

UTILISATION DU BRUIT DE FOND POUR L'ANALYSE DES DOMMAGES DES BATIMENTS DE BOUMERDES SUITE AU SEISME DU 21 MAI 2003.

François DUNAND****, Yamina AIT MEZIANE**, Philippe GUÉGUEN****, Jean-Luc CHATELAIN****, Bertrand GUILLIER****, Rabah BEN SALEM**, Mohammed HADID**, Mustapha HELLEL**, Abdelrahmane KIBOUA**, Nasser LAOUAMI**, Djamel MACHANE**, Nouredine MEZOUEER**, Ali NOUR**, El-Hadi OUBAICHE** et Abdelkader REMAS**

RÉSUMÉ

Le séisme du 21 Mai 2003 de Zemmouri a démontré les insuffisances d'un système constructif largement répandu en Algérie qui s'est avéré très vulnérable en zone de forte sismicité. Le système poteaux-poutres avec des remplissages rigides a été défaillant en zone épacentrale, où plus de 80% des constructions effondrées ou sévèrement endommagées ont été réalisées avec ce système.

Nous utilisons la méthodologie du bruit de fond sur des bâtiments non démolis, classés vert et orange, des cités des 1200 Logements et des 800 Logements à Boumerdes afin de déterminer leurs fréquences propres. Nous montrons ainsi que les fréquences longitudinales et transversales des bâtiments de la cité des 1200 Logements sont toutes deux comprises entre 2,5 et 3,5 Hz, bande de fréquence dans laquelle le spectre de réponse de la direction EW d'une réplique enregistrée à Boumerdes présente une amplification supérieure de l'ordre de 30 % à celle de la direction NS, ce qui, si les bâtiments sont aussi résistants dans leur direction transversale et longitudinale, peut expliquer la différence de dégâts observée suivant l'orientation des bâtiments.

Par ailleurs, nous mettons en évidence une diminution des fréquences propres en fonction du degré d'endommagement des bâtiments dans les deux systèmes de construction, poteaux-poutres et voile en béton armé, utilisés respectivement dans la cité des 1200 Logements et la cité des 800 Logements. Ces résultats encouragent la multiplication de ce type de mesures, afin de mettre en place une méthodologie, basée sur les mesures de fréquences à partir d'enregistrements du bruit de fond, qui permettrait de compléter objectivement le contrôle visuel pour le classement des bâtiments en fonction de leur endommagement après un séisme.

Mots-clés : Bruit de fond - Fréquence propre - Bâtiments - Séisme - Boumerdes - Algérie.

USES OF AMBIENT VIBRATIONS FOR BOUMERDES BUILDINGS DAMAGE ANALYSIS AFTER THE 21 MAY 2003 EARTHQUAKE

ABSTRACT

The 21st May 2003 Zemmouri earthquake has evidenced that the widely used system of construction has proven to be highly vulnerable : frames with rigid masonry, as over 80% of the structures destroyed or highly damaged in the epicentral zone were built under this system.

In July-August 2003, the CGS of Alger and LGIT of Grenoble conducted a joint ambient noise recording campaign on non destructed buildings, classified green and orange, in the "cité des 1200 Logements" and the "cité des 800 Logements" located in Boumerdes,

*LGIT, Maison des Géosciences, BP 53, 38000 Grenoble cedex, France

**CGS, 1 rue Kaddour Rahim, BP 252 Hussein Dey, Alger, Algérie

***Bureau Veritas, 63 avenue Poisat 38320 Eybens, France

****LCPC, 58 rue Lefebvre 75015 Paris, France

*****IRD, 213 rue La Fayette, 75010 Paris, France

F. DUNAND, Y. A IT MEZIANE, P. GUÉGUEN, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, R. BEN SALEM, M. HADID, M. HELLEL, A. KIBOUA, N. LAOUAMI, D. MACHANE, N. MEZOUER, A. NOUR, EL-H. OUBAICHE ET A. REMAS

aiming at determining their dynamical characteristics. We show that the longitudinal and transversal frequencies of the "cité des 1200 Logements" buildings are comprised between 2,5 and 3,5 Hz, a frequency range in which the spectral response of the EW direction of an aftershock recorded in Boumerdes is over 30% higher than in the NS direction, which may explain the damage variation observed with the building orientations.

We also show a decrease of the fundamental frequencies as a function of the building damage rate in both construction types, frames with rigid masonry and shear wall, used respectively in the "cité des 1200 Logements" and the "cité des 800 Logements". These results show that it may be useful to set up a methodology, based on frequency determination from ambient noise recordings, which would be used as an objective complement to the visual control to determine building classifications according to their damage rate after an earthquake.

Key-word : Ambient vibrations - Modal frequency - Buildings - Earthquake - Boumerdes - Algeria.

I - INTRODUCTION

Le séisme de Zemmouri du 21 Mai 2003 a provoqué d'importants dégâts, notamment dans la ville de Boumerdes. Nous avons réalisé une série d'enregistrements du bruit de fond sur des bâtiments des cités des 1200 Logements et 800 Logements situées à Boumerdes, composées de constructions de type poteaux-poutres pour la première et voile en béton armé pour la seconde, afin de déterminer leurs caractéristiques dynamiques. Cette campagne d'enregistrement a été réalisée en collaboration entre le CGS d'Alger et le LGIT de Grenoble en juillet-août 2003.

L'application de la méthode d'enregistrement du bruit de fond sur des bâtiments d'un même système constructif ayant subi des dommages à des degrés différents a pour but de montrer qu'il est envisageable d'utiliser une telle méthode, soit pour expliquer une répartition anormale des dégâts, soit comme complément de l'inspection visuelle pour le classement des bâtiments après un séisme.

Les résultats encourageants obtenus dans cette étude montrent l'utilité de multiplier les études de cas afin de mettre en place une méthodologie basée sur la mesure des fréquences propres des bâtiments à l'aide d'enregistrements du bruit de fond.

II - URBANISATION ET SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA VILLE DE BOUMERDES

La ville de Boumerdes a connu trois périodes d'édification : (1) la vieille ville, (2) l'extension, décidé à la fin des années 60, et (3) l'extension

hors du plan d'urbanisme, qui continue à ce jour. La vieille ville de Boumerdes était une petite localité faisant partie de la commune de Thénia. Cette ville comptait selon le recensement de 1966 une population de 636 habitants, ce nombre est passé à environ 3 500 habitants en 1970, et a atteint 20 000 après la réalisation du programme établi selon le plan d'urbanisme de 1970.

Le site de la ville de Boumerdes est traversé par trois oueds : l'oued de Boumerdes, l'oued Tatarèg et l'oued Corso. Cette situation donne un site à topographie accidentée, qui est surlignée par l'urbanisation de la ville. L'extension de celle-ci s'est effectuée principalement à l'Ouest, entre l'oued de Boumerdes et celui de Tatarèg pour la première phase (plan 1970) et sur le plateau défini entre l'oued Tatarèg et l'oued de Corso pour la seconde phase, qui continue à ce jour.

III - SYSTÈMES CONSTRUCTIFS ET DOMMAGES OBSERVÉS

À Boumerdes, les constructions peuvent être divisées en deux grands types, correspondant au système de construction utilisé :

- le «système traditionnel», basé sur l'utilisation de poteaux et de poutres. Sa facilité d'exécution en fait le plus utilisé en Algérie;
- le système constructif par voile en béton armé

Nous allons étudier le comportement vis-à-vis du séisme de ces deux systèmes constructifs représentatifs des bâtiments de la ville de Boumerdes : la Cité des 1200 Logements (poteaux-poutres) et la Cité des 800 Logements (voiles).

