

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université HASSIBA BEN BOU ALI de CHLEF

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté par

Mr. Hocine MERABET

Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Pour l'obtention du diplôme de Magister
en Génie Civil

Sous le thème

Influence des Effets de Site sur l'Amplification du Mouvement Sismique du Sol

Soutenu publiquement devant les membres de jury

M. Miloud TAHAR ABBAS	Maître de Conférences (A), Université de Chlef	Président
M. Hamid AFRA	Directeur de Recherches, CNERIB, Alger	Examineur
M. Mohamed HADID	Maître de Conférences (A), ESNTP, Kouba	Examineur
M. Belkacem LAMRI	Maître de Conférences (A), Université de Chlef	Examineur
Mme Zamila HARICHANE	Maître de Conférences (A), Université de Chlef	Rapporteur

Remerciements

Je remercie en premier et en dernier lieu, DIEU, tout puissant de m'avoir accordé courage et santé pour accomplir ce modeste travail.

Je remercie vivement Mme Zamila HARICHANE, Maître de Conférences à l'Université de Chlef, qui a été à l'origine du présent travail, pour sa disponibilité, assistance et conseil tout au long de cette étude.

Je tiens à remercier M. Miloud TAHAR ABBAS, Maître de Conférences à l'Université de Chlef, d'avoir accepté de présider le jury d'examen.

Je remercie également M. Hamid AFRA, Directeur de Recherches et Directeur Général au Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiments (CNERIB), M. Mohamed HADID, Maître de Conférences à l'Ecole Supérieur des Travaux Publics (ENSTP) de Kouba et M. Belkacem LAMRI, Maître de Conférences à l'Université de Chlef, d'avoir accepté d'examiner le présent travail et d'être membre du jury.

Enfin, mes sincères remerciements, sont réservés au coprs enseignant du département de Génie Civil de l'Université de Chlef et aux invités, qui vont m'honorer de leurs présence et encouragements.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, le fruit de longues années d'études à mon père qui m'a suivi durant mes années d'études et qui m'a encouragé pour atteindre mon but.

Je le dédie également à ma chère mère qui m'a toujours soutenu.

Je le dédie aussi à mon cher collègue Walid Benzine à qui je souhaite beaucoup de réussite, sans oublier évidemment mes collègues de travail Megueni, Benzbida, Yasmina et Samira.

Mais dédicaces vont aussi à mon grand frère Abdelkader et ses filles Nessrine et Sara, ainsi que mon frère Abed et sa fille Nour el Houda.

Remerciements	ii
mmm	iii
Abstract	iv
Résumé	v
Table de Matières	vi
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xvii

Table des Matières

Introduction Générale	1
I.1. Introductions	2
I.2. Objectifs visés	2
I.3. Organisation du mémoire	3
Chapitre 1 : Etude Bibliographique	5
1.1. Introduction	6
1.2. Influence des effets de site sur les dommages des structures	6
1.2.1. Effets directs	7
1.2.2. Effets indirects	7
1.3. Méthode d'estimation des effets de site	9
1.3.1. Méthodes analytiques (théoriques)	9
1.3.2. Méthode expérimentale (empirique)	10
1.3.2.1. <i>Technique du Rapport Spectral Horizontal/Vertical –HVSR</i>	10
1.3.2.2. <i>Technique du rapport spectral standard –SSR</i>	12
1.3.2.3. <i>Technique de la fonction d'amplification spectrale (S_a/a_{max})</i>	13
1.3.2.4. <i>Méthode de spectre de Fourier (FAS)</i>	13
1.4. Effets de site topographiques	14
1.5. Effets de site non linaires	19
1.5.1. Aperçu général	19
1.5.2. Relation contrainte-déformation	19
1.5.3. Pris en compte des effets de site non linaires	21
1.5.4. Analyse unidimensionnelles non linaires de la réponse de site	23
1.5.5. Effet de site non linaires observés lors de séisme antérieurs	23
1.6. Conclusion	25
Chapitre 2 : Etude empirique de l'effet de site sur les mouvements sismiques du sol	26

2.1. Introduction	27
2.2. Données accélérométriques utilisées	27
2.3. Caractéristiques des mouvements sismiques forts	28
2.4. Analyse des enregistrements des mouvements sismiques	31
2.5. Intégration des mouvements sismiques	32
2.6. Caractérisations du site basée sur V_{max} / a_{max}	33
2.7. Conclusion	49
Chapitre 3 : Quantification empirique des effets de site sur le contenu fréquentiel des mouvements du sol	50
3.1. Introduction	51
3.2. Contenus fréquentiels des signaux -Spectres de Fourier	51
3.2.1. Transformée de Fourier continue	52
3.2.2. Transformée de Fourier discrète	52
3.2.3. Spectre de Fourier	53
3.3. Applications aux signaux du séisme de Boumerdes 21 Mai 2003	55
3.4. Fonction d'amplification HVSR	56
3.5. Fonction d'amplification SSR	57
3.6. Conclusion	72
Chapitre 4 : Etude analytique des effets de site	74
4.1. Introduction	75
4.2. Méthodes d'analyse des effets de site	75
4.2.1. Analyse linéaire de la réponse sismique de site	76
4.2.2. Analyse linéaire équivalente de la réponse sismique de site	76
4.2.3. Analyse non linéaire de la réponse sismique de site	77
4.3. Détermination de la réponse du profil de sol du site étudié	77
4.4. Effets des conditions de site local sur les mouvements sismiques	78
4.5. Contraste d'impédance	80
4.6. Evaluation de la réponse d'un site	80
4.6.1. Essais géotechnique du site de Bab-Ezzouar	81
4.6.2. Essais géotechnique du site de Maradja	83
4.7. Programme utilisé	86
4.8. Applications	87
4.8.1. Fonction d'amplification	87
4.8.2. Histoire des accélérations de sol (Accélérogramme)	89
4.8.3. Spectres de réponse calculés aux sites étudiés	90

Chapitre 5 : Influence des effets de site sur les spectres de réponse	95
5.1. Introduction	96
5.2. Spectre de réponse	96
5.3. Calcul du spectre de réponse	96
5.4. Quantification des effets de site sur les spectres de réponse	100
5.4.1. Effet de l'amortissement sur les spectres de réponse	100
5.4.2. Effet des conditions locales de sol sur les spectres de réponse	104
5.4.3. Effet de la magnitude sur les spectres de réponse	106
5.4.4. Effet de la durée sur les spectres de réponse	113
5.5. Rapport des spectres de réponse normalisée NHVSR	114
5.6. Conclusions	126
Chapitre 6 : Prise en compte de effets de site par les spectres de réponses réglementaires et étude comparative	127
6.1. Introduction	128
6.2. Classification des sites selon les règlements parasismiques	128

6.2.1. Règles Parasismiques Algériennes RPA99	129
<i>6.2.1.1. Classification des sites</i>	129
6.2.2. Eurocode 8	131
<i>6.2.2.1. Classification des sites</i>	131
<i>6.2.2.2. Spectre de réponse élastique</i>	132
6.2.3. Uniform Building Code (UBC1997)	135
<i>6..2. 3.1. Classification des sites</i>	135
<i>6.2.3.2. Spectre de réponse élastique</i>	135
6.4. Applications	137
6.5. Conclusions	140
Conclusions générales et recommandation	141
Références bibliographiques	145

Table des Matières

	Page
Dédicaces	i
Remerciements	ii
ملخص	iii
Abstract	iv
Résumé	v
INTRODUCTION GENERALE	
i.1	Introductions 2
i.2	Objectifs visés 2
i.3	Organisation du mémoire 3

CHAPITRE 1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES METHODES DES EFFERT DE SITE

1.1	Introduction 6
1.2	Influence des effets de site sur les dommages des structures 6
1.2.1	Effets directs 7
1.2.2	Effets indirects 7
1.3	Méthode d'estimation des effets de site..... 9
1.3.1	Méthodes analytiques (théoriques)..... 9
1.3.2	Méthode expérimentale (empirique) 11
1.3.1	Méthode d'estimation des effets de site..... 11
1.3.1.1	Technique du Rapport Spectral Horizontal/Vertical –HVSR..... 13
1.3.1.2	Technique du rapport spectral standard –SSR..... 14
1.3.1.3	Technique de la fonction d'amplification spectrale (Sa/amax)..... 14
1.4.	Effets de site topographiques 15
1.5.	Effets de site non linaires 20
1.5.1.	Aperçu général 20
1.5.2.	Relation contrainte-déformation 20
1.5.3.	Pris en compte des effets de site non linaires 22
1.5.4.	Analyse unidimensionnelles non linaires de la réponse de site 24
1.5.5.	Effet de site non linaires observés lors de séisme antérieurs 24
1.6.	Conclusion 25

Chapitre 2
CARACTÉRISATION DES EFFETS DE SITE SUR LES MOUVEMENTS
SISMIQUES DU SOL

2.1	Introduction.....	27
2.2	Données accélérométriques utilisées.....	27
2.3	Caractéristiques des mouvements sismiques forts	30
2.4	Analyse des enregistrements des mouvements sismiques.....	31
2.5	Intégration des mouvements sismiques.....	33
2.6	Caractérisations du site basée sur V_{max} / a_{max}	33
2.7	Conclusion.....	50

Chapitre 3
CARACTÉRISATION DES EFFETS DE SITE SUR LE CONTENU FRÉQUENTIEL
DES MOUVEMENTS DE SOL

3.1	Introduction	52
3.2	Contenus fréquentiels des signaux -Spectres de Fourier.....	52
3.2.1	Transformée de Fourier continue.....	53
3.2.2	Transformée de Fourier discrète.....	53
3.2.3	Spectre de Fourier.....	55
3.3.	Applications aux signaux du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003...	57
3.4	Fonction d'amplification HVSR.....	58
3.5	Fonction d'amplification SSR.....	59
3.6	Conclusion.....	88

Chapitre 4
ETUDE ANALYTIQUE DES EFFETS DE SITE

4.1	Introduction	90
4.2	Méthodes d'analyse des effets de site.....	90
4.2.1	Analyse linéaire de la réponse sismique de site.....	91
4.2.2	Analyse linéaire équivalente de la réponse sismique de site.....	91
4.2.3	Analyse non linéaire de la réponse sismique de site.....	92

4.3	Détermination de la réponse du profil de sol du site étudié.....	93
4.4	Effets des conditions locales de site sur les mouvements sismiques.....	93
4.5	Contraste d'impédance.....	95
4.46	Evaluation de la réponse d'un site.....	97
4.6.1	Essais géotechniques du site de Bab-Ezzouar.....	97
4.6.2.	Essais géotechniques du site de Maradja.....	100
4.7	Programme utilisé.....	102
4.8	Applications.....	104
4.8.1	Fonction d'amplification.....	104
4.8.2	Histoire des accélérations de sol (Accélérogramme).....	106
4.8.3	Spectres de réponse calculés aux sites étudiés.....	108
4.9	Conclusion.....	111

Chapitre 5

INFLUENCE DES EFFETS DE SITE SUR LES SPECTRES DE RÉPONSE

5.1	Introduction	113
5.2	Spectre de réponse.....	113
5.3	Calcul du spectre de réponse.....	113
5.4	Quantification des effets de site sur les spectres de réponse.....	118
5.4.1	Effet de l'amortissement sur les spectres de réponse	118
5.4.2.	Effet des conditions locales de sol sur les spectres de réponse.....	119
5.4.3.	Effet de la magnitude sur les spectres de réponse.....	122
5.4.4.	Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse.....	125
5.4.5	Effet de la durée sur les spectres de réponse	135
5.5	Rapport des spectres de réponse normalisés NHVSR.....	136
5.6	Conclusions.....	150

Chapitre 6

PRISE EN COMPTE DE EFFETS DE SITE PAR LES SPECTRES DE RÉPONSES RÉGLEMENTAIRES ET ÉTUDE COMPARATIVE

6.1	Introduction.....	152
6.2	Classification des sites selon les règlements parasismiques.....	152

6.2	Classification des sites selon les règlements parasismiques.....	153
6.2.1	Règles Parasismiques Algériennes RPA99/2003.....	153
6.2.1.1	Classification des sites.....	154
6.2.2	Eurocode 8.....	155
6.2.2.1	Classification des sites.....	155
6.2.2.2	Spectre de réponse élastique.....	156
6.2.3	Uniform Building Code (UBC1997).....	159
6.2.3.1	Classification des sites.....	159
6.2.3.2	Spectre de réponse élastique.....	160
6.4	Applications.....	161
6.5	Conclusions.....	166

CONCLUSIONS GENERALES

1	Conclusions.....	168
2	Recommandations.....	169

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 :	Valeurs maximales des accélérations lors du tremblement de terre de Boumerdes du 21 Mai 2003 aux 13 stations du Réseau Algérien d'Accélérographes dans les directions (E-W), (V) et (N-S).	30
Tableau 2.2 :	Caractérisation de site.	49
Tableau 4.1 :	Lithologie du sondage dans le quel l'essai Down-hole est réalisé au niveau du site de Bab-Ezzouar.	99
Tableau 4.2 :	Propriétés géotechniques de sol de 9 couches sur montant sur un semi espace rigide du site de Maradja.	102
Tableau .4.3 :	Comparaison des monocouches équivalentes.	105
Tableau 5.1 :	Date et magnitude des différents séismes.	124
Tableau 5.2 :	Valeurs des accélérations maximales enregistrées lors du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 (M=6.80).	128
Tableau 5.3	les paramètres de caractérisation de site obtenu de l'interprétation des enregistrements sismiques du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003.	149
Tableau 6.1 :	Classification des sites d'après le RPA99.	154
Tableau 6.2 :	Périodes caractéristiques selon le RPA99.	154
Tableau 6.3 :	Classification des sites d'après L'Eurocode 8.	156
Tableau 6.4 :	Valeurs des paramètres décrivant le spectre de réponse élastique de type 1.	157
Tableau 6.5 :	Valeurs des paramètres décrivant le spectre de réponse élastique de type 2.	158
Tableau 6.6 :	Classification des sols d'après l'UBC1997.	159
Tableau 6.7 :	Périodes caractéristiques des spectres moyens des composantes (E-W) et (N-S) et les différents règlements parasismiques (RPA99, Eurocode8 et UBC97).	163

Liste des Figures

Fig.1.1 :	Facteurs influant sur les caractéristiques des mouvements sismiques des sols.	7
Fig1.2 :	Schématisation des effets de site directs.	8
Fig.1.3 :	Spectres de réponse élastiques réglementaires des sites.	14
Fig.1.4 :	Topographie superficielle.	16
Fig. 1.5 :	Fonction d'amplification horizontale à la crête d'une pente simple pour une onde SV inclinée.	17
Fig. 1.6 :	Effet de site topographique lors du séisme de Dahama -Yamen 2006.	19
Fig.1.7 :	Schématisation de la réponse d'un sol dans le plan ($\tau - \gamma$) lors du chargement cyclique	23
Fig.2.1 :	Stations d'accélérographes du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.	29
Fig. 2.2 :	Carte montrant la distribution de dépôts quaternaires (gris) et les failles actives principales dans la région Alger-Boumerdes.	29
Fig.2.3 :	Faille de Thénia et localisation du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003	32
Fig. 2.4 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Keddara (Station 1).	35
Fig. 2.5 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et(V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Keddara (Station 2).	36
Fig. 2.6 :	Accélérations, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Dar EL Baida.	37
Fig. 2.7 :	Accélérations, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Hussein Dey.	38
Fig. 2.8 :	Accélérations, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Kouba.	39
Fig. 2.9 :	Accélérations, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Tizi Ouzou.	40
Fig. 2.10 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Blida.	41
Fig. 2.11 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Azazga.	42
Fig. 2.12 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en	43

	champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de EL Afroun.	
Fig. 2.13 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Hammam Righa.	44
Fig. 2.14 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Miliana.	45
Fig. 2.15 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Ain Defla.	46
Fig. 2.16 :	Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau de la réplique de Boumerdes.	47
Fig. 2.17	Carte géologique structurale de la région d'Alger durant le séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003.	48
Fig. 3.1 :	Schématisation d'un profil de sol soumis à la propagation d'une onde de cisaillement de type SH.	56
Fig. 3.2 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissés et lissés des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara1.	61
Fig. 3.3 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara1.	62
Fig. 3.4 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissés et lissés des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara2.	63
Fig. 3.5 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara2	64
Fig. 3.6 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Dar ELBeida.	65
Fig. 3.7 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Dar ELBeida .	66
Fig. 3.8 :	Tracées des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Hussein Dey.	67
Fig. 3.9 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de	68

	Boumerdes 2003 au niveau du site de Hussein Dey.	
Fig. 3.10 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Kouba.	69
Fig. 3.11 :	Tracées des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Kouba.	70
Fig. 3.12 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Tizi Ouzou.	71
Fig. 3.13 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Tizi Ouzou.	72
Fig. 3.14 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Blida.	73
Fig. 3.15 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Blida.	74
Fig. 3.16 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Azazga.	75
Fig. 3.17 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) lissées et non lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Azazga.	76
Fig. 3.18 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de EL Afroun .	77
Fig. 3.19 :	Tracées des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de EL Afroun.	78
Fig. 3.20 :	Tracées des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissés et lissés des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Hammam.	79
Fig. 3.21:	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Hammam Righa.	80

Fig. 3.22 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissés et lissés des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Meliana	81
Fig. 3.23 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSr) lissées et non lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Meliana.	81
Fig. 3.24 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Ain Defla.	82
Fig.3.25 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSr) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Ain Defla.	83
Fig. 3.26 :	Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau de la réplique de Boumerdes site.	84
Fig.3.27 :	Tracés des fonctions d'amplifications (HVSr) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau de la réplique de Boumerdes.	85
Fig. 3.28 :	Rapport Spectral Standard (SSR) entre les composantes E-W et N-S des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau de la station de Keddara1 et celles de la station Keddara2.	86
Fig. 4.1 :	Deux dépôts de sol identiques sur montant sur un semi espace rigide (rocheux) avec des vitesses de l'onde de cisaillement différentes.	94
Fig. 4.2 :	Effet des conditions locales sur les fonctions d'amplification.	95
Fig. 4.3 :	Carte montrant les caractéristiques principales de la marge d'Alger. La géologie illustre les unités principales de la chaîne Maghrebien. D1 et D4 représentent les bassins sédimentaires, et l'étoile noire représente l'épicentre du tremblement de terre de Boumerdes du 21 Mai 2003 .	98
Fig. 4.4 :	Profil des vitesses de l'onde de cisaillement (a) et profil de sol (b) au site de Bab-Ezzouar.	100
Fig. 4.5 :	Fonction d'amplification des sites (Bab Ezzouar et Maradja).	106
Fig. 4.6 :	Comparaison entre les accélérations calculées et enregistrées des stations de Bab-Ezzouar, Maradja et Dar ELBeida des composantes (a)-(E-W) et (b)- (N-S).	107
Fig. 4.7 :	Comparaison entre les spectres de réponse calculés à Bab -Ezzouar et Maradja et ceux enregistrés au site de Dar El Beida.	110
Fig. 5.1 :	Oscillateurs simple à un degré de liberté.	114
Fig. 5.2 :	Principe d'obtention de l'intégrale de Duhamel.	115
Fig. 5.3 :	Spectre de réponse en déplacement.	116
Fig. 5.4 :	Spectre de réponse en pseudo-accélération.	117

Fig. 5.5 :	Effet du coefficient d'amortissement sur les pseudo accélérations de l'accélérogramme de la station de Keddara1- rocher.	120
Fig. 5.6 :	Effet du coefficient d'amortissement sur les pseudos accélérations de l'accélérogramme de la station de Keddara2- sol.	121
Fig. 5.7 :	Effet du type de sol sur les spectres de réponse normalisés des composantes E-W, N-S et V des stations Keddara (1), Keddara (2) et Dar EL Baida du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003.	123
Fig. 5.8 :	Effet de la magnitude sur les spectres de réponses normalisés des composantes (E-W) et (N-S) pour des sites rocheux.	126
Fig. 5.9 :	Effet de la magnitude sur les spectres de réponses normalisés des composantes (E-W) et (N-S) pour des sites meubles.	127
Fig. 5.10 :	Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance inférieur ou égale 20km lors du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 .	1129
Fig. 5.11	Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance épacentral entre 20 et 50 km lors du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 .	130
Fig. 5.12	Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance épacentral entre 50 et 100 km lors du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 .	131
Fig. 5.13	Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance épacentral supérieur à 100km lors du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 .	132
Fig. 5.14	Comparaison des spectres en pseudo accélérations normalisées pour différentes distances épacentrales.	133
Fig. 5.15	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Keddara1.	138
Fig. 5.16 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Keddara2.	139
Fig. 5.17 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Dar EL Beida.	140
Fig. 5.18 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Hussein Dey.	141
Fig. 5.19 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des	142

	accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Kouba.	
Fig. 5.20 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Tizi Ouzou.	143
Fig. 5.21 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Blida.	144
Fig. 5.22 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de EL Afroun.	145
Fig. 5.23 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Hammam Righa.	146
Fig. 5.24 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Meliana.	147
Fig. 5.25 :	Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 au niveau du site de Ain Defla.	148
Fig. 6.1 :	Spectres de réponse élastiques réglementaires pour les 4 catégories de sites des Règles Parasismiques Algériennes.	155
Fig. 6.2 :	Spectres de réponse élastiques du type 1 pour les 5 classes de sol de l'EC8.	158
Fig. 6.3 :	Spectres de réponse élastiques du type 2 pour les 5 classes de sol de l'EC8.	159
Fig. 6.4 :	Spectre de réponse élastique de l'UBC97.	160
Fig. 6.5 :	Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W, N-S et les spectres de réponse élastiques des Règles Parasismiques Algériennes.	164
Fig. 6.6 :	Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W et N-S et les spectres de réponse élastiques du type 1 pour les 5 classes de sol de l'EC8.	164
Fig. 6.7 :	Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W et N-S et les spectres de réponse élastique du type 2 pour les 5 classes de sol de l'EC8.	165
Fig. 6.8 :	Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W et N-S et les spectres de réponse élastiques de l'UBC97.	165

1. Introductions

Les tremblements de terre font partie des cataclysmes naturels qui ont toujours exercé une grande fascination sur l'humanité. Ils sont responsables de la destruction de villes entières et ont aussi causé la mort de millions d'hommes et souvent des conséquences économiques désastreuses pour les pays touchés.

Les effets de sites peuvent amplifier très significativement les mouvements sismiques et augmenter le risque des dommages et la rupture des structures. Ces effets ont été observés lors de plusieurs séismes antérieurs. Plusieurs chercheurs se sont intéressés, ces dernières années, à la caractérisation des effets de site à partir des données accélérométriques. Ces données constituent une source de connaissance et de compréhension très intéressante du problème d'amplification des mouvements sismiques aux sites étudiés.

D'autre part, l'évaluation de la réponse de dépôts de sol stratifiés, à une sollicitation sismique, constitue l'un des problèmes fondamentaux de génie parasismique. Il s'agit de déterminer les caractéristiques du mouvement sismique au voisinage de la surface du sol, à partir d'un mouvement d'entrée à la base. Cette évaluation est indispensable à la définition des accélérations auxquelles une structure est soumise.

La majorité des règles parasismiques, de part le monde, prend en compte ces effets de site par l'introduction de catégories définissant des types de sols. Cependant, cette prise en compte se révèle insuffisante ou mal adaptée pour certains sites particuliers, à la lumière des retours d'expérience de ces dix dernières années. Les évolutions futures de la réglementation permettront d'introduire des améliorations.

2. Objectifs visés

Le but principal du présent mémoire dont l'intitulé est « Influence des Effets de Sites sur l'Amplification du Mouvement Sismique du Sol » est une caractérisation des effets de site à partir d'enregistrements de mouvements sismiques en surface de sol. Cette caractérisation est menée par des méthodes empiriques et des méthodes analytiques.

Nous avons choisi d'utiliser les données accélérométriques collectées lors d'un séisme récent qui a secoué le nord de l'Algérie. Il s'agit du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 de magnitude 6.8 sur l'échelle Richter.

Nous avons étudié des effets de site sur l'histoire de ces mouvements de sol, c-à-d, les accélérations, les vitesses et les déplacements, des particules de sol et aussi sur le contenu fréquentiel des accélérations en termes de spectre de Fourier ou leurs rapports et également sur les spectres de réponses en pseudo accélération.

Nous avons, en dernier lieu comparé les spectres de réponses en champ proche avec, d'une part, les Règlements Parasismiques Algériennes (RPA, version 2003) et d'autres par deux codes parmi les plus connus dans le monde: l'Eurocode8 et l'UBC 1997.

A partir de cette étude, nous avons pu mettre en évidence la présence des effets de site qui ont accompagné le séisme de Boumerdes aux niveaux des sites de Keddara, Dar EL Beida et EL Afroun. Nous avons aussi constaté que dans le RPA, la fréquence correspondant à $\frac{1}{T_1}$ est inférieure à celle des mouvements enregistrés.

3. Organisation du mémoire

Ce mémoire est constitué de six chapitres qui sont organisés de la manière suivante:

Le premier chapitre est consacré à la description de différentes méthodes existantes d'estimations des effets de site de façon numérique et analytique pour la mise en évidence et la prise en compte de ces effets.

Puis, *le deuxième chapitre* est consacré à une quantification des effets de site sur les mouvements sismiques de sol, au niveau des sites correspondants aux stations qui ont enregistré les mouvements de sol lors du séisme du 21 Mai 2003 de Boumerdes. Cette étude a porté sur un examen visuel des courbes représentant les accélérations, les vitesses et les déplacements des particules de sol enregistrés lors du choc principal du séisme de Boumerdes par les treize stations d'accélérographes en champ libre.

Le troisième chapitre est consacré à une quantification empirique des effets de site sur le contenu fréquentiel des mouvements de sol. Dans ce chapitre nous avons étudié les effets de site sur le contenu fréquentiel des mouvements sismiques du sol aux moyens des spectres de Fourier en utilisant des données de mouvements forts, sous formes d'accélérogrammes, et les rapports de ces spectres.

Toutefois, il y a un autre moyen de quantifier l'effet de site au moyen du contenu fréquentiel ; il s'agit des spectres de réponse des mouvements des sols.

Le quatrième chapitre porte sur l'étude de l'amplification par effet de site, de façon analytique au niveau de deux sites. L'un à Bab-Ezzouer et l'autre à Maradja à 20 et 30 km, respectivement, de la capitale Alger. Nous avons évalué la fonction d'amplification de chacun des deux sites en surface libre en utilisant un programme numérique (SHAKE91). Pour ce la, nous avons transféré l'accélérogramme enregistré à la station du site rocheux de Keddara (barrage de Keddara) aux bases respectives des deux sites de Bab-Ezzouer et Maradja. En dernier lieu, la réponse de chacun des deux sites étudiés, en termes d'accélération de sol et spectres de réponse, est comparée avec celle enregistrée à un site avoisinant, lors du choc principal du séisme de Boumerdes 2003.

Le cinquième chapitre porte sur l'influence des effets de site sur les spectres de réponse. Pour cela nous avons étudié l'effet du coefficient d'amortissement, le type de sol, la magnitude, la distance épacentrale et la durée du séisme sur les spectres de réponse normalisés, en utilisant les données accélérométriques du séisme de Boumerdes 2003. Cependant, pour montrer l'effet de la magnitude sur les spectres de réponse nous avons choisi, en plus, d'autres séismes ; ceux de Duzce et Izmit en Turquie et les séismes de Northridge et Loma Prieta aux USA.

Le sixième chapitre porte sur une comparaison entre les spectres de réponse normalisés obtenus en champ proche lors du séisme de Boumerdes 2003 et les spectres réglementaires, d'une part, des Règles Parasismiques Algériennes *RPA99* (version 2003) et, d'autre part, avec ceux de l'*Eurocode8* et l'*UBC1997*. L'objectif principal de cette étude comparative est d'étudier les différences qui peuvent être observées par l'utilisation de différents règlements dans la prise en compte des effets de site.

1.1. Introduction

La terre est très hétérogène et sa géologie de surface variée est à l'origine des variations significatives spatiales des mouvements sismiques. Les conditions de sol locales peuvent produire une grande amplification du mouvement du sol lors d'une excitation sismique. Les conditions locales de sol et les conditions géologiques sont principalement étudiées en termes d'accélération maximale, vitesses ou déplacements ou encore au moyen des spectres de Fourier ou spectres de réponses.

Les conditions locales de sol influent considérablement sur les caractéristiques des ondes sismiques pendant une excitation sismique. Les dépôts de sol meubles amplifient les fréquences du mouvement de sol et prolongent la durée du mouvement [1]. Les observations des mouvements forts peuvent être employées pour déterminer la période prédominante de vibration et les propriétés dynamiques d'un site. La méthode de micro-tremblements mesure les vibrations ambiantes dans la terre. Les enregistrements des mouvements sismiques des sols constituent la meilleure source pour estimer les effets de site.

Vers les années 1930, le premier accélérographe d'enregistrement de mouvements forts fut construit et installé aux sites libres dans les constructions [2]. Le premier système automatique de numérisation de mouvement fort 'accélérogramme' fut développé par Trifunac et Lee (1979) [3].

1.2. Influence des effets de site sur les dommages des structures

Les mesures des dégâts dus aux tremblements de terre sont fonction de différents facteurs. Les facteurs influençant les caractéristiques du mouvement du sol à un site peuvent être récapitulés comme ci-dessous et sont schématisés par la figure 1.1 [1] :

- magnitude du tremblement de terre,
- distance épacentrale,
- conditions géologiques de dépôts de sol,
- direction et vitesse de propagation des ondes,
- type de sol et
- Mécanisme de la source du tremblement de terre.

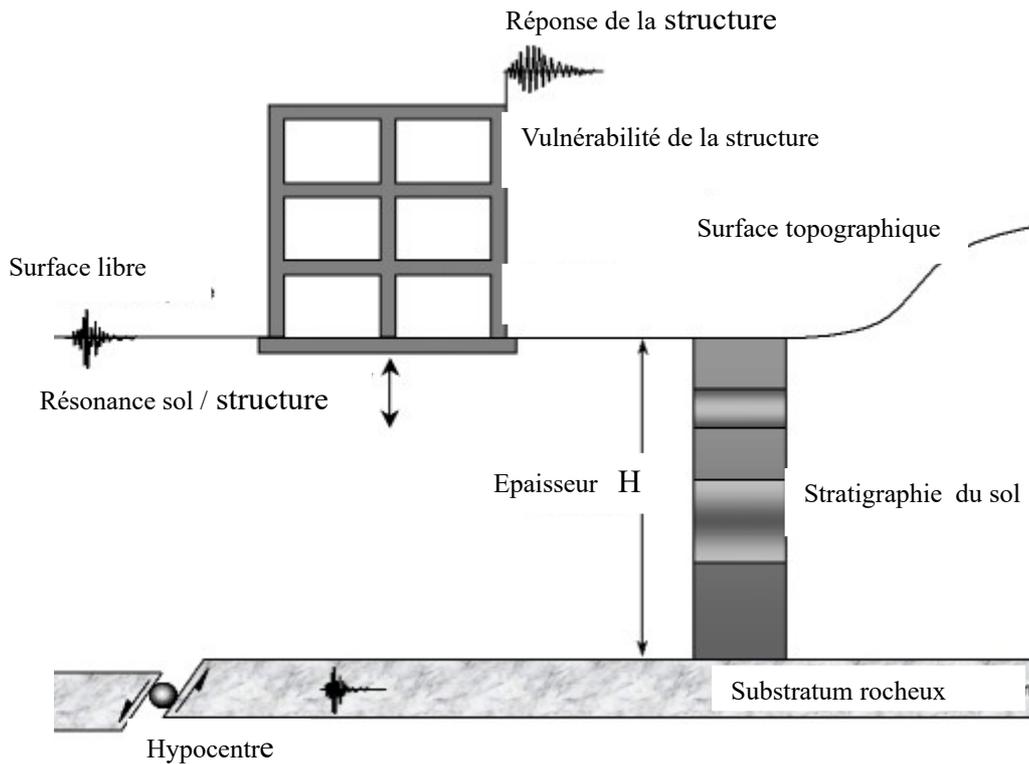


Fig.1.1- Facteurs influant sur les caractéristiques des mouvements sismiques des sols
(Adaptés selon Lang [1]).

Les caractéristiques dynamiques de la réponse de site varient pendant une excitation sismique. Les effets de site sismiques peuvent être divisés en deux catégories ; effets de sites directs et effets indirects.

1.2.1. Effets directs

Dans ces conditions la dégradation de la résistance du sol lors d'une excitation sismique est importante. Les conséquences d'une telle situation, sont la liquéfaction des sols, le tassement sismique, la rupture superficielle ou glissement de terrain provoqué par l'instabilité des pentes. Les effets de site directs sont les plus responsables des dégâts des structures (Fig.1.2).

1.2.2. Effets indirects

Le sol reste stable et résiste à l'interférence du tremblement de terre ; les ondes sismiques transmises dans le sol peuvent augmenter l'amplitude des mouvements sismiques.

Les observations tirées des dégâts de tremblements de terre antérieurs font garder à l'esprit des effets des conditions de sol sur les mouvements sismiques. Les séismes d'EL Asnam 1980, de Mexico 1985, et de Kobe 1995 ont montré de façon indéniable l'importance de la prise en compte des conditions locales de sites dans la conception parasismique des bâtiments.

Les effets de site peuvent modifier la propagation des ondes sismiques, et le contenu fréquentiel, l'amplitude et la durée de l'excitation (effet d'amplification des couches de sol). La topographie superficielle peut contribuer à l'apparition des effets de site locaux. Pour identifier ces effets, les enregistrements des mouvements sismiques aux sites sont nécessaires.

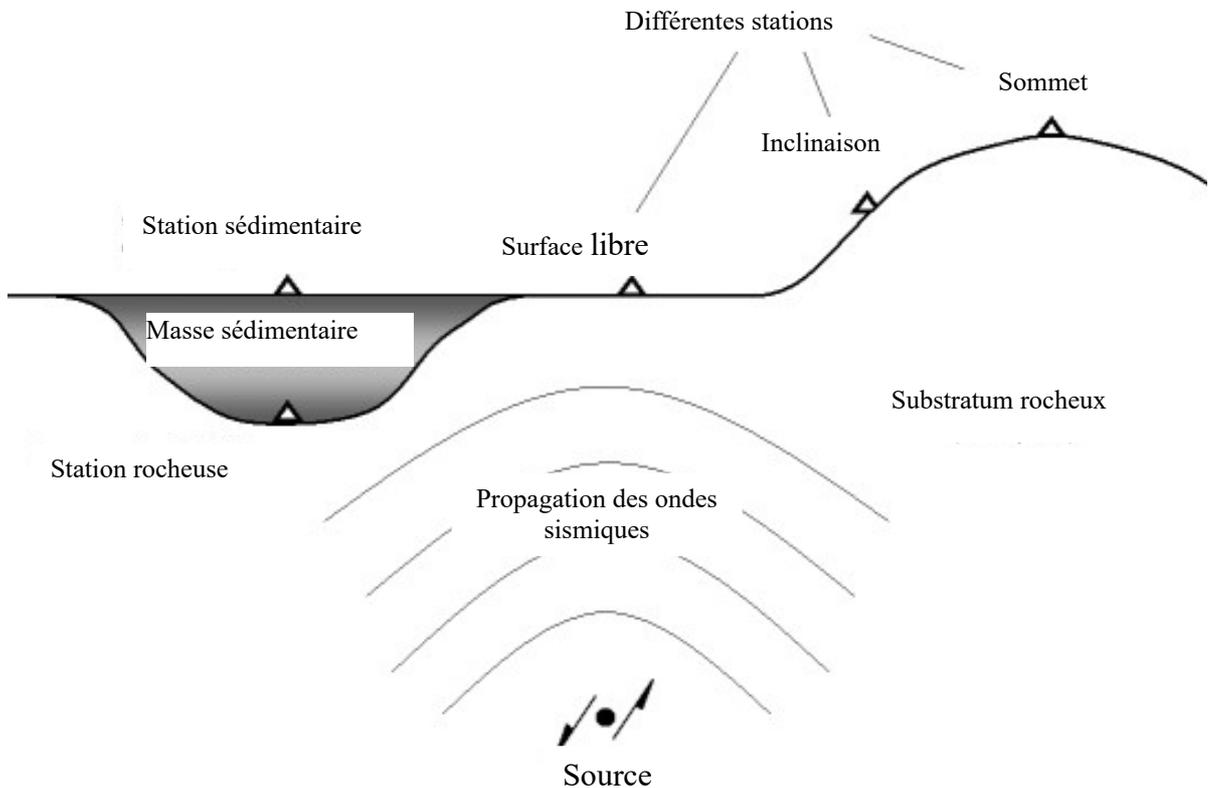


Fig1.2- Schématisation des effets de site directs (*Adapté selon Lang [1]*).

Le mouvement du sol peut varier localement en raison de la topographie ou de la constitution du sous-sol. Les réponses des sols aux sollicitations sismiques dépendent fortement de leurs caractéristiques géotechniques et géologiques. L'estimation des effets de site, quoi qu'ils soient (directs ou indirects), passe par la connaissance détaillée

du sous-sol (géologie, géométrie et les caractéristiques géotechniques), et par l'établissement d'un système sous forme de modèle géotechnique.

1.3. Méthode d'estimation des effets de site

Pour identifier les effets de site, c-à-d identifier les dégâts structuraux pendant une excitation sismique, les études spécifiques peuvent être menées à l'échelle locale ou régionale. Il est nécessaire de développer des techniques d'évaluation de la réponse de site et améliorer les méthodes de simulation numérique.

Deux approches principales sont utilisées pour quantifier les effets de site: les méthodes analytiques (théoriques) et les méthodes expérimentales (empiriques).

1.3.1. Méthodes analytiques (théoriques)

Les méthodes théoriques utilisent des données géotechniques du sol tels que les paramètres mécaniques et dynamiques. Ces méthodes consistent à faire des hypothèses sur le modèle géométrique de sol (unidimensionnel, bidimensionnel ou tridimensionnel), ou selon le modèle rhéologique (comportement linéaire ou non linéaire de sol). Dans ce contexte différentes méthodes d'analyses peuvent être menées, que nous décrivons brièvement ci-dessous.

- ***Analyses non linéaire équivalente unidimensionnelle de la réponse de site***

L'analyse de la réponse sismique d'un site est souvent menée en supposant que le profil de sol correspondant au site étudié est stratifié horizontalement et d'étendue latérale infinie. La dissipation de l'énergie dans le sol est prise en introduisant un pourcentage d'amortissement hystérétique. Ainsi, le modèle utilisé dans ces conditions est un modèle viscoélastique linéaire.

La prise en compte des non linéarités du sol est faite par l'approche linéaire équivalente unidimensionnelle (1-D) de la réponse de dépôts de sol. Elle a été incorporée dans beaucoup de programmes numériques dont le plus universel est le programme *SHAKE91* [4]. La donnée essentielle dans cette méthode est la fonction d'amplification définie comme le rapport de l'amplitude du déplacement en un point (A) du profil de sol ou à la surface libre (le plus souvent) et l'amplitude du déplacement à un point (B) situé

sur un affleurement rocheux hypothétique ou au niveau d'une base rocheuse, pour une fréquence donnée. Cette fonction prend la forme ci-dessous [5], si le point B est à l'interface d'une couche de sol homogène d'une épaisseur h_i , une masse volumique ρ_i , un coefficient d'amortissement ξ_i et une vitesse de l'onde de cisaillement V_{S_i} :

$$T_{j,j+1}(\omega) = \frac{2}{(1+q)e^{ip_1h} + (1-q)e^{-ip_1h}} \quad (1.1)$$

Ou sous la forme ci-dessous si l'amortissement dans le sol est supposé nul :

$$T_{j,j+1}(\omega) = \frac{1}{\cos(p_1h) + iq \sin(p_1h)} \quad (1.2)$$

où $p_1 = \frac{\omega}{V_s}$ et

$$q = \frac{\rho_1 G_1}{\rho_2 G_2} \text{ est appelé le rapport d'admittance,}$$

G_2 et ρ_2 sont le module de cisaillement et la masse volumique dans le rocher.

Une fois la fonction d'amplification déterminée, on peut déterminer la réponse d'un dépôt de sol à sa surface par convolution à une sollicitation dynamique en terme d'accélération des particules de sol ou déformations. On en déduit ensuite la

déformation maximale, puis une déformation moyenne ($\gamma_{moy} = \alpha \gamma_{max}$; $\alpha = 0.5$ à 0.6).

On entame ensuite des itérations jusqu'à ce que la déformation induite soit compatible avec celle obtenue des courbes de variations du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement [5].

1.3.2. Méthode expérimentale (empirique)

Les méthodes expérimentales se basent sur l'analyse des enregistrements des mouvements de sol générés lors d'un séisme d'une certaine magnitude en un site particulier. Dans ces méthodes, plusieurs techniques en découlent.

1.3.2.1. Technique du Rapport Spectral Horizontal/Vertical –HVSR

La technique HVSR (Horizontal to vertical spectral Ratio), développée par Nogoshi et Igarashi et généralisée par Nakamura, est généralement utilisée pour les enregistrements de mouvements forts. Cette technique est maintenant largement utilisée grâce à sa simplicité et son efficacité pour identifier la fréquence fondamentale du sol, qui est d'habitude définie comme la fréquence du premier pic. Cela révèle l'influence de couches de sol meubles près de la surface.

La technique HVSR permet d'estimer la réponse de sites en procédant à la division de l'amplitude du spectre de Fourier d'une composante horizontale par celle de la composante verticale, pour une même station et un même événement sismique.

La méthode HVSR des mouvements forts a été présentée par *Nogoshi et Igarashi, en 1971) et modifiée par Nakamura, en 1989) [6]. Cette technique utilise une seule station d'enregistrement de mouvement de sol. Le principe de cette technique consiste à enregistrer des vibrations ambiantes du sol pendant une excitation sismique et à calculer le rapport spectral entre la composante horizontale et la composante verticale d'une même station. Le rapport H/V est principalement déterminé pour les ondes SH.*

Les valeurs d'amplification spectrales des rapports H/V doivent être considérées comme un indicateur relatif d'amplification locale du sol. Il y a une corrélation entre la génération d'un pic de fréquence H/V et la rigidité des couches sédimentaires [1]. L'effet de l'amortissement du sol local peut modifier les signaux sismiques. La composante verticale du mouvement du sol est relativement non influencée par la structure locale, tandis que la composante horizontale contient l'onde P aux conversions des ondes S aux discontinuités structurelles au niveau du site étudié.

Des travaux récents [1] recommandent de prendre seulement la partie des ondes S du sismogramme (accélérographe) pour l'analyse spectrale H/V. Les mouvements du sol observés sont divisés selon un modèle d'atténuation régional basé sur le mouvement de sol enregistré aux stations sur rocher. Les stations sur rocher sont supposées pour n'éprouver aucun effet de site. Si la source et les effets de chemin pour une région sont bien connus, alors cette méthode peut estimer l'amplification de site.

La technique H/V peut être appliquée pour déterminer les caractéristiques dynamiques de dépôt sous-jacent [7]. Cette technique consiste en un calcul empirique des fonctions de transfert T_H et T_V à partir d'enregistrements horizontaux et verticaux des microtremors en surface de sol et au niveau du substratum rocheux :

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1.3-a)$$

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (1.3-b)$$

Où S_{HS} est le spectre de réponse horizontal du sol et S_{VS} le spectre de réponse vertical du sol. S_{HB} est le spectre de réponse horizontal sur la roche et S_{VB} le spectre de réponse vertical sur la roche. La fonction d'effet de site modifiée peut être écrite comme [7]:

$$T_{\text{Site}} = \frac{T_H}{T_V} = \frac{S_{HS} \cdot S_{VB}}{S_{HB} \cdot S_{VS}} \quad (1.4)$$

Dans les sols fermes, la propagation des ondes est la même dans toutes les directions. Le rapport spectral (H/V) dans la roche sera égal à un et la fonction de transfert d'un site s'écrit [7] :

$$T_{\text{Site}} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (1.5)$$

T_{site} ou la courbe H/V montre un même pic à f_0 (fréquence fondamentale) quelque soit le type de l'événement sismique. Si f_0 et A_0 (Rapport des vitesses entre le rocher et le sol) sont connues de la courbe H/V et si la vitesse de l'onde sismique au rocher (V_B) est également connue, l'épaisseur du sol (H) peut être calculée à partir des deux expressions:

$$f_0 = \frac{V_S}{4H} \quad \text{et} \quad A_0 = \frac{V_B}{V_S} \quad (1.6)$$

d'où

$$H = \frac{V_B}{4A_0f_0} \quad (1.7)$$

L'énergie sismique est amplifiée en raison de l'effet topographique. Ainsi, il est important que les effets topographiques soient considérés dans les régions fortement sismiques.

1.3.2.2. Technique du rapport spectral standard –SSR

La méthode du Rapport Spectral Standard (SSR -Standard Spectral Ratio) a été largement utilisée de part le monde. La méthode du Rapport Spectral Standard est présentée par *Borcherdt, en 1970* (dans [1]).

Sa formulation consiste à calculer le rapport d'amplitude des spectres de Fourier entre deux stations d'enregistrements. La première station d'enregistrement est sur sol et la deuxième station d'enregistrement est sur rocher (site de référence). Ainsi, cette méthode nécessite un site de référence (généralement rocheux) pour être appliquée. La distance entre les deux sites doit être limitée pour avoir un champ d'ondes semblable [6].

La méthode du Rapport Spectral Standard (SSR), la plus universellement utilisée permet de faire une comparaison des mouvements en surface de sol, enregistrés en plusieurs sites ou stations dans la même région. L'utilité de cette technique dépend de la disponibilité d'une station sur une roche voisine. Un large espacement entre les sites de sismographes limite l'utilisation de cette technique [6]. Les sites étudiés devraient avoir la même source de séisme et les effets de trajectoire. Il est supposé que la source, la trajectoire et les effets de site sur les mouvements du sol sont séparables.

La technique du SSR est basée sur deux conditions: la nécessité d'un site de référence, généralement rocheux ou en affleurement à la base du profil de sol du site étudié; la deuxième condition est que le deuxième site soit aussi proche de la station étudiée et pour un même événement sismique.

1.3.2.3. Technique de la fonction d'amplification spectrale (S_a/a_{max})

La fonction d'amplification spectrale (S_a/a_{max}) se base sur des données de tremblement de terre pour calculer essentiellement des spectres de réponse normalisés, valeur maximale d'accélération ($S_a(T)/a$), vitesse ($S_v(T)/V$), ou déplacement ($S_d(T)/d$) de mouvement de terre.

Généralement le calcul des spectres de réponse normalisés qui concerne l'accélération maximale de sol ($S_a(T)/a$) est le plus employé, parce que les données de mouvements forts dans la plupart des cas sont disponibles en termes d'accélération de sol.

