



Generalitat de Catalunya  
**Institut Cartogràfic de Catalunya**

**Visite technique à la zone endommagé par le séisme  
d'Al-hoceima du 24 février 2004**

*X. Goula i M. González*

*Mars 2004*

Rapport : GS-192/04 (fr)

## Index

- Présentation
- Contexte sismotectonique
- Rupture sismique
- Enregistrement de fortes répliques
- Visite des zones endommagées
- Analyse préliminaire
- Considérations finales

## PRÉSENTATION

Du 4 au 9 mars, a eu lieu une visite technique à la zone affectée par le tremblement de terre du 24 février de Mw=6.5 dans le but de:

- enregistrer les répliques de forte magnitude à proximité,
- réaliser des mesures de bruit de fond afin de caractériser la période fondamentale des sols et l'éventuelle relation avec les dégâts observés,
- observer et analyser les dégâts les plus significatifs,
- rechercher l'existence de ruptures de surface.

La visite a été financée par l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) de la Generalitat de Catalunya. L'équipe technique était formée par des scientifiques de l'ICC, du Centre de Recerca en Ciències de la Terra (CRECIT) de l'Institut d'Estudis Andorrans (IEA), de l'Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) et de RSE Aplicaciones Territoriales S.A. Elle a également compté avec le soutien et la collaboration de l'Institut Européen de la Méditerranée, du Département de Physique du Globe de l'Université Mohammed V de Rabat, des représentations diplomatiques espagnoles au Maroc et marocaines en Espagne, ainsi que de l'Ambassade d'Andorre à Madrid. Nous remercions les gestions réalisées par ces organismes pour nous faciliter l'entrée au pays.

Les personnes qui ont intégré la mission ont été:

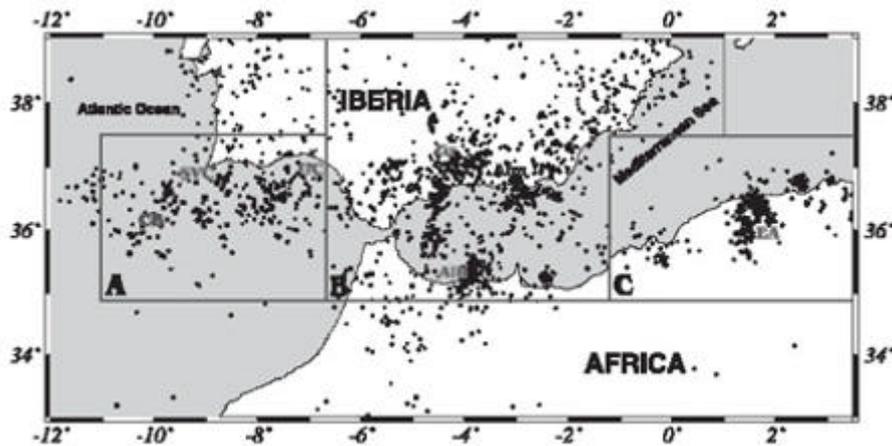
- Xavier Goula: docteur en Physique et responsable de sismologie à l'ICC,
- Marta González: géologue et chef des projets du CRECIT de l'IEA,
- Antoni Marcé: technicien électronique de RSE Aplicaciones Territoriales S.A.
- Asbai ElHassan: géologue et étudiant en doctorat à l'UPC.



## CONTEXTE SISMOTECTONIQUE

Le séisme s'est produit au niveau de la côte nord du Maroc, près de la ville d'Al Hoceima, de  $M_w=6.5$  selon le CSEM (European-Mediterranean Seismological Centre) et à une profondeur superficielle de moins de 10 km selon les agences marocaines SPGM et CNRM.

Le tremblement de terre se situe à la limite des plaques ibérique et africaine, en sa partie centrale (Figure 1). Cette zone est caractérisée par une sismicité plus diffuse qu'au niveau des deux zones voisines du Golfe de Cadix à l'ouest et d'Algérie à l'est. De récentes études (Bufoin *et al.*, 2004) ont mis en évidence une déficience de sismicité au cours du XX<sup>ème</sup> siècle en ce qui concerne les deux zones voisines, qui pourrait être interprétée comme une période anormale de quiétude sismique. Antérieurement, au long du XIX<sup>ème</sup> siècle, deux tremblements de terre de magnitude  $M>6$  à effets destructeurs eurent lieu au sud de l'Espagne (en 1829 et 1884).



**Figure 1.** Limite des plaques ibérique et africaine, en sa partie centrale (Bufoin *et al.*, 2004).

Au même endroit, en l'an 1994 (Bezzegoud and Bufoin, 1999) s'est produit un séisme de magnitude proche de 6, avec cependant moins de dégâts que ceux produits par l'actuel tremblement de terre du mois de février 2004.

