont pas étudiés par un bureau d'étude, principalement pour des raisons économiques. En parallèle, les autorités encouragent la rédaction d'un code modèle, applicable à l'échelle de l'état fédéral.

3.2 La réglementation en vigueur en 2017

3.2.1 Cadre légal

Au Mexique qui est un pays fédéral il n'existe pas de règlement parasismique national, chaque état élaborant le sien.

Toutefois il existe un manuel, le "*Manual de diseño de obras civiles - diseño por sismo*" édité par la CFE. la *Comisión Federal de Electricidad* qui fait référence pour tout le pays. Sa dernière édition était de 2008⁵.

Pour la ville de Mexico, il existe un "*Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*" et des "*Normas Tecnicas Complementarias para diseno por sismo*") que l'on désigne parfois sous le nom de NTC 2004.



Figure 3-3 - Couverture du Manuel de la CFE

3.2.2 Réglementation de la ville de Mexico

Le corpus normatif de la ville de Mexico (qui est souvent repris par les autres municipalités du pays) comprend deux parties bien distinctes :

- un document pouvant être assimilé au corps principal visant à préciser les objectifs de performances,
- plusieurs annexes techniques visant à préciser les aspects techniques et scientifiques de la réglementation.

Cette manière de présenter les textes normatifs a été introduite dès 1976 en vue de faciliter les évolutions. En effet, les rédacteurs des annexes techniques ont ainsi plus de liberté pour les faire évoluer en fonction de l'état des connaissances. En revanche, une évolution du corps principal doit faire l'objet d'une approbation collégiale par le gouvernement de la ville de Mexico. Ce processus prend plus de temps et doit composer aussi avec les impératifs politiques.

3.2.3 Zonage sismique pour Mexico

Zonage macroscopique

La réglementation de la ville de Mexico propose une carte de zonage sismique de l'état de la ville de Mexico (district fédéral). Cette dernière fait intervenir 8 zones, dont 6 caractérisées comme suit : zones I, II, IIIa, IIIb, IIIc et IIId. Pour les deux autres zones, l'une est considérée comme assimilable à la zone II et l'autre correspond à une surface insuffisamment investiguée. A ce zonage sont associés des spectres de dimensionnement.

Zonage spécifique au site

Le zonage "sismo-géotechnique" de Mexico reflète à la fois la nature lithologique du sous-sol mais aussi les grandes tendances en termes de période dominante du sol et d'amplification maximale du mouvement sismique. Il s'apparente à l'esprit d'un micro-zonage sismique. Une expression permettant le calcul de la période dominante du sol est également proposée. Cette dernière est en particulier fonction du module de cisaillement des couches de sol en présence, qui doit donc être estimé par des mesures *in situ*. Si de telles mesures ne sont pas disponibles, il est possible d'estimer la période grâce à une carte qui est fournie.

⁵ Le 13 novembre 2017 sur le site gov.mx de l'Administration Publique Fédérale une nouvelle édition était annoncée. Elle devrait être publiée par l'INEEL (Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias)

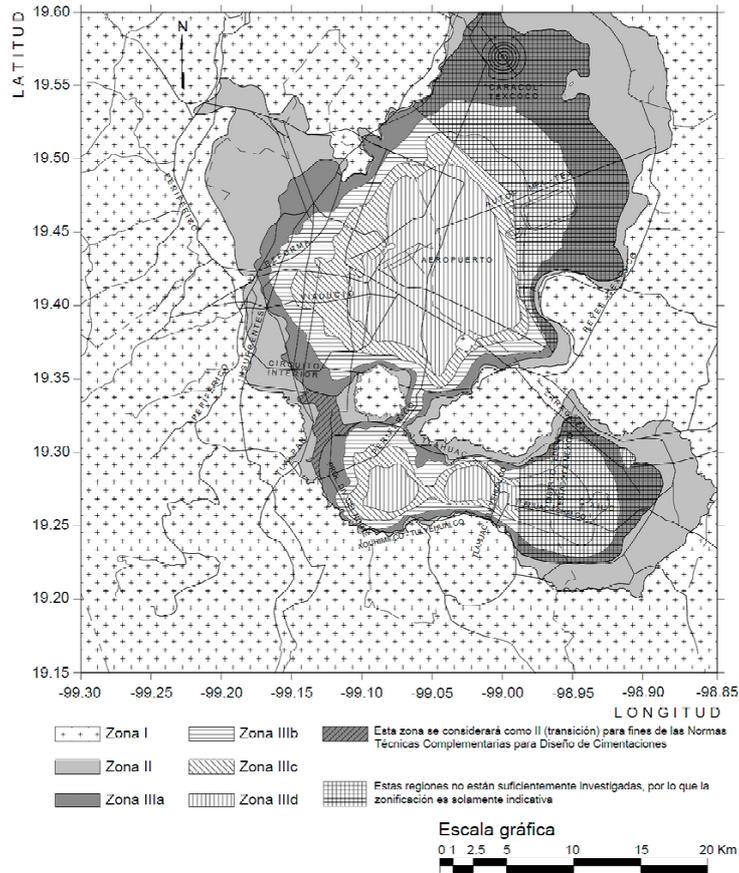


Tabla 3.1 Valores de los parámetros para calcular los espectros de aceleraciones

| Zona | c | a_0 | T_a ¹ | T_b ¹ | r |
|------------------|------|-------|--------------------|--------------------|------|
| I | 0.16 | 0.04 | 0.2 | 1.35 | 1.0 |
| II | 0.32 | 0.08 | 0.2 | 1.35 | 1.33 |
| III _a | 0.40 | 0.10 | 0.53 | 1.8 | 2.0 |
| III _b | 0.45 | 0.11 | 0.85 | 3.0 | 2.0 |
| III _c | 0.40 | 0.10 | 1.25 | 4.2 | 2.0 |
| III _d | 0.30 | 0.10 | 0.85 | 4.2 | 2.0 |

¹ Periodos en segundos

Figure 3-4 - Carte de zonage sismique de la ville de Mexico et paramètres des spectres.

3.2.4 Autres aspects

La prise en compte de l'interaction sol-structure est encouragée dans le texte de 2004, notamment en raison des particularités des sols de la ville de Mexico. En effet par suite de l'interaction dynamique sol-structure, la réponse sismique d'une structure sur appuis flexibles, c'est-à-dire d'une structure fondée sur un terrain déformable (par exemples les sols très mous caractérisés par une vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement V_s inférieure à 100 m/s, ce qui est le cas dans la zone du lac de Mexico), diffère sous plusieurs aspects de celle de la même structure fondée sur un terrain rigide (base fixe), soumise à une sollicitation identique en champ libre.

Pour la Ville de Mexico, cela se traduit d'ailleurs par des prescriptions normatives dédiées en annexe des règles complémentaires. En particulier, on peut noter qu'une approche simplifiée permet de prendre en compte la période propre du système en tenant compte de l'interaction sol/structure. Cette dernière est évaluée à partir de termes de raideurs calculés sur la base de la méthode de Winkler. De plus, il est également proposé de prendre en compte un amortissement dédié avec des formules simplifiées.

3.3 Les évolutions envisagées

Suite au séisme de 2017, il n'est pas prévu de modifier en profondeur la réglementation existante. Tous les spécialistes en effet s'accordent sur le fait que les dommages importants constatés tiennent à la non application des normes.

Quelques détails du zonage seront actualisés (cette modification était d'ailleurs déjà prévue avant le séisme de 2017) mais fondamentalement les principes de la réglementation ne seront pas bouleversés.

Toutefois, le confortement préventif des constructions existantes va faire l'objet d'une démarche spécifique. Cette démarche, qui s'appuiera sur le retour d'expérience de 2017, s'efforcera de définir des priorités d'intervention assorties d'obligations de travaux.

De plus les ingénieurs mexicains souhaitent qualifier l'effet de la consolidation des sols (en liaison avec les activités historiques de pompage) sur la réponse dynamique en surface dans le temps. Dans ce sens, ils préconisent d'anticiper les spectres de dimensionnement à grande échéance (à 50 ans voire à 100 ans).

3.4 Principaux enseignements

De cette collecte d'informations, nous pouvons retenir les éléments suivants :

- l'aléa sismique est déterminé à l'échelle de la commune ou de l'état fédéral (état de Mexico),
- à Mexico, les règles en vigueur, qui datent de 2004, s'appuient sur un zonage sismo-géotechnique associé à des spectres réglementaires de dimensionnement,
- l'interaction sol-structure pour les différents types de fondations est bien définie et sa prise en compte est grandement encouragée,
- les règles de construction qui ont évolué tout au long du siècle dernier (en réponse aux séismes de 1957 et de 1985, mais pas uniquement) sont considérées maintenant comme satisfaisantes et stabilisées,
- il n'est donc pas prévu de modifier en profondeur la réglementation existante,
- il est toutefois envisagé de prévoir des spectres de dimensionnement "évolutifs" pour tenir compte de la densification des sols dans le temps, un phénomène très spécifique à la cuvette de Mexico,
- le confortement préventif des constructions existantes va faire l'objet d'une démarche spécifique.

Sur ce dernier point, celui de la prise en compte de l'existant, la mission ne peut que recommander de continuer à suivre dans le temps les évolutions réglementaires de Mexico. "La reprise du passif" est sans doute la principale question que le génie parasismique devra traiter à l'avenir.

Références

Alcocer, S. M., & Castaño, V. M. (2008). Evolution of codes for structural design in Mexico. *Structural Survey*, 26(1), 17-28.

4 Sol et géotechnique

4.1 Contexte géologique général

Le bassin de Mexico est situé au sud de la partie la plus élevée du plateau central mexicain. La ville de Mexico est située à l'emplacement d'un ancien lac à un peu plus de 2 200 m d'altitude.

Ce bassin, de forme allongée dans la direction NNE-SSO (100 x 30 km²), est entouré de nombreux volcans faisant partie de l'Axe Volcanique Transmexicain. En bordure ouest se situent les chaînes andésitiques du Tertiaire (Sierra de las Cruces), au sud, les formations basaltiques du Quaternaire (-2.6 Ma à ce jour) de la Sierra du Chichinautzin et au Nord, les roches volcaniques du Tertiaire (-65 à -2,6 Ma) de Sierras de Guadalupe et de Pachuca.

La Sierra Nevada se trouve à l'est avec ses volcans en basaltes et andésites du Tertiaire, Popocatépetl et Iztaccíhuatl culminant vers 5 300 m d'altitude. Au centre-est du plateau se trouvent de nombreux petits sommets isolés, comme le Centro de la Estrella ou la Sierra de Santa Catarina.

Avant le Pléistocène (-2,6 à - 0,012 Ma), la vallée était ouverte vers le sud, avec un drainage se faisant par l'intermédiaire de deux vallées profondes passant par les villes de Cuautla et Cuenavaca. Cette vallée a été fermée lors de la période d'activité volcanique de la Sierra du Chichinautzin, commencée il y a environ 700 000 ans pendant le Pléistocène, condamnant le drainage des eaux vers le sud et créant un lac peu profond. Sédiments lacustres, matériel éruptifs et produits d'érosion du relief remplissent l'ancienne vallée.

4.2 Lithologie de la Vallée de Mexico

Les principales formations sont les suivantes (voir aussi Figure 4.1) :

- une formation superficielle constituée de remblai pouvant atteindre une dizaine de mètres d'épaisseur (1 à 10 m), une superposition de dépôts alluviaux meubles et de lentilles de matériaux éoliens et d'une croûte sèche liée à la baisse du niveau dans le lac ;
- une série dite "argiles supérieures" lacustres d'une épaisseur allant de 25 à 50 m, constituée d'une alternance de strates d'argiles à taux de consolidation variables induit par les surcharges superficielles et par les activités de pompage. Des strates de matériaux plus résistants sont décrites dans cette formation ;
- une couche résistante (la primera "capa dura") constituée de matériau sablo-limoneux avec des lentilles d'argiles et de graves en épaisseurs variables. Cette couche est quasi-inexistante en zone centrale pour atteindre 2 m sur les bords du lac. Cette formation est utilisée comme niveau d'ancrage pour les fondations profondes (Torre Latinoamericana par exemple) ;
- une formation dite "argiles inférieures" consolidées d'origine lacustre, de 15 m d'épaisseur dans le centre du lac et quasi-inexistante sur les rives. Existence d'alternance de strates argileuses et de lentilles plus compactes ;
- des dépôts profonds de 1 à 5 m d'épaisseur avec alternance de sables et de graves alluviales cimentées par des argiles compactes et des carbonates de calcium, puis des strates moins compactes (appelées "playas") ;
- des superpositions de dépôts volcaniques et de sédiments lacustres atteignant une épaisseur de plusieurs centaines de mètres. Le toit de cette formation constitue la "segunda capa dura".

Au cours des trente dernières années, les études ont contribué à préciser les caractéristiques de la zone de transition située entre la zone lacustre et la zone collinaire.

4.3 Caractéristiques physiques et mécaniques des sols de Mexico

Le sous-sol de Mexico est caractérisé par des dépôts argileux très compressibles drainés par des couches de sable intercalaires. Ceci se traduit donc par un tassement continu de la surface du sol.

Jusqu'aux alentours des années 1950, la plupart des besoins en eau de la ville ont été couverts par l'exploitation de puits forés à des profondeurs de 50 à 500 m. Cette forte exploitation des nappes profondes s'est traduite par une forte baisse du niveau piézométrique. Le fort prélèvement d'eau en profondeur alors que la nappe superficielle n'était pas altérée a produit un gradient hydraulique important à travers les couches d'argile compressible. Ce phénomène en produisant une augmentation de la contrainte effective a accéléré le phénomène de consolidation et a eu pour conséquence d'augmenter l'importance des tassements. A titre d'exemple, le tassement annuel était de l'ordre de 35 cm/an aux alentours des années 1950 alors que les prélèvements d'eau étaient à leur maximum. Certains quartiers connaissent encore à ce jour des tassements annuels de l'ordre du centimètre à la dizaine de centimètres.

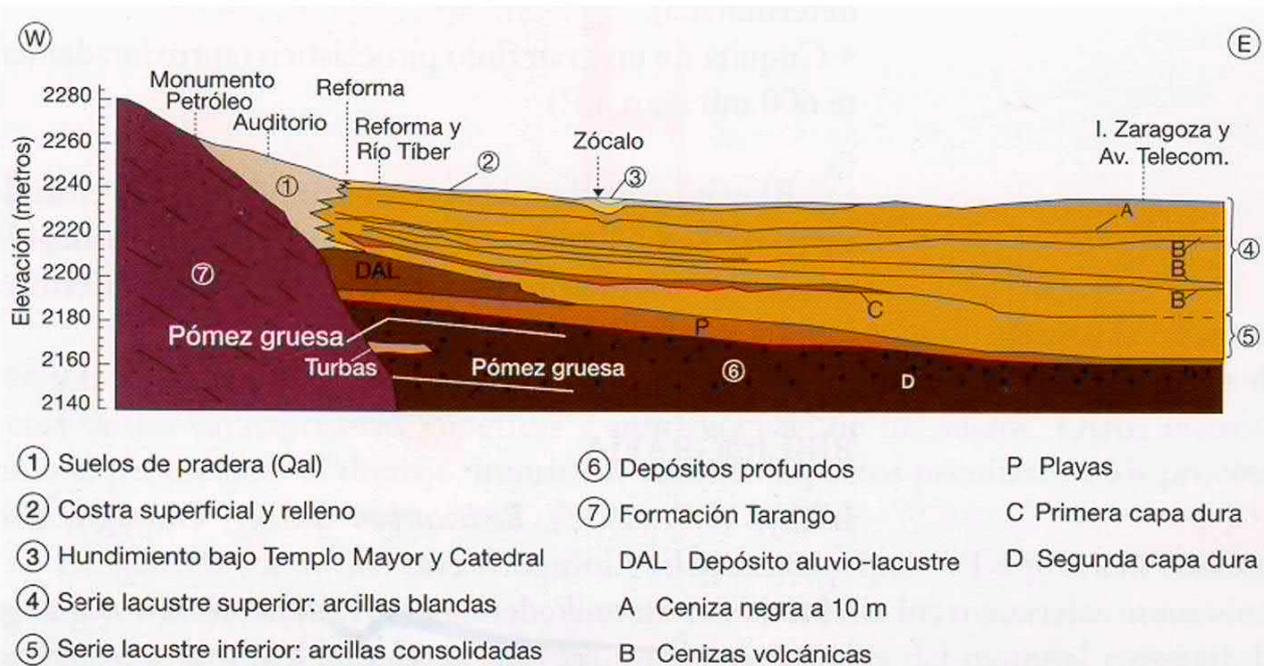


Figure 4-1 – Profil stratigraphique simplifié est-ouest de la ville de Mexico [1].

Dans les argiles supérieures, les teneurs en eau peuvent atteindre 150 – 250 % (centre-ville historique) voire dépasser les 400 % dans la zone du lac (Texcoco) avec des résistances de pointes q_c au pénétromètre statique (CPT) souvent inférieures à 10 MPa (voir Annexes). Au niveau de l'ancien lac, le poids volumique des argiles sur 20 m d'épaisseur est proche de 12 kN/m³ en moyenne.

La vitesse V_s des ondes de cisaillement peut être inférieure à 100 m/s voire à 30 à 50 m/s sur les 30 premiers mètres de profondeur (voir Annexes). Les valeurs de $V_{s,30}$ moyenne harmonique des vitesses de cisaillement sur les 30 premiers mètres de profondeur peuvent être inférieures à 70 m/s. Le coefficient de Poisson mesuré avec les relations de l'élasticité entre les vitesses des ondes P et S, est comprise entre 0,490 et 0,499 (données personnelles). Pour cette gamme de déformation des sols (distorsion $< 10^{-5}$), la valeur du module de cisaillement G (appelé G_0 ou G_{max}) est inférieure à 5 voire 3 MPa. Dans la zone de transition (Zone II), les valeurs moyennes de V_s peuvent être plus élevées, notamment avec la présence de dépôts de sédiments plus grossiers.

4.4 Zonage sismo-géotechnique

La ville de Mexico s'étend actuellement sur des sols de nature très diverse allant des laves ou des sols très compacts (cas des collines) aux sols excessivement compressibles de l'ancien lac.

La vallée de Mexico est divisée en trois zones distinctes (Figure 4-2) correspondant à :

- la zone des collines constituée de roches volcaniques ou de coulées de lave couvrant des sédiments (Zone I) ;
- la zone lacustre avec des remplissages en majorité argileux (Zone III) ;
- la zone de transition traduisant le changement progressif entre la zone lacustre et la zone de (Zone II).

Majoritairement basé sur ce découpage en grandes unités, le zonage "géotechnique" de Mexico reflète aussi les grandes tendances en termes de période dominante du sol et d'amplification maximale du mouvement sismique. A ces zones "sismo-géotechniques" sont rattachés des spectres élastiques réglementaires.

Rappelons que la zone des dommages importants observés lors des séismes de 1957, de 1979 et de Septembre 1985 est située dans la zone du lac en bordure de la zone de transition. Les dégâts sont mineurs ou inexistantes comme dans le cas du séisme de 1985 dans la zone des collines et dans la zone de transition. Par rapport au règlement d'urgence post 1985 (Figure 4.2-a), le zonage de 2004 redessine les contours des trois zones et apporte des subdivisions pour la zone III (Figure 4.2-b).

Dans le texte réglementaire de 2004, des spectres d'accélération sont donnés pour les zones I, II, IIIa, IIIb, IIIc, III d.

Sur la base du zonage défini en 2004, les nombreux sondages et profils acquis depuis les 15 dernières années ont conduit à la proposition de son amélioration.

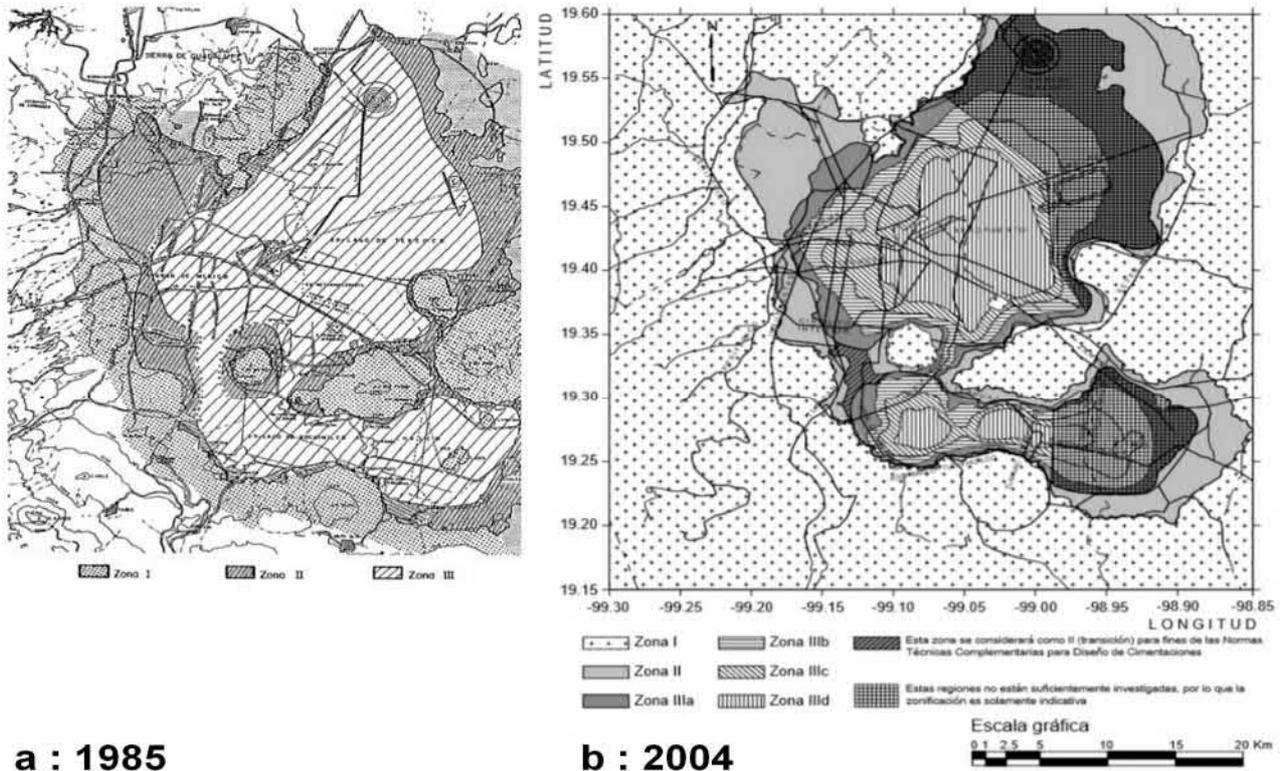
4.5 Période fondamentale du sol de Mexico

Dans les conditions 1D de propagation des ondes S verticales, champ incident en phase avec le champ réfléchi en surface, la période $T_{0\text{sol}}$ pour le premier mode fondamental est obtenue par l'expression suivante (1) :

$$T_{0\text{sol}} = 4H/VS \quad (1)$$

La méthode H/V monocapteur a été utilisée pour cette mission (voir Annexes). Fondée sur l'utilisation du bruit de fond sismique, elle permet une estimation de la fréquence de résonance pour le premier mode fondamental ($f_0 = 1/T_0$) d'un empilement de couches sédimentaires reposant sur un substratum sismique.

Des travaux publiés à partir de 2013 proposent une cartographie actualisée des isoépaisseurs d'argiles (Figure 4-3-a) et des isovaleurs de période dans la vallée de Mexico (Figure 4-3-b).



a : 1985

b : 2004

Figure 4-2 – Evolution de la carte géotechnique de la ville de Mexico.

A gauche (a) la version de 1985 et à droite la carte de 2004 en vigueur en 2017 (b).

4.6 Carte des périodes et carte des dégâts

Sur un fond de plan urbain, les ouvrages fortement endommagés et détruits ont été reportés (Figure 4.4-a) ainsi que les mesures H/V réalisées dans le cadre de la présente mission, sous forme de plages de valeurs (Figure 4.4-b). Le dénombrement des ouvrages sévèrement endommagés montre une concentration de ceux-ci dans les zones II, IIIa et IIIb (voir Annexes). Une étude de détail présentée en documents annexes, montre le changement rapide de période du sol dans les quartiers situés entre Condesa et Roma.

Par ailleurs, des chercheurs proposent de tenir compte de la consolidation des sols sur l'évolution de la réponse dynamique de la colonne de sol. La réduction de l'indice des vides, dont la "densification" du milieu, tendrait à diminuer la période fondamentale du sol notamment.

4.7 Principaux enseignements

Les sols de la vallée de Mexico offrent des propriétés physiques et mécaniques remarquables sur plus de 50 m d'épaisseur, en lien direct avec leur mode de dépôt. Très compressibles et sujets à un phénomène spectaculaire de consolidation naturelle ou induit par les activités de pompage/drainage de la ressource en eau, leur déformation verticale, avec ou sans chargement en surface, est inexorable dans la zone occupée par l'ancien lac et dans sa zone périmétrale.

Le contraste mécanique élevé entre les sols profonds et cette couverture de sol compressible (0 à 80 m environ en partie est) est aussi à l'origine des effets dynamiques subis en surface par les occupants et les ouvrages.

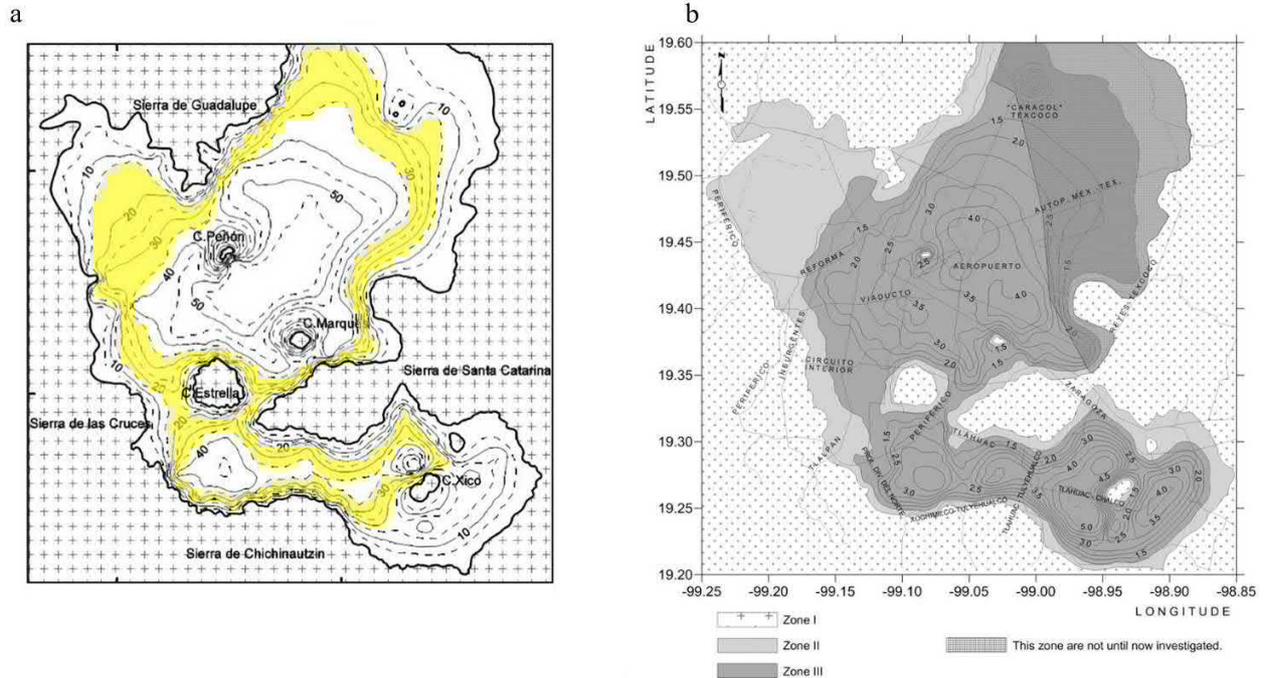


Figure 4.3 – Isoépaisseurs de sols de remplissage (a) et isovalues de la période fondamentale T_0 sol de Mexico [2].