1 - Cité des 1200 Logements.

a - Système constructif en poteaux-poutres

La cité des 1200 Logements fait partie du plan d'urbanisme de 1970. Elle est composée d'immeubles de cinq niveaux d'une hauteur de 2,80 m, formés d'un à quatre blocs identiques séparés par des joints de construction de faible épaisseur (≈ 1 cm), dont les dimensions en plan sont de 10,7 m en largeur et de 18,0 m ou de 21,8 m en longueur. Le bloc de base est conçu avec des portiques orientés transversalement. Les trames sont au nombre de cinq ou six dans la direction longitudinale et de deux dans la direction transversale (fig. 1). Les poteaux sont orientés dans le sens transversal avec les sections suivantes : 20 x 40 cm pour les poteaux de rive et 20x50 cm pour les poteaux intermédiaires (fig. 1). Les poutres, de sections de 20x40 cm, sont disposées transversalement sur les poteaux et sur le pourtour du bâtiment (fig. 1). Le sous-sol est formé par un voile en béton armé périphérique. La cage d'escalier est orientée dans le sens transversal, avec un voile en béton armé transversal qui supporte les volées d'escaliers. Les remplissages extérieurs sont réalisés avec deux épaisseurs de briques creuses dans le plan des portiques.

b - Description des dommages

Sur les bâtiments visités, les dommages sont concentrés et localisés dans les niveaux inférieurs. Dans la majorité des bâtiments, les maçonneries du rez-de-chaussée sont éclatées et des rotules plastiques se sont développées aux nœuds des poteaux du rez-de-chaussée (fig. 2). Il y a alors formation d'un étage souple, conduisant dans plusieurs cas à des mécanismes d'étages.

c - Influence de l'orientation des bâtiments sur les dommages

En observant la distribution spatiale des dégâts, il semble que les bâtiments orientés Nord-Sud (NS) aient été plus touchés que ceux orientés Est-Ouest (EW) (fig. 3, tableau 1). Nous considérons comme détruits, les bâtiments qui se sont écroulés lors du séisme et de ses répliques et ceux qui avaient été rasés à la date du 6 août 2003. En prenant comme orientation des bâtiments leur sens longitudinal, sur un total de 45 bâtiments dans la cité avant le séisme, 16 étaient orientés NS et 29 orientés EW (tableau 1). Quel que soit le nombre de blocs de base accolés pour former un bâtiment, le pourcentage des bâtiments détruits orientés NS est toujours supérieur à celui des

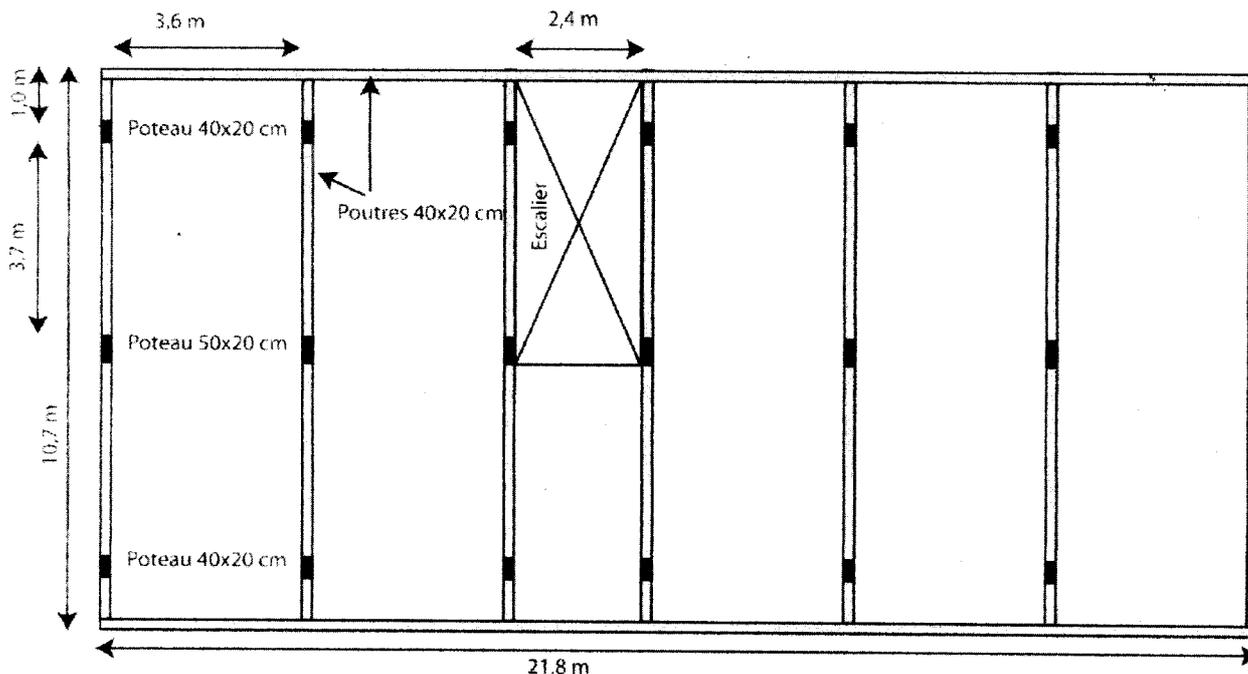


Fig. 1 - Vue en plan d'un étage d'un bâtiment de la "cité des 1200 Logements".
Les poutres sont représentées en gris et les poteaux en noir.

Map view of a floor of a building of the "cité des 1200 Logements".
The frames are represented in gray and the columns in black.

F. DUNAND, Y. AIT MEZIANE, P. GUÉGUEN, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, R. BEN SALEM, M. HADID, M. HELLEL, A. KIBOUA, N. LAOUAMI, D. MACHANE, N. MEZOUER, A. NOUR, EL-H. OUBAICHE ET A. REMAS



Fig. 2 - Photo du rez-de-chaussée d'un des bâtiment de la cité des 1200 Logements, mettant en évidence la rupture des remplissages en brique pour le système constructif en poteaux-poutres.

Picture of the first floor of a building of the "cité des 1200 Logements" showing the rupture of brick filling in a frame system.

Tableau I : Taux de destruction des bâtiments de la cité des 1200 Logements en fonction de leur orientation.

Ratio of destroyed "Cité des 1200 Logements" buildings as a function of their orientation

Type	Nombre total	Nombre NS	Nombre NS rasés (% du nombre de NS)	Nombre EW	Nombre EW rasés (% du nombre de EW)
4 blocs	2	0	0 (0%)	2	0 (0%)
3 blocs	13	5	2 (40%)	8	3 (38%)
2 blocs	25	9	6 (67%)	16	3 (19%)
1 bloc	5	2	2 (100%)	3	0 (0%)
Total	44	16	10 (63%)	29	6 (21%)

