

Les missions post-sismiques AFPS. Une contribution au développement de la connaissance et de l'expertise en génie parasismique

Didier COMBESCURE¹, Carolina FRANCO², Elias EL HABER³, Sylvain POLLET⁴, Denis MOIRIAT⁵, Cédric GIRY⁶

¹ Fusion for Energy, ITER Delivery, Barcelona, didier.combescure@f4e.europa.eu

² Géodynamique et Structure, Montrouge, carolina.franco@geodynamique.com

³ EDF, Aix-en-Provence, elias.el-haber@edf.fr

⁴ APAVE Infrastructures et Construction, Caen, sylvain.pollet@apave.com

⁵ ASNR, Fontenay-Aux-Roses, denis.moiriat@asn.fr

⁶ EPF, Bagnaux, cedric.giry@ens-paris-saclay.fr

RESUME Depuis plus de 40 ans, l'Association française du génie parasismique (AFPS) organise des missions de terrain partout dans le monde sur les territoires touchés par des événements sismiques majeurs. Depuis 1985, plus de 40 missions post-sismiques ont ainsi été réalisées à travers le monde avec le soutien de l'État et de l'industrie française. Les plus récentes ont eu lieu à Cianjur, en Indonésie (événement du 21 novembre 2022), à Kahramanmaraş, en Turquie (événements du 6 février 2023), à Noto au Japon (événement du 1er janvier 2024) et à Hualien à Taiwan (événement du 3 avril 2024). Comme le font de nombreux pays (Algérie, Italie, Japon, Suisse, Etats-Unis, Yougoslavie, Nouvelle-Zélande), ces exercices permettent, d'une part, de réaliser un retour d'expérience (REX) et, d'autre part, de former des experts, de différentes générations et spécialités, directement sur le terrain, comme des sismologues, des ingénieurs en structures ou en géotechnique, des spécialistes de la gestion de crise, des sociologues, des architectes, etc. Après chaque mission, un rapport synthétisant les observations de terrains, les mesures et le REX réalisés, sont mis à disposition de la communauté scientifique sur le site de l'AFPS. De plus, à partir des données recueillies sur place (photos géoréférencées et reportage 3D, essais géotechniques in situ, mesures de déplacements, essais géophysiques, ...), des outils pédagogiques de sensibilisation du public et de formation des professionnels sont en cours de développement (visites virtuelles de territoires touchés par des séismes). Des visites d'inspections virtuelles de bâtiments endommagés par des séismes réels sont notamment déjà utilisées pour former les inspecteurs du dispositif de diagnostic d'urgence de l'AFPS (convention avec la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises). Par ailleurs l'AFPS initie et rédige des cahiers techniques afin d'améliorer la connaissance et les bonnes pratiques en génie parasismique. De nombreux jeux de données et d'observations en lien avec les missions post-sismiques sont aussi accessibles aux adhérents.

Mots-clés Risque sismique, Retour d'expérience, Formation, Observations, Mesures *in situ*, Dommages structurels.

I. INTRODUCTION

L'AFPS considère que l'étude des grands séismes est essentielle pour la compréhension et l'amélioration de l'ingénierie parasismique. En plus de ses nombreuses activités dans le domaine, l'Association priorise l'organisation de missions post-sismiques et le partage des enseignements tirés du terrain ainsi que la formation des jeunes membres.

La première mission post-sismique, menée par l'AFPS sur le terrain, a été organisée après le tremblement de terre de Mexico des 19 et 20 septembre 1985. L'ampleur des dégâts causés par ce tremblement de terre et les caractéristiques particulières du sol dans le bassin sédimentaire de Mexico, combinées au bon réseau accélérométrique installé dans le pays, ont incité l'AFPS à considérer cet événement comme potentiellement riche d'enseignements et à envoyer une équipe sur le terrain, comme d'autres pays l'avaient déjà fait (Algérie, Italie, Japon, Suisse, États-Unis, Yougoslavie, Nouvelle-Zélande).

Depuis lors, l'AFPS a régulièrement réalisé plus de 40 études post-sismiques dans le monde entier avec le soutien du gouvernement français.

A. Répartition géographique des études post-sismiques de l'AFPS

Quarante-cinq missions post-sismiques ont été organisées depuis 1985 : Les Figures 1 et 2 montrent leur répartition géographique.