À l'échelle régionale, les informations plio-quadernaires se localisent à la périphérie du Rif, en particulier près de la côte, où les déformations tectoniques ont été davantage étudiées (J.L. Morel (1988, 1994) et L. Ait Brahim (1990, 1991, 1997)).

Les types de structures associées aux déformations les plus remarquables (Figure 2) sont:

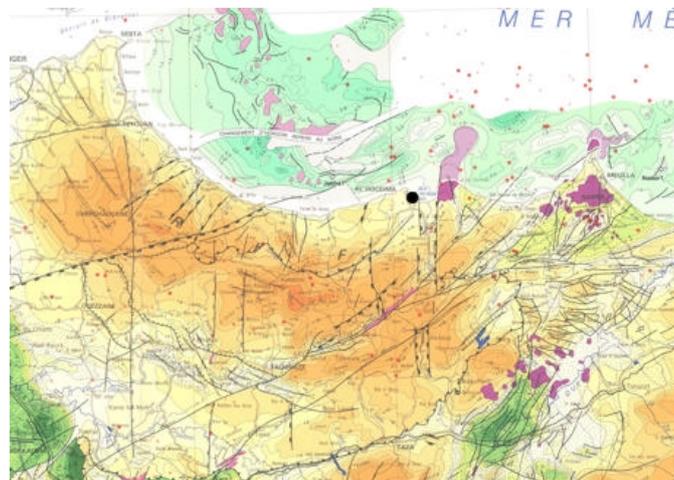
- les grandes failles de coulissage sénestres et inverses NE-SW (Al Hoceima, Nekor, Saïss, Melilla),
- les chevauchements, correspondant à des rampes émergentes (Rif interne/externe, chevauchement frontal du pré-Rif), limités ou coupés par les failles de coulissage antérieures,
- les plis de grand rayon (Ketama, région de Tanger),

- un système de failles normales néoformées, délimitant des zones d'enfoncement du recouvrement quaternaire (graben d'Al Hoceima, avec des épaisseurs de dépôts allant jusqu'à 400 m).

Les failles principales semblent être organisées en fonction des grandes failles en direction et affectant probablement toute la croûte, comme celles de Jebha et celles du système Al Hoceima/Nekor/Saïss/Melilla dans un champ de contraintes compressif N-S à NW/SE.

## RUPTURE SISMIQUE

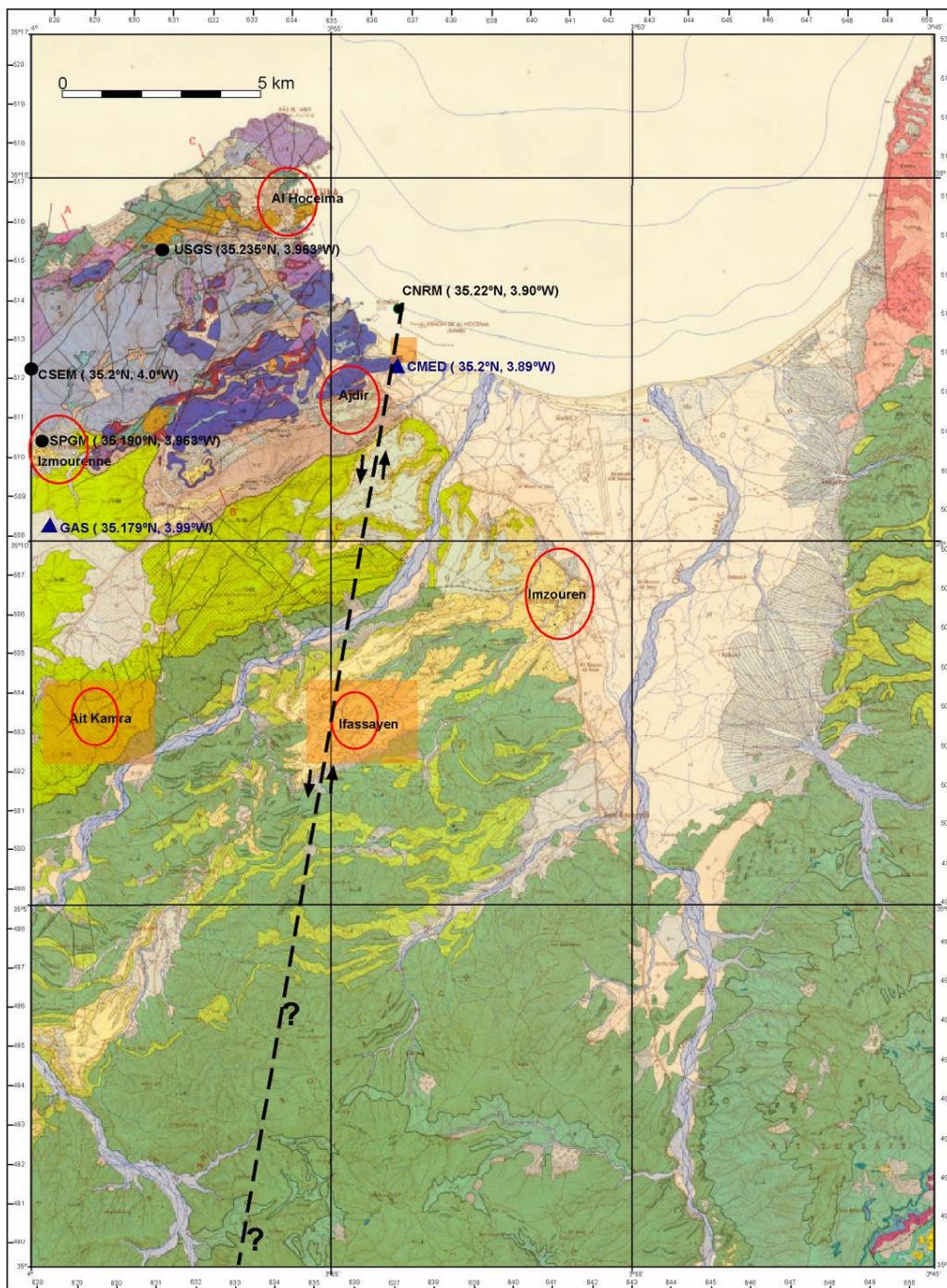
Le mécanisme focal obtenu par différents centres représente un mouvement de coulissage sénestre de direction entre subméridienne et N 20° E, qui correspond avec les directions des principaux accidents reconnus en cette partie du Rif (Figure 2).