1.3.2.4. Méthode du spectre de Fourier

En 1954, Kanai dans [1] a présenté l'application de la méthode des spectres d'amplification de Fourier sur les données de microtremors. La première application de cette technique a montré que le sol est qualitatif. Bard, en 1998 (dans [1]), a étudié les spectres au moyen du bruit ambiant enregistré dans un site. Les grandes périodes ont été attribuées aux sites meubles. La méthode d'amplification des *spectres de Fourier* mène à des résultats satisfaisants sur les données de mouvements sismiques [1] (Fig.1.3).

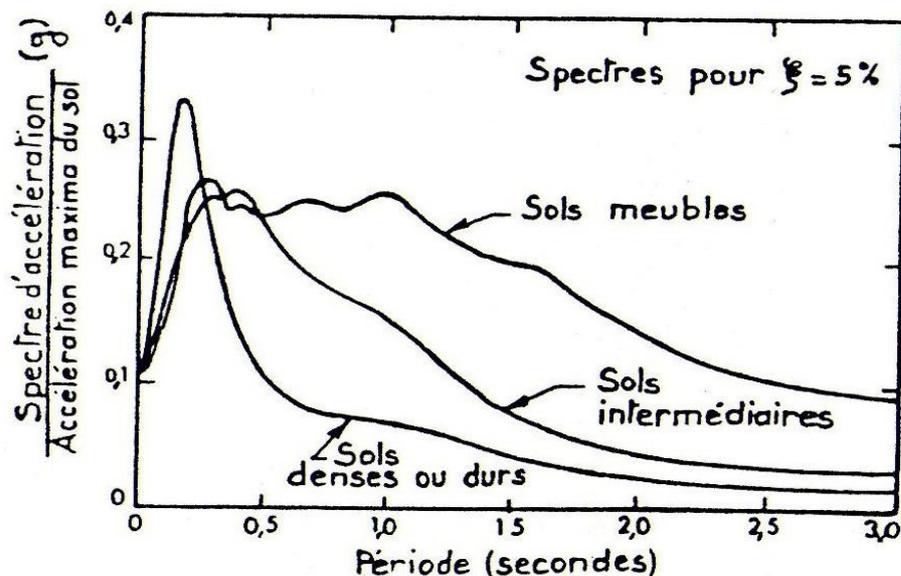


Fig.1.3 Spectres de réponse élastiques réglementaires des sites [8].

1.4. Effets de site topographiques

Les effets de site topographiques sont définis comme les modifications locales des caractéristiques de la réponse sismique d'un site dues à la présence d'irrégularités topographiques ou à des variations des propriétés mécaniques du sol. Ces modifications induisent une amplification de la réponse du site et l'apparition d'ondes en surface [1].

Les effets topographiques, consistent en la modification des mouvements de sol dans les zones proches des pentes. La topographie superficielle peut influencer considérablement la fréquence et les caractéristiques d'amplification du mouvement sismique, ainsi que les dégâts structuraux. On distingue deux types de topographie [1]: la topographie superficielle et la topographie de sous-sol.

- La topographie superficielle, est principalement caractérisée par des particularités montagneuses, comme la présence de la roche ou des pentes de sol meuble. La topographie superficielle à la crête peut amplifier le mouvement horizontal.
- La topographie du sous-sol, est causée par l'hétérogénéité latérale des couches du sous-sol ou par la géométrie du bassin.

Les sommets des crêtes d'arête, mènent à une amplification du mouvement sismique (Fig. 1.4). L'amplification du mouvement sismique sur les particularités topographiques est de sorte que les effets maximaux peuvent être observés pour les longueurs d'ondes qui sont approximativement liées aux dimensions horizontales de la forme topographique.

Des études antérieures ont étudié l'influence de la topographie superficielle sur les mouvements du sol en utilisant à la fois des études théoriques et expérimentales [1].

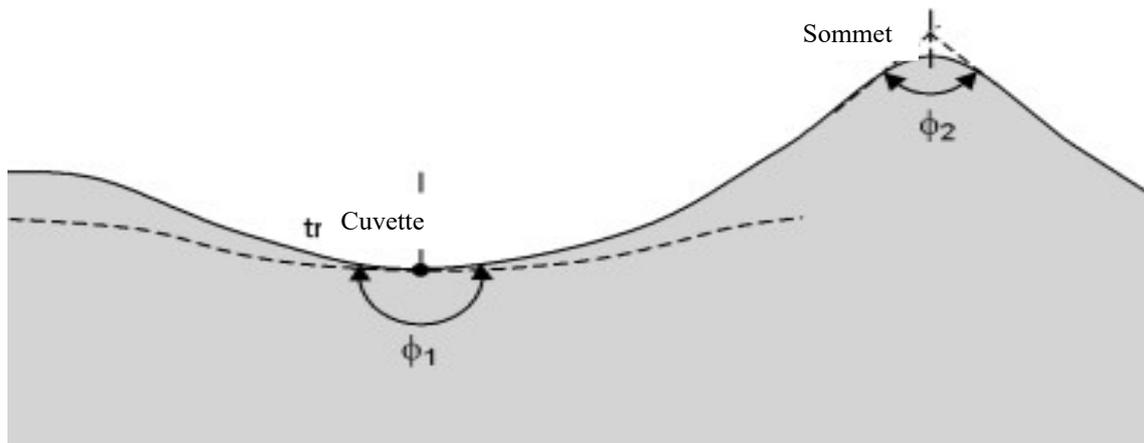


Fig.1.4-Topographie superficielle (*Adaptés selon Lang [1]*).

Des études [9] sur la propagation des ondes planes dans un demi-espace à différents angles d'incidence α_v (Fig.1.5-a), ont montré que l'amplification augmente généralement avec l'angle de la pente et à proximité de la crête et elle est maximale pour un rapport hauteur de la pente (H) à la longueur d'ondes (λ) H/λ de l'ordre de 0,2. Des résultats pour les ondes SV d'incidence verticale sont résumés dans la figure 1.5-b [9]. L'amplification montrée par la figure.1.5-b peut être augmentée de façon significative quand les ondes incidentes sont inclinées dans la crête du talus (c'est-à-dire, $\alpha_v < 0$). Par exemple, dans la figure 1.5-c la pente à facettes verticales montre une amplification supérieure de 50% par rapport aux niveaux d'amplification montrés dans la figure 1.5-b pour un angle d'incidence vertical $\alpha_v = -10$ degrés. L'orientation de la pente au niveau du site étudié par rapport à la source est inclinée de telle sorte que tout train d'ondes de volume incliné se propagerait probablement dans la crête du talus (c'est-à-dire, $\alpha_v < 0$) [9].

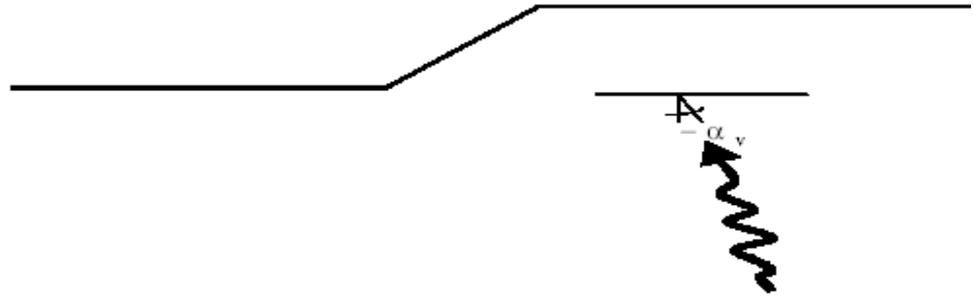
Les effets de site liés au simple relief topographique font qu'une amplification des mouvements au sommet de la crête, est due au moins partiellement à une focalisation des ondes liée à la convexité de la surface libre. Dans les remplissages sédimentaires récents, les ondes subissent d'importantes réflexions verticales entre la surface et le fond du remplissage, et les interférences qui en résultent produisent des phénomènes de résonance et d'amplification à certaines fréquences.

L'approche adoptée par l'Association Française de génie parasismique AFPS (1995), présente un paramètre empirique complémentaire comme le facteur d'amplification topographique dans la définition du spectre de conception pour représenter les effets topographiques [10]. Les bassins et les dépôts qui ont rempli les vallées ont des effets très importants sur la variation du mouvement sismique.

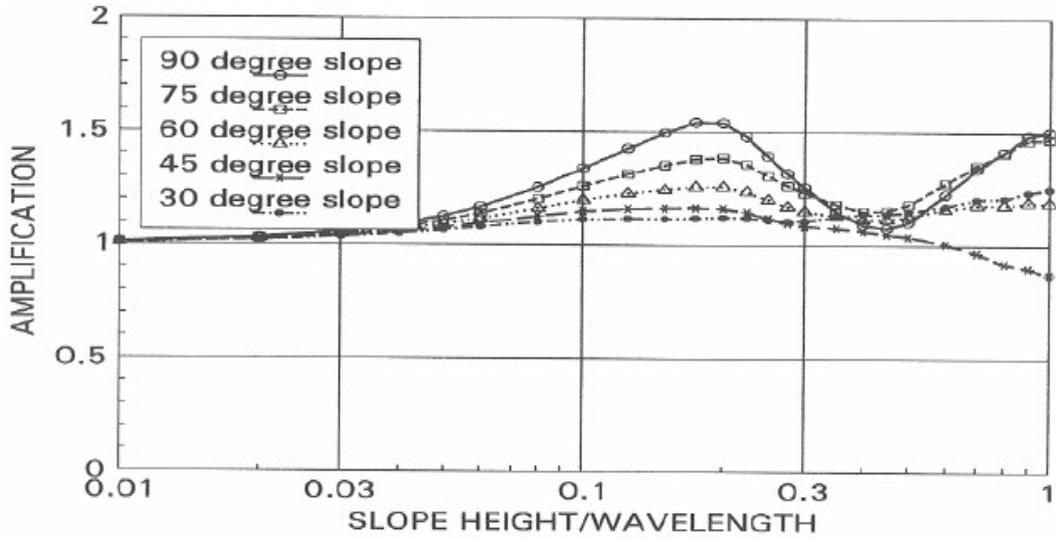
Les ondes sismiques se propageant vers la surface de la terre peuvent être modifiées au niveau de la structure proche de la surface géologique et la topographie superficielle. La plus part des études d'effets topographiques sont basées sur les interprétations de données de mouvements faibles à travers des arêtes isolées, bidimensionnelles, qui sont couchées sur un semi espace homogène.

Les bases de données géologiques et géotechniques seraient nécessaires pour évaluer les effets d'amplification. En effet, des investigations géologiques et géotechniques détaillées sont reliées à l'identification des conditions locales de sol et de leur variation dans les directions verticale et horizontale.

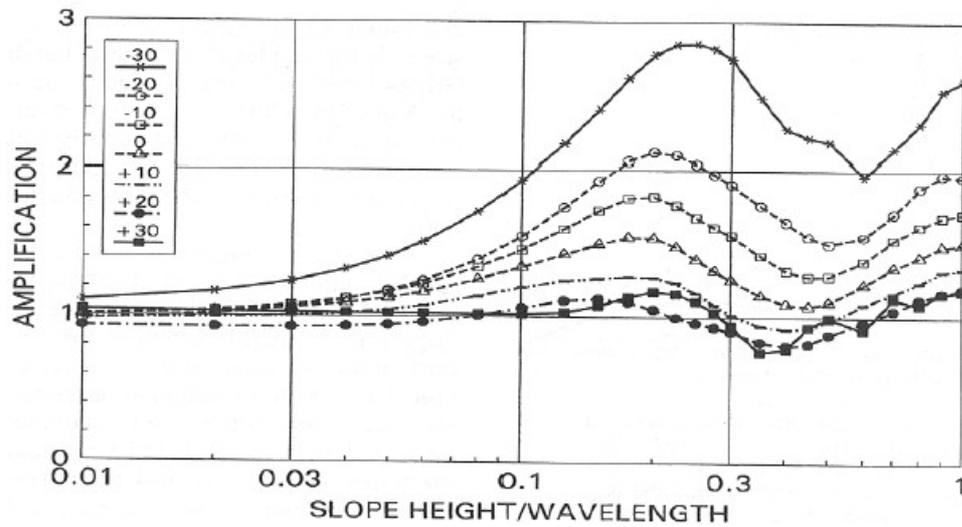
Les caractéristiques des mouvements sismiques enregistrés doivent être bien définies. *Pagliaroli et al* [8], ont avancé que le facteur d'amplification topographique à la crête peut être obtenu en considérant le rapport entre l'accélération horizontale maximale bidimensionnelle et l'accélération horizontale maximale unidimensionnelle. Les facteurs d'amplification topographiques ainsi évalués peuvent être plus élevés que ceux recommandés par l'Eurocode8 (25 % à 35 %). Ces sous estimations sont beaucoup plus importantes si les valeurs spectrales sont considérées.



(a) Géométrie d'une pente simple avec onde d'incidence inclinée.



(b) Amplification horizontale à la crête pour une onde incidente verticale SV sur une pente inclinée.



(c) Amplification horizontale à la crête d'une pente verticale pour une onde incidente SV inclinée de (-30°) à (30°).

Fig. 1.5- Fonction d'amplification horizontale à la crête d'une pente simple pour une onde SV inclinée [8].

Des effets topographiques ont été observés lors de séismes antérieurs sur des constructions placées aux sommets de colline qui ont subi des dégâts plus accentués que ceux placés à la base tel que le séisme de Dahama-Yamen en 2006 (Fig.1.6). La quantification d'amplification topographique est une question très difficile. La difficulté principale réside dans l'information insuffisante sur les caractéristiques géologiques et géotechniques de sites qui rendent problématique la séparation des effets topographiques.



Fig. 1.6- Effet de site topographique lors du séisme de Dahama -Yamen 2006

www.brgm.fr/brgm/risque/antilles/sdhc.htm.

Des études théoriques/numériques des effets topographiques ont examiné l'amplification à travers les arêtes isolées, bidimensionnelles, qui sont couchées sur un demi-espace homogène [8]. Cette amplification topographique des mouvements sismiques peut être étudiée par comparaison entre l'analyse numérique unidimensionnelle et l'analyse bidimensionnelle.

1.5. Effets de site non linéaires

1.5.1. Aperçu général

La non linéarité des sols est un effet de site qui se traduit globalement par une diminution de l'amplification du site sous mouvements forts par rapport à celle attendue sous faibles sollicitations. Elle se caractérise généralement par un filtrage du contenu en hautes fréquences et par un léger décalage vers les basses fréquences de la réponse du site [11].

La non linéarité des sols s'observe sur des sites particulièrement meubles excités par des mouvements forts ; donc situés près de la source. La complexité du rayonnement sismique de la source en champ proche et l'influence de la non linéarité des sols sont ainsi deux aspects indissociables. Il est de ce fait difficile de séparer ces deux effets à partir de données de mouvements forts acquises en champ proche. Il est important de souligner que la non linéarité observée sur les enregistrements de surface peut très bien trouver son origine tout au long du parcours qui conduit l'énergie libérée par le séisme de la source au point d'observation [11].

En pratique, la caractérisation non linéaire des sols à un site nécessite la réalisation d'un ou de deux forages carottés (prélèvement) afin d'étudier les propriétés dynamiques des matériaux constituant le sol. Ensuite, des essais dynamiques de cisaillement ou des essais triaxiaux cycliques doivent être menés afin de déterminer les variations de la rigidité et de l'amortissement en fonction de la déformation.

1.5.2. Relation *contrainte-déformation*

L'apparition de la non-linéarité est liée à la limite de validité des lois de comportement élastiques linéaires. La loi de Hooke classiquement utilisée en sismologie relie linéairement le tenseur des contraintes à celui des déformations via le tenseur des modules élastiques et en particulier la contrainte de cisaillement à la déformation en cisaillement via le module de cisaillement. Cette relation est raisonnable tant que la déformation en cisaillement ne dépasse pas 10^{-5} [11].

D'autres lois de comportement permettent de décrire le comportement des sols sous fortes sollicitations. Il est d'usage, dans les calculs de la réponse dynamique d'un profil

de sol, de considérer que le mouvement sismique a pour origine une onde de cisaillement se propageant depuis le substratum. Dans ces conditions, un échantillon pris dans la couche de sol est soumis à des cycles de charge-décharge correspondant à ce type de sollicitation dans un appareil triaxial pour analyser son comportement.

Lorsque l'amplitude des déformations cycliques en cisaillement dépasse 10^{-5} les dissipations plastiques dans le milieu deviennent non négligeables et le module de cisaillement diminue lorsque la déformation en cisaillement augmente. On sort du domaine élastique et on entre dans le domaine hystérétique stabilisé (Fig.1.7). Tant que la déformation en cisaillement reste inférieure à 10^{-4} la forme des cycles ne varie pas avec la répétition du chargement et chaque cycle peut être caractérisé par le module de cisaillement et le coefficient d'amortissement.

Dans le domaine fortement non linéaire, des changements importants de la microstructure interviennent, engendrant des déformations irréversibles, de cisaillement et de volume, significatives. Ces changements de microstructure se traduisent par des variations de volume (tassement) dans les matériaux non saturés et par une augmentation de la pression interstitielle dans les matériaux saturés. Cette augmentation de la pression interstitielle peut conduire jusqu'à l'annulation des contraintes effectives et donc de la résistance du sol (phénomène de liquéfaction). Ce type de comportement engendrant des déformations irréversibles significatives qui ne peuvent pas être abordées que par des modèles non-linéaires.

Parmi les travaux les plus cités dans la littérature, le travail de Hardin et Drnevich en 1972 dans [11] a illustré le comportement non-linéaire fort des sols mous pendant une excitation sismique. Il est caractérisé par une diminution du module de cisaillement G et une augmentation du coefficient d'amortissement ξ . Généralement le comportement non- linéaire de sol peut être décrit par une relation entre la contrainte de cisaillement τ et la déformation γ :

$$\tau = G(\gamma)\gamma \quad (1.8)$$

où $G(\gamma)$ peut être définie par :

$$G(\gamma) = \frac{G_{\max}}{1 + |\gamma| \cdot \gamma_{ref}} \quad (1.9)$$

Avec G_{\max} est le module de cisaillement pour une petite déformation et γ_{ref} est la contrainte de déformation de référence.

L'équation (1.10) donne le rapport entre le module de cisaillement G et la déformation relative γ [2].

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \gamma^\beta} \quad (1.10)$$

avec α, β sont des constantes selon le type de sol.

1.5.3. Prise en compte des effets de site non linéaires

Le comportement du sol sous sollicitations cycliques est fortement non linéaire et présente un caractère dissipatif qui n'existe pas dans un milieu élastique. Ces caractéristiques se doivent d'être prises en compte pour obtenir des solutions raisonnables. Il se caractérise par une variation à chaque instant des caractéristiques qui sont généralement le module de cisaillement G et le coefficient d'amortissement ξ .

La première approximation du comportement non linéaire des sols peut être obtenue par l'utilisation des propriétés linéaires équivalentes des matériaux. Il s'agit d'un modèle viscoélastique linéaire équivalent. Sous chargement cyclique, les modèles viscoélastiques font apparaître une boucle d'hystérésis. Pour ces sollicitations, le comportement réel du sol peut être représenté par ces modèles.

Pour cela on fait appel à une procédure de linéarisation qui consiste à remplacer le modèle non linéaire par un modèle linéaire équivalent ayant des propriétés dissipatives plus ou moins équivalentes à celles du matériau réel. La mise en œuvre de la méthode linéaire équivalente permet de prendre en compte les non linéarités du sol de façon approchée en résolvant de façon itérative une suite de problèmes linéaires.

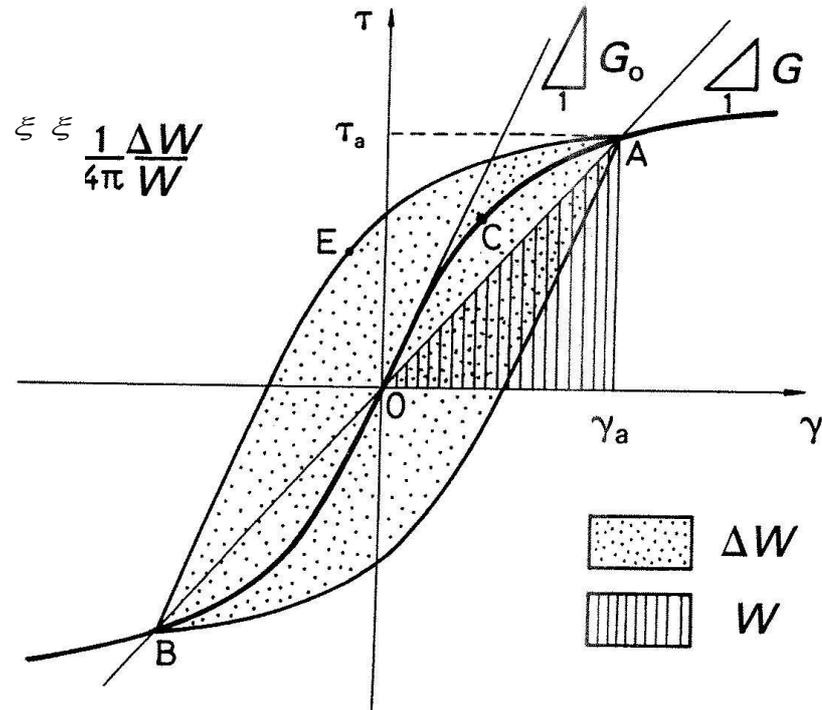


Fig.1.7-Schématisation de la réponse d'un sol dans le plan $(\tau - \gamma)$ lors du chargement cyclique [11].

Une fois que la détermination des paramètres de ce type de modèles est réalisée, il est nécessaire de vérifier la capacité du modèle à bien simuler la variation du module de cisaillement et de l'amortissement pour différentes valeurs de distorsion. Cette variation du module de cisaillement et de l'amortissement avec la distorsion est généralement caractérisée par des courbes $G-\gamma$ et $\xi-\gamma$ permettant de définir d'une façon significative le comportement du sol soumis au chargement cyclique.

La réponse du sol présente des cycles ou des boucles d'hystérésis comme dans la figure.1.7. Ces boucles représentent la quantité d'énergie de déformation emmagasinée par le sol lors du chargement. Une façon de quantifier cette énergie se fait par l'intermédiaire du coefficient d'amortissement du sol ξ . Ce coefficient est défini par la relation suivante:

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{G\gamma_a^2}$$

(1.11)

Où ΔW correspond à l'aire intérieure du cycle d'hystérésis, c'est-à-dire, l'énergie de déformation dissipée et W correspond à l'énergie imposée pour le niveau de distorsion γ_a .

1.5.4. Analyse unidimensionnelle non linéaire de la réponse de site

La première différence entre analyse non linéaire et linéaire équivalente de la réponse de site est que les analyses non linéaire utilisent un modèle plus réaliste pour représenter le comportement du sol sous sollicitations cycliques. Un modèle non linéaire trace l'évolution des boucles d'hystérésis générées dans un sol par un changement cyclique en une manière séquentielle, tandis que le modèle linéaire équivalent approche seulement la rigidité et l'amortissement représentatif après la séquence entière des chargements cycliques. Une représentation plus réaliste du comportement non linéaire des sols cycliquement chargés donne aux analyses non linéaires un avantage significatif par rapport aux analyses de réponse sismique linéaires équivalentes pour les niveaux de vibration sismique élevés ou les effets non linéaires sont dominants.

1.5.5. Effets de site non linéaires observés lors de séismes antérieurs

L'Algérie est l'une des régions les plus actives du bassin méditerranéen où surviennent périodiquement des tremblements de terre violents et souvent meurtriers. Les séismes meurtriers d'Alger (1716), d'Oran (1790), de Djidjel (1856), d'El Asnam (1954 et 1980), d'autres séismes et dernièrement celui de Boumerdes (2003) en sont témoin.

le 21 Mai 2003, la région Alger-Boumerdes a été frappée par un tremblement de terre destructif de magnitude 6,8. Une accélération maximale du sol (PGA) de 0.58g a été enregistrée au site de keddara environ à 20 km de l'épicentre. A environ 150 m de ce site, une valeurs maximale de 0.34g a été enregistrée. Des études sur la fonction d'amplification au moyen de rapport HVSR a mis en évidence un facteur d'amplification d'une valeur de 2 entre les deux stations [12].

Les observations faites sur de nombreux séismes forts (Mexico, 1985 ; Kobé, 1995) ont montré l'importance des conditions locales de sol et des effets non linéaires sur le mouvement sismique. Ces effets de site sont principalement dus à la géologie

particulière de la zone, caractérisée par la présence de collines calcaires et d'anciennes mangroves asséchées.

Le comportement de sol non-linéaire affecte fortement le mouvement sismique de dépôts proches de la surface, aboutissant à la réduction de vitesse des ondes de cisaillement. Ce qui a montré l'importance de l'utilisation des modèles de comportement non-linéaires du sol lors des études de réponse sismique des sites. Des modèles de comportement de sols très sophistiqués qui peuvent simuler la réponse des sols sur une large gamme de déformations ont été développés.

1.6. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons donné les différents types des effets de site : géologique, topographique et non linéaire. Nous avons présenté les principales techniques (ou méthodes) existantes pour estimer les effets de sites. Les techniques (ou méthodes) d'estimation des effets de site sont classées, le plus généralement, en méthodes analytiques (ou numériques) et méthodes empiriques (ou expérimentales). Les effets topographiques, consistent en la modification des mouvements de sol dans les zones proches des pentes.

Le comportement du sol sous sollicitations cycliques est fortement non linéaire. Il se caractérise par une variation à chaque instant des caractéristiques qui sont généralement le module de cisaillement G et le coefficient d'amortissement ξ . Le comportement de sol non-linéaire affecte fortement le mouvement sismique de dépôts proches de la surface, aboutissant à la réduction de la vitesse des ondes de cisaillement.

Nous avons exposé des cas d'effets de site qui ont accompagné des tremblements de terre en Algérie comme dans le monde.

2.1. Introduction

Pendant un séisme, les mouvements sismiques générés en surface de couches alluvionnaires, peuvent différer considérablement de ceux de l’affleurement rocheux. Il est nécessaire de connaître les valeurs maximales de l’accélération, de la vitesse et du déplacement pour caractériser la violence d’un séisme.

Dans les accélérogrammes, on peut distinguer une phase initiale pendant laquelle les accélérations sont faibles, une phase forte, une phase modérée et une phase très faible de retour progressif au repos. L’accélération maximale du sol peut être largement affectée par la durée du mouvement fort prolongée et la période prédominante décalées vers une des périodes de la couche de sol. La nature des matériaux constituant le dépôt ainsi que les épaisseurs des couches peuvent influencer considérablement l’amplification ou la déamplification du mouvement sismique. De plus, si ces dépôts sont dans un état lâche, ils peuvent être le siège de tassements importants. L’orsqu’ils sont saturés, ils peuvent perdre de leur résistance au cisaillement, ce qui peut mener à la liquéfaction.

2.2. Données accélérométriques utilisées

L’analyse de beaucoup de mouvements forts de sol enregistrés lors de tremblements de terre qui ont secoué plusieurs régions à travers le monde ont mis en évidence la présence des effets de site.

Pour la présente étude empirique des effets de site nous avons choisi d’analyser les mouvements de sol enregistré lors d’un séisme récent qui a frappé rudement le nord de l’Algérie, particulièrement la région Alger-Boumerdès. Il s’agit du séisme de Boumerdes du 21 mai 2003 de magnitude de $M=6.8$ sur l’échelle Richter.

Le choc principal a causé des destructions répandues principalement dans le secteur de la partie orientale d’Alger. Le choc principal a été ressenti jusqu’à 250 km de l’épicentre qui a été localisé en mer.

Durant le choc principal, Beaucoup d’enregistrements ont été obtenus par le réseau national d’accélérographes géré par le Centre de Recherche appliquée en Génie Parasismique (CGS) (Fig. 2.1). Les stations en champ libre les plus proches de

l'épicentre, qui ont enregistré le choc principal, sont les deux stations de Keddara, à 20 km de l'épicentre (Fig. 2.2). Les deux stations de Keddara sont distantes d'environ 150 m l'une de l'autre et une différence importante entre les valeurs maximales des accélérations a été observée ; Cette différence est certainement due à un effet de site. Dans la station 1 les accélérations pic de sol (PGA) Est-Ouest, Nord-Sud et Verticale sont de 0.34g, 0.25g et 0.26g, respectivement. Dans la station 2 les accélérations pic de sol (PGA) E-W, N-S et Verticale sont de 0.58g, 0.22g et 0.35g, respectivement.

L'écart très important observé entre les deux stations 1 et 2 concerne plus particulièrement les accélérations dans la direction E-W ; ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'un effet de site particulièrement important au niveau de la station 1. Les accélérations dans la direction E-W sont largement supérieures à celles dans la direction N-S. Cette observation est valable presque au niveau de l'ensemble des stations qui ont enregistré le choc principal (Fig. 2.1). Cette observation est probablement liée à l'effet de directivité de la faille [12] (Fig. 2.3).

Le niveau élevé de l'énergie libérée lors du choc principal ($M_w = 6.8$) explique les niveaux d'accélération élevés, particulièrement en champs proche et intermédiaire comme le montre le tableau 2.1.

- En champ intermédiaire: Hussein Dey, 36 Km, E-W : 0.27 g ; V : 0.09 g ; N-S : 0.23g
Dar El Beida, 29 Km, E-W : 0.52 g ; V : 0.16 g ; N-S : 0.46 g
- En champ lointain: El Afroun, 86 Km, E-W : 0.16 g ; V : 0.03 g ; N-S : 0.09 g
Blida, 72 Km, E-W : 0.046 g ; V : 0.028 g ; N-S : 0.038 g

Les sites situés sur le bassin de la Mitidja (Fig.2.1) sont classifiés comme des sols fermes bien que les enregistrements aux stations de Dar EL Beida et EL Afroun montrent un niveau élevé d'accélération en comparaisant avec ceux situés sur des sols fermes.

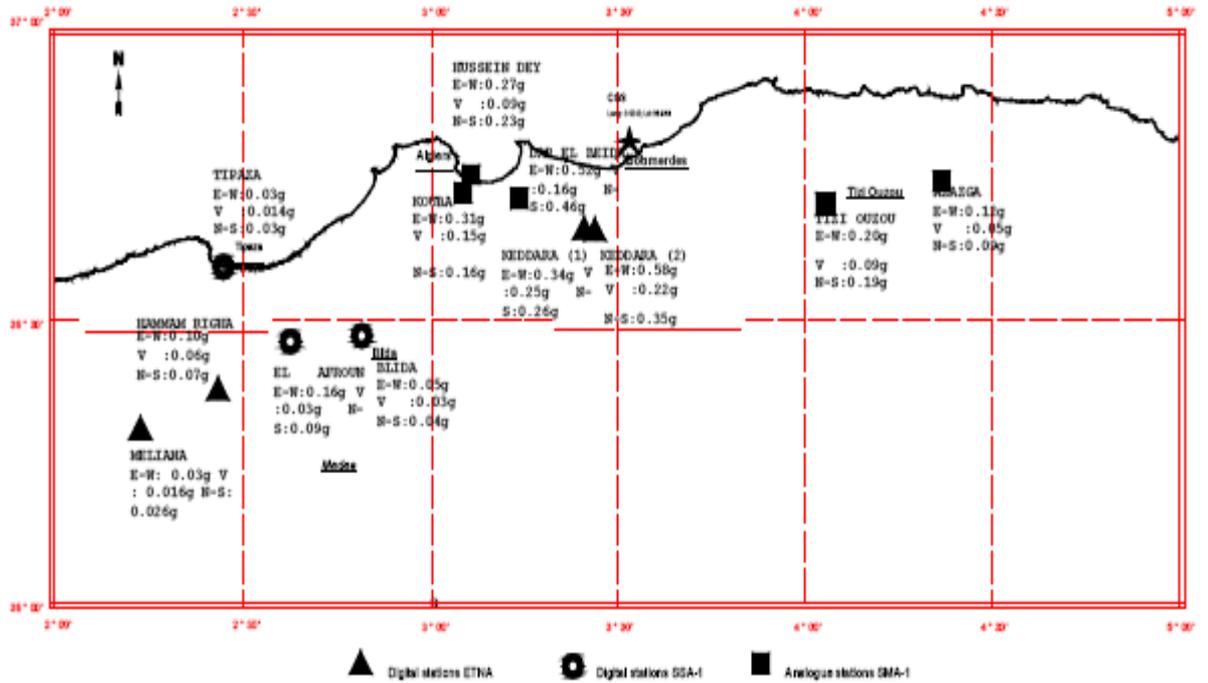


Fig.2.1-Stations d'accélérographes du Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique [13].

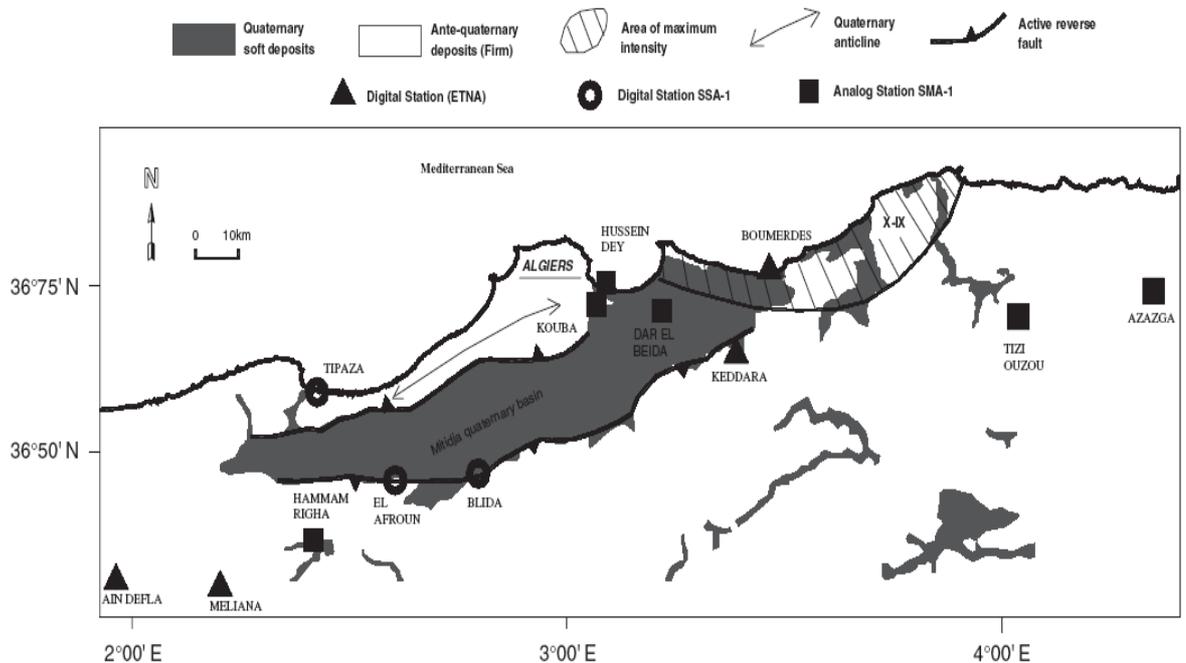


Fig. 2.2 - Carte montrant la distribution de dépôts quaternaires (gris) et les failles actives principales dans la région Alger-Boumerdes, la zone d'intensité maximale (IX-X) du séisme du 21 mai 2003 de Boumerdes est représentée par la zone hachurée. Les stations des mouvement

forts sont représentée par des triangles remplis, remplis carrés, cercles et épais selon le type d'enregistreur installé [12].

Tableau 2.1– Valeurs maximales des accélérations lors du tremblement de terre de Boumerdes du 21 Mai 2003 aux 13 stations du Réseau Algérien d'Accélérographes dans les directions (E-W), (V) et (N-S).

Station	Distance épical e en (Km)	A(g) Est - Ouest	A(g) Verticale	A(g) Nord-Sud
Keddara 1	20	0,33	0,26	0,24
Keddara 2	20	0 ,58	0,34	0,22
Dar EL Beida	29	0 ,50	0,16	0,54
Hussein Dey	36	0,27	0,08	0,23
Kouba	41	0,31	0,15	0,15
Tizi Ouzou	49	0,20	0,09	0,19
Blida	72	0,05	0,03	0,04
Azazga	75	0,09	0,05	0,12
El Afroun	86	0,16	0,03	0,09
Hammam Righa	110	0,10	0,07	0,07
Miliana	130	0,03	0,03	0,016
Ain Delay	151	0,025	0,03	0,01

2.3. Caractéristiques des mouvements sismiques forts

Les données accélérométriques qui vont nous permettre de mener la partie expérimentale du présent travail sont enregistrées par le réseau national d'accélérographes du CGS. Le tableau 2.1 présente les accélérations maximales du sol enregistrées lors du tremblement de terre de Boumerdes du 21 Mai 2003 à 13 stations dans les directions (E-W), (V) et (N-S).

Juste après le choc principal, une station numérique a été installée au niveau de Boumerdes, à 7 Km de l'épicentre, par le CGS. Il est important de noter que lors de la

réplique du 27/05/2003 ($M = 5.8$), les accélérations maximales de sol enregistrées lors de cette réplique sont les suivants :

- Composante E-W: 0.29 g
- Composante V : 0.4 g
- Composante N-S : 0.13 g

Il ressort une composante verticale extrêmement importante et largement supérieure par rapport aux composantes horizontales. Cette dernière observation peut être expliquée par le fait que la station se trouve en champ proche où il est admis qu'à ce niveau la verticale peut être supérieure aux autres. Il serait intéressant de corrélérer cette observation avec les types de ruptures observées à Boumerdes.

Les enregistrements des mouvements sismiques en terme d'accélération des particules de sol lors d'une secousse sismique se fait par les accélérographes. Ces enregistrements d'accélération de sol s'appellent des accélérogrammes.

2.4. Analyse des enregistrements des mouvements sismiques

L'information directe que l'on peut tirer de l'enregistrement d'un mouvement sismique par une examinations visuelle concerne [14]:

- l'accélération maximale,
- la durée de la vibration forte et
- la fréquence prédominante.

Les valeurs discrètes du signal sismique, tracées en fonction du temps donnent ce que l'on appelle accélérogramme. Ces accélérogramme pour les trois composantes (E-W), (N - S) et (V) correspondant aux différentes stations repérées dans le tableau 2.1 sont présentés dans les figures 2.4 à 2.16.

L'analyse des ces signaux montre que chaque accélérogramme de chacune des composantes E-W, N-S et V se compose de 4 phases:

- Une phase initiale dans laquelle les accélérations commencent très faibles (0 - 4 Sec) pour toutes les stations.

- Une phase modérées (4 - 6,25 Sec) pour les station en champ proches et intermédiaires (Keddara1, Keddara2, Dar EL Beida, Hussein Dey et la réplique de Boumerdes).
- Une phase riche en accélérations fortes (6,25 - 13,75 Sec) durant la quelles les accélérations de sol maximales (PGA : Pic Ground Accélération) ont été obtenues pour toutes les stations.
- Une quatrième phase de retour progressif au repos dans la quelles les accélérations sont modérées (13,75 - 17,5 Sec) en suite s'affaiblissent au de là de 17,5 Sec jusqu'à 30 Sec.

La distance épacentrale et le type de sol influent considérablement sur les caractéristiques des mouvements sismiques comme il est indiqué sur les figures 2.4 à 2.16. De plus, nous remarquons que les accélérations maximales (PGA) ont été enregistrées pour les composantes E-W pour toutes les stations sauf la réplique de Boumerdes, la composante verticale et largement supérieure aux composantes horizontales.

Nous remarquons également que les accélérations faibles ont été enregistrées par les composantes N-S pour toutes les stations. Ces valeurs fortes pour les composantes E-W et faibles pour les composantes N-S sont liées, comme il à été expliqué par les spécialiste [12], à la direction de la faille de Thenia (Fig. 2.3), qui a causé le tremblement de terre, ou les principaux dommages de la zone concernée ont été observés dans cette orientation.

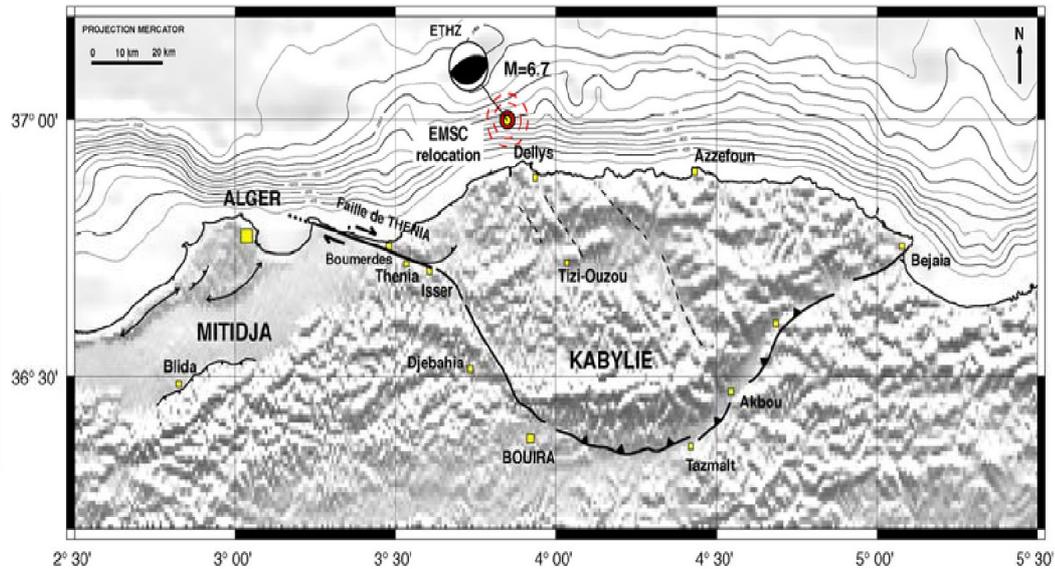


Fig. 2.3 – Faille de Thénia et localisation du séisme du Boumerdes 21 Mai 2003 (M. Meghraoui, d’après Boudiaf, <http://eost.u-strasbg.fr>).

2.5. Intégration des mouvements sismiques

Comme on a cité ci-dessus, l’information directe peut être tirée des tracés des mouvements sismiques en termes d’accélération des particules de sol. Cependant, l’autre information peut être tirée de ces enregistrements après leurs intégrations dans le domaine temporel. Celle-ci permet d’obtenir, après une 1^{ère} intégration les vitesses des particules de sol puis leurs déplacements, après une deuxième intégration.

Pour le calcul des vitesses et déplacement, nous avons utilisé l’algorithme des trapèzes [15], que nous avons traduit en un programme numérique en langage Fortran. Ce dernier nous a permis de déterminer les vitesses et déplacements à partir des accélérations enregistrées par les différentes stations. Les valeurs maximales V_{max} et d_{max} ont été reportées ci-dessous dans le tableau 2.2. Les vitesses et déplacements ainsi obtenus par intégration sont tracés en fonction du temps dans les figures 2.4 à 2.16.

2.6. Caractérisation de site basée sur v_{max}/a_{max}

Les valeurs maximales obtenus v_{max} et a_{max} vont être utilisées dans la caractérisation de site afin de classer les sites des différentes stations et aussi pour déterminer la période (ou fréquence) fondamentale.

En effet, pour un mouvement harmonique, la relation entre la vitesse maximale (v_{\max}) et l'accélération maximale (a_{\max}) est donnée par l'équation [16] :

$$v_{\max} = \frac{1}{\omega} a_{\max}$$

(2.1)

ou bien

$$\frac{v_{\max}}{a_{\max}} = \frac{T}{2\pi}$$

(2.2)

Ainsi, théoriquement, le rapport v_{\max}/a_{\max} est proportionnel à la période fondamentale. Donovan, 1989 dans [16] a proposé d'assigner des valeurs moyennes de $v_{\max}/a_{\max} = 61$ cm/s/g et 122 cm/s/g à des formations rocheuse et meuble, respectivement. Le tableau 2.2 résume les valeurs de a_{\max} , v_{\max} et d_{\max} pour trois composantes des différentes stations citées dans le tableau 2.1.

On y trouve également la période fondamentale obtenue du rapport v_{\max}/a_{\max} . Une colonne est réservée aux conditions géologiques qui sont déterminées à partir de la carte des structures géologiques de la région d'Alger et les aires affectées par le séisme du 21 Mai 2003 (Fig. 2.17) donnée par Maouche et al [17].

L'arrangement géologique et tectonique du bassin de la Mitidja a été exposé et discuté longuement dans les travaux précédents (Maouche et al 2004) dans [17], le sol affleure à l'est de Boumerdes. L'histoire géologique des bassins sédimentaires algériens s'inscrit dans le processus de géodynamique globale de la tectonique des plaques qui a structuré l'Algérie en deux domaines: au Nord, l'Algérie alpine; au Sud, la plate-forme saharienne.

L'Algérois est intégré dans l'Algérie alpine et est essentiellement structuré par la plaine de la Mitidja qui est un bassin de type intra montagneux, bordé au sud par le domaine des nappes formant l'Atlas Tellien. La série sédimentaire du bassin de la Mitidja s'étend du jurassique au Miocène. A l'est, la Mitidja est bordée par des affleurements de socle de type granitoïde apparaissant à Boumerdes et le long de la faille de Thénia. Le remplissage sédimentaire quaternaire de la Mitidja représente localement une épaisseur

de 120 m. Proche des côtes se sont des sables rouges du Pliocène supérieur très compactes qui affleurent et recouvrent les marnes plaisanciennes. C'est sur ce type de terrain que s'est construite notamment la ville de Boumerdes.