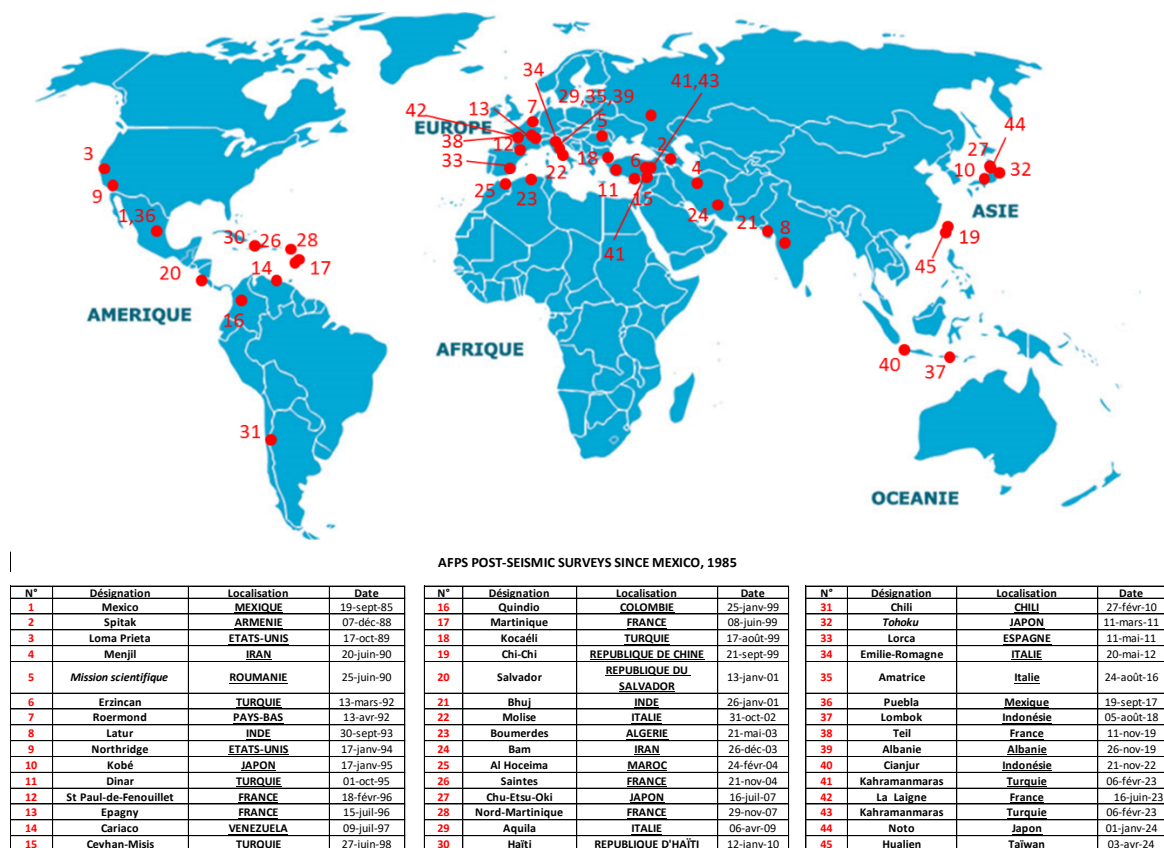


FIGURE 1. Missions post-sismiques de l'AFPS dans le monde entier depuis 1985

Les pays visités sont pour l'instant principalement localisés en Europe, au Moyen-Orient et en Asie (cf. Figure 2). Les pays les plus visités sont la France (5 missions, notamment dans les territoires d'outre-mer), l'Italie (4 missions), la Turquie (5 missions) et le Japon (3 missions).

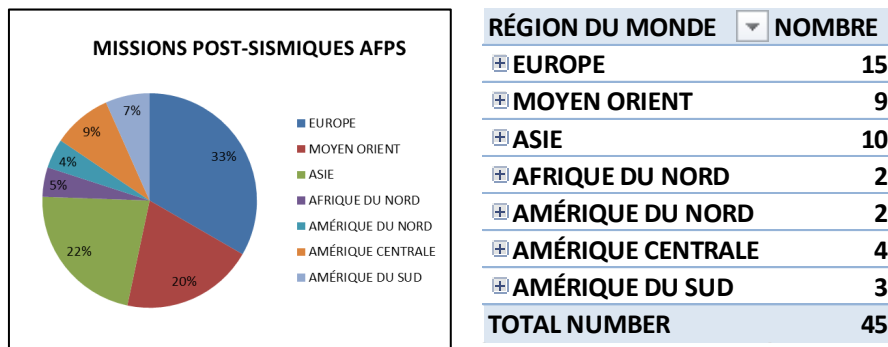


FIGURE 2. Répartition géographique par région du monde

B- Évolution des normes sismiques françaises

Le retour d'expérience des études post-sismiques a constitué la base de données sur laquelle les dispositions sismiques les plus importantes ont été élaborées pour les normes françaises et, plus récemment, pour les normes européennes de génie parasismique.

La première norme sismique française (AS 55) a été établie juste après le tremblement de terre d'Orléansville (Algérie) en 1955. Ce code de « première génération » recommandait de considérer une accélération horizontale uniforme d'environ 0,1 à 0,2 g dans la conception des bâtiments et ne fut appliqué que sur le territoire algérien avant son indépendance de la France.

Suite au tremblement de terre d'Agadir en 1960 (Maroc), les règles dites PS 62/64 ont été établies, et ont évolué progressivement vers un « code de deuxième génération » appelé PS 69, à la suite d'un consensus entre les professionnels de l'ingénierie et le gouvernement français. À l'époque, les normes sismiques n'étaient obligatoires que pour les bâtiments publics. Peu après, les dégâts observés après le tremblement de terre d'El Asnam (Algérie) en 1980 ont conduit la communauté à développer ces règles et à élaborer le PS 69/82 (DTU P 06-003).

En 1983, à l'initiative de Jean Despeyroux, l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS) fut créée en même temps qu'une nouvelle norme française (PS 92) s'adressant à l'ensemble du pays commençait à se dessiner. L'association a réalisé sa première mission après le tremblement de terre de Mexico en 1985 et par la suite, de nombreuses autres missions se sont succédées à travers le monde (la chronologie des missions de l'AFPS est présentée sur la Figure 3). Le retour d'expérience obtenu à partir de toutes ces missions fut valorisé dans les Recommandations AFPS 90 (1990) qui rassemblent un ensemble de règles et des recommandations concernant les constructions et les installations à réaliser dans les régions sujettes aux tremblements de terre. Celles-ci sont divisées en 3 volumes :

- AFPS 90 - Volume 1 : Normes communes à toutes les constructions, règles concernant les sols et les fondations ;
- AFPS 90 - Volume 2 : Matériaux : structures en briques/structures en béton armé/structures en béton précontraint ; Règles spécifiques aux différentes constructions : structures porteuses/bâtiments/équipements ;
- AFPS 90 - Volume 3 : Matériaux : constructions en acier / constructions en bois ; Règles spécifiques aux diverses constructions : constructions industrielles / appuis parasismiques / façades légères.

En 1992, la norme parasismique française PS 92 succéda à la PS 69/82 et fut largement enrichie par ces Recommandations AFPS 1990 et les retours d'expérience de récents tremblements de terre alors (notamment Mexique en 1985, Spitak en Arménie en 1988, Loma-Prieta en Californie en 1989). Simultanément, la norme PS-MI 89/92 fut rédigée, fournissant des règles simplifiées pour la construction résidentielle, basées sur des directives techniques constructives.

Par la suite, les progrès techniques en matière de construction sismique et les souhaits des pays européens d'harmonisation des normes de construction ont conduit à l'avènement de la première norme parasismique européenne Eurocode 8, entrée en vigueur en France en 2011.