Cité des 1200 Logements

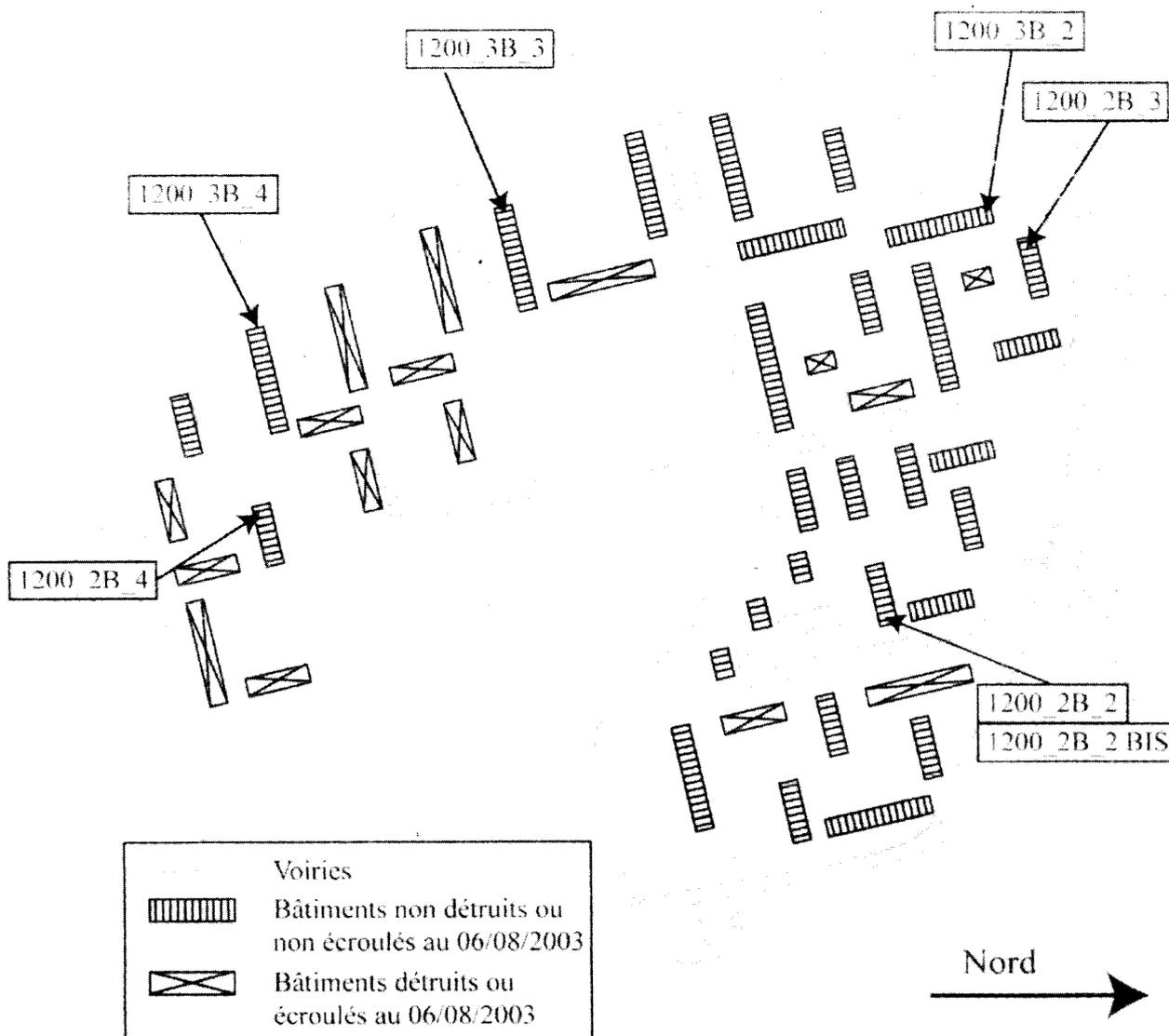


Fig. 3 - Distribution des bâtiments détruits dans la cité des 1200 Logements. Nous considérons comme détruits, les bâtiments qui se sont écroulés lors du séisme et de ses réplique et ceux qui avaient été rasés à la date du 6 août 2003. En hachuré, les bâtiments détruits, en croisé les bâtiments non détruits, et en gris les délimitations des voiries.

Distribution of destroyed buildings in the "cité des 1200 Logements". Are considered as destroyed the buildings that were put down by the earthquake and those that were destroyed as of 6 august 2003. Destroyed buildings are hatched, non-destroyed are marked with crosses, and grey lines are lanes.

F. DUNAND, Y. AIT MEZIANE, P. GUÉGUEN, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, R. BEN SALEM, M. HADID, M. HELLEL, A. KIBOUA, N. LAOUAMI, D. MACHANE, N. MEZOUER, A. NOUR, EL-H. OUBAICHE ET A. REMAS

bâtiments orientés EW (tableau I). Au total, 63 % des bâtiments orientés NS et 21 % de ceux orientés EW ont été détruits; une telle différence ne peut être imputée au hasard.

La réplique du 27 mai ($M = 5,8$) a été enregistrée par la station accélérométrique du CGS de Boumerdes à 500 m de la cité des 1200 Logements. En supposant que cette réplique ait provoqué les mêmes phénomènes que le choc principal, on peut tenter d'expliquer la disparité des dégâts par l'analyse de cette réplique. L'accélérogramme de la réplique (fig. 4) montre que le pic d'accélération maximale dans la direction NS (0,29 g) est inférieur à celui de la direction EW (0,39 g). De plus, le spectre de réponse en accélération de la réplique pour un amortissement de 5% (fig. 5), montre que les composantes NS et EW ne sont pas superposables en amplitude. Si l'on considère que les bâtiments classés «vert» (selon la fiche d'évaluation du CTC qui, suite au séisme, a classé les bâtiments en trois classes : «vert», dommages non relatifs à la structure porteuse; «rouge», bâtiment à détruire; et «orange», dommages relatifs à la structure porteuse, demandant une étude plus

approfondie pour un reclassement soit en «rouge» soit en «vert» avec des travaux) sont représentatifs du comportement des bâtiments de la Cité des 1200 Logements avant le séisme, alors les fréquences longitudinales et transversales de ces bâtiments sont toutes deux comprises entre 2,0 et 3,5 Hz (Tableaux II et III). Dans cette bande de fréquence le spectre de réponse de la direction EW présente une amplification supérieure de l'ordre de 30 % à celle de la direction NS.

Le niveau supérieur de la sollicitation dans la direction EW aux fréquences des bâtiments peut expliquer la différence de dégâts suivant l'orientation des bâtiments.

2 - Cité des 800 logements

a - Système constructif

Les bâtiments de la Cité des 800 Logements, construits en 1986, sont conçus avec un système de voiles en béton armé et des remplissages extérieurs en panneaux préfabriqués de béton armé. Les bâtiments sont de cinq ou dix niveaux,

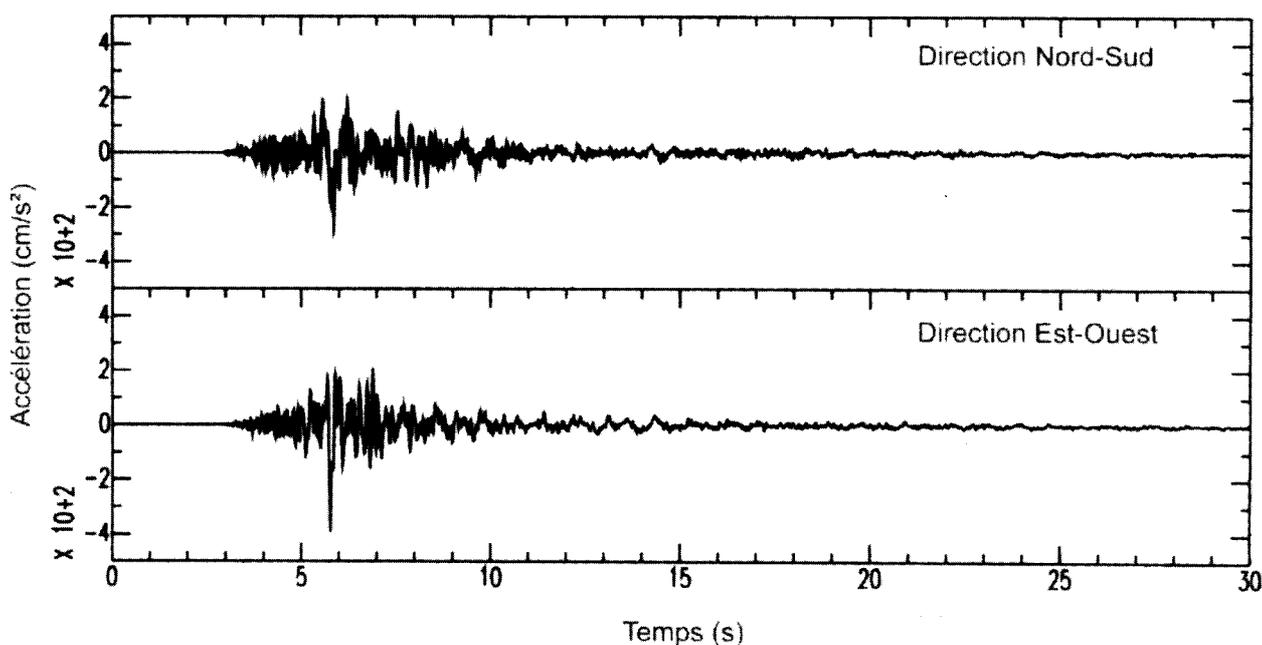


Fig. 4 - Enregistrement de la réplique du 27 mai 2003 ($M = 5,8$) à Boumerdes. (Station Boum_1, CGS). Le pic d'accélération maximale dans la direction Est-Ouest (trace du bas; 0,39 g) est supérieur à celui de la direction Nord-Sud (0,29 g).