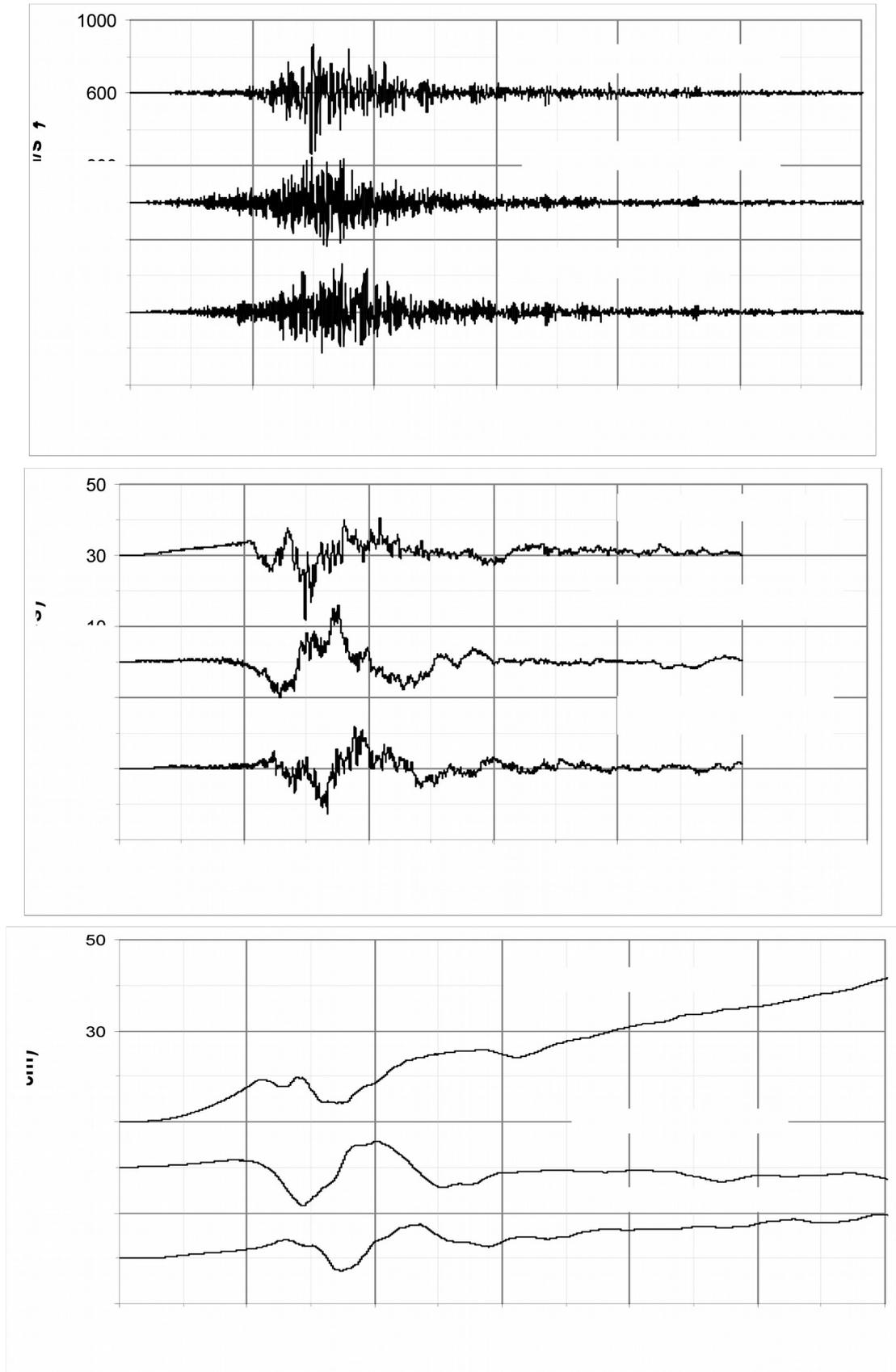


Fig. 2.4 - Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Keddara (Station 1).

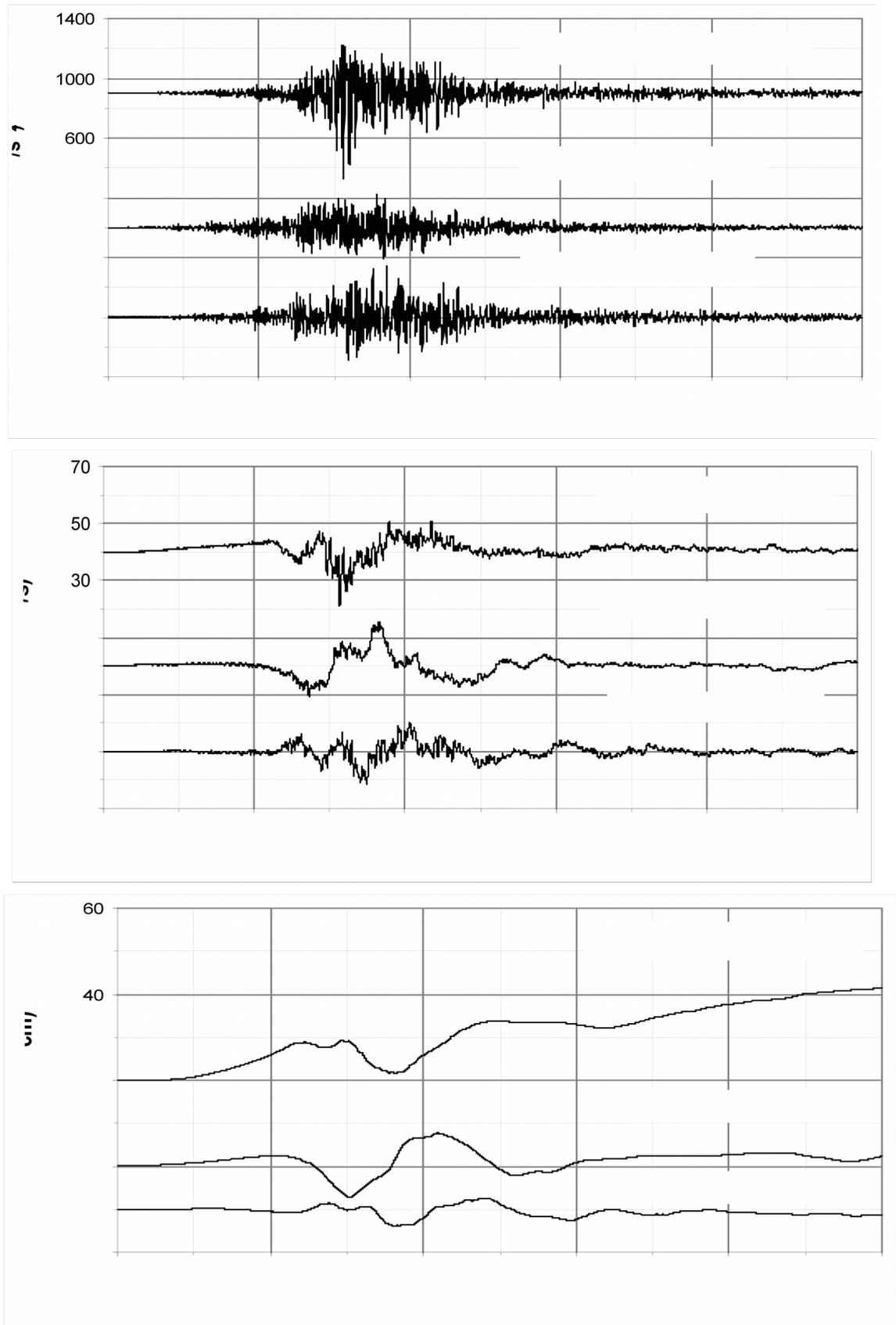


Fig. 2.5- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Keddara (Station 2).

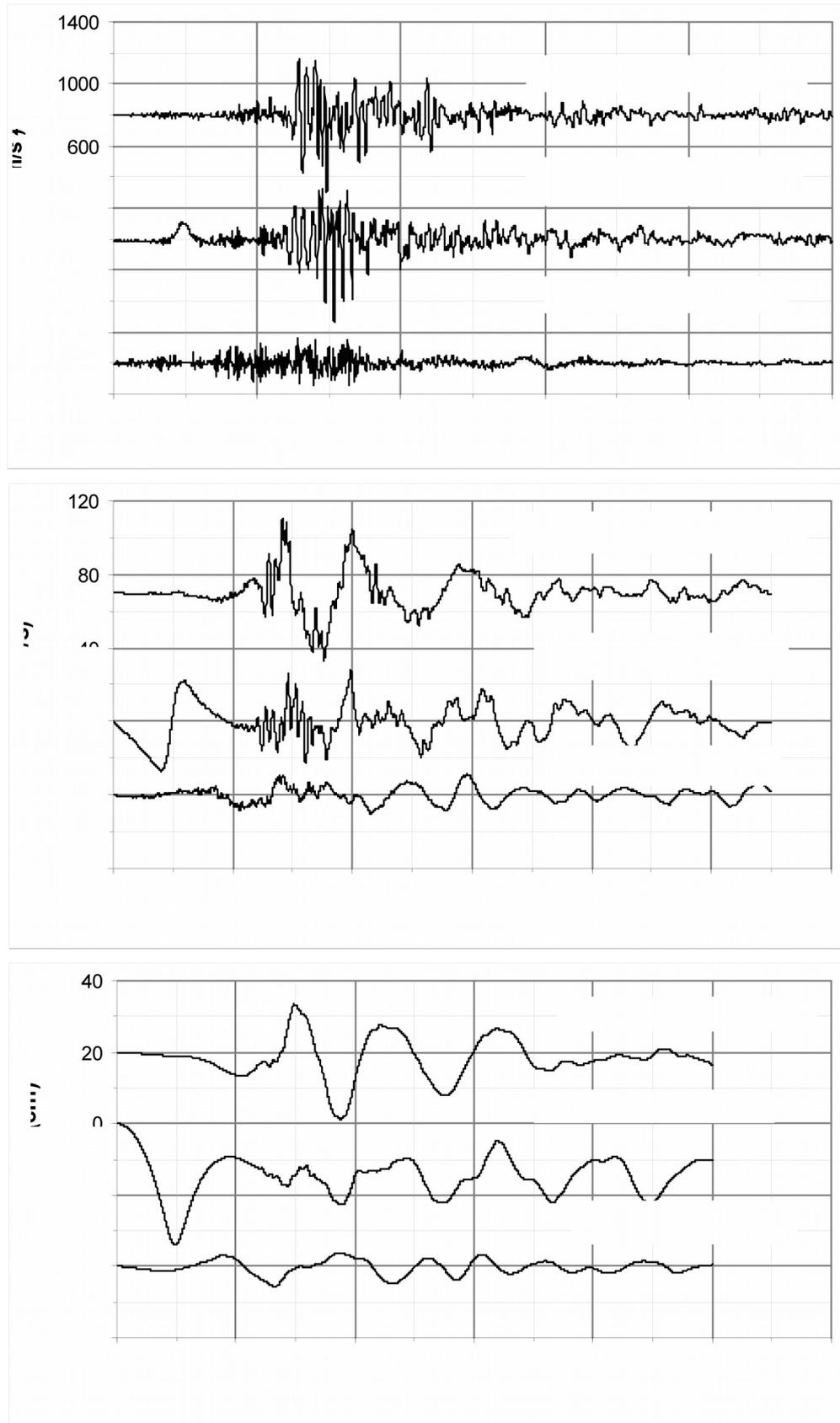


Fig. 2.6- Accélérations, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Dar EL Beida.

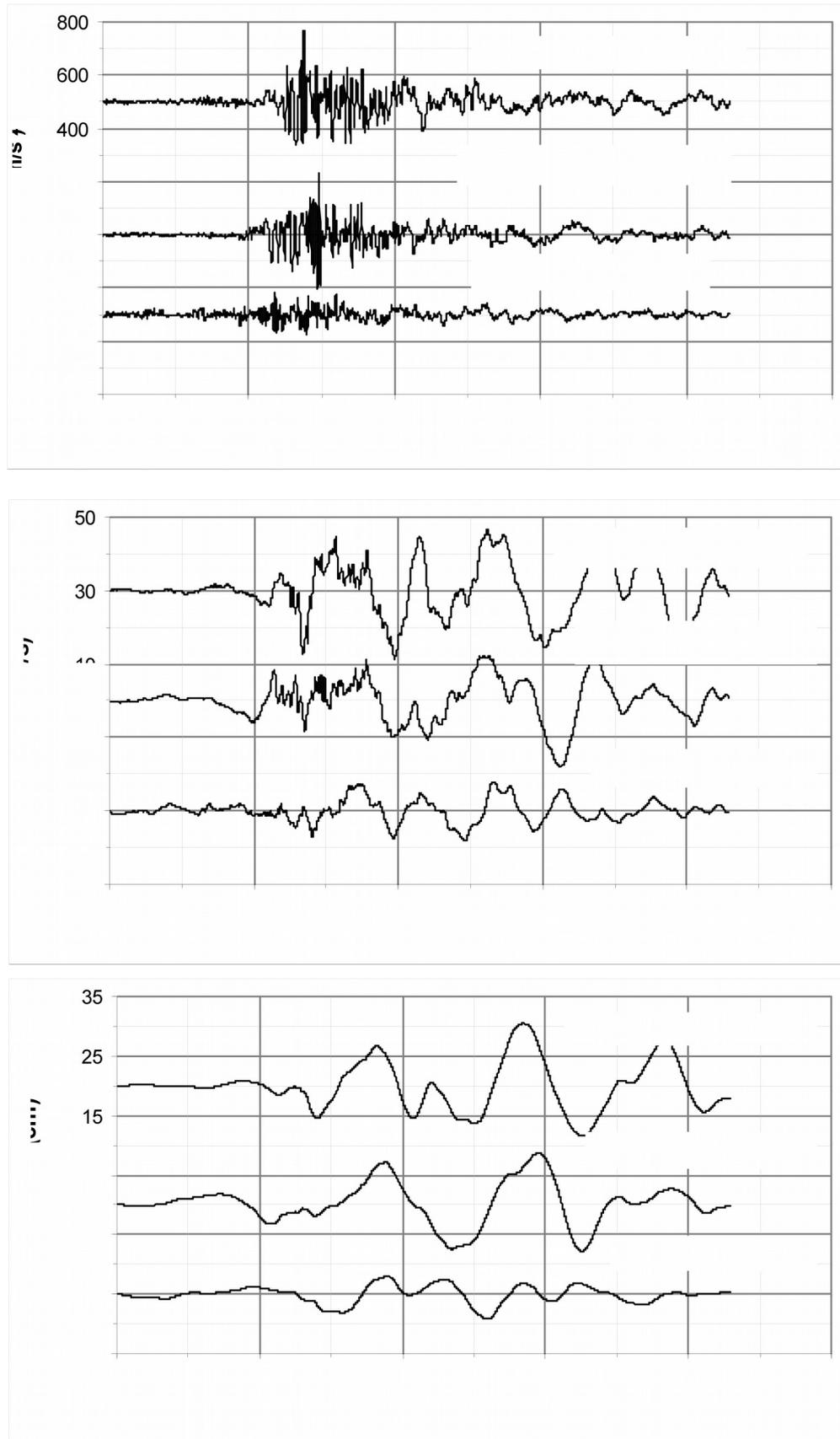


Fig. 2.7- Accélérations, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Hussein Dey.

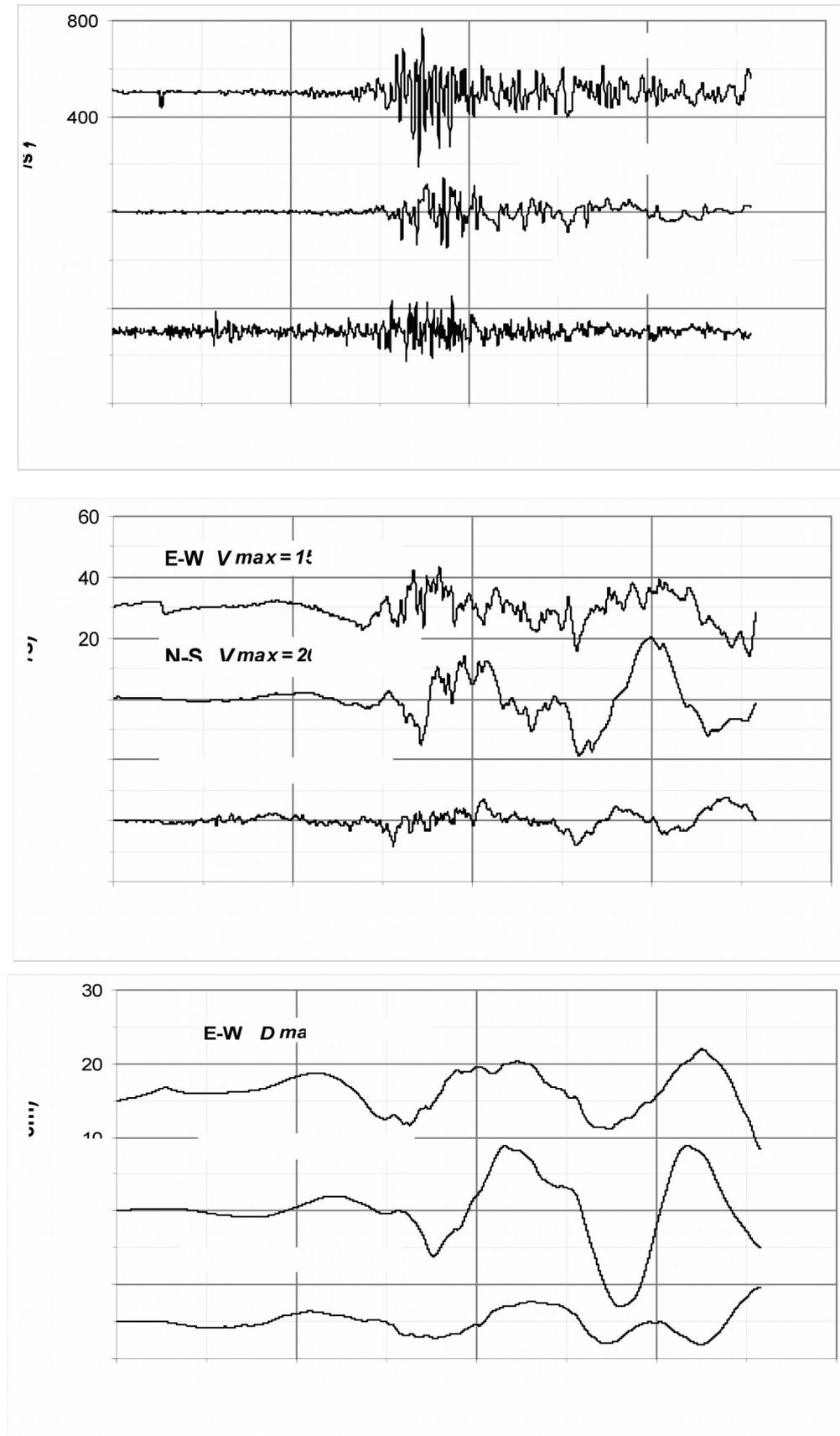


Fig. 2.8- Accélérations, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Kouba.

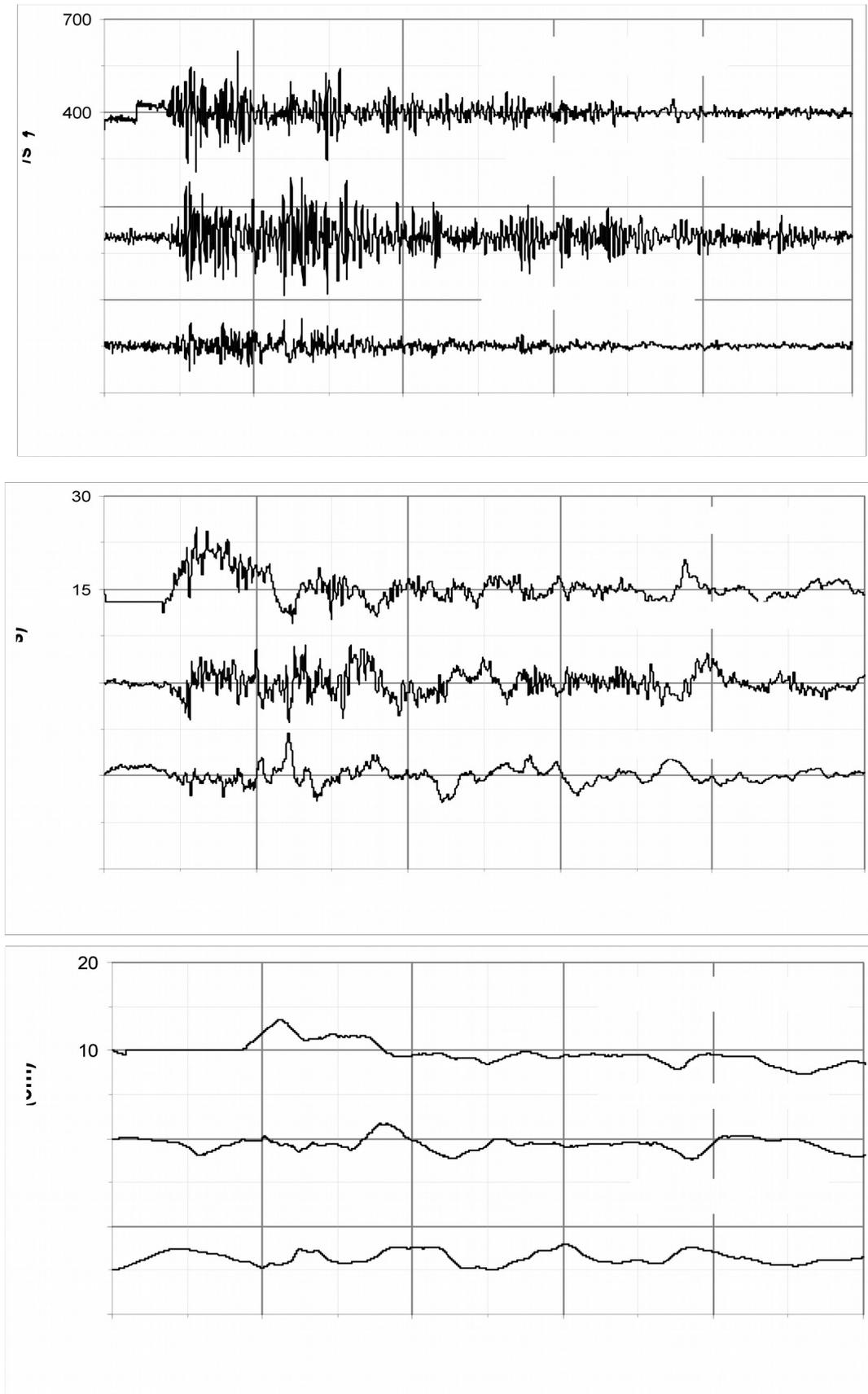


Fig. 2.9- Accélération, Vitesse et déplacement des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Tizi Ouzou.

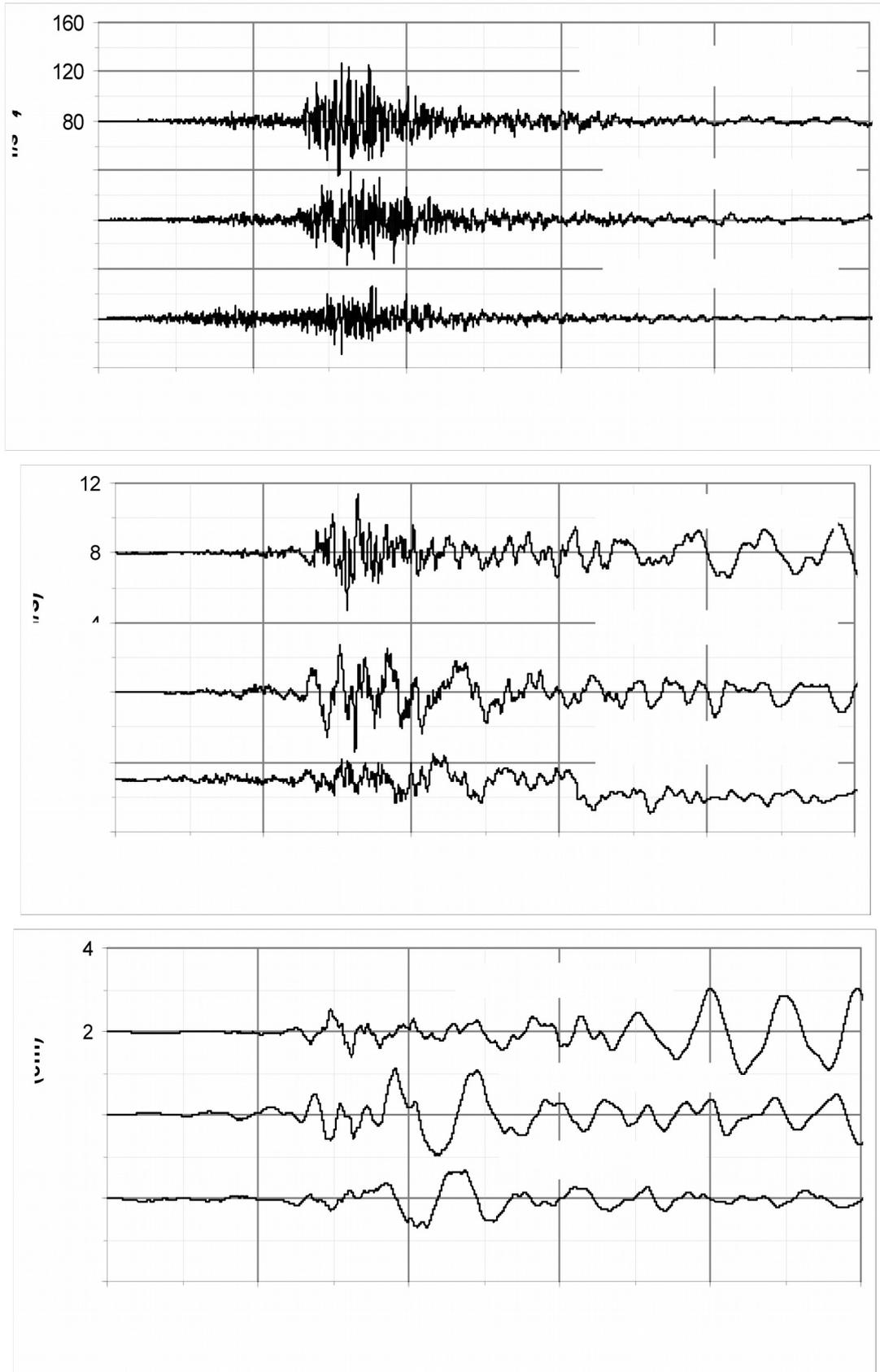


Fig. 2.10- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Blida.

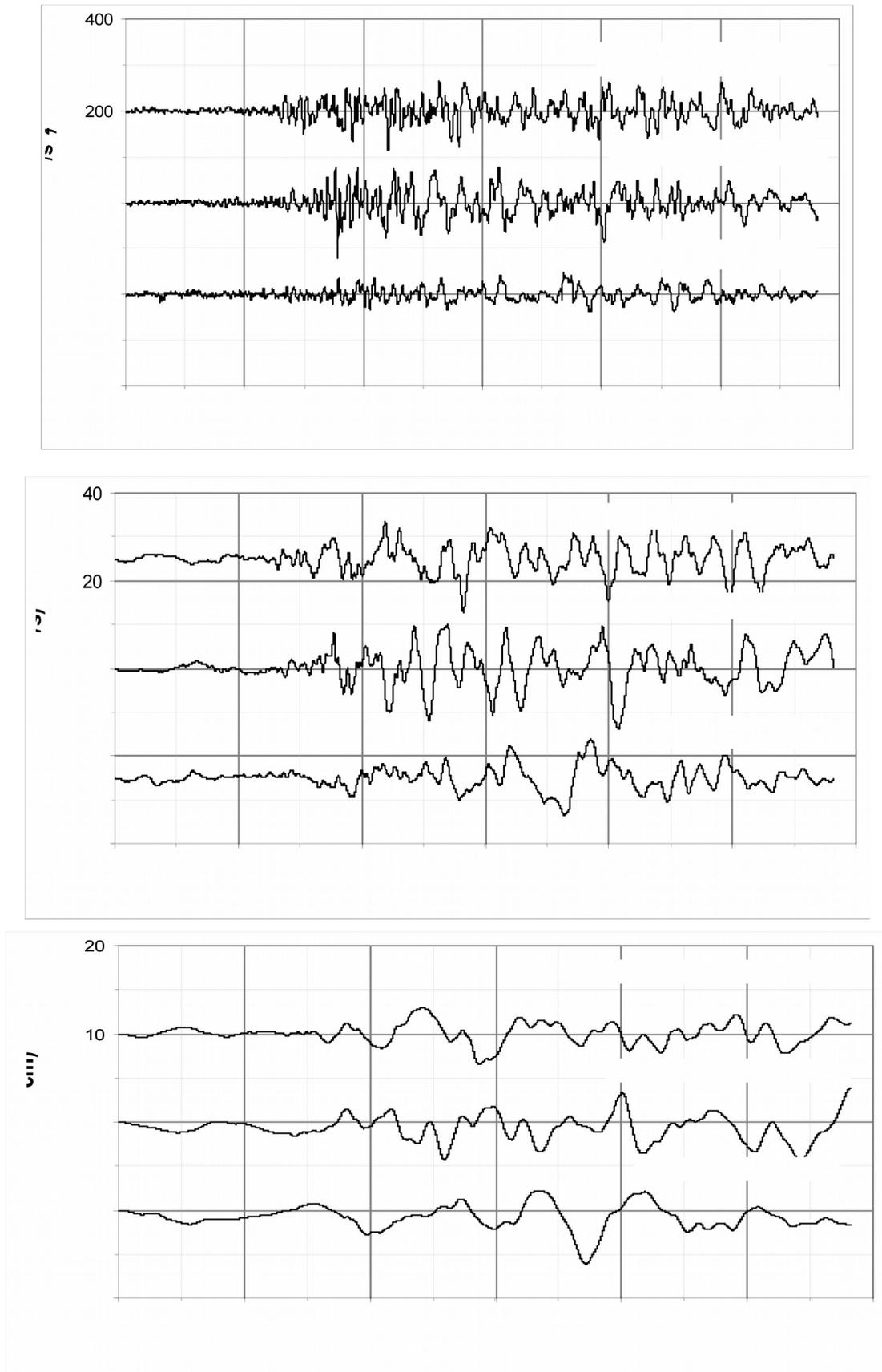


Fig. 2.11- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Azazga.

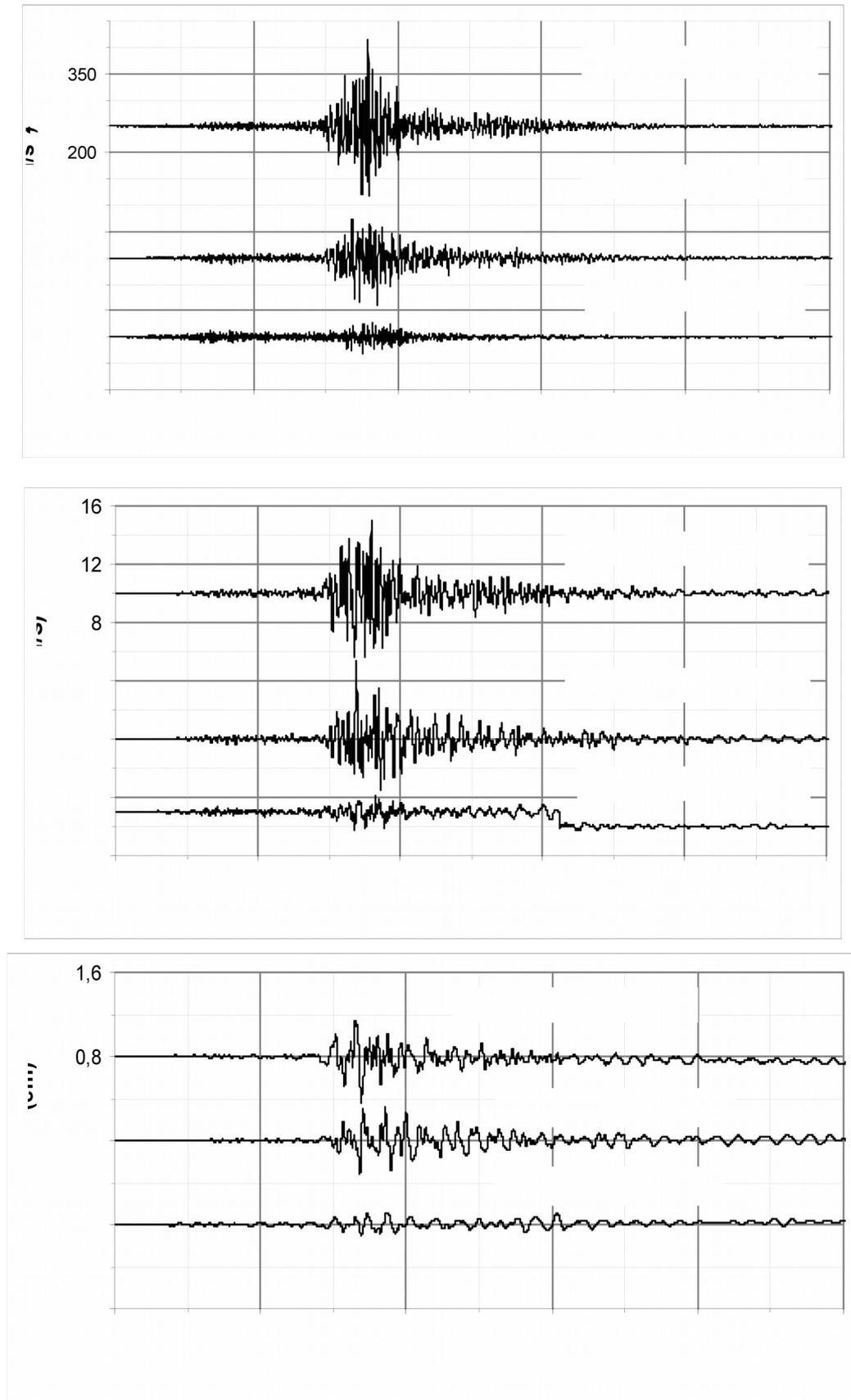


Fig. 2.12- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de EL Afroun.

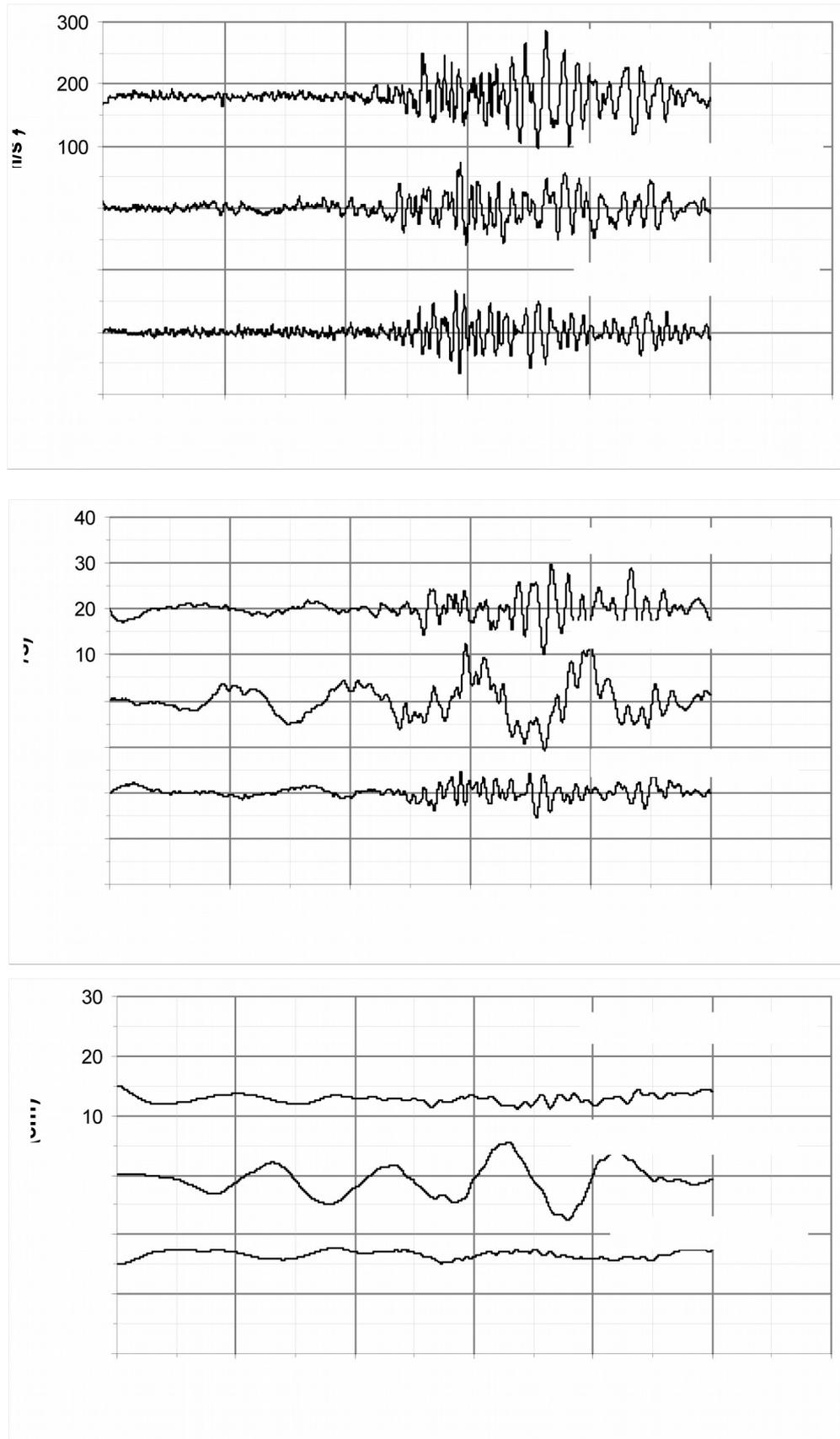


Fig. 2.13- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Hammam Righa.

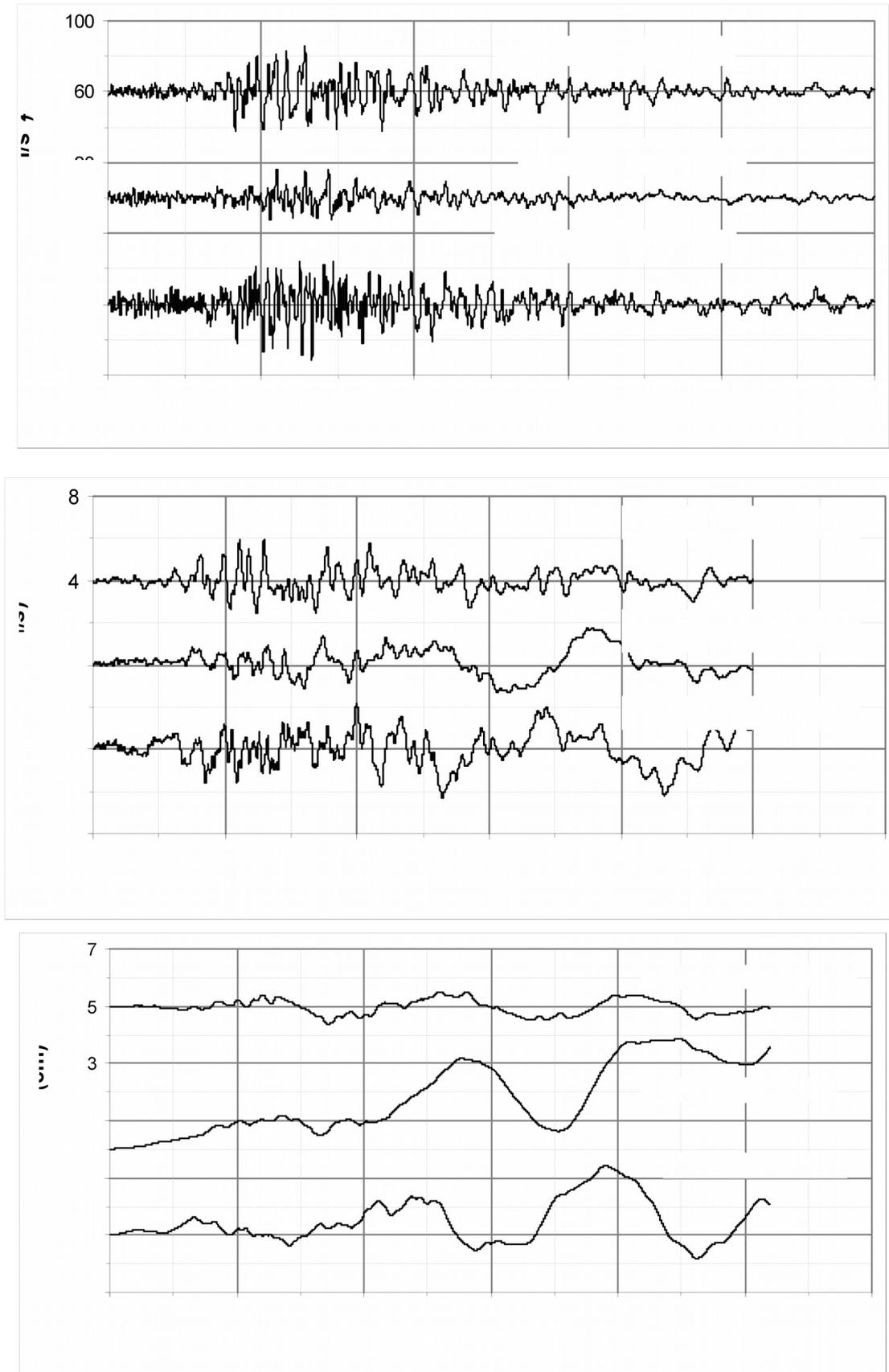


Fig. 2.14- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Meliana.

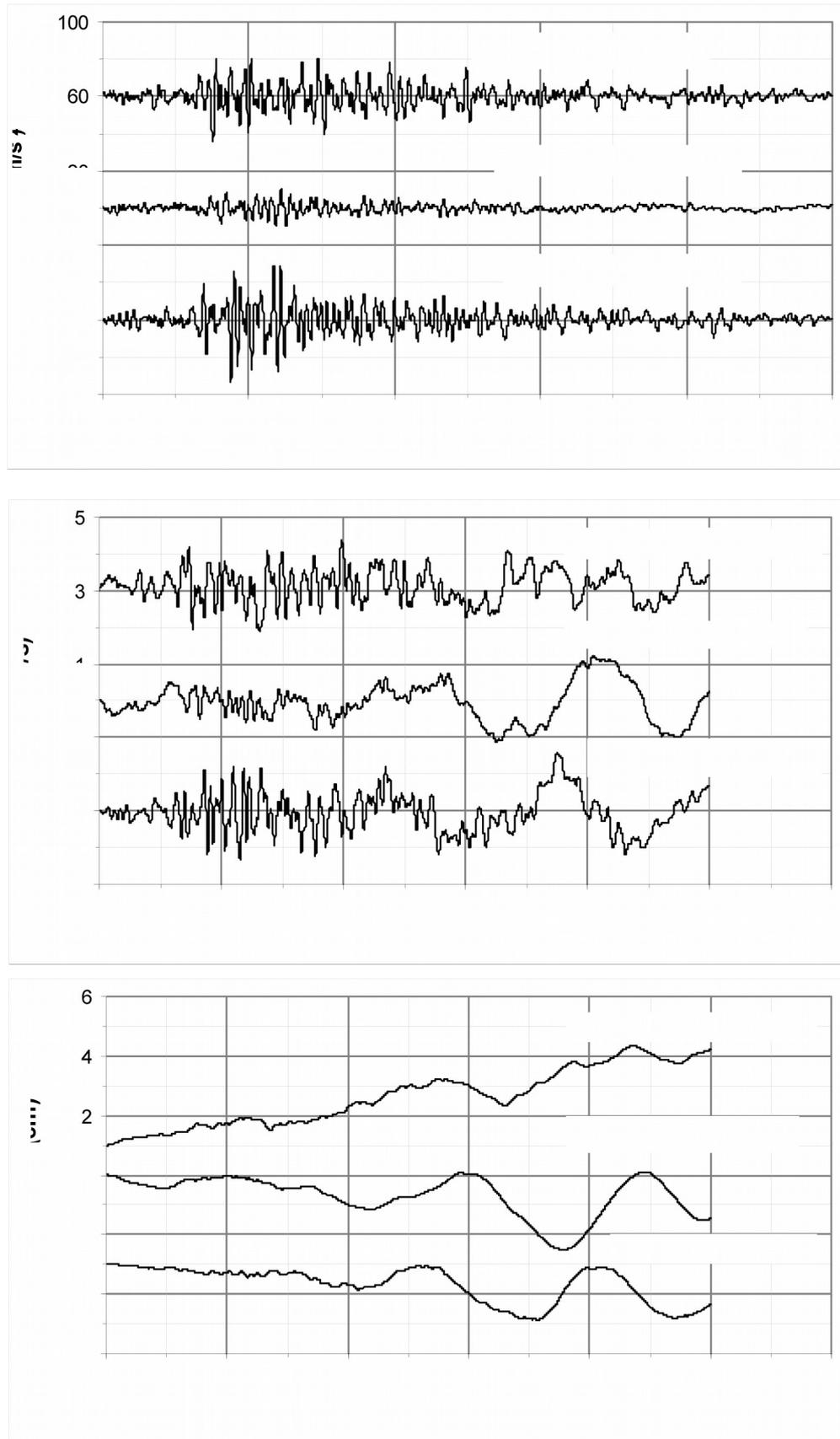


Fig. 2.15- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du sol du site de Ain Defla.

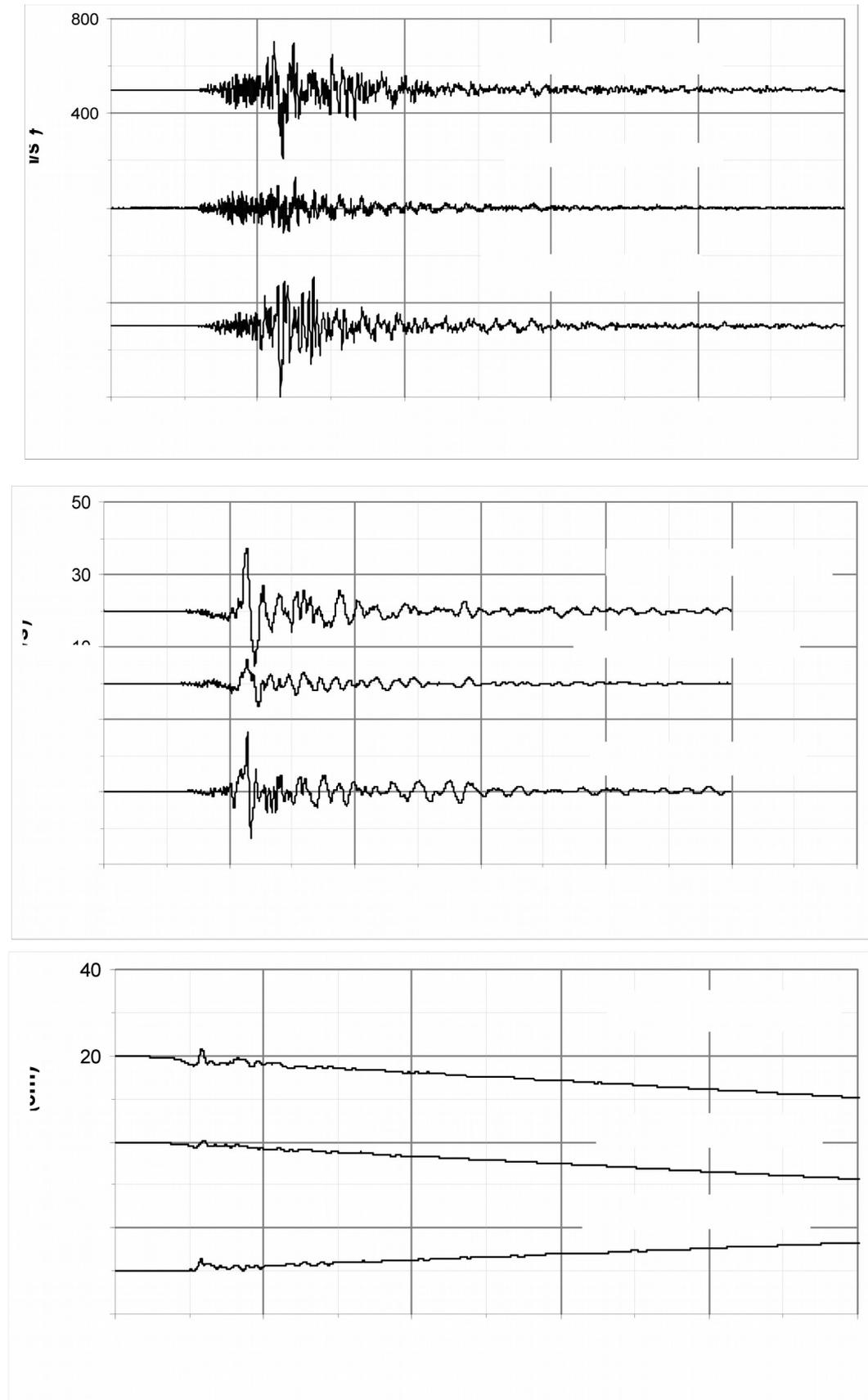


Fig. 2.16- Accélérations, Vitesses et déplacements des composantes (EW), (NS) et (V) en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau de la réplique de Boumerdes.