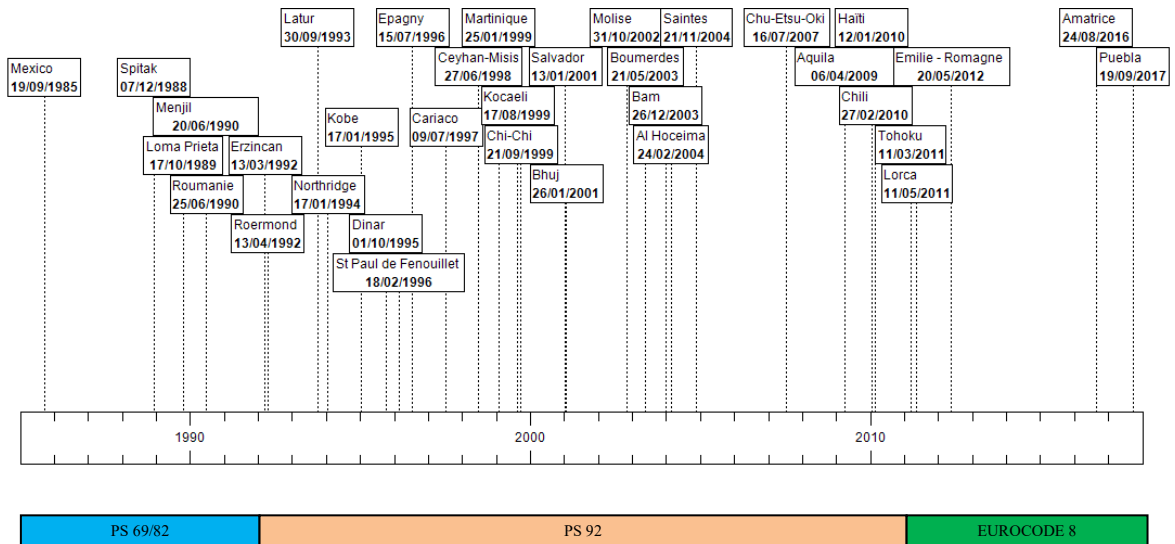


FIGURE 3. Chronologie des études post-sismiques de l'AFPS et évolution des codes de génie parasismique

II. ORGANISATION DES MISSIONS POST-SISMIQUES

Comme le montrent les figures 1 à 3, l'AFPS organise, depuis sa création, en moyenne une mission post-sismique par an, en fonction de l'occurrence des grands séismes et de la spécificité de l'événement (intérêt technique, contexte géopolitique...).

A. Thèmes habituellement couverts par les missions

L'objectif de ces missions post-sismiques est de collecter, directement sur le terrain, un maximum d'informations factuelles concernant l'événement, d'en tirer des enseignements importants et de promouvoir les recommandations préventives issues de ce retour d'expérience afin de réduire l'impact des séismes futurs (conception de structures parasismiques, suivi des données, information des populations, urbanisme, gestion de crise ...). Parmi les différents thèmes traités dans le cadre de ces missions, les plus communs sont :

- Aléa sismique et mécanique des sols : ce thème couvre l'analyse du contexte sismotectonique dans la zone concernée par le tremblement de terre. L'acquisition de données de terrain peut être utilisée (capteurs accélérométriques, GPS, etc.), les effets de site et les conditions géotechniques particulières des sols sont analysés.
- Structures : le comportement sous séisme des structures de tout type (béton armé, acier, maçonnerie, bois ...) et des ouvrages de génie civil et industriel sont analysés. Les pratiques/typologies architecturales sont

également examinées. Des études de cas pédagogiques peuvent être identifiées pour une étude plus approfondie après la mission de terrain. Les spécialistes peuvent également analyser le comportement particulier de certains ouvrages/bâtiments d'intérêt et les techniques de construction employées pour la modernisation et le renforcement des bâtiments.

- Urgence, gestion de crise : ces études peuvent également améliorer les outils et les procédures de l'organisation française pour le diagnostic post-séisme, créée par l'AFPS pour effectuer des évaluations structurelles rapides en cas de crise sismique.
- Reconstruction/réorganisation territoriale : la reconstruction et la réorganisation territoriale peuvent être analysées (urbanisme, évolution des normes de génie parasismique ...), en revenant sur des zones déjà visitées par l'AFPS au cours de missions précédentes.
- Sociologie : au cours de la dernière décennie, des spécialistes en sociologie ont rejoint les missions de l'AFPS pour analyser les procédures de gestion de crise et le comportement des personnes pendant la phase de prévention, pendant la crise et après le tremblement de terre.

B- Composition de l'équipe

La participation à une mission post-sismique de l'AFPS est ouverte à tous les membres de l'association. Comme le montre la Figure 4, le nombre de participants peut varier considérablement d'une mission à l'autre, mais les équipes sont généralement composées d'une moyenne de six membres signant une lettre d'engagement. Afin de recueillir un retour d'expérience couvrant plusieurs domaines du génie parasismique, l'Association implique au moins un spécialiste de chaque domaine/sujet, tel que l'aléa sismique, la mécanique des sols, les structures (béton armé, structures en acier et en bois...), la gestion de crise, l'architecture, la réorganisation territoriale, la sociologie (cf. § II.A). Les niveaux d'expérience sont également mélangés afin de promouvoir le transfert de connaissances entre les spécialistes expérimentés et les plus jeunes. La coordination de la mission est assurée par un chef d'équipe qui veille de plus à la réalisation du rapport et à l'organisation d'une restitution publique de la mission.

D'autres personnes peuvent également apporter leur aide à l'équipe pendant ou après la mission (scientifiques, gestionnaires de crise...), par exemple pour aider l'équipe à organiser des visites sur le terrain, pour récupérer des données ou des documents, ou bien encore pour réviser le rapport final. L'assistance fournie par les contacts locaux sur le terrain est essentielle pour la réussite de la mission car elle permet notamment de se concentrer sur les informations intéressantes, d'obtenir si besoin les autorisations pour des investigations (mesures invasives par exemple dans les sols) et de faciliter leur mise en œuvre, et permet entre autre aux participants d'optimiser leurs déplacements sur site.