**Figure 2.** Carte tectonique de la zone (Carte Néotectonique du Maroc, 1994)

Sur la carte géologique régionale à échelle 1:50.000 (Figure 3), ont été représentées les positions des différentes localisations du tremblement de terre, principal données par différents centres:

<b>CSEM</b>	35.2° N	4.0° W	European-Mediterranean Seismological Centre
<b>USGS</b>	35.235° N	3.963° W	National Earthquake Centre, USA
<b>IGN</b>	35.142° N	3.997° W	Instituto Geográfico Nacional, España
<b>SPGM</b>	35.190° N	3.996° W	Centre de Physique du Globe, Rabat Agdal, Maroc
<b>CNRM</b>	35.22° N	3.90° W	Centre National de la Recherche Scientifique et Technique, Rabat, Maroc



**Figure 3.** Carte géologique du Rif 1:50.000 (Service Géologique du Maroc, 1984). Les points noirs représentent les positions des différentes localisations du tremblement de terre principal, données par différents centres. Les triangles bleus indiquent les emplacements des accélérographes, les cercles rouges, les zones où ont été réalisées les observations des bâtiments, et les carrés oranges, les zones où ont eu lieu les observation de terrain. Le trait noir discontinu représente le possible tracé de la faille.

La longueur de la rupture, selon les relations empiriques acceptées, pour un séisme de  $M_w=6.5$ , correspond à 20-30 km et le saut horizontal de faille à environ 1 mètre.

Les observations de terrain réalisées par nous et par différentes équipes (communication personnelle de Ben Brahim, après une visite sur le terrain et un vol en hélicoptère) n'ont pas permis d'indiquer l'existence de ruptures de surface.

En revanche, nous avons pu mettre en évidence l'existence de petites fissures d'ordre centimétrique, qui peuvent se suivre sur le terrain le long de centaines de mètres en différents endroits. Sur la carte de la figure 3, nous y avons indiqué nos observations près de la plage du Club Méditerranée et au niveau de la région d'Ifassayene (photos 1 à 4). Très probablement, ces fissures se sont produites au-dessus de la rupture sismique, puisqu'elles suivent des directions proches de celle de la faille donnée par le mécanisme focal, c'est à dire environ entre N-S et N 20° E.



**Photo 1.** Observations des fissures près de la plage du Club Méditerranée. Situation sur la figure 3.



**Photo 2.** Observations des fissures près de la plage du Club Méditerranée. Situation sur la figure 3.



**Photo 3.** Observations des fissures au niveau de la région d'Ifassayene. Situation sur la figure 3.



**Photo 4.** Observations des fissures au niveau de la région d'Ifassayene. Situation sur la figure 3.

## ENREGISTREMENT DE FORTES RÉPLIQUES

Du 4 mars à 20 h au 9 mars à 10 h, deux accélérographes K2 ont été en fonctionnement: au Club Méditerranée (CMED) près de la plage, et au niveau de l'installation GPL d'Izmourenne (GAS) (figure 3 et photos 5 et 6).