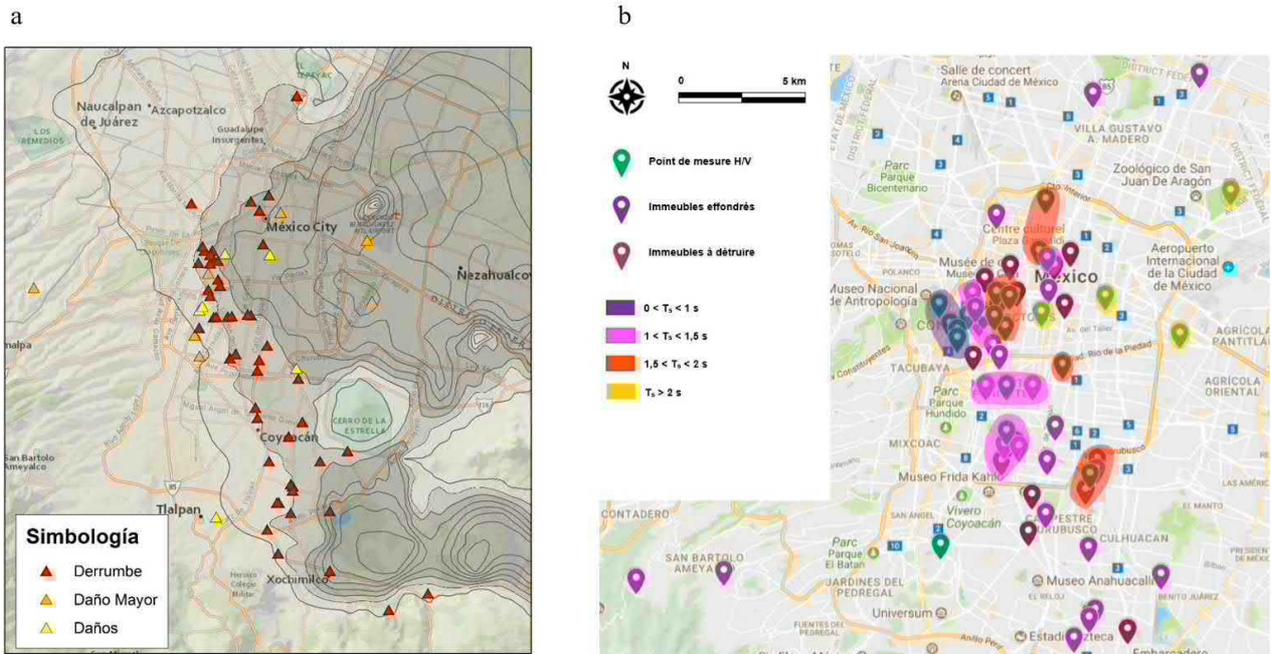


Figure 4.4a – Carte des dégâts (a) avec les ouvrages détruits lors du séisme du 19/09/1985 (derrumbes), les ouvrages avec endommagements majeurs (daños mayores) et endommagements significatifs (daños) [1].

Figure 4.4b - Report des mesures H/V et plages de période T_0 sol mesurées par la mission AFPS sur fond de carte

L'effet de site est très prononcé à Mexico avec une amplification du mouvement sismique dans les sols de couverture. Cet effet est sollicité de façon différentielle selon la signature spectrale des séismes, comme le montre les distributions majoritairement distinctes des désordres pour les séismes du 19/09/1985 et du 19/09/2017 (voir Annexes). En 1985, c'est une zone plus profonde de l'ancien lac qui a fait l'objet de désordres (zones IIIb et IIIc).

En 2017, les zones géotechniques sont plutôt les zones II, IIIa et IIIb. En 1985, la distribution des désordres est localisée dans le cadran nord-ouest tandis qu'en 2017 la répartition est plus étirée vers le sud, sur les berges ouest de l'ancien lac. En 2017, il s'agit majoritairement de désordres à l'échelle d'un ou de quelques ouvrages limitrophes, pas à l'échelle de "quartiers".

Avant 1985 (texte de 1976 en vigueur), les trois zones principales (collines, zone de transition, lac) étaient cartographiées puis leur délimitation et leur subdivision ont été précisées après 1985 et après 2004.

La distribution des désordres de 2017 dans des zones géographiques spécifiques donnent raison aux ingénieurs de Mexico dans leur recherche d'un zonage toujours plus précis, relatant au mieux les effets de site avec prise en compte de spectres contrastés au passage d'une zone à une autre.

Nous avons pu mesurer ces changements de période fondamentale avec un équipement manu-portable pour des mesures de bruit de fond sismique et une méthode H/V. La limite d'un zonage précis peut aussi s'expliquer par les effets 2D et 3D à considérer en raison de changements "rapides" de nature lithologique et/ou d'épaisseur de sol.

Les effets d'amplification des sols pour des épaisseurs comprises entre 15 et 35 m semblent manifestes au regard de la distribution des immeubles effondrés. Le mouvement sismique en surface a, semble-t-il, sollicité sélectivement des ouvrages répartis sur une grande surface mais éparés en définitive une fois les observations effectuées sur le terrain.

Références

- [1] E. Ovando Shelley, Consideraciones preliminares sobre los efectos de los temblores de septiembre de 2017 en las obras par construir el NAICM. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México (2017).
- [2] J. Martínez-González, J. Lermo, F. Vergara-Huerta, E. Ramos-Pérez, Avances en la zonificación sísmica de la Ciudad de México y zona de Chalco, edo. de Mex., propuesta de nuevo mapa de periodos dominantes para las NTC para diseño por sismo del reglamento del D.F. XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Mexico (2015).

5 Fondations

5.1 Principaux enjeux

La ville de Mexico est réputée pour ses phénomènes de tassement d'ampleur exceptionnelle en conditions statiques que cela soit sous l'effet de l'application du moindre chargement en surface ou, plus simplement, sous l'effet des activités historiques de pompage de la ressource en eau profonde provoquant une accélération de la consolidation des sols.

Indépendamment du mode de fondation retenu (fondation superficielle, profonde), les projets doivent composer avec ce phénomène en donnée d'entrée. De surcroît, hormis dans les zones de collines ou dans certains secteurs de la zone de transition, le substratum géotechnique est souvent trop profond, selon des critères technico-économiques, pour aller le rechercher comme ancrage pour les fondations profondes et faire travailler avantageusement celles-ci "en pointe". Dans certains cas, une formation plus sableuse, de quelques mètres d'épaisseur est recherchée comme ancrage. C'est le cas pour les pieux de la Torre Latinoamericana (Colonia Centro, Delegación Cuauhtémoc) construite en 1956 et ayant subi les séismes de cette même année, à savoir celui de 1985 et de 2017. La hauteur de cette tour est de 196 m pour une base carrée de 34.4 x 34.4 m.

De plus, les infrastructures doivent composer, sous chargement sismique, aux effets de site lithologiques se traduisant, notamment, par d'importantes amplifications du mouvement horizontal. La cause de ces amplifications est notamment la présence d'alluvions sur 10 à 60 m d'épaisseur, dont des argiles très compressibles saturées en eau.

Dans ce contexte, les effets de l'interaction-sol-structure sont prononcés et se répartissent comme suit : les effets cinématiques avec notamment des déplacements horizontaux marqués par une forte amplitude en surface (le d_g de la norme EN 1998 ou EC8) et les effets des efforts d'inertie engendrés par la masse de la structure et retransmis au sol par l'intermédiaire des éléments de fondation.

5.2 Typologie de fondations

Les typologies des fondations les plus caractéristiques de la ville de Mexico sont représentées en Figures 5.1 et 5.2.

Les fondations superficielles sur semelles peuvent se rencontrer (Figure 5.1a) pour les ouvrages apportant de faibles charges sur le sol support (1 à 2 étages). Sur les sols compressibles de la zone lacustre, l'apport ne serait-ce que de 10 kPa peut déjà occasionner des tassements de plusieurs dizaines de centimètres. La limite de la capacité portante pouvant être rapidement atteinte avec des ouvrages de quelques étages, il est fréquent de réaliser des "double-radriers" avec un niveau enterré de compensation non habité sous réserve que celui-ci ne soit pas inondé par une nappe proche de la surface (Figure 5.1b).

Le recours aux fondations profondes telles que les pieux est vite nécessaire dans la zone du lac. Une première possibilité est de concentrer les pieux ou les barrettes au niveau des descentes de charge (Figure 5.1c) ou d'avoir des maillages plus denses sous les voiles et en zone de circulation (Figure 5.2a, 5.2b et 5.2c).

Les sols d'ancrage pouvant être profonds dans l'ancienne zone lacustre (30 à 45 m), les fondations profondes peuvent être flottantes (Figure 5.2a) c'est-à-dire que leur pointe ne s'appuie pas sur un sol plus raide en profondeur. Ces éléments ne mobilisent que du frottement avec le sol le long de leur fût qui peut être en béton ou en acier. Très utilisés à partir des années 60, cette technique a permis de réduire le tassement différentiel entre le bâtiment et le sol environnant.

Dans certains cas, ces pieux peuvent être prolongés par une pointe en acier de plus faible section, recherchant le toit d'un horizon plus compact. Il s'agit de pieux à pointe pénétrante (Figure 5.2b). Ce système, peu fréquent concernerait quelques dizaines d'ouvrage. Certains bâtiments sont fondés sur des pieux en quinconce ou entrelacés ou encore "over-lapping" piles en anglais (Figure 5.2c).

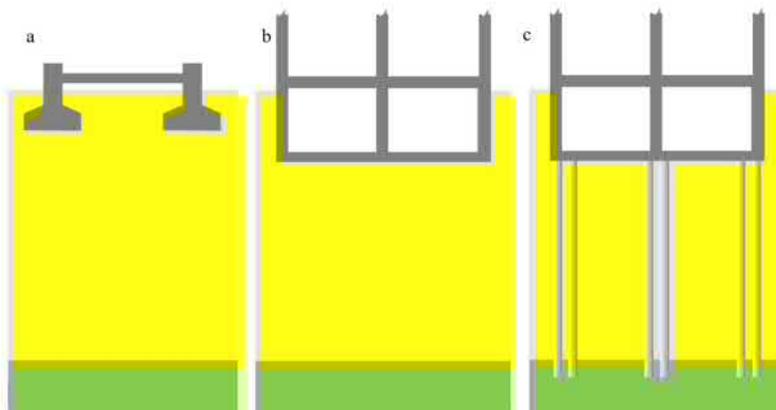


Figure 5.1 – Exemple de fondations réalisées à Mexico. Fondations superficielles de type semelles isolées ou filantes (a), radier avec niveau perdu de compensation (b) et ce même mode de fondation avec, en plus, des pieux localisés sous descente de charges de structure. Figure d'après [1].



Figure 5.4 – Avenida Juárez (Delegación Cuauhtémoc, Mexico)

Sur la Figure 5.4, l'ouvrage est proche du centre historique non loin de la Torre Latinoamericana (zone de l'ancien lac). Des équipes de travaux sont en cours d'installation d'un masque entre les deux bâtiments, a priori pour limiter l'effet visuel de l'espacement différentiel horizontal. Dans ce cas il y a semble-t-il eu une aggravation de la déformation verticale du sol existante lors du séisme du 19/09/2017, avec des rotations pérennes de l'un et/ou l'autre des ouvrages. En pied de l'ouvrage de couleur sombre (avec un textile travaux), une désolidarisation verticale est observable avec un mouvement relatif vers le bas du trottoir (10 à 20 cm). Dans l'interstice horizontal entre le RdC et le sol, nous n'avons pas pu voir d'éventuels pieux ou le niveau enterré de compensation. En face de ces bâtiments, une mesure de fond sismique a été réalisée fournissant une période du sol de 1.52 s.

Au niveau de la Calle Durango (zone de transition), un autre phénomène de découplage du trottoir avec le niveau RdC du bâtiment R+7 est observable. La déformation verticale différentielle semble trahir un réseau de points "durs" pouvant être des pieux (voir Annexes). Suite aux échanges avec le Pr. Auvinet, il est connu que sous l'effet du séisme, l'émergence des pieux travaillant en pointe s'accroît.

Nous constatons aussi, sur les ouvrages avec des endommagements visibles sur la structure, que, même si la superstructure présente des indices de mouvement fort en réponse au séisme, les déformations au niveau de l'interface sol-structure ne sont pas nécessairement flagrantes voire même non identifiables.

C'est le cas pour deux exemples choisis : un bâtiment en angle de quartier, dans la Colonia Roma, Calle Morelia (Figure 5.5) et un ouvrage situé le long de l'Avenida Cuauhtémoc au n°872 (Figure 5.6). Ce dernier bâtiment se situe à proximité d'une zone où des ouvrages ont été détruits par le séisme à l'intersection de la Calle Concepción Beistegui et la Calle Yacatas.

Une mesure a été effectuée à proximité de la Calle Morelia et une autre sur la Calle Yacatas. Au pic de fréquence, les périodes sont de 1.79 et 1.23 s respectivement.

Nous n'avons pas pu véritablement observer des têtes de pieux avec leur encastrement pour statuer sur les moments induits par les effets inertiels, ni sur les éventuels effets d'ovalisation du sol encaissant par un mouvement relatif des pieux. En 1985, la plastification de certaines têtes de pieux avait été relevée lors des diagnostics in situ.

Nous n'avons pas vu d'effet d'interaction accentuée entre les pieux et les radiers ou encore sur les réseaux de longrine, comme la majoration des moments additionnels en raison de points durs créés par les pieux en pointe.



Figure 5.5 – Calle Morelia (Delegación Cuauhtémoc, Mexico)



Figure 5.6 – Avenida Cuauhtémoc (Delegación Cuauhtémoc, Mexico)

Comme souligné par le Pr. Auvinet, les effets de résonance ayant majoritairement concerné des ouvrages moins hauts qu'en 1985, c'est-à-dire de type R+5 à R+10, les moments issus des effets inertiels sur les têtes de pieux étaient moindres en 2017. En 1985, certains ouvrages de mauvaise conception architecturale avaient été conduits à la ruine.

Concernant le renforcement de sol par inclusions rigides, sensu stricto, nous n'avons pas de retour d'information sur des désordres avérés. Pour l'amélioration des sols par pré-chargement avec drains verticaux, la technique est utilisée notamment pour les pistes du futur aéroport de Mexico. En raison du contexte géotechnique de Mexico, les tassements induits à la périphérie d'un chargement rendent le procédé inadapté en zone urbaine.

Pour limiter les tassements induits par chargement du terrain par les voiries, les aménageurs peuvent recourir à la substitution des sols de surface (remblais, argile) par des scories volcaniques, moins denses.

Au niveau des ouvrages souterrains, seuls quelques dommages au niveau des cheminées de ventilation d'une tranchée couverte du métro de Mexico ont été repérés (Pr. Auvinet).

A la faveur d'instrumentations au moyen de cellules de pression interstitielle en proche périphérie du chantier pour le nouvel aéroport de Mexico, une légère surpression transitoire de quelques kiloPascals a été repérée lors des séismes du 7 et du 19/09/2017.

5.4 Principaux enseignements

En première analyse et sur les ouvrages observés, les fondations de la zone lacustre ont très majoritairement répondu à l'objectif essentiel de contribution à la stabilité des ouvrages.

Des pathologies sont probablement identifiables et certaines sont suspectées, comme une forte sollicitation des fondations au niveau des encastremements ou encore des tassements différentiels, mais, elles ne sont pas spectaculaires comme ce fût le cas en 1985.

Devant faire face à des phénomènes aigus de tassement des ouvrages sur des sols très compressibles, les Ingénieurs de Mexico ont acquis une expérience importante sur les techniques de fondation permettant d'y répondre. La réponse en conditions statiques, comme la recherche d'une reprise des efforts verticaux en pointe pour les fondations profondes, s'avère aussi stabilisatrice sous chargement sismique.

Ces techniques ont encore été améliorées à l'issue du retour d'expérience consécutif au drame du 19 septembre 1985. La sollicitation sismique, la réponse dynamique du sol et la typologie des ouvrages présentent des différences entre 1985 et 2017, mais nous pouvons acter que des pathologies flagrantes de 1985 n'ont pas été observées en 2017 comme la bascule d'ouvrage par défaut de fondation.

Références

- [1] G. Auvinet, E. Méndez, M. Juárez, The Subsoil of Mexico City. Vol. III. Three volumes edition celebrating the 60th Anniversary of The Institute of Engineering. UNAM (2017).
- [2] ASIRI. Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides. IREX. Presses des Ponts (2012).
- [3] AFPS, Guide pour l'utilisation et le dimensionnement des fondations profondes sous action sismique des bâtiments à risque normal. Cahier Technique AFPS n°38 (2017).

6 Bâtiments endommagés

6.1 Principales typologies d'ouvrages

L'analyse des dommages observés sur les bâtiments a été faite par typologie structurale. Cette notion englobe d'une part le principe de construction (maçonnerie, béton,...) et d'autre part la géométrie d'ensemble de l'ouvrage (élancement, nombre d'étages, ...). Ces deux paramètres ont été retenus en raison de l'influence importante qu'ils ont sur la réponse dynamique d'une structure, quelle que soit sa typologie.

Outre le cas des monuments historiques, quatre typologies ont pu être identifiées, avec dans l'ensemble une bonne corrélation entre le nombre de niveaux des bâtiments et leur mode constructif. Les typologies identifiées sont énumérées ci-dessous :

- **bâtiments en maçonnerie** : ces bâtiments sont essentiellement des logements individuels ou des petits commerces de construction souvent antérieures aux années 80 (Figure 6-1). Les éléments porteurs y sont souvent en bois ou en briques. Ces bâtiments sont généralement peu élevés et ne dépassent pas trois niveaux ;
- **bâtiments avec structure poteaux-poutres en béton armé et remplissage en maçonnerie** : ces bâtiments sont essentiellement des immeubles d'habitation qui présentent souvent un rez-de-chaussée "clair" servant de stationnement (Figure 6-2). Les remplissages en maçonnerie sont principalement constitués de briques et dans certains cas de blocs de béton manufacturés (parpaings), voire des deux. Un contreventement par croix de Saint-André en béton est parfois présent dans les panneaux verticaux de ces constructions (Figure 6-3). Ces bâtiments sont souvent de petits immeubles ayant une hauteur répartie sur 3 à 10 niveaux ;
- **bâtiments en béton armé avec contreventement par voiles** : cette catégorie, concerne des immeubles d'habitation ou de bureau de 10 à 15 niveaux environ (Figure 6-4). Ces structures sont souvent de type poteau / poutre avec dalle béton. La présence de voiles se retrouve au niveau des cages de circulations et de certaines façades ;
- **bâtiments hauts en construction béton, mixte ou métallique** : ces bâtiments sont principalement des tours de bureau ou d'habitation en béton (Figure 6-6) dont l'ossature est réalisée en profilés métalliques et les planchers en dalle mixte sur bac acier (Figure 6-6). Les façades sont alors constituées par des éléments non structuraux tels que des façades vitrées. Ces structures comportent souvent plus de 15 niveaux.



Figure 6-1 - Bâtiment en maçonnerie



Figure 6-2 - Bâtiment avec structure poteaux-poutres en béton et remplissage maçonnerie



Figure 6-3 - croix de Saint-André en béton



Figure 6-4 - Bâtiments courants en béton armé



Figure 6-5 - Bâtiments de grande hauteur en béton



Figure 6-6 - Bâtiments de grande hauteur en construction, mixte ou métallique

6.2 Bâtiments effondrés

A la date de la mission, une majorité des bâtiments effondrés avaient été déblayés. Aussi, l'étude de ces bâtiments s'appuie-t-elle sur les informations collectées lors des missions de diagnostic d'urgence. Au total, plus de 14 000 bâtiments ont fait l'objet de ce type d'inspection à Mexico. Le nombre total des bâtiments effondrés est de 44. Pour la grande majorité de ces édifices, trois constatations importantes sont faites :

- **leur localisation se situait au niveau de la "zone géologique de transition"**, correspondant à un ensemble plus hétérogène de dépôts lacustres et de colluvions, en limite de zone IIIa et IIIb (Figure 6-7) ;
- **leur construction est de type poteaux-poutre en béton armé avec remplissage en maçonnerie**. (Figures 6-9, 6-10, 6-11) ;
- **leur hauteur est comprise entre 4 et 8 niveaux**. La Figure 6-8 présente la distribution du nombre de bâtiments effondrés en fonction du nombre de niveaux pour 32 bâtiments ;
- **leur date de construction est antérieure aux années 1990**. Il peut être noté que seul un bâtiment récent (de moins de cinq ans) s'est effondré.

Les immeubles partiellement effondrés laissent apparaître que la ruine peut avoir été causée par la défaillance d'un seul étage (y compris rez-de-chaussée) (Figure 6-12). Les rigidités relatives des étages semblent donc avoir joué un rôle important, qu'elles soient liées à la conception d'origine du bâtiment ou bien à une diminution locale de rigidité lors de sa réponse dynamique (pertes de remplissage en maçonnerie par exemple).

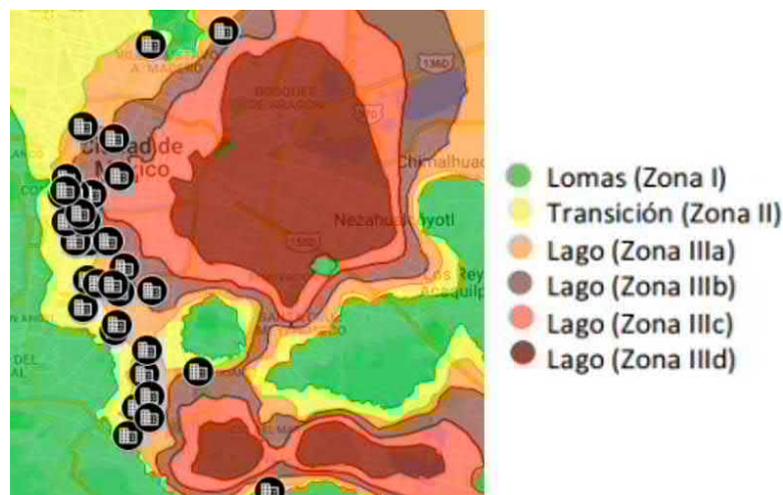


Figure 6-7 - Distribution géographique des bâtiments effondrés

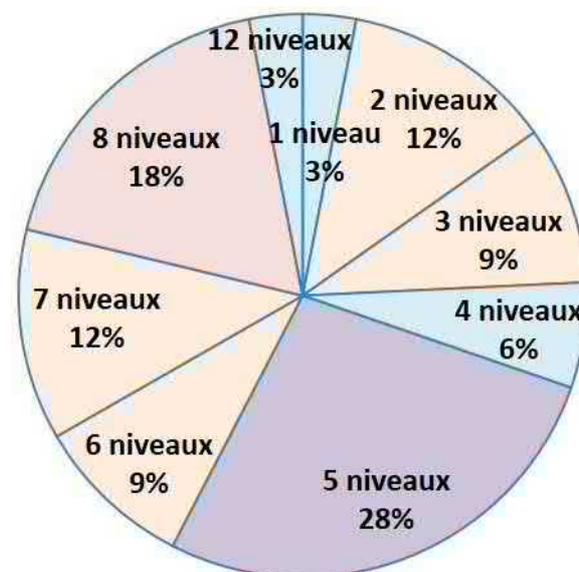


Figure 6-8 - Distribution du nombre de bâtiments effondrés en fonction du nombre de niveaux



Figure 6-9 - 9 niveaux



Figure 6-10 - 6 niveaux



Figure 6-11 - 8 niveaux



Figure 6-12 - 5 niveaux

Photos : www.huffingtonpost.com.mx/2017/09/23/fotos-el-antes-y-despues-de-los-edificios-derrumbados-en-cdmx_a_23220020

6.3 Désordres observés sur les bâtiments non effondrés

6.3.1 Désordres liés à la typologie

Cette partie précise, pour chacune des typologies identifiées et présentées précédemment, la nature des désordres observés.

- **Bâtiments bas en maçonnerie** : dans l'ensemble, ce type de bâtiment a très peu souffert du séisme du 19 septembre 2017. Quelques cas d'entrechoquements légers ont été observés, principalement lors d'une proximité avec un bâtiment de typologie différente.
- **Bâtiments avec structure poteaux-poutres en béton armé et remplissage en maçonnerie** : cette typologie d'ouvrages a été de loin la plus impactée par le séisme du 19 septembre 2017 (Figure 6-13).

Les dégradations d'éléments de remplissage en maçonnerie y ont été récurrentes. Deux mécanismes principaux ont été observés dans les panneaux de remplissage.

- Le premier concerne des déplacements hors plan, et la chute de tout ou partie des briques de remplissage de ces murs de maçonnerie (Figure 6-14). Ce type d'endommagement résulte de mouvements orthogonaux aux murs et/ou d'une torsion du bâtiment. Ce mécanisme a été observé sur des murs avec ou sans raidisseur en béton.
- Le second concerne la présence de fissurations diagonales à 45°, caractéristique d'une rupture par cisaillement des panneaux de remplissage (rupture dans le plan) (Figure 6-15). Cela démontre que des efforts présents dans les contreventements n'ont pu être correctement repris.



Figure 6-13 - Vue d'ensemble d'un bâtiment endommagé



Figure 6-14 - Rupture hors plan du remplissage



Figure 6-15 - Rupture par cisaillement du remplissage

C'est également pour cette typologie qu'ont été observés les dégâts structuraux les plus nombreux.

- Pour certaines de ces structures, des endommagements forts ont été constatés au niveau des jonctions poteaux-poutres (Figure 6-16), notamment au premier ou au second niveau.
- Plus marginalement, des ruptures de poutres ont été observées (Figure 6-17). Ces ruptures ne sont pas intuitives car elles présentent un faciès de ruine vis-à-vis de l'effort tranchant (fissuration à 45°) alors qu'elles surviennent à mi-travée, où une ruine vis-à-vis d'un moment de flexion (fissuration verticale) serait attendue. Dans ces cas, il est probable que le remplissage en maçonnerie et sa dégradation ait conduit à une transmission d'efforts parasites dans les poutres.



Figure 6-16 - Rupture de jonction poteau-poutre



Figure 6-17 - Rupture d'une poutre par cisaillement

Il est important de noter qu'une forte sélectivité a eu lieu au sein de cette classe. En effet, si la majorité des bâtiments endommagés appartient à cette typologie, beaucoup de bâtiments de cette classe ne présentent pas d'endommagement. Ce phénomène est d'autant plus marqué qu'il est observable à l'échelle d'un quartier où les conditions de sol sont a priori semblables et pour des bâtiments datant de périodes de construction visiblement similaires. Notons toutefois que, indépendamment de l'épaisseur des sols de remplissage de la vallée de Mexico, la carte des périodes de sol montre parfois des variations nettes à l'échelle d'un quartier.

- **Bâtiments en béton armé avec contreventement par voiles :**

Ce type de bâtiment a relativement peu souffert de ce séisme. De manière marginale, de la fissuration par cisaillement (diagonales à 45°) a été observée sur certains voiles en béton armé (Figures 6-18, 6-19) ainsi que sur des poteaux courts (Figure 6-20).

- **Bâtiments hauts en construction béton, mixte ou métallique :**

Malgré les forts déplacements en flexion et en torsion (plusieurs dizaines de centimètres), ces bâtiments ont très peu souffert du séisme. Dans de rares cas, des bris d'éléments vitrés ou non structuraux sont visibles.



Figure 6-18 - Fissuration d'un voile par cisaillement



Figure 6-19 - Faciès de la fissuration de cisaillement (zoom)



Figure 6-20 - Rupture d'un poteau court

6.3.2 Désordres indépendants de la typologie

Les désordres présentés dans cette section dépendent soit de l'environnement des bâtiments, soit de leurs éléments non structuraux.