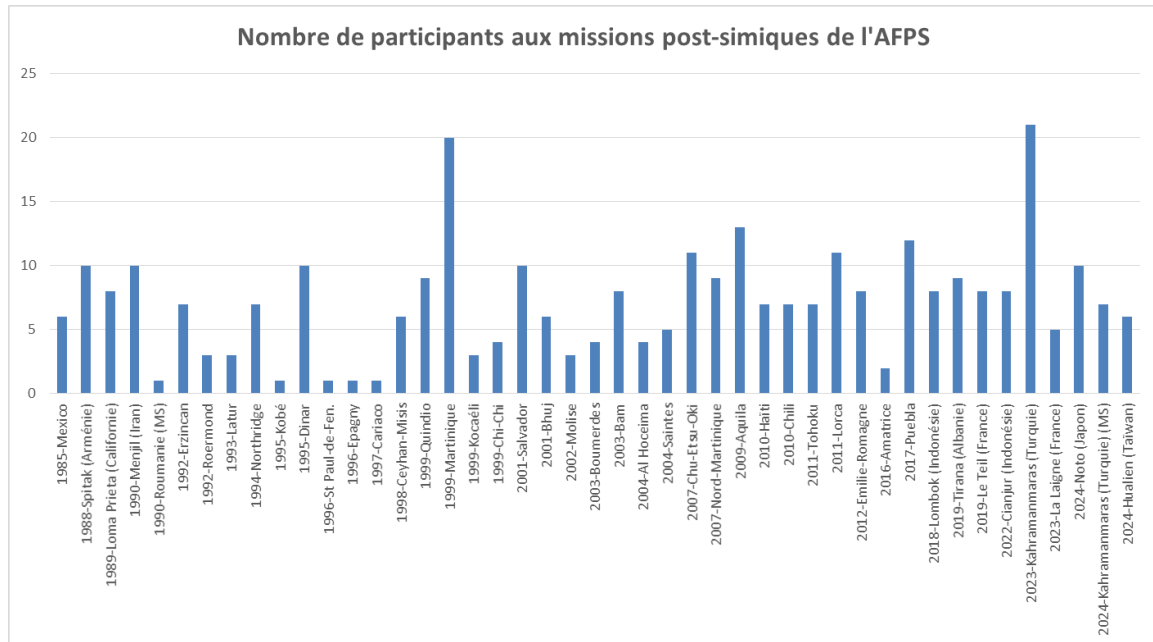


FIGURE 4. Composition des missions de l'AFPS depuis 1985

C- Aspects logistiques

Le voyage dure généralement une semaine et est organisé dans une période comprise entre le premier et le deuxième mois après le tremblement de terre. L'objectif est de se rendre sur place assez rapidement après le tremblement de terre pour inspecter les dégâts avant le début de la reconstruction, et assez tard pour ne pas interférer avec les services de secours.

Pour que le voyage soit efficace, l'équipe peut être divisée en plusieurs sous-groupes qui se rendent sur différents sites et rencontrent différentes personnes. L'hébergement est choisi à proximité immédiate de la zone sinistrée et peut être modifié si nécessaire. Les ingénieurs structurels travaillent généralement dans les centres-villes ou le long des infrastructures concernées. D'autres experts sont équipés pour se rendre dans les régions épacentrales afin d'examiner les ruptures de surface, les glissements de terrain, etc.

D- Sécurité des membres de l'équipe

Aller sur le terrain nécessite de s'approcher des quartiers et de zones sinistrées encore potentiellement instables. Dans les régions susceptibles de subir des répliques, les risques doivent être sérieusement pris en compte et réduits autant que possible. L'Association a publié un livre de sécurité, AFPS (2017), destiné aux membres qui se rendent sur des zones affectées (missions post-sismiques, inspecteurs d'urgence...). Ce livre délivre des conseils pour bien préparer son déplacement et adopter les comportements appropriés lors des inspections ou en cas de répliques. Ce livre de sécurité est disponible en français sur le site web de l'AFPS, et une version anglaise est envisagée (cf. Fig 5). De plus, en amont de chaque mission, une demi-journée dédiée à la sécurité sur le terrain est organisée pour les membres de l'équipe afin de leur rappeler les bonnes pratiques essentielles.



FIGURE 5. Campagne de sensibilisation à la sécurité pour les membres de l'AFPS se rendant dans les zones sinistrées, AFPS (2017)

III. VALORISATION DU RETOUR D'EXPÉRIENCE

Les objectifs du REX ayant été discutés (cf. § I.B), il est important pour l'Association de structurer ces données, d'améliorer leur acquisition, de perfectionner leur analyse et d'optimiser leur capitalisation :

- les missions post-sismiques doivent être optimisées, depuis leur préparation jusqu'à l'exploitation des données recueillies ;
- les pathologies sismiques (sur les bâtiments et si possible sur les équipements) doivent être analysées et recevoir une réponse normative ;
- les missions post-sismiques ne sont utiles que pour assurer l'avancement et la diffusion des connaissances.

A- Rapports d'mission post-sismique de l'AFPS

Après la mission sur le terrain, l'équipe rédige un rapport résumant les observations et les informations obtenues sur le site au cours d'une période prolongée qui dure généralement trois mois.

Au début, les rapports tendaient à être une compilation de rapports intermédiaires rédigés sur une base individuelle par chaque expert, et incluant directement les conclusions intermédiaires de chacun. Depuis quelques années, la rédaction des rapports est assumée de manière très collégiale par l'équipe et toutes les conclusions sont compilées à la fin. Le volume des rapports (nombre de pages constituant le corps du texte et les annexes) peut varier d'une mission à une autre, comme le montre la Figure 6.

Il est à noter que le volume des corps de texte tend à augmenter au cours de la dernière décennie, notamment en raison du développement de la photographie numérique. Le rapport le plus volumineux a été rédigé à la suite du tremblement de terre de Tohoku au Japon en 2011. A cette occasion, l'Association a décidé d'organiser pour la première fois une « mission post-sismique virtuelle », consistant à rassembler autant d'informations que possible provenant d'internet et de rapports publiés par d'autres associations, comme expliqué dans le paragraphe § IV.D.

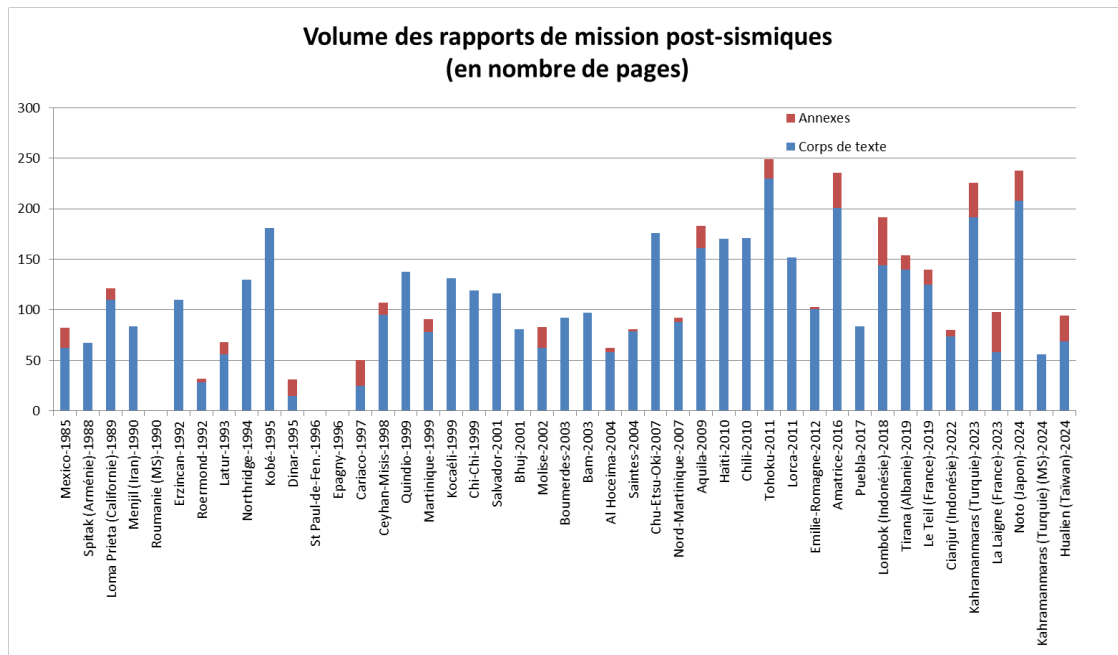


FIGURE 6. Volume des rapports d'études post-sismiques de l'AFPS depuis 1985

Les rapports sont traditionnellement rédigés en français, mais depuis quelques années l'association s'engage à les traduire par des traducteurs spécialisés dans la langue des pays visités et/ou en anglais, afin de toucher un public plus large.