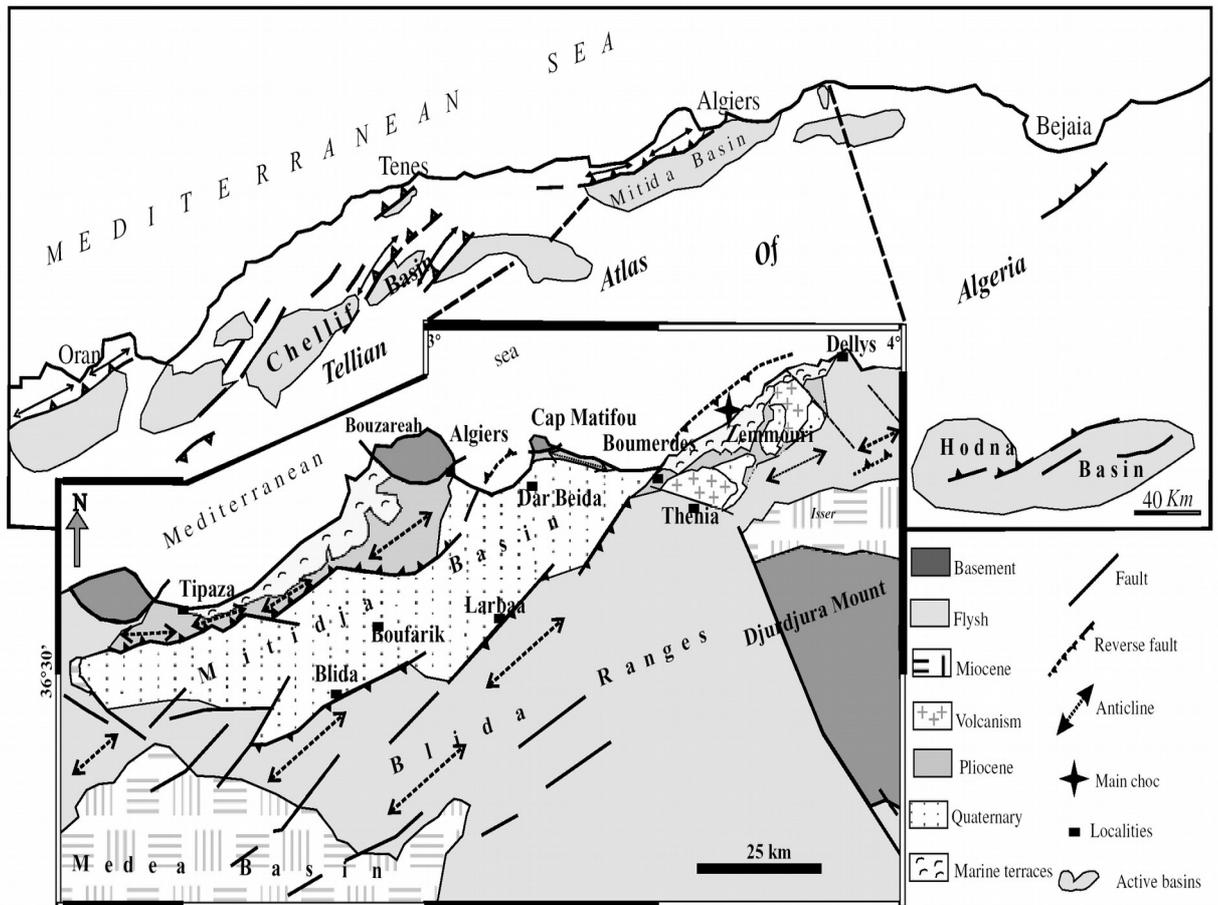


Fig. 2.17 - Carte géologique structurale de la région d'Alger durant le séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 (d'après Maouche et al. [17]).

Tableau 2.2- Caractérisation de site.

Station/Distance (km)	Composante	a_{\max} en (cm/s ²)	v_{\max} en (cm/s)	d_{\max} en (cm)	Période fondamental en (s)	$a_{\max} \cdot \frac{d_{\max}}{v_{\max}}$	Conditions géologiques
Keddara 1/20	E-W	331.55	17.95	35.92	0.340	663.47	Quaternaire
	N-S	246.40	15.79	8.44	0.402	131.70	
	V	260.14	12.51	10.95	0.302	227.70	
Keddara 2/20	E-W	577.40	18.84	31.17	0.205	955.28	Quaternaire
	N-S	224.95	15.70	7.70	0.438	110.33	
	V	244.74	11.32	3.98	0.290	86.05	
Dar El Beida/29	E-W	501	40.78	18.74	0.511	230.23	Quaternaire
	N-S	537.45	28.23	33.95	0.330	646.35	
	V	164.14	11.23	5.79	0.430	84.63	
Hussein Day/36	E-W	269.50	18.56	10.44	0.432	151.59	Quaternaire
	N-S	231.60	18.20	8.80	0.494	111.98	
	V	85.94	8.12	4.21	0.593	44.56	
Kouba/41	E-W	311.90	15.75	6.95	0.317	137.63	Quaternaire
	N-S	148.30	20.30	12.93	0.860	94.46	
	V	151	8.33	4.65	0.346	84.29	
Tizi Ouzou/49	E-W	195.20	10	17.70	0.322	345.50	Quaternaire
	N-S	192	6.53	2.40	0.214	70.57	
	V	87	6.82	2.94	0.492	37.50	
Blida/72	E-W	46.35	3.35	1.02	0.454	14.11	Quaternaire
	N-S	38.62	3.38	1.12	0.550	12.80	
	V	28.53	1.45	0.70	0.319	13.77	
Azazga/75	E-W	86	12.25	3.51	0.895	24.64	Quaternaire
	N-S	120	14	4.35	0.733	37.29	
	V	46.30	8.74	6.11	1.185	32.37	
El Afroun/86	E-W	164	5.06	0.44	0.195	14.26	Quaternaire
	N-S	90.93	5.40	0.32	0.373	5.39	
	V	30.70	1.24	0.11	0.254	2.72	
Hammam Righa/110	E-W	105	10.40	5.18	0.622	52.30	Quaternaire
	N-S	73.50	12.51	7.54	1.069	44.30	
	V	67.23	5.48	2.74	0.512	33.62	
	E-W	25.7	1.94	0.63	0.474	8.35	

Miliana/130	N-S	16.50	1.72	3.85	0.655	36.93	Quaternaire
	V	31.24	2.28	2.43	0.458	33.30	
	E-W	25	1.36	3.36	0.342	61.76	
Ain Defla/151	N-S	10	1.22	2.51	0.766	20.57	Quaternaire
	V	33	1.57	1.86	0.299	39.10	

2.4. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons tenté de mettre en évidence la présence de l'effet de site qui accompagne les tremblements de terre en utilisant des données d'un séisme récent en Algérie. Il s'agit du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 de magnitude égale à 6,8.

Nous avons déterminé les caractéristiques des mouvements sismiques enregistrés, par une lecture visuelle des tracés des accélérations des particules de sol. Les accélérations sont les données accélérométriques obtenues aux différentes stations d'enregistrement. Une intégration directe de ces accélérations dans le domaine temps nous a permis d'obtenir les vitesses et déplacements des particules de sol.

Les rapports v_{max}/a_{max} ont permis d'estimer les périodes fondamentales des différents sites étudiés et de les caractériser.

Remerciements

Les données accélérométriques utilisées dans la présente étude nous ont été fournies par Dr Hamid Afra, Directeur de recherches et Directeur Général au Centre National de Recherches intégrées aux Bâtiments à Soudania (CNERIB) et Dr Nasser Laouami, Directeur de Recherches au Centre de Recherche Appliquée en Génie Parasismique à Alger (CGS). Qu'ils trouvent ici notre gratitude et sincères remerciements.

3.1. Introduction

Il est bien connu que la nature du sol modifie le mouvement sismique. Cette modification est plus importante pour les sols meubles. Elle est caractérisée aussi par l'amplification des mouvements sismiques ou leurs contenus fréquentiels. Pour quantifier cette influence, il est très important de déterminer la fonction d'amplification du sol.

Dans ce chapitre nous allons caractériser et quantifier l'effet de site à l'aide d'une étude empirique en utilisant deux techniques différentes; la première technique consiste à établir une fonction de transfert ou d'amplification d'un site donné pour une même station d'enregistrement de mouvements du sol lors d'une secousse sismique. Il suffit de calculer le module du rapport spectral entre une composante horizontale (E-W ou N-S) et la composante verticale de la même station. Il s'agit du rapport spectral Horizontal /Vertical (Horizontal to Vertical Spectral Ratio –HVSR).

La deuxième technique consiste à calculer une fonction de transfert ou d'amplification d'un site généralement meuble, par rapport à un site de référence, site rocheux. Il s'agit de calculer le rapport spectral standard entre une composante du premier site et la même composante du deuxième site pour un même événement sismique (Standard Spectral Ratio-SSR).

Dans le présent chapitre nous allons étudier les effets de site sur le contenu fréquentiel des mouvements sismiques du sol en terme des spectres de Fourier de ces mouvements aux leurs rapports à travers les fonctions d'amplification. Toute fois, il y a un autre moyen de quantifier l'effet de site au moyen du contenu fréquentiel ; il s'agit des spectres de réponse des mouvements des sols.

3.2. Contenus fréquentiels des signaux -Spectres de Fourier

Une analyse détaillée basée sur les techniques de traitement du signal est effectuée sur l'ensemble des mouvements sismiques enregistrés par le réseau national d'accélérographes.

L'estimation des effets de site en utilisant la technique des rapports spectraux est effectuée pour toutes les stations d'enregistrement du séisme de Boumerdes, afin d'évaluer la fréquence fondamentale et l'amplification maximale.

Ayant une excitation sismique obtenue à la base rocheuse ou au niveau de tout point d'un profil de sol d'un site donné (Fig. 3.1), il est intéressant de déterminer le contenu fréquentiel de cette excitation afin de savoir dans quelle gamme de fréquences cette excitation est énergétique. La donnée du spectre de Fourier permet d'avoir une idée immédiate sur la bande de fréquences où l'amplitude du mouvement est maximale. Ceci peut être obtenu en utilisant la transformée de Fourier Rapide "FFT" (Fast Fourier Transform).

3.2.1. Transformée de Fourier continue

Si f est une fonction continue dans le temps, sa transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel s'écrit [15] :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.1)$$

Ou la transformée de Fourier inverse s'écrit:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

3.2.2. Transformée de Fourier discrète

Si la fonction f est définie par N valeurs consécutives enregistrées (échantillons) avec un intervalle de temps Δt (pas d'échantillonnage), on peut définir une transformée discrète. Dans notre cas, la fonction $f(t)$ est un séisme de projet défini par un accélérogramme $\ddot{y}(t)$ à la surface du sol ou du substratum rocheux, son contenu fréquentiel est $\ddot{y}(\omega)$. Les N valeurs consécutives de l'accélérogramme sont :

$$\ddot{y}_k = \ddot{y}(t_k) \quad (3.3)$$

avec $t_k = k \cdot \Delta t$; $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Posons :

$$T = N.\Delta t \quad (3.4)$$

où T est la durée totale (blancs compris) de l'accélérogramme. Les valeurs des fréquences discrètes sont :

$$f_n = \frac{n}{T}; \quad n = -N/2, \dots, N/2 \quad (3.5)$$

ou bien en terme de pulsations,

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T}.n \quad (3.6)$$

d'où

$$\ddot{y}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \ddot{y}(t) e^{-i\omega_n t} dt \quad (3.7)$$

Qui s'écrit :

$$\ddot{y}(\omega) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} \ddot{y}_K e^{-i2\pi K n / N} \quad (3.8)$$

La somme $\sum_{k=0}^{N-1} \ddot{y}_K e^{-i2\pi K n / N}$ est appelée « Transformée de Fourier Discrète » de N valeurs \ddot{y}_K ,

soit

$$H_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} \ddot{y}_K e^{-i2\pi K n / N} \quad (3.9)$$

d'où

$$\ddot{y}(\omega) \approx \Delta t.H_n$$

(3.10)

La formule de la transformée de Fourier inverse s'écrit [15] :

$$\ddot{y}_K = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_n e^{-i2\pi K n / N}$$

(3.11)

Le calcul de la transformée de Fourier fait intervenir un nombre d'opérations proportionnel à N^2 . Comme dans le domaine du génie parasismique, le nombre d'opérations et de l'ordre de plusieurs milliers, il serait donc judicieux de faire appel à un algorithme plus développé, il s'agit de la transformée de Fourier rapide (FFT: Fast Fourier Transform) [15]. Le but de son utilisation est de réduire le nombre d'opérations ; le nombre utilisé par la FFT doit être dans ce cas un multiple d'une puissance de 2.

3.2.3. Spectre de Fourier

La relation (3.1) peut s'écrire sous la forme :

$$F(\omega) = E(\omega)e^{-i\phi(\omega)} = C(\omega) + i.S(\omega)$$

(3.12)

avec $E(\omega)$ le spectre d'amplitude de Fourier

$$E(\omega) = \sqrt{(C(\omega))^2 + (S(\omega))^2}$$

(3.13)

Ayant obtenu le spectre de Fourier de l'accélérogramme au niveau du substratum rocheux $\ddot{y}_{N+1}(\omega)$, on peut obtenir celui au toit de n'importe quelle couche

$\ddot{y}_j(\omega)$ par convolution selon la relation suivante :

$$\ddot{y}_j(\omega) = \ddot{y}_{N+1}(\omega) \cdot T_{j,N+1}(\omega) \quad (3.14-a)$$

ou

$$\ddot{y}_j(\omega) = \ddot{y}_{N+1}(\omega) \cdot T_{j,N+1}^*(\omega) \quad (3.14-b)$$

$T_{j,N+1}(\omega)$ est la fonction d'amplification calculée en prenant le rapport des amplitudes des déplacements au toit d'une couche j du profil de sol et au niveau de l'interface de la couche N et le rocher sous-jacent (Fig. 3.1) [5]. $T_{j,N+1}^*(\omega)$ est la fonction d'amplification calculée en divisant l'amplitude du déplacement à la surface d'une couche j par celle à la surface de la base rocheuse supposée en affleurement (Fig. 3.1).

L'accélérogrammes dans la couche (j) $\ddot{y}(z_j, t)$ et éventuellement à la surface libre

$\ddot{y}(0, t)$, est obtenu par la transformée de Fourier inverse tel que :

$$\ddot{y}(z_j, t) = \text{Re} \left(\sum_{n=0}^{N/2} y''_j(\omega) e^{i\omega_n t} \right) \quad (3.15)$$

Cette équation permet de connaître en tout point du profil de sol l'accélération, la vitesse et le déplacement par intégration (division par ω et ω^2), la déformation de cisaillement γ_j et, à l'aide de loi de comportement, la contrainte de cisaillement σ_{xz} dans une couche j .

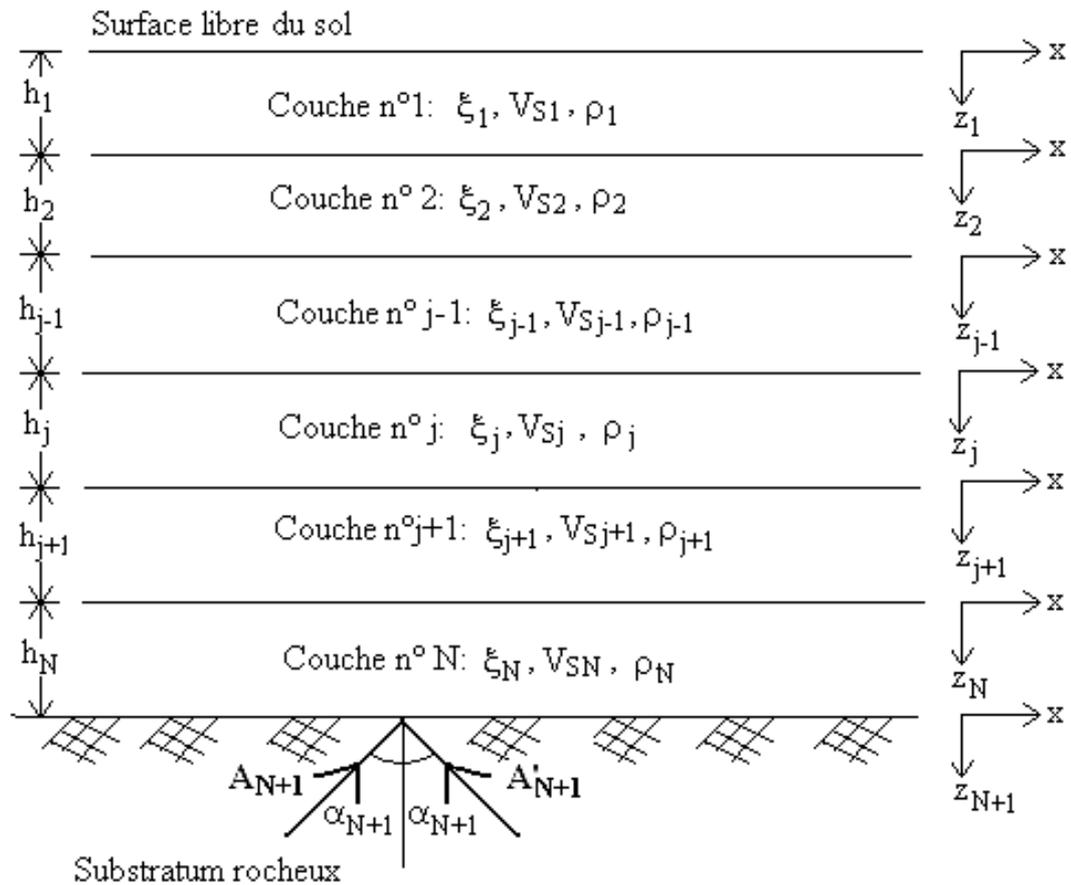


Fig. 3.1- Schématisation d'un profil de sol soumis à la propagation d'une onde de cisaillement de type SH.

3.3. Applications aux signaux du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003

L'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT), incorporé dans une subroutine écrite en langage Fortran [15], a été appliqué aux signaux des trois composantes (E-W), (N-S) et (V) des 13 stations qui ont enregistré le séisme de Boumerdes. Les spectres de Fourier des signaux ainsi obtenus sont montrés sur les figures 3.2-a à 3.20-a.

L'analyse des spectres de Fourier obtenus montre :

- Un contenu fréquentiel riche dans un intervalle de fréquences de 4 à 17 Hz pour les composantes (E-W) et (V) pour la station de Keddara1 et dans un intervalle de fréquences de 4 à 10 Hz pour la station de Keddara 2.

- Au le site de Dar EL Beida, on constate un contenu fréquentiel plus riche que pour les deux stations de keddara1 et keddara2 dans un intervalle de fréquence de 1 à 10 Hz pour les composantes (E-W) et (N-S).
- Pour les sites de Hussein Dey, Kouba, Tizi-Ouzou, Azazga et Hammam Righa un contenu fréquentiel moyen autour de 2 à 8 Hz pour les composantes (E-W) et (N-S) est observé.
- Les deux sites de EL Afroun et celui sur lequel on a enregistré la réplique de Boumerdes (distance de 7 km de l'épicentre) montre un contenu fréquentiel moyen par rapport à celui de la station de Dar EL Beida. Un contenu fréquentiel autour de 4 à 8 Hz pour les deux composantes E-W et N - S respectivement, est observé.
- Aux autres sites Blida, Méliana et Ain Defla, le contenu fréquentiel est très faible par rapport à ceux des autres sites pour toutes les composantes E-W, N-S et V.

Particulièrement, pour la composante N-S de la station de keddara2 (Fig.3.4-a), on remarque que le spectre de Fourier est relativement riche en fréquences dans un intervalle de 10 à 18 Hz. On remarque également que les spectres de Fourier de la station de Dar EL Beida sont nettement plus riches en fréquences par rapport aux autres stations.

3.4. Fonction d'amplification HVSR

La méthode HVSR détaillée dans le chapitre 1 est appliquée ici pour calculer la fonction d'amplification pour chaque site ; Keddara 1, Keddara 2, Dar EL Beida, Hussein Day, Kouba, Tizi Ouzou, Blida, Azazga, EL Afroun, Hammam Righa, Meliana, Ain Defla et celui de la réplique de Boumerdes.

La méthode HVSR est formulée du fait que les conditions de sol n'affectent pas la composante verticale, mais affectent les composantes horizontales. Cette fonction est calculée en divisant l'amplitude du spectre de Fourier de la composante horizontale E-

W (ou N-S) de la station d'enregistrement par l'amplitude du spectre de Fourier de la composante verticale de la même station, c à d pour le même site.

Les courbes HVSR obtenues correspondants aux différentes stations 3.3, 3.4, dans cet ordre.

Dans chacune de ces figures on présente d'abord la fonction d'amplification HVSR telle qu'a été obtenue par le calcul, appelée non lissée ; puis on présente la fonction d'amplifications lissée. En effet, le calcul direct de la fonction d'amplification à partir du rapport spectral donne des courbes très parasitées à cause du bruit additif aux mesures et du calcul numérique discret de la transformée de Fourier. Ces courbes présentent de nombreux pics (Figures 3.2-a, 3.3-a jusqu'à 3.20-a et 3.27-a), d'où la difficulté de localiser les fréquences modales ou bien les modes de vibration.

A cet effet, il est nécessaire de lisser la fonction d'amplification HVSR. Le lissage consiste à recalculer la valeur d'un point d'une courbe à partir d'une moyenne pondérée de plusieurs points situés de part et d'autre du point considéré. Il existe plusieurs techniques de lissage ; nous avons retenu ici la technique de la fenêtre triangulaire qui pondère les valeurs des points de la courbe par une fonction triangulaire définie par [18] :

$$F(f_i) = 1 - \frac{|f - f_i|}{f_0}, \quad \text{pour} \quad |f - f_i| \leq f_0 \quad (2.14)$$

La technique du lissage a été appliquée aux valeurs des courbes des figures (3.2-a, 3.3-a) à (3.20-a, 3.27-a). Les fonctions d'amplification ainsi lissées sont présentées sur les figures (3.2-b et 3.3-b) à (3.20-b et 3.27-b).

L'analyse des courbes des fonctions d'amplification (HVSR) en champ proche (Keddara) fait ressortir un contenu fréquentiel riche en haute fréquence pour la station1 et une fréquence centrale autour de 4 Hz pour la station de Keddara2. Pour la station Keddara1, des investigations géophysiques permettront de confirmer la présence d'effets de site qui expliquerait la valeur élevée de l'accélération enregistrée.

Pour ce qui est de la station de la réplique de Boumerdes, la fréquence centrale est entre 1 et 2 Hz. Cependant l'analyse par la méthode HVSR fait ressortir une fréquence fondamentale autour de 0.7 Hz, ce qui dénote l'existence probable d'une couche alluvionnaire.

Une conclusion préliminaire, à partir du contenu fréquentiel au rocher (Keddara 2) et celui à Boumerdes montre l'absence du phénomène de résonance au niveau de la fréquence fondamentale, ce qui est plutôt favorable.

Pour les constructions édifiés sur rocher, il est probable, vu le contenu fréquentiel au rocher (Keddara 2), que le phénomène de résonance soit survenu pour les constructions qui ont des fréquences à partir de 4 Hz.

3.5. Fonction d'amplification SSR

La fonction d'amplification SSR (Standard Spectral Ratio) est appliquée pour montrer l'amplification du mouvement sismique d'un site par rapport à un autre. En d'autres termes, la fonction d'amplification SSR va nous permettre de mettre en évidence l'amplification par effet de site.

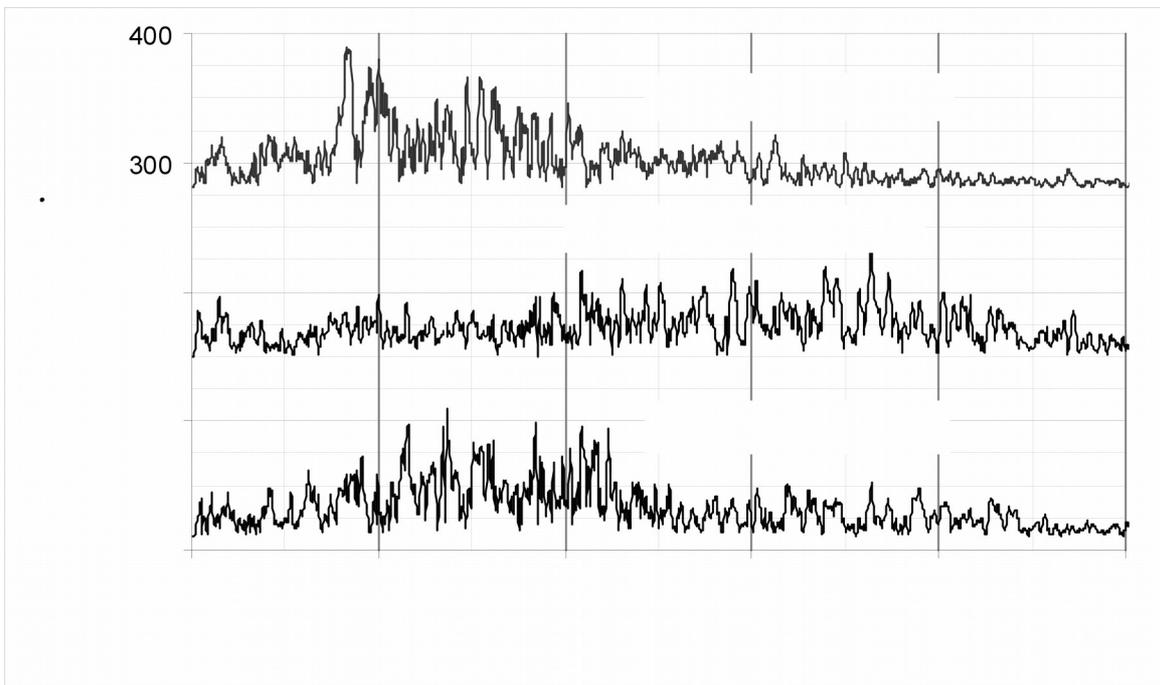
Le calcul de la fonction d'amplification SSR consiste à diviser l'amplitude du spectre de Fourier d'une composante d'une station d'enregistrement, c-à-d d'un site, par l'amplitude du spectre de Fourier de la même composante d'une deuxième station d'enregistrement et ce pour un même événement sismique.

Parmi toutes les stations d'accélérographes présentées dans le tableau 2.1, une seule est référenciée par les spécialistes comme station de référence; c-à-d les enregistrements des mouvements de sol à cette station sont supposés sur site rocheux. Il s'agit de la station de Keddara2. Par cette procédure nous avons obtenu des courbes perturbées que nous avons présentées sur la figure 3.28.

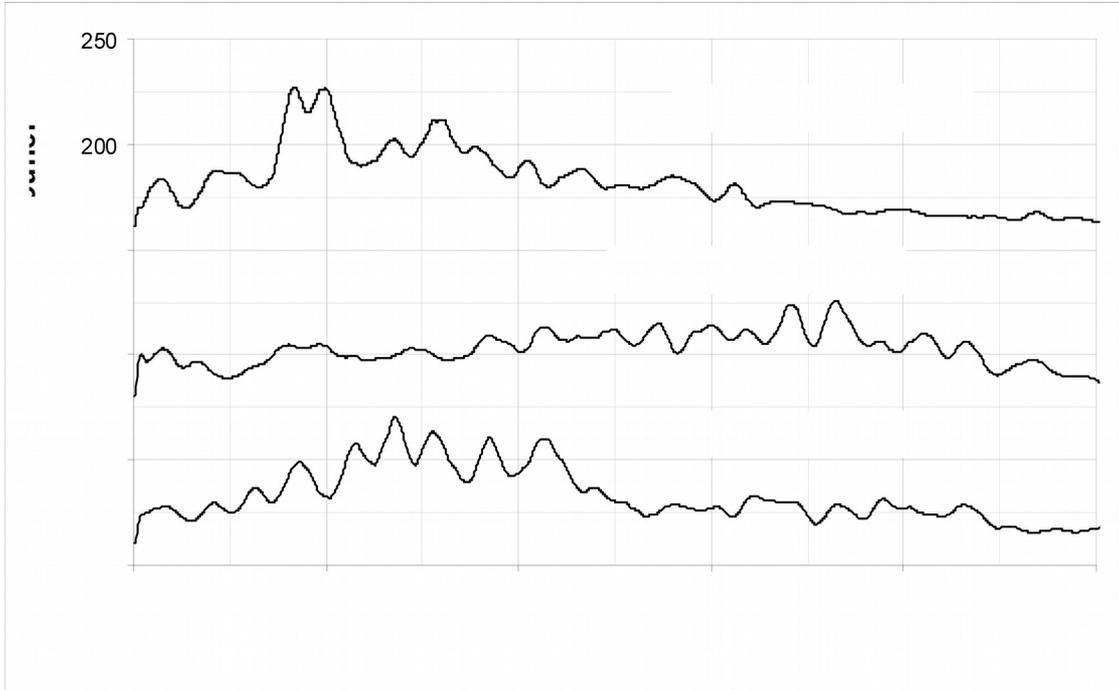
La procédure de lissage, mentionnée ci-dessus, a permis de tracer aussi les courbes lissées de la fonction SSR. A partir de cette figure, nous remarquons que le facteur d'amplification qui représente le module du rapport spectral entre la composante E-W (ou N-S) de la première station à la même composante E-W (ou N-S) de la deuxième station s'est approché d'une valeur de 10 à la fréquence (29,7Hz) pour la composante E-

W (Fig.3.28 (E-W)) et a dépassé la valeur de 10 à une fréquence de (43 Hz) pour la composante N-S (Fig. 3.28 (N-S)).

Cette valeur élevée du facteur d'amplification spectral laisse croire à une présence certaine d'un effet de site au site de Keddara1. Nous pouvons conclure aussi, à travers ces simples applications et en absence d'études détaillées de sol, que le site de Keddara1 (Station 1) est probablement constitué d'une couche de sol d'épaisseur et de caractéristiques mécaniques faibles par rapport aux couches adjacentes [19].

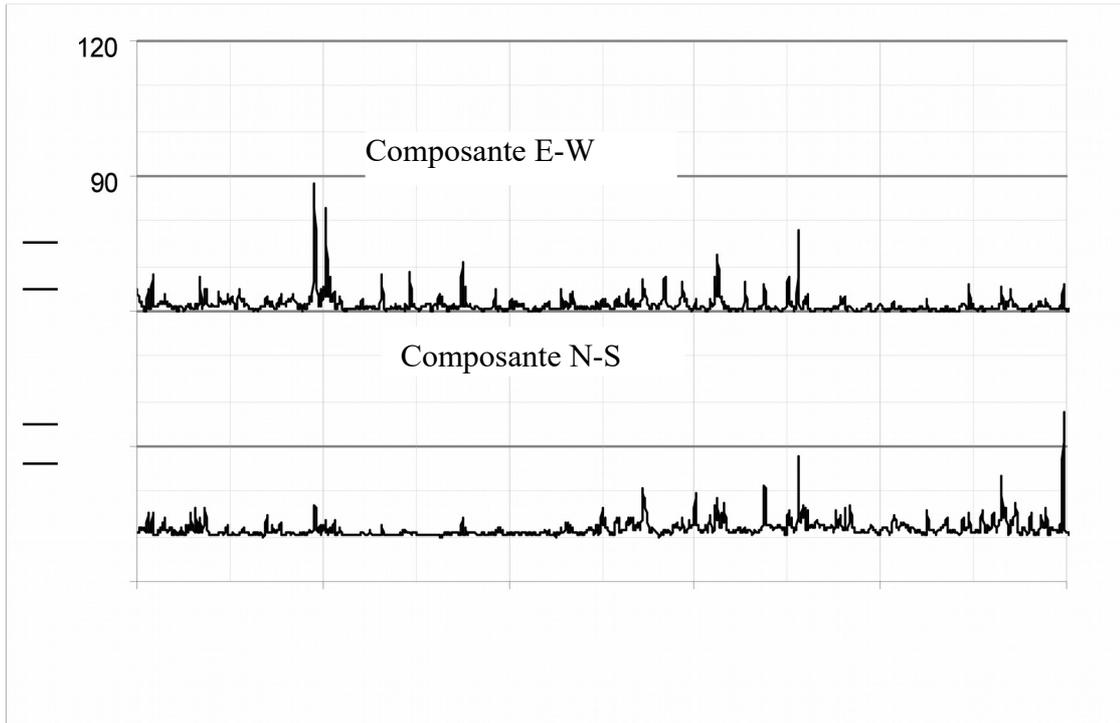


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

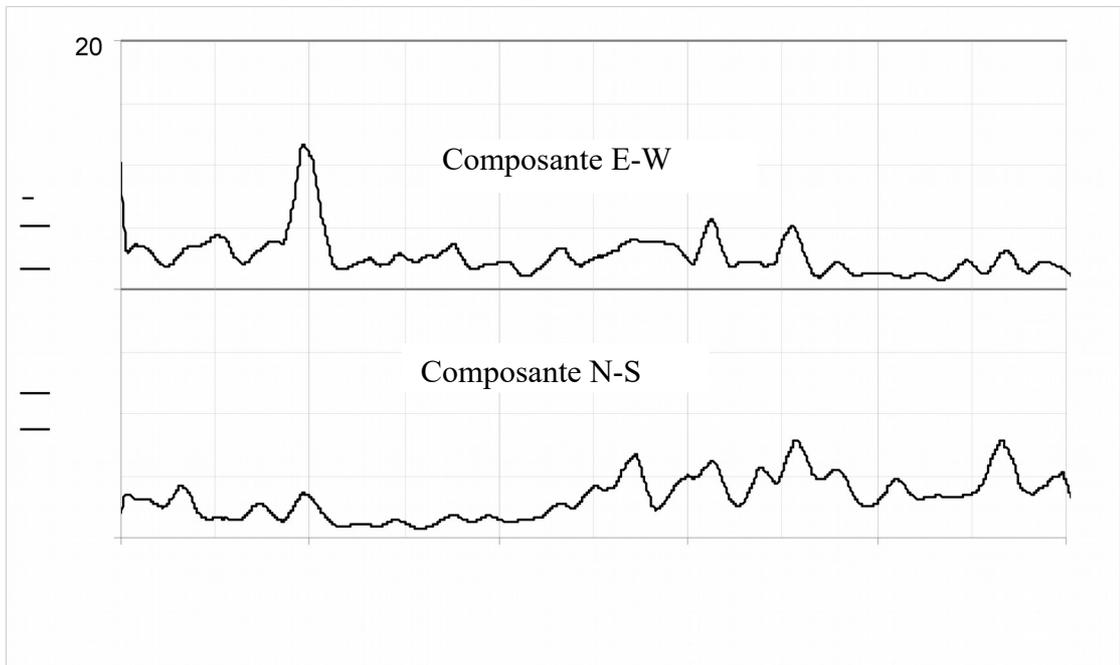


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.2- Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara1.

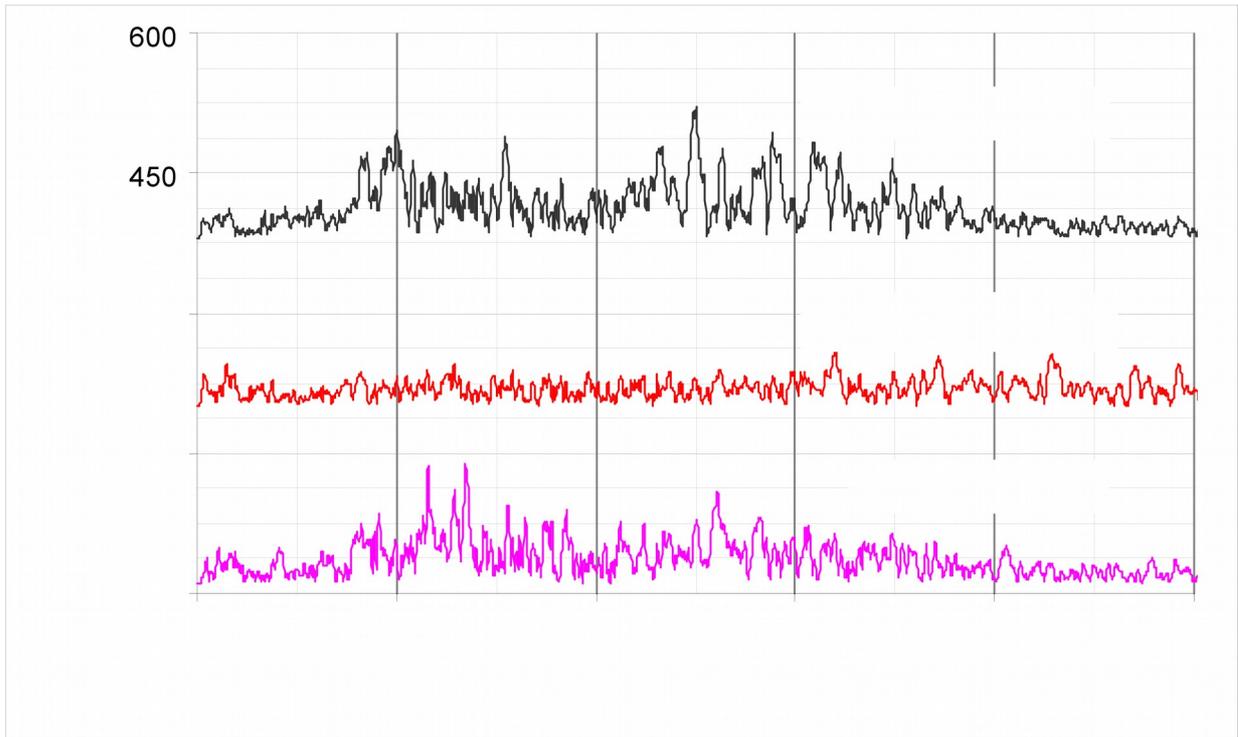


(a)- HVSR non lissée.

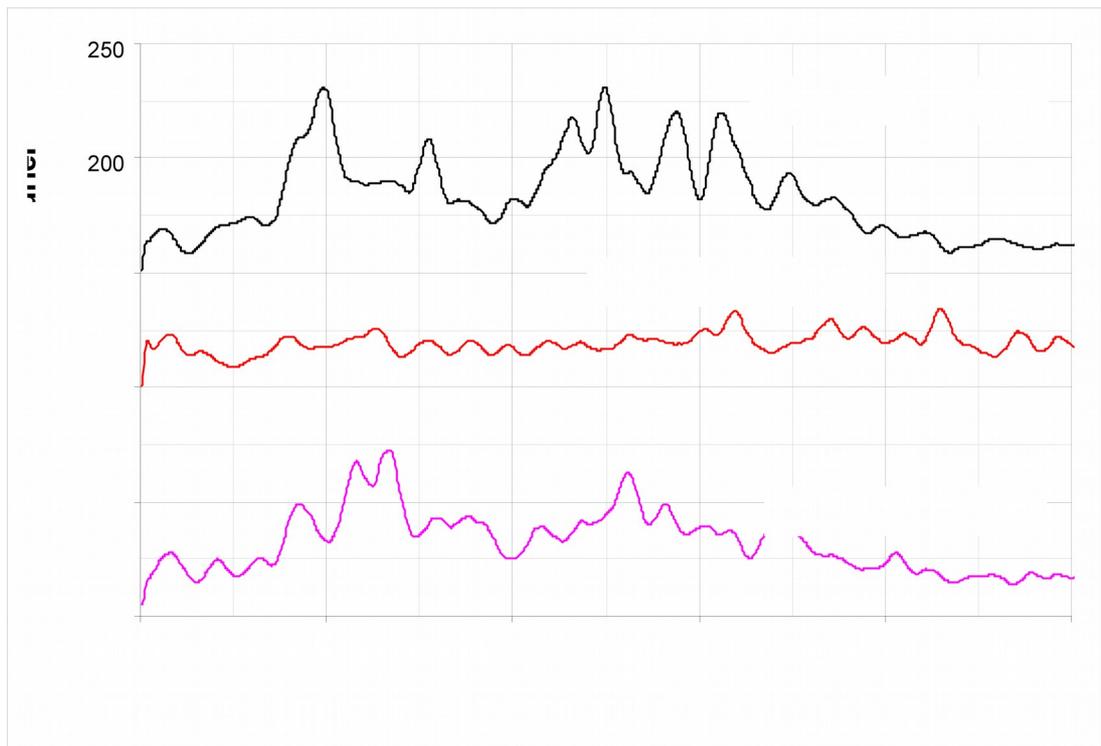


(b)- HVSR lissée.

Fig. 3.3 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara1.

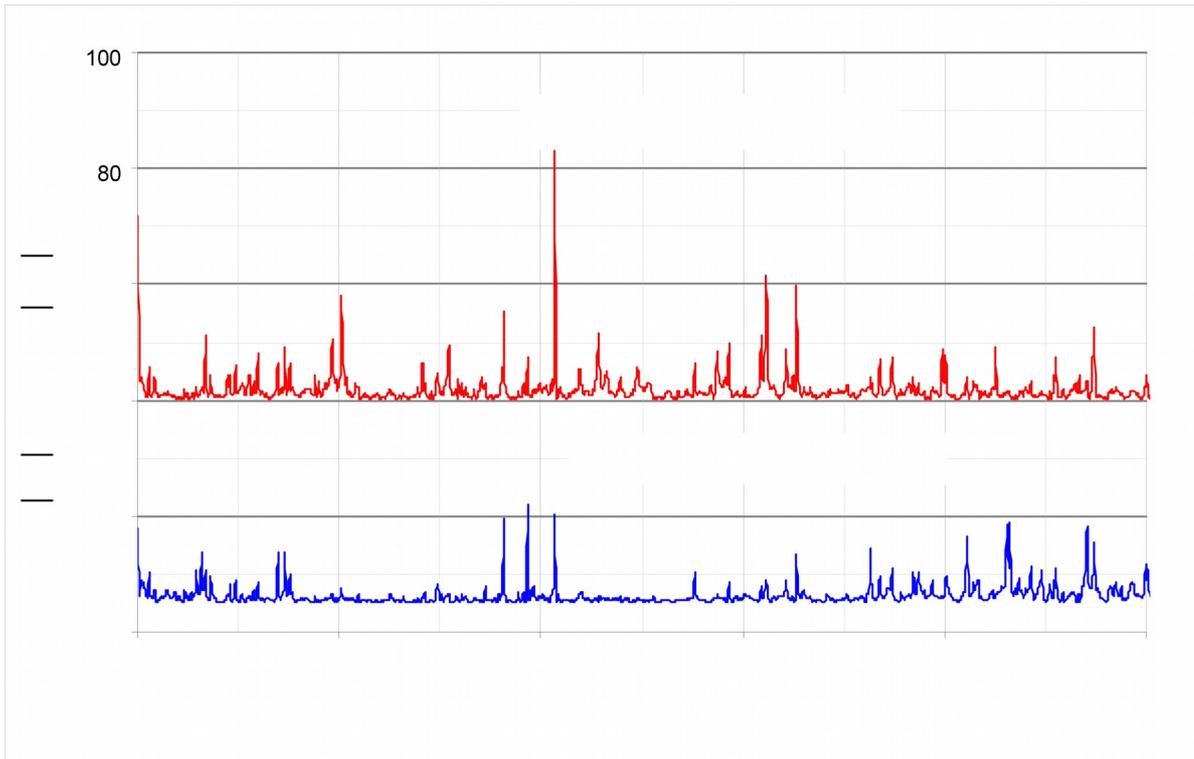


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

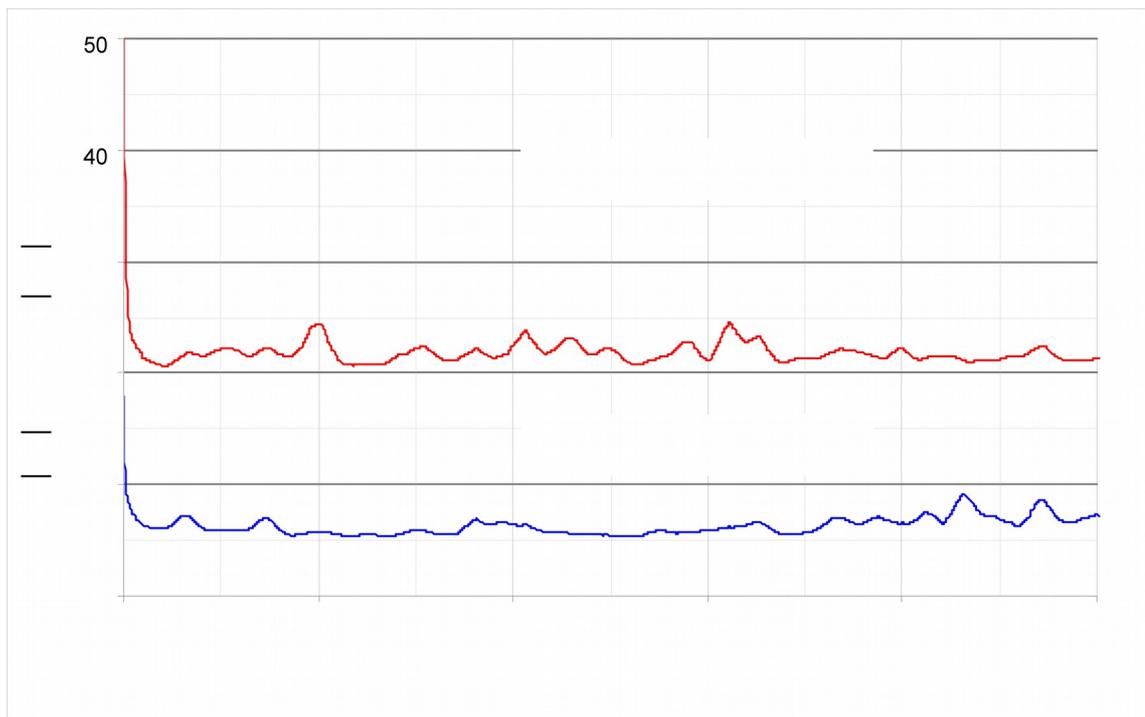


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.4 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara2.