- **Basculement de bâtiment :**

Quelques cas de basculements "légers" de bâtiments ont été observés (Figure 6-21). L'origine de ces mouvements peut provenir soit d'une rupture localisée du système de fondation, soit d'un tassement du sol survenu lors de l'action sismique. Au regard des propriétés du sol de Mexico, la seconde hypothèse n'est pas à exclure. Il est intéressant de noter qu'en dépit des conséquences potentielles sur leur équilibre statique, certains bâtiments ayant subi ce type de comportement étaient toujours en service.

- **Dégradation partielle de l'interface avec le sol :**

Il a été observé de manière assez régulière des dégradations et des mouvements notables (de l'ordre de la dizaine de centimètres) du sol à la périphérie directe des bâtiments. Dans certains de ces cas, un vide était visible sous le bâtiment, pouvant traduire une désolidarisation partielle du système de fondation avec le sol.

- **Entrechoquement de bâtiments**

Des phénomènes d'entrechoquement de bâtiments ont été observés. Certains témoignages relatent un fort ressenti sous l'effet de ces chocs avec des bâtiments parfois non réoccupés à l'issue du séisme. Toutefois, dans la majorité des cas, les zones de contact restent très limitées (Figure 6-22) et les conséquences structurelles faibles. Ces dégâts ont principalement concerné des bâtiments comportant 2 à 4 niveaux, voisins de bâtiments plus hauts. Dans le cas des constructions récentes, la largeur des joints de fonctionnement s'est avérée suffisante.

- **Chutes d'éléments non structuraux**

L'intérieur des bâtiments endommagés présentait parfois des chutes de faux plafonds ainsi que des destructions de cloisons. Au moment de la mission, ce type de désordre n'était visible que sur des bâtiments restés inoccupés. A l'extérieur des bâtiments, quelques chutes d'éléments vitrés (Figure 6-23), acrotères ou jardinières ont eu lieu.

- **Effet "d'angle"**

Les effets "d'angle" ou "domino" désignent des phénomènes à l'échelle d'un ensemble de constructions où une accentuation des désordres est observée sur les bâtiments se situant aux angles des rues. Si des dégâts importants ont effectivement été observés sur des bâtiments se situant aux angles, il en a été de même en zone courante de rue. En l'état, la question de la validité de cette hypothèse reste encore ouverte, aucune conclusion n'a été arrêtée.



Figure 6-21 - Inclinaison (gauche) d'un bâtiment



Figure 6-22 - Entreoquement de deux bâtiments de typologie différente



Figure 6-23 - Pertes d'éléments vitrés et non structuraux

Le tableau (Tableau 6-1) présente la fréquence d'observation des différentes pathologies, en fonction du nombre de niveaux des bâtiments et de la typologie dominante associée.

Tableau 6-1 : fréquence d'observation des différentes dégradations sur la superstructure

| Nombres de niveaux | 1 - 3 | 3 - 10 | 10 - 15 | > 15 |
|---|---------------|--|--|----------------------------------|
| Typologie de bâtiment dominante | Maçonnerie | Poutres en béton armé et remplissage en maçonnerie | Béton armé et voile de contreventement | Construction mixte ou métallique |
| Ruine d'éléments structuraux | Faible | Modéré | Faible | Non observé |
| Dégradation des éléments de remplissage en maçonnerie | Faible | Fréquent | Non observé | Non observé |
| Chutes ou instabilité d'éléments non structuraux externes | Faible | Faible | Faible | Faible |
| Entreoquement de bâtiments | Faible | Faible | Faible | Non observé |
| Basculement de bâtiment | Faible | Faible | Non observé | Non observé |
| Dégradation partielle de l'interface sol-structure | Non observé | Faible | Faible | Supposé |

Echelle de classification en terme de fréquence d'observation : Non observé / Faible / Modéré / Fréquent

6.4 Corrélation dynamique sol / structures

Les observations réalisées pendant la mission ont montré qu'une typologie de bâtiment bien identifiée s'est montrée particulièrement vulnérable au séisme étudié (bâtiments de 4-8 niveaux avec structure poteaux-poutres en béton armé et remplissage en maçonnerie). Parmi les causes possibles, l'effet d'un phénomène de double résonance sol / structure a régulièrement été discuté. Cet effet correspond à la mise en résonance simultanée du sol et de la structure. Cela peut se produire si le contenu fréquentiel du séisme est particulièrement riche au voisinage des périodes fondamentales du sol et de la structure. Ce risque est naturellement accentué si ces deux fréquences sont proches.

L'objet de cette partie est d'étudier cette problématique sur la base d'une part des mesures de fréquences propres du sol effectuées lors de la mission et d'autre part de calculs numériques liés au comportement vibratoire d'un bâtiment.

6.4.1 Analyse des fréquences de sol mesurées et des fréquences de bâtiments estimées selon l'EC8

La première étape de cette étude sur la corrélation dynamique sol / structure consiste à rapprocher la localisation de bâtiments détruits ou très endommagés avec la localisation de mesures de fréquences de sol effectuées lors de la mission. Le choix de 17 bâtiments (14 détruits et 3 endommagés) et 9 mesures (5 en zone Condesa – Roma, et 4 plus au sud) a été fait en raison de la proximité relative de leur localisation (Figure 6-24 et Figure 6-25).

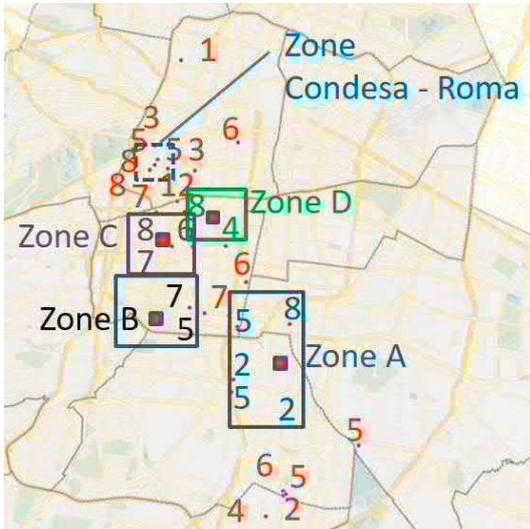


Figure 6-24 - Distribution des ouvrages détruits en partie centrale de Mexico avec rattachement aux zones de mesures H/V – Le chiffre correspond au nombre de niveaux.

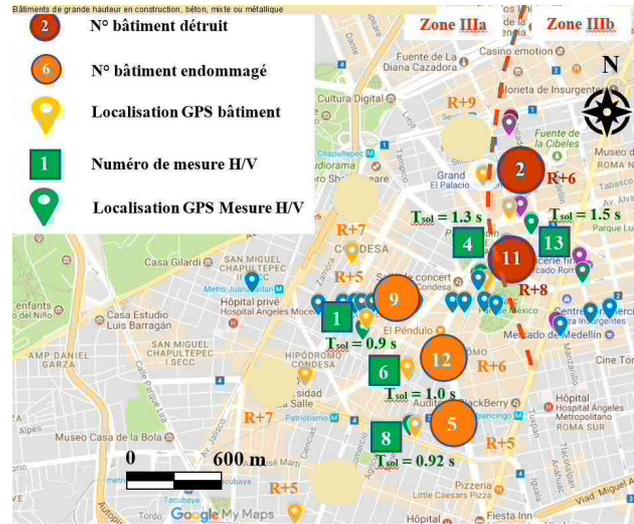


Figure 6-25 - Zoom sur une sélection d'ouvrages endommagés et détruits des Colonias Condesa et Roma avec rattachement aux points de mesures H/V.

La seconde étape consiste à évaluer la fréquence propre des bâtiments retenues. L'Eurocode 8 propose pour les structures portiques en béton la formule suivante : $T_{bat} = 0.075 \cdot H^{3/4}$, H étant la hauteur de l'ouvrage (Pour $H < 40m$). Le Tableau 6-2 présente, pour chacun des 17 bâtiments retenus, leur période estimée (colonne 5, avec $h_{niveau} = 3,5m$) et la mesure de période du sol correspondante (colonne 6). Ces valeurs sont également reportées sur la Figure 6-27 (courbe 1 et nuage de points)

Tableau 6-2 : Estimation des périodes de bâtiments retenues et mesures de sol associées

| Localisation bâtiment | N° mesure H/V | Nombre niveaux | Endommagé (E) / Détruit (D) | Période Tbat (s) (flexion, selon EC8) | Période Tsol (s) (H/V) | Tsol / Tbat |
|-----------------------|---------------|----------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------|
| Zone A | 25 | 3 | D (2 bâtiments) | ~ 0,43 | 1.36 | 3,16 |
| Zone D | 24 | 5 | D | ~ 0,64 | 1.64 | 2,56 |
| 5 | 8 | 6 | E | ~ 0,73 | 0.92 | 1,26 |
| 9 | 1 | | E | | 0.92 | 1,26 |
| Zone B | 26 | 8 | D | ~ 0,91 | 1.08 | 1,47 |
| Zone A | 25 | | D (2 bâtiments) | | 1.36 | 1,86 |
| 12 | 6 | 7 | E | ~ 0,82 | 1.00 | 1,21 |
| Zone C | 27 | | D | | 1.23 | 1,50 |
| 2 | 13 | | D | | 1.50 | 1,83 |
| Zone B | 26 | 8 | D | ~ 0,91 | 1.08 | 1,18 |
| Zone C | 27 | | D | | 1.23 | 1,35 |
| Zone C | 27 | 9 | D | ~ 1.00 | 1.23 | 1,23 |
| 11 | 4 | | D | | 1.30 | 1,30 |
| Zone A | 25 | | D | | 1.36 | 1,36 |
| Zone D | 24 | | D | | 1.64 | 1,64 |

En comparant les périodes fondamentales des bâtiments (estimées par l'approche EC8), et du sol (mesures H/V), nous observons que les premières sont systématiquement inférieures aux secondes. Pour les bâtiments compris entre 5 et 8 niveaux, cet écart est compris entre 20 et 250%. En conséquence, la seule comparaison de ces fréquences ne conduit pas à l'identification d'une corrélation sol / structure. Toutefois, il est important de garder à l'esprit qu'une perte de rigidité augmentant sa période se produit lorsqu'un bâtiment s'endommage.

Le sens de l'étude numérique qui suit est précisément d'estimer l'évolution de ces fréquences en présence d'endommagement et de poursuivre leur comparaison avec les fréquences du sol mesurées.

6.4.2 Analyse numérique de l'évolution des fréquences de bâtiments

La maquette numérique construite est représentative d'un ouvrage "type" (et non d'un édifice particulier), représentatif de la typologie la plus impactée (Figure 6-26). Il s'agit donc d'une structure poteaux / poutres avec remplissages en maçonnerie et possédant un rez-de-chaussée "clair". Le bâtiment est rectangulaire (12m x 16m), comportant 3 travées de 4 m dans sa largeur et 4 travées de 4 m dans sa longueur. Les planchers ont une épaisseur de 0,15 m, les poteaux et les poutres une section de 0,25 x 0,25 m². Le nombre d'étages est paramétrable. Concernant les murs de maçonnerie, trois configurations ont été considérées :

- sans remplissage, représentative d'une structure endommagée à ce niveau,
- avec remplissage et avec ouvertures (fenêtres),
- avec remplissage et sans ouverture.

La modélisation a été réalisée avec le logiciel aux éléments finis Cast3M. Des éléments de type poutre (Euler-Bernouilli) ont été utilisés pour les poteaux et les poutres alors que des éléments de type coque (uni-couche) ont été utilisés pour les planchers et les remplissages. Le béton armé et la maçonnerie ont été caractérisés par leur module d'Young (40 GPa et 20 GPa respectivement), leur coefficient de Poisson (0.2 pour chacun) et leur masse volumique (2500 kg.m⁻³ et 2300 kg.m⁻³ respectivement). Les poteaux ont été supposés être encastrés à leur base.

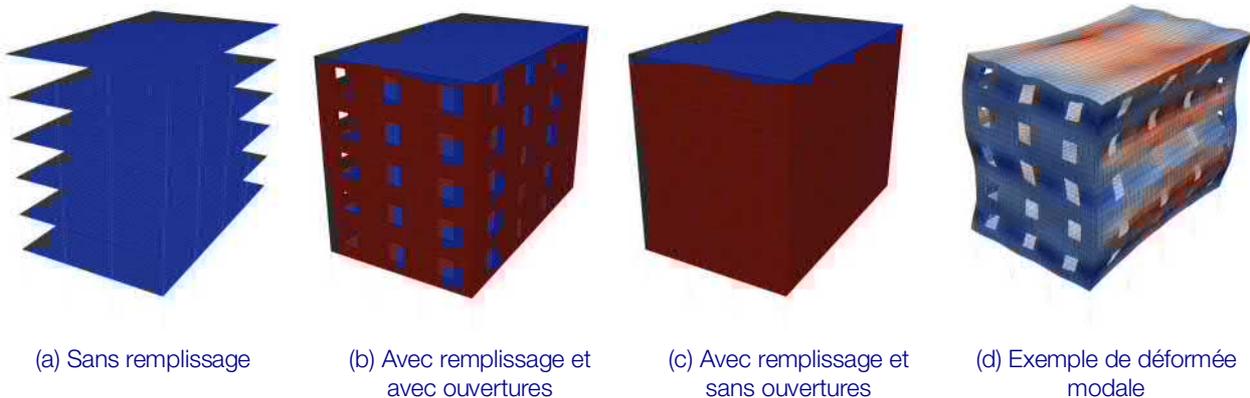


Figure 6-26 - Maquette numérique utilisés pour les trois configurations analysées

L'étude numérique a consisté, pour chaque configuration, à évaluer l'évolution de la fréquence fondamentale en fonction du nombre d'étages. Ces résultats sont représentés sur la Figure 6-27. On constate qu'en condition non dégradée l'influence des ouvertures est négligeable (courbes 3 et 4). En revanche la perte des remplissages conduit à l'augmentation des périodes d'un facteur 6 environ (courbe 2). Il est important de souligner que bien que cette étude permette d'obtenir des tendances, il aurait été intéressant de poursuivre les analyses en ne considérant qu'une partie des remplissages comme dégradés. Cela aurait sans doute permis de mettre en avant l'effet d'éventuelles dissymétries induites, pouvant conduire à l'apparition d'effets de torsion. De plus, le choix des paramètres élastiques ayant été estimé, il conviendrait d'affiner ces valeurs.

Sur la Figure 6-27 sont donc reportées :

- l'estimation de la période propre d'un bâtiment selon l'EC8,
- l'évaluation de la période propre d'un bâtiment avec ou sans remplissage en maçonnerie,
- les périodes de sols mesurées à proximité de bâtiments effondrés ou très endommagés.

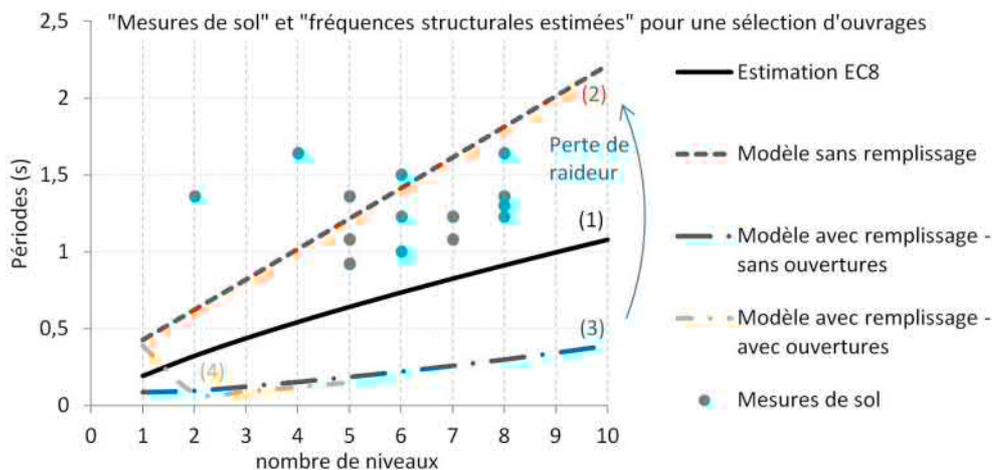


Figure 6-27 - Variations des période fondamentales de structures et de sol sur une sélection d'ouvrages.

6.4.3 Résultats et discussion

De par les conditions aux limites idéalisées, les résultats numériques reproduits sur cette figure sont à considérer comme des bornes "inférieures" et "supérieures" de cette structure type. De ce fait, il est logique de constater que l'estimation de la fréquence selon l'EC8 se situe au milieu de ces bornes.

Dans le cas des fréquences de sol mesurées, on constate que la quasi-totalité se situe entre la droite "EC8" et la borne supérieure de la modélisation. Or, au cours d'une sollicitation sismique, l'évolution de l'endommagement dans un bâtiment aura tendance à faire évoluer la valeur des périodes fondamentales depuis la valeur "EC8" vers la borne supérieure de la modélisation numérique (i.e. sans remplissage).

Dans cette situation, il est tout à fait possible que la fréquence propre d'un bâtiment puisse intercepter la fréquence propre du sol, créant un risque de double résonance. De plus, ces résultats montrent clairement que, pour des bâtiments comportant entre 4 et 8 niveaux, l'endommagement des remplissages entraîne une augmentation de la période fondamentale comprise entre 1 et 1,75 s. Cette plage de périodes correspond en réalité aux accélérations spectrales maximales constatées dans les zones où les bâtiments les plus endommagés ont été observés.

Les conditions d'apparition d'une double résonance semblent réunies et ce risque réel n'est donc pas à exclure. Pour autant, il faut garder à l'esprit que ce phénomène ne saurait être à lui seul retenu comme la seule explication des désordres observés. En effet, la proximité de bâtiments semblables ayant des niveaux d'endommagement très différents montre que d'autres facteurs (notamment la capacité des éléments structuraux) entrent en compte dans la dégradation d'un bâtiment.

Enfin, n'oublions pas que l'analyse porte ici uniquement sur les modes en flexion de la structure. Indiscutablement, les vidéos capturées lors du séisme révèlent des modes en torsion sur certains ouvrages ; d'autant que l'endommagement de murs de remplissage peut créer des dissymétries, favorables à l'apparition de torsion.

6.5 Comparaison avec le séisme de 1985

La ville de Mexico est sujette à des sources sismiques de natures variées. Or, au-delà de la magnitude d'un séisme, la distance de l'épicentre et la nature du mécanisme de déclenchement conduisent à générer des signaux dont les conséquences sur les structures peuvent être bien différentes. La comparaison des conséquences structurelles des séismes des 19 septembre 2017 et 1985 doit donc être faite en gardant à l'esprit cette spécificité. Cette partie met en perspective les éléments du rapport de mission post-sismique AFPS de 1985 avec les observations issues de la mission de 2017.

Lors du séisme du 19 septembre 2017, comme lors des séismes de 1985, 1979, et 1957, la zone concentrant le maximum de dégâts se situe au niveau de la zone géologique de transition. Le secteur de la Condesa et Roma constitue notamment une zone ayant été systématiquement impactée.

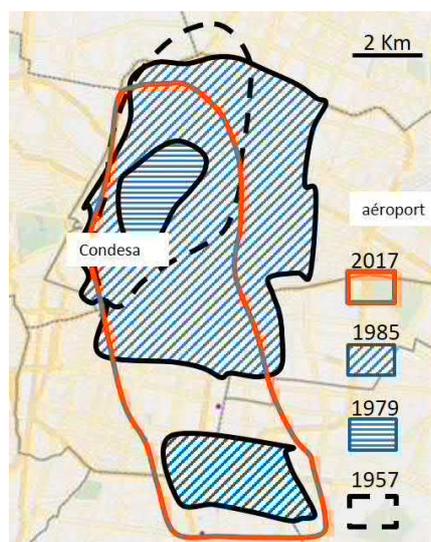
En comparant les conséquences du séisme de 2017 avec celui de 1985, les points suivants peuvent être relevés :

- le nombre de bâtiments effondrés ou très endommagés est significativement inférieur en 2017. (230 en 2017 contre 878 en 1985).
- en 2017, très peu d'ouvrages d'une hauteur de plus de 8 niveaux ont été impactés, alors qu'en 1985, les ouvrages les plus impactés furent ceux dont la hauteur était comprise entre 6 et 15 niveaux. Dans les deux cas, les petits bâtiments (avec une période propre faible) se sont bien comportés. Ces constatations s'expliquent en grande partie par le contenu fréquentiel des signaux. La période correspondant aux accélérations maximales étant de 1 s en 2017 et 2 s en 1985.
- en 2017 comme en 1985, les structures en béton armé avec remplissages maçonneries ont posé problème au travers de la dégradation rapide des maçonneries, modifiant considérablement la réponse des ouvrages concernés. Cette problématique reste donc d'actualité, principalement au regard des bâtiments précédant les règles de 1987.
- en 2017 comme en 1985, il a été constaté que plus les périodes de construction étaient récentes, plus les bâtiments ont eu un comportement satisfaisant. Cela démontre l'intérêt de l'évolution de la réglementation.
- en 2017, la problématique de l'entrechoquement des bâtiments est restée faible, alors qu'en 1985 beaucoup de désordres ont découlé de ce phénomène.
- les éléments non structuraux, qui avaient été très problématiques en 1985 (chutes de parois vitrées), se sont très bien comportés en 2017. Probablement une attention particulière a-t-elle été portée sur ce point.

Les désordres liés à des problématiques de fondations, tels que les bascules et enfoncements, sont restés très limités en 2017, alors que leur importance était notable en 1985. Ce phénomène pourrait s'expliquer notamment par un meilleur zonage et un meilleur respect de celui-ci, ainsi que par l'évolution des spectres réglementaires.

L'ensemble de ces constatations sont reprises dans le Tableau 6-3.

Tableau 6-3 : Eléments de comparaison 2017 - 1985



| Observations | 2017 | 1985 |
|---|-----------|-----------|
| Bâtiments détruits ou hors d'usage | 283 | 878 |
| Nombre de niveaux des bâtiments majoritairement impactés | 4 - 8 | 6 - 15 |
| Endommagement des structures béton avec remplissage maçonné | Important | Important |
| Entrechoquement des bâtiments | contenu | important |
| Chute d'éléments non structuraux | contenu | important |
| Renversement ou endommagement sévère des fondations | contenu | important |
| Bénéfice des évolutions règlementaires | apparente | apparente |

Figure 6-28 - zones de dommages maximum

6.6 Principaux enseignements

A l'échelle de la ville, le bon comportement dont a fait preuve une grande majorité du bâti est à souligner.

Plusieurs problématiques très présentes lors du séisme de 1985 n'ont eu, en 2017, que peu d'ampleur :

- les phénomènes d'entrechoquement entre bâtiments et leurs conséquences sont restés limités ;
- la chute des éléments extérieurs non structuraux, tels que baies vitrées, acrotères et balcons est également restée très limitée.

Néanmoins, certains points restent problématiques :

- le comportement des murs de remplissage par maçonnerie et leur faible résistance vis-à-vis des sollicitations hors plans engendrent la chute de ces éléments ;
- la perte de ces éléments modifie la circulation des efforts dans la structure et impacte directement les éléments porteurs adjacents. Leur endommagement est donc lié à une mise en fonctionnement anormale.

Enfin, l'étude des désordres fait apparaître un phénomène de sélectivité très fort, à trois niveaux :

- à l'échelle de la géologie du site, puisque les bâtiments endommagés se répartissent essentiellement sur la "zone de transition" du sol de Mexico ;
- à l'échelle de la typologie des bâtiments ; ainsi, les bâtiments comportant 4 à 8 niveaux de type poteaux-poutres en béton armé avec remplissage en maçonnerie ont concentré la majorité des désordres observés ;
- au sein d'une typologie, puisque pour des constructions semblables et des localisations pouvant être très proches, certains bâtiments sont très impactés, alors que d'autres ne présentent pas de dégâts observables.

Compléments

Extraits de la Nota Informativa del Grupos de Sismologia e Ingenieria de la UNAM du 23 septembre 2017

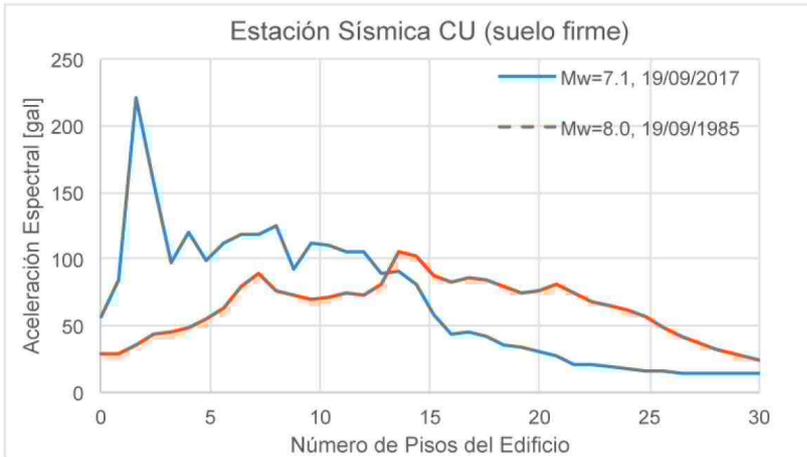


Figure 6-29 - Accélération spectrale suivant le nombre d'étage pour 1985 (en rouge) et 2017 (en bleu) sur sol ferme (UNAM 23.09.2017)

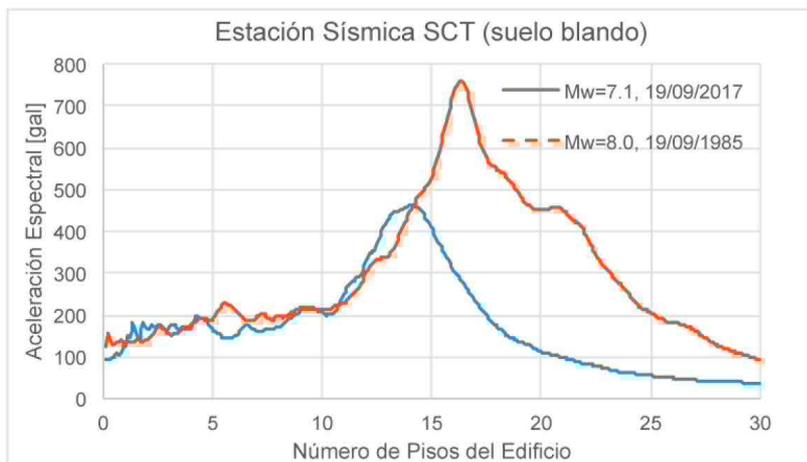


Figure 6-30 - Accélération spectrale suivant le nombre d'étage pour 1985 (en rouge) et 2017 (en bleu) sur sol meuble (UNAM 23.09.2017)

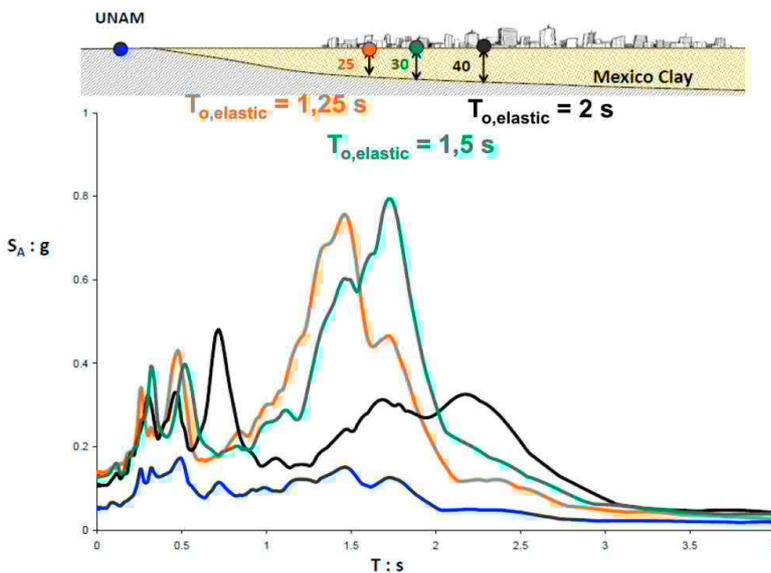


Figure 6-31 - Accélération spectrale suivant la position de l'immeuble (NTU 25.09.2017)

7 Bâtiments confortés

Depuis 1985, de nombreux bâtiments ont fait l'objet de travaux de confortement. Nous avons également constaté au cours de la mission la réalisation de confortements postérieurs au séisme du 19 septembre 2017. Cette partie présente la nature des renforcements observés, leur principe de fonctionnement et leur comportement évalué suite au séisme du 19 septembre 2017.