**27 may 2003 aftershock ($M 5,8$) recorded in Boumerdes (Station Boum_1, CGS) .
Acceleration peak is higher on the east-West component (top track; 0,39 g)
than on the North-South component (bottom track; 0,29 g).**

**Spectre de réponse de la réplique du 27 mai enregistrée à Boumerdes
pour un coefficient d'amortissement de 5%**

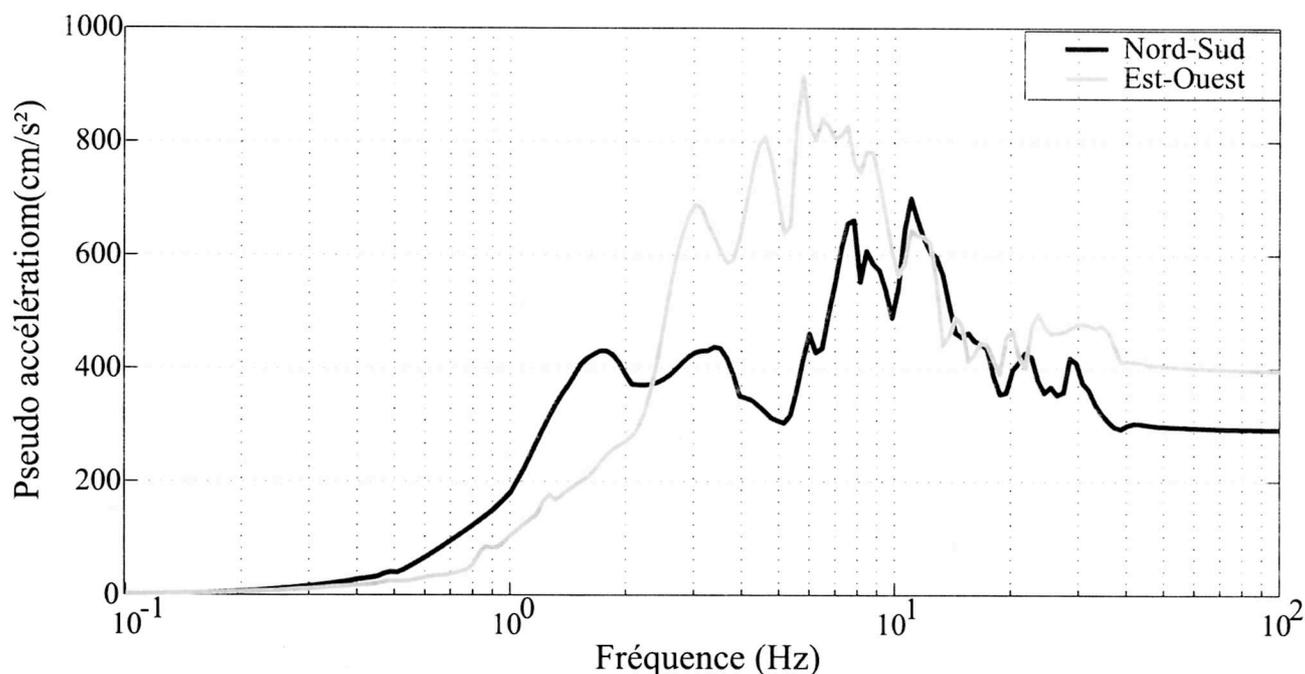


Fig. 5 - Spectre de réponse de la réplique du 27 mai 2003 ($M = 5,8$) enregistrée à Boumerdes (Station Boum_1, CGS) avec un coefficient d'amortissement de 5%. Dans la bande de fréquence 2,5-3,5 Hz, correspondant aux fréquences propres des bâtiments de la cité des 1200 Logements, le niveau de la composante Est-Ouest est supérieur à celui de la composante Nord-Sud.

Spectral response of the 27 may 2003 aftershock recorded in Boumerdes with a 5% damping coefficient. In the 2,5-3,5 Hz frequency range, corresponding to the fundamental frequencies of the cité des 1200 Logements buildings, the level of the East-West component is higher than the level of the North-South component.

Tableau II : Fréquences propres des bâtiments de 2 blocs de la cité des 1200 obtenues à l'aide d'enregistrements de bruit de fond.

Frequencies of buildings of 2 blocks from the 1200 Logements city gotten with the registrations of bottom noise

Bâtiment	Fréquence Longitudinale (Hz)	Fréquence Transversale (Hz)	Classement
1200_2B_1	3,0	3,4	Vert
1200_2B_2	2,7	3,3	Vert
1200_2B_2 bis	2,2	3,2	Vert
1200_2B_3	2,0	3,1	Vert
1200_2B_4	1,4	2,2	Orange

Les numéros des bâtiments (colonne de gauche) correspondent à ceux de la figure 3. Le bâtiment numéroté «1200_2B_2 bis» correspond à une mesure réalisée dans le bâtiment «1200_2B_2» suite à la suppression des cloisons du rez de chaussée.

F. DUNAND, Y. AIT MEZIANE, P. GUÉGUEN, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, R. BEN SALEM, M. HADID, M. HELLEL, A. KIBOUA, N. LAOUAMI, D. MACHANE, N. MEZOUER, A. NOUR, EL-H. OUBAICHE ET A. REMAS

Tableau III : Fréquence propres des bâtiments de 3 blocs de la cité des 1200 obtenues à l'aide d'enregistrements de bruit de fond.

Modal frequency of the "Cité des 1200 Logements" building composed of 3 units obtained with ambient vibration records. Building numbers (left column) follow the same notation as in figure 3.

Bâtiment	Fréquence Longitudinale (Hz)	Fréquence Transversale (Hz)	Classement
1200_3B_1	3,4	3,5	Vert
1200_3B_2	1,6	3,1	Orange
1200_3B_3	1,1	1,7	Orange
1200_3B_4	1,0	1,3	Orange

Les numéros des bâtiments (colonne de gauche) correspondent à ceux de la figure 3.

leurs dimensions sont respectivement en plan de 22,2 x 18,3 m avec une hauteur de 14 m et 17,5 x 11,6 m avec une hauteur de 28 m (fig. 6). Il faut noter que ces bâtiments laissent apparaître à la fois une mauvaise réalisation et un mauvais entretien. Par exemple, les épaisseurs minimales d'enrobages des aciers n'ont pas été respectées dans les voiles et les aciers se trouvent actuellement apparents et corrodés (fig. 7).

b - Description des dommages

Suite au séisme du 21 mai, aucun bâtiment de la Cité des 800 Logements ne s'est écroulé. Les bâtiments de 5 étages n'ont subi aucun dommage ni aux structures porteuses, ni en façades. Cependant, dans les bâtiments de 10 étages, un mouvement relatif entre les panneaux de façades préfabriqués s'est produit, faisant apparaître des fissures au niveau de leurs jointures, ceci avec des degrés différents suivant les bâtiments (fig. 7), sans pour autant que la structure porteuse ait été endommagée.

Etant donné la faible distance séparant cette cité de celle des 1200 Logements (1 km), et l'absence d'effet de site avéré (Guillier *et al.*, ce volume) on peut supposer que la sollicitation sismique a été de même intensité. Malgré leur mauvais entretien et réalisation, aucun des bâtiments, contreventés par des voiles, de la Cité des 800 Logements ne s'est effondré. Ils ont donc mieux résisté que ceux de la Cité des 1200 Logements qui, eux, sont construits avec des poteaux-poutres.