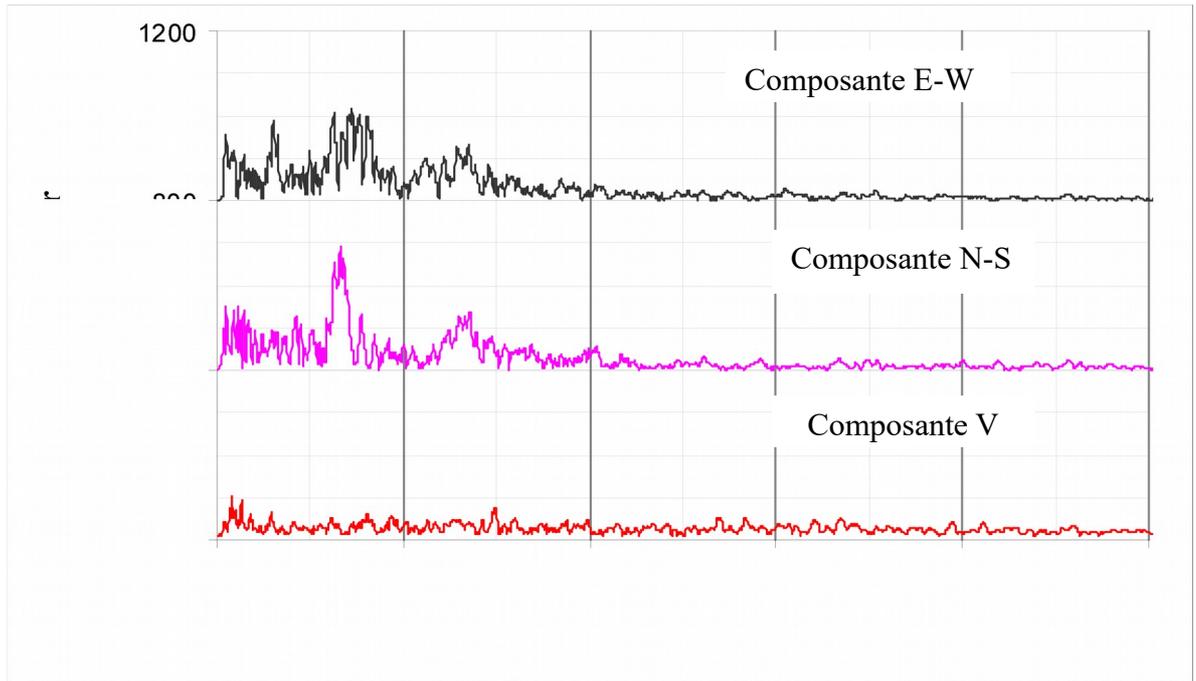


(a)- HVSR non lissée.

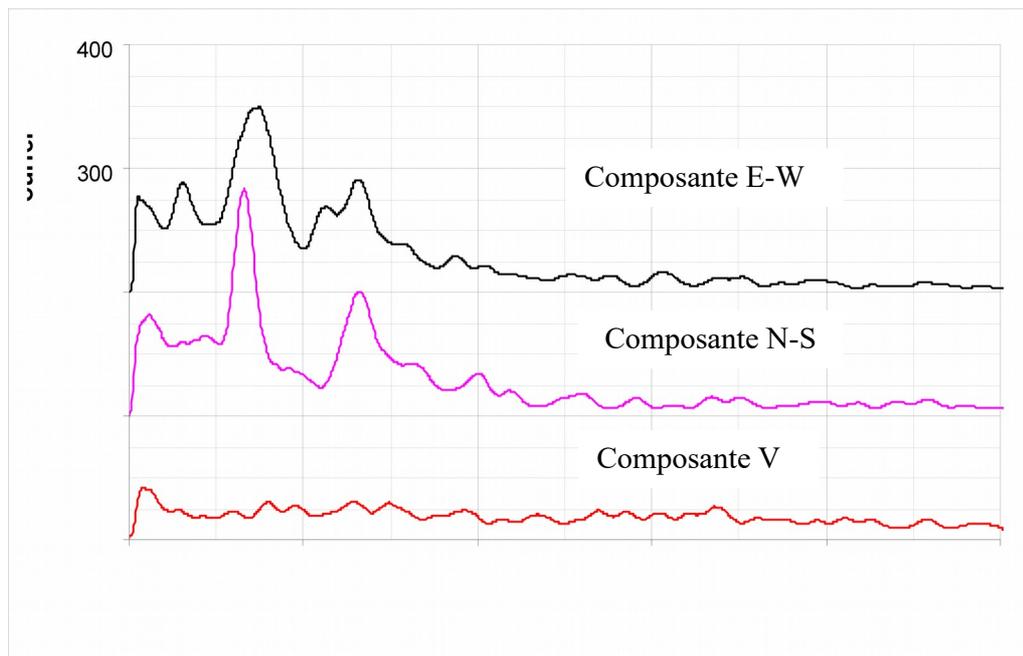


(b)- HVSR non lissée.

Fig. 3.5 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara2

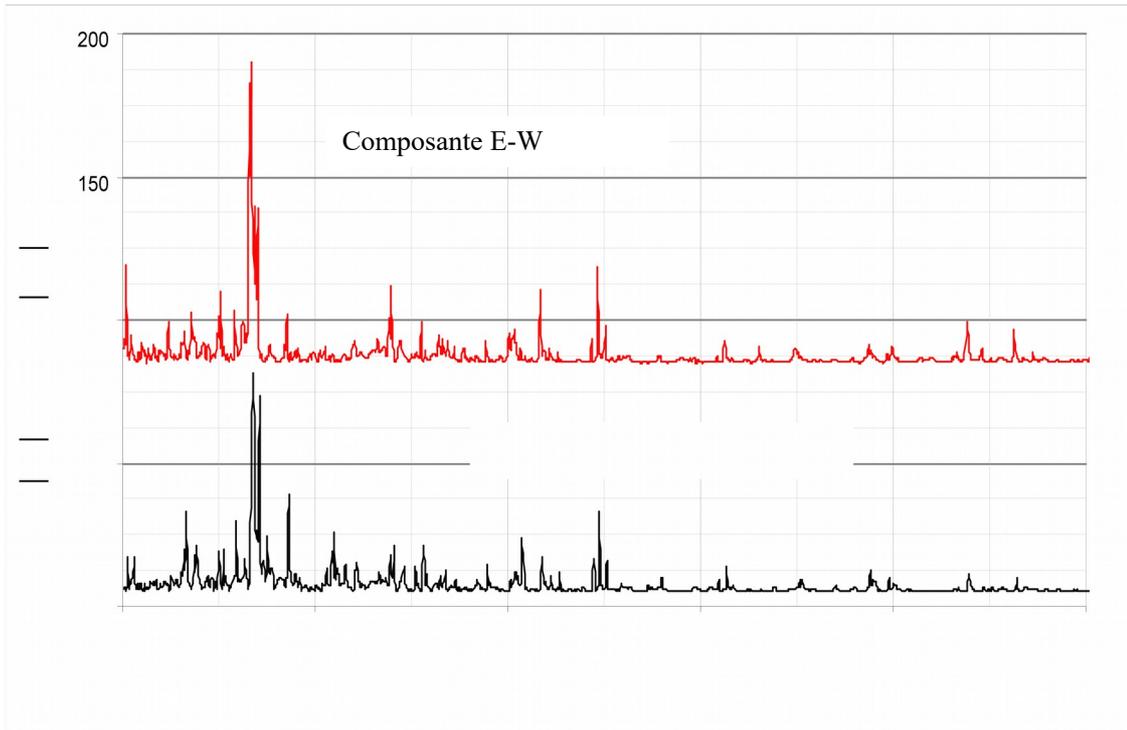


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

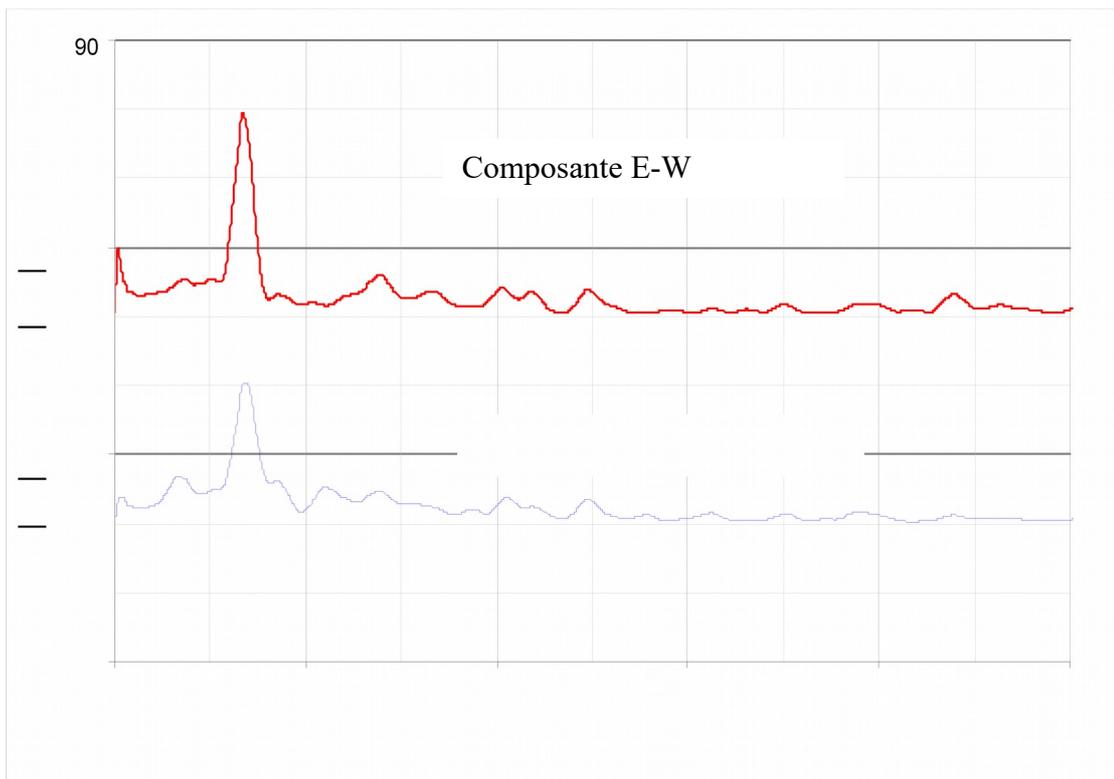


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.6 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Dar EL Beida.

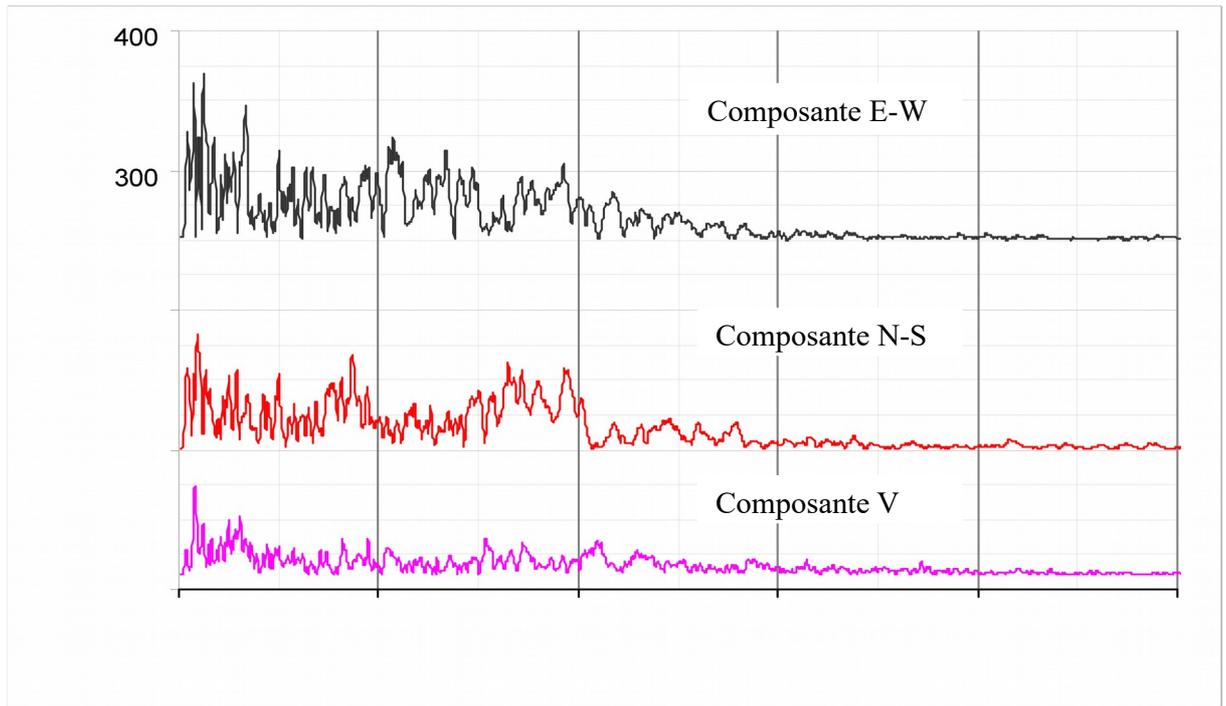


(a)- HVSR non lissées.

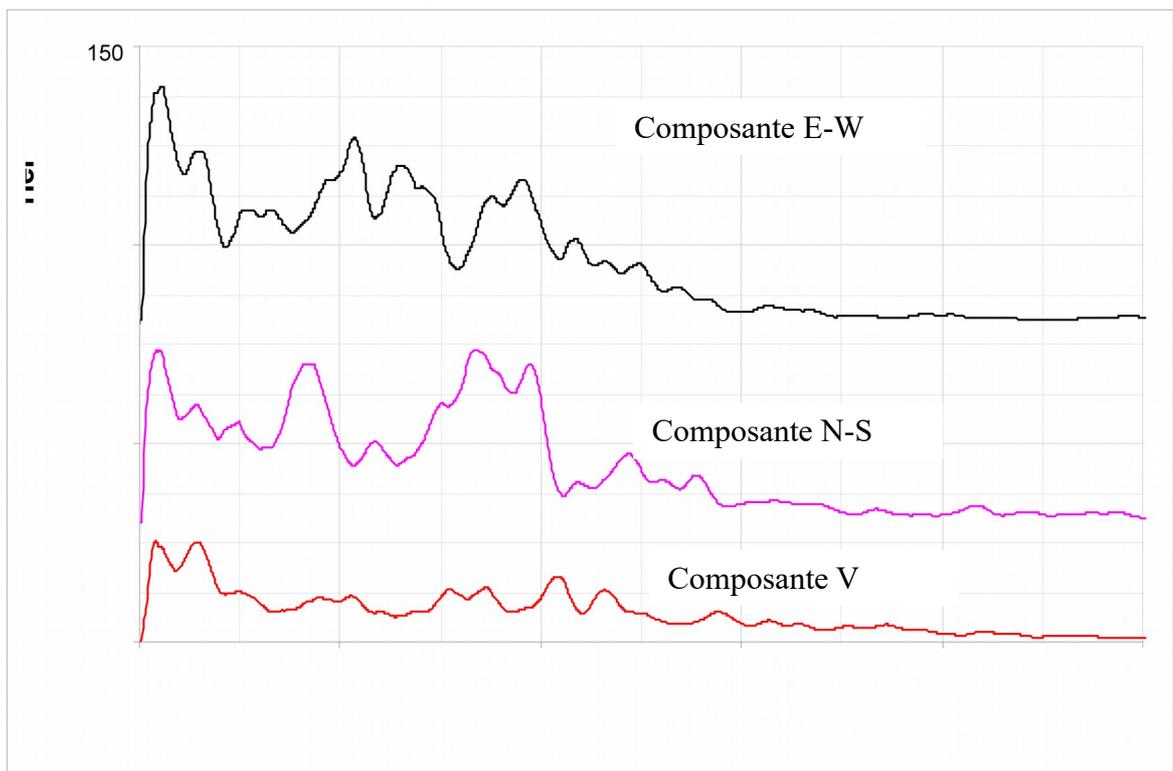


(a)- HVSR lissées.

Fig. 3.7 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Dar EL Beida.

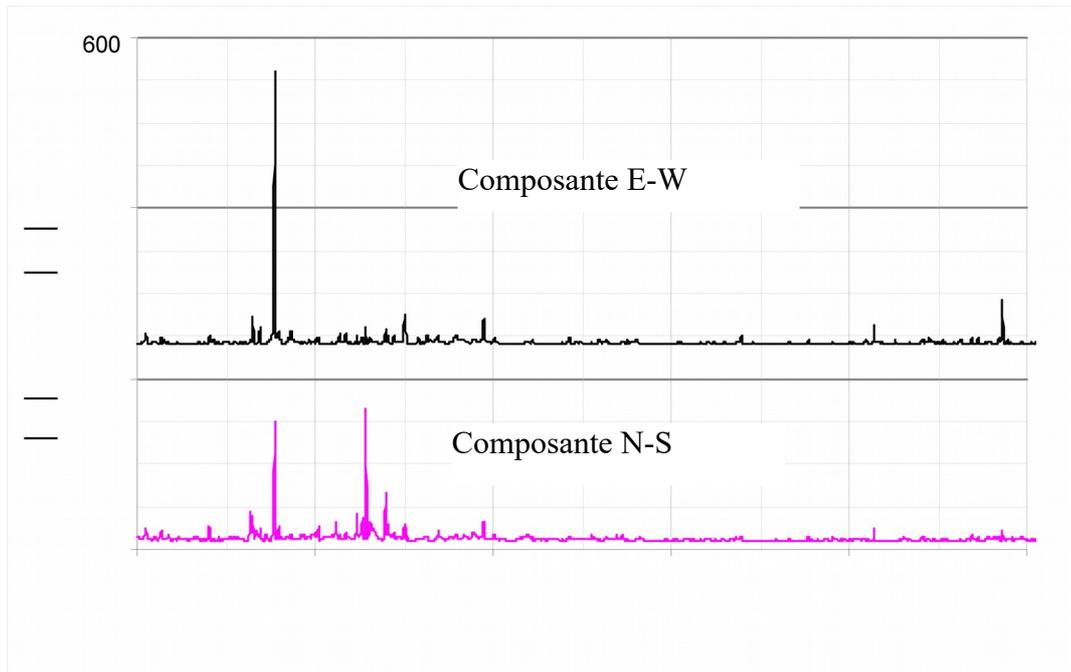


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

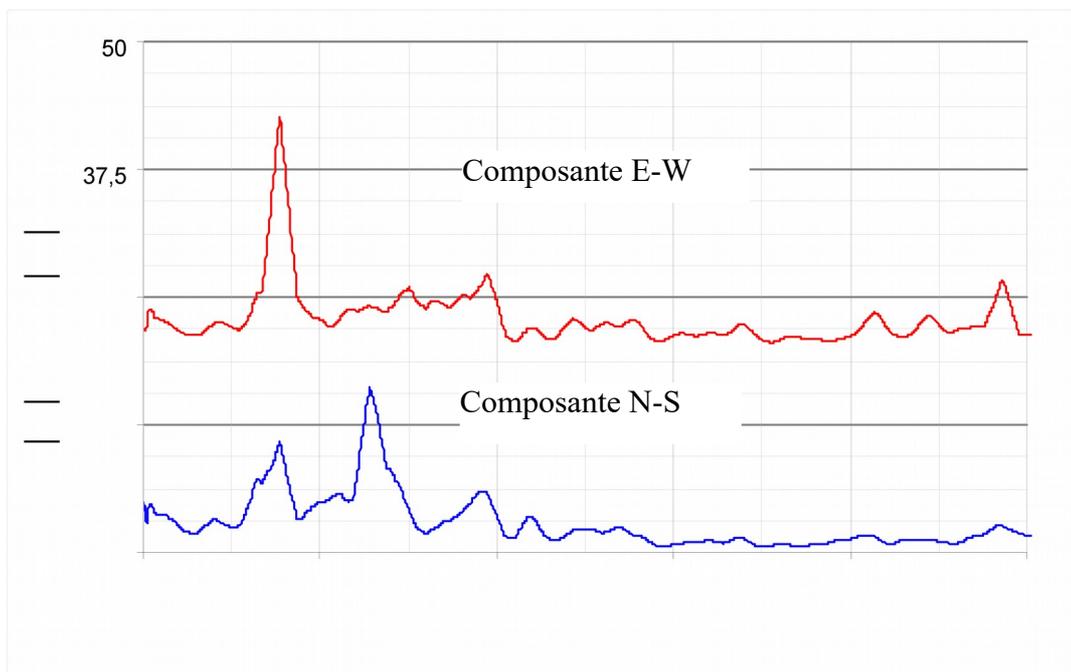


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.8 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Hussein Dey.

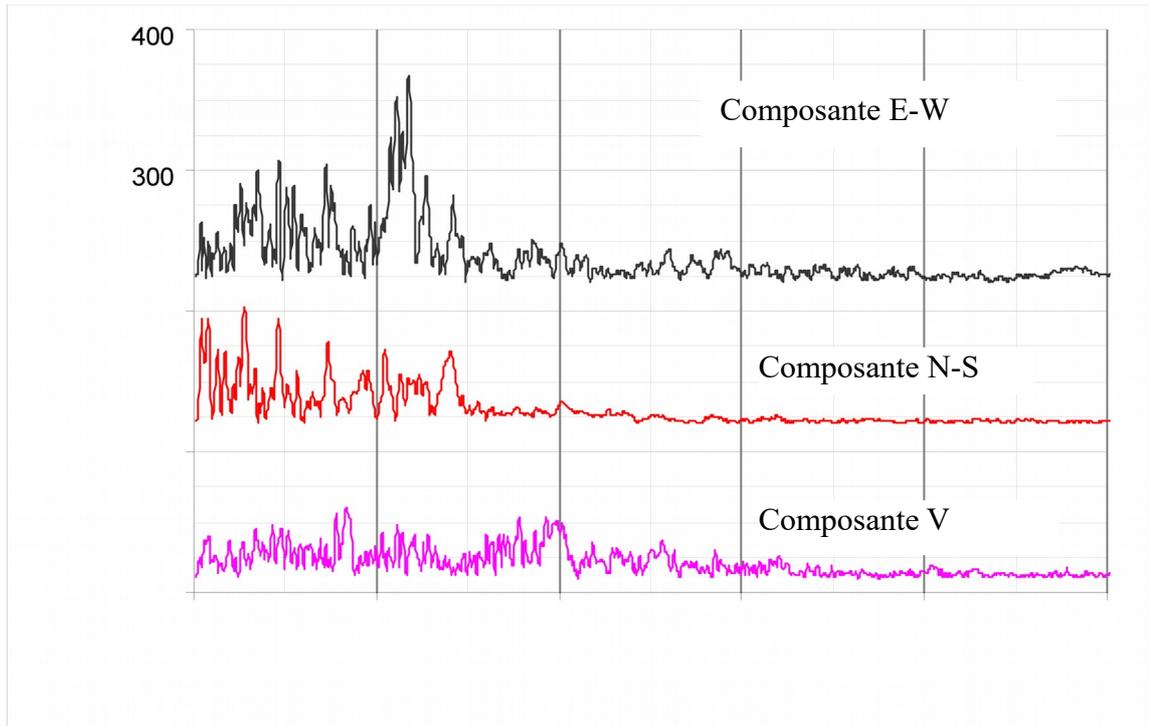


(a)- HVSR non lissées.

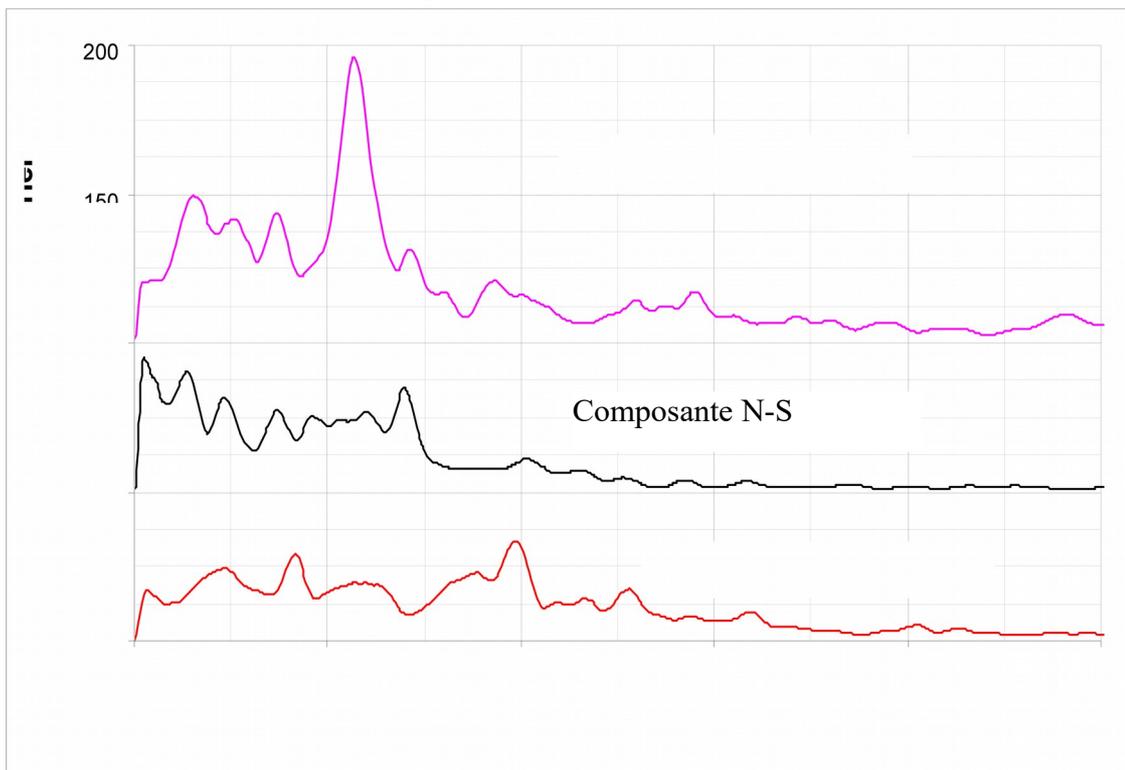


(a)- HVSR lissées.

Fig. 3.9 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Hussein Dey.

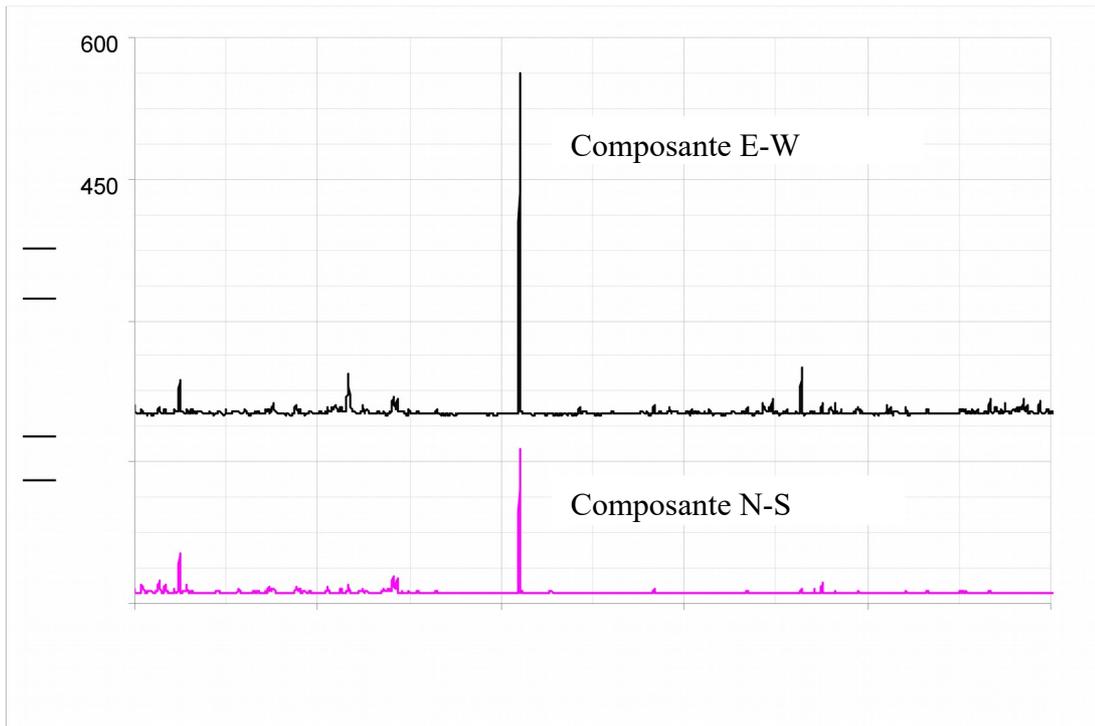


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

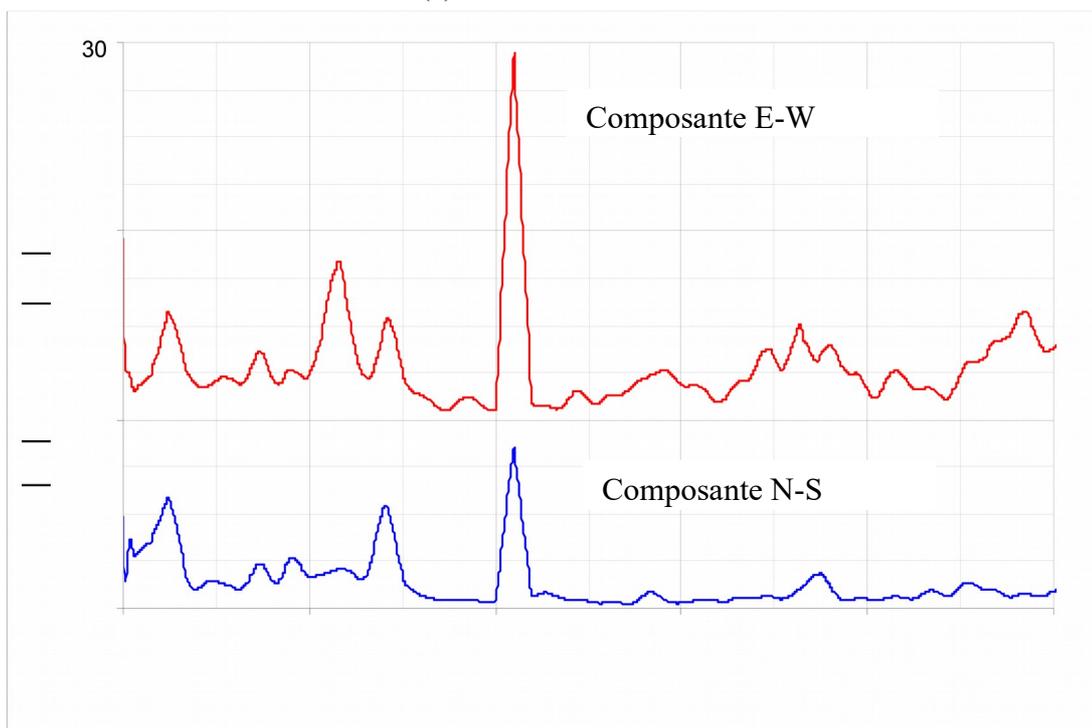


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.10- Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Kouba.

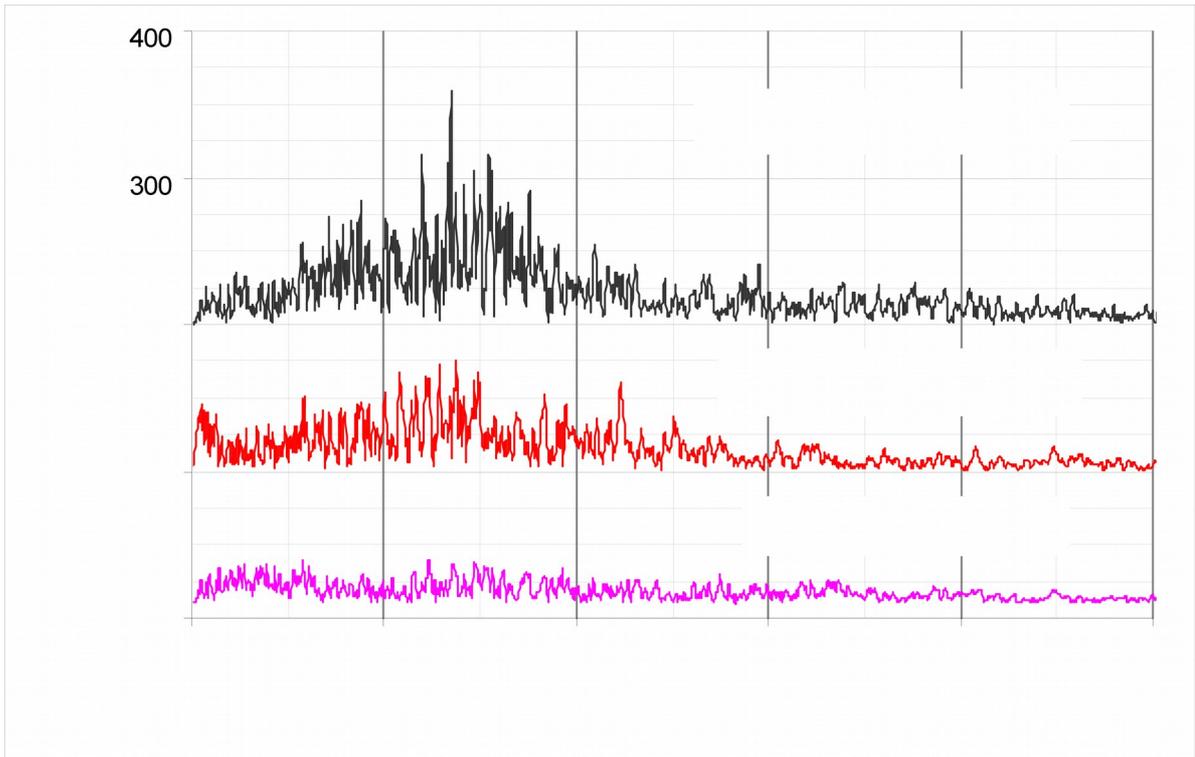


(a)- HVSR non lissées.

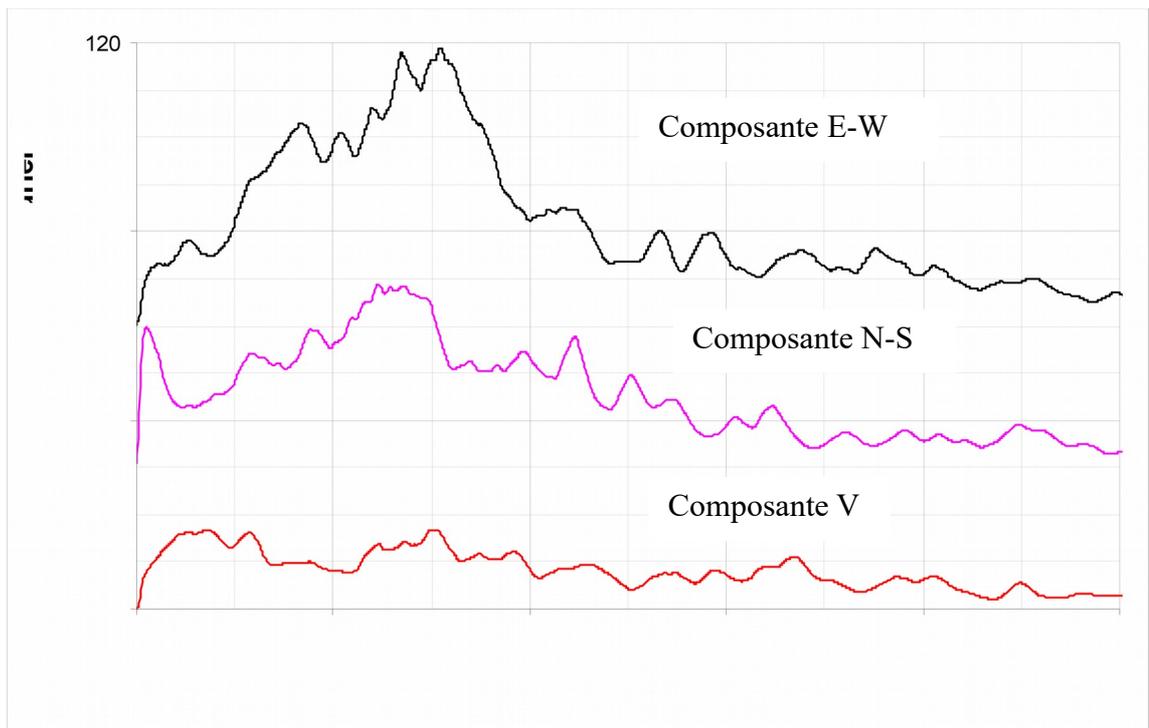


(a)- HVSR lissées.

Fig. 3.11- Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Kouba.

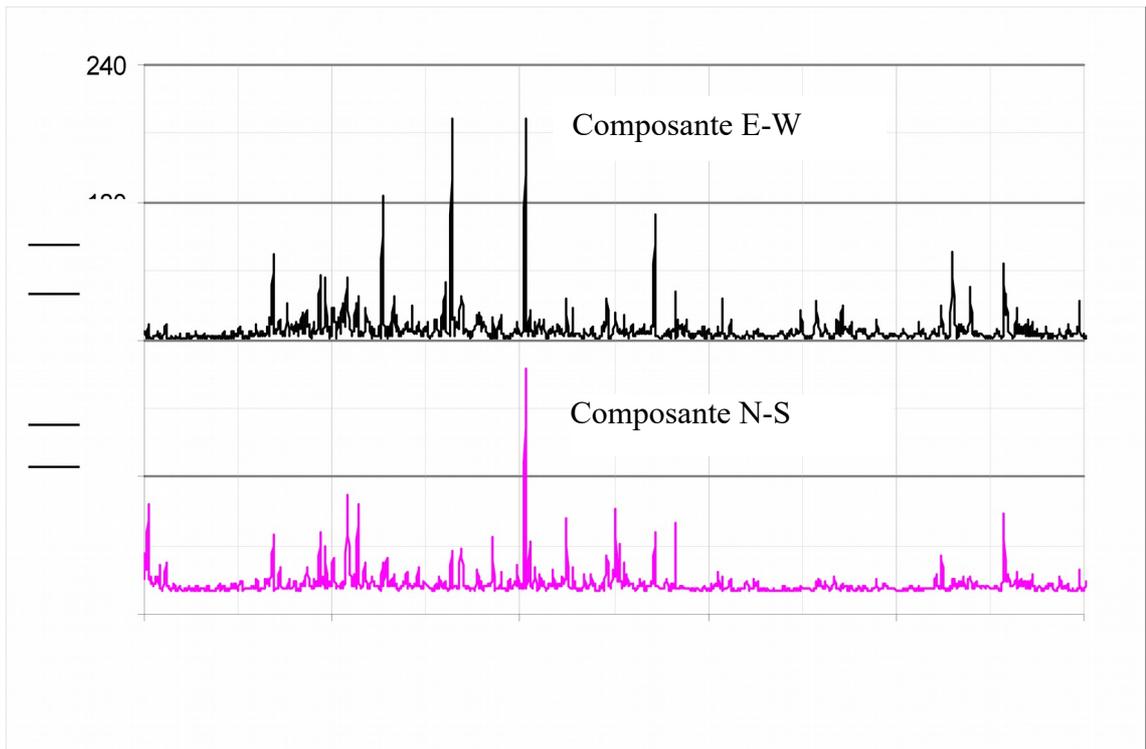


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

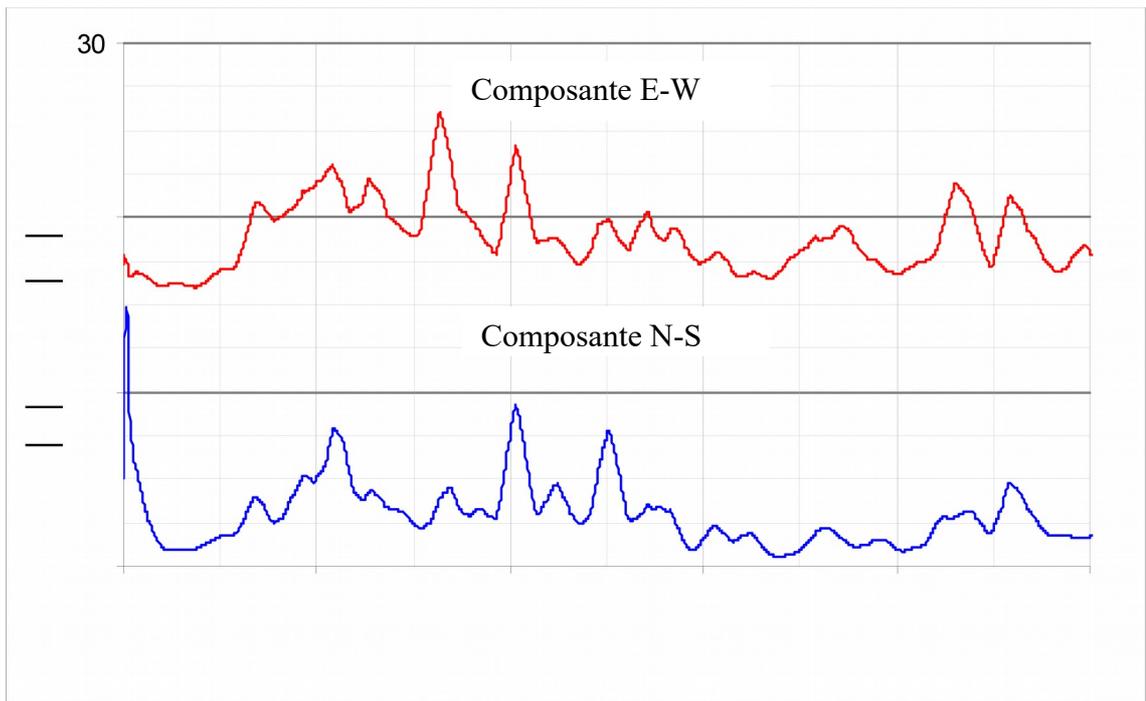


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.12 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Tizi Ouzou.

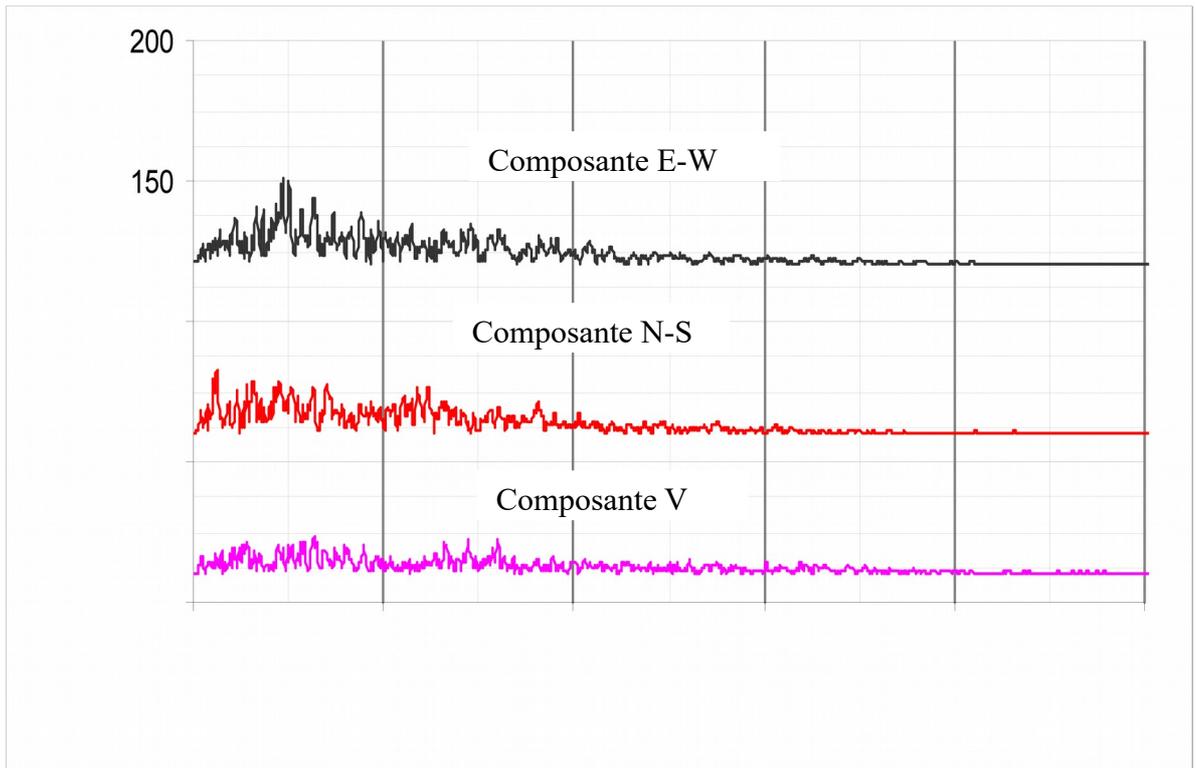


(a)- HVSr non lissée.

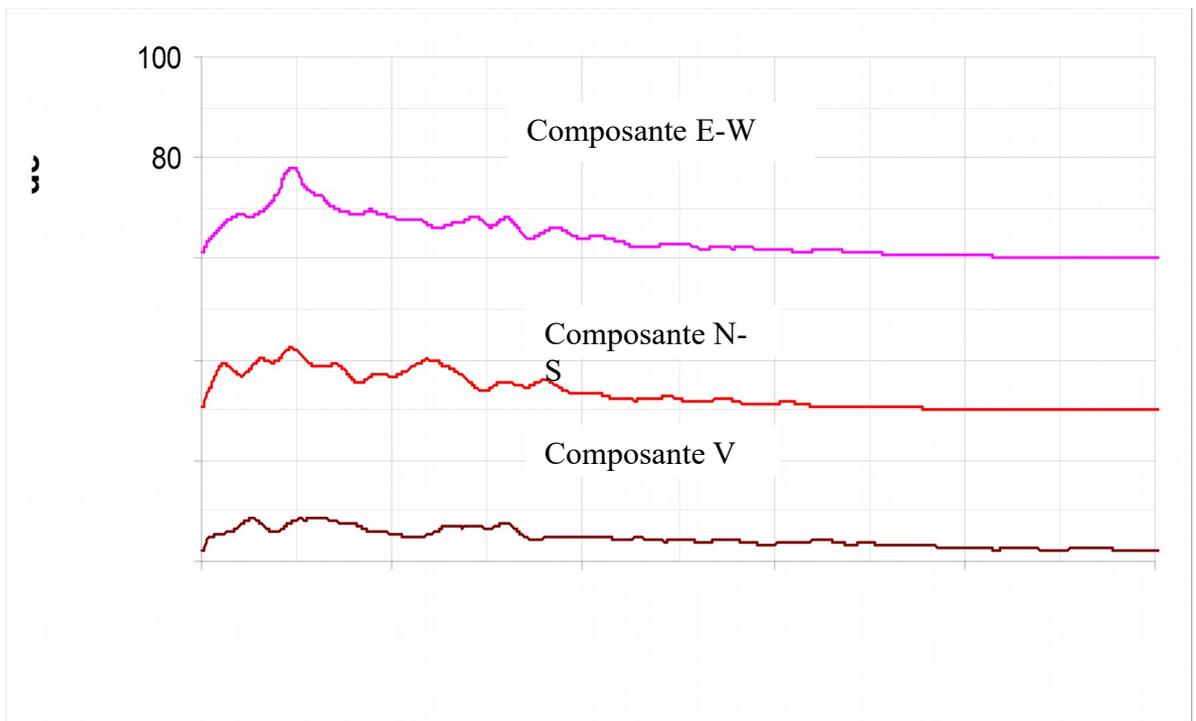


(b)- HVSr lissée.