7.1 Contexte réglementaire

Après le séisme de septembre 1985 les autorités mexicaines ont publié en octobre de la même année une norme d'urgence applicable aux bâtiments neufs et aux bâtiments à conforter [1]. En 1987, une norme complémentaire est apparue prenant en compte de nouveaux critères, telle que la ductilité [2]. En 2004, des dispositions étaient publiées pour les réhabilitations de constructions en maçonnerie. Suite au séisme du 19 septembre 2017, une norme pour la réhabilitation de bâtiments endommagés est apparue en décembre de la même année [3].

7.2 Typologies de confortement observés

Lors de la mission, quatre types de confortements ont été observés. Les sections 7.2.1 et 7.2.2 présentent des exemples de confortements antérieurs et postérieurs au séisme de septembre 2017.

Renforcement en béton armé (Figure 7-1, exemples 1, 2 et 3) :

Cette technique consiste soit à augmenter la capacité des éléments porteurs existants en révisant leur dimensionnement à la hausse, soit à ajouter de nouveaux éléments en béton armé. Du point de vue des caractéristiques dynamiques, ce type de confortement modifie la raideur et la répartition des masses de l'ouvrage. Notons que cette technique a été principalement observé sur des bâtiments en béton armé comprenant entre 10 et 20 niveaux.

Confortement par contreventement en construction métallique (Figure 7-2, exemples 4, 5, 6, 7, 8 et 11) :

Cette technique consiste à ajouter un système de contreventement destiné à transmettre les efforts horizontaux provenant de l'accélération du séisme, jusqu'aux fondations de l'ouvrage. Ces renforts sont majoritairement constitués de profilés métalliques, et parfois de tirants. Ce type de confortement a couramment été observé sur des bâtiments en béton comportant entre 5 et 10 niveaux. La raideur d'ensemble apportée par ce type de renforcement peut modifier de manière significative les fréquences fondamentales des ouvrages concernés.

Le renforcement d'éléments en béton armé par collage de plats métalliques (Figure 7-3, exemple 12) :

Cette technique vise à augmenter *a posteriori* la quantité d'armatures d'un élément en béton. Ces armatures additionnelles sont placées à l'extérieur des éléments concernés et prennent alors la forme de plats métalliques. Ce type de renforcement permet d'apporter résistance et ductilité tout en évitant de modifier les caractéristiques dynamiques du bâtiment. Cette technique n'a été observée que sur un seul bâtiment, dans le cadre d'un renforcement en cours.

Confortement par dispositifs de dissipation d'énergie (Figure 7-4, exemples 9, 10) :

Cette technique consiste à ajouter des éléments visant à accroître la dissipation d'énergie dans une structure lors de sa mise en mouvement par un séisme. L'utilisation d'amortisseurs élastiques et/ou visqueux a été observée, en réhabilitation, sur des immeubles de grande hauteur. Cette technologie permet de contrôler l'amortissement de la structure ainsi que ses fréquences fondamentales. Notons que dans certains cas, le confortement a également consisté en une modification de la structure initiale. Cette technique consiste par exemple à retirer des étages ou bien à diviser la structure pour créer plusieurs structures indépendantes. De fait, la répartition des masses et la réponse dynamique de l'édifice s'en trouve modifiée.



Figure 7-1 - Renforcement par voile béton



Figure 7-2 - Renforcement par contreventement métallique



Figure 7-3 - Renforcement d'éléments en béton



Figure 7-4 - Confortement par dissipateur

7.2.1 Exemples de bâtiments confortés avant le séisme du 19 septembre 2017

Exemple 1 - Renforcement en béton armé et modification de la géométrie d'origine : complexe de Tlatelolco.

Construit entre 1960 et 1964, l'ensemble Résidentiel "Nonoalco Tlatelolco" est un symbole de la concentration de population de la ville de Mexico. Lors du séisme de 1985 ce quartier a connu de gros effondrements et une campagne de renforcement s'en est suivie sur ces bâtiments en béton armé. Les Figures 7-5 et 7-6 montrent respectivement un bâtiment de cet ensemble avant et après son confortement.



Figure 7-5 - Bâtiment en 1960, avant confortement



Figure 7-6 - Bâtiment renforcé après 1985

Le confortement a consisté à :

- Réaliser de nouveaux pieux implantés à 6,50 m de la façade,
- Diviser l'ensemble de l'ouvrage en sous-structures par la suppression des voiles pignons sur toute la hauteur, afin de raccourcir de 35 cm la structure initiale et de créer un joint de fonctionnement de 70 cm entre chaque nouveau module,
- Réaliser des raidisseurs sur toute la hauteur des deux grandes façades,
- Réaliser des poutres reliant les poteaux tous les 3 étages.

Le principe de confortement est donné sur la Figure 7-7.

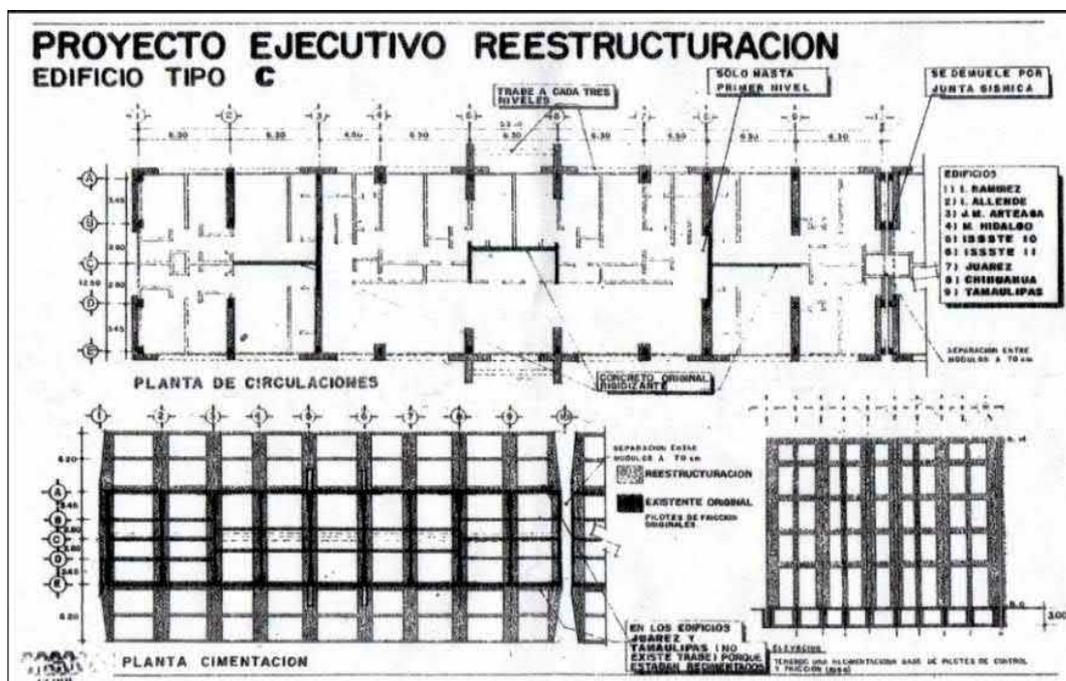


Figure 7-7 - Principe de renforcement d'un bâtiment du quartier Tlatelolco - vue en plan

Lors du séisme du 19 septembre 2017, le bâtiment n'a pas subi de dommages structuraux visibles, bien qu'il ait été sujet à des déplacements horizontaux d'environ 50 cm.

Exemple 2 - Renforcement en béton armé : immeubles dans le complexe de Tlatelolco

Renforcement de 4 bâtiments datant de 1964 appartenant au même complexe urbanistique que l'exemple précédent. Le bâtiment de type "barre" a été renforcé par l'ajout de voiles en béton contre ses façades. Les Figures 7-8 à 7-10 montrent les deux types de renforcement réalisés. Il est à noter que ces bâtiments se sont bien comportés lors du séisme du 19 septembre 2017.



Figure 7-8 - Bâtiments confortés, vue d'ensemble



Figure 7-9 - Voile orthogonale réalisée sur toute la hauteur



Figure 7-10 - Contre-voile réalisé sur toute la hauteur

Exemple 3 - Renforcement en béton armé : immeubles de type poteaux-poutres en béton armé et remplissage maçonnerie

La présence de croix de Saint-André ou de contreventement en "V" a régulièrement été constatée sur les façades de bâtiments de type poteaux-poutres en béton armé et remplissage maçonnerie (Figure 7-11 et Figure 7-12). Il est parfois difficile de détecter si ces renforts ont été réalisés lors de la construction ou bien ultérieurement.

Ce type de renfort se retrouve également pour solidariser deux parties d'un même bâtiment pouvant présenter un risque de torsion (Figure 7-12). Les bâtiments disposant de ce type de renfort ne présentaient pas de désordres visibles, autres que d'éventuelles chutes de briques.

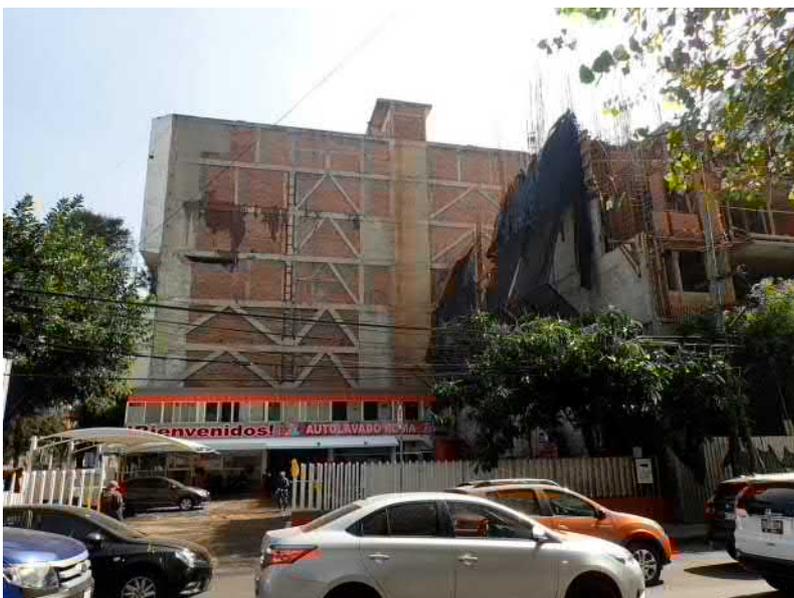


Figure 7-11 - Contreventements sur mur en maçonnerie

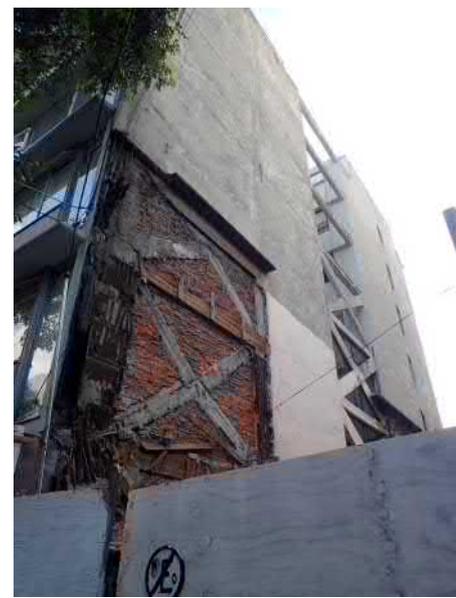


Figure 7-12 - Contreventement sur un mur de maçonnerie et entre deux bâtiments

Exemple 4 - Confortement par contreventement en construction métallique

La Figure 7-13 présente un bâtiment de 10 étages en béton situé dans le quartier Roma (un des quartiers les plus impactés). Son renforcement est constitué par des croix de Saint André sur l'ensemble de l'ouvrage. Celles-ci sont disposées à l'extérieur, mais également à l'intérieur du bâtiment. Ce bâtiment ne présentait pas de désordre significatif suite au séisme du 19 septembre 2017.



Figure 7-13 - Confortement en croix – vue d'ensemble



Figure 7-14 - Détail du confortement en croix au rez-de-chaussée

Exemple 5 - confortement par contreventement en construction métallique

La Figure 7-15 et la Figure 7-16 montrent le confortement par profilés métalliques en façade d'un bâtiment de 6 étages du ministère de l'agriculture. Au-delà de l'accroissement de capacité du bâtiment, ce confortement a également pour conséquence de limiter les déplacements latéraux et donc les risques d'entrechoquement. Ce bâtiment ne présentait pas de désordres visibles suite au séisme du 19 septembre 2017.



Figure 7-15 - Contreventement en façade : vue d'ensemble



Figure 7-16 - Détail du confortement en pied

Exemple 6 - Confortement par contreventement en construction métallique

Les Figures 7-17 à 7-19 montrent le confortement réalisé en 1990 de l'institut d'Amérique Latine (IFAL), composé de plusieurs bâtiments de 2 et 3 étages.

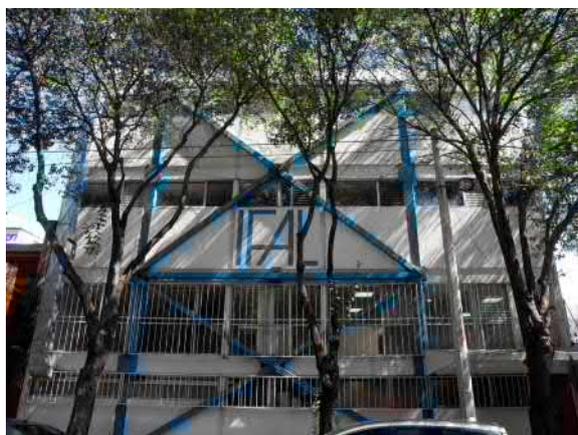


Figure 7-17 - Contreventement sur façade



Figure 7-18 - Détail du confortement



Figure 7-19 - Détail du confortement en pied

Exemple 7 - confortement par contreventement en construction métallique

Les Figures 7-20 et 7-21 montrent un bâtiment à 3 étages dont le confortement est disposé dans son angle. Cette disposition vise certainement à limiter la problématique liée à la torsion. On peut entrevoir à travers les fenêtres la chute de nombreux éléments de faux plafond, traduisant des secousses importantes lors du séisme du 19 septembre 2017. Ce bâtiment ne présente toutefois pas de désordres structurels visibles.



Figure 7-20 - Confortement métallique dans l'angle du bâtiment



Figure 7-21 - Confortement métallique - détail

Exemple 8 - Confortement par contreventement en construction métallique

Les Figures 7-22 et 7-23 montrent le confortement d'un bâtiment dont le contreventement a été réalisé par l'utilisation de tirants métalliques ancrés tous les 4 niveaux sur la structure. Ce bâtiment ne présentait pas de désordres visibles.



Figure 7-22 - Contreventement par tirants métalliques

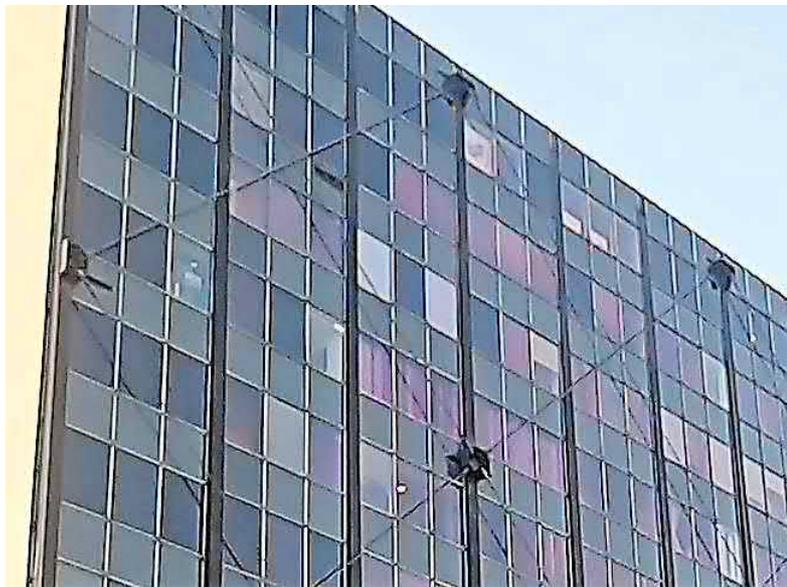


Figure 7-23 - Détails des tirants métalliques

Exemple 9 - Confortement par dispositifs dissipateurs d'énergie

Ce type de confortement a fait l'objet d'une norme qui est apparue en décembre 2017. Par conséquent, les exemples que nous présentons ici n'étaient pas couverts à l'époque de leur construction par une norme mexicaine. Les premiers bâtiments renforcés par la technique de dissipation de l'énergie datent de plus de 25 ans. Aucun dommage visible n'a été relevé sur les bâtiments que nous avons vu et qui étaient confortés de cette manière.

Les Figures 7-24 et 7-25 montrent un confortement en diagonale de type viscoélastique.



Figure 7-24 - Systèmes dissipatifs installés à chaque niveau



Figure 7-25 - Système dissipatif : détail sur les amortisseurs

Exemple 10 - Confortement par dispositifs dissipateurs d'énergie

La Figure 7-23 et la Figure 7-24 montrent le confortement du bâtiment du Ministère de l'Economie, construit en 1975, et qui est en cour de travaux depuis environ deux années. Un ensemble de raidisseurs horizontaux et de dissipateurs diagonaux a été disposé sur toute la hauteur de l'ouvrage. Ces éléments rapportés s'appuient sur la structure en béton armé d'origine. Aucun dommage visible n'a été relevé sur ce bâtiment.



Figure 7-26 - Confortement toute hauteur



Figure 7-27 - Détails sur les amortisseurs diagonaux et les raidisseurs horizontaux

7.2.2 Exemples de bâtiment confortés après le séisme de 2017

Exemple 11 - Confortement par contreventement en construction métallique

Ce bâtiment qui abrite un centre médical privé, comporte une structure de type poteaux-poutres en béton armé, avec un rez-de-chaussée relativement clair (Figure 7-28). Le confortement par croix de Saint André a été appliqué à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment (Figure 7-29), afin d'assurer la stabilité à tous les niveaux.



Figure 7-28 - Avant confortement



Figure 7-29 - Travaux de confortement en cours

Exemple 12 - Renforcement d'éléments en béton par collage de plat métallique : parc de stationnement multiétages

Un seul exemple de cette nature a été observé. Cette technique vise à conforter les poteaux du rez-de-chaussée d'un parc de stationnement de 8 étages (Figure 7-30). Des cerclages métalliques ont été disposés de manière à confiner ces poteaux et à accroître leur résistance vis-à-vis des sollicitations de compression et de cisaillement. De la résine (e.g. epoxydique) a également été utilisée pour ponter la fissuration existante dans les poteaux. Les poteaux renforcés sont de plus associés à des poteaux (Figure 7-31) ou voiles (Figure 7-33) complémentaires, qui pour certains étaient déjà présents avant le séisme de 2017 (visibles sur des photos de 2008).

Notons que ce bâtiment ne semble pas avoir subi de dommages importants suite au séisme du 19 septembre 2017 (non renforcé à cette période), alors même que sa hauteur (8 étages) et sa conception avec des masses de plancher importantes pouvaient être défavorables.



Figure 7-30 - Parc de stationnement – San Luis Potosi – 8 niveaux



Figure 7-31 - Poteau d'angle renforcé et contre poteau



Figure 7-32 - Poteau renforcé au rdc et poteaux additionnels



Figure 7-33 - Renforcement d'un poteau

7.3 Principaux enseignements

A l'échelle de la ville, il est important de souligner que les bâtiments confortés par les différentes techniques que nous avons présentées dans ce chapitre se sont bien comportés lors du séisme du 19 septembre 2017. Aucun de ceux que nous avons pu observer et analyser ne faisait apparaître de dommages significatifs.

Il est également intéressant de constater que les différents types de renforcements s'accordent chacun avec une typologie d'ouvrage. Cela démontre une habitude certaine des problématiques de renforcement.

Références

- [1] Norme de Emergencia en Materia de Construcciones para el Distrito Federal. Diario oficial 1985.
- [2] Normas Tecnicas complementarias para diseno sismico 1987.
- [3] Normas para la rehabilitacion sismica de edificios de concreto danados por le sismo del 19 de septiembre de 2017,

8 Réseaux d'utilité publique

Ce chapitre fait le point sur les réseaux endommagés lors du séisme du 19 septembre 2017.



Figure 8-1 – Etats du Mexique avec des réseaux endommagés en 2017 (document wikipedia).

8.1 Réseaux de télécommunication

Le recensement des dommages sur les sites de télécommunication est donné au Tableau 4. Il n'y a pas de données aussi fournies pour l'état de Puebla adjacent.

| Ville ou Etat | Nombre de sites endommagés |
|-------------------------|----------------------------|
| Ville de Mexico (CDMX) | 93 |
| Etat de Mexico (EDOMEX) | 44 |
| Etat de Morelos | 7 |

Tableau 4. Dommages sur les sites de télécommunication pour la ville de Mexico, l'état de Mexico et l'état de Morelos.

Les lignes de téléphonie filaires ont souffert de dommages pendant le séisme alors que le service de téléphonie mobile et internet ne s'est pratiquement pas interrompu (hors saturation du réseau due à un grand nombre de connexions simultanées).

On notera qu'un communiqué de l'Instituto Federal de Telecomunicaciones fait état que 72 h après le séisme, 98 % des réseaux de télécommunication publics fonctionnaient.

On notera également que des services de téléphonie mobiles gratuits ont été fournis aux équipes de secours pendant l'organisation des opérations de sauvetage.

8.2 Réseaux de transport

Autoroute et Ponts

Le chantier de l'autoroute Pirámides a subi des dommages, un pont en construction s'est effondré à Texcoco (état de Mexico).

Un pont routier à Chimalhucán a été endommagé, sans que l'on connaisse l'étendue des dégâts.

Un pont de l'autoroute Mexico-Acapulco s'est effondré au km 109 dans l'état de Morelos.

Un pont s'est effondré à Ixtaltepec, état de Oaxaca (il n'est pas précisé s'il s'agit du séisme du 7 ou du 19 septembre).

Le pont La Unión s'est effondré à Villa Corzo, état de Chiapas (il n'est pas précisé s'il s'agit du séisme du 7 ou du 19 septembre).

Métropolitain

Il a été rapporté à la mission que le métro de Mexico a fonctionné normalement et n'a pas souffert de dommages.

8.3 Réseaux d'énergie et d'eau

Suite au séisme, le dispositif d'urgence concernant les réseaux vitaux faisait partie intégrante des premiers dispositifs d'urgence comme déclaré dans un communiqué du Président de la République, au même plan que les services sociaux :

- Sécurité sociale,
- ISSSTE (Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado),
- PEMEX (entreprise historique nationale, qui a perdu son monopole mais reste fortement implantée sur les territoires),
- Secrétariat de la Défense Nationale,
- Secrétariat de la Marine.

Electricité

L'électricité a été coupée volontairement par sécurité immédiatement après le séisme dans toutes les zones affectées puis rétablie dans les minutes qui ont suivi.

On fait état de chute de transformateurs dans l'état de Mexico (Ecatepec, parc industriel Xalostoc). Des sous-stations de l'entreprise CFE (Comisión Federal de Electricidad) ont été endommagées dans l'état de Morelos.

Des parcs éoliens ont été affectés dans les états de Oaxaca et de Chiapas (il est vraisemblable qu'il s'agisse du séisme du 7). Les gestionnaires de ces parcs ont travaillé de concert avec la CFE et le CENACE (Centro de Control de la Energía) pour rétablir l'injection d'électricité dans le réseau national. Il n'est pas reporté de chute d'éolienne ni d'aérogénérateur.

Eau

La Comisión Estatal del Agua de l'état de Oaxaca (CEA Oaxaca) a indiqué sur son site plusieurs des réparations qu'elle a effectuées suite au séisme du 7 septembre et de ses répliques. Il a ainsi été possible de suivre en temps réel le rétablissement du service. D'après les photos mises en ligne, on constate que les réparations sont effectuées dans des conditions éloignées des pratiques de pose habituelles (fouille non sécurisée, port d'équipement de sécurité variable, etc.), les équipes sont intervenues rapidement. Les techniques employées (toujours d'après les photos) sont souvent un remplacement d'une partie de canalisation en métal par une canalisation non métallique (il est difficile de dire s'il s'agit de polyéthylène, PVC, composite, etc.) Des raccords métal plastique sont également utilisés.

Nous n'avons pas pu récupérer de données globales chiffrées sur les fuites et les interruptions de service dues à un arrêt des pompes sur les puits.



Figure 8.2 – (Gauche) Réparation d'une conduite à Ixtaltepec (Oaxaca). (Droite) Effondrement d'une route à Tlahuac (CDMX) dû à une tuyauterie d'eau

Les réseaux d'eau les plus affectés dans la ville de Mexico (CDMX) se trouvent dans les Delegaciones Iztapalapa et Tlahuac. De nombreuses fuites ont dû être réparées. On déplore également l'effondrement d'une route sous laquelle une tuyauterie d'eau a rompu, générant des mouvements de sol.

Dans l'état de Mexico, 6 fuites et 7 puits endommagés ont été rapportés. Dans l'état de Morelos, 17 conduites d'eau furent endommagées.

Gaz et Pétrole

Hormis une fuite sur une canalisation de distribution de gaz en acier de 2 pouces dans la zone épiscopale (pression non communiquée), il n'a pas été rapporté de dommages sur les réseaux de distribution et de transport de gaz et hydrocarbures liquides.

La canalisation *Los Ramones* située au Nord-Ouest de Mexico est instrumentée avec une fibre optique enterrée le long de la canalisation principalement pour la détection de tiers (une seule fibre optique enterrée à côté du tube). Lors du séisme du 7 septembre, ce système a néanmoins enregistré les secousses.

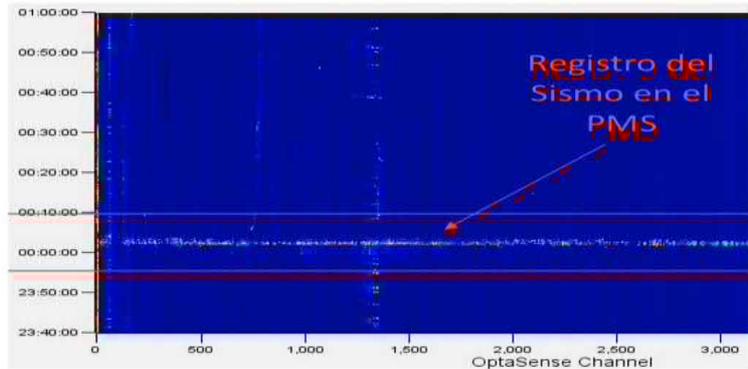


Figure 8.3 – Canalisation de transport de gaz équipée d'une fibre optique

8.4 Divers

On a relevé des renversements d'équipement dans une usine de médicaments dans l'état de Mexico (zone industrielle d'Ecatzingo).

Il n'a pas été possible de visiter de site industriel sur place, néanmoins, il a été rapporté que dans une raffinerie au nord de la ville de Mexico, les équipements ont fortement bougé sans qu'aucun dégât n'ait été constaté.

De même, sur un terminal méthanier dans l'état de Tamaulipas (assez éloigné de l'épicentre), il n'a pas été noté de dommages particuliers.

Il n'y a pas de dommages à signaler sur les installations off-shore.

8.5 Principaux enseignements

En comparant avec les conclusions du rapport de mission de 1985, on pourra noter que les enseignements concernant les réseaux sont assez similaires, à savoir que les installations industrielles se sont très bien comportées vis-à-vis du séisme.