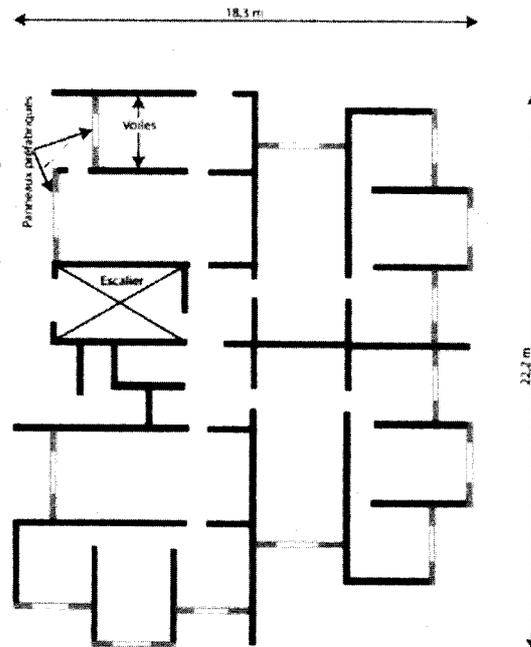


Fig. 6 - Vue en plan d'un étage d'un bâtiment de la cité des 800. Les voiles sont représentées en noir et les panneaux préfabriqués en gris.

Map view of a floor of a building of the "Cité des 800 Logements". The shear walls are represented in black and the prefabricated panels in gray.

IV - OBSERVATIONS SUR LE COMPORTEMENT DES STRUCTURES À PARTIR D'ENREGISTREMENTS DE BRUIT DE FOND

1 - Méthodologie

a - Le bruit de fond

L'utilisation des enregistrements de bruit de fond pour la caractérisation dynamique des structures est proposée dans la littérature depuis les années 70, et de nombreux articles y sont

UTILISATION DU BRUIT DE FOND POUR L'ANALYSE DES DOMMAGES DES BATIMENTS DE BOUMERDÈS
SUITE AU SÉISME DU 21 MAI 2003



Fig. 7 - Photo du rez-de-chaussée d'un bâtiment de la cité des 800 Logements, mettant en évidence (1) la mauvaise qualité de la réalisation et de l'entretien de la structure avec l'apparition du treillis soudé sur les voiles en béton armé, et (2) des fissures provoquées par le séisme à la jonction des panneaux préfabriqués en béton armé avec la structure.

Picture of the first floor of the "cité des 800 Logements" building, showing (1) the bad quality of the building and of the structure maintenance with the apparition of the iron reinforcement in the shear wall, and (2) fissurations due to the earthquake at the junction between prefabricated concrete pannels and the structure.

consacrés (e.g. Stubbs *et al.*, 1973, Udawadia *et al.*, 1973). Un bilan des applications à été dressé par Ivánovic *et al.*, (2000). Cependant, cette méthode reste peu exploitée par la communauté du génie parasismique. Le principe de l'essai repose sur l'existence permanente d'un bruit de fond mécanique qui sollicite les structures. Cette sollicitation a pour origine des sources diverses de bruits aléatoires et périodiques, dues aux activités humaines comme le trafic routier ou les industries, et aux activités naturelles comme le vent. Malgré la faible amplitude de cette sollicitation (10^{-6} à 10^{-4} g), il est possible de mesurer la réponse des bâtiments à cette sollicitation et d'en déduire leurs caractéristiques dynamiques dans le domaine des petites déformations (Farsi, 1996, Boutin *et al.*, 1999, Hans, 2002). Ainsi tous les inconvénients liés aux systèmes mécaniques à mettre en place pour générer une sollicitation sont évités. L'essai consiste à disposer des capteurs sur la structure et à enregistrer sa réponse à la sollicitation du bruit de fond. La facilité de mise en œuvre permet de répéter les mesures et de multiplier les bâtiments testés. Rester en petites déformations n'autorise pas à utiliser directement ces informations dans le cadre de calcul de bâtiment au séisme. En effet, les séismes réglementaires provoquent des accélérations de l'ordre de 1 g, qui induisent un comportement des structures en grandes déformations (i.e. non linéaire) ou avec des matériaux dégradés. Mais les informations obtenues par des enregistrements de bruit de fond permettent d'obtenir rapidement et simplement un ordre de grandeur du comportement dynamique du bâtiment (Dunand *et al.*, 2003).

b - Traitement des enregistrements de bruit de fond

Les enregistrements de bruit de fond sont réalisés avec des sismomètres Lennartz 5 secondes à 3 composantes couplés à une station CityShark II (Chatelain *et al.*, 2000). Cette station permet de connecter 6 capteurs 3 composantes et de numériser leur signal simultanément.

Les durées d'enregistrement ont été fixées à 15 minutes pour obtenir une durée suffisante de signal non perturbé. En effet, le bruit de fond est de faible amplitude (10^{-6} à 10^{-4} g) et de faibles perturbations peuvent engendrer des signaux tran-

sitoires, sortant du niveau du bruit, qui ne correspondent pas à la réponse dynamique du bâtiment. Ces perturbations peuvent être :

- le passage d'un véhicule (voiture, camion, tramway, train, ...) près de la structure, provoquant une sollicitation mono-fréquentielle de niveau sortant du niveau du bruit;
- le passage d'une personne à côté du capteur, engendrant des impacts qui ne correspondent pas à la réponse de la structure soumise au bruit de fond;
- la mise en vibration d'un élément local (plancher, cloison ...) par une activité dans la structure, engendrant une perturbation qui n'est pas représentative du comportement global de la structure.

L'utilisation d'un "anti-trigger" permet de choisir automatiquement les parties du signal non perturbées qui seront traitées. Pour chacune des fenêtres de signal choisies, le spectre de Fourier est calculé et lissé, puis les spectres sont moyennés. Cette méthodologie permet d'obtenir un spectre de Fourier de l'enregistrement de bruit de fond qui n'est pas dépendant des perturbations du signal.

2 - Résultats pour la Cité des 800 Logements

Nous avons réalisé des enregistrements de bruit de fond dans 10 bâtiments (5 et 10 étages) de la cité des 800. Les résultats du traitement des enregistrements de bruit de fond (fig. 8 et 9) sont présentés dans le tableau IV pour les bâtiments de 5 étages, et dans le tableau V pour les bâtiments de 10 étages.

Avant toute comparaison des fréquences de bâtiments, il convient de vérifier l'hypothèse selon laquelle les fréquences des bâtiments d'une même cité, construits à la même époque, suivant les mêmes plans et par les mêmes entreprises, sont identiques. Seuls les immeubles R+4 de la cité des 800 Logements peuvent servir à ce test car ils ont subi très peu de dommages. Les fréquences transversales des bâtiments R+4 de la cité des 800 Logements sont comprises entre 3,9 et 4,0 Hz, soit une variation inférieure à 3 % (tableau IV). L'hypothèse est donc vérifiée et nous considérons qu'elle est applicable à tous les bâtiments des

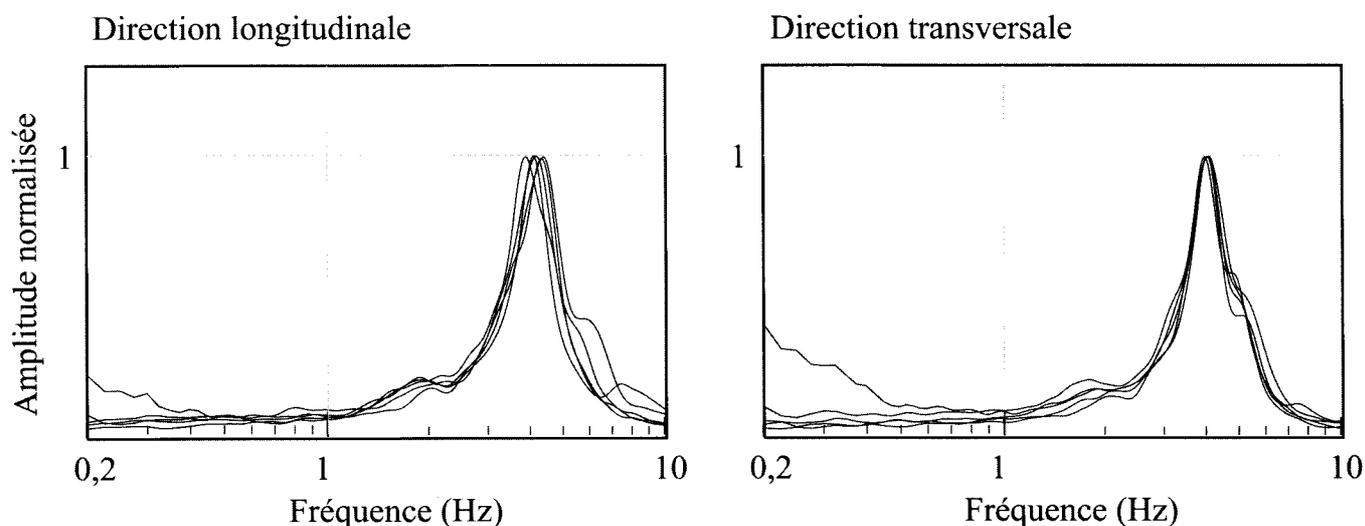


Fig. 8 - Spectres de Fourier des enregistrements de bruit de fond réalisés sur les bâtiments de 5 étages de la cité des 800 Logements.