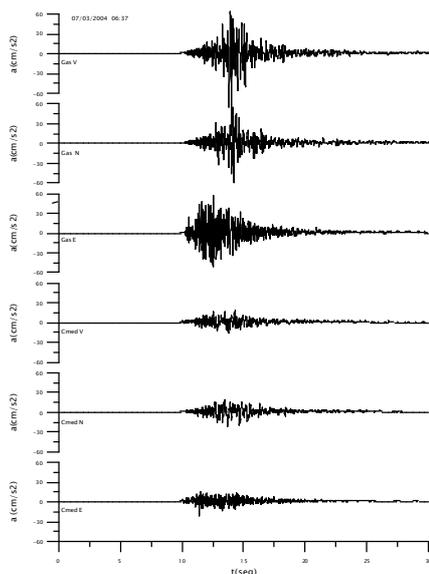


**Photo 5.** Site de l'accélérographe GAS au niveau de l'installation de GPL d'Izmourenne.

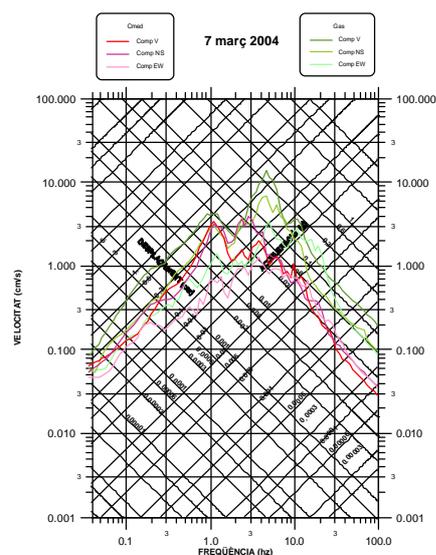


**Photo 6.** Site de l'accélérographe CMED au Club Méditerranée.

Au long de cette période, une centaine de répliques ont été enregistrées, la majorité de  $M > 3$  et une de  $M = 5$  le 7 mars à 6h38, pour laquelle, les enregistrements et les spectres de réponse (figures 4 et 5) sont présentés. L'épicentre de cette réplique était située près de l'épicentre du séisme principal selon les différences de temps S-P observées sur les accélérogrammes. Il faut signaler que le mouvement le plus intense fut enregistré par l'accélérographe le plus éloigné de l'épicentre, près d'Izmourenne (GAS), situé sur des sédiments quaternaires, avec un pic d'accélération supérieur à 0.1 g. L'accélérographe CMED était situé sur un affleurement calcaire.



**Figure 4.** Enregistrement du tremblement de terre du 07/03/2004 de magnitude 5 aux stations GAS et CMED.



**Figure 5.** Spectres de réponse du tremblement de terre du 07/03/2004.

Les temps d'arrivée de ces enregistrements seront utiles aux localisations précises des répliques, de façon conjointe avec les données d'autres institutions.

## VISITE DES ZONES ENDOMMAGÉES

Les noyaux urbains les plus importants de la région affectée par le tremblement de terre et différentes zones rurales ont été visités (voir la carte de la figure 3).

### Al Hoceima

Ville avec beaucoup de constructions de l'époque coloniale espagnole, avec une population urbaine d'environ 70.000 habitants. La ville est située sur un affleurement rocheux, et malgré être située à moins de 10 km de l'épicentre du séisme principal, les dégâts sont légers. Il n'y a pas eu de collapsus, ni de graves dégâts. Cependant, beaucoup de bâtiments de bonne qualité (type C) présentent des fissures et des dégâts de degré 2. Il est possible que l'intensité EMS ait été de VI ou VII. Comme cas particulier, il faut citer l'Hotel Mohammed V, construit à l'époque de la présence espagnole, qui ne révèle aucun endommagement majeur.

La multiplicité des répliques fait que la population ne se sente pas en sécurité chez elle et dort dans des tentes, installées même à la place majeure de la ville (photo 7).



**Photo 7.** Campement à la place majeure d'Al hoceima.

### Imzouren

Ville quasiment aussi importante qu'Al Hoceima, mais à caractéristiques constructives et de situation très différentes. La ville s'étend au long de 3 km de la marge gauche de l'Oued Nekkour et occupe une partie de la plaine alluviale récente et des terrasses plus anciennes (de faible orographie) de l'Oued Nekkour et de l'Oued Rij (figure 3), formées par des conglomérats, grès et limons d'âge Pliocène.