Les réseaux de distribution et de transport d'hydrocarbures se sont également très bien comportés, ce qui est cohérent avec le retour d'expérience habituellement collecté sur les grands séismes récents (Izmit 1999, Tohoku 2011).

Les canalisations de distribution d'eau en revanche ont provoqué quelques dégâts pouvant impacter le bon déroulement des secours, et il est à noter que des restrictions sur la consommation de l'eau potable étaient toujours en cours 2 mois après le séisme.

Les réseaux de transport, notamment le métropolitain, comme en 1985, se sont très bien comportés de même que les réseaux de télécommunication qui ont grandement participé à la bonne organisation des secours post-séisme.

L'électricité a été coupée intentionnellement mais a pu être rétablie très rapidement, témoignant du soin apporté par les Mexicains à la conception industrielle parasismique consignée dans le Guide de conception parasismique édité par l'EDF local, la Compañía Federal de Electricidad.

9 Simulacro

9.1 Nature de l'exercice

Depuis 1985 chaque 19 septembre a lieu à Mexico "el simulacro", littéralement le simulacre. Ce terme signifie en fait un exercice d'évacuation et de gestion de crise en cas de séisme. C'est un événement annuel pris très au sérieux. Il est préparé, annoncé dans la presse et les médias, et il donne lieu à une évaluation détaillée. En 2017, les médias avaient parlé de "macrosimulacro" et même de "megasimulacro" en incitant le public à y participer.

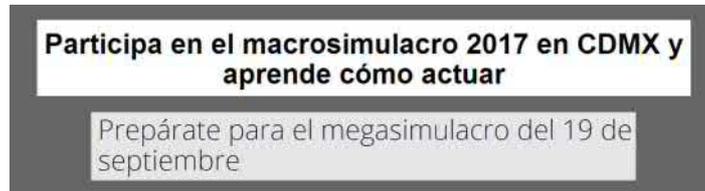


Figure 9.1 – "macrosimulacro" et "megasimulacro" dans les médias

Pour la préparation de l'exercice, le guide de procédure de la Protection Civile donne 5 points à respecter :

1. Inscrire la propriété et obtenir un numéro d'enregistrement
2. Tenir une réunion préalable avec le comité interne chargé de la sécurité avec comme hypothèse une évacuation dans un délais de 40 seconde après l'alerte
3. Réaliser l'exercice le 19 septembre 2017 à 11h00 au déclenchement des sirènes du SAS, le Système d'Alerte Sismique
4. Donner l'ordre de retour et réaliser immédiatement la réunion d'évaluation de l'exercice
5. Remplir dès que possible le formulaire d'évaluation et le transmettre au Secrétariat de la Protection Civile pour obtenir une preuve de participation

Les consignes d'évacuation sont les suivantes :

- les personnes qui occupent le rez-de-chaussée et le premier étage évacuent vers les points de rencontre si elles sont dans le délai des 40 secondes
- les personnes à partir du 2^e étage ou en dehors de la plage des 40 secondes se retirent dans les zones considérées comme à faible risque et n'évacuent qu'après la fin du tremblement de terre vers les points de rencontre
- après l'évacuation un comptage est effectué aux points de rencontre par les responsables
- le responsable de l'exercice active l'inspection de la propriété pour vérifier s'il est possible de rentrer à nouveau

Figure 9.2 – Formulaire d'évaluation du "Simulacro 2017"



Figure 9.3 – Des images du "Simulacro 2017"

Le 19 septembre 2017 à 11h00, l'alarme est déclenchée, les évacuations sont organisées, les comptages effectués aux points de rencontre, les bâtiments inspectés, les retours autorisés.

Des images de l'exercice sont mises en ligne quasiment en temps réel.

A 12h21, le chef du Gouvernement Miguel Angel Mancera et son équipe se réunissent pour évaluer l'exercice 2017.

A 13h34, le "vrai" séisme survient.

Mancera analiza resultado del simulacro 2017 en la CDMX

● El mandatario capitalino y su gabinete se ubicaron en el cuarto de crisis del C5 para evaluar el número de personas y edificios que participaron en este evento

El jefe de Gobierno, Miguel Ángel Mancera, y su equipo se reúnen en el C5 de la Ciudad de México para evaluar el Simulacro 2017.

Desde hace más de 50 minutos, el mandatario capitalino y miembros de su gabinete se ubicaron en el **cuarto de crisis** para evaluar el número de personas y edificios que participaron en este simulacro.

Mientras tanto, las **cámaras del C5** enfocan diversas calles de la ciudad para monitorear en tiempo real el ejercicio de **protección civil**.

19/09/2017 | 12:21 | Sandra Hernández [Ciudad de México]



Figure 9.4 – 19 septembre 2017 à 12h21 M.A. Mancera et son équipe se réunisse pour évaluer le "Simulacro 2017"

9.2 Principaux enseignements

Nous avons pu constater que cet exercice annuel de grande ampleur avait un double intérêt :

- en faisant participer très largement la population, il permet à chacun d'acquérir les bons réflexes
- mais surtout il permet en permanence de maintenir la conscience du risque sismique

Pour les responsables et les constructeurs, le bénéfice "pédagogique" est très important : en effet quand chaque année on participe à une simulation d'une telle ampleur, il semble difficile d'oublier ou d'occulter le risque sismique lorsqu'on commande, dessine, construit ou gère un bâtiment.

En France, nous avons ce type d'exercice pour le risque d'incendie, tout particulièrement dans les établissements scolaires où un exercice d'évacuation est organisé chaque année. Et dans l'ensemble on peut admettre que ce risque n'est pas occulté par les responsables et les constructeurs.

Pour le risque sismique nous avons des exercices dit "Richter". Au début c'étaient surtout des exercices d'état major (le premier exercice "Richter" était d'ailleurs simplement un exercice cadre "sur table"), mais lors de l'exercice "EU Richter Caraïbes 2017", au moment du séisme (fictif) du mardi 21 mars 2017 à 10 h, les établissements scolaires ont fait des exercices d'évacuation, l'aéroport a également été évacué, tout comme certaines entreprises qui avaient décidé de se joindre à l'exercice.

Au vu de l'expérience Mexicaine, nous ne pouvons que recommander de poursuivre et d'amplifier nos exercices "Richter" pour leur donner peut être un jour l'ampleur et la fréquence d'un "Simulacro".

10 Gestion de crise



Figure 10.1 – Images des premiers secours (photo AFP bureau de Mexico)

10.1 Protocole de gestion de crise

Le protocole de gestion de crise est national depuis 2014. Les Etats-Unis mexicains sont fédérés en 32 états dotés chacun d'une certaine autonomie pour la gestion de crise Ils doivent toutefois suivre les lignes directrices fédérales.

En 2014, le gouvernement national a créé le plan national **MX** de gestion de crise qui lie toutes les agences concernées (fédérales et assimilées) :

- *Secretaría de la Defensa Nacional* (SEDENA) : Ministère de la Défense,
- *Secretaría de la Marina* (SEMAR) : Marine nationale,
- *Sistema Nacional de Protección Civil* (SINAPROC) : Protection civile,
- *Petróleos Mexicanos* (PEMEX) : Entreprise historique d'hydrocarbures,
- *Comisión Federal de Electricidad* (CFE) : EDF historique mexicain,
- *Comisión Nacional de AGUA* (CONAGUA) : Commission nationale de l'eau.

Les 16 *Delegaciones* (arrondissements) de la ville de Mexico sont dotés par le gouvernement local d'un plan d'urgence scindé en 6 processus opérationnels (détection des dommages, etc.) et 3 processus de support (approvisionnement, etc.) qui seront détaillés en annexe. La Figure 10-2 illustre un site internet mis à disposition des équipes de secours par le CENAPRED (*Centro Nacional de Prevención de los Desastres*) où les bâtiments effondrés sont géoréférencés avec des photographies.



Figure 10.2 – Cartographie des bâtiments effondrés avec photographie (@CENAPRED)

Suite à un événement, les différentes agences se mobilisent pour réhabiliter en urgence les voies d'accès, les services de santé, les réseaux d'utilité publique (eau, énergie et télécommunications). Sont également considérés dans le plan l'éclairage public, les transports (routier, ferroviaire, aérien et maritime), les hôpitaux, les écoles, les logements, les bâtiments publics ainsi que toutes les autres installations stratégiques.

10.2 Déroulé de l'événement

Dès que le séisme s'est fait connaître ([SEGOB, 2017]),

- le Président de la République a enclenché le plan MX et déclaré qu'il mettrait en œuvre les 3 étapes suivantes :
 1. Subvenir en nourriture et médicaments, rétablir les services d'eau, de gaz et d'électricité.
 2. Recenser les constructions endommagées et détruire les bâtiments dangereux.
 3. Déblayer afin de permettre les opérations de reconstruction.
- Suite aux ordres du Président, la Direction Générale de la Protection Civile (DGPC) a mis en place un Comité National d'Urgence (CNU).
- Le CNU coordonne le soutien apporté aux états concernés par la catastrophe et assure le lien entre les autorités locales et les 6 grandes agences fédérales (voir § 10.1) :
 - Les 15 000 caméras vidéo de la ville de Mexico et alentours, dépendant du Centre de Commandement, de Contrôle Informatique, des Communications et du Citoyen sont mises à disposition de la Protection Civile.
 - Les secours sont envoyés dans les bâtiments effondrés afin de sauver le maximum de victimes des décombres.
 - Les diagnostics d'urgence sont initiés selon le processus mis en place par le gouvernement local de la ville de Mexico (voir Figure 10-3).
 1. Une demande est effectuée sur internet ou par téléphone.
 2. Une *brigada* (équipe) composée de *brigadistas* : ingénieur, architecte et Directeur Responsable d'Ouvrage (DRO), inspecte et délivre son diagnostic (voir § 11. Diagnostic d'urgence).
 3. Selon le diagnostic, des vérifications complémentaires doivent être réalisés.

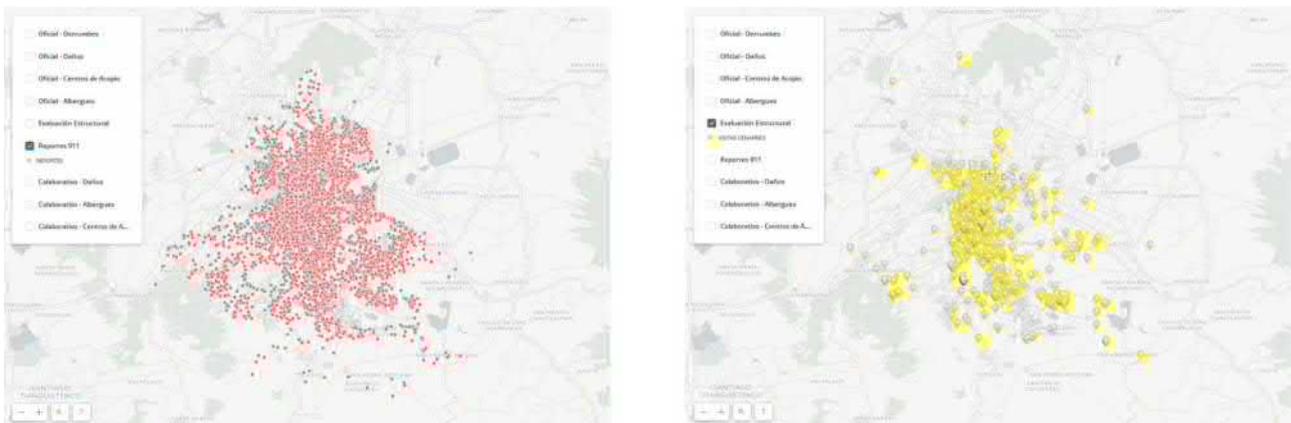


Figure 10.3 – Utilisation collaborative d'un site internet de la Protection Civile pour localiser les appels au 911 (point rouges, figure de gauche) et les diagnostics réalisés (points jaunes, figure de droite)

Deux jours après le séisme, 230 décès et 44 bâtiments effondrés sont recensés sur la ville de Mexico. Les services médicaux ont accueilli 1 372 blessés.

La *Comisión Federal de Electricidad* a indiqué que 92 % des 4,84 millions de personnes impactées par des coupures de courant avaient recouvré l'usage de l'électricité 24 heures après le séisme.

Cinq jours après le séisme, plus des deux-tiers des 11 200 demandes d'évaluation de bâtiments avaient été classées ainsi :

- 6 640 en "vert",
- 688 en "jaune",
- 321 en "rouge".

Au matin du 4 octobre, le coordinateur national de la Protection Civile déclarait que le corps de la dernière personne recherchée avait été retrouvé. Officiellement, 369 personnes ont perdu la vie suite aux conséquences directes du tremblement de terre, dont 228 dans la ville de Mexico, 74 dans l'état de Morelos, 45 dans l'état de Puebla, 15 dans l'état de Mexico, 6 dans l'état de Guerrero et 1 dans l'état de Oaxaca ([URESTE, 2017]).

10.3 Organisation opérationnelle

L'article 17 de la loi sur la protection civile régit les responsabilités locales de l'organisation de la protection civile (fonctionnement et financement). Concernant les tremblements de terre, les fonctionnaires de la Protection Civile travaillent en étroite collaboration avec les organisations suivantes :

- Le *Centro Nacional de Prevención de los Desastres* (CENAPRED) dont les activités les amènent à soutenir le SINAPROC (voir §10.1). En effet, le CENAPRED mène des actions de recherche, de formation, d'instrumentation (18 stations accélérographiques) et de diffusion sur les risques naturels et le risque sismique en particulier.
- Le *Centro de Instrumentación y Registro Sísmico* (CIRES) a développé le *Sistema de Alerta Sísmica* (SAS), débuté en 1991 et devenu service public en 1993. Le SAS relie historiquement la côte de l'Etat de Guerrero et la ville de Mexico en 50 s environ (on a enregistré jusqu'à 70 s). Deux types d'alerte sont émis en fonction de la gravité du séisme :
 - alerte préventive,
 - alerte publique pour les séisme de magnitude supérieure à M_w 6 en général.
- Le *Servicio Sismológico Nacional* (SSN) de l'UNAM possède une centaine de stations accélérométriques. L'*Instituto de Ingeniería* est capable de générer des cartes d'intensité en quelques minutes après l'occurrence d'un séisme grâce à ce réseau ainsi que d'outils numériques propres.



Figure 10.4 – Posters réalisés par le Servicio Sismológico Nacional (SSN) de l'UNAM

10.4 Principaux enseignements

Les responsables de la gestion de crise 2017 ont pu disposer d'outils qui n'existaient pas ni en 1985 ni en 1999.

Il faut noter à ce sujet la création en 2014 d'une coordination nationale et d'outils modernes de coordination des interventions.

Mais il faut noter également que des outils, qui n'étaient pas prévus initialement pour la gestion de crise (comme le recensement en temps réel des ventes/locations de biens immobiliers) ont été détournés de leurs objectif initiaux pour optimiser l'organisation des secours.

Et il ne faut pas négliger non plus la mobilisation immédiate de tous les volontaires qui se sont précipités pour les premiers secours, qui ont aidé pour les relogements ou qui ont participé aux opérations de diagnostics ultérieurs.

La leçon que l'on pourrait tirer de cette dernière expérience mexicaine, c'est à la fois une réponse organisationnelle structurée et une très grande mobilisation spontanée. Deux termes que l'on ne saurait séparer à Mexico. Deux volets qu'il serait souhaitable d'approfondir chez nous.

Références

[SEGOB, 2017] Secretaría de Gobernación (2017). Reporte de acciones de la Coordinación Nacional de Protección Civil, tras el sismo del 19 de septiembre. Mexico : GOB. <https://www.gob.mx/segob/prensa/reportes-de-acciones-de-la-coordinacion-nacional-de-proteccion-civil-tras-el-sismo-del-19-de-septiembre> (consultation janvier 2018).

[URESTE, 2017] Ureste M., Aroche A. (2017). Lo que el #19S nos dejó: las víctimas, daños y damnificados en México. Mexico : Animal Político. <http://www.animalpolitico.com/2017/10/cifras-oficiales-sismo-19s/> (consultation janvier 2018).

11 Diagnostics d'urgence

Après un séisme important, les opérations de diagnostic d'urgence du bâti sont essentielles. Celles-ci ont pour vocation de permettre la classification rapide des ouvrages en catégories simples (utilisable, accès temporaire possible sous contrôle, accès interdit). Il s'agit alors pour les usagers d'éviter la prise de risque et pour les autorités de mieux maîtriser la gestion des structures opérationnelles et d'urgences. Ce type de diagnostic doit démarrer au plus tôt après l'événement.

Les éléments de cette partie sont issus des échanges que nous avons eus avec des responsables de la Sécurité Civile de la ville de Puebla, la Maison de l'Architecture de Mexico, l'ambassade de France à Mexico, l'Agence France Presse, ainsi que des témoignages de citoyens.

11.1 Organisation des diagnostics

Dans la ville de Mexico, c'est plutôt la sécurité civile qui a pris en charge les opérations de diagnostics d'urgence des bâtiments publics. En ce qui concerne les diagnostics des constructions d'habitations privées, en l'absence d'un dispositif initial spécifique, ils ont été conduits, lorsque tel a été le cas, de deux manières :

En premier lieu, de nombreux diagnostics ont été réalisés, à la demande de propriétaires ou de locataires, par des ingénieurs indépendants, théoriquement formés et accrédités pour ce type d'intervention. Ces interventions étaient réalisées sous forme de prestations facturées. Ce fonctionnement a conduit dans certains cas à ce que plusieurs diagnostics soient effectués sur un même ouvrage, avec parfois des conclusions contradictoires. Il est également à noter qu'une grande disparité des tarifications a visiblement été pratiquée, puisque les tarifs dont nous avons eu connaissance allaient de 100 à 5000 euros. Certes pour des bâtiments différents, mais les disparités ont été telles que le 23 septembre 2017 le gouvernement a décidé de fixer un tarif maximum pour le diagnostic des écoles.

En second lieu, et devant le nombre de bâtiments à inspecter, l'ordre des architectes de Mexico a pris l'initiative d'organiser une mission de diagnostic d'urgence du bâti privatif. La stratégie mise en œuvre était de former de manière rapide un maximum de volontaires et de répondre aux demandes des particuliers contactant l'organisme. Des formations accélérées d'inspecteurs ont donc été dispensées, afin de créer des binômes comprenant un "sachant expérimenté" et un volontaire (élève en école d'architecture). Ces séances, qui se déroulaient en 1 heure dans la rue ont permis de former 7000 volontaires et de pratiquer gratuitement environ 14 000 diagnostics.



Figure 11.1 – Formation des volontaires à la Casa del Arquitecto de Mexico

Dans la ville de Puebla, proche de l'épicentre, la réalisation des diagnostics d'urgence, y compris sur le bâti privé et historique, a été menée par la sécurité civile locale. Une organisation différente est donc observée entre ces deux capitales d'états différents.

11.2 Nature et méthodologie des évaluations

Plusieurs fiches de diagnostic dites "Dictamen" ont pu être consultées. Ces fiches sont parfois propres aux bureaux d'études ayant réalisé le diagnostic, ou sont parfois estampillées "protection civil" (Figure 11.3). Toutes présentent une structure très proche, permettant la réalisation d'un diagnostic harmonisé de manière rapide, dont les étapes sont présentées ci-dessous.

Etape 1 : Emplacement et description du bâtiment.

Cette partie précise l'adresse, la localisation du bâtiment, son usage et si l'inspection est externe ou externe et interne.

Etape 2 : Etat du bâtiment

Cette partie vise à identifier la présence de dégâts liés à la structure de l'ouvrage, ses réseaux et ses fondations. Les critères principaux sont répertoriés dans le tableau suivant. A chacun de ces points est associée une mention précisant son observation, son absence, ou l'existence d'un doute.

Tableau 11-1 : Critères d'évaluation de l'état du bâtiment

| | Oui | Non | Doute |
|---|-----|-----|-------|
| a. Effondrement total | | | |
| b. Effondrement partiel | | | |
| c. Construction dissociée de sa fondation | | | |
| d. Tassement différentiel ou conséquent | | | |
| e. Inclinaison du bâtiment ou d'un étage | | | |
| f. Dommages aux éléments structuraux (poteaux, poutres, murs) | | | |
| g. Dommages graves aux éléments non structuraux | | | |
| h. Dommages dans les installations électriques | | | |
| i. Dommages dans les installations de plomberie | | | |
| j. Dommages dans les installations à gaz | | | |
| k. Fissuration ou mouvement du sol | | | |
| l. Glissement ou rupture de terrain | | | |
| m. Parapets, balcons ou autres objets en danger de chute | | | |
| n. Autres dangers (rupture de canalisations, déversements toxiques etc ...) | | | |

Etape 3 : Classification globale

La classification du bâtiment est réalisée selon quatre catégories, en fonction des réponses positives répertoriées à l'étape précédente. Il peut être noté que la notion de risque est clairement associée au diagnostic porté.

- Aucune réponse affirmative : Edifice ou zone sûre / risque faible
- Au moins une réponse positive aux critères "a" à "f" : Edifice peu sûr / risque élevé
- Au moins une réponse positive aux critères "g" à "n" : Zone peu sûre/ risque élevé
- En cas de doutes : Sécurité incertaine

Etape 4 : Recommandations

Cette dernière partie précise si le bâtiment nécessite ou non une inspection détaillée et si des moyens de déblaiement ou une intervention spécialisée sont nécessaires (protection civile, service de l'eau, de la construction, ...)

Une zone de commentaire est également disponible et reçoit le verdict du Dictamen.

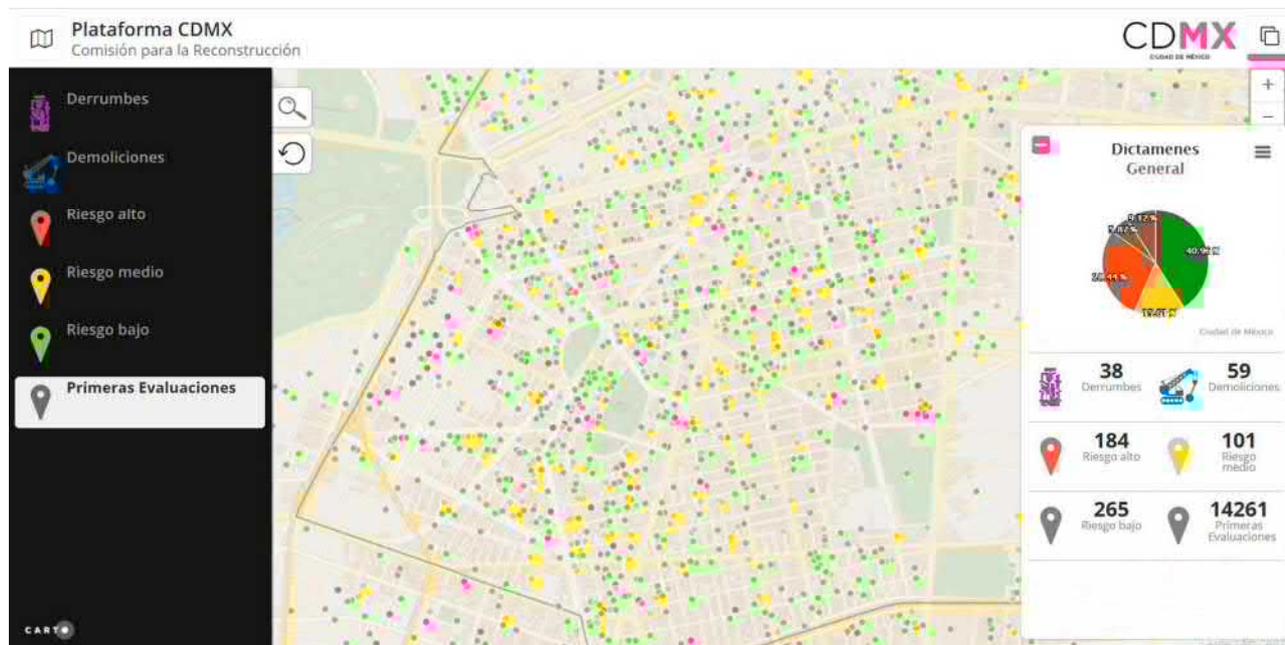


Figure 11.2 – Carte dynamique de localisation des désordres – issue des Dictamens (source : www.plataforma.cdmx.gob.mx/comision)

La classification des bâtiments diagnostiqués a été ensuite mise en ligne sur une carte interactive du site de la ville de Mexico (Figure 11.2). Il est à noter que cette carte provenait d'une utilisation alternative d'un logiciel destiné à évaluer la valeur des biens immobiliers.

**Forma de Inspección Post sísmica
Evaluación Rápida**

Ticket No. _____

Nombre del Evaluador Técnico: _____
Profesión: _____
Fecha: _____

1. Ubicación y Descripción de la Edificación.

Zonificación propuesta de la ciudad para efectuar la evaluación: _____
Dirección: _____
Colonia: _____ Delegación: _____
CP: _____ Entre que calles / Referencia: _____
Coordenadas geográficas: _____
Persona contactada: _____ Teléfono: _____

Uso del Inmueble:

Casa habitación Departamentos Comercios Oficinas públicas
Oficinas privadas Industrias Estacionamiento Bodegas
Educación Recreativo Centro de reunión
Otro: _____

Número de niveles sobre el terreno (incluyendo azotea y mezanines): _____

Número de sótanos: _____

Número de ocupantes: _____

Tipo de inspección: Inspección exterior únicamente Inspección interior y exterior

2. Estado de la Edificación.

| | Sí | No | Existen Dudas |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| a.- Derrumbe total | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b.- Derrumbe parcial | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c.- Edificación separada de su cimentación | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d.- Asentamiento diferencial o hundimiento | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e.- Inclinación notoria de la edificación o de algún entrepiso | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f.- Daños en elementos estructurales (columnas, vigas, muros) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g.- Daño severo en elementos no estructurales | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| h.- Daños en instalaciones eléctricas | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| i.- Daños en instalaciones hidrosanitarias | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Página 1 de 2

| | Sí | No | Existen Dudas |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| j.- Daños en instalaciones de gas | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| k.- Grietas, movimiento del suelo | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| l.- Deslizamiento de talud o corte | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| m.- Pielres, balcones u otros objetos en peligro de caer | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| n.- Otros peligros (líneas o ductos rotos, derrames tóxicos, etc.) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

3. Clasificación Global.

Una vez evaluado el Estado de la Edificación, de no encontrarse alguna respuesta afirmativa, el inmueble se calificará como **Edificación/Área Segura o de Riesgo Bajo**. En caso de encontrarse una respuesta afirmativa en cualquiera de los incisos "a" al "f", se clasificará como **Edificación Insegura o de Riesgo Alto**. En caso de encontrarse una respuesta afirmativa en cualquiera de los incisos "g" al "n", se clasificará como **Área Insegura o de Riesgo Alto**. De existir dudas, se señalará **Seguridad Incierta**.

Edificación u/o Área Segura Riesgo Bajo **Edificación u/o Área Insegura Riesgo Alto** **Seguridad Incierta**

4. Recomendaciones.

| | Sí | No | Sí | No |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| No requiere revisión futura | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Es necesaria evaluación detallada | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SACMEX | <input type="checkbox"/> |
| Apuntalar | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SSP (ERUM o CONDORES) | <input type="checkbox"/> |
| Maquinaria para remover escombros | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | SOBSE | <input type="checkbox"/> |
| Protección Civil | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Central de Fugas | <input type="checkbox"/> |

Observaciones: _____

Firma: _____

Página 2 de 2

Figure 11.3 – Fiche de Dictamen diffusée par la protection civile de Mexico

11.3 Principaux enseignements

A Mexico, l'absence d'organisation des opérations de diagnostic d'urgence du bâti privé (bureau et habitation) conduit à une situation complexe pour leurs occupants. L'absence d'interlocuteur identifié conduit à ne pas savoir vers qui se tourner pour obtenir un diagnostic de confiance. L'absence de cadre offre la possibilité d'une marchandisation des diagnostics. De plus, la monétisation de ces diagnostics n'est sûrement pas étrangère à ce que dans certain cas, des résultats d'un diagnostic commandé par un propriétaire puissent être contradictoires avec celui commandé par les locataires ; facteur certainement amplifié par l'absence d'obligation d'assurance des habitations.