Les rapports des missions post-sismiques de l'AFPS sont publiés sur le site web de l'AFPS, à l'adresse :

<http://www.afps-seisme.org/fre/PUBLI/Rapports-de-missions>

En plus du rapport de mission, pour chaque mission et selon le même modèle, un résumé « A4 » inclut les données essentielles concernant les caractéristiques et les séquences des chocs, les résultats sur les sols, les structures, la société et l'économie. Ce résumé est accompagné d'une liste de mots-clés pour améliorer la recherche d'informations. Chaque résumé est ajouté dans la page du rapport correspondant sur le site web de l'AFPS (cf § III.A). Ce travail a débuté en 2014 et une dizaine de résumés ont déjà été réalisés.

Pour les missions dont la page « résumé » manque encore, le groupe jeune de l'AFPS – créé pour favoriser les échanges entre les membres historiques et la nouvelle génération d'ingénieurs et de chercheurs, et composé de jeunes membres de moins de 35 ans – participe à la relecture de l'ensemble des rapports ainsi qu'à la rédaction de ces résumés. Ce travail constitue une expérience à la fois académique et formatrice. La Figure 7 présente un exemple de résumé de la mission post-sismique rédigé après le séisme de Noto (Japon) 2024.

[Contact](#) | [Mon compte](#) | [Adhérer à l'AFPS](#)

[Missions et organisation](#) | [Risque sismique](#) | [Publications](#)

Rapports de missions post sismiques - 2024 - NOTO (JAPON)

- Dates : 01 janvier 2024 à 16h10 - Heure locale
- Localisation : dans la mer du Japon sur la côte nord-ouest de Honshū (37° 29' 53" N, 137° 14' 31" E).
- Magnitude selon l'échelle de Richter : M7,6 (01/01/2024-JMA) à 10 km de profondeur (USGS).
- Origine et mécanisme sismotectonique : rupture en compression sur une faille orientée NW / NE.
- Profondeur du foyer : 10 à 15 km

Mots clés : Noto-Japon, crise sismique, effets de site, liquéfaction, construction en bois, tsunami

Caractéristiques générales

Le lundi 1er janvier 2024, la péninsule de Noto, au Japon, a été frappée par un séisme de magnitude MJ 7,6 (Mw 7,5-7,6). L'épicentre se trouve à l'extrémité Nord-Est de la péninsule. Ce séisme a été ressenti avec une intensité JMA égale ou supérieure à six (6, 6+ et 7) sur l'ensemble de la péninsule. Le séisme de Noto a provoqué 245 morts et 320 blessés graves. 8 754 bâtiments ont été détruits et 18 986 sévèrement endommagés. Il a généré un tsunami observé sur toute la façade Nord-Ouest du Japon, de Kyushu à Hokkaido. La zone concernée par des dégâts liés au séisme est très grande et de la liquéfaction des sols a été observée jusqu'à Niigata.

Caractéristiques sismologiques

Le séisme du 1er janvier 2024 est le séisme le plus fort connu à ce jour dans la zone de la péninsule de Noto. Le mouvement tectonique associé à ce séisme a entraîné la surrection de toute la péninsule, avec des déplacements verticaux pouvant atteindre 4 m notamment observés par l'assèchement de ports au Nord-Ouest de la péninsule, à proximité de la ville de Wajima. La mission a pu observer des indices de rupture de surface secondaire, en particulier près de Suzu avec des décalages verticaux pouvant dépasser le mètre. Les niveaux de sollicitations enregistrés par les réseaux accélérométriques correspondent dans l'ensemble aux caractéristiques de mouvement attendues pour un séisme crustal de magnitude Mw 7,5 au Japon.

Les accélérations maximales du sol enregistrées sur la péninsule de Noto ont dépassé le g, avec un pic local mesuré à 2 g, à Fouest de la péninsule.

Conséquences structurales et géotechniques

La géomorphologie de la péninsule est constituée de reliefs montagneux traversés par des axes routiers qui desservent de petits bassins sédimentaires où se nichent les principales villes de la péninsule. Des effets de sites sismiques ont été mis en évidence localement en particulier dans les petits bassins sédimentaires, comme au droit de la ville d'Anamizu. D'un point de vue géotechnique, c'est sans doute le phénomène de liquéfaction des sols qui est le plus marquant et qui a particulièrement touché soit des zones anthropiques (zones gagnées sur la mer ; zones où des matériaux sableux ont été mis en remblais comme à Uchinada) soit de petits bassins sédimentaires sensibles au phénomène de liquéfaction des sols en raison de leur nature.

La péninsule de Noto possède de nombreux barrages, gérés principalement par le Département des travaux publics du gouvernement préfectoral d'Ishikawa. Ces barrages ont subi des dommages partiels mineurs, et ont pu assurer leurs fonctions principales de sécurité pendant et après le séisme malgré les fortes sollicitations sismiques.

Conséquences socio-économiques

Le séisme de Noto a provoqué 245 morts et 320 blessés graves. Plus de 18 000 personnes se sont retrouvées sans abris. 83 980 maisons ont été endommagées. Le coût des dommages devrait être compris entre 6,9 et 16,2 milliards d'euros.

RAPPORT
 de la mission post-sismique du séisme du 1^{er} janvier 2024 de Noto (Japon)

Septembre 2024

FIGURE 7. Exemple de résumés d'études post-sismiques publiés sur le site web de l'AFPS

B- Restitutions publiques

L'AFPS organise à l'issue de chaque mission (3 ou 4 mois après la mission) au moins une restitution publique, au cours de laquelle l'équipe présente les observations et les conclusions de son travail et fournit le rapport de la mission. Ces réunions sont conçues pour un large public (membres et non membres de l'AFPS) et durent une demi-journée. Elles se déroulent généralement dans un auditorium du gouvernement français à Paris. Grâce au Ministère de la Transition écologique, de l'Energie, du Climat et de la Prévention des risques, des enregistrements vidéo de certaines restitutions publiques sont disponibles sur YouTube sans restriction à l'adresse suivante : <https://www.youtube.com/@afpsseisme3780/videos>

D'autres sessions peuvent être organisées en fonction des circonstances. A titre d'exemple, une restitution publique a été organisée à la Préfecture de Nice pour présenter la mission post-sismique Amatrice, à l'occasion de la présentation du plan départemental de prévention du risque sismique.