Fig. 3.13 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSr) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Tizi Ouzou.

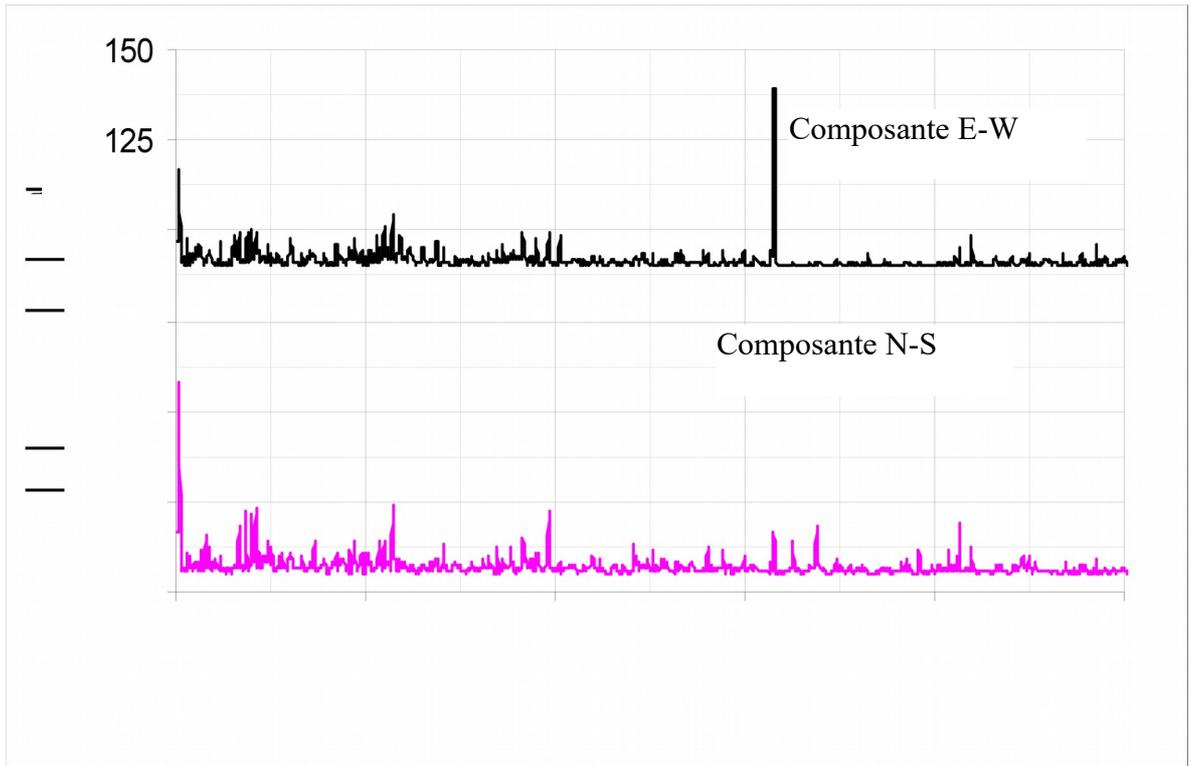


(a)- Spectre de réponse lissée.

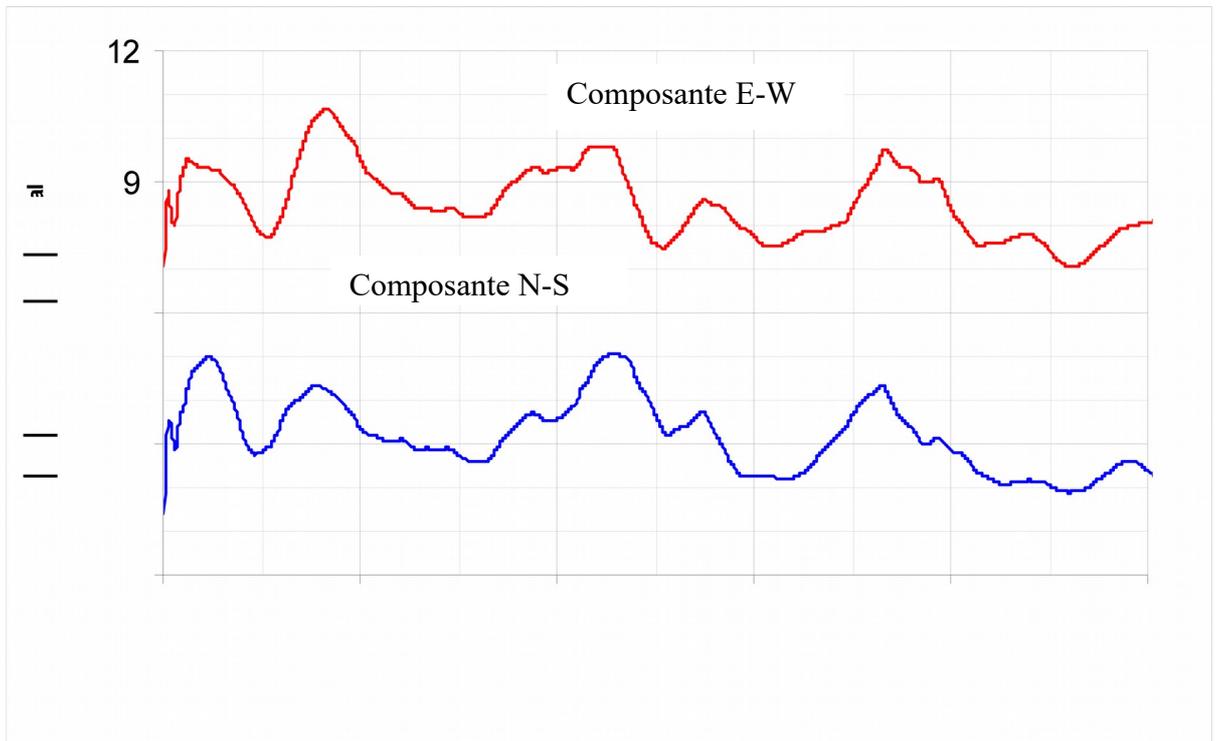


(b)- Spectre de réponse non lissée.

Fig. 3.14 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Blida .

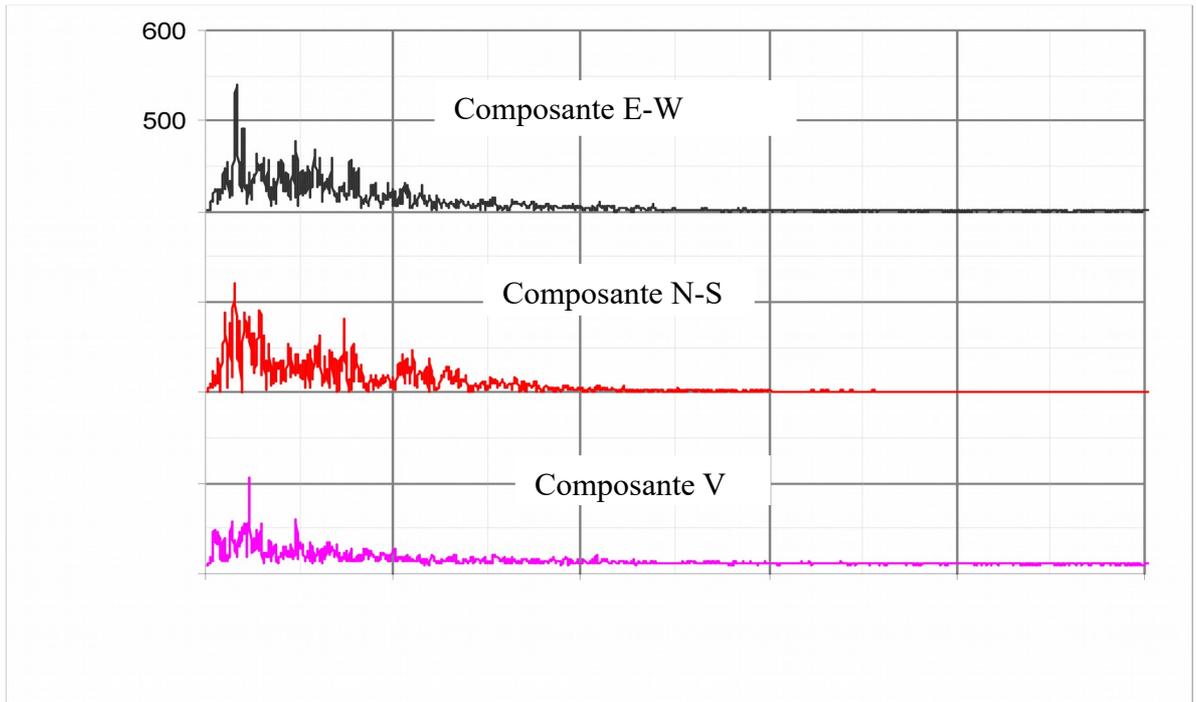


(a)- HVSR non lissée.

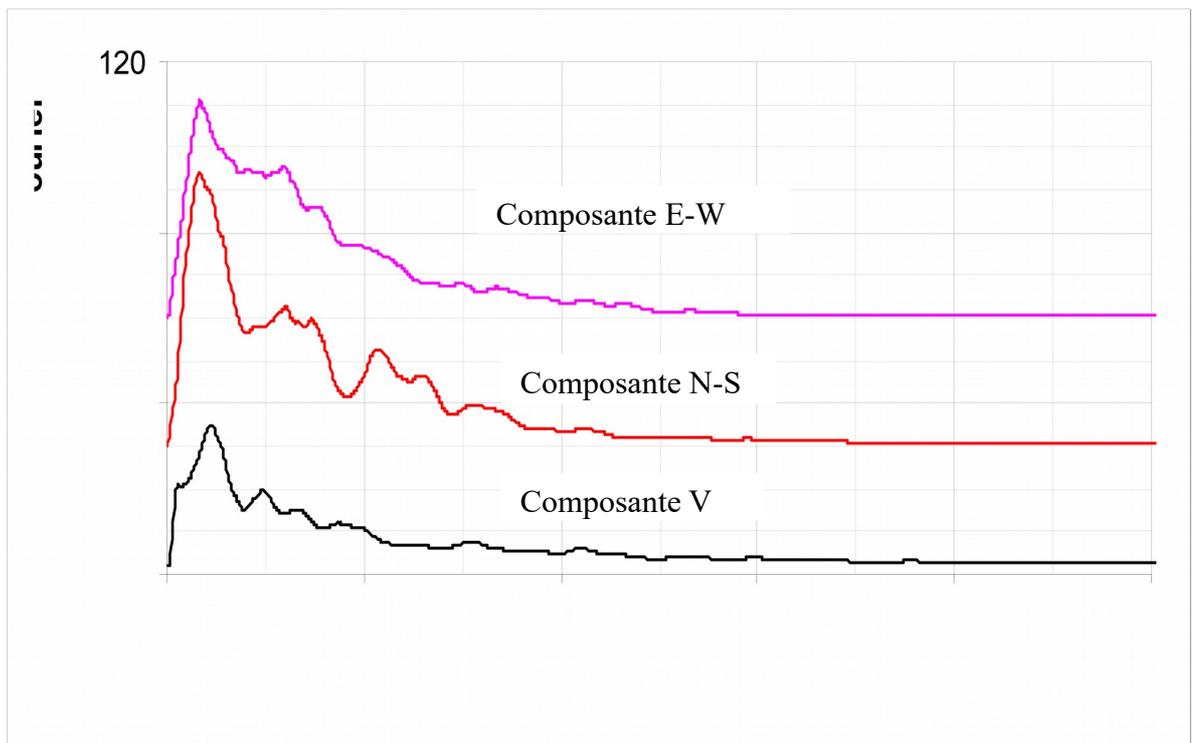


(b)- HVSR lissée.

Fig. 3.15 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Blida .

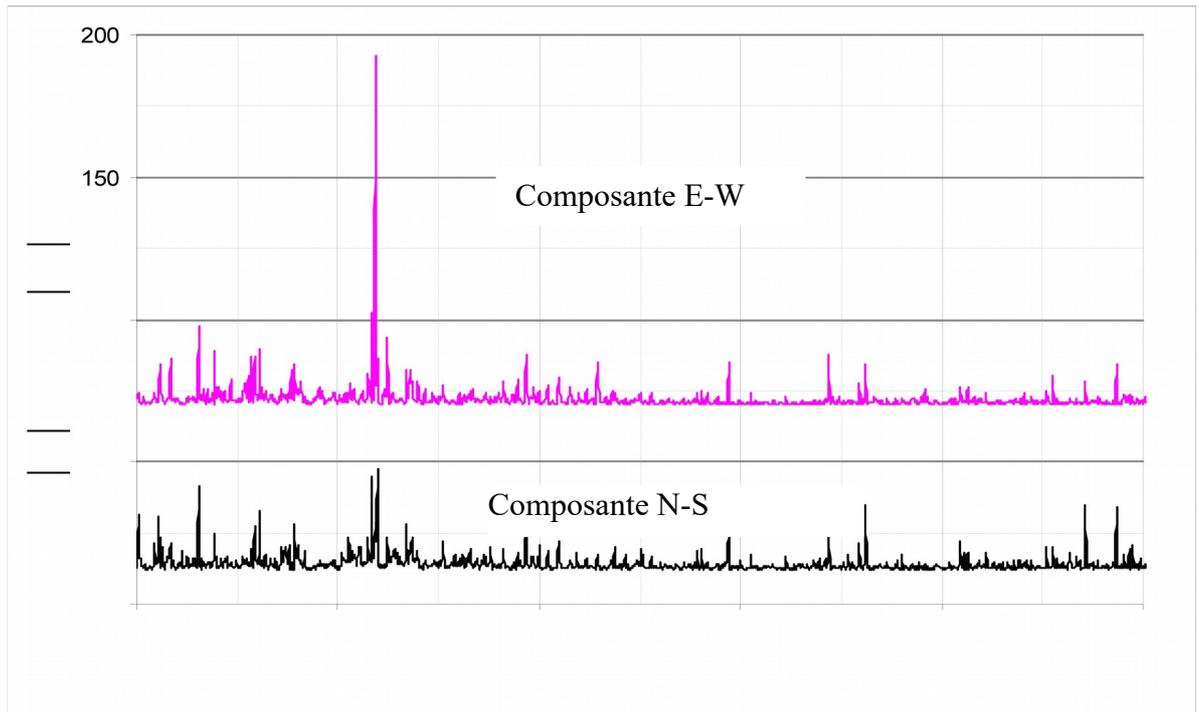


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

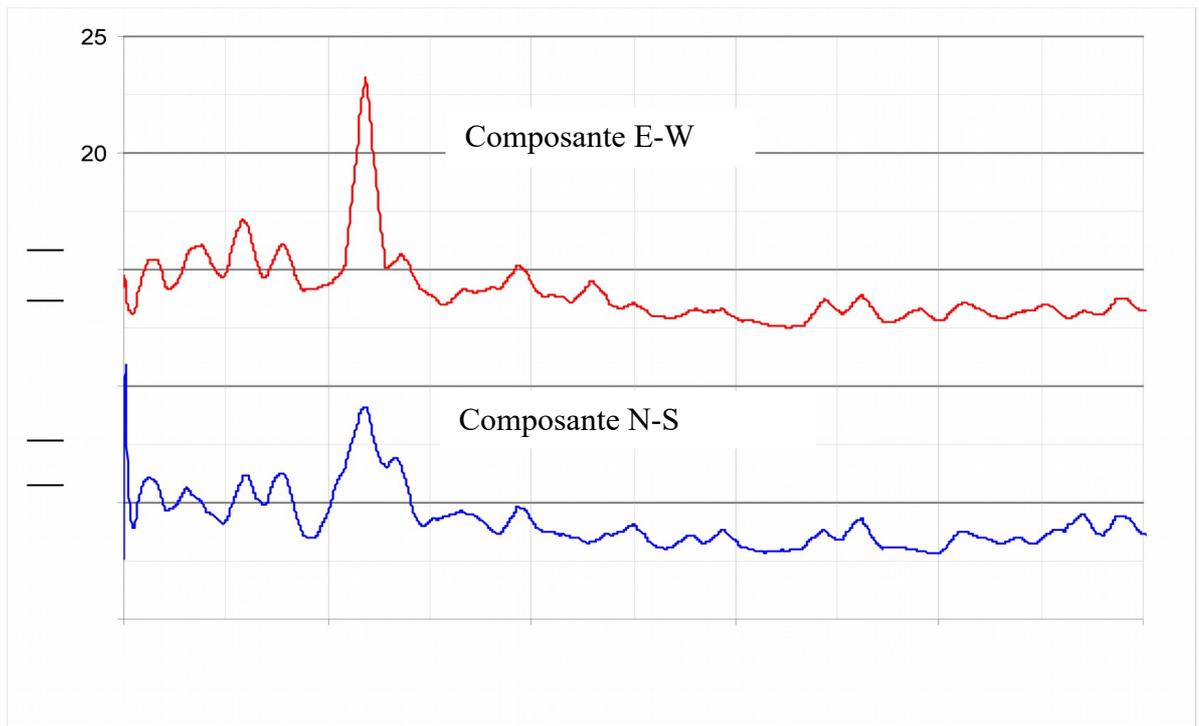


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.16 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées et lissées des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Azazga .

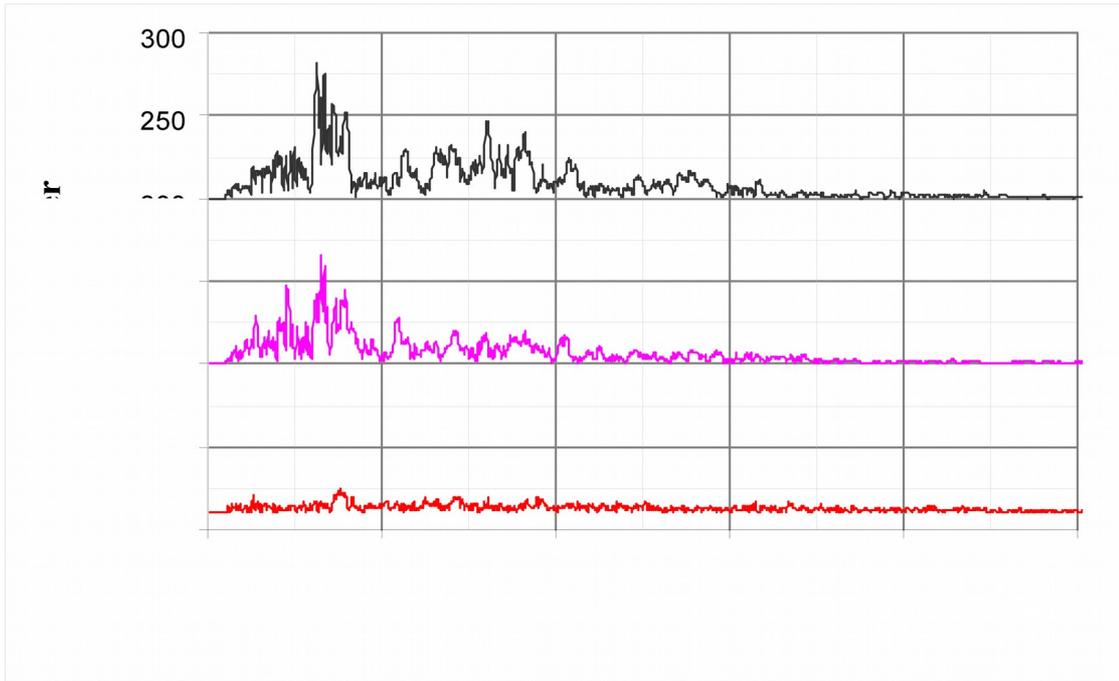


(c)- HVSr non lissée.

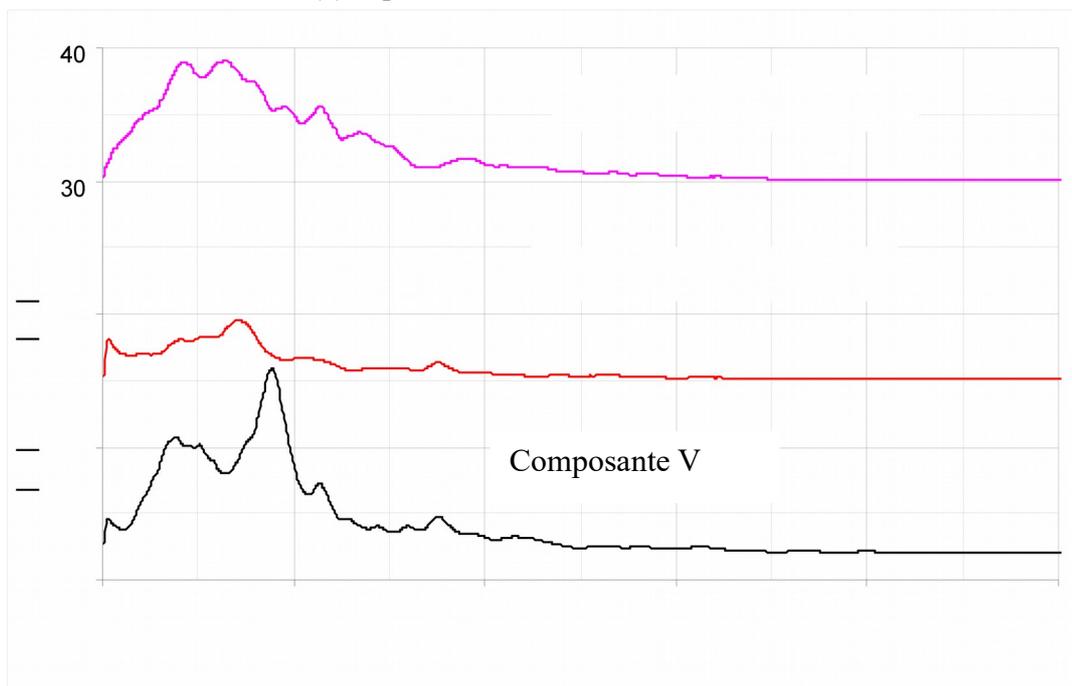


(d)- HVSr lissée.

Fig. 3.17 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSr) non lissées et lissées des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Azazga .

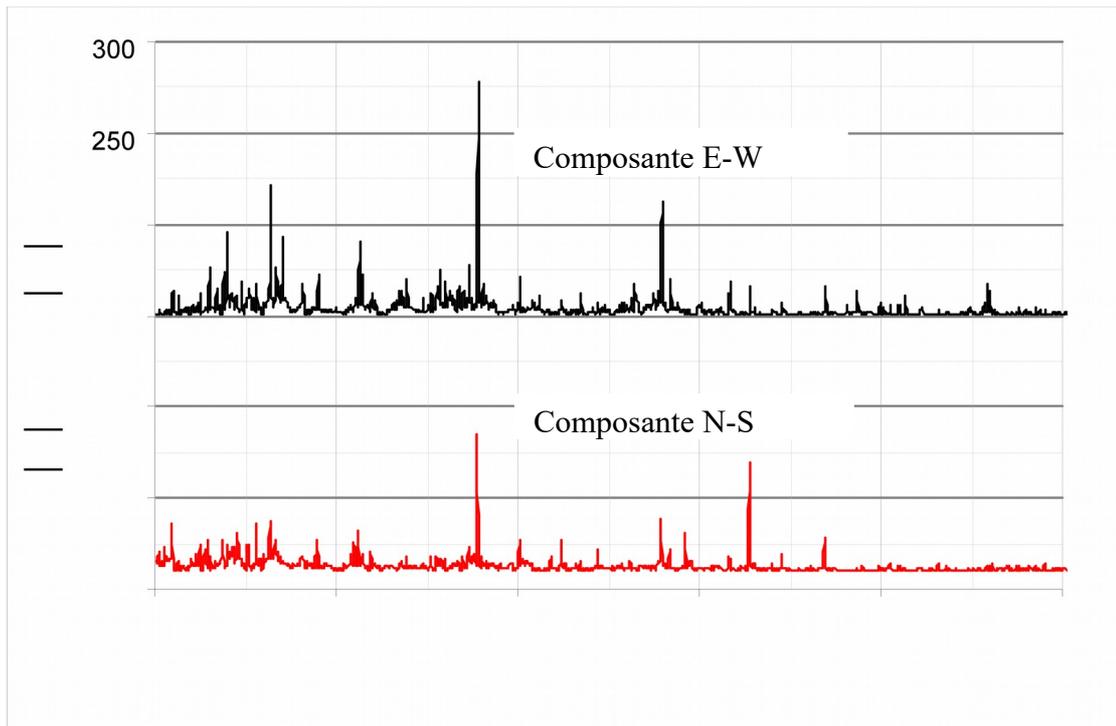


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

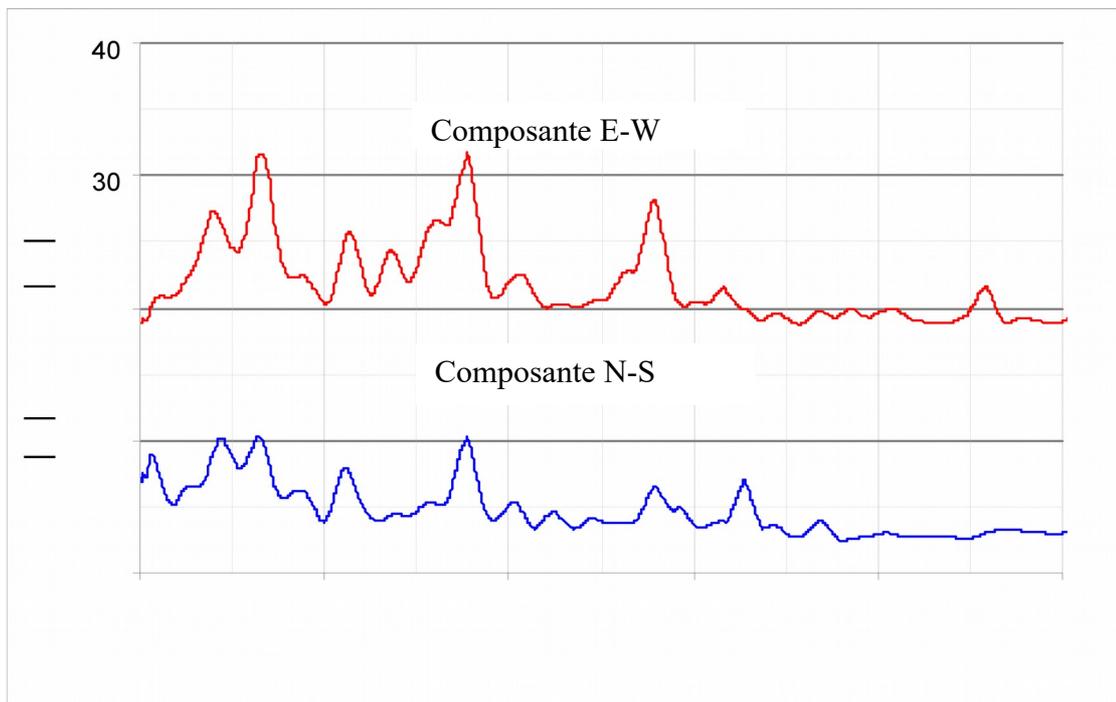


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.18 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de EL Afroun .

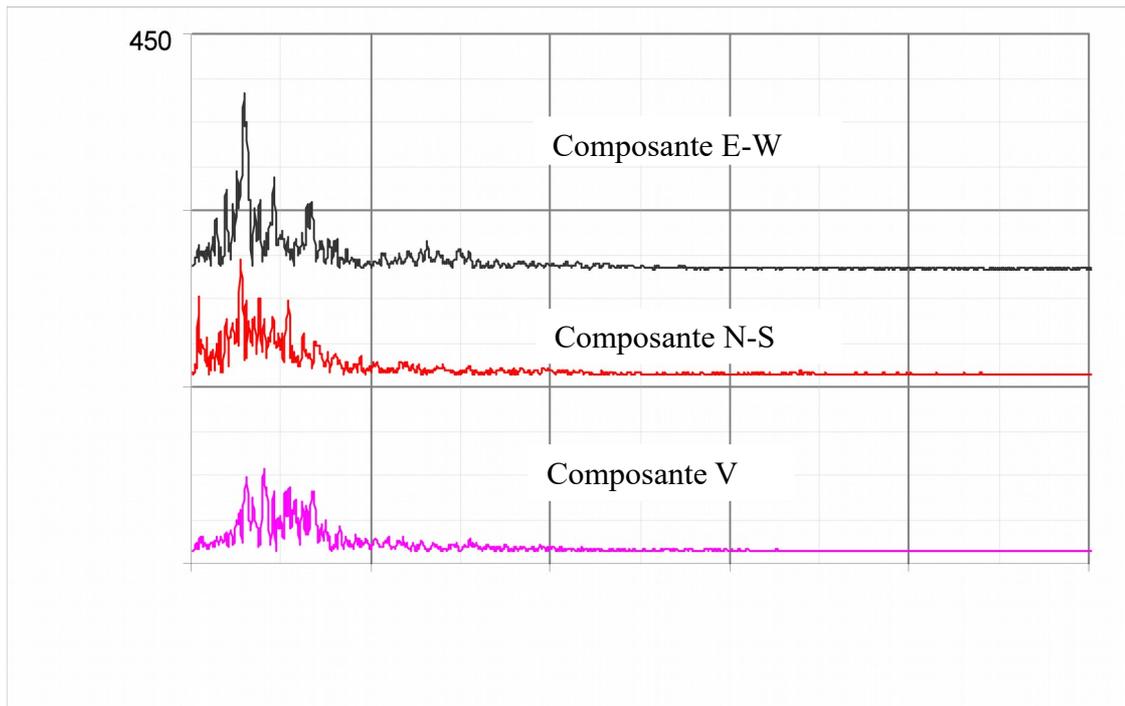


(a)- HVSR non lissée.

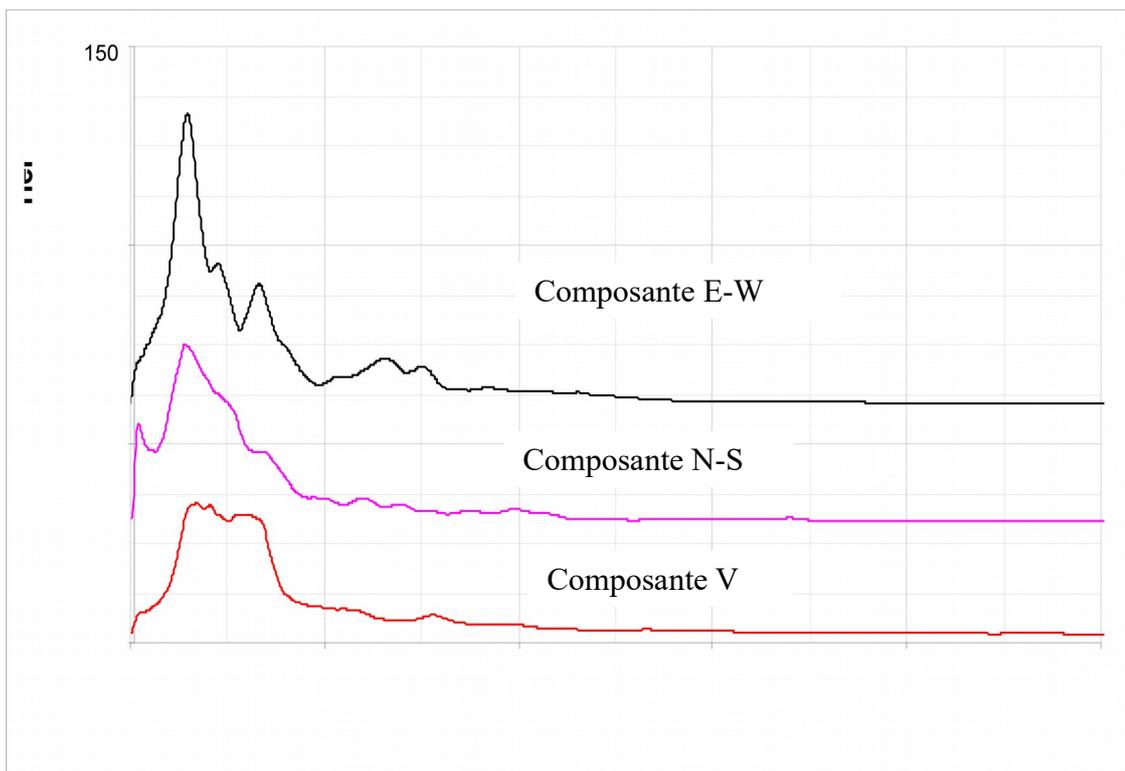


(b)- HVSR lissée.

Fig. 3.19 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de EL Afroun.

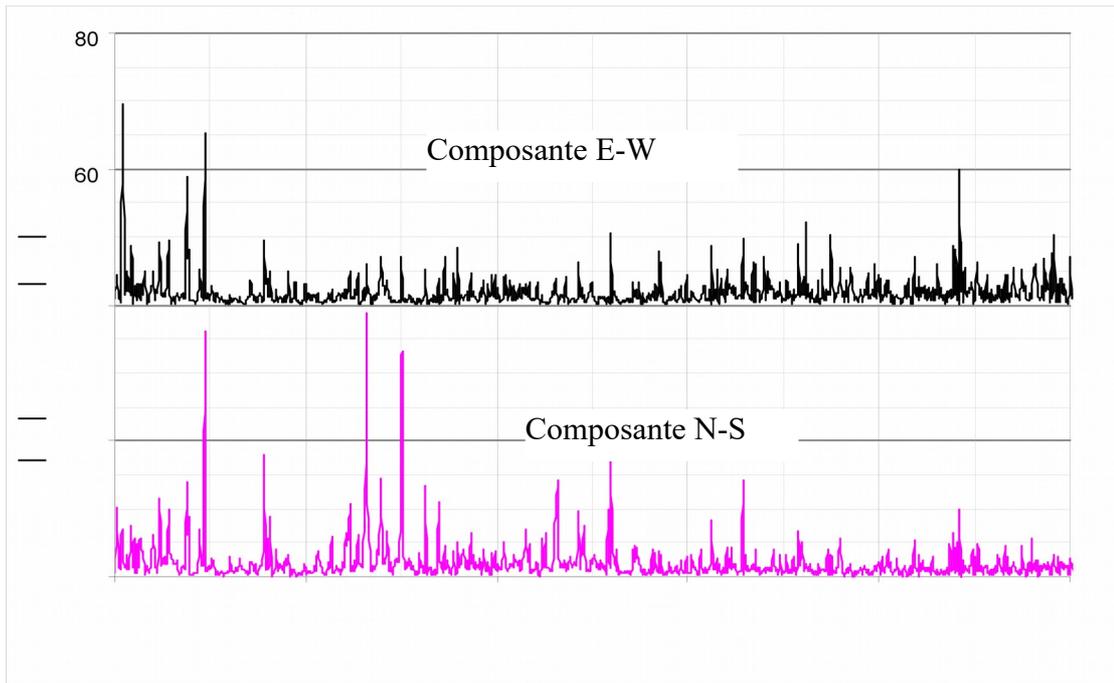


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

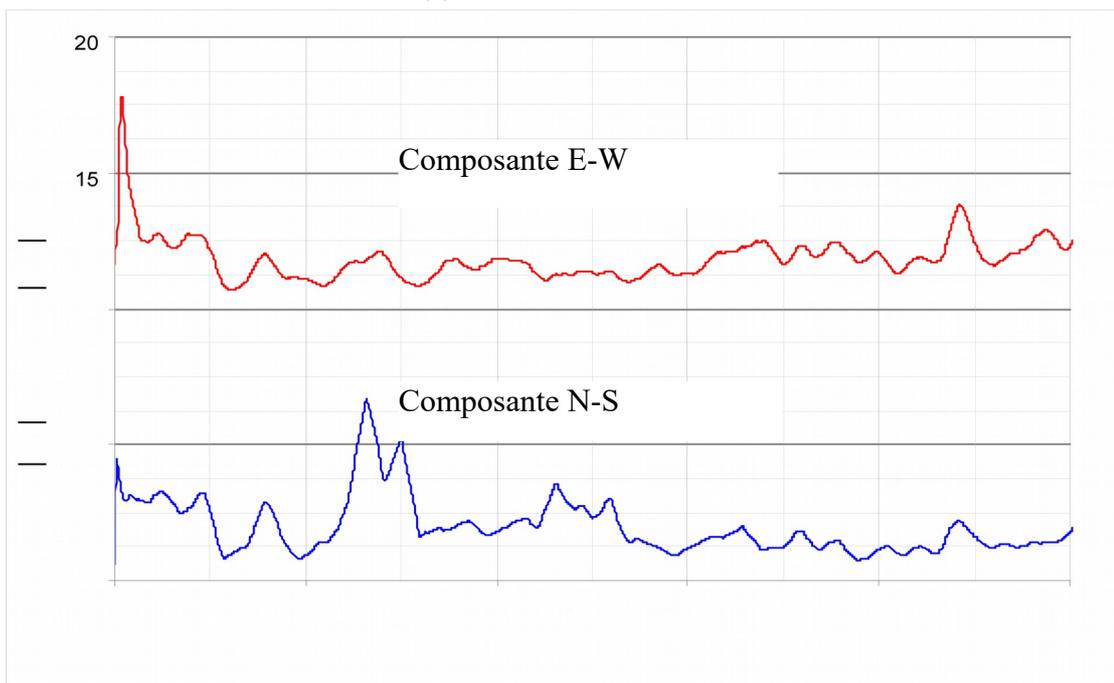


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.20 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissés (a) et lissés (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Hammam.

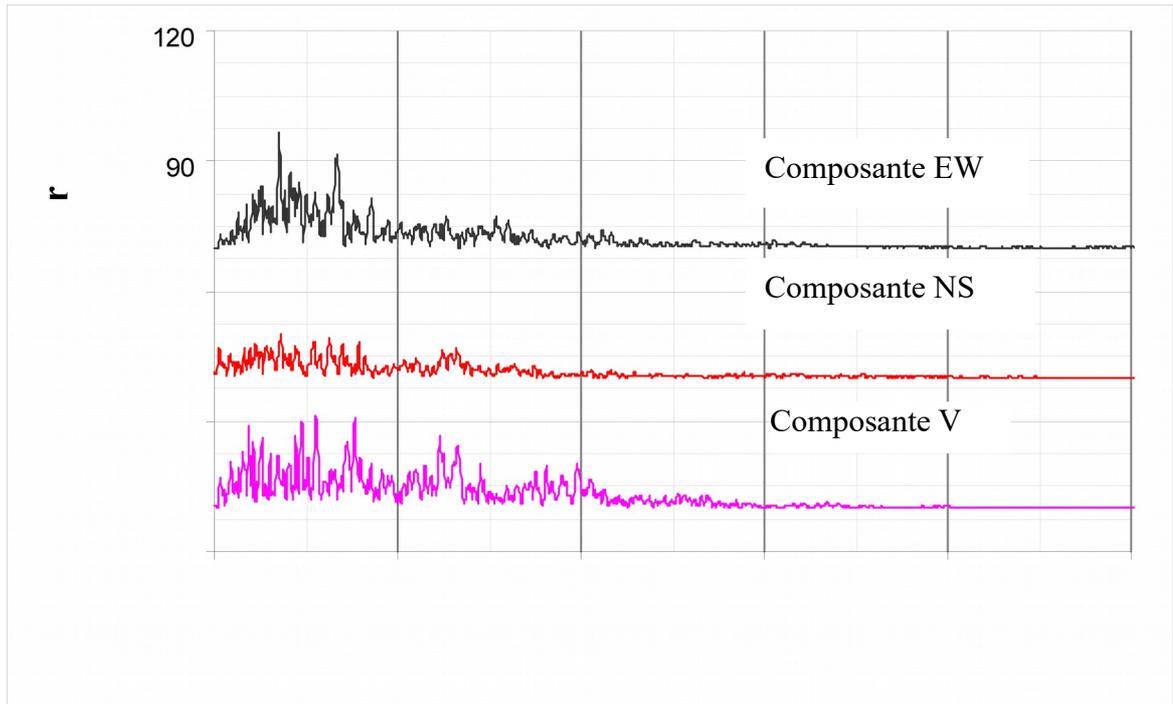


(a)- HVSR non lissée.

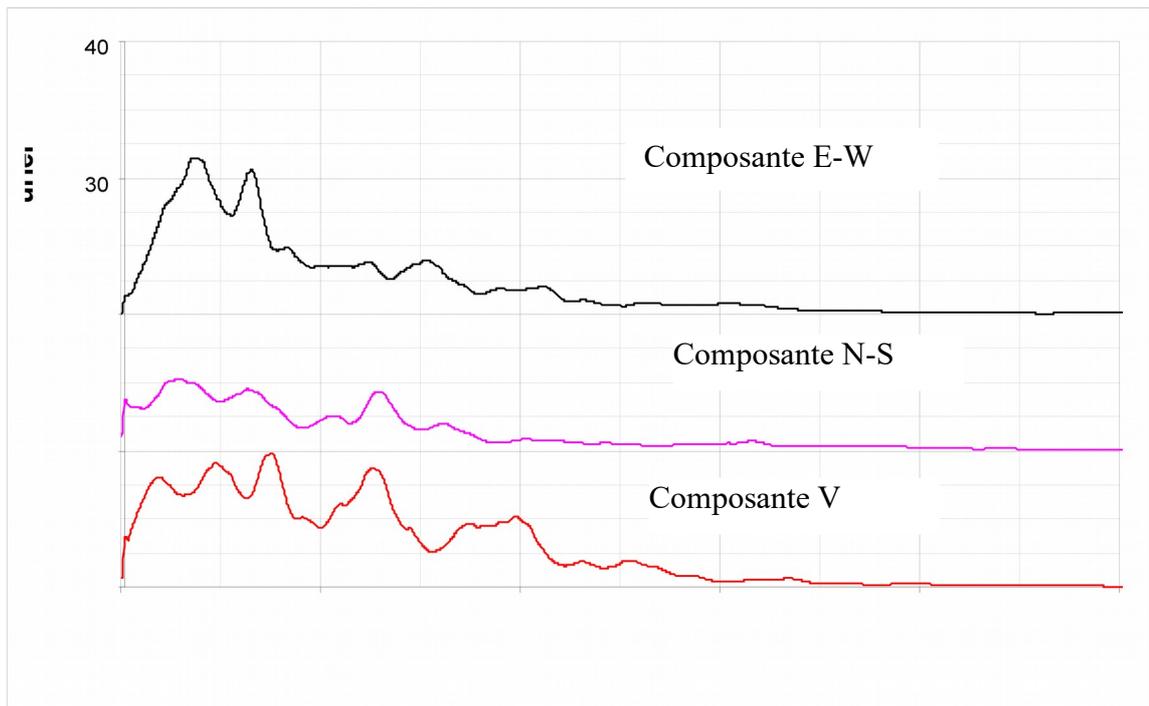


(b)- HVSR lissée.

Fig. 3.21 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Hammam Righa.

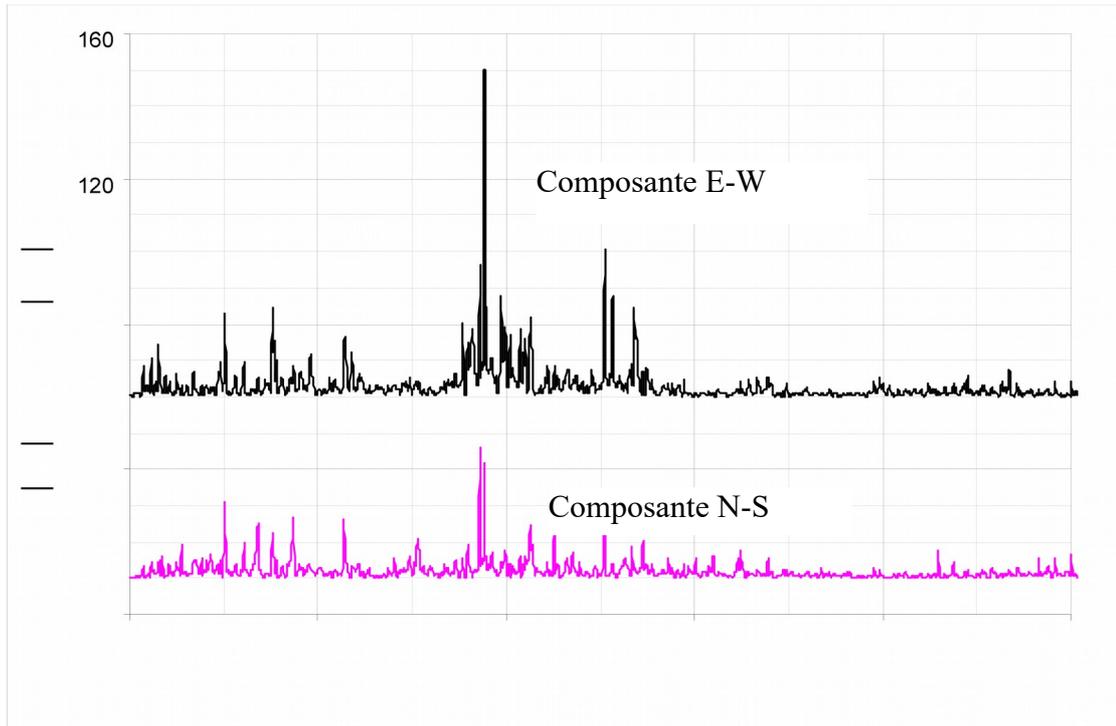


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

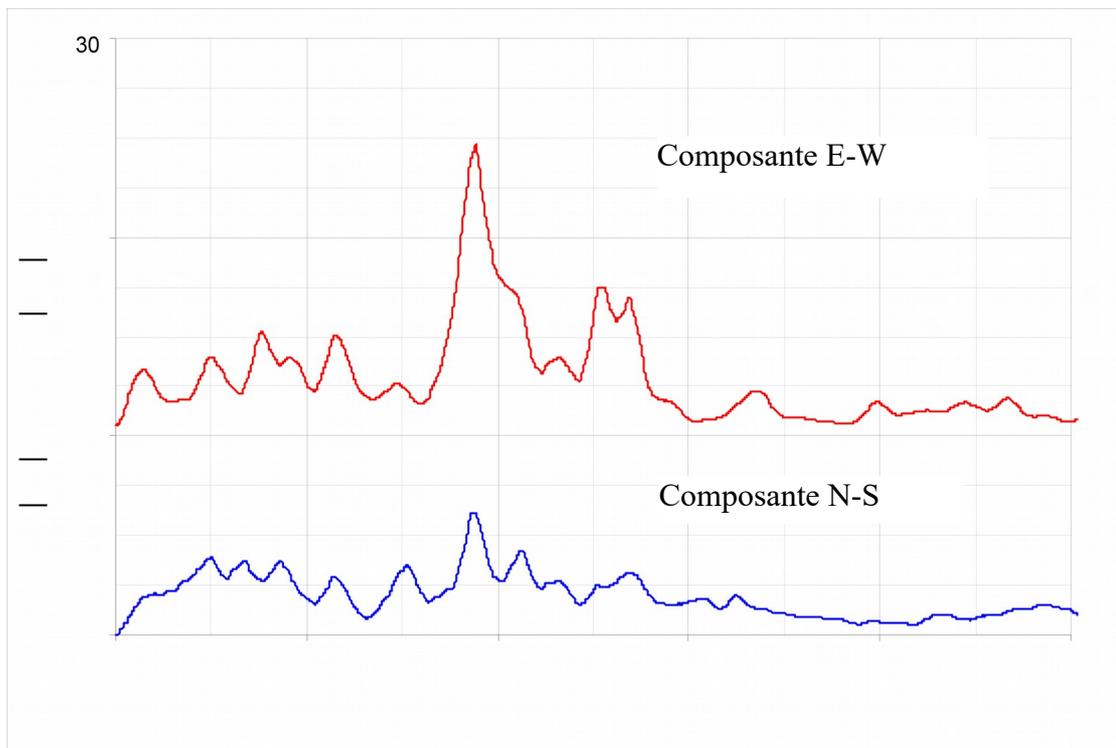


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.22 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissés (a) et lissés (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Bouterdes 2003 au niveau du site de Meliana .