Pour éviter cette situation potentiellement dangereuse et stressante pour une population déjà impactée, il est nécessaire que ce type de diagnostic soit :

- organisé en amont des événements, dans le cadre de la gestion de crise
- appuyé par un nombre suffisant d'inspecteurs, identifiés comme tel et préalablement formés
- piloté par une entité unique et indépendante
- effectué selon une méthodologie unique
- connu de la population et gratuit

Devant la nécessité du grand nombre d'inspections à réaliser lors de cet évènement, il est intéressant de noter l'efficacité du dispositif spontané et la forte participation de volontaires pour y contribuer. En situation dégradé, lorsque le nombre d'inspecteurs est limité, des sachants sont devenus en urgence "formateurs de diagnostiqueurs d'urgence" avec un résultat tout à fait impressionnant. La préparation à ce type de formation express pourrait également faire partie des dispositions contenues dans les missions confiées aux équipes de diagnostic d'urgence.

12 Système d'information géographique

Les systèmes d'information géographique (SIG) permettent de représenter, confronter, analyser et interpréter des données géoréférencées. Ils sont devenus au cours des dernières années un outil performant pour l'ensemble des corps de métier utilisant des données cartographiques. Dans ce chapitre nous mettons en avant leur utilisation par la ville de Mexico dans la gestion de crise, ainsi que son intérêt pour une restitution optimisée des données cartographiques acquises au cours de la mission AFPS.

12.1 Cartographie dynamique

Un bon exemple de l'utilisation des systèmes d'information géographique dans la gestion de crise suite à un séisme concerne le diagnostic d'urgence. Juste après le séisme du 19 septembre 2017, la Casa del Arquitecto a en effet détourné un logiciel de vente de biens immobiliers pour effectuer le suivi, quasi en temps réel, des diagnostics d'urgence.

Par la suite, le suivi des diagnostics sera repris sur la plateforme de la CDMX, la Ciudad de México. Sur cette plateforme accessible en ligne et ouverte à tous, une cartographie dynamique, avec mise à jour quotidienne, permettait d'observer sur fond de carte OSM (Open Street Map) les bâtiments inspectés ainsi que la conclusion des diagnostics : bâtiment écroulé, bâtiment à démolir, bâtiment présentant un risque élevé, moyen ou faible (rouge, jaune ou vert). Le nombre total de bâtiments inspectés était également indiqué.



Figure 12-1 – Copie d'écran du site <https://plataforma.cdmx.gob.mx/>

Cet outil ouvert a été largement utilisé au cours de la mission afin de cibler certaines visites de terrain. Dans l'ensemble, les informations disponibles en ligne étaient cohérentes avec les observations faites sur le terrain, ce qui traduit une utilisation de qualité du SIG dans le contexte d'un séisme.

En France, une interface telle que les cartes interactives du portail internet GeoRisques, pourrait, si ce n'est pas déjà prévu par ailleurs, constituer le cœur d'un système cartographique de gestion de crise en cas de séisme fort, mais également à la suite de n'importe quel aléa naturel.

12.2 Restitution cartographique de la mission

La mission post sismique, dans une ville aussi étendue que Mexico, a nécessité de nombreux déplacements afin de réaliser un maximum d'observations et de mesures. Il a été décidé de procéder à une sauvegarde des données de la mission sous forme de données SIG. Les principales informations contenues dans le SIG sont :

- les fonds de carte OSM de la ville (routes, bâtiments, cours d'eau...),
- la trace GPS d'une balise SPOT emportée par la mission avec un point automatique toutes les 10 minutes et des points complémentaires déclenchés manuellement,
- les localisations précises des mesures H/V et l'information sur les résultats associées à chaque point de mesure,
- les photos de la mission (aujourd'hui, les téléphones portables permettent de prendre des photos géolocalisées. Les informations de localisation peuvent être récupérées afin d'intégrer les photos dans le SIG. D'autre part, lors de la mission deux appareils photos équipés d'un GPS ont été utilisés).

Les fichiers sont fournis sous forme de fichiers "shapefile" qui sont des fichiers de forme géoréférencés utilisables avec l'ensemble des logiciels SIG disponibles. Ce sous-produit de la mission présente le double intérêt de regrouper au même endroit l'ensemble des informations acquises lors de la mission et de constituer un rendu numérique utilisable et interrogeable *a posteriori*. En fournissant directement l'information sur la localisation géographique des observations, ce type de données pourrait faciliter *in fine* d'éventuelles nouvelles missions post-sismiques à Mexico.

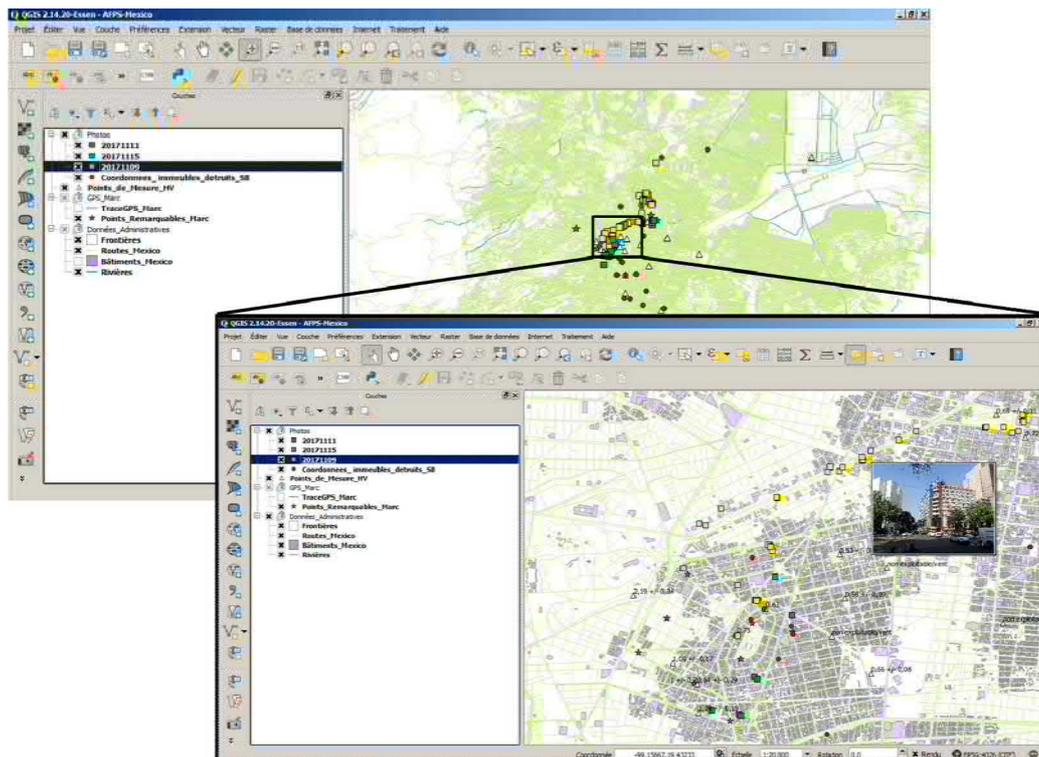


Figure 12-2 - Données shapfiles de la mission représentées dans le logiciel QGIS. En haut une vue d'ensemble des déplacements dans la ville de Mexico. En bas un zoom montrant le caractère interrogeable des couches avec l'affichage des photos associées aux points de prises de vue et les valeurs des mesures H/V.

12.3 Principaux enseignements

La mission a pu constater que les outils cartographiques actuels, et les SIG en particulier, pouvaient représenter un apport significatif en période de gestion de crise. Elle a pu apprécier aussi le caractère très ouvert et accessible de la plateforme de la ville de Mexico.

Elle ne peut que recommander de préparer en France de telles approches et de développer les outils nécessaires.

13 Le séisme vu à travers les médias

13.1 Revue de presse locale

"Comme toujours, Solidarité" a titré *La Jornada* le lendemain du séisme du 19 septembre 2017.

Les 19 et 20 septembre, la télévision, la radio, la presse écrite et digitale donnaient les premières informations sur le tremblement de terre, en parlant tout particulièrement des dégâts et des victimes. Dans le même temps, la presse diffusait des informations utiles pour l'organisation des secours (adresses des abris, recommandations à la population, actions gouvernementales, sauvetage, bénévolat, etc.).

Le 21 septembre, à la une des journaux, les récits des actions acharnées des sauveteurs côtoyaient les pronostics sur l'ampleur des dégâts. Une dizaine de jours après le tremblement de terre, le soufflé commençait à retomber et d'autres informations prenaient le devant de la scène. Ainsi 13 jours après, le 2 octobre, le référendum en Catalogne faisait la une et les informations sur les travaux de reconstruction passaient au second plan.



Figure 13.1 – Unes du journal *La Jornada* à J+1 (gauche) et J+13 (droite)

Il faut aussi signaler le rôle particulier joué par les réseaux sociaux dans la diffusion de l'information. L'organisation des secours a, par exemple, bénéficié de la rapidité de transmission d'informations massives en provenance des réseaux sociaux. Mais les amateurs de sensationnel ont également pu y trouver leur compte. Vérifiées ou non, les informations et les rumeurs se sont répandues à grande vitesse. Pour le meilleur ou pour le pire ? Il est difficile de trancher.

13.2 Couverture de l'événement par les correspondants français

Lorsque l'on fait une recherche sur un moteur de recherche, avec les termes "séisme Mexique 2017", les résultats qui sortent en premier sont les sites Internet d'organismes de presse (télévision, radio, presse écrite...). Il faut attendre la fin de la seconde page de résultats pour que le site de l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) apparaisse pour fournir une information scientifique, qualitative, sur le tremblement de terre. La majorité de l'information directement accessible à distance provient donc des médias, que ce soit par les voies traditionnelles (TV, radio, presse) ou par Internet. Afin de comprendre comment, en situation dégradée, cette information a été récoltée, transcrite puis diffusée en France, nous avons rencontré le directeur de l'Agence France Presse (AFP) à Mexico, ainsi qu'une journaliste indépendante travaillant à Mexico.

- La sécurisation et l'opérationnalité en situation dégradée

Le siège de l'AFP Mexico est situé dans le quartier Roma, un de ceux qui a été le plus affecté lors du séisme. Le bâtiment, une maison de 2 étages, a donc été fortement secoué lors du séisme mais a bien résisté. L'ensemble du personnel est sorti rapidement suite aux premières secousses, pour se réfugier sur une place du quartier, à l'endroit identifié dans la procédure d'évacuation mise en place par l'agence. Pour les journalistes, comme pour tous les habitants, l'enjeu premier est naturellement d'assurer leur sécurité lors de l'évènement sismique.

Dans la foulée, la nécessité consiste à rester opérationnel pour être en mesure de couvrir l'évènement et de transmettre l'information. Dans ce but, l'AFP disposait d'un plan d'urgence, comprenant des moyens logistiques mobiles (valises satellite, groupes électrogènes...) et plusieurs possibilités de localisations pré-identifiées pour constituer le QG de crise.

- La récolte de l'information

La récolte de l'information s'effectue de manière multiple. Une part provient des constatations effectuées sur sites. De ce point de vue, une première difficulté réside dans la désorganisation de la ville, le blocage des voies de circulation et la coupure des transports en commun ; ce qui a nécessité de recourir à des chauffeurs-livreurs en moto pour se rendre sur les sites touchés par le séisme. La seconde difficulté est de recueillir l'information alors que l'urgence, la panique, le désarroi sont présents, et que la présence d'observateurs peut être une source de tensions.

Sur le plan des informations techniques liées aux caractéristiques du séisme et aux bilans, la source principale est essentiellement issue des médias locaux. Les interventions du responsable de la protection civile sont également suivies avec intérêt car elles constituent le vecteur officiel de la communication des autorités.

- La transmission et la diffusion de l'information

La transmission vers la France de ces informations, via des images et vidéos par exemple s'est faite, dans les premiers instants ayant suivi le séisme, via l'application *what's app*, quand seul le réseau mobile Internet fonctionnait. Le contenu journalistique produit est proposé aux médias français, qui opèrent donc sur celui-là une sélection visant à choisir les sujets s'inscrivant dans leur ligne éditoriale.

Sans verser dans le sensationnalisme, mais pour refléter la réalité d'un drame humain où près de 300 personnes ont perdu la vie, les premières images apparues sur nos écrans en France concernant le séisme du 19 septembre 2017, montraient des décombres et des secours à la recherche de survivants. Le traitement médiatique français de cet événement a quant à lui été relativement court, de l'ordre de deux ou trois jours.

- La perception depuis la France

Bien que les informations liées au séisme n'aient été diffusées que quelques jours, et sans que la place consacrée soit démesurée, les images diffusées se concentraient sur les destructions de la quarantaine de bâtiments écroulés. Cela donnait l'impression d'une ville où les destructions étaient très importantes. Au sein même de notre mission, nous avons été frappés du décalage que nous ressentions entre ce que nous nous attendions à observer sur place et ce que nous avons pu constater en terme d'ampleur des dégâts. A l'échelle d'une ville de la taille de Mexico, le bilan, bien que dramatique, est resté limité. Afin de montrer qu'une majorité de la ville de Mexico était encore debout, l'AFP a d'ailleurs réalisé, un mois après le séisme, un survol vidéo en drone de Mexico. Les images n'ont trouvé qu'un seul preneur parmi les médias français.



Figure 13.2 – Images BFM TV (gauche) et Le Monde, édition du 20 septembre 2017, p.6 (droite)

13.3 Principaux enseignements

Lors de notre mission, nous avons pu constater que comme souvent en cas de crise les médias pouvaient être très réactifs et très efficaces. Nous avons pu aussi constater que l'information passait vite. Treize jours après le séisme, le sujet ne faisait plus la une à Mexico.

Nous avons pu aussi vérifier que comme souvent en cas de crise, il y avait un très fort "effet loupe" des médias. Ceux-ci se focalisant principalement sur les aspects dramatiques ou spectaculaires, la vision à distance est souvent très faussée.

Mais comme enseignement principal, nous ne pouvons que recommander de poursuivre les échanges que nous avons pu avoir avec les équipes de journalistes à Mexico. En effet, dans un sens pour une équipe scientifique, il est important d'appréhender la difficulté pour les médias d'exercer leur travail en temps de crise. Et dans l'autre sens les journalistes sont ouverts aux apports scientifiques qui peuvent les aider à approfondir leurs informations.

14 Architecture

14.1 L'architecture mexicaine contemporaine

L'architecture mexicaine contemporaine est connue et appréciée dans le monde entier. Son représentant le plus célèbre est Luis Barragán (1902-1988). Distingué en 1980 par le Pritzker Prize (la plus haute distinction mondiale dans le domaine de l'architecture) il est considéré comme l'équivalent de Le Corbusier et sa Maison-atelier de Mexico est classée au patrimoine mondial de l'humanité.

En France, la Fondation Electra a consacré en 2003 une exposition à l'architecture mexicaine dont le titre était tout un programme : "Les Bâisseurs de lumière". Dans le catalogue, on apprenait que *"Le Mexique compte aujourd'hui 140 écoles d'architecture dont 18 dans la seule vallée de Mexico, soit 60.000 étudiants, plus qu'aux États-Unis !"*.

Tout le propos de l'exposition se positionnait dans "l'après-Barragán", autour de trois générations d'architectes plus ou moins influencées par ce père fondateur du modernisme mexicain. Le commissaire y distinguait trois mouvements : *"l'expressionnisme"* qui recourt à la plasticité du béton, *"la métaphysique de la couleur"* qui s'inspire de l'oeuvre du maître et de la tradition coloniale, enfin *"l'internationalisme"* qui fait la part belle aux structures légères en acier et verre.

C'est avec ces références en tête que nous avons abordé cette mission au Mexique, et nous avons été particulièrement frappés de rencontrer à Puebla les responsables de la Protection Civile dans un beau bâtiment très coloré. Il s'agissait du Centre de Convention William O. Jenkins.



Figure 14.1 – Le Centre de Convention William O. Jenkins à Puebla

Ouvert depuis 1998 et terminé en 2009, ce complexe de 33 000 m² construit par l'architecte Javier Sordo Madaleno amalgame d'anciennes usines textiles aux noms très poétiques de La Guia, La Esperanza, La Mascota et La Pastora (le guide, l'espérance, la mascotte et la bergère), des bâtiments historiques et des constructions très contemporaines. Dans sa notice de présentation le Centre indique que le projet a sauvé des bâtiments d'intérêt historique et artistique, avec un équilibre parfait entre le culturel et le commercial, entre le moderne et l'ancien.

A cette description on peut rajouter que l'ensemble bien que constitué de structures très hétérogènes dispose de qualités parasismiques remarquables : non seulement les structures se sont bien comportées pendant le séisme et n'ont pas été endommagées, mais le centre était parfaitement opérationnel lorsque nous l'avons visité, la Protection Civile y officiait et son "Centro de Analisis" était en pleine activité.

Avec cet exemple, on peut admettre que le Génie du parasismique et la Muse de l'architecture peuvent parfois faire bon ménage, au Mexique du moins⁶.

⁶ Dans d'autres missions AFPS nous avons déjà pu faire ce type de constatation. Par exemple en Colombie, nous avons remarqué qu'à Armenia, la Mairie dévastée et inutilisable après le séisme du 25 janvier 1999 s'était réfugiée dans le Musée du Quindío, un très beau bâtiment construit par Rogelio Salmons, le plus célèbre architecte Colombien, un architecte qui avait fréquenté l'atelier de Le Corbusier en France.

En Inde aussi, à Ahmedabad après le séisme du Bhuj du 21 janvier 2001, nous avons pu visiter le Gandhi Labour Institute absolument intact. Ce bâtiment avait été construit par Balkrishna Doshi, un architecte indien renommé qui lui aussi avait fréquenté l'atelier de Le Corbusier en France. Toujours dans cette mission en Inde, l'architecte Shah Snehal qui travaillait avec Mario Botta sur un très gros projet pour le groupe Tata, nous expliquera, en nous faisant visiter ses bureaux absolument impeccables après le séisme, que les cinquante immeubles qui s'étaient totalement effondrés à Ahmedabad était "une architecture de promoteur" et pas "une architecture d'architecte". La mission 2017 au Mexique peut sans doute nous conforter dans cette idée sur les bienfaits parasismiques de "l'architecture d'architecte".

14.2 Esthétique parasismique

Lorsqu'on regarde l'évolution de l'architecture contemporaine à Mexico depuis une cinquantaine d'année, on est frappé de voir peu à peu l'émergence d'une esthétique dont l'inspiration semble d'origine nettement parasismique.

Ce fait est très visible le long du Paseo de la Reforma, la grande avenue de Mexico qui se développe sur 14,7 km. Créé au XIX^{ème} siècle sur ordre de Maximilien I^{er} cette avenue peut retracer toute l'histoire de l'architecture de la fin du XX^{ème} siècle jusqu'au début du XXI^{ème}. On y trouve en effet presque tous les styles de cette période.

Après des bâtiments plutôt "art déco", c'est le "style international" qui va s'imposer. Un style assez opaque de boîtes parfaites, souvent avec des murs rideaux lisses et peu d'expression. Pour lutter contre le côté impersonnel du "style international" dans les années 1990, la vague du "postmodernisme" se voudra plus complexe et plus décalée.

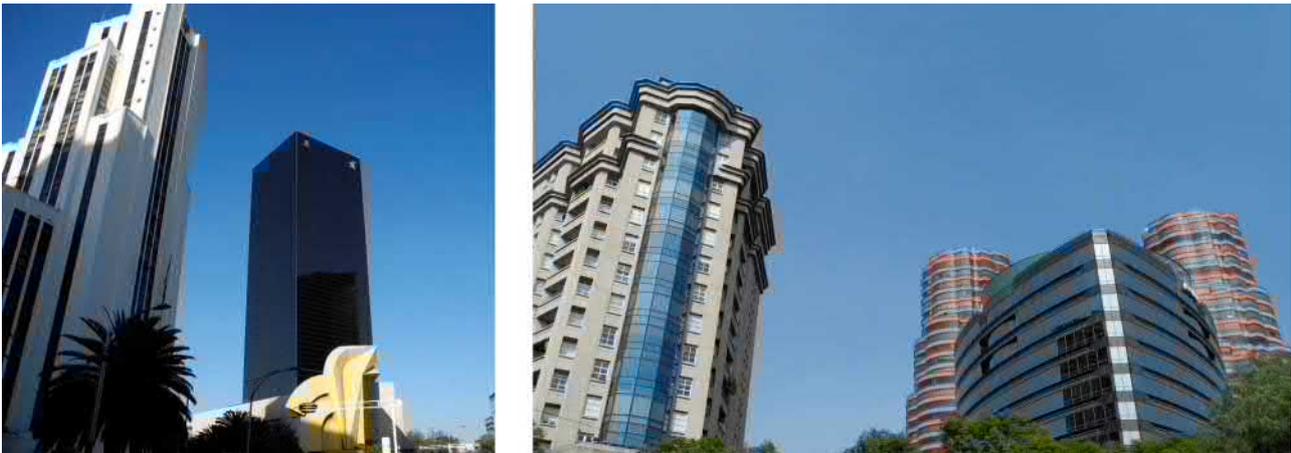


Figure 14.2 – Mexico l'évolution des styles

A Mexico un bâtiment illustrera cette tendance : il s'agit du building de la CFE, la *Comisión Federal de Electricidad*, un bâtiment que l'on trouve souvent publié sur le thème du "triomphe du postmodernisme".

Mais on pourrait lui accoler comme sous-titre le "triomphe du design parasismique". En effet, au Mexique qui est un pays fédéral il n'existe pas de règlement parasismique national, chaque état élaborant le sien. Mais il existe toutefois un manuel, le "*Manual de diseño de obras civiles - diseño por sismo*" édité par la CFE.

Et on doit noter en hommage aux rédacteurs de ce manuel que le building de la CFE, qui n'est pas spécialement simple ni régulier mais dont les ossatures rouges sont puissamment charpentées, s'est parfaitement comporté lors du dernier séisme.



Figure 14.3 – Le building de la CFE, la *Comisión Federal de Electricidad*

Après le séisme de 1985, beaucoup de bâtiments vont être confortés avec des éléments métalliques très visibles et très expressifs en façade. A l'origine ces renforcements réalisés sans doute dans l'urgence n'étaient peut être pas destinés à durer, mais ils se sont pérennisés et finalement ils ont donné aux bâtiments un caractère de stabilité et de force assez marqué.

Nous avons pu noter cet effet sur le bâtiment de l'IFAL, l'Institut Français d'Amérique Latine, où les croix de Saint André, nettement visibles sur toutes les faces du bâtiment sont plutôt rassurantes.



Figure 14.4 – Confortements parasismiques réalisés sur des immeubles existants après 1985

Dans les bâtiments nouveaux, on va voir des éléments de contreventement apparaître en façade. Au début ils seront esquissés derrière les façades vitrées, un peu comme un strip-tease où on dévoile ses dessous un peu mais pas trop.



Figure 14.5 – Transparence et contreventements

Puis ils vont devenir de plus en plus affirmés et sur les bâtiments les plus récents ils deviennent quasiment des manifestes esthétiques : "je résiste au séisme et je vous le dis !".



Figure 14.6 – Des contreventements visuellement affirmés sur des immeubles récents

A ce sujet, on peut s'arrêter un peu sur la Torre Reforma. Achèvement en 2015, cette tour de 57 étages et 246 m de haut, aura été pendant une année la plus haute tour du Mexique⁷. Construite par l'architecte Benjamin Romano et le bureau d'étude Arup, elle se flatte dans sa plaquette de présentation d'être un des rares bâtiments d'Amérique latine à ne pas avoir de colonne et d'avoir "un design et une structure qui combine le talent national avec la meilleure technologie mondiale".

⁷ En mai 2016 elle sera battue par la Torre KOI de 279 m construite dans la banlieue de Monterrey.

Dans sa plaquette, on apprend aussi que le bureau d'étude Arup a fait des analyses sismiques de pointe en prenant en compte un séisme d'une période de retour de 2500 ans, une valeur bien au delà des exigences du code en vigueur. En 2017, le bâtiment s'est très bien comporté et il était parfaitement opérationnel lorsque nous l'avons visité.

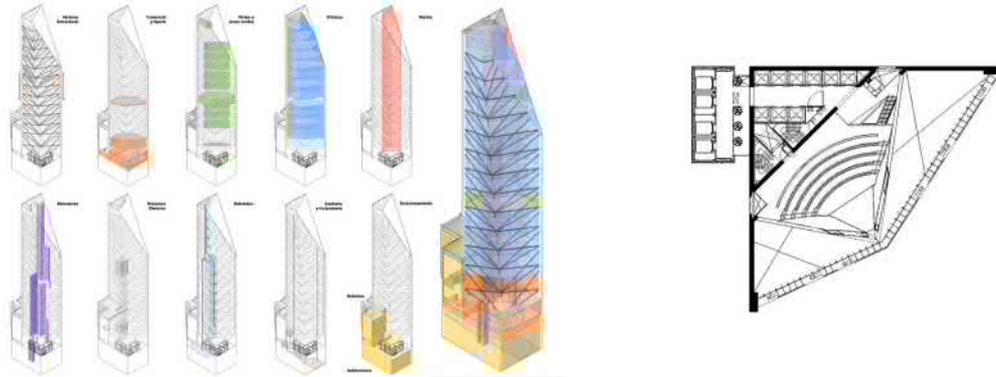


Figure 14.7 – La Torre Reforma schémas de principe et plan du niveau 24 (© torrereforma.com)

Sa structure est assez spécifique. Elle est basée sur deux voiles bétons principaux en équerre et des planchers suspendus par l'intermédiaires de tirants en façade. Les voiles en béton ont nécessité des fondations "très" spéciales : des parois moulées de forte épaisseur (1.20 m) descendues jusqu'à 60 m de profondeur, réalisées par Cimesa, la filiale Mexicaine de Soletanche Bachy.

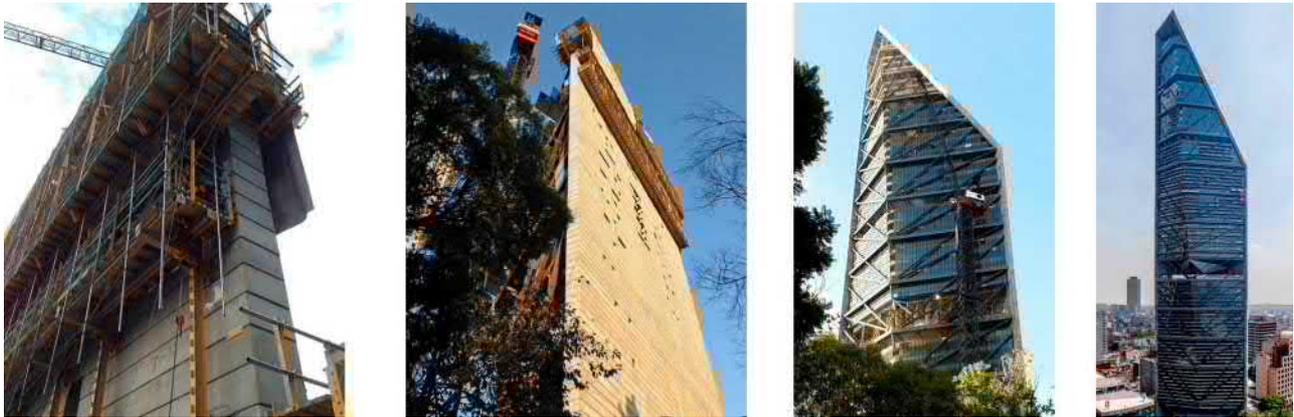


Figure 14.8 – La Torre Reforma photos du chantier (© curbed.com)

Comme une forme en équerre est sensible à la torsion, les efforts correspondants sont repris pas les tirants en façade et au rez de chaussée, les forces convergent sur un assemblage spectaculaire. Pour renforcer la dramaturgie de ces forces concourantes, dans le hall un plancher vitré permet de contempler ce nœud principal. La théâtralisation de ce point est encore renforcée par le plafond vitré du restaurant en sous-sol d'où on peut ainsi admirer l'ouvrage sous toutes ses coutures. Et en le contemplant on ne peut que regretter de ne pas avoir été présent le jour du séisme pour voir jouer le mécanisme.