Fourier spectra of the ambient noise recordings performed on the 5-storey buildings of the cité des 800 Logements.

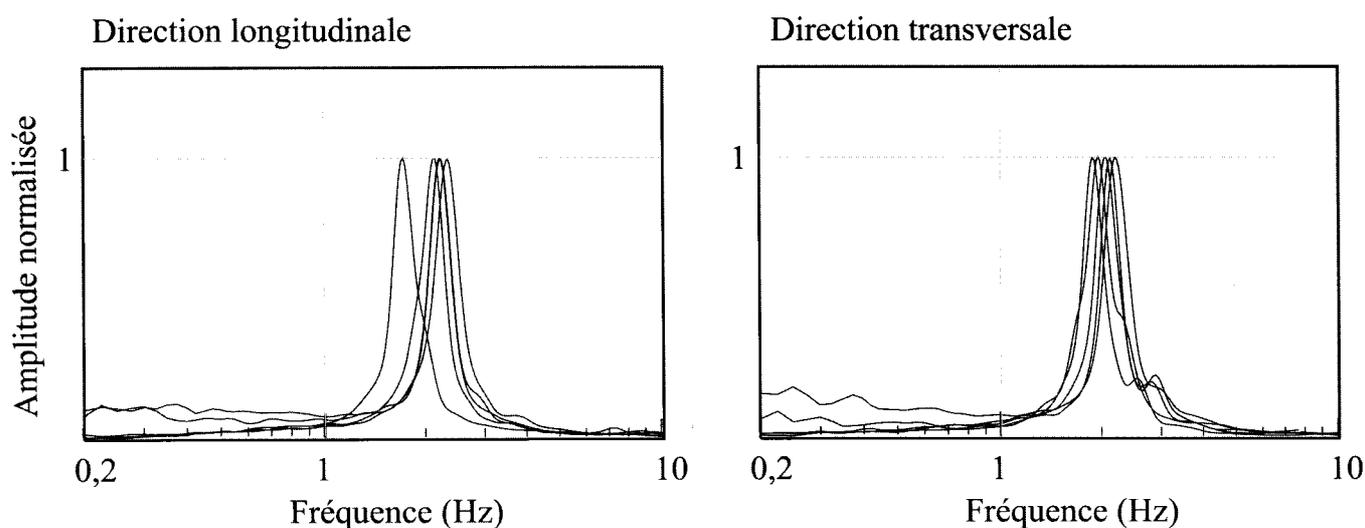


Fig. 9 - Spectres de Fourier des enregistrements de bruit de fond réalisés sur les bâtiments de 10 étages de la cité des 800 Logements.

Fourier spectra of the ambient noise recordings performed on the 10-storey buildings of the cité des 800 Logements.

Tableau IV : Fréquences propres des bâtiments de 5 étages de la cité des 800 Logements obtenues à l'aide d'enregistrements de bruit de fond.

Frequencies of buildings from 5 floors from the 800 Logements city gotten with the enregistrements of bottom noise

Bâtiment	Fréquence Longitudinale (Hz)	Fréquence Transversal (Hz)	Classement
800_5E_1	4,4	4,0	Vert
800_5E_2	4,3	4,0	Vert
800_5E_3	4,2	4,0	Vert
800_5E_4	4,1	4,0	Vert
800_5E_5	3,9	3,9	Vert

F. DUNAND, Y. A IT MEZIANE, P. GUÉGUEN, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, R. BEN SALEM, M. HADID, M. HELLEL, A. KIBOUA, N. LAOUAMI, D. MACHANE, N. MEZOUEUR, A. NOUR, EL-H. OUBAICHE ET A. REMAS

Tableau V : Fréquences propres des bâtiments de 10 étages de la cité des 800 obtenues à l'aide d'enregistrements de bruit de fond.

Modal frequency of the " Cité des 800 Logements" 10-story building obtained with ambient vibration records.

Bâtiment	Fréquence Longitudinale (Hz)	Fréquence Transversale (Hz)	Classement
800_10E_1	2,3	2,2	Vert
800_10E_2	2,2	2,1	Vert
800_10E_3	2,2	2,1	Vert
800_10E_4	2,1	1,9	Vert
800_10E_5	1,7	2,0	Orange

cités étudiées, et que, par voie de conséquence, les diminutions de fréquences observées ne sont dues qu'aux effets du séisme sur les structures.

La faible variations des fréquences longitudinales (4,4 à 3,9 Hz) et transversales (3,9 et 4,0 Hz) des bâtiments de 5 étages montre, en corrélation avec les observations visuelles, que ces bâtiments n'ont été que très peu affectés par le séisme (tableau IV).

Les fréquences de la direction longitudinale des bâtiments de 10 étages varient entre 2,3 et 1,7 Hz, soit une diminution relative de l'ordre de 26 % et entre 2,2 Hz et 1,9 Hz pour la direction transversale, soit une diminution relative de l'ordre de 14 % (tableau V). Comme les seuls dégâts observés sont relatifs aux panneaux préfabriqués de façades, ces diminutions peuvent leur être imputées. Les panneaux de façade semblent donc assurer une part de la rigidité de ces structures.

3 - Résultats pour la Cité des 1200 Logements

Nous avons réalisé des enregistrements de bruit de fond dans 8 bâtiments de la cité des 1200 Logements, composés de 2 ou 3 blocs de base séparés par des joints de construction (?1cm). Les résultats du traitement de ces enregistrements (fig. 10 et 11) sont présentés dans le tableau II pour les bâtiments composés de 2 blocs, et dans le tableau III pour les bâtiments composés de 3 blocs. Les bâtiments 1200_3B_1 et 1200_2B_1 (tableaux II et III) ne font pas à proprement parler partie de la Cité des 1200 Logements, mais ils sont construits suivant les mêmes plans et sont

situés dans Boumerdes à l'Est de la Cité des 1200 Logements. Ces deux bâtiments ont été testés car ils n'ont subi que très peu de dommages. Par ailleurs, le bâtiment 1200_2B_2 a été mesuré 2 fois, la première suite au séisme (1200_2B_2), et la seconde suite à la destruction des cloisons du rez-de-chaussée en vue de sa réhabilitation (1200_2B_2 bis).

Les fréquences se voient diminuées d'un facteur de l'ordre de 2 (bâtiments à 2 blocs) à 3 (bâtiments à 3 blocs) pour des bâtiments n'étant que très peu fissurés à des bâtiments proche de la ruine suite au séisme. Cette diminution de fréquence importante peut être mise en relation avec la destruction des remplissages. En effet, les structures poteaux-poutres sont souples si on considère uniquement la structure porteuse, alors qu'en prenant en compte la rigidité des remplissages, la rigidité d'ensemble est supérieure.