C'est une ville où, récemment, l'argent de l'émigration en Europe ont été investis en de multiples bâtiments de RdC + 2, 3 ou 4 niveaux. Ce sont des bâtiments à pilier et poutre en béton avec des finitions de maçonnerie, comme on trouve en de nombreuses zones d'Espagne.

Les infrastructures sont rudimentaires, par exemple, la majorité de rues ne sont pas goudronnées, il n'y a pas de réseau d'égouts, les constructions autour du centre ne suivent aucun ordre et s'enfilent sur les collines se rapprochant des zones rurales, etc.

Des bâtiments très endommagés sont observés (effondrement d'une trentaine de constructions) et d'autres sont en bon état.

L'Agence Régionale d'Urbanisme, avec le soutien de l'ONG française Architectes d'Urgence, portait à terme le recensement des bâtiments endommagés. Nous eûmes l'opportunité de réaliser plusieurs rencontres et réunions avec eux, que nous expliquons dans le paragraphe qui suit.

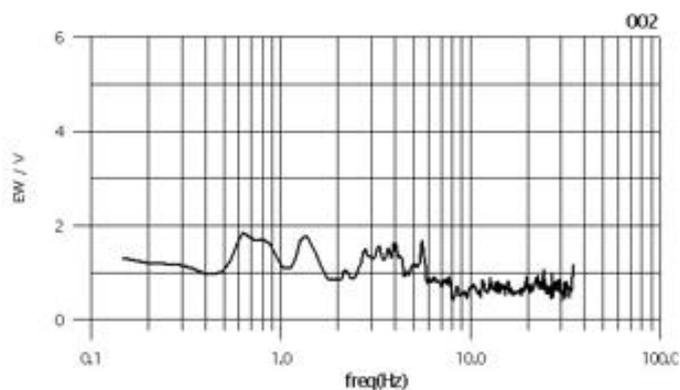
Il est très difficile d'attribuer une valeur d'intensité à la ville, étant donné la forte dispersion observée : dégâts 5 aux constructions de type B et même C, et dégâts 0 pour beaucoup de constructions de type C (ou B). Il faudra attendre le résultat du travail effectué par l'Agence Régional pour obtenir la distribution totale des dégâts.

Il est possible que la présence de sols pas très consolidés et que quelques pratiques constructives jouent un rôle important dans cette distribution.

Afin de contribuer à donner une explication à la distribution des dégâts, au cours de la visite ont été enregistrés des microtremors sur environ 10 points de la ville, caractérisés par l'existence de dégâts de différent degré : de 0 à 5, et en différents quartiers de la ville. Voici trois figures présentant des mesures effectuées devant deux bâtiments effondrés et un autre sans dégâts apparents (photos 8, 9, 10, 11, 12, 13 et figures 4, 5 et 6). La tendance des relations spectrales (méthode de Nakamura) no semblent pas très révélatrices de grandes amplifications, à teneur des premiers résultats obtenus.



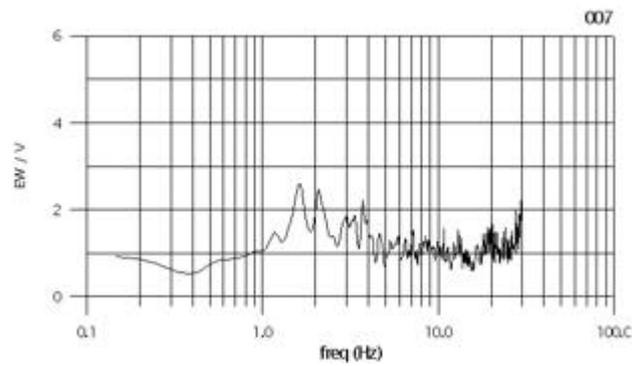
**Photos 8 et 9.** Deux vues du collapsus d'un bâtiment où une mesure de bruit sismique fut effectuée (degré de dégâts 4-5). Situation sur la figure 3.



**Figure 4.** Graphique avec la relation spectrale de la mesure prise au niveau des photos 8 et 9.



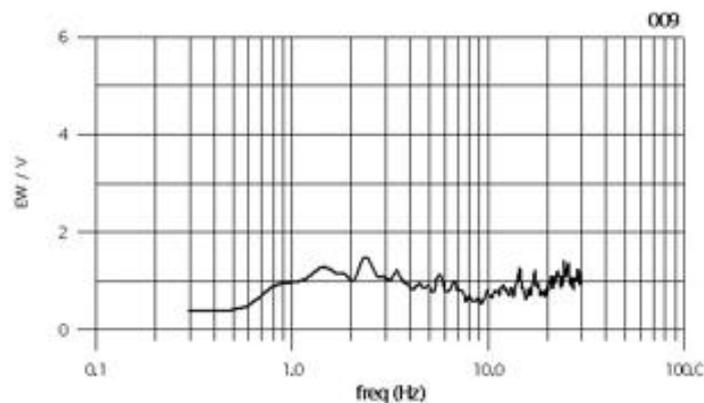
**Photos 10 et 11.** Deux vues du collapsus d'un autre bâtiment où une mesure de bruit sismique fut également effectuée (degré de dégâts 4-5). Situation sur la figure 3.