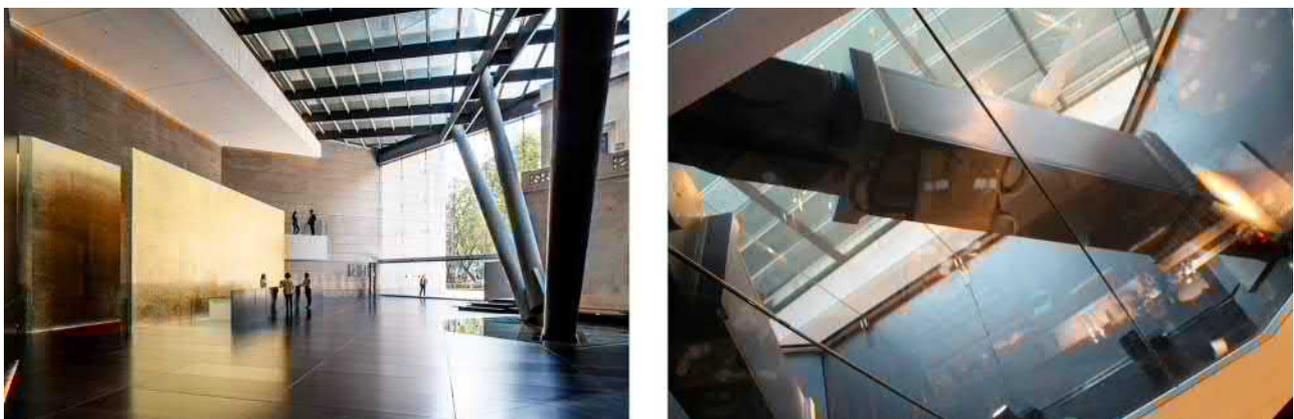


Figure 14.9 – La Torre Reforma vue du hall (© torrereforma.com), plafond vitré du restaurant en sous-sol

14.3 La responsabilité de l'architecte

Dans le cadre de la mission, nous avons pu constater que les bâtiments récents, construits depuis 1985 s'étaient bien comportés à quelques exceptions près. Malheureusement dans ces exceptions, il y a eu un effondrement particulièrement dramatique qui a touché une école et qui a été très médiatisé.

On peut rappeler les faits. Le mardi 19 septembre 2017 à 11 h, comme tous les 19 septembre depuis 1985, a lieu le "simulacro" (l'exercice post-sismique) dans l'école Enrique Rebsamen. L'exercice se déroule normalement mais à 13 h14 un "vrai" séisme se produit et sous les yeux médusés des parents présents une partie de l'école s'effondre totalement. Comme souvent maintenant dans notre époque hyper-moderne des gens filment avec des téléphones portables et les images se retrouvent rapidement sur les réseaux sociaux. Beaucoup de monde se précipite spontanément pour participer aux secours qui dureront plusieurs jours dans un contexte effroyable, les photos en témoignent, mais malheureusement 19 enfants de 6 à 13 ans et 7 adultes périront dans ce désastre.



Figure 14.10 – Opération de secours à l'école Enrique Rebsamen (©AFP / Mario Vazquez)

Bien sûr, il ne nous appartient pas de porter un jugement sur ce drame ni de fixer des responsabilités, la justice est saisie, les expertises seront longues et douloureuses. Mais un point nous a particulièrement frappé. Dans la presse, on a mis en cause la direction de l'école qui aurait fait une surélévation du bâtiment effondré, on a donné les noms des ingénieurs qui auraient signé en 2010 et 2014 des avis favorables (des "dictamen"), mais on n'a jamais cité le nom des architectes qui auraient construit, agrandi ou surélevé ce bâtiment. En France, si un terminal d'aéroport s'effondrait à Roissy, ou si un balcon tombait à Issy les Moulineaux, la presse très rapidement citerait le nom des architectes.



Figure 14.11 – L'école Enrique Rebsamen avant et après (images internet)

Il est évident qu'il y a eu des erreurs, des manques, des oublis de la part des constructeurs mais avec un effondrement aussi total, il est manifeste que ce bâtiment manquait cruellement d'un minimum d'éléments de stabilité aux efforts horizontaux. Par delà les responsabilités juridiques, la leçon que l'on pourrait tirer de ce drame est plutôt à destination de tous les architectes. Étymologiquement, l'architecte est "l'archos-tectos", le chef des constructeurs (comme l'archange est le chef des anges, et l'archevêque le chef des évêques). C'est donc à lui que revient au final la responsabilité terrible et magnifique de penser les projets pour qu'ils puissent résister à des efforts horizontaux et de prévoir les éléments de stabilité nécessaires pour que ses bâtiments ne s'effondrent pas totalement comme des châteaux de cartes.

14.4 La formation des architectes au Mexique

Le problème de la responsabilité des architectes pose le problème de leur formation. Sur ce sujet, nous avons eu l'occasion d'échanger avec un jeune architecte du patrimoine français qui a fini ses études à la "Facultad de Arquitectura" de l'UNAM à Mexico. Il nous expliqua qu'à l'UNAM il n'y avait pas de formation spécifique parasismique mais que la problématique sismique était omniprésente pendant toutes les études.

En fait le génie parasismique est totalement intégré à l'enseignement, tout particulièrement dans les modules obligatoires "sistemas estructurales" (systèmes structurels) qui se développent sur 6 semestres. Dès le premier semestre, on parle au sujet des édifices de "sistemas de transmision para cargas gravitacionales" (systèmes de transmission pour les charges gravitationnelles) et des "sistemas de transmision para fuerzas horizontales" (systèmes de transmission pour les forces horizontales). Et dès le 3^e semestre on trouve en bibliographie des ouvrages tels que "Construcciones antisismicas y resistentes al viento" ou "Diseno de estructuras resistentes a sismos".

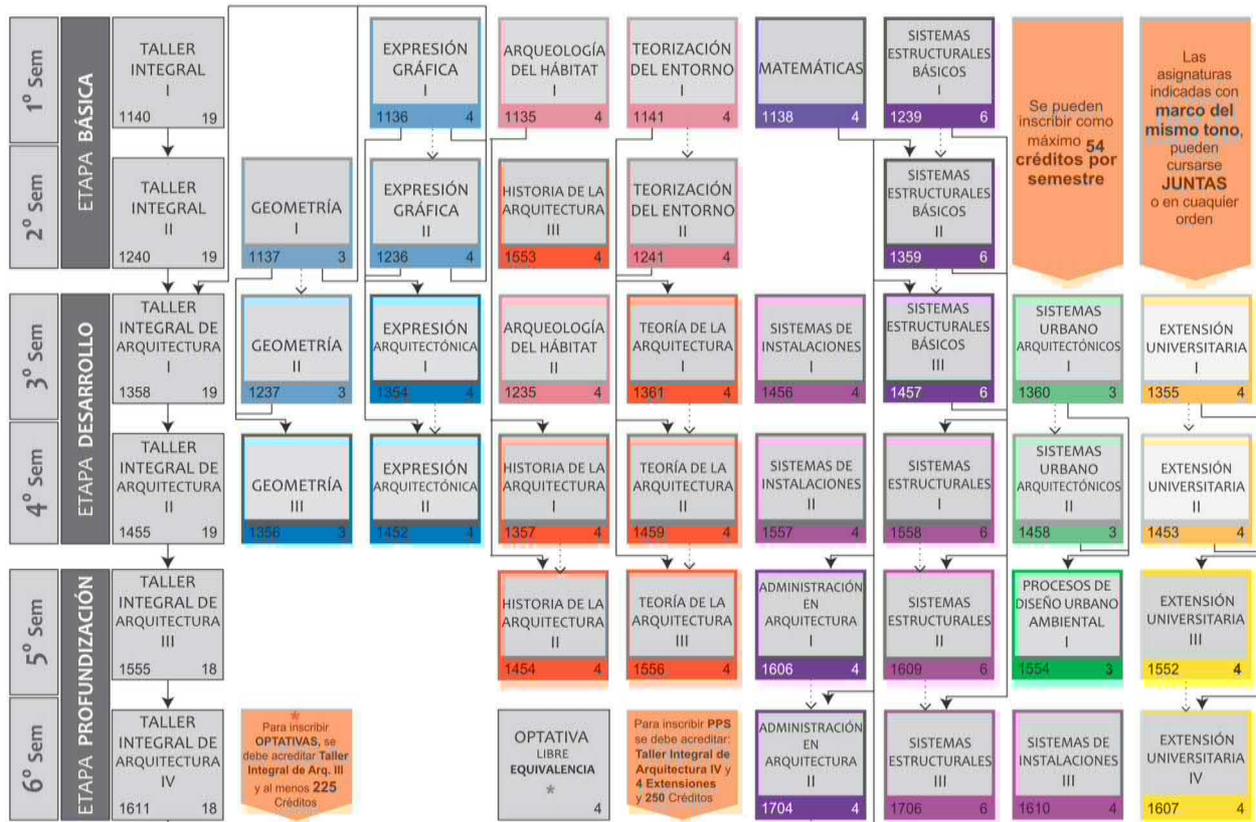


Figure 14.12 – Programme des 6 premiers semestres de la "Facultad de Arquitectura" de l'UNAM

Dans le "taller de arquitectura" (atelier d'architecture), on parle dès le 3^e semestre dans le cours de construction, de la sismicité de Mexico, des caractéristiques géotechniques du site, de l'amplification des ondes et des propriétés dynamiques des sols.

Par comparaison en France, la problématique parasismique est considérée dans l'enseignement de l'architecture comme une spécialité. Elle peut donner lieu à un DPEA "construction parasismique" à Marseille (Diplôme Propre aux Écoles d'Architecture) ou un DSA "architecture et risques majeurs" à Paris (Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement). Dans un pays où on estime que 21 000 communes sont concernées par le risque sismique, réserver la culture parasismique aux "spécialistes", peut laisser dubitatif et une approche "mexicaine" de la formation des architectes mériterait sans doute d'être envisagée chez nous.

14.5 Principaux enseignements

Nous avons vu dans le présent chapitre qu'au Mexique la prise en compte du risque sismique ne se faisait pas au détriment de la qualité et de la diversité de l'architecture. Bien au contraire, nous avons constaté que le risque sismique pouvait être une source de créativité architecturale importante. De la sorte, l'architecture mexicaine contemporaine, déjà connue et publiée en France, mériterait de continuer à recevoir un éclairage particulier.

Nous avons noté que dans l'enseignement de l'architecture au Mexique la prise en compte du risque sismique faisait partie de la culture de base de tout architecte et n'était aucunement une spécialité. Nous ne pouvons que recommander de développer une telle approche en France.

15 Bâtiments historiques

15.1 La problématique du bâti historique face au séisme

En France dans la communauté du génie parasismique, la problématique du bâti historique face au séisme est un sujet récent. Il est apparu principalement à la suite des derniers événements sismiques survenus en Italie. Dans le cadre de cette mission nous avons d'ailleurs été frappés par les similitudes et les convergences des démarches mises en œuvre au Mexique avec celles pratiquées en Italie.

A Puebla le Gérant du Centre Historique et du Patrimoine Culturel de la Ville, Sergio A. De La Luz Vergara Berdejo, nous a fait une belle présentation sur cette problématique et il nous a remis un document très consistant intitulé *"Manual de procedimientos del patrimonio monumental de Puebla para efectos de sismo"*. Ce document de 220 pages est un véritable manuel de procédure (comme son nom l'indique). Dans le cadre de notre rapport, nécessairement succinct, il n'est guère possible de le commenter en détail⁸ mais ce document est à rapprocher de documents italiens similaires. Tous ces documents, mexicains ou italiens, mériteraient d'être traduits en français.



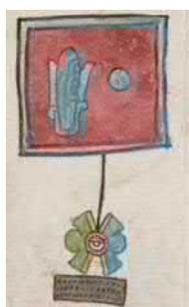
Figure 15.1 – Couverture du "Manuel" de Puebla

A Mexico c'est le Coordinateur National des Monuments Historiques, l'architecte Arturo Balandrano Campos, et son assistant l'architecte Manuel Villaruel, qui nous ont expliqué l'organisation administrative de l'INAH (*Instituto Nacional de Antropología e Historia*) qui a la charge du patrimoine au Mexique, ainsi que le programme PREVINAH (*Programa Nacional de Prevención de Desastres en Materia de Patrimonio Cultural*).

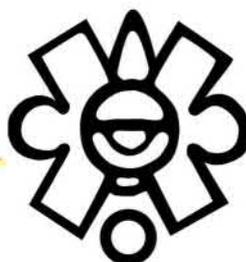
Les prérogatives de l'INAH ont le mérite de la clarté et de la simplicité. Elles visent :

- tout le patrimoine paléontologique, archéologique et anthropologique qui est considéré comme "patrimoine de la nation" et ne peut appartenir à personne (en gros cela recouvre tout le patrimoine antérieur à la colonisation espagnole)
- tous les bâtiments construits du XVI^{ème} au XIX^{ème} siècle qui sont considérés comme "historiques" (ils peuvent être publics ou privés mais ils sont tous sous la supervision de l'INAH)

De la sorte, 117 000 monuments dépendent de l'institut. Lors du séisme de 2017, 1821 ont été touchés : 20% avec des effondrements, 60% avec des dommages non structuraux et 20% avec de simples fissures. L'Institut ne manque donc pas de travail post-sismique, mais il développe aussi une politique active de prévention. Les manuels de conservation préventive qu'il diffuse méritent d'être connus. Le risque sismique n'y est pas absent et à ce sujet on se doit de signaler que le logo de l'INAH est une version stylisée d'un glyphe idéographique qui signifiait "terremoto" (tremblement de terre).



Glifo temblor de tierra



Instituto Nacional
de Antropología
e Historia

Logo de l'INAH

Figure 15.2 – Extrait du Codex Telleriano

⁸ Ce manuel est disponible sur le site <http://consejocentrohistoricopuebla.com/> et il fera partie des annexes de la mission.

15.2 Puebla

La ville de Puebla, officiellement *Heroica Puebla de Zaragoza*⁹, est également connue sous le nom de *Puebla de los Ángeles*. En 1987, son Centre historique a été classé sur la liste du Patrimoine mondial de l'Unesco pour sa grille urbaine intacte et la qualité de ses bâtiments.

Le 15 juin 1999 ce Centre historique avait été impacté par un séisme de magnitude Mw 7 et d'intensité MMI VIII qui avait fait 25 morts et plus de 200 blessés dans la région de Puebla. De nombreux édifices historiques avaient été très endommagés avec des effondrements partiels importants.

Suite à ce séisme un très gros travail de réparation et de confortement préventif des bâtiments a été engagé et la mission n'a pu que constater ses effets bénéfiques. Lors de notre visite le 13 novembre 2017, nous avons pu constater que la plupart des bâtiments étaient intacts. Certes, il y avait des immeubles étayés ou des confortements dans les clochers des églises, mais aucun effondrement de bâtiments, mêmes partiels, ne s'était produit.



Figure 15.3 – Vues du centre de Puebla



Figure 15.4 – Puebla, vues de quelques églises avec des désordres mineurs



Figure 15.5 – La Cathédrale de Puebla renforcée après le séisme de 1999 dans un état impeccable

⁹ La ville est chère au cœur des mexicains parce que le 5 mai 1862, l'armée du général Ignacio Zaragoza y a battu les troupes françaises lors de la bataille de Puebla. Depuis le 5 mai, "El Cinco de Mayo", est célébré au Mexique. En 2012, une pièce de 10 pesos à l'effigie du général Ignacio Zaragoza a été émise pour commémorer les 150 ans de la défaite des français.

15.3 Mexico

A Mexico, nous avons pu constater qu'il y avait eu des dommages importants sur certains monuments et que des travaux de déblaiement et d'étaisements étaient en cours. En particulier la moitié de la coupole de *Nuestra Senora de los Angeles* était effondrée et dans l'église de *Nuestra Senora de Loretto* on mettait en place des étalements. Cependant la grande majorité des édifices anciens étaient ouverts au public.



Figure 15.6 – Mexico, coupole effondrée de *Nuestra Senora de los Angeles*, étalement en cours dans *Nuestra Senora de Loretto*

Toutefois en regardant les monuments dans le détail on aperçevait souvent des inclinaisons dans tous les sens plus qu'étonnantes. Mais à Mexico, on peut estimer que c'est "normal", le sol se tassant régulièrement et pas nécessairement d'une manière homogène, la verticalité des bâtiments est parfois fluctuante, souvent inversement proportionnelle à la date de leur construction.

La dynamique d'un séisme peut parfois amplifier le phénomène mais fondamentalement c'est plutôt la statique, c'est à dire les forces qui varient infiniment lentement, qui explique le caractère "incliné" de beaucoup de bâtiments. Un très bel exemple du caractère mouvant de Mexico se trouve dans la Cathédrale où un pendule donne en permanence la variation des déplacements de la nef, quasiment un sismomètre permanent. De la sorte au Mexico, on est donc habitué au mouvement qui fait la vie des bâtiments.



Figure 15.7 – Mexico, des inclinaisons variées, la Cathédrale et son pendule

15.4 Principaux enseignements

Nous avons vu dans le présent chapitre qu'au Mexique, comme en Italie d'ailleurs, la prise en compte du risque sismique dans les bâtiments historiques faisait l'objet d'une problématique spécifique avec des approches particulières.

Nous ne pouvons que recommander de développer cette problématique en France en profitant de la riche expérience accumulé sur le sujet par des pays où la fréquence des séismes est plus élevée que chez nous.

Nous pensons qu'un tel sujet mériterait une mission plus approfondie spécifiquement dédiée. En raison de la brièveté de notre mission et de l'ampleur des autres sujets à traiter, notre rapport n'est à prendre que comme un premier repérage.

Nous avons noté aussi que nos interlocuteurs seraient très intéressés par une rencontre internationale entre spécialistes sur le sujet. D'un point de vue diplomatique la France, qui abrite le siège de l'Unesco¹⁰, serait peut être bien placée pour organiser cette rencontre.

¹⁰ L'Unesco dont l'une des missions est "de protéger notre patrimoine et de favoriser la créativité" et dont la Directrice générale est une ancienne Ministre de la Culture française.

16 Les bâtiments français de Mexico

Dans le cadrage de notre mission, il nous a été demandé de donner une appréciation sur les bâtiments français de Mexico. En effet à la suite du séisme de 1985, le Ministère des Affaires étrangères avait engagé des dépenses importantes pour renforcer son patrimoine et il nous a semblé judicieux de faire un point particulier sur ces bâtiments.

16.1 Constats techniques effectués

Au titre des bâtiments diplomatiques et des infrastructures culturelles de la France au Mexique, nous avons pu visiter et rencontrer les responsables des bâtiments de l'Ambassade et du Consulat général, de l'Institut Français d'Amérique Latine (IFAL) et de la Casa de Francia.

L'Ambassade et le Consulat général sont abrités dans un bâtiment construit entre 1992 et 1996 par l'architecte français Bernard Kohn. C'est un ensemble assez complexe d'une surface de 16 850 m² qui comporte 13 niveaux avec des sous-sol abritant 110 places de parking. Du point de vue structurel le bâtiment s'est bien comporté. Les seuls désordres que nous avons constatés étaient une cloison "claquée" dans une salle de réunion en étage, quelques fissures à des jonctions entre la structure béton et des remplissages en briques, et des désaffleurements de parement en façade. Des désordres tout à fait mineurs, "normaux" après un tel séisme.



Figure 16.1 – L'Ambassade de France à Mexico

L'IFAL est un institut qui a été fondé en 1944 par le gouvernement de "la France Libre" du Général de Gaulle. Les plans d'origine ont été réalisés sur la période 1954-1963 et les travaux auraient été réalisés en 1973 avec des compléments en 1977-1978 peu de temps avant le séisme de 1985. En 2000, une importante opération de confortement a été réalisée. Sur les plans que nous avons pu consulter, on parle de "rigidizacion edificio" (rigidifier le bâtiment) et nous avons été impressionnés par la qualité du dossier réalisé par l'ingénieur mexicain Garcia Jarque¹¹ : modélisation 3D, note de calcul, plans d'exécutions avec tous les détails, y compris les reprises de fondation.

Nous avons pu constater que cette rigidification avait bien fonctionné en 2017, le bâtiment ne présentant que quelques fissures mineures, là aussi à des jonctions entre la structure béton et des remplissages en brique. On peut noter que dans le cas d'espèce la rigidification offre un double intérêt : d'une part elle permet de renforcer la stabilité aux efforts horizontaux (une stabilité qui était sans doute très faible avant. Et même si le bâtiment avait "supporté" le séisme de 1985, on pouvait le considérer comme un bâtiment vulnérable), mais d'autre part en modifiant notablement la période propre du bâtiment elle déplace sa position sur le spectre de dimensionnement ce qui dans le cas d'espèce est très favorable en terme d'efforts (ce point dépend bien sûr de la nature du sol).



Figure 16.2 – L'Institut Français d'Amérique Latine (IFAL) à Mexico

¹¹ Au passage on peut signaler que les archives techniques des bâtiments pouvant avoir une très grande valeur en situation post-sismique ou pour des interventions ultérieures, il serait judicieux de les numériser et de disposer des copies dans d'autres lieux.

La Casa de Francia est l'ancienne Ambassade de France. C'est un des derniers immeubles du XIX^{ème} siècle qui reste dans le secteur et il se retrouve cerné tout autour par des immeubles de très grande hauteur. En 1998, il a été transformé par l'architecte français Bernard Desmoulin en Centre Culturel. Cette transformation toute en finesse a donné un bâtiment très élégant et apprécié pour représenter la France à Mexico. Dans une interview en 2015 Bernard Desmoulin déplorait que "*La beauté a disparu du discours des architectes. Elle est bannie depuis le 17^{ème} siècle, et elle est bien partie pour ne pas être présente au 21^{ème}*". Manifestement à Mexico à la Casa de Francia, cela n'est pas le cas. Mais cette élégance ne s'est pas faite au détriment de la prise en compte du risque sismique. En effet, le bâtiment était dans un état absolument impeccable lorsque nous l'avons visité, juste une petite épaufrure sur une pierre au sol de l'entrée témoignait d'un entrechoquement entre le bâtiment principal et l'escalier extérieur.



Figure 16.3 – La Casa de Francia à Mexico

16.2 Déroulement de la crise

Nous avons eu des échanges très intéressants avec les responsables des bâtiments sur le déroulement de la crise. De la richesse de nos échanges, on peut mettre en valeur quelques points :

- l'alerte n'est arrivée que quelques secondes après le début du séisme (ce qui est absolument normal, le séisme ayant été beaucoup plus près de Mexico que celui de 1985)
- pendant le séisme, les personnes se sont regroupées comme prévu dans les parties recommandées comme les plus sûres du bâtiment (en général à proximité des ascenseurs)
- à la fin du séisme les bâtiments ont été évacués et tout le monde s'est retrouvé aux points de regroupements
- il n'a été possible de retourner dans les bâtiments (pourtant intacts et opérationnels) que lorsque le "dictamen" officiel a été réalisé par un ingénieur inscrit sur la liste des ingénieurs de Mexico, plusieurs jours après.

D'une manière générale, on peut faire un bilan positif : il n'y a eu aucune victime et tous les services de la France étaient ouverts au public lors de notre mission (ce qui n'était pas le cas de tous les pays représentés à Mexico). Sur le déroulement de la crise, on peut toutefois faire quelques commentaires :

- baser la sécurité sur un dispositif de prévision ou d'alarme peut parfois être illusoire.
- la consigne d'évacuer ou de rester dans un bâtiment mériterait des réflexions au cas par cas (s'il est souhaitable de quitter un bâtiment qui risquerait de s'effondrer, il peut être parfois plus dangereux de quitter un bâtiment sûr pour sortir en se retrouvant dans un environnement plus dangereux du fait des bâtiments voisins)
- dans tous les cas définir les zones les plus sûres d'un bâtiment est une excellente démarche. Il serait judicieux de contrôler dans ces zones sécurisées les accrochages des éléments susceptibles de tomber.
- le dispositif pour le retour dans les lieux mériterait d'être amélioré en terme de délais et il serait souhaitable que les diagnostics d'urgence post-sismiques soient réalisés en interne.

16.3 Principaux enseignements

Nous avons vu que la France à Mexico avait engagé à la suite du séisme de 1985 un très important programme de confortement ou de reconstruction de ses bâtiments. Nous avons constaté que ce programme avait été efficace et qu'il avait donné lieu à des architectures de qualité. Nous ne pouvons que recommander d'engager des programmes similaires dans tous les pays du Monde soumis au risque sismique où la France est représentée.

Sur le plan technique nous pensons qu'il serait judicieux :

- que les responsables techniques des bâtiments soient formés et habilités au diagnostic d'urgence post-sismique.
- que les dossiers techniques des bâtiments soient numérisés et disposés en plusieurs lieux.
- que pour chaque bâtiment il soit réalisé un pré-diagnostic d'urgence post-sismique permettant de préparer d'avance (pour un bâtiment déjà connu) un dossier synthétique qui serait facilement utilisable en situation post-sismique.
- que les plans de sécurité incendie soient complétés par une représentation permettant de différencier rapidement sur place les éléments structurels des éléments de remplissage non porteur.

17 Réflexions d'urbanisme

"Les villes devraient être construites à la campagne, l'air y est tellement plus pur." Alphonse Allais (1855 -1905)

En France, lorsque vous parlez de Mexico et du risque sismique, les Français ont souvent à l'esprit la proposition de l'humoriste Alphonse Allais et effectivement on peut se demander pourquoi et comment une des plus grandes agglomérations du Monde a été construite et s'est développée dans une zone soumise à un tel risque sismique.

Mais pour répondre il est nécessaire de remonter loin en arrière. En matière de risque sismique, les sismologues composent avec l'échelle des temps géologiques, en dizaine de milliers voire en millions d'année, et effectivement le risque pour Mexico s'est mis en place il y a bien longtemps (et perdurera encore pendant longtemps). Mais nous nous placerons sur un temps un peu plus court, celui du temps humain.

On estime que les premiers hommes arrivèrent au Mexique il y a environ 20 000 ans après avoir traversé le détroit de Béring. La première civilisation connue sera celle des Olmèques vers 1500 av. J.-C. qui bâtirent déjà des pyramides en terre. Cette civilisation déclina et disparut autour de 900 av. J.-C.

La civilisation Maya se développa alors et elle atteignit son apogée à la période dite "classique" entre 200 et 900 après J.-C. Sa grande œuvre fut la cité théocratique de Teotihuacán qui est située à environ 40 km au nord-est de Mexico. Son nom signifie "l'endroit où sont nés les Dieux" et on estime qu'elle a compté jusqu'à 200 000 habitants. Il est certain que les Mayas ont subi des tremblements de terre : ils en ont tenu la chronique et ils ont créé un glyphe spécifique pour cela. Une autre preuve, mais plus indirecte, tient à l'architecture. En effet, certains archéologues ont comparé la pyramide du Soleil à la Grande Pyramide d'Égypte en signalant qu'elles avaient des bases identiques (225 m de côté) mais que l'édifice maya était deux fois moins haut (65 m contre 144 m). Une différence qui pourrait s'expliquer par des nécessités de stabilité parasismique.