La destruction des cloisons longitudinales du rez-de-chaussée du bâtiment 1200_2B_2, se traduit par une diminution de fréquence de 19 % (tableau II et fig. 12). Lors de la première mesure, les remplissages du rez-de-chaussée avaient déjà subi des dommages mais pas la structure porteuse. Le comportement dynamique du bâtiment peut, en première approximation, être assimilé à un oscillateur à 1 degré de liberté, alors sa fréquence (F) est reliée à sa rigidité (K) et à sa masse (M) par la relation suivante :

$$F = 1/(2\pi) * (K/M)^{0,5} \quad (1)$$

Comme la masse du bâtiment n'a pas changé durant la destruction des cloisons (1-les gravats n'ont pas été évacués, 2-la masse des cloisons

UTILISATION DU BRUIT DE FOND POUR L'ANALYSE DES DOMMAGES DES BATIMENTS DE BOUMERDES
SUIITE AU SÉISME DU 21 MAI 2003

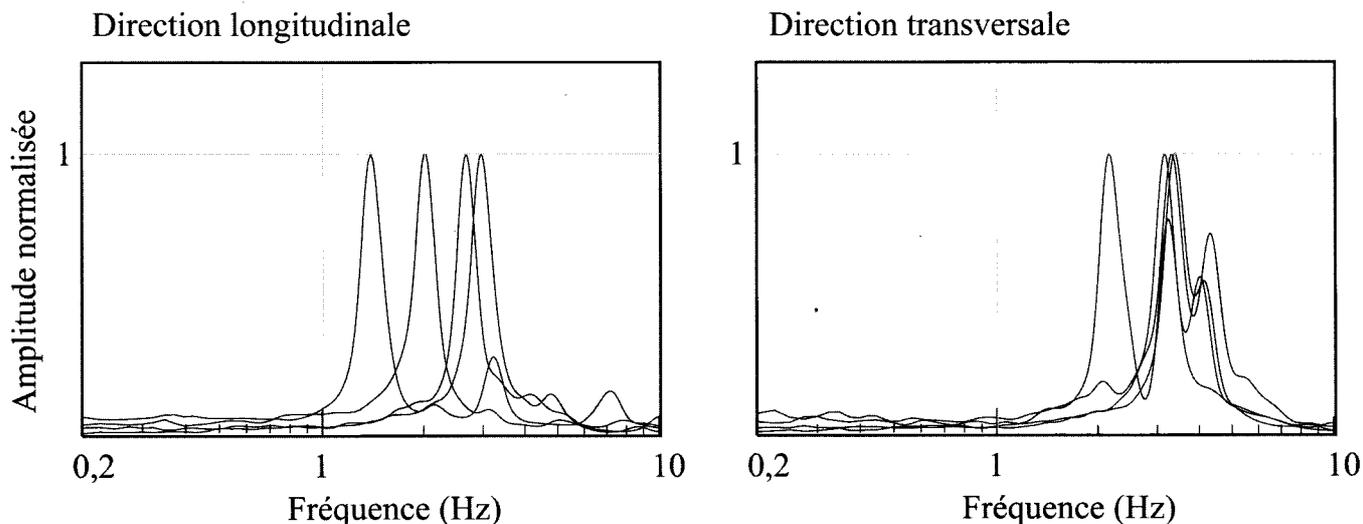


Fig. 10 - Spectres de Fourier des enregistrements de bruit de fond réalisés sur les bâtiments composés de 2 blocs de la cité des 1200 Logements.

Fourier spectra of the ambient noise recordings performed on the 2-block buildings of the cité des 1200 Logements.

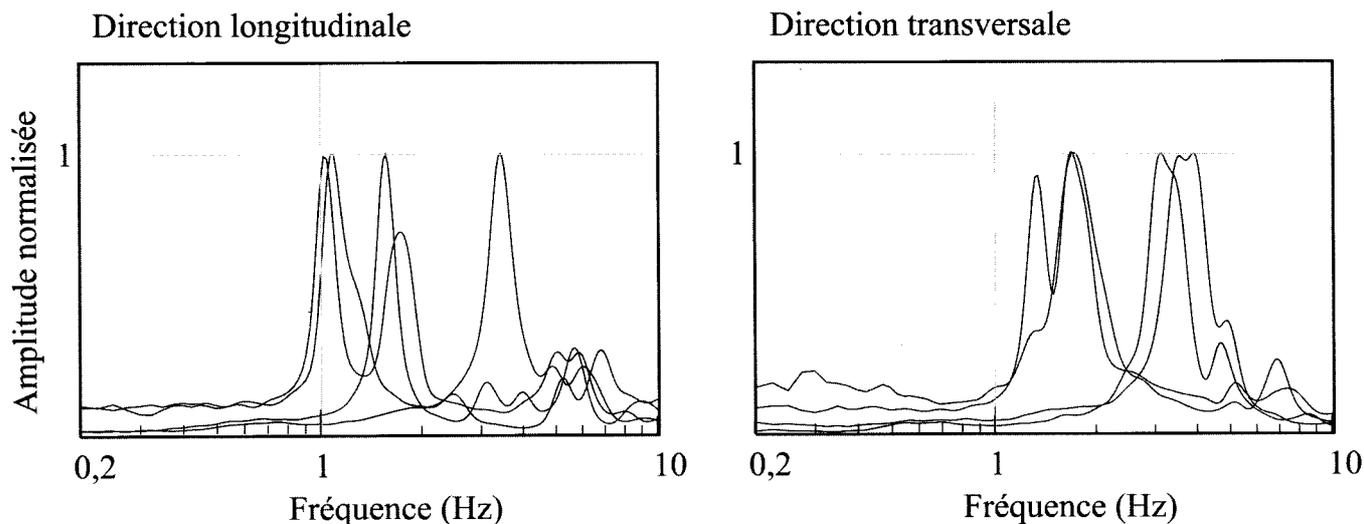


Fig. 11 - Spectres de Fourier des enregistrements de bruit de fond réalisés sur les bâtiments composés de 3 blocs de la cité des 1200 Logements.

Fourier spectra of the ambient noise recordings performed on the 3-block buildings of the cité des 1200 Logements.

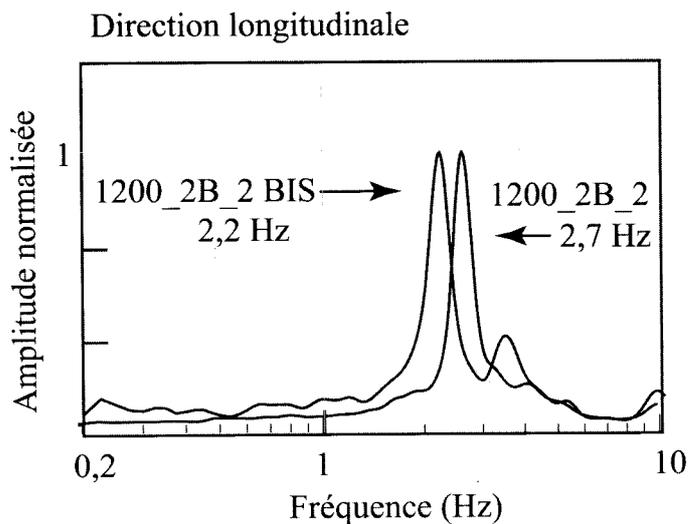


Fig. 12 - Comparaison des spectres de Fourier des enregistrements de bruit de fond (direction longitudinale) réalisés sur un bâtiment composé de 2 blocs de la cité des 1200 Logements suite au séisme du 21 mai 2003 (noir) et après la démolition des remplissages longitudinaux du rez-de-chaussée (gris).

Comparison of the Fourier spectra of ambient noise recordings (longitudinal direction) performed on a 2-block building of the cité des 1200 Logements after the 21 may 2003 earthquake (in black) and after destruction of the first floor longitudinal fillings.