**Figure 5.** Graphique avec la relation spectrale de la mesure prise au niveau des photos 10 et 11.



**Photos 12 et 13.** Essais de mesure de bruit sismique en une rue adjacente à la situation des photos antérieures. Les bâtiments semblent être entiers. Situation sur la figure 3.



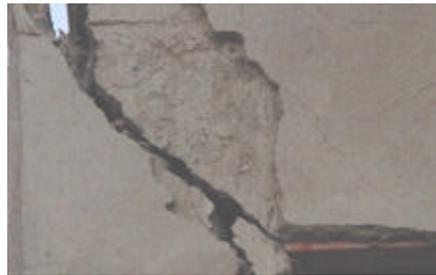
**Figure 6.** Graphique avec la relation spectrale de la mesure prise au niveau des photos 12 et 13.

## Ajdir

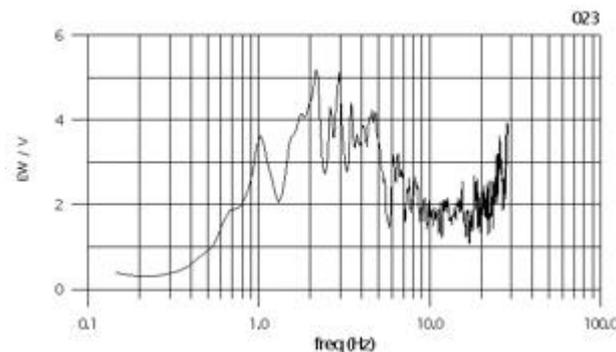
Il s'agit d'une agglomération urbaine plus petite et dispersée que l'antérieure, également située sur les terrasses des Oueds mentionnés et plus près de l'épicentre et de la probable faille à l'origine de la crise sismique. Les dégâts semblent importants et plus uniformes. Beaucoup de bâtiments très endommagés ont été vus (degré 3 ou 4) et de bonne qualité apparente (C). Des mesures de microtremors été réalisées devant différents bâtiments (photos 14, 15, 16 et figure 7). L'intensité semble être supérieure au degré VIII.



**Photos 14 et 15.** Bâtiment à piliers écrasés. Détail des dégâts. L'intensité semble être supérieure au degré VIII. Situation sur la figure 3.



**Photo 16.** Détail des dégâts.  
Situation sur la figure 3.



**Figure 7.** Graphique de relation spectrale de la mesure prise au niveau des photos 14, 15 et 16.

### Izmourenne

C'est une agglomération à moitié urbaine et à moitié rurale, située en hauteur, en dehors de la plaine des Oueds, sur des terrains formés par des grès des manteaux de "flysch" et en présence de cônes de déjection importants. Les dégâts semblent y être également importants. Des mesures de microtremors ont été réalisées devant quelques constructions (photos 17 et 18, figure 8).



Photos 17 et 18. Dégâts à la mosquée d'Izmourenne. Situation sur la figure 3.

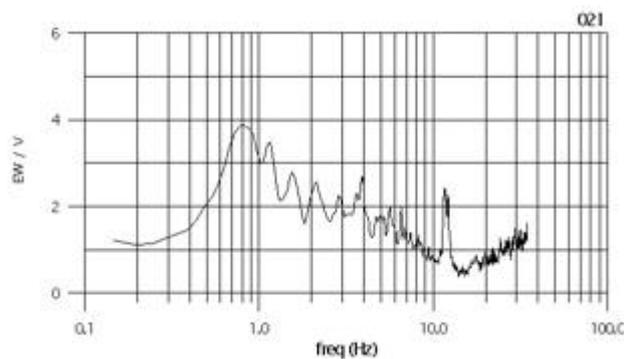


Figure 8. Graphique avec la relation spectrale de la mesure prise au niveau des photos 17 et 18.