Figure 17.1 – Maquette de la cité de Teotihuacán

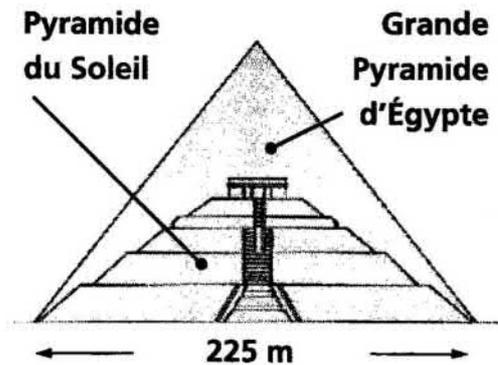


Figure 17.2 – Comparaison de la hauteur des pyramides

Pour des raisons encore aujourd'hui obscures la cité de Teotihuacán fut abandonnée à partir du VI^e siècle. Vers le milieu du XIII^e siècle, un groupe d'indiens venant d'un lieu nommé Aztlián arriva dans la vallée de Mexico. Il se faisait appeler *mexitín* ou *mexica* et ce seront les Espagnols qui les appelleront *aztecas* en référence à leur lieu d'origine.

La fondation de Tenochtitlán, le fondement donc du futur Mexico, ne manque pas d'intérêt. Suivant la légende le dieu tribal Huitzilopochtli avait donné l'ordre aux mexicas de "planter la tente à l'endroit où ils verraient un aigle perché sur un cactus dévorant un serpent". Le présage (qui est un symbole du Mexique et qui figure sur le drapeau national) fut trouvé sur une île au milieu d'un lac et l'une des plus grandes agglomérations du Monde débuta son développement à l'issue de ce présage.

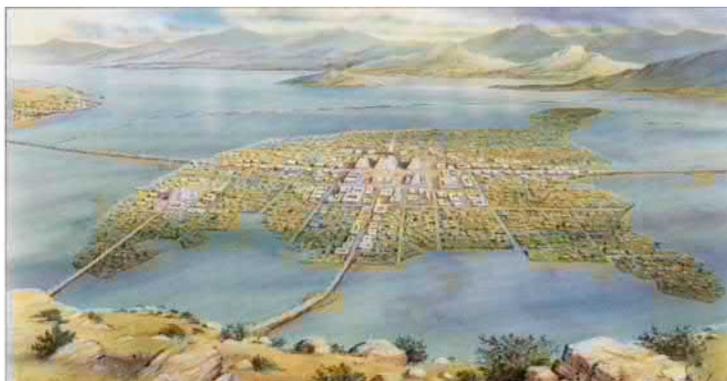


Figure 17.3 – La cité aztèque de Tenochtitlán (futur Mexico)

D'un point de vue symbolique, pour les peuples préhispaniques le serpent était souvent la représentation des volcans et des séismes. S'implanter sur une île assez loin des volcans et avec un sol plutôt mou pouvant amortir les ondes sismiques (mais bien sûr uniquement pour des constructions raides) était un choix sans doute "fonctionnel" pour terrasser "le serpent". Par ailleurs l'empire Aztèque s'étant développé d'une manière assez guerrière en soumettant les autres tribus et en prélevant des impôts, une île sur un lac était une position militaire stratégique.

Lorsque Hernán Cortés débarqua en 1519, l'Empire Aztèque était immense mais assez haï. Cortés était un guerrier, sans doute sans pitié (on lui impute entre 15 000 et 30 000 victimes dans le massacre de Cholula près de Puebla, un massacre dont le souvenir est encore vivace au Mexique) mais il ne manquait pas de sens politique et diplomatique. En effet, il n'aurait jamais pu conquérir le Mexique avec seulement une poignée d'hommes s'il n'avait su pactiser et nouer des alliances. Il aura d'ailleurs une maîtresse amérindienne "La Malinche", devenue Doña Marina, une ancienne esclave qu'un cacique Maya donna aux conquistadors et qui lui servit d'interprète et de conseil. Il eut un fils avec elle et on rapporte souvent l'affirmation de Cortés selon laquelle, après Dieu, Marina était la raison principale de son succès.

Profitant du soutien indéfectible des Tlaxcalteques, ralliant tous les Indiens ennemis des Aztèques, Cortés conquiert Tenochtitlan le 13 août 1521 après un long siège de trois mois et des combats qui détruisirent une partie de la ville, faisant selon les estimations entre 120 000 et 240 000 morts chez les Aztèques, dont 40 000 dans la bataille. Pour asseoir son pouvoir, Cortés ne pouvait que conserver la capitale de l'empire Aztèque pour en faire la sienne. Les noms étant toujours donnés par les vainqueurs, Tenochtitlan devint ainsi Mexico et les Mexicas des Aztèques, mais l'emplacement resta. Mexico devint donc la capitale de la Nouvelle-Espagne, les temples furent rasés pour en faire des églises et on estime qu'au début du XVII^e siècle la ville avait 200 000 habitants, dont seulement 2 000 espagnols.



Figure 17.4 – "La consécration des temples païens"



Figure 17.5 – Mexico en 1628

Mais du point de vue des risques naturels, les espagnols gèrent moins bien l'hydraulique que ne le faisait les Aztèques. Il subirent plusieurs inondations pendant le XVI^e siècle et en septembre 1629 ce fut "el diluvio", le déluge. Cette inondation fut l'un des désastres naturels les plus dramatiques dans l'histoire de Mexico. Trente mille personnes moururent noyées et les survivants subirent des épidémies. Il fallut attendre 1634 pour que l'eau se retire définitivement de la ville et on envisagea un moment d'abandonner le site. Mais finalement à la catastrophe, deux réponses furent données : une religieuse et une autre civile.

Comme il était de coutume à l'époque, l'Église et la société interprétèrent la catastrophe comme une punition divine. La ville de Mexico était sous l'emprise du péché qu'il fallait expier et l'inquisition travailla sans relâche. On mis donc au bûcher les marranes (les juifs récemment convertis au catholicisme), les sodomites et pour faire bonne figure les Portugais aussi.

La réponse civile, celle du génie civil, fut tout aussi simple (comme souvent les réponses d'ingénieur) mais quand même plus efficace. Pour éviter les inondations, il suffisait de vider le lac. Et ainsi fut fait, avec bien sûr des travaux et des moyens colossaux (ce qui est souvent le cas pour les réponses "simples" d'ingénieur) et il faudra plus de deux siècles pour que Mexico cesse d'être une île pour devenir une ville dont le sol continue à se tasser inexorablement.



Figure 17.6 – Mexico au XVII^e siècle

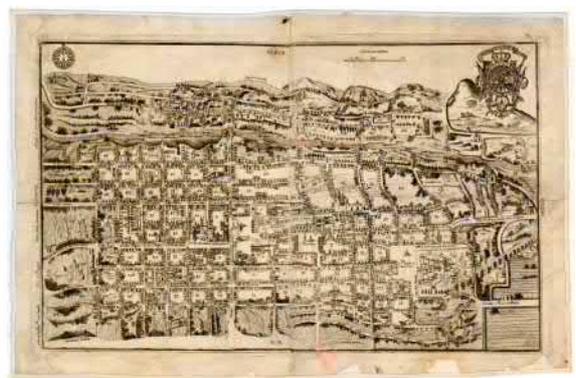


Figure 17.7 – Mexico en 1796

Pendant que le lac se vidait, les séismes n'oubliaient pas Mexico. Il y a des événements connus qui ont touché Mexico (1568, 1611, 1653, 1682, 1697, 1711, 1768, 1787, 1800, 1806, 1837) pour lesquels les sismologues sont capables de donner la localisation, la magnitude et des cartes d'intensité. Mais à chaque fois, vu la faible hauteur des bâtiments, les dégâts restèrent modérés et dans les chroniques on ne parle pas de grande catastrophe pour la ville elle-même.

Au XX^e siècle la ville a connu un essor colossal. De moins de 350 000 habitants sur 27 km² en 1900, elle passe à 1.8 millions d'habitants sur 117 km² en 1940, pour atteindre 18 millions d'habitants sur 1 540 km² en 2000.

Mais le risque sismique préoccupe toujours assez peu. La première alerte qui touche la ville "moderne" se situe en 1941 et donne lieu au règlement de 1942, le premier règlement qui dans le district fédéral de Mexico donne des dispositions de conception sismique.

La deuxième alerte aura lieu en 1957. Et il y aura un symbole fort : l'Ange de l'Indépendance, la statue d'Antonio Rivas Mercado, élevée en 1910 pour honorer les héros de la lutte contre la domination espagnole, est tombée. Le symbole de Mexico est à terre.

Une nouvelle norme sera publiée en 1957, puis une autre en 1966 et encore une autre en 1976. Mais comme il n'y a eu que 70 victimes en 1957, le risque n'est pas très présent dans les esprits et on applique les normes seulement pour les nouveaux bâtiments sans trop se soucier de tout le parc construit avant.

Et puis le 19 septembre 1985 à 7h17, Mexico subira ce que la chronique appellera "le coup de massue" : au moins 10 000 morts, 2831 bâtiments gravement endommagés, dont 258 bâtiments totalement détruits et 143 partiellement effondrés. Des chiffres vertigineux dont on pensait que Mexico ne se relèverait pas de sitôt .

Mais avec un dynamisme incroyable Mexico encore une fois fit face au désastre et se releva. Et comme symbole fort la Coupe du monde de football 1986 aura lieu à Mexico. Elle fut remportée par l'équipe d'Argentine, mais ce sera peut être le Mexique qui restera dans l'histoire pour l'organisation post-sismique de cette coupe.



Figure 17.8 – Mexico 1985 "le coup de massue"



Figure 17.9 – Mexico 1986 "la Coupe du monde de football"

Suite au séisme des normes parasismiques d'urgence paraîtront en 1985, puis en 1987 des normes sur les fondations. Les dernières normes en vigueur seront les NTC 2004. Après le séisme de 2017, on estime que ces normes, dites "modernes", ont été satisfaisantes. Bien sûr, elles vont être améliorées, peaufinées, précisées mais on n'envisage pas de les bouleverser de fond en comble. On doit aussi noter que ces normes "modernes" ont permis la réalisation d'ouvrage assez audacieux. La Torre Virreyes de 130 m de haut, construite entre 2011 et 2015, en est un bel exemple.



Figure 17.10 – La Torre Virreyes

Au début du XXI^e siècle le terme "résilience" va apparaître dans le discours des villes¹². Mexico adhère en 2013 au groupe "100 Resilient Cities" un groupe initié par la fondation Rockefeller (une fondation qui n'oublie pas de dire qu'elle existe lorsqu'elle intervient). Mais au delà du marketing et de la communication, on peut noter que dans une plaquette de 2016 à la veille de 2017, le risque sismique reste bien placé dans l'échelle de perception des risques à Mexico.



Figure 17.11 – Mexico 2016 "la stratégie de la résilience" (vue par la fondation Rockefeller)

Trente deux ans après le séisme de 1985, jour pour jour, le 19 septembre 2017 à 13h34, juste après l'exercice du "Simulacro 2017" un nouveau séisme survient. Bien sûr, c'est un drame, des immeubles s'effondrent, il y a des victimes. Mais avec un peu de recul, on s'aperçoit que l'ampleur du drame est sans commune mesure avec le désastre de 1985. Pourtant le séisme de 2017 n'a pas été moins impactant que celui de 1985. Les zones touchées ne sont pas tout à fait les mêmes mais des immeubles qui avaient pourtant résisté en 1985 s'effondrent totalement en 2017.

Entre 1985 et 2017, en l'espace d'une génération, un travail énorme a été fait dans tous les domaines (études scientifiques, réglementation, confortements, exercices...) et on peut dire que ce travail a été efficace. Certes, il y a des trous, des failles, des manques dans le dispositif, tout particulièrement sur la vulnérabilité des constructions réalisées avant 1985 et la démarche doit être poursuivie (et sera poursuivie, nous n'en doutons pas). Mais on peut estimer qu'à Mexico en 2017 le risque sismique est devenu un risque "maîtrisable" et ce à l'échelle d'une immense agglomération.

Mexico 1985-2017, un écart énorme. En matière sismique, le drame n'est plus une fatalité : une efficacité que l'on peut mettre au crédit de toute la communauté du génie parasismique.

Si la Coupe du monde de football fut la réponse de Mexico au séisme de 1985, pour 2017 on pourrait prendre comme symbole du "dynamisme post-sismique" de la ville, la construction du nouvel aéroport dont Norman Foster et Fernando Romero sont les architectes. Le séisme de 2017 n'a en effet pas ralenti la construction de cet aéroport qui donne lieu à des travaux de consolidation de sol absolument gigantesques. Mais il est surtout piquant lorsque que l'on parcourt les documents de présentation de l'aéroport de voir deux guerriers Toltèques, des Atlantes, apparaître au milieu de ce projet ultramoderne. Le Mexique n'oublie donc pas son passé et ses ancêtres qui connaissaient déjà, et maîtrisaient sans doute le risque sismique.



Figure 17.12 – Le nouvel aéroport de Mexico avec ses deux guerriers Toltèques (vu par Norman Foster et Fernando Romero)

Pour finir, si on peut estimer que le risque sismique à Mexico est un risque naturel devenu maîtrisable, il en reste encore bien d'autres. Notamment le risque volcanique qui menace la ville en permanence. Lors de notre visite dans Le Centro Nacional de Prevencion de Desastres, il y avait une échelle affichée pour le risque volcanique avec des consignes allant du vert au rouge. Le vert disait "normal", l'orange signifiait "alerte" et le rouge "alarme". Et l'alarme rouge voulait dire : "évacuation de toute la population". A l'échelle d'une agglomération pareille, une évacuation totale ne sera pas un mince sujet. Nos réflexions d'urbanisme sur la ville de Mexico face aux risques naturels sont donc loin d'être finies.

¹² Ce mot provient de la physique (et non du droit, résilier un contrat voulant dire l'annuler). La résilience caractérise la résistance aux chocs d'un matériau. En anglais résilience signifiait à l'origine rejaillissement ou rebondissement, un terme finalement assez joyeux.

18 Conclusions

Nous avons commencé cette mission avec quatre interrogations principales :

- le séisme de 2017 a-t-il été plus ou moins impactant pour la cité de Mexico que celui de 1985 ?
- les bâtiments récents, construits depuis 1985, se sont-ils bien comportés ?
- les bâtiments confortés depuis 1985 se sont-ils bien comportés ?
- les bâtiments français de Mexico se sont-ils bien comportés ?

Notre première interrogation mérite une réponse nuancée. Le séisme du 19 septembre 2017 a été d'une magnitude moindre (Mw 7.1) que celui du 19 septembre 1985 (M 8.1), mais il a été beaucoup plus proche (120 km du centre de Mexico en 2017 contre 350 km en 1985) avec un foyer situé à une plus grande profondeur (51 km en 2017 contre 33 km en 1985).

De la sorte, ses effets ont été différents. Les zones les plus endommagées n'ont pas été les mêmes : plutôt la zone dite "de transition" au bord de l'ancien lac à l'ouest en 2017, alors qu'en 1985 c'était le centre de l'ancien lac qui concentrait les dommages.

Mais des immeubles qui avaient résisté en 1985 se sont totalement effondrés en 2017.

Avec ces éléments on peut conclure, que le séisme de 2017 a été sans doute plus localisé dans ses effets destructeurs que celui de 1985, mais qu'il n'a pas été moins impactant pour la cité de Mexico.

On peut aussi noter que deux séismes sont rarement identiques et que la résistance à un séisme passé ne vous garantit pas nécessairement pour un séisme à venir.

Pour le deuxième point concernant les bâtiments récents, on doit signaler qu'à 3 ou 4 exceptions près, tous les bâtiments effondrés en 2017 avaient été construits avant 1985 (et non renforcés depuis). On peut en déduire à l'inverse que la plupart des bâtiments construits après 1985 se sont bien comportés.

Si après le séisme de 1985, les codes et les règles de calcul ont été modifiés à Mexico (et dans le monde entier aussi) après celui de 2017 il n'est pas envisagé de modification importante de la réglementation.

Certes des améliorations vont être apportées, une prise en compte de l'évolution dans le temps notamment, un affinage des zonages, mais pour les grandes lignes on peut admettre que le corpus de connaissance sur le sujet est assez stabilisé.

Cet enseignement nous semble primordial pour la communauté du génie parasismique. En effet, pendant tout le XX^e siècle, les grands séismes ont toujours été suivis de changement des règles et des codes. Au début du XXI^e siècle, ce n'est plus le cas, et on peut admettre que la réglementation est considérée maintenant comme satisfaisante.

Reste bien sûr, à la voir appliquée partout, ce qui est un vaste sujet.

Concernant le troisième point, la mission n'a constaté aucun endommagement significatif sur des immeubles confortés depuis 1985. Cet enseignement est aussi très important pour la communauté du génie parasismique.

Manifestement, il est possible d'une manière raisonnable de conforter, de renforcer ou de rigidifier des bâtiments existants et d'obtenir qu'ils se comportent correctement face à un séisme.

Il y a bien sûr plusieurs manières d'opérer et il ne faut pas réduire les techniques de renforcement à une recette unique. Dans cette optique, les exemples de Mexico peuvent nous offrir une belle palette de solutions efficaces (et éprouvées par un vrai séisme...).

Pour le quatrième point concernant le comportement des bâtiments français de Mexico, là aussi le constat est très net : la mission n'a constaté aucun endommagement significatif sur les bâtiments français de Mexico.

Et on ne peut que saluer la politique de gestion des bâtiments de la France engagée à Mexico depuis 1985 et souhaiter qu'une telle politique de bonne gestion préventive du risque sismique soit aussi appliquée dans toutes les villes du Monde soumises au risque sismique où la France est présente.

Dans le cadre de cette mission, nous avons donc pu répondre d'une manière assez nette aux quatre questions initiales posées.

Mais nous avons aussi pu élargir les constats à d'autres problématiques :

- l'importance à accorder aux diagnostics d'urgence post-sismique, un domaine dans lequel l'AFPS s'est déjà engagé et qu'il importe de continuer à développer,
- l'intérêt de la maîtrise des systèmes d'information géographiques, un domaine balbutiant chez nous mais qui mériterait d'être travaillé et rendu opérationnel,
- le champ des bâtiments historiques qui nécessite des approches spécifiques et qui devrait être approfondi en relation avec les spécialistes de la question.

Le bilan que nous tirons de cette mission est un bilan assez positif. Les chiffres sont d'ailleurs éloquentes : plus de 10 000 victimes en 1985, de l'ordre de 300 en 2017, pour un séisme certes différent mais pas nécessairement moins impactant.

Bien sûr, un séisme est un drame avec des effondrements effroyables, des blessés, des morts dont les médias se sont faits à juste titre l'écho.

Mais si on considère les chiffres et que l'on fait quelques comparaisons pour 10 000 victimes en 1985 et 300 en 2017, avec une population impactée qui se compte en millions d'habitants :

- en 1985 les accidents de la route faisaient environ 10 000 victimes en France et nous n'en sommes pas à 300 maintenant (plutôt de l'ordre de 4 000),
- en 2009 avec une magnitude Mw de 6,2, le séisme de L'Aquila a fait environ 300 victimes, pour une population de l'ordre de 70 000 habitants,
- en 2016 avec une magnitude Mw de 6,0, le séisme d'Amatrice a fait aussi 300 victimes mais malheureusement pour une population de l'ordre de 3 000 habitants,

La maîtrise du risque sismique à l'échelle d'une grande agglomération est donc un objectif envisageable, sur une échelle de temps somme toute assez brève (30 ans !).

Cette maîtrise du risque n'est pas antinomique ni avec la qualité architecturale, ni avec le développement urbanistique de la cité. L'exemple de Mexico prouverait plutôt le contraire, les contraintes parasismiques ayant poussé l'architecture dans des voies plus créatives et l'urbanisme dans des structurations de la ville plus maîtrisées.

Un dernier point que nous voudrions soulever en conclusion est celui de l'intérêt des missions post-sismiques sur le terrain.

En 1985, les enseignements de la mission AFPS avait été très importants pour toute la communauté du génie parasismique.

En 2017, nous avons pu constater sur le terrain les retombées positives des démarches initiées il y a plus de trente ans. Mais si nous étions restés à distance et si nous n'avions vu Mexico qu'à travers le filtre virtuel d'Internet ou l'effet loupe des médias, nous aurions eu sans doute le regard faussé et raté beaucoup d'éléments très pertinents.

Pour terminer, nous souhaitons que dans trente ans ce rapport puisse être encore le point de départ d'une nouvelle mission à Mexico ...

19 Remerciements

La mission tient à remercier tout d'abord les membres de la mission AFPS 1985 qui nous ont passé le relais et accompagné pour la préparation : Victor Davidovici, Alain Pecker et Pierre Sollogoub.

Nous devons aussi remercier le Conseil et tous les membres de l'AFPS qui en France ont décidé, préparé, organisé, suivi et encouragé cette mission, et tout particulièrement : Céline Dujarric, la Responsable des missions post-sismiques, et Emmanuel Viallet, le Président de l'Association, qui nous ont été très précieux.

Nous devons bien sûr remercier le Ministère de la Transition écologique et solidaire qui a soutenu la mission et spécialement Madame Mendy Bengoubou-Valerius, Chargée de mission Risques sismique et volcanique, et Monsieur Vincent Courtray de la Direction Générale de la Prévention des Risques qui ont facilité toutes nos démarches.

Nous remercions les services de l'Ambassade de France et du Consulat général à Mexico :

- Madame Anne Grillo, Ambassadrice de France, et Monsieur François Vandeville, Premier Conseiller, qui ont mobilisé leurs services pour soutenir la mission
- Monsieur Aymeric Blanc, Directeur Adjoint de l'Agence Française de Développement
- Monsieur Jean-Claude Caravaca, Attaché Régional Adjoint de Sécurité Intérieure
- Monsieur Frédéric Charroin, Chef du Service Commun de Gestion
- Monsieur Fabien Ines, Attaché Régional de Sécurité Intérieure
- Madame Annie Marchegay, Chargée de la Coopération Scientifique et Technologique
- Madame Marie Héléne Papi, Consul Adjoint, Chef de Chancellerie
- Monsieur Jean-Joinville Vacher, Conseiller chargé de la Coopération Scientifique et Universitaire
- Monsieur Rémi Vacher, Secrétaire Général de l'IFAL

Nous remercions tous les membres de l'UNAM qui nous ont si bien reçus :

- Monsieur Gabriel Auvinet
- Monsieur Gustavo Ayala Millan
- Madame Silvia Garcia
- Monsieur Roberto Meli
- Monsieur Mario Ordaz Schroeder
- Monsieur Efrain Ovando-Shelley

Nous remercions les architectes responsables de l'INAH pour le temps qu'ils nous ont consacré :

- Monsieur Arturo Balandrano Campos, Coordinador Nacional de Monumentos Historicos
- Monsieur Manuel Villaruel, Architecte

A Puebla, nous remercions pour leur accueil et nos échanges :

- Monsieur Ruben Dario Herrera Cabrera, Director General de Proteccion Civil
- Monsieur Enrique Calderon Lozada, Director Operativo de Proteccion Civil
- Monsieur Sergio A. de la Luz Vergara Berdejo, Gerente del Centro Historico y Patrimonio Cultural, Secretaria Technico de Ciudades Patrimonio
- Monsieur Victor Jimenez, Directeur de la Distribution de gaz de Puebla, ENGIE Mexico
- Monsieur Ricardo Vargas, Gas de Morelos

A Mexico, nous remercions pour leur collaboration :

- Madame Maria Bustamante Harfush, Architecte, Directrice de la Casa del Arquitecto
- Monsieur Raúl Hernández, Architecte
- Messieurs Carlos Carames et Javier Ibañez, Ingénieurs de Dynamis Associates
- Monsieur Sylvain Estibal, Directeur du bureau de l'AFP à Mexico

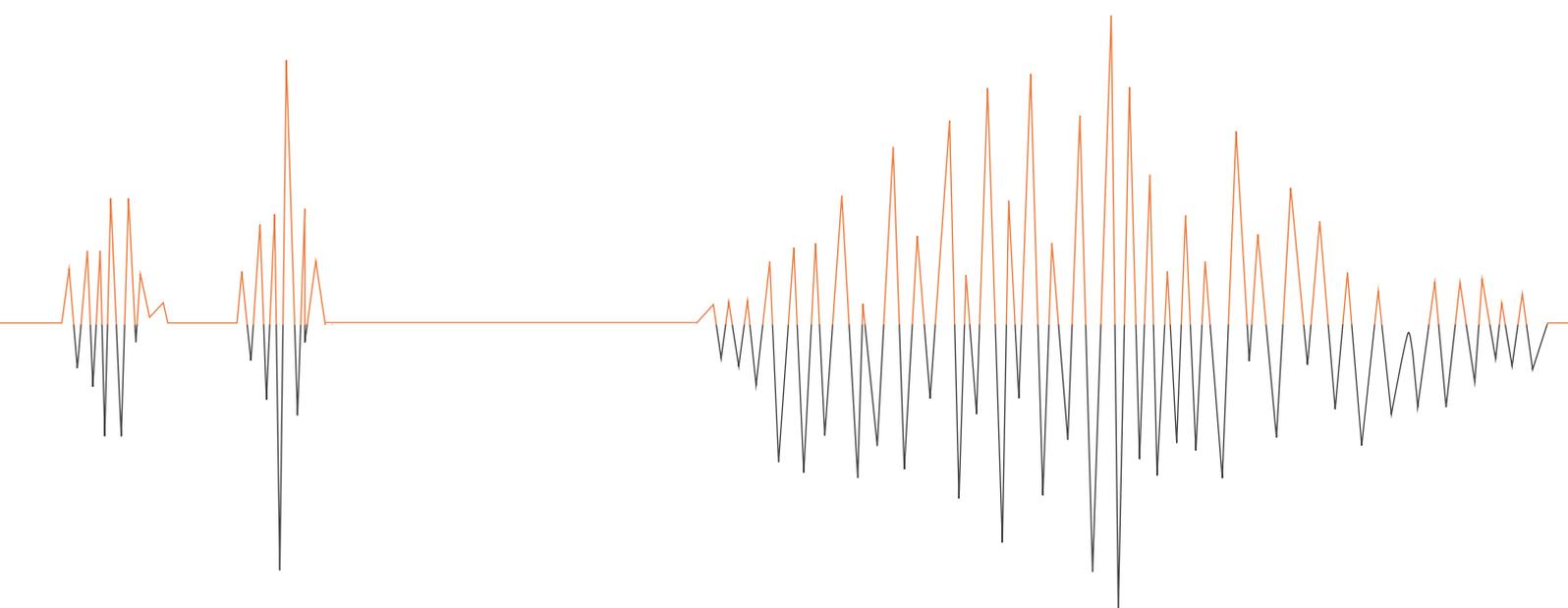
Nous remercions aussi pour leur assistance :

- Messieurs Antoine Olivier, Ernesto Parras, Alberto Robles, Fernando Tovar, d'ENGIE Mexico
- Madame Grissel Montero et Messieurs Edgar Herrera, Edgar de Leon Cervantes, Emanuel Silva, de CENAGAS
- Madame Ileana Maya et Messieurs Agustin Becerril, Jordi Valls, de Suez Mexico

Nous remercions Messieurs Noé et Marco Paz Cruz pour leur si précieux appui logistique lors de la préparation et de la réalisation de la mission.

Nous remercions les entreprises et organismes qui ont participé au financement de la mission : BE Taylor, CEA, EDF, Géodynamique et Structure, GRTgaz, IFSTTAR et Ménard.

Nous tenons à remercier également tous les contacts qui ont pris le temps de répondre à nos sollicitations.





Publié par :

L' **AFPS**

Association Française du Génie Parasismique
French Association for Earthquake Engineering

Tel : +33 (0)1 85 34 33 19

E-Mail : afps@enpc.fr

Site internet : www.afps-seisme.org

Siège social et secrétariat :

42 rue Boissière, F-75016 Paris

Copyright :

© AFPS, Association Française du Génie Parasismique
La reproduction de cette publication à des fins commerciales, notamment en vue de la vente, est interdite sans autorisation écrite préalable du détenteur des droits d'auteur.

Responsable de publication :

Marc GIVRY

Auteurs :

Stéphane BRULE - Cédric DESPREZ - Charles FERNANDEZ
Marc GIVRY - Kevin MANCHUEL - Gustavo MENDOZA
Benjamin RICHARD - Carlos TAYLOR

Photos : AFPS

Conception graphique :

Valérie SCOTTO DI CÉSARÉ
www.vsdcom.fr



Février 2018
2^e édition
Juillet 2018