F. DUNAND, Y. A IT MEZIANE, P. GUÉGUEN, J.-L. CHATELAIN, B. GUILLIER, R. BEN SALEM, M. HADID, M. HELLEL, A. KIBOUA, N. LAOUAMI, D. MACHANE, N. MEZOUER, A. NOUR, EL-H. OUBAICHE ET A. REMAS

supprimées représente moins de 5 % de la masse de l'étage), la diminution de fréquence est due uniquement à la diminution de rigidité qui est de 33 %. Comme les remplissages avaient déjà été endommagés par le séisme, on peut dire que les remplissages participaient pour au moins 33 % à la rigidité totale. Ceci montre que les remplissages participent pour une part non négligeable à la rigidité et donc au contreventement de la structure.

La fréquence longitudinale du bâtiment en meilleur état à 2 blocs (3,0 Hz) et à 3 blocs (3,4 Hz) ne diffère que de 11 % (tableaux II et III). Ceci montre que l'accolement de blocs ne modifie que faiblement le comportement dynamique ou que les joints de dilatation entre les blocs assurent effectivement une coupure de rigidité.

4 - Comparaison des fréquences mesurées avec les fréquences des RPA 99

Les règles parasismiques algériennes (RPA 99) proposent une estimation de la fréquence des bâtiments par la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$\begin{aligned} F &= 1/(C_T h_N^{3/4}) \\ F &= D^{1/2}/(0,09 h_N) \end{aligned} \quad (2)$$

Avec :

- $C_T = 0,05$ pour des portiques auto-stables en béton armé avec remplissage en maçonnerie ou pour des contreventements assurés partiellement ou totalement par des voiles en béton armé.

- h_N hauteur du bâtiment.

- D dimension horizontale du bâtiment dans la direction considérée.

Les valeurs calculées avec la formule des RPA 99 pour les bâtiments des deux cités sont présentées dans le tableau VI. Si on considère que les bâtiments des deux cités qui ont les fréquences les plus élevées sont représentatifs du comportement dynamique non endommagé, on peut comparer les fréquences mesurées et les fréquences calculées. Cette comparaison montre que les fréquences mesurées sont quasi systématiquement supérieures de 20 à 40 % aux fréquences calculées. Ce qui montre que la formule des RPA 99 a tendance à sous-estimer la rigidité des bâtiments.

A l'inverse, les fréquences dans la direction longitudinale des bâtiments à 2 et 3 blocs de la cité des 1200 Logements sont inférieures de 10 à 20 % aux fréquences calculées. Ceci peut s'expliquer par l'absence de contreventements longitudinaux dans ces bâtiments. Dans ce cas, la formule des RPA 99 surestime la rigidité des bâtiments.

Lorsque les contreventements sont suffisants, la formule des RPA 99 sous-estime la fréquence, et inversement lors d'un défaut de contreventement. L'écart des fréquences mesurées aux fréquences calculées pourrait, lors d'un diagnostic pré-sismique, informer sur un défaut de contreventement du bâtiment.

V - Conclusion

Le taux de dommages occasionnés par le séisme de Zemmouri du 21 mai 2003 dans la ville de Boumerdes est dû en grande partie à la défaillance, par une mauvaise réalisation, du système de construction poteaux-poutre très répandu dans la région.

Les dommages plus importants subits par les bâtiments orientés Nord-Sud par rapports à ceux orientés Est-Ouest observés dans la cité des 1200 Logements s'explique par une sollicitation sismique 1,3 fois supérieure dans la direction Est-Ouest dans la bande de fréquence correspondant à la fréquence propre de ces bâtiments.

Nous avons mis en évidence une diminution de la fréquence propre des bâtiments avec l'augmentation de l'endommagement, à l'aide d'une méthode utilisant le bruit de fond comme sollicitation dynamique des bâtiments. Les fréquences diminuent d'un facteur de l'ordre de 2 à 3 pour les structures en poteaux-poutres et de 1,5 pour des structures contreventés par voiles en béton armé. Ces résultats, obtenus à l'aide d'une méthode simple et facile à mettre en œuvre, nous montrent qu'il est intéressant de continuer ce type d'études afin de développer une méthodologie basée sur les mesures de fréquences et qui servirait de complément de diagnostic, notamment pour une aide à la classification post-sismique des bâtiments.

Remerciements : Nous remercions Maroc El Hadj pour sa patience et son dévouement lors des campagnes d'enregistrement du bruit de fond, ainsi que tout le personnel du CGS pour leur aide et leur efficacité. Cette étude a été financée par le CGS et l'INSU.

UTILISATION DU BRUIT DE FOND POUR L'ANALYSE DES DOMMAGES DES BATIMENTS DE BOUMERDÈS
SUIITE AU SÉISME DU 21 MAI 2003

Tableau VI : Comparaison des fréquences obtenues par des enregistrements de bruit de fond aux fréquences estimées par la formule des RPA 99.

Comparison of modal frequency obtained with ambient vibration records with modal frequency obtained following the RPA 99 formula.

Bâtiment	Direction	Mesure (Hz)	RPA 99 (Hz)	Différence relative
cité des 800 10 étages	Longitudinale	2,3	1,9	- 20 %
cité des 800 10 étages	Transversale	2,2	1,7	- 30 %
cité des 800 5 étages	Longitudinale	4,3	3,3	- 30 %
cité des 800 5 étages	Transversale	4,0	2,7	- 48 %
cité des 1200 3 blocs	Longitudinale	3,4	3,7	8 %
cité des 1200 3 blocs	Transversale	3,5	2,8	-25 %
cité des 1200 2 blocs	Longitudinale	3,0	3,7	19 %
cité des 1200 2 blocs	Transversale	3,4	2,8	- 21 %

VI- BIBLIOGRAPHIE

BOUTIN, C., HANS, S., ERDIN, I., ET LORIOT, M., 1999.

Approche de la vulnérabilité sismique par l'étude du comportement de bâtiments réels. *Rapport de recherche ENTPE, Vaulx-En-Velin, France.*

CHATELAIN, J. L., GUÉGUEN, P., GUILLIER, B., FRÉCHET, J., BONDoux, F., SARRAULT, J., SULPICE, P., AND NEUVILLE, J.M., 2000.

Cityshark : A user-friendly instrument dedicated to ambient noise (micro-tremor) recording for site and building response studies. *Seismological Research Letters, 71(6).*

DUNAND, F., BARD, P.Y., GUÉGUEN, P., CHATELAIN, J.L., PILOT, B., AND VASSAIL, T., 2003.

Auscultation dynamique d'un bâtiment : Comparaisons séismes/ bruit de fond et avant / après travaux. *6ème Colloque National AFPS.*

FARSI, M.N., 1996.

Identification des structures de génie civil à partir de leurs réponses vibratoires. *PhD thesis of University of Grenoble, France.*

GUILLIER, B., MACHANE, D., OUBAICHE, E.H., CHATELAIN, J.-L., AIT MEZIANE, Y., BEN SALEM, R., DUNAND, F., GUÉGUEN, P., HADID, M., HELLEL, M., KIBOUA, A., LAOUAMI, N., MEZOUER, N., NOUR A. ET REMAS, A., 2004.

Résultats préliminaires sur les fréquences fondamentales et les amplifications de sols, obtenus par l'étude du bruit de fond, sur la ville de Boumerdes – Algérie, Mémoires du SGA, n° 12.

HANS, S., 2002.

Auscultation dynamique de bâtiments et modélisation par homogénéisation. Contribution à l'analyse de la vulnérabilité sismique. *PhD thesis ENTPE, Lyon, France.*

IVANOVIC, S.S., TRIFUNAC, M.D. AND TODOROVSKA, M.I., 2000.

Ambient vibration tests of structures - a review. *Bull. Indian Soc. Earthquake Tech..*

SCANDINAVIAN ENGINEERING CORPORATION., 1970.

Boumerdes Plan d'urbanisme 70. *Rapport interne SONATRACH, 128p.*

STUBBS, I.R. AND MACLAMOR, V.R., 1973.

The ambient vibration survey. *Fifth World Conference On Earthquake Engineering.*

UDWADIA, F.E., AND TRIFUNAC, M.D., 1973.

Ambient vibration tests of full-scale structures. *Proceeding of the 5th world conference on earthquake engineering.*