C- Réseau social et site internet

L'AFPS est relativement active sur les réseaux sociaux. Outre la page YouTube mentionnée précédemment et le site internet de l'AFPS (<https://www.afps-seisme.org/>), une page LinkedIn a été lancée depuis la mission d'Amatrice en 2016. Lors de la mission de 2017 au Mexique, l'équipe a été plus largement active sur internet et a publié un « programme en temps réel » sur la page d'accueil du site de l'AFPS et sur LinkedIn, mis à jour

tous les 2 à 3 jours. La couverture des services Internet et les emplois de temps lors des missions peuvent toutefois limiter l'information en temps réel pendant les missions.

Actuellement, l'AFPS utilise les réseaux sociaux et la page d'accueil de son site internet pour partager les infos et des actualités avec la communauté et pour attirer des nouveaux membres. En particulier, pour les missions post-sismiques les réseaux sociaux pourraient être d'une grande importance pour susciter la curiosité de ses membres et les inciter à participer aux prochaines missions, aux restitutions publiques et à lire les rapports.

D- Contribution aux conférences et ateliers

La contribution des équipes des différentes missions aux ateliers et aux conférences mondiales et européennes est également encouragée. A titre d'exemple, le REX de la mission d'Amatrice a été présenté lors de plusieurs événements :

- 9 au 13 janvier 2017 à Santiago du Chili : lors de la 16^e Conférence mondiale de génie parasismique (WCEE), un rapport préliminaire de la mission de terrain a été présenté avant la publication du rapport final.
- 9 au 10 mars 2017 à Rome : les résultats de la mission d'Amatrice ont été présentés lors du deuxième séminaire scientifique du Centre de connaissances pour la gestion des risques de catastrophes, organisé pour discuter de la science au service des politiques et des opérations.
- 18 au 21 juin 2018 à Thessalonique : Le retour d'expérience de la mission Amatrice ainsi que les missions post-sismiques de l'AFPS ont été présentés lors de la 16^e Conférence européenne sur le génie sismique.

Plus récemment, le REX de la mission post-sismique en Turquie a été présenté lors de la 18^e conférence mondiale de génie parasismique (WCEE) du 30 juin au 5 juillet 2024 à Milan en Italie.

E- Publication de livres et de documents techniques

De nombreux ouvrages ont été publiés depuis 1985, s'appuyant sur les études post-sismiques de l'AFPS, comme par exemple AFPS (1990), mentionnées au § I.B, et AFPS (2010), proposant des directives techniques constructives dans les régions sujettes aux tremblements de terre. L'exemple le plus récent et le plus complet de valorisation des études post-sismiques est rassemblé dans le livre de Davidovici (2017), avec une multitude de photos accompagnées d'illustrations sur les dommages structurels.

En plus des livres et des rapports de mission, l'AFPS publie des rapports et guides techniques établis par des experts membres de l'AFPS. Tous ces documents sont accessibles aux membres de l'AFPS via le lien : <https://www.afps-seisme.org/publications-0>.

IV. PERSPECTIVES

A- Réflexions sur le présent et l'avenir

La deuxième génération des Eurocodes est l'occasion de prendre du recul et de faire le point. La valorisation du retour d'expérience post-sismique est encore aujourd'hui essentielle pour de nombreuses raisons :

- la connaissance du retour d'expérience des missions post-sismiques est de plus en plus cruciale aujourd'hui, alors que les outils informatiques avancés peuvent donner l'illusion de la réalité et influencer le jugement des ingénieurs ;
- le retour d'expérience est également fondamental pour acquérir une expertise : les considérations rationnelles et l'expérience de terrain sont essentielles dans tous les domaines technologiques ;
- le retour d'expérience post-sismique couvre un domaine très vaste, comme indiqué précédemment. Les études post-sismiques sont un excellent moyen de promouvoir les échanges entre experts de différents domaines concernant l'ingénierie sismique ;

- les événements sismiques majeurs attirent l'attention des médias et cet intérêt devrait être utilisé pour sensibiliser le public, transmettre des connaissances techniques de base à la population et promouvoir des actions politiques afin d'accroître la préparation et la résilience des pays sujets aux tremblements de terre.

De nombreux retours d'expérience issus des études post-sismiques ont déjà été bien utilisés par la communauté, mais le besoin de former des experts restera toujours le même en raison du renouvellement permanent et nécessaire des générations d'ingénieurs. De plus, les méthodes ou les approches employées lors de missions post-sismiques doivent progresser au même rythme que les connaissances et les nouvelles technologies, et il existe certainement de nombreuses façons d'améliorer l'acquisition, l'analyse et la capitalisation des retours d'expérience. C'est pourquoi l'AFPS maintient sa volonté de poursuivre cette activité et réfléchit à la manière de la renforcer.

La durée des missions sur le terrain, limitée notamment par la disponibilité des participants qui dépend de leurs contraintes personnelles et professionnelles, ne changera probablement pas. Cependant, le contexte des missions post-sismiques peut évoluer de plusieurs manières, comme expliqué ci-dessous :

B- Outils fournis par les nouvelles technologies

Afin d'exploiter pleinement les avancées technologiques des dernières décennies, l'utilisation d'outils récents tels que les drones, les capteurs accélérométriques et vélocimétriques H/V (Horizontal/Vertical), les applications mobiles et les données Internet doit être envisagée. Si cela génère un travail supplémentaire de traitement des données, ces nouveaux outils permettent d'approfondir les analyses de terrain et les études de cas intéressantes. L'étude Mexique 2017 a été l'occasion de mieux établir plusieurs procédures :