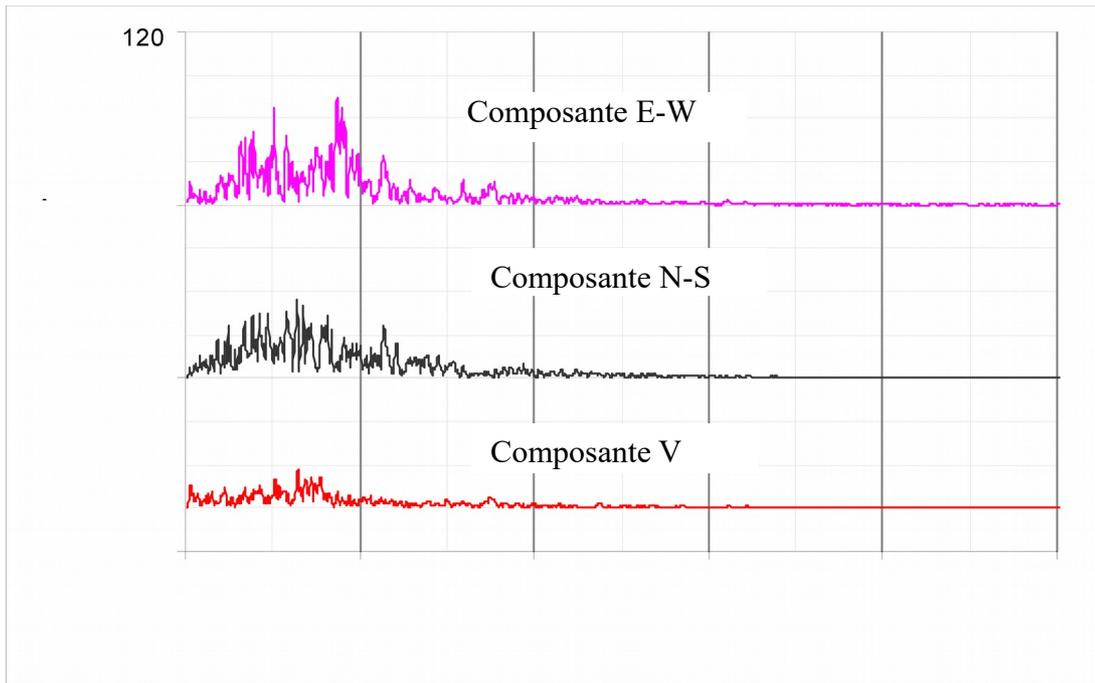


(a)- HVSr non lissée.

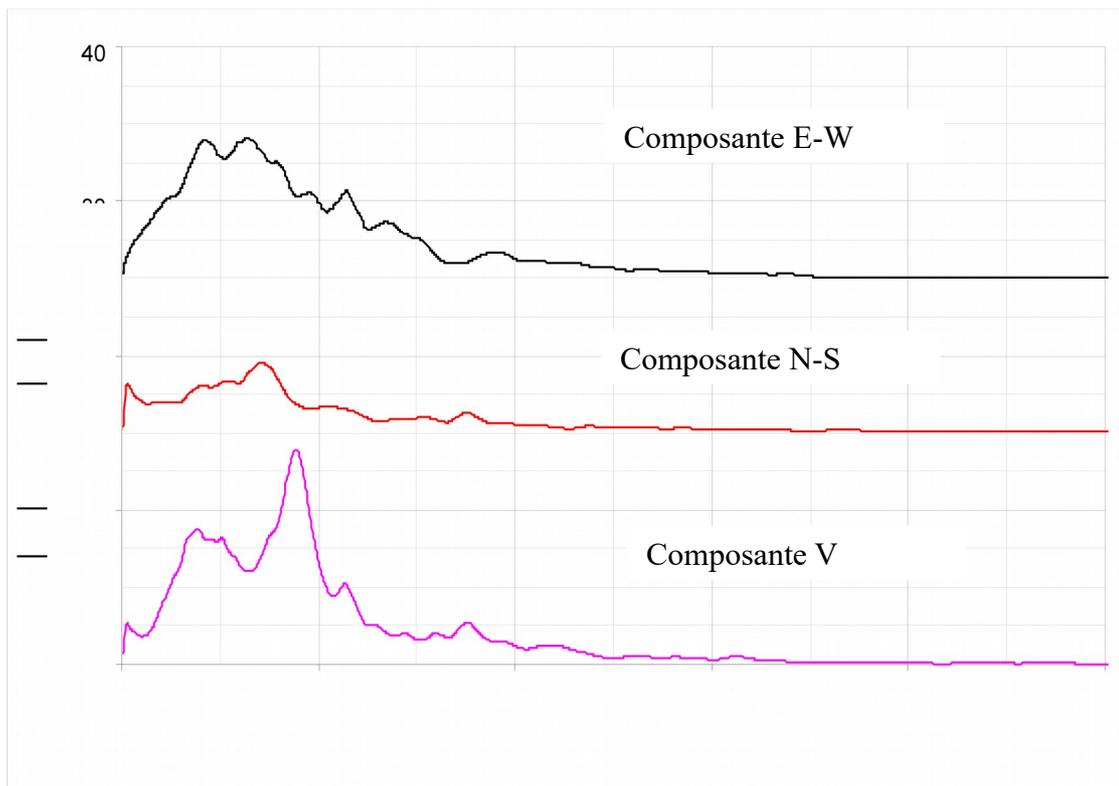


(b)- HVSr lissée.

Fig. 3.23 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSr) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Bouterdes 2003 au niveau du site de Meliana .

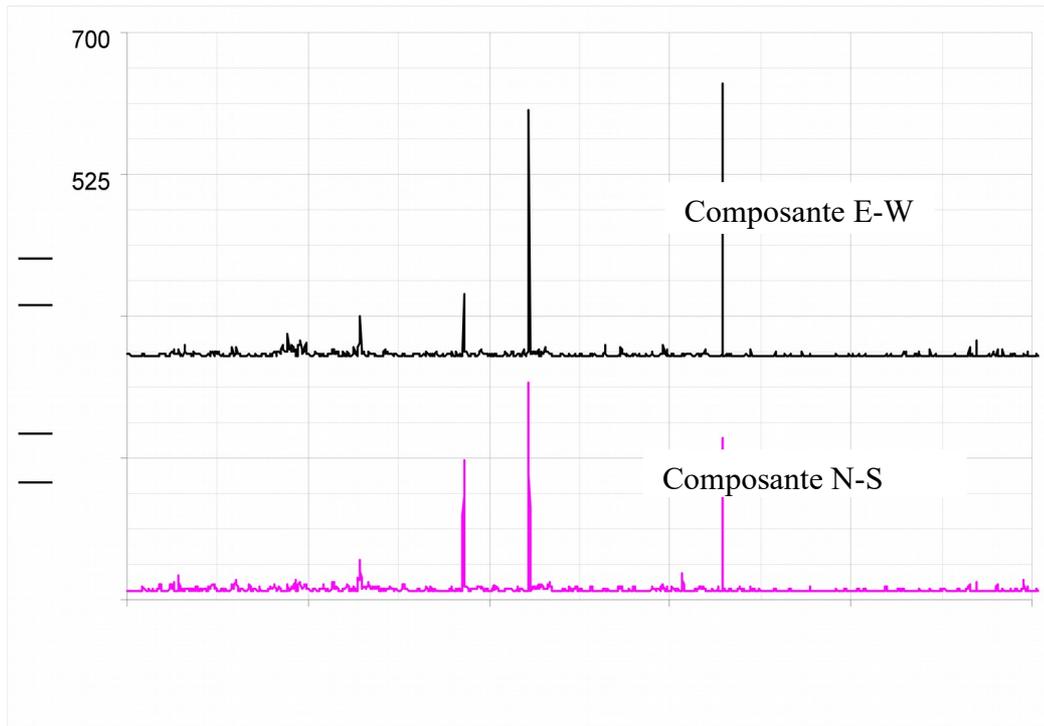


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

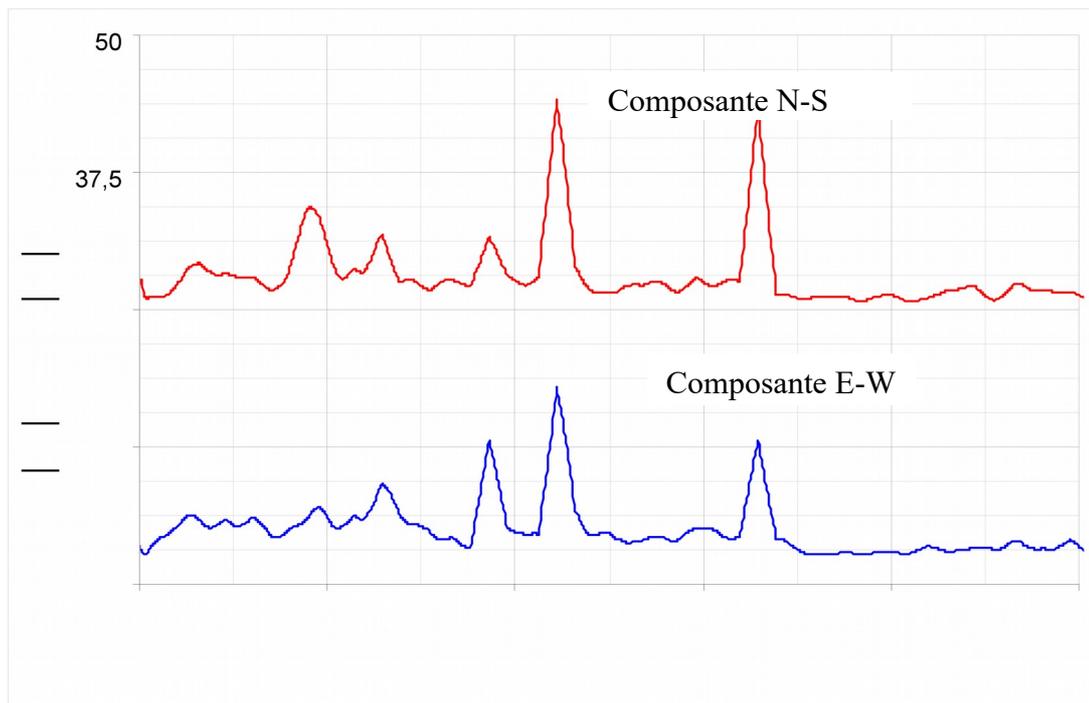


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.24 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Ain Defla .

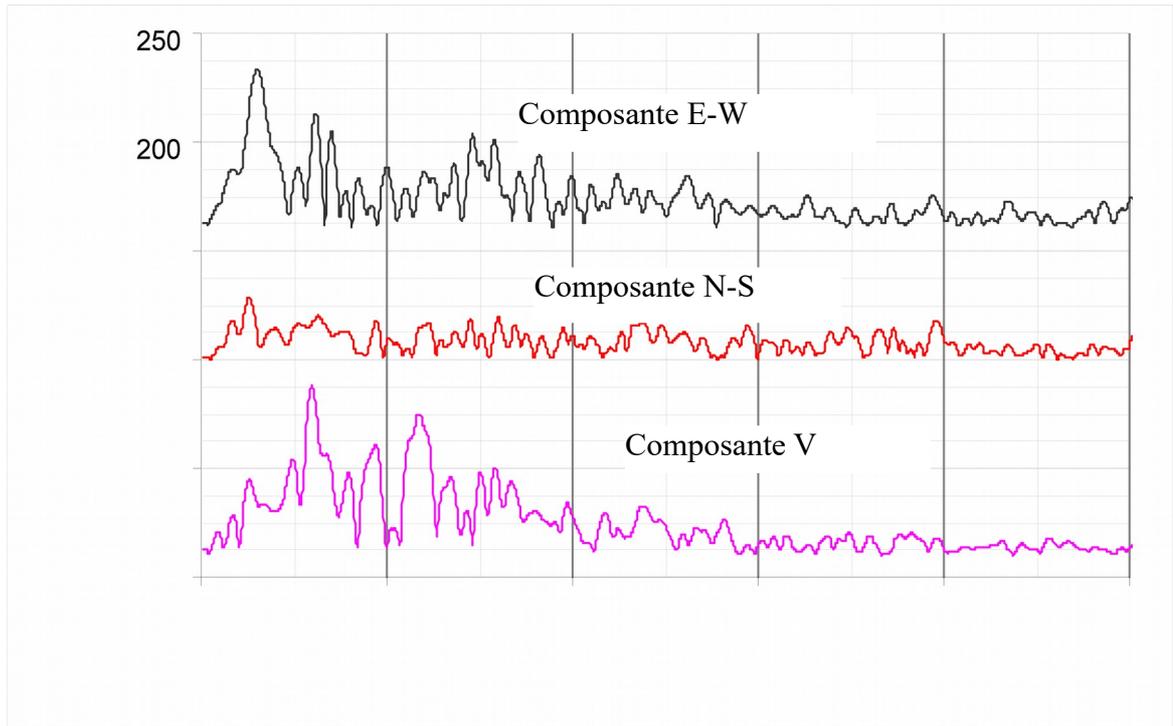


(a)- HVSR non lissée.

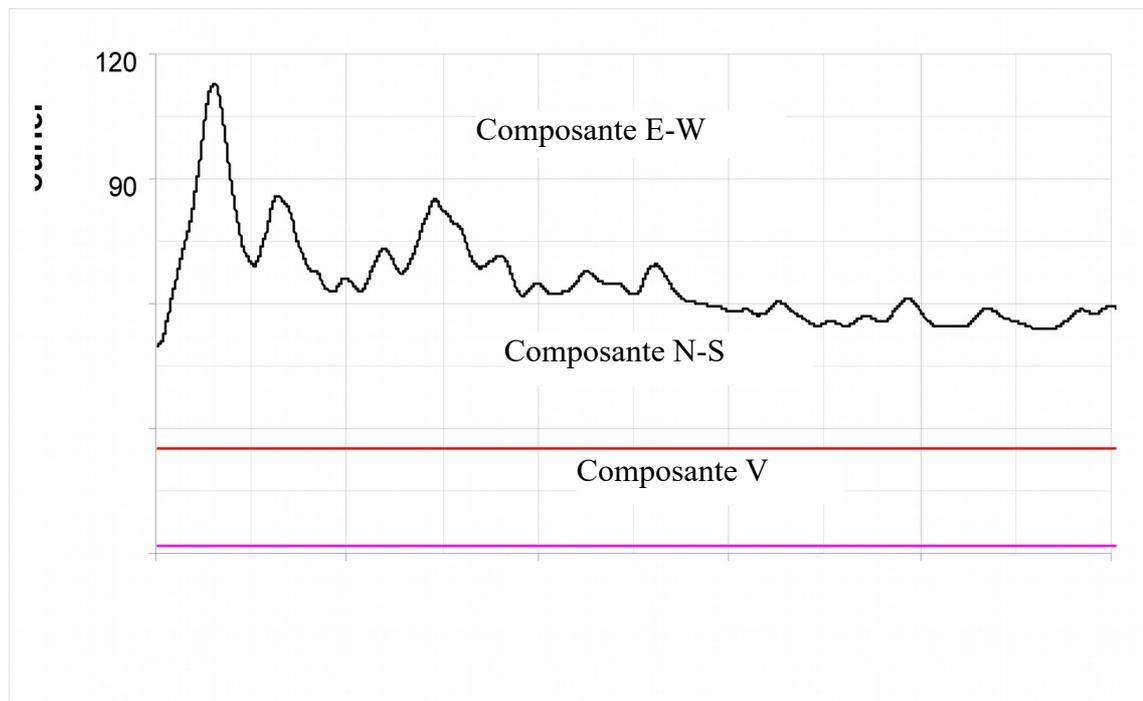


(b)- HVSR lissée.

Fig. 3.25 - Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Ain Defla .

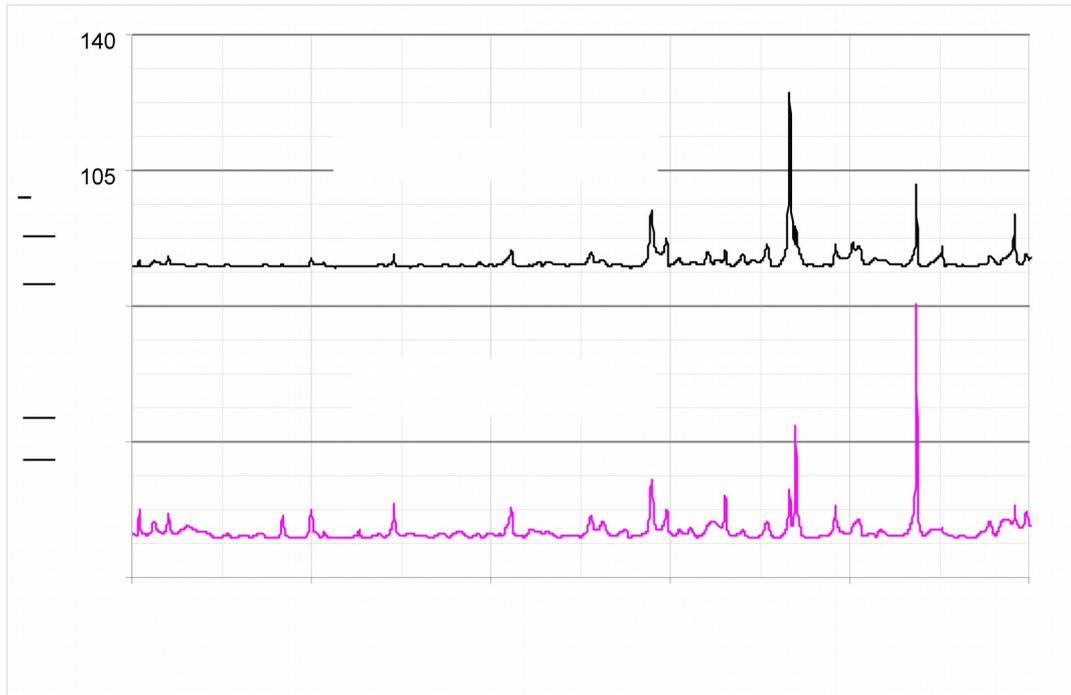


(a)- Spectre de Fourier non lissée.

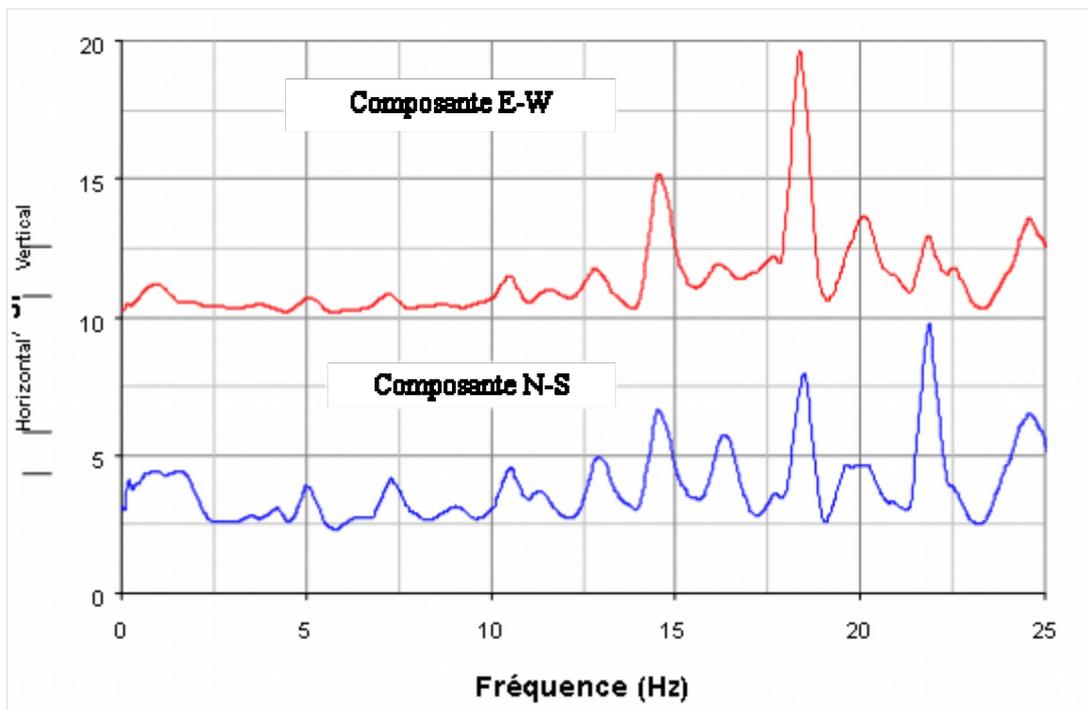


(b)- Spectre de Fourier lissée.

Fig. 3.26 - Tracés des Amplitudes des Spectres de Fourier non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W, N-S et V) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau de la réplique de Boumerdes site .

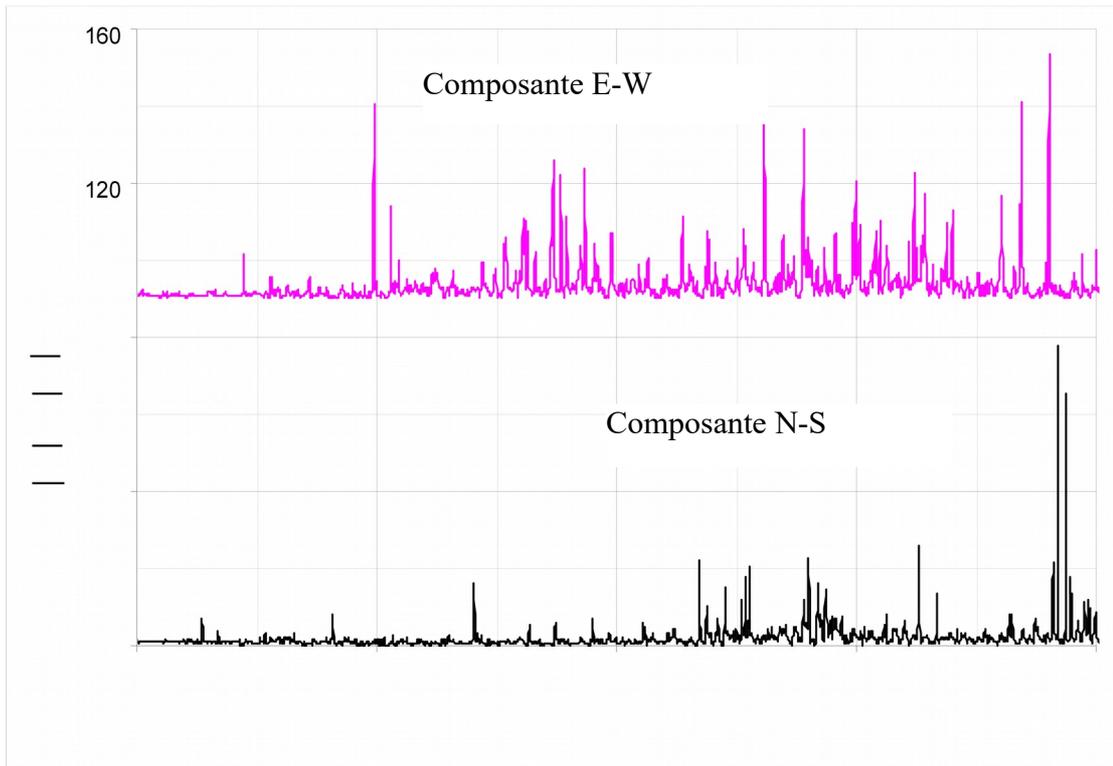


(a)- HVSR non lissée.

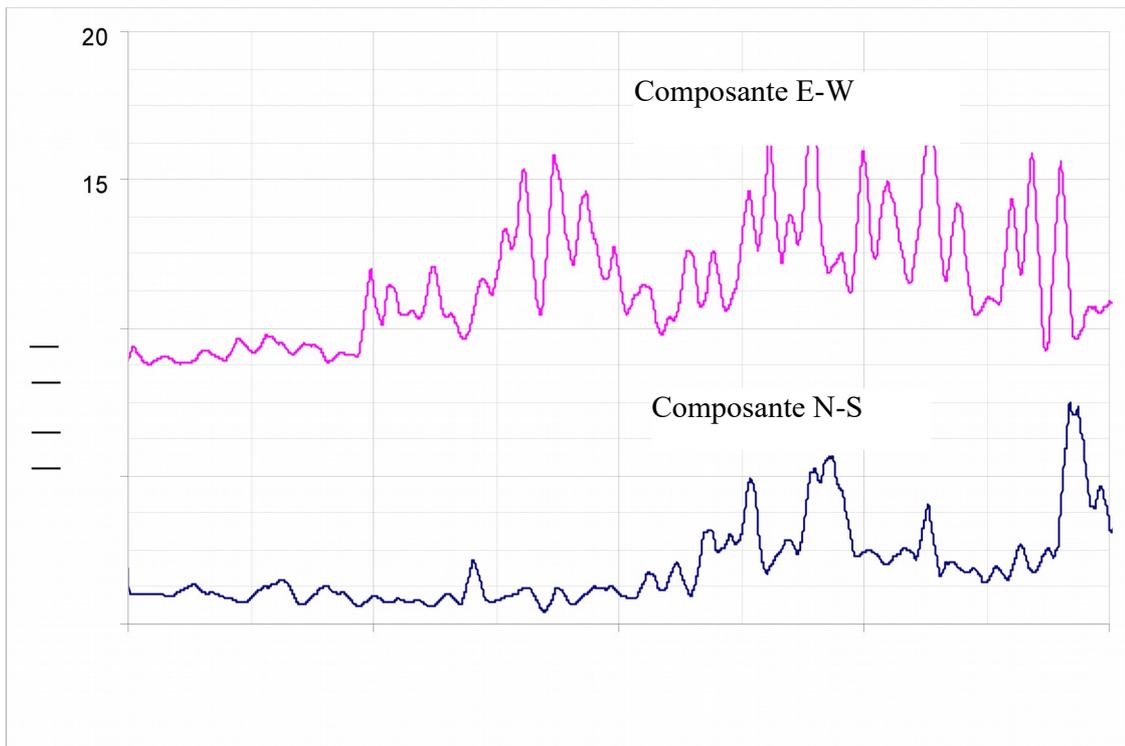


(b)- HVSR lissée.

Fig. 3.27- Tracés des fonctions d'amplifications (HVSR) non lissées (a) et lissées (b) des composantes (E-W et N-S) des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau de la réplique de Boumerdes .



(a) SSR non lissé



(b) SSR lissé

Fig. 3.28- Rapport Spectral Standard (SSR) entre les composantes E-W et N-S des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau de la station de Keddara1 et celles de la station Keddara2.

3.6. Conclusion

Nous avons appliqué les différentes méthodes empiriques utilisées universellement dans l'estimation de l'effet de site. Nous avons pu mettre en évidence un effet de site très prononcé au niveau du site de Keddara1, au niveau de la crête du barrage de Keddara, à travers les valeurs élevées du facteur d'amplification spectral (SSR).

L'analyse des contenus fréquentiels des signaux enregistrés en champ proche (Keddara) fait ressortir un contenu fréquentiel riche en haute fréquence avec une fréquence centrale autour de 4 Hz pour la station de Keddara1. L'application de la méthode HVSR fait ressortir un type de sol rocheux. Pour la station de Keddara1, des investigations géophysiques permettront de confirmer la présence d'effets de site qui expliqueraient la valeur élevée de l'accélération enregistrée.

Pour ce qui est de la station de Boumerdes, la fréquence centrale est entre 1 et 2 Hz. Cependant l'analyse par la méthode HVSR fait ressortir une fréquence fondamentale autour de 0.7 Hz, ce qui dénote l'existence probable d'une couche alluvionnaire. En effet, la fréquence de résonance varie entre 0.2 (pour les dépôts épais ou pour des matériaux extrêmement mous) et 10Hz ou plus (pour des couches très fines de dépôt de sol) selon Pitilakis [19].

Une conclusion préliminaire, à partir du contenu fréquentiel du mouvement sismique au rocher (Keddara 1) et celui à Boumerdes montre l'absence du phénomène de résonance au niveau de la fréquence fondamentale, ce qui est plutôt favorable.

4.1. Introduction

La connaissance de la réponse sismique d'un profil de sol à une sollicitation sismique constitue l'un des problèmes fondamentaux du génie parasismique. Cette dernière est impérative dans la mesure où les couches constituant ce même profil doivent servir d'assise à d'éventuels ouvrages, qui doivent résister à des événements sismiques. Cette réponse se caractérise par la connaissance de la fréquence fondamentale de vibration de la couche en surface pour la comparer à celle de l'ouvrage afin d'atténuer le phénomène de résonance.

Si l'accélération au niveau du substratum rocheux est connue, quelle est donc la valeur de l'accélération sismique en terme d'accélération ou spectre de réponse à prendre en compte dans le calcul sismique.

Dans le présent chapitre nous allons étudier l'amplification par effet de site, de façon analytique. Pour cela, nous choisirons des sites dont les propriétés de leurs profils de sol sont connues. Puis nous procédons à l'évaluation de leurs réponses en surface libre, en termes d'accélération de sol et de spectres de réponse, suite à une excitation sismique générée à leurs bases (mouvement de référence).

4.2. Méthodes d'analyse des effets de site

Le profil de sol local en un site donné peut avoir un effet important sur les mouvements sismiques du sol. Les conditions locales du sol peuvent affecter l'intensité, le contenu fréquentiel et la nature de l'excitation sismique. Les analyses de la réponse sismique de site sont généralement basées sur l'hypothèse de la propagation verticale de l'onde de cisaillement à travers des couches de sol horizontales uniformes d'étendue latérale infinie.

L'influence des mouvements verticaux des ondes de compression, des conditions de sol latérales non uniformes, la variation incohérente et spatiale des mouvements de sol sont typiquement non intégrées dans les analyses conventionnelles de la réponse sismique de site. L'évaluation uniquement de l'impact de la propagation verticale des ondes de cisaillement dans une analyse de réponse de site est conséquente avec les exigences des règlements et codes [20].

Les techniques d'analyse de la réponse de sol sont nombreuses. Elles diffèrent dans les hypothèses simplificatrices sur lesquelles se reposent, dans la représentation des relations contrainte-déformation du sol et dans les méthodes d'intégration de l'équation de mouvement.

Le développement des méthodes existantes d'analyses de la réponse dynamique a en un processus évolutif progressif stimulé par les besoins en pratique et le développement dans la connaissance du comportement fondamental des sols sous sollicitations cycliques dérivé des observations en champ et d'essais au laboratoire. Ces méthodes peuvent être classées, de façon générale, en trois catégories : (1) Analyse linéaire, (2) Analyse linéaire équivalente et (3) Analyse non linéaire [5].

4.2.1. Analyse linéaire de la réponse sismique de site

L'analyse linéaire, grâce à sa simplicité, a été extensivement utilisée pour étudier analytiquement la réponse dynamique de dépôts de sol. Conforme aux solutions analytiques, l'analyse linéaire est dérivée pour des géométries et propriétés de sol idéalisées, c-à-d en supposant que le dépôt de sol est constitué d'une couche uniforme de rigidité soit constante ou variable avec la profondeur de sorte qu'elle peut être exprimée par des fonctions mathématiques. Cependant, en général, le sol ne se comporte pas élastiquement et ses propriétés peuvent changer dans l'espace. Dans de telles situations, les solutions analytiques ne sont plus possibles et des techniques numériques telles que la méthode des éléments finis ou celle des différences finies sont utilisées.

4.2.2. Analyse linéaire équivalente de la réponse sismique de site

La méthode dite (linéaire équivalente) développée par Seed et Idriss vers la fin des années 60 et le début des années 70 et implantée depuis dans des codes de calcul (*SHAKE* [4], *FLUSH* [21],...), est l'une des plus utilisées actuellement dans l'analyse des profils de sol sous sollicitations dynamiques. Elle est adaptée dans l'évaluation de la réponse de profils de sol soumis à un mouvement du à la propagation verticale d'ondes de cisaillement de type SH.

La simplicité du modèle linéaire équivalent unidimensionnel, la qualité des résultats fournis et la rapidité des calculs liés à la possibilité de résolution dans le domaine

fréquentiel ont eu fait on outil de calcul apprécié des ingénieurs et dont l'utilisation est devenue aujourd'hui quasi universelle dans les bureaux d'études [5].

Cette méthode a été formulée sur le modèle *masse-ressort* de dépôts de sables reposant sur une base rigide au niveau de laquelle les mouvements sismiques sont appliqués. Cette méthode a été généralisée au modèle de propagation avec frontières absorbantes (ou de transmission) d'énergie. Dans le nouveau modèle l'excitation sismique peut être générée en tout point du modèle.

Les données de base (input) de *SHAK91* concernent le profil de sol, les paramètres de sol et le mouvement imposé sous forme d'accélérogramme. Les paramètres de sol utilisés dans *SHAK91* incluent la vitesse de l'onde de cisaillement ou le module de cisaillement initial et la masse volumique de chaque couche de sol. Des courbes, reliant la réduction du module de cisaillement et le coefficient d'amortissement visqueux équivalent à la déformation de cisaillement pour chaque type de sol, sont également utilisées.

4.2.3. Analyse non linéaire de la réponse sismique de site

Une analyse non linéaire est généralement performée en utilisant un modèle discret comme les modèles en *éléments finis* ou *masse-ressort*, et en menant une intégration pas à pas dans le domaine temps de l'équation de mouvement.

Une analyse non linéaire ou avancée de la réponse sismique de site est nécessaire si une ou plus des conditions suivantes s'imposent : (1) le projet considéré est d'une importance cruciale ; (2) des conditions de frontières irrégulières sont à modéliser ; (3) le projet inclut un talus fondé sur un site de sol nécessitant des études spéciales ; et (4) une analyse plus exacte qu'une analyse linéaire – équivalente unidimensionnelle de réponse sismique de site est désirée [5].

La première différence entre les analyses non linéaires et linéaire - équivalentes de la réponse de site est que les analyses non linéaires utilisent un modèle plus réaliste pour représenter le comportement du sol sous sollicitations cycliques.

4.3. Détermination de la réponse d'un profil de sol d'un site

L'objectif de cette étude est d'estimer la variabilité de l'amplification du signal sismique due aux effets de site. Dans ce but, nous proposons une simulation numérique 1D pour modéliser la réponse du sol. La variabilité de l'amplification pourrait être évaluée en effectuant des simulations numériques pour différentes combinaisons des paramètres de la colonne de sol et une sélection d'accélérogramme échelonnés à différents a_{\max} (accélération maximale ou pic).

Dans cette partie, le mouvement de référence (sur rocher) transféré de la station d'enregistrements vers le site étudié, est appliqué à la base du profil de sol de ce dernier. La réponse du profil de sol du site étudié en termes d'accélération et spectres de réponse peut être obtenue en utilisant la théorie de la propagation des ondes dans les milieux stratifiés. L'hypothèse couramment admise en génie parasismique est que le mouvement imposé à la base d'une structure dans le calcul dynamique de celle-ci est dû à la propagation verticale ascendante d'une onde de cisaillement de type SH (Figure 3.1 avec $\alpha_{N+1} = 0$) dans le profil de sol sur lequel se pose la structure. Cette théorie de propagation d'onde a été traduite numériquement par plusieurs programmes, entre autres, le programme *SHAKE91* [4], *COMSISOL* et *COMSIS98* [20].

4.4. Effets des conditions locales de sol sur les fonctions d'amplification

L'influence des conditions de sol et la géologie locale des sites sur l'intensité des mouvements sismiques est menées depuis plusieurs années. Les constructions situées sur des sols rocheux ne sont pas affectées.

Les conditions locales des sites peuvent profondément influencer toutes les caractéristiques importantes (amplitude, contenu fréquentiel et la durée de la forte vibration). Ces influences dépendent des propriétés géométriques et matérielles de la surface, la topographie du site et les caractéristiques de l'excitation introduite.

La nature des effets de site locaux peut être illustrée selon plusieurs cas ; l'analyse analytique de la réponse de sol, ou par la mesure des mouvements de sol en surface de sites avec différentes conditions de sol.

Les paramètres de sol qui peuvent influencer les mouvements sismiques sont, la densité (ρ) et la vitesse des ondes de cisaillement (v_s) des matériaux proches de la surface ; faibles par rapport à ceux en profondeur. La conservation de l'énergie élastique des ondes nécessite que le flu de l'énergie ($\rho \cdot v_s \cdot u'^2$) à partir de la surface de sol soit constant [22]. Autrement, si ρ et v_s diminuent lorsque les ondes s'approchent de la surface, l'accélération doit augmenter.

On considère, par exemple, deux dépôts de sol montrés sur la figure 4.1. Leur géométrie est identique, mais les vitesses de propagation des ondes de cisaillement sont différentes.

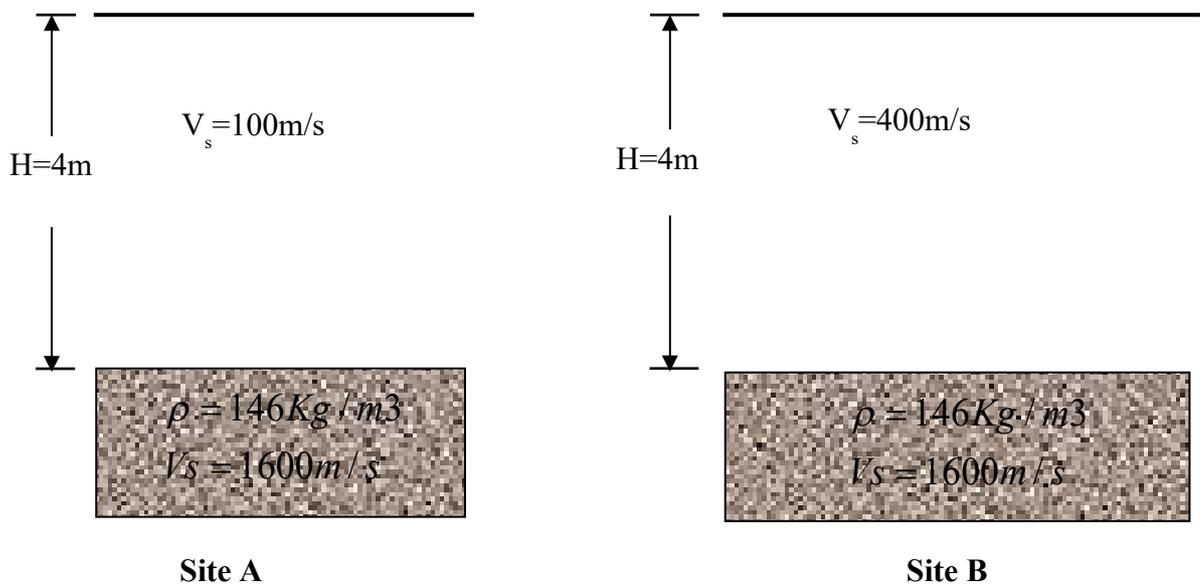


Fig. 4.1 – Deux dépôts de sol identiques sur montants un semi espace rigide (rocheux) avec des vitesses d'onde de cisaillement différentes.

Si chaque site est assumé pour être linéairement élastique, l'amplification de chaque site est illustrée sur la figure 4.2. Cette fonction d'amplification est évaluée en utilisant le programme SHAKE91. Clairement, le dépôt de sol le plus meuble (Site A) présente une amplification à une fréquence basse par rapport au site ferme (Site B).

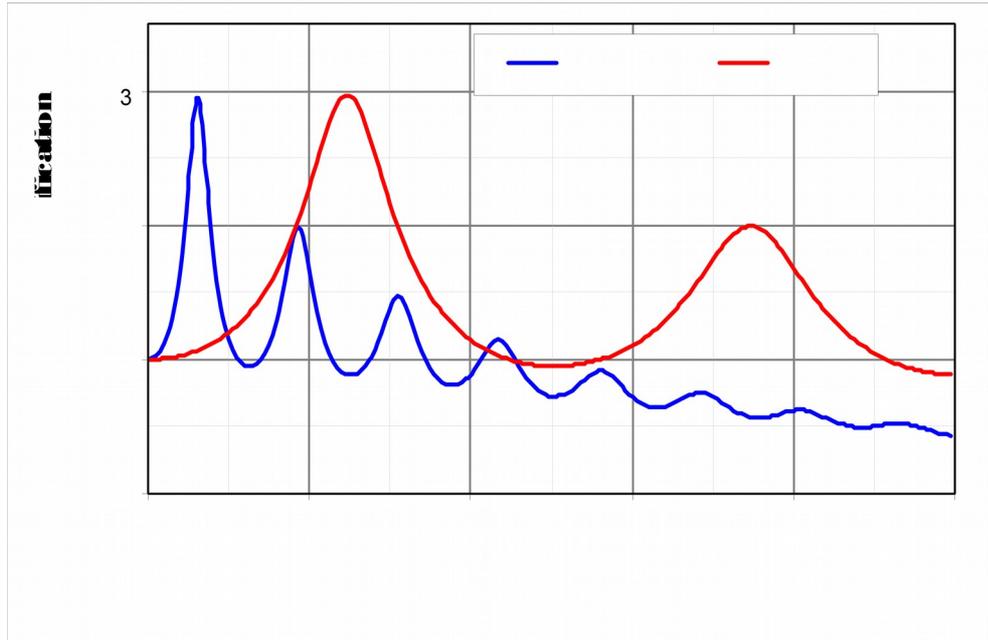


Fig. 4.2 –Effet des conditions locales sur les fonctions d’amplification.

En effet, la fréquence fondamentale a l’expression [5] :

$$f_0 = \frac{V_s}{4H}$$

(4.1)

où H est l’épaisseur de la couche.

4.5. Contraste d’impédance

L’impédance est définie par l’expression ci-dessous

$$I = \rho.V_s.\cos\theta$$

(4.2)

Où ρ est la densité (kg / m^3), V_s la vitesse de l’onde de cisaillement (m/s) et θ l’angle d’incidence de l’onde sismique [19]. Près de la surface ($\theta = 0$), on a :

$$I = \rho.V_s$$

(4.3)

Les différences dans l'impédance sont importantes. Si l'impédance devient plus petite, la résistance au mouvement diminue et son amplitude augmente (loi de la conservation de l'énergie). Cependant, une grande partie de l'énergie augmentée est absorbée en raison de l'amortissement du sol meuble.

Dans la terre, les changements de l'impédance se produisent principalement dans la direction verticale. Ils augmentent la pression et la température avec la profondeur à partir de la surface du sol.

Le contraste d'impédance est défini comme [19]:

$$C = \frac{\rho_2 \cdot Vs_2}{\rho_1 \cdot Vs_1} \quad (4.4)$$

ou ρ_1 et Vs_1 sont la densité et la vitesse de l'onde de cisaillement dans une couche sédimentaire et ρ_2 et Vs_2 sont la densité et la vitesse dans le rocher adjacent.

Un grand contraste d'impédance entre des sols meubles recouvrant le substratum rocheux provoque de fortes réflexions. Les ondes sismiques se réfléchissent et se réfractent dans les différentes couches de sol recouvrant le rocher. Ces ondes s'interfèrent entre elles, ce qui peut résulter en une résonance (fréquence propre ou fondamentale du sol).

L'amplitude des picks de la résonance est principalement reliée au contraste d'impédance entre les couches en surface et le rocher sous-jacent, à l'amortissement matériel des sédiments et les caractéristiques du train d'onde (type d'onde, angle d'incidence, champ proche ou loin,...)[19].

Pour les cas traités ci-dessus (Fig. 4.1) l'amplification à la fréquence de résonance (fréquence fondamentale) est donnée par l'expression :

$$A_0 = \frac{2}{\frac{1}{C} + 0,5\pi\xi_i} \quad (4.5)$$

où C est le contraste d'impédance et ξ_i est l'amortissement matériel des sédiments. Pour des cas de faibles amortissements ($\xi = 0$), l'amplification maximale est le double du contraste d'impédance.

Une autre observation intéressante est lorsque la longueur d'onde λ , donnée par [19] :

$$\lambda = V_{s1} \cdot T \quad (4.6)$$

est beaucoup plus longue que l'épaisseur de la couche (signifiant que $\frac{\omega H}{V_{s1}} \cong 0$), l'amplitude des déplacements en surface est doublée. Ceci est connu en terme de "l'effet de surface libre" et causé par la réflexion des ondes sismiques en arrivant à la surface de la terre [19].

4.6. Evaluation de la réponse d'un site

L'amplification par des conditions de sol local peut être obtenue en comparant les mouvements sismiques sur différents sites. Les enregistrements des mouvements sismiques lors du séisme de Boumerdes du 21 mai 2003 de magnitude 6.8 peuvent être utilisés. Les variations des mouvements de sol sont définies en termes de l'accélération horizontale maximale et la réponse spectrale.

La marge Algérienne (Fig. 4.3) est une région sismique active, où pendant le dernier siècle, plusieurs tremblements de terre de forte magnitude ont eu lieu [17]. Parmi ces séismes le séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 en est le plus catastrophiques, réçemmet. A cet effet, nous allons évaluer la réponse de deux sites avec des données géotechniques et géométriques connues et différentes. Un site situé à Bab-Ezzouar à 20 km de la capitale Alger et le site de Maradja situé à 20 km de l'épicentre du séisme de Boumerdes 2003.