### Zones rurales d'AitKamra et d'Ifassayenne

Il s'agit de deux zones caractéristiques d'une grande superficie située près de la rupture sismique, où ont été observées des fissures sur le terrain qui peuvent indiquer l'existence de la rupture à proximité. En ces zones ont été observés les collapsus de beaucoup de maisons à un seul étage, de construction traditionnelle et pierre et boue. Leurs situations sont très dispersées sur le territoire, il n'y a pas de noyau urbain proprement dit. Ces au niveau de ces zones qu'il y a eu le plus de victimes causées par l'effondrement des lourdes toitures. Il y a de nombreux dégâts de degré 5 en ces constructions de type A (photos 19 et 20).



**Photos 19 et 20.** Exemple de dégâts de degré 5 en des constructions de type A.  
Situation sur la figure 3.

### **Barrage de Mohamed Abde El Karim El Khatabi**

Il s'agit d'un barrage de terre situé sur l'Oued Nekkour à environ 20-30 km de l'épicentre. Selon le responsable de l'Office d'Hydraulique d'Al Hoceima, le barrage n'a pas souffert d'endommagements. L'accélérographe du barrage avait enregistré le tremblement de terre principal avec une accélération proche de 0.20 g.

### **Installation de liquation de gaz GPL à Izmourenne**

Il s'agit d'une installation de liquation de gaz pour la recharge des bombonnes à usage domestique, correspondant au site de l'accélérographe GAS. Il existe un réservoir de 2.000 m<sup>3</sup>, qui est supporté par 8 piliers d'1 m de diamètre enfoncés 8 m sous-terre. Le réservoir a bien résisté à la secousse, selon le responsable de l'installation, Mr. Temsmani Mohammed. Malgré la perte de fluide électrique durant plus de 36 h, les tâches d'entretien se firent manuellement. Une certaine inquiétude se faisait ressentir en ce qui concerne l'état de quelques constructions de machinerie qui, au passage des différentes répliques, allaient en se dégradant.

## **ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES OBSERVATIONS RÉALISÉES**

### **En ce qui concerne la rupture sismique**

La rupture semble s'être initiée à peu de kilomètres de la côte près du "Peñón de Ahucemas". Ces indications sont corroborées par l'épicentre déterminé par le CNRM, qui est l'unique centre avec des données de stations très proches. La rupture semble s'être propagée le long d'environ 20-30 km en une direction SSW, sans avoir mis en évidence, jusqu'à maintenant, des ruptures de surface, mais quand même, diverses fissures trouvées près de la plage du Club Méditerranée et en quelques autres endroits, comme à Ifassayenne.

### **En ce qui concerne l'enregistrement de fortes répliques**

Plus d'une centaine de répliques ont pu être enregistrées par les deux accélérographes situés près de la rupture sismique, quelques-unes d'entre elles de forte magnitude. L'analyse préliminaire des enregistrements d'une réplique de  $M = 5.0$  montre une forte amplification au niveau de la zone montagneuse d'Izmourenne, en raison de la présence de sédiments quaternaires. Ces enregistrements seront également utiles à la détermination précise de la localisation des répliques, de façon conjointe avec les données d'autres stations, ainsi qu'à la détermination précise de la géométrie de la rupture.

### **En ce qui concerne l'enregistrement de « microtremors »**

Selon les premiers résultats obtenus, les relations spectrales entre composantes horizontales et verticales des enregistrements de microtremors (méthode de Nakamura), semblent indiquer de fortes amplifications au niveau des zones d'Ajdír et d'Izmourenne. Les premiers résultats des mesures réalisées à Imzouren ne montrent pas de variations qui pourraient expliquer les différences de dégâts observés en différents endroits.

### **En ce qui concerne les anomalies constructives**

L'observation des dégâts et les diverses réunions réalisées avec les équipes d'architectes de l'Agence Régionale d'Urbanisme et d'Architectes d'Urgence, nous amènent à commenter les aspects suivants:

- L'auto-construction semble être le principal problème qu'il faut mentionner en ce qui concerne les dégâts observés, en particulier à la ville d'Imzouren. Malgré l'existence de Règles Parasismiques, de nombreux bâtiments ont été faits par des constructeurs locaux sans intervention d'architectes ni aucun calcul d'ingénieurs. Dans beaucoup de cas, même le propriétaire vit à l'étranger et les intermédiaires ne prennent pas vraiment soin de la qualité des constructions. C'est un problème difficile à éliminer de façon brutale, selon l'opinion de l'Agence.
- La qualité des matériaux de construction utilisés n'est pas suffisante : qualité du béton, qualité et quantité du ferrailage qui relie le béton, séparation trop grande entre les renforcements horizontaux, piliers de section trop fins, même de 0,20 m.
- Absence de réglementation concernant le contrôle de qualité. Il faut signaler, par exemple, l'existence d'un seul laboratoire d'analyse du béton dans la région.
- Les responsabilités sont floues au niveau des textes légaux.