- Géolocalisation des photographies (avec GPS, smartphones, etc.) : l'intérêt de sauvegarder les coordonnées GPS directement dans les propriétés du fichier image est de pouvoir les charger facilement sur une carte afin d'analyser la répartition géographique des dommages (pour mettre en avant les effets du site par exemple), de superposer différentes couches d'informations (données sur les mouvements du sol, carte d'intensité et dommages observés). Elle peut également être utilisée pour créer des visites virtuelles à des fins éducatives ou pour des applications de sensibilisation du public, afin de pouvoir revenir en arrière et comparer l'évolution des dommages sur les bâtiments à la suite d'une réplique, ou pour suivre les reconstructions de la ville.
- Capteurs H/V : ce type de technologie est maintenant largement utilisé par les praticiens et peut être administré de manière plus systématique lors de missions post-sismiques. De nombreuses données ont été acquises depuis la mission au Mexique de 2017 et fournissent des informations sur les propriétés des sols à l'emplacement exact des bâtiments observés. Des comparaisons intéressantes ont ainsi été possibles sur des bâtiments de même typologie mais fondés sur des sols différents. Ces capteurs sont désormais également utilisés pour mesurer la fréquence naturelle des bâtiments.
- Scléromètres et appareils Ferroskan : la mission Mexique 2017 a permis d'utiliser ce type d'appareils pour évaluer le taux de renforcement des structures en béton armé. Sans disposer des plans de la structure, ils peuvent fournir des données supplémentaires pour des investigations ultérieures.
- Les drones peuvent également constituer des dispositifs intéressants pour minimiser les risques encourus par les personnes sur le terrain, et peuvent donner des aperçus intéressants sur les quartiers fortement endommagés, sur les zones inaccessibles (par exemple les clochers des églises), sur les glissements de terrain, etc. L'utilisation de drones peut nécessiter une autorisation spéciale en fonction de la législation du pays ou même être interdite. Toutes ces activités doivent être menées à bien lors de la planification de la mission.

- Caméra 360 : les prises de vues par caméra 360 d'ouvrages endommagés permettent de renforcer la pédagogie utilisée dans la formation des inspecteurs de diagnostic d'urgence post-sismique à travers des exemples permettant la réalisation de visite virtuelle.

La base de données issue des études passées et futures doit être structurée, car la quantité de données à enregistrer augmente continuellement, et doit toujours rester disponible. Cette base de données sera structurée sur deux niveaux : les données compressées seront téléchargées sur le site Internet de l'AFPS, et les données de haute qualité seront sauvegardées sur un serveur spécial.

C- Formation des inspecteurs d'urgence

'Ce type de mission d'enseignement est également un moyen important d'analyse de la gestion de crise et plus particulièrement les phases d'évaluations post-sismiques des bâtiments en situation d'urgence. Depuis la création du dispositif français pour les diagnostics d'urgence post-sismique créée par l'AFPS en 2006, toutes les missions post-sismiques ont été l'occasion de comparer la procédure, la méthodologie et les outils à ceux intégrées au Plan national de gestion des risques depuis 2014 [Convention entre la Direction Générale de la Sécurité Civile et de Gestion de Crise et l'AFPS]. C'est aussi une bonne occasion de recueillir des reportages à vocation pédagogique sur la reconnaissance et l'évaluation de la gravité des dommages réels, et de se confronter à l'application de la procédure d'évaluation avec la fiche de visite présentée à la Figure 8.

The image shows two forms from the AFPS (Association Française pour la Prévention des Risques Sismiques) used for post-sismic emergency diagnosis. The left form, titled 'DIAGNOSTIC POST-SISMIQUE D'URGENCE - FICHE D'ÉVALUATION RAPIDE DU NIVEAU DE DOMMAGES', contains general information such as inspection date, location, building type, and inspector details. It includes a 'CHAMP DE L'INSPECTION' section with a grid for structural and non-structural elements. The right form is a more detailed 'FICHE D'ÉVALUATION RAPIDE DU NIVEAU DE DOMMAGES' with a grid for assessing damage levels (Non, Modéré, Sévère, Étriqué) for various structural and non-structural elements. The grid uses a color-coded system (green, yellow, orange, red) to indicate the severity of damage.

FIGURE 8. Formulaire de l'AFPS pour le diagnostic post-sismique d'urgence

La constitution de visite virtuelle de bâtiments endommagés suite à la prise d'image 360 sera ainsi utilisée pour la formation à l'habilitation des inspecteurs du Dispositif Urgence de l'AFPS. Un exemple de page d'accueil est présenté sur la Figure 9.

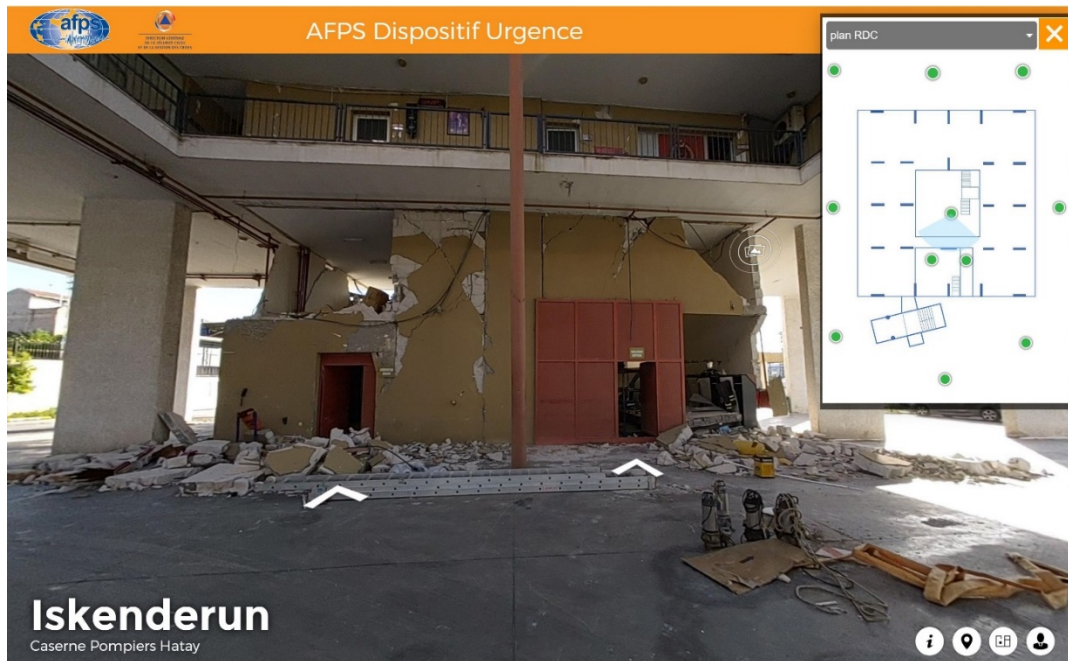


FIGURE 9. Visite virtuelle d'une caserne de Pompiers à Iskenderun après le séisme de Turquie du 6 février 2023

D- Missions post-sismiques virtuelles

Internet est une autre source importante de données généralement dispersées et incomplètes. Peu de sites web peuvent être simplement référencés, mais les données provenant de nombreux autres sites doivent être acquises, intégrées et post-traitées.