## CONSIDÉRATIONS FINALES

Sur la visite technique à la zone endommagée par le tremblement de terre d'Al Hoceima, nous avons pu extraire quelques considérations, la majorité déjà connues, mais qui sont souvent oubliées:

1. La correcte application des Règles de Construction Parasismique est d'une importance vitale, et ceci d'autant plus dans des pays de sismicité modérée dans lesquels il n'y a pas de culture sismique développée, ni en ce qui concerne les administrations, ni entre la population. L'aménagement du territoire est primordiale dans le but de prévenir ces désastres. Une fois connus les endroits où se trouvent les sources sismiques, il faut éviter le développement des populations en leurs alentours, et si elles s'y font, il faut respecter les normes constructives.
2. Il est d'une importance capitale faire de bons conceptions structurales des édifications et utiliser des matériaux de bonne qualité dans l'exécution des chantiers. Il est très important d'établir des organes de contrôle des processus constructifs.
3. Les études géotechniques sont un outil fondamental pour les architectes et ingénieurs, puisqu'elles donnent une bonne connaissance des caractéristiques du sous-sol et de son comportement qui joue souvent de façon défavorable en amplifiant le mouvement sismique.
4. Il y a un manque important de connaissance du phénomène sismique entre la communauté technique du bâtiment chargés de l'édification ainsi que de l'évaluation de l'état des bâtiments après le séisme.
5. Il s'avère nécessaire de créer des groupes multidisciplinaires qui aident dans le champ de l'ingénierie sismique à la prévention des catastrophes. Il est nécessaire d'avoir une forte interaction entre scientifiques, connaisseurs du phénomène et les différents secteurs en relation avec la prévention.
6. En zones de sismicité modérée, il existe des outils comme les simulations de scénarios de dégâts qui peuvent aider à la préparation de l'émergence. Il serait également nécessaire dans ces zones, d'avoir des formulaires préparés afin de pouvoir élaborer rapidement une enquête sur les bâtiments endommagés, autant pour ce qui fait de la décision sur son habitabilité, que pour améliorer la mitigation des dégâts pour de futurs séismes.
7. Il est nécessaire de créer des équipes multidisciplinaires expérimentées dans les champ de la sismologie, de l'ingénierie sismique et de l'émergence, afin de réaliser des actions rapides avec leur instrumentation. Ces équipes pourraient être composées par des spécialistes de différents pays et de différentes institutions pour pouvoir agir avec rapidité en cas de crises.

8. Il faudrait également disposer d'un bon réseau d'instruments de mesure sismique (autant d'accélérographes comme de sismographes), de titularisation partagée, pour la correcte caractérisation de la rupture sismique et des mouvements engendrés.
9. Il existe un problème très grave avec le transfert du matériel scientifique et du matériel de secours au niveau des douanes des frontières. Il serait nécessaire de créer un organisme international chargé de la gestion de tous les papiers de douane en moments de crise.

## REMERCIEMENTS

Nous voulons remercier, en plus des personnes et institutions qui ont contribué à la réalisation de la visite, tous ceux qui ont aidé à sa réalisation, et de façon plus particulière:

- Jaume Miranda, pour toutes les facilités offertes pour l'organisation de la mission.
- Antoni Roca et Montserrat Masses, pour le soutien dans la réalisation de la visite.
- Taj-Eddine CHERKAOUI du SPGM, pour le soutien donné dans le travail sur le terrain et en particulier pour les cartes topographiques et géologiques 1:50.000.
- Haddour HORACHE, responsable de l'Agence Régionale Urbaine de Taza- Al Hoceima, pour les réunions de travail avec les architectes, pour les travaux sur terrain réalisés par eux et l'ONG Architectes d'Urgence.
- Mohammed TEMSAMANI de l'entreprise Samlam GAZ, et le responsable du Club Méditerranée d'Ajdir, pour les facilités données pour le bon fonctionnement des accélérographes sur leurs installations.
- Stéphane Baize et Marc Cuching de l'IRSN (France), Philippe Combes de GEOTER et Jean Luc Morel pour les informations sur la géologie et la tectonique du Rif.
- Omar Ben Brahim du CNRM, pour les informations sur l'épicentre et les observations de terrain.
- Teresa Susagna de l'ICC, pour le soutien et rapide processus des enregistrements obtenus.
- Jorge Fleita de l'ICC, pour l'aide à la réalisation de la page web et la traduction en espagnol.
- Vicenç Palà, pour les facilités dans l'obtention des images satellite.
- Janira Irizarry, pour la révision du document et la traduction en anglais.
- Natàlia Gallego, pour la traduction en français.