Ce type d'étude a été testé après le tremblement de terre de Tohoku (Japon) en 2011. Les études post-sismiques virtuelles peuvent être efficaces pour obtenir des informations dans les pays très développés en raison de leur grande capacité à acquérir et à restituer des informations (images datées disponibles sur Google Earth, enregistrements aux stations sismiques...). La durée des études virtuelles est différente de celle des études sur le terrain et est conditionnée par l'arrivée des informations : l'étude post-sismique de Tohoku qui a duré un an par exemple aurait pu durer plus longtemps en raison de l'arrivée continue d'informations. Les questions de droits d'auteur peuvent par ailleurs constituer une limitation de l'utilisation des images ou des publications trouvées sur Internet.

En général, une telle étude virtuelle ne peut pas remplacer l'étude réelle sauf dans des cas bien spécifiques. Les principales raisons sont : (a) le manque de détails, qui ne peuvent pas être facilement reconnus et rapportés par des non-experts et (b) le fait que tout expert, avec ses connaissances et sa perception, peut tirer ses propres conclusions une fois qu'il a inspecté directement un scénario complexe.

E- Missions post-sismiques longue durée

À la suite de la mission post-sismique réalisée après le séisme de Kahramanmaraş (06/02/2023, Turquie), qui s'est déroulée du 31 mars au 9 avril 2023, l'AFPS a mis en place, avec ses membres, des missions de longue durée en Turquie. Ce type de mission vise à approfondir, d'une part, les observations réalisées lors de la mission post-sismique initiale, et d'autre part, à renforcer les collaborations avec les organismes de recherche et les structures techniques locales.

Ce type de mission longue durée offre l'opportunité d'effectuer des études approfondies sur des phénomènes complexes tels que le comportement des sols, la résilience des structures face aux tremblements de terre, ainsi

que l'évolution des risques sismiques dans diverses régions. Ces missions facilitent également la collecte de données permettant de mieux comprendre les effets des répliques et d'améliorer les stratégies de prévention pour les futures crises. Elles favorisent également la mise en place de partenariats solides avec les chercheurs locaux, contribuant ainsi à l'échange de connaissances et à l'amélioration continue des pratiques de gestion des risques.

Un exemple est donné par la mission réalisée en mai 2024 dans la ville de Gölbaşı (province de Adıyaman) fortement endommagée par le phénomène de liquéfaction des sols durant la séquence sismique du 6 février 2023. Des reconnaissances géotechniques et géophysiques ont été réalisées en étroite collaboration et avec la participation sur le terrain d'une équipe du Middle East Technical University (METU) d'Ankara. Ces recherches partagées avec le METU visent notamment à mieux comprendre l'influence des différents facteurs de site qui ont pu amplifier l'occurrence de ce phénomène.

Cette mission a aussi été l'occasion d'utiliser de nouvelles technologies pour étudier les sols en profondeur. Comme à la suite des opérations de secours, l'accès aux zones sinistrées et la possibilité de réaliser des investigations en profondeur sont souvent restreints, voire impossibles avec des moyens conventionnels, il existe un besoin croissant de techniques alternatives basées sur des équipements légers, sophistiqués et rentables. Le pénétromètre dynamique à cône instrumenté à énergie variable (iDCPT) combiné à l'analyse multicanal des ondes de surface (MASW) et aux mesures du bruit ambiant (HVSr) est un exemple d'alternative moderne, permettant des mesures verticales et horizontales à haute résolution avec un équipement minimal, transportable par avion.

V. CONCLUSIONS

Les retours d'expérience des missions post-sismiques ont constitué la base de données sur laquelle ont été élaborées les dispositions les plus importantes pour la rédaction des normes françaises, et plus récemment des normes européennes, de génie parasismique.

L'objectif des missions post-sismiques est de collecter, directement sur le terrain, un maximum d'informations factuelles concernant l'événement ou les événements (séquence sismique), d'acquérir de nouvelles connaissances et de promouvoir des recommandations préventives issues de ce retour d'expérience dans le but de réduire les impacts des effets des tremblements de terre dans des conditions similaires.

L'Association Française du Génie Parasismique (AFPS) considère comme une priorité l'organisation de missions post-sismiques, le partage des enseignements tirés du terrain et la formation des jeunes membres. Depuis 1985, 36 missions post-sismiques ont été organisées, et il est nécessaire de structurer en permanence les données de retour d'expérience, d'améliorer leur acquisition, d'affiner leur analyse et d'optimiser leur capitalisation.

Les méthodes d'études post-sismiques doivent progresser au même rythme que nos connaissances. C'est pourquoi l'Association maintient sa volonté de poursuivre cette activité et réfléchit à la manière de la faire évoluer, notamment avec l'application des nouvelles technologies. Chaque étude favorise la mise en œuvre des améliorations techniques, et les missions post-sismiques de Lorca (Espagne) en 2011, de Puebla (Mexique) en 2017 ou de Kahramanmaraş (Turquie) en 2022 puis 2024 ont été l'occasion de réaliser des essais in-situ.

Les pays européens ont souhaité harmoniser les normes de construction. Ces considérations ont conduit à l'avènement de la première norme sismique européenne, l'Eurocode 8. Une autre possibilité de développer les études post-sismiques consiste à organiser des études européennes et à constituer une base de données de retours d'expérience mutuels.

VI. REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement tous les participants aux missions post-sismiques de l'AFPS (membres des missions, contacts locaux qui ont apporté leur aide aux équipes de l'AFPS), pour avoir recueilli et partagé les retours d'expérience acquis sur le terrain depuis 1985. Nous remercions également tout particulièrement les participants aux missions d'Amatrice en 2016 et du Mexique en 2017, ainsi que le groupe des jeunes de l'AFPS qui participe activement au renouvellement des missions post-sismiques de l'AFPS.

REFERENCES

AFPS (1990). Recommandations AFPS 90

AFPS (2017). Livret de sécurité AFPS, version 1.

Davidovici V, (2017). Conception – construction parasismique, AFNOR Editions.

AFPS (2010), Dispositions constructives parasismiques des ouvrages en acier, béton, bois et maçonnerie, nouvelle édition conforme aux Eurocodes, Presse des ponts

Les rapports d'études post-sismiques de l'AFPS sont publiés sur le site web de l'AFPS, à l'adresse : <https://www.afps-seisme.org/publications/rapports-de-missions-post-sismiques>