4.6.1. Données géotechnique du site de Bab-Ezzouar

Dans le cadre d'un programme complet d'enquête géotechnique du site de Bab-Ezzouar entre Novembre 2005 et Janvier 2006 [23], des sondages et des échantillonnages ont été réalisées. La synthèse des résultats des sondages carottés ont permis de révéler que sous une couche de remblai d'épaisseur variable de 1,0 à 6,0 m, le site destiné à recevoir le siège de CMA-CGM est constitué d'une formation d'alluvions représentée par des argiles brunâtres à beiges, graveleuses, limoneuses, marneuses en profondeur surmontant un horizon de grès et sables fins consolidés et parfois grésifiés. La formation argileuse est compacte, de consistance raide en générale.

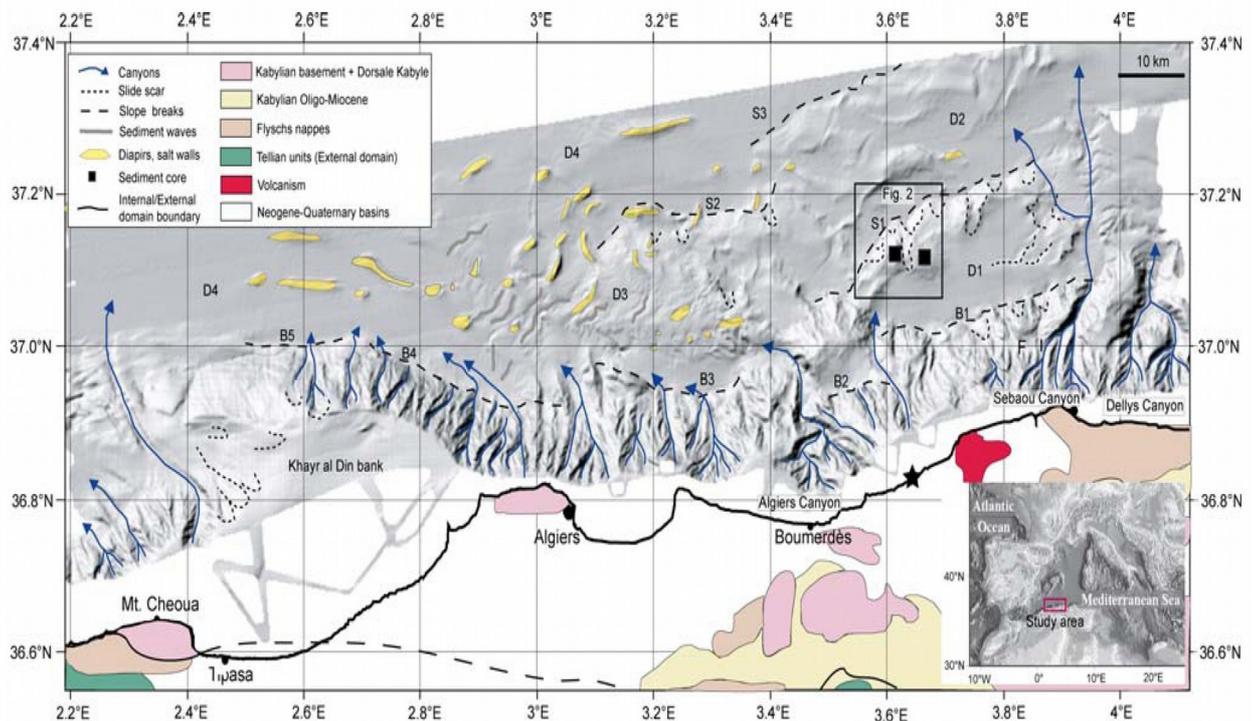


Fig. 4.3-Carte montrant les caractéristiques principales de la marge d'Alger. La géologie illustre les unités principales de la chaîne Maghrebien. D1 et D4 représentent les bassins sédimentaires, et l'étoile noire représente l'épicentre du tremblement de terre de Boumerdes 2003 [24].

L'essai Down Hole a été réalisé en décembre 2005, selon la norme ASTM D4428/D4428M. Cet essai permet la détermination des vitesses des ondes de cisaillement pour une tranche de terrain localisée au voisinage d'un sondage et pour une direction verticale de propagation des ondes, par la méthode Down-Hole.

La méthode down-hole consiste à mesurer les vitesses des ondes de compression (V_p) et des ondes de cisaillement (V_s) d'une entité géologique entre la surface du sol et la position du capteur dans le sondage. Cette technique permet aussi la détermination des caractéristiques géodynamiques du terrain lesquelles sont destinées le plus souvent à l'analyse dynamique des sols et par la suite, à la modélisation du comportement d'une structure et de son terrain par rapport aux vibrations (d'origine sismique ou autres...).

La distribution des vitesses des ondes de cisaillement, en fonction de la profondeur à partir de la surface du sol est la suivante :

- 300 m/s entre 00,0 à 04,0 m
- 540 m/s entre 05,0 à 13,0 m
- 1450 m/s entre 14,0 à 46,0 m

Ces valeurs des vitesses sont tracées en fonction de la profondeur H sous la surface du sol dans la figure 4.4. La lithologie du sondage dans lequel l'essai Down-hole est réalisé et présenté dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1- Lithologie du sondage dans le quel l'essai Down-hole est réalisé au niveau du site de Bab-Ezzouar.

N° Couch e	Profonde ur H (m)	Epaisseur de la couche (m)	Désignation de la couche	Poids volumiqu e (kg/m ³)	Vitesse des ondes de cisaillement Vs(m/s)	Amortissement estimé (%)
1	3,00	3,00	Remblai (argile, blocs, herbe et brique)	2000	0300,00	10,0
2	6,00	3,00	Argile brune graveleuse et présence de galets	2170	0352,17	10,0
3	13,80	7,80	Argile beige compacte marneuse	2100	0540,00	10,0
4	16,30	2,50	Limon argileux rougeâtre	2115	0801,59	10,0

5	-	-	Rocher (Sable)	2215	1450,00	00,0
---	---	---	----------------	------	---------	------

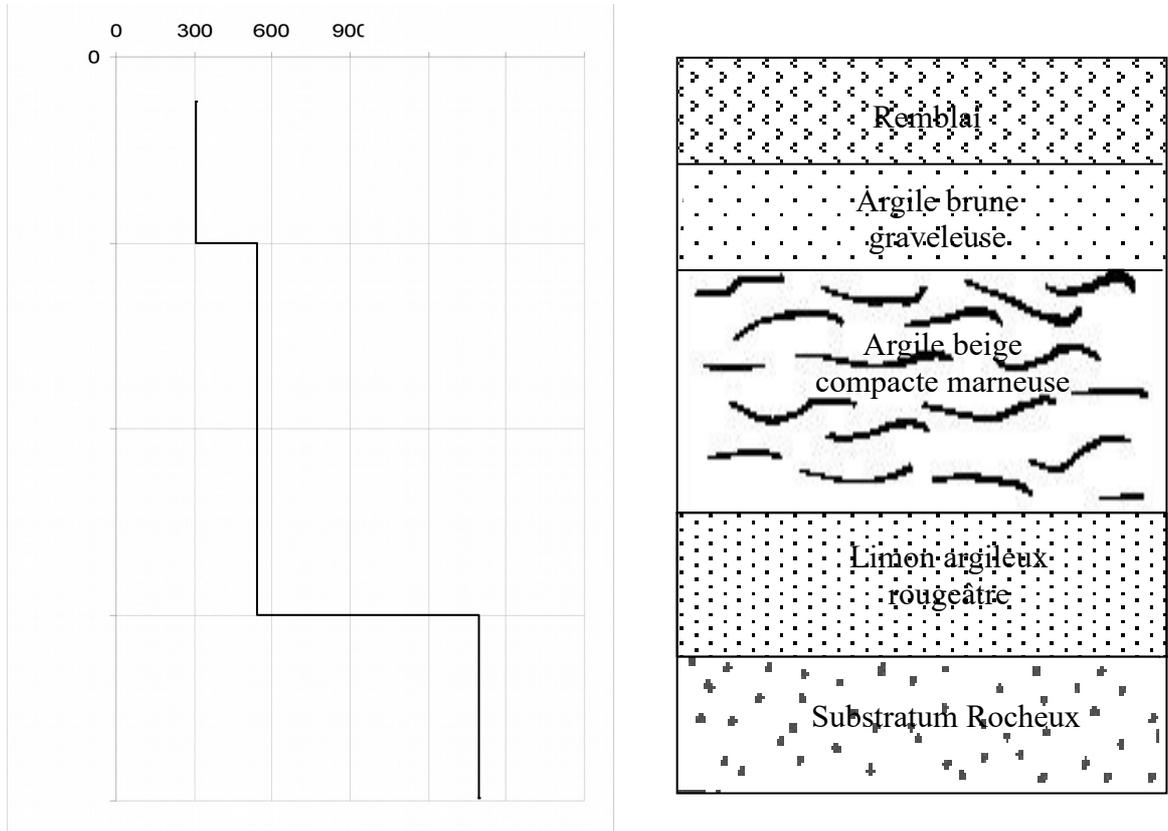


Fig. 4.4- Profil des vitesses de l'onde de cisaillement

(a) et profil de sol (b) au site de Bab-Ezzouar.

Les vitesses des ondes de cisaillement V_s varient entre 300 et 1400 m/s jusqu'à la profondeur de 49 mètres. Ces valeurs reflètent la nature stratigraphique des formations attribuées par le carottage et traduisent une amélioration relative des caractéristiques élastiques des sols en allant de plus en plus en profondeur. Selon le RPA 99 [24], la formation de grès et de sables consolidés est classée dans la catégorie S_1 , site rocheux. Les investigateurs [23] ont recommandé de classer le terrain dans la catégorie S_2 à cause de la présence d'une couche d'argile.

4.6.2. Données géotechnique du site de Maradja

Des essais géotechniques au laboratoire, tels que les essais triaxiaux et les essais oedométriques ont été effectués sur des noyaux de sédiments situés à Maradja environ 30 km de l'épicentre du tremblement de terre de Boumerdes du 21 Mai 2003 de magnitude $M_w = 6.8$.

Le sol étudié se compose de sédiments et de dépôts probablement volcaniques. Dans le site étudié, le dépôt de sol est caractérisé par une largeur variable, entre 11 et 30 km à l'ouest et de largeur de 1 à 8 km à l'est d'Alger [25].

Plusieurs bassins sédimentaires sont liés par la base de la pente et les écartements profonds (D1, D2, D3 et D4 dans la fig.4.3). Les analyses sédimentaires et géotechniques ont été effectuées au laboratoire pour définir la lithologie et les propriétés physiques et mécaniques des sédiments. Les images de rayon X obtenues pour différentes profondeurs illustrent les différentes couches qui sont composées de sédiments, et les mesures des poids spécifique pour chaque couche du sédiment.

L'accélérogramme enregistré pendant le séisme de Boumerdes à la station de Keddara1 (Rocher) à 20 km de l'épicentre du séisme de Boumerdes, est appliqué à la base des colonnes sédimentaires. Sur la base du diagramme donné par Idriss (1985 dans [25]), l'accélération maximale est donnée en fonction de la magnitude (M) du tremblement de terre et la distance à l'épicentre (d). Il permet d'estimer l'accélération maximale induite par le tremblement de terre de Boumerdes ($M_w = 6.8$).

Pour une distance épacentrale d'environ de 25-30 km de l'épicentre de tremblement de terre de Boumerdes et une magnitude $M_w = 6.8$, a_{max} induite est entre 0.15g et 0.2g [25]. Le tableau 4.2 donne les propriétés géotechniques du site de Maradja, qui représente un profil de sol de 9 couches. Les paramètres géologiques et géotechniques du profil de sol ont été déterminés au laboratoire.

Le site de Maradja repose sur un substratum rocheux au niveau duquel une excitation sismique est générée et se propage à travers le profil de sol sous formes d'ondes de cisaillement verticales ascendantes de type SH. Les caractéristiques du profil de sol sont montrées sur le tableau 4.2. Les vitesses des ondes de cisaillement V_s varient entre 150 et 300 m/s jusqu'à la profondeur de 40 mètres. Ces valeurs reflètent la nature stratigraphique des formations attribuées par le carottage et traduisent une amélioration relative des caractéristiques élastiques des sols en allant de plus en plus en profondeur.

Tableau 4.2- Propriétés géotechniques de sol de 9 couches sur montant sur un semi espace rigide du site de Maradja [25].

N° Couche	Profondeur H (m)	Epaisseur de la couche (m)	Désignation de la couche	Poids volumique (kg/m ³)	Vitesse des ondes de cisaillement Vs(m/s)	Amortissement t estimé (%)
1	5	5	argile siliceuse	1550	200	10,0
2	5.10	0.1	argile	1590	185	10,0
3	6.10	1	argile siliceuse	1650	200	10,0
4	7.70	1.60	sable	1700	185	10,0
5	8	0.30	argile siliceuse	1730	150	10,0
6	10.50	2.50	argile	1735	185	10,0
7	15.20	4.70	argile siliceuse	1740	244	10,0
8	15.70	0.50	sable	1803	205	10,0
9	40	24.30	argile siliceuse	1850	300	10,0
10 (Rocher)	-	-	sable	2100	300	0

4.7. Programme utilisé

Plusieurs programmes numériques pour l'évaluation de la réponse de sol existent (SHAKE, FLUSH, FRELAY, SEREN, DYNAFLOW...etc). La plupart de ces programmes sont basés sur l'hypothèse que le mouvement sismique est causé par la propagation verticale ascendante d'ondes de cisaillement à partir de la formation rocheuse et à travers un profil de sol stratifié horizontalement. Dans ce chapitre, le programme *SHAKE91* [4] est choisi.

SHAKE 91 [4] est un programme de calcul de la réponse sismique d'un profil de sol à stratification horizontale ; il a été développé par Schnabel et Seed à l'université de Berkeley en Californie. Les hypothèses fondamentales du programme *SHAKE 91* sont décrites ci dessous:

- Le profil du sol est supposé infini horizontalement.
- Chaque couche du profil de sol est entièrement définie par son module de cisaillement G , sa masse volumique ρ , son coefficient d'amortissement ξ et son épaisseur h .
- La réponse sismique du profil de sol est due à la propagation verticale d'une onde de cisaillement.
- L'onde de cisaillement excitatrice est introduite sous forme d'un accélérogramme.
- La non linéarité du comportement de sol (variation du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement) est prise en compte par un schéma itératif en considérant un comportement linéaire équivalent.

Les différentes opérations permises par le programme *SHAKE 91* sont les suivantes:

- Lecture du mouvement d'excitation, détermination de sa valeur maximale et calcul de ses périodes prédominantes.
- Lecture des données relatives au profil de sol et calcul de sa fréquence fondamentale de vibration.
- Calcul de la contrainte et de la déformation maximales au milieu de chaque couche et détermination des nouvelles valeurs du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement compatibles avec le niveau de déformation réel dans chaque couche.
- Calcul du mouvement sismique en tout point du profil à partir d'une excitation générée au niveau du substratum rocheux ou calcul de l'excitation sismique au niveau du substratum rocheux par déconvolution de la réponse sismique enregistrée à n'importe quel point du profil.
- Histoire des mouvements sismiques (accélération en fonction du temps) en tout point du profil.
- Calcul des spectres de Fourier des mouvements sismiques au toit de toutes couche du profil de sol en fonction de la fréquence.
- Calcul des spectres de réponses des mouvements sismiques en tout point en fonction de la fréquence ou la période.
- Calcul de la fonction d'amplification entre les toits de deux couches du profil de sol.

- Calcul des contraintes et des déformations des particules de sol en fonction du temps dans chaque couche.

4.8. Résultats numériques

L'objectif de cette étude est d'estimer la variabilité de l'amplification du signal sismique due aux effets de site. Dans ce but, des simulations numériques ont été mises en oeuvre pour analyser la réponse du sol.

4.8.1. Fonction d'amplification

La fonction d'amplification ou de transfert entre la surface du profil de sol de chacun des deux sites étudiés et la base rocheuse, supposée en affleurement rocheux est présentée sur la figure 4.5. Les données du profil de sol utilisées sont celle présenté dans les tableaux 4.1 et 4.2.

Après avoir calculé les caractéristiques des mounocouches équivalents aux multicouches de Bab-Ezzouar et Maradja (Tableau 4.3), nous remarquons que le site de Bab-Ezzouar a un contraste d'impédance (3.4) plus haut que celui du site de Maradja (1.2). Ce qui explique les fortes amplitudes de la fonction d'amplification du site de Bab-Ezzouar par rapport à celui de Maradja (Fig. 4.5).

Pour comparer les fonctions d'amplification des deux sites de Bab-Ezzouar et Maradja, on a calculé la vitesse moyens, la masse volumique et le coefficient d'amortissement pour chacun des deux profils de sol correspondants aux sites étudiés.

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}}} \quad ; \quad \bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}} \quad ; \quad \bar{\xi} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\xi_i}} \quad \text{et} \quad H = \sum_{i=1}^n h_i .$$

Tableau .4.3- comparaison des monocouches équivalents aux profils de sol de Bab-Ezzouar et Maradja.

Mono-couche équivalent	Epaisseur H (m)	ξ (%)	V_s (m/s)	ρ (KN/m3)	$\frac{H}{V_s}$ (s)	$\frac{\rho_2.V_{s2}}{\rho_1.V_{s1}}$
Couche de Bab-Ezzouar	16.30	10	451.75	2095.44	0.036	3.40
Rocher de Bab-Ezzouar	-	0	540.00	2100.00	-	-
Couche de Maradja	40.00	10	254.12	1772.74	0.157	1.20
Rocher de Maradja	-	0	300.00	2100	-	-

Ayant obtenu le spectre de Fourier de l'accélérogramme au niveau du substratum rocheux $\ddot{y}_{N+1}(\omega)$, on peut obtenir celui au toit de n'importe quelle couche $\ddot{y}_j(\omega)$ par la relation suivante :

$$\ddot{y}_j(\omega) = \ddot{y}_{N+1}(\omega).T^*_{j,N+1}(\omega) \quad (4.7)$$

L'accélérogramme dans la couche (j) $\ddot{y}_j(z_j, t)$ et éventuellement à la surface libre $\ddot{y}_j(0, t)$, est obtenu par la transformée de Fourier inverse telle que :

$$\ddot{y}(z_j, t) = \text{Re} \left(\sum_{n=0}^{N/2} \ddot{y}_j(\omega) e^{i\omega_n t} \right) \quad (4.8)$$

Cette équation permet de connaître en tout point du sol l'accélération, la vitesse et le déplacement par intégration (division par ω et ω^2), la déformation de cisaillement γ_j et à l'aide de la loi de comportement, la contrainte de cisaillement $\sigma_{xz}^{(j)}$.

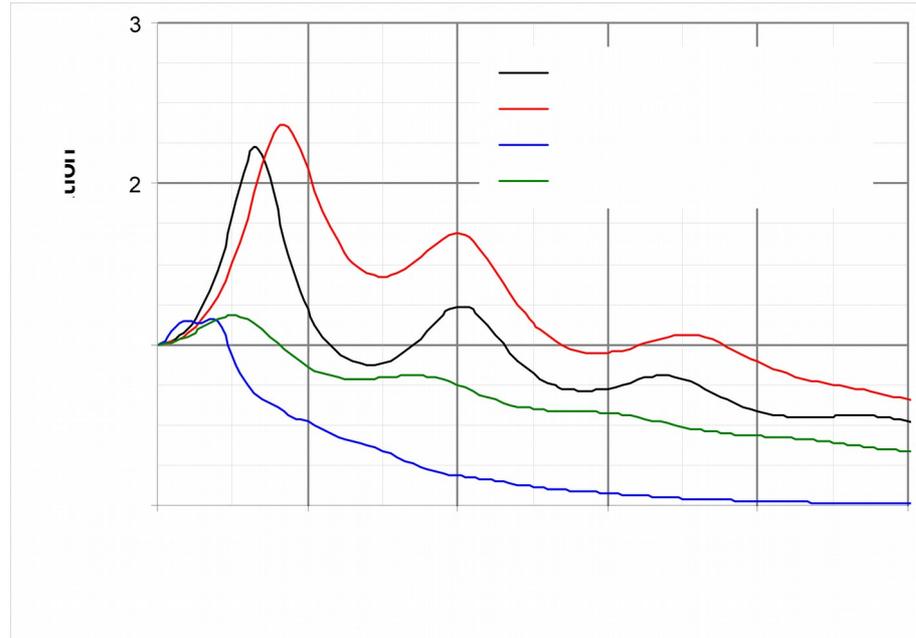


Fig. 4.5- Fonction d'amplification des sites (Bab Ezzouar et Maradja).

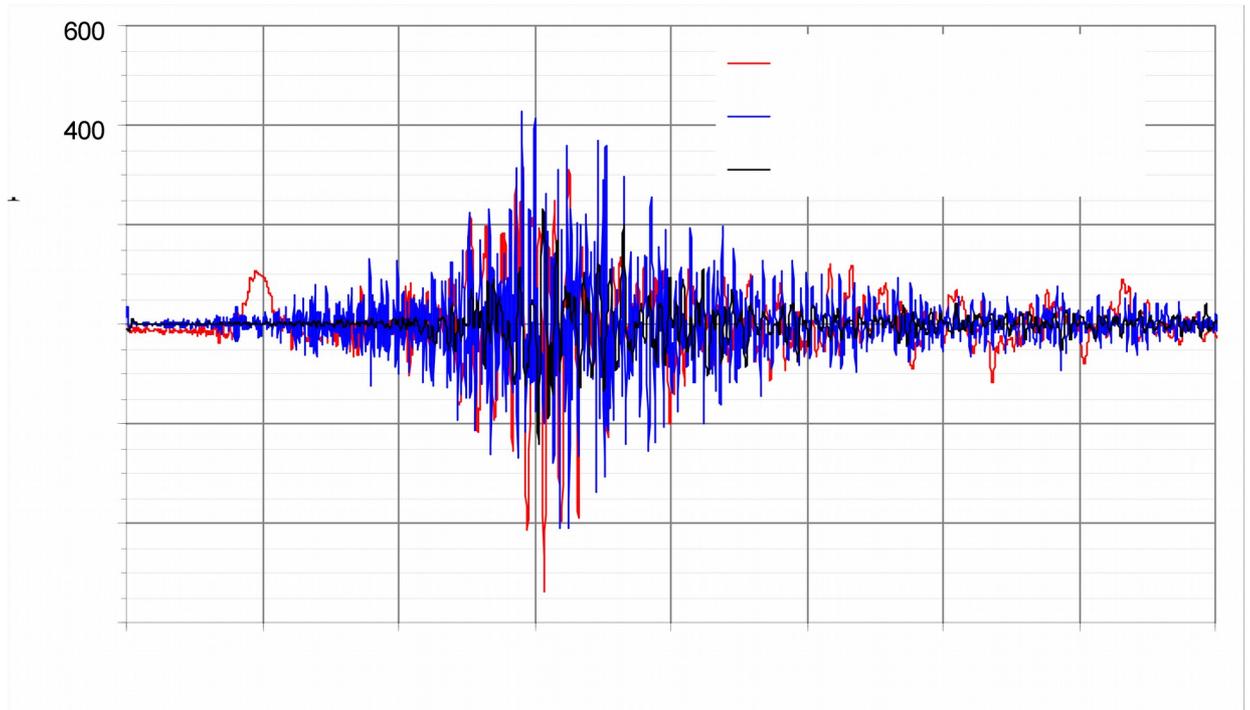
4.8.2. Histoire des accélérations de sol (Accélérogramme)

Dans le but d'obtenir la réponse du profil de sol étudié, en termes d'accélérations de sol, nous avons excité le profil de sol par le mouvement de référence, c-à-d l'accélérogramme du site de Keddara2 (rocher) transféré de la station d'enregistrement vers les sites étudiés (Bab-Ezzouar et Maradja). Cet accélérogramme est présenté dans la figure 2.4-a (chapitre 2). Nous avons pris les composantes (E-W) et (N-S).

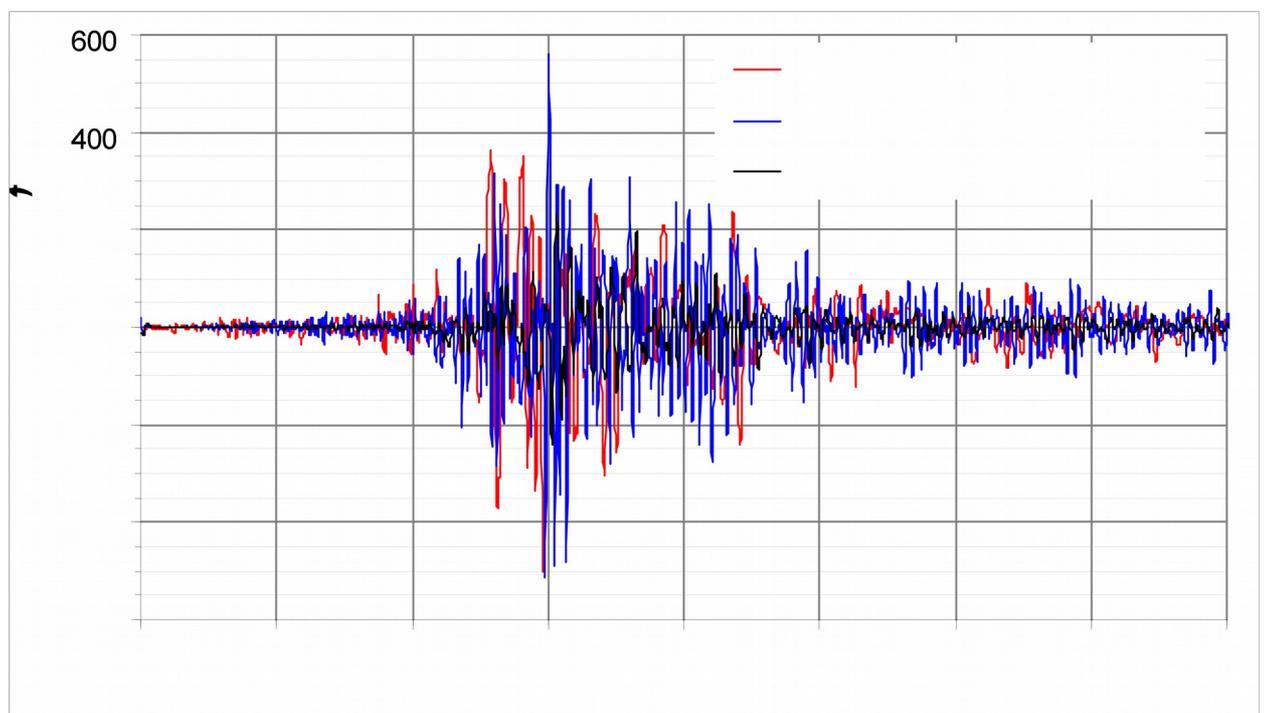
Les accélérations de sol en surface libre des sites sont obtenues en utilisant le programme *SHAKE91* [4], dans le cas où le comportement du sol est supposé visco-élastique linéaire. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.6.

Les site de Bab-Ezzouar avoisine un site expérimental (Dar El Beida) d'environ une dizaine de kilomètres. Les accélérations enregistrées lors du choc principal dans les directions (E-W), (V) et (N-S) sont, respectivement 0.54g, 0.16g et 0.50 g. Nous comparons dans les figures 4.6 les accélérogrammes calculées à la surface des deux sites (Bab-Ezzouar et Maradja) et les accélérogrammes enregistrés au site de Dar El Beida pour les deux composantes E-W et N-S.

Le site de Dar ELBeida est situé dans la ville d'Alger où une accélération maximale (E-W) de 0.52g à été enregistrée lord du séisme de Boumerdes (21 Mai 2003).



(a) Composante (E-W)



(b) Composante (N-S)

Fig. 4.6 – Comparaison entre les accélérations calculées et enregistrées aux stations de Bab-Ezzouar, Maradja et Dar ELBeida des composantes E-W (a) et N-S (b).

4.8.3. Spectres de réponse calculés aux sites étudiés

Le spectre de réponse en accélération, vitesse ou déplacement permet de faire intervenir la notion du contenu en fréquences du mouvement. Son but est de caractériser un séisme d'après la réponse d'une structure simple.

Par définition, le spectre de réponse d'un accélérogramme exprime la réponse maximale, en déplacement, en vitesse ou en accélération, d'un oscillateur à un degré de liberté en fonction de sa fréquence propre, pour un coefficient d'amortissement donné. L'intérêt de ce spectre est de permettre par une simple lecture d'évaluer le déplacement (vitesse ou accélération) maximum d'un oscillateur quelconque, donc les effets maxima.

Cette manière de procéder est la base de la méthode la plus couramment utilisée pour le calcul dynamique des structures. Par contre, le spectre ne fournit pas la valeur du temps à laquelle se produit le déplacement maximum ; pour certaines applications, on doit donc recourir à l'emploi direct de l'accélérogramme [5].

La subroutine de calcul du spectre de réponse la plus universellement utilisée est celle écrite par Idriss à l'université de Berkeley en 1968 en langage fortran. Elle est basée sur les techniques présentées par Nigam et al (1968) [26]. Cette subroutine a été utilisée dans plusieurs programmes numériques entre autres, le programme SHAKE91 [4].

Nous avons utilisé le programme *SHAKE91* pour calculer les spectres de réponse en pseudo accélération aux surfaces libres des sites étudiés (Bab-Ezzouar et Maradja). Les résultats obtenus pour un coefficient d'amortissement de 5% sont présentés dans la figure 4.7.

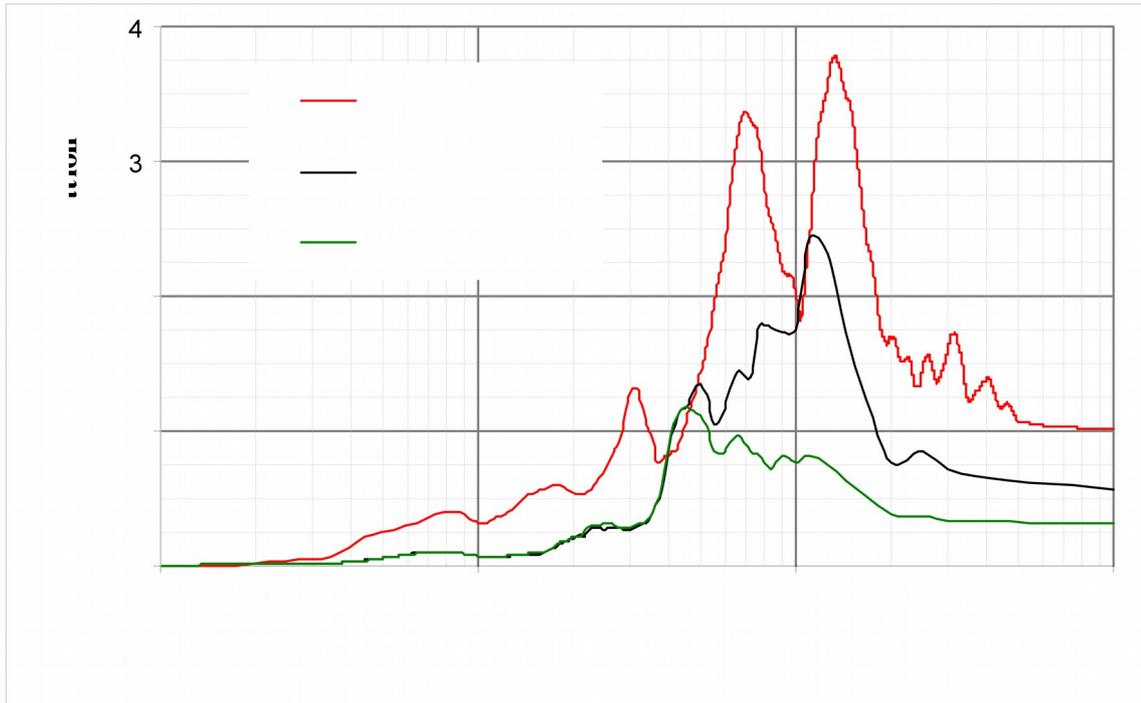
D'autre part, nous confrontons dans la même figure les spectres de réponse calculés à la surface du site projet à ceux obtenus des enregistrements du site expérimental avoisinant de Dar El Beida.

D'après la figure 4.7, nous remarquons que les spectres de réponse en pseudo accélérations normalisées présentent un contenu fréquentiel riche, pratiquement dans la même plage de fréquences.

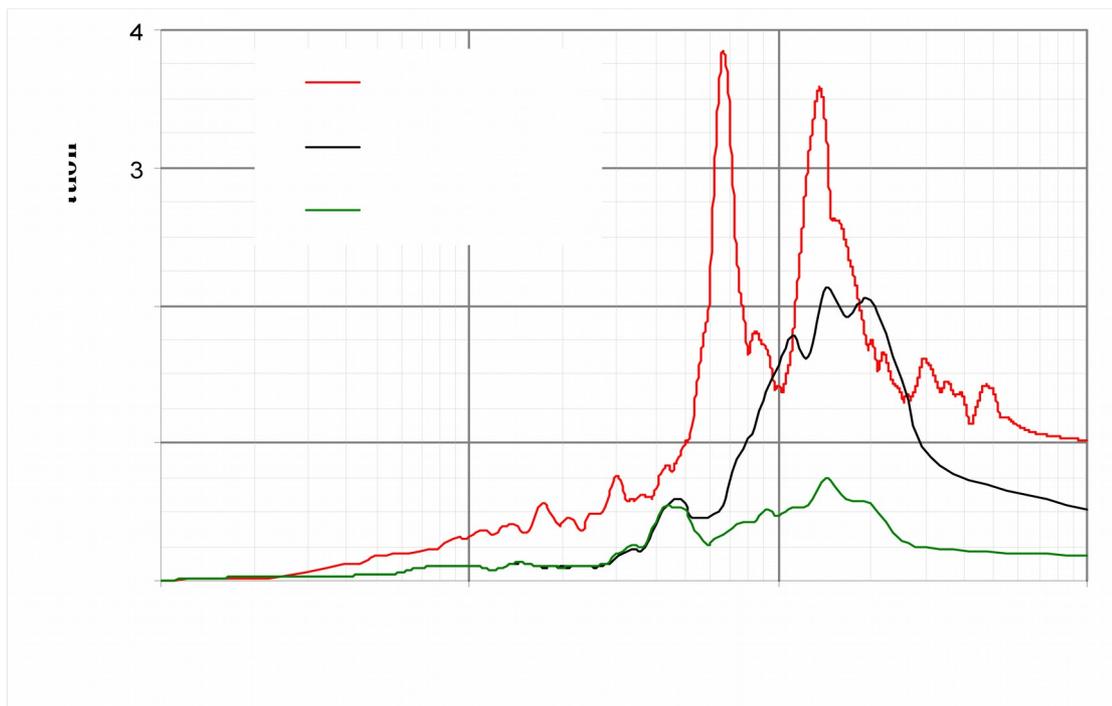
Cependant, les amplitudes des spectres normalisés au site de Dar ELBeida sont plus importantes du fait que ce site est plus proche à l'épicentre (29 km) par rapport aux deux autres sites et d'autre part à la nature du sol qui doit avoir influencé ces amplitudes spectrales.

Tandis que pour les deux sites de Bab-Ezzouar (à 20 km) et Maradja (à 43 km), les spectres de réponse présentent des valeurs maximales qui correspondent, approximativement, aux mêmes fréquences mais ces valeurs maximales sont plus importantes pour le site de Bab-Ezzouar aussi proche que le site de Dar ELBeida mais son contraste d'impédance plus important que celui du site de Maradja fait apparaître les amplitudes maximales vers les fréquences plus hautes.

Les valeurs maximales du spectre de Bab-Ezzouar plus faibles par rapport à celles de Dar EL Beida sont dues au caractère ferme de ce site.



(a) Composante E-W.



Composante N-S.

Fig. 4.7- Comparaison entre les spectres de réponse calculés à Bab -Ezzouar et Maradja et ceux enregistrés au site de Dar El Beida.

4.9. Conclusion

A travers les applications traitées dans ce chapitre, nous avons en premier lieu étudié l'amplification par effet de site de façon analytique sur deux sites constitués chacun par un monocouche de géométrie identique mais de vitesse d'onde de cisaillement différents.

Nous concluons que les effets du site sont présents dans les sites meubles (V_s faible) et l'amplification se passe à des fréquences plus faibles par rapport aux sites fermes.

En deuxième lieu, nous avons étudié l'amplification des mouvements sismiques sur deux sites en Algérie, proches de l'épicentre du séisme de Boumerdes 2003, où nous avons excité leurs base par l'accélérogramme enregistré au site rocheux de keddara2.

Nous avons ensuite comparé les réponses aux deux sites en termes d'accéléérations et de pseudo accéléérations (spectres de réponse) avec ceux enregistrés à un site proche (Dar EL Beida) où nous avons pu mettre en évidence la présence d'un effet de site au niveau de ce site.

Nous concluons que la nature des matériaux constituant le dépôt de sol ainsi que les épaisseurs des couches de sol peuvent influencer considérablement l'amplification ou la déamplification du mouvement sismique.

5.1. Introduction

Depuis leur application en 1934 par Beniuff et en 1941 par Bio et Housner [27], les spectres de réponse ont montré leur efficacité dans le traitement des problèmes de modélisation et d'analyse des structures soumises aux mouvements sismiques. Ils sont à base des méthodes de calcul de l'action sismique dans les règlements parasismique (méthode statique et méthode spectrale). Trifunac [28] a présenté un bref historique du calcul du spectre de réponse sismique. Puis, en 2007 a présenté un autre article [29] pour commémorer le 75^{em} anniversaire de la formulation du concept de la méthode du spectre de réponse.

5.2. Spectre de réponse

Le spectre de réponse est l'outil le plus approprié, développé jusqu'à présent pour exprimer la relation de la réponse d'excitation sismique en technologie de tremblement de terre.

Le spectre de réponse en accélération, en vitesse ou en déplacement, permet de caractériser un séisme d'après la réponse d'un oscillateur à un degré de liberté. Cet oscillateur est caractérisé par une période propre T et un pourcentage d'amortissement critique ξ . Ainsi, le spectre de réponse d'un enregistrement sismique est le tracé de la réponse maximum (accélération, vitesse ou déplacement) d'une série d'oscillateurs simples à un degré de liberté avec le même amortissement ξ et la masse m , mais de raideurs variables K_i , au mouvement de sol spécifié (accélérogramme solliciteur), en fonction de la fréquence propre f (ou la période T). L'intérêt de ce spectre est de permettre par une simple lecture d'évaluer le déplacement (vitesse ou accélération) maximum d'un oscillateur quelconque.

5.3. Calcul du spectre de réponse

Le spectre de réponse permet de caractériser une excitation. Il consiste en la détermination de la réponse maximale (déplacement, vitesse ou accélération) d'une série d'oscillateurs de différentes fréquences propres, soumis à cette même excitation. Le spectre de réponse résultant permet alors l'évaluation de la réponse de n'importe quel système linéaire, à partir de sa fréquence propre. L'utilisation principale est donc l'évaluation de la réponse maximale des bâtiments lors de tremblements de terre, en supposant que la réponse est dominée par un mode unique, ce qui est vrai dans la majorité des cas où le mode fondamental de la structure est prédominant.

Le calcul du spectre de réponse se fait en se basant sur la réponse dynamique d'un système à un degré de liberté (DDL) tel qu'illustré sur la figure 5.1, où $x(t)$ est la réponse en déplacement, ω_0 est la fréquence propre du système et ξ est le pourcentage d'amortissement.

L'équation de mouvement d'un oscillateur simple à un degré de liberté soumis à une excitation à la base s'écrit comme suite. Un oscillateur simple est constitué d'une masse m concentrée reliée à un point fixe par un ressort (Fig. 5.1).

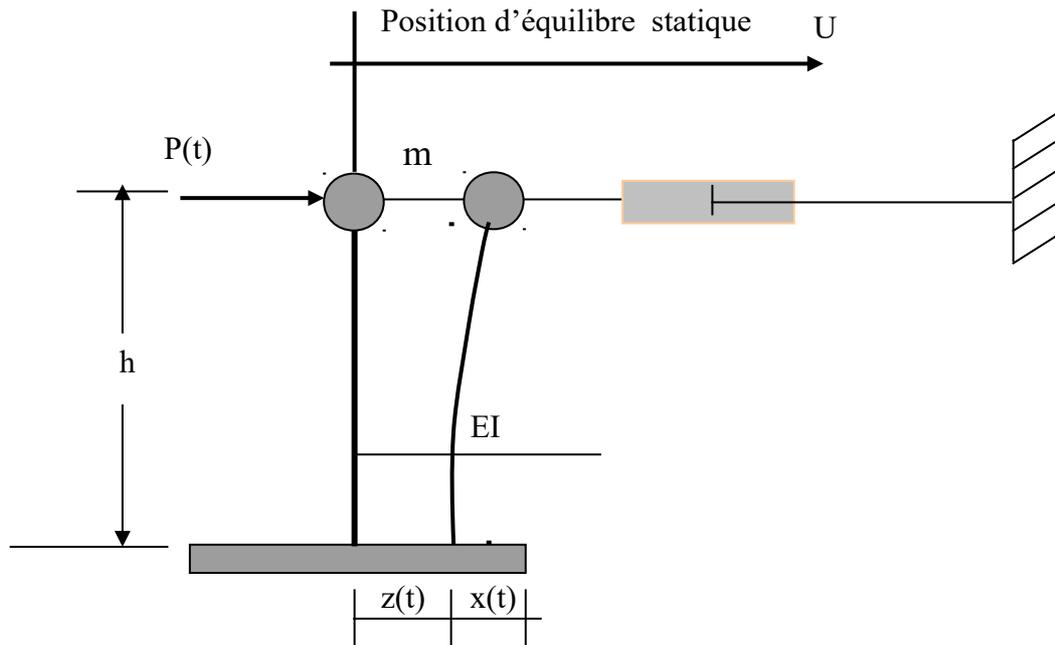


Fig.5.1- Oscillateur simple à un degré de liberté.

On considère qu'il ne peut se déplacer que dans une seule direction et le mouvement est, dans le cas général, amorti. On peut écrire l'équation de mouvement de cet oscillateur simple soumis à une force variable $P(t)$. Soit $x(t)$ le déplacement de la masse m par rapport à la position d'équilibre, $x'(t)$ sa vitesse, $x''(t)$ son accélération.

Lors du mouvement, m est soumise à :

- Une force de rappel (Force dans le ressort)

$$F_1(t) = -k \cdot x(t)$$

- Une force résistante de l'amortissement

$$F_2(t) = -c \cdot x'(t)$$

- Une force extérieure imposée $P(t)$

La loi fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$F_1(t) + F_2(t) + p(t) = m x''(t) \quad (5.1)$$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$Mx'' + Cx' + Kx = -Mz'' \quad (5.2)$$

où $z(t)$ est le déplacement du support.

En introduisant les variables :

- Pulsation propre de vibration $\omega = \sqrt{\frac{K}{M}}$
- L'amortissement critique $\xi = \frac{C}{2\sqrt{K.M}}$

L'Equation (5.2) prend la forme suivante :

$$x'' + 2\xi\omega x' + \omega^2 x = -z''(t) \quad (5.3)$$

La réponse temporelle à tout instant de l'oscillateur est donnée par l'intégrale de Duhamel :

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t Z''(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau \quad (5.4)$$

ou ω_D la pulsation propre amortie.

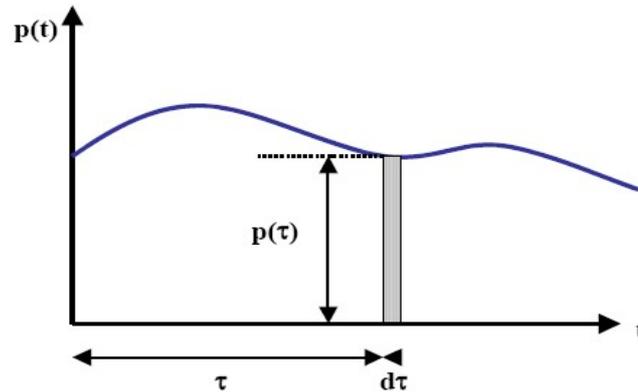


Fig.5.2- Principe d'obtention de l'intégrale de Duhamel.

Pour une série d'oscillateurs de période propre T et de pourcentage d'amortissement critique variable, pour chaque réponse (equation.5.4), on ne retient que la valeur maximale de déplacement que l'on notera S_D .

$$S_D(T, \xi) = \max_t x(T, \xi, t) \quad (5.5)$$

En reportant les valeurs S_D en fonction de la période T pour des valeurs fixées de ξ_i , on obtient les courbes de la figure (5.3), appelées spectres de réponse en déplacement.

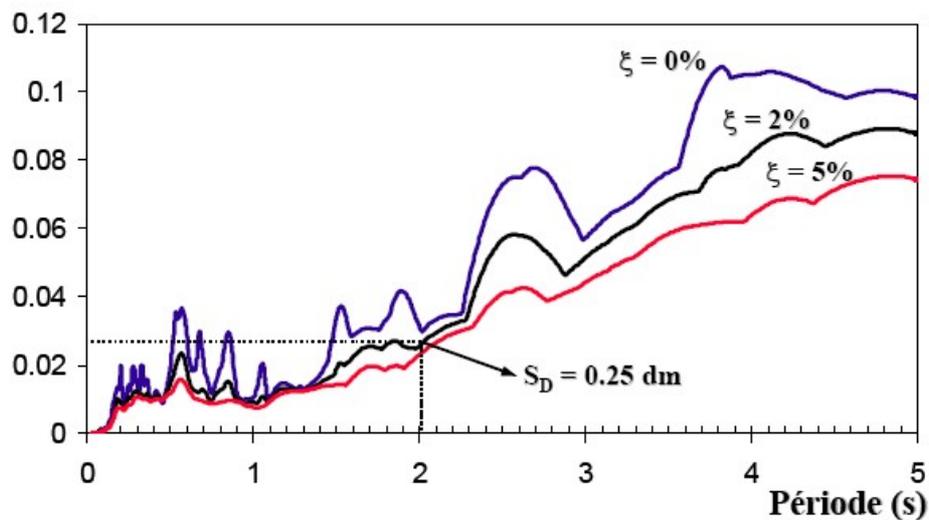


Fig. 5.3. Spectres de réponses en déplacement [30].

Le spectre de réponse en pseudo accélération $S_A(T, \xi)$ est défini :

$$S_A(T, \xi) = \max_t [\omega^2 x(T, \xi, t)] = \omega^2 S_D(T, \xi) \quad (5.6)$$

Ceci permet de déterminer les efforts élastiques dans le système étudié lorsqu'il est multiplié par la masse M.

De même on peut définir un spectre de pseudo-vitesse $S_V(T, \xi)$. Ces grandeurs sont reliées par :

$$S_A(T, \xi) = \omega S_V(T, \xi) = \omega^2 S_D(T, \xi) \quad (5.7)$$

Les spectres de la figure (5.2) sont présentés sur la figure (5.4) en terme de pseudo accélérations calculées par l'expression (5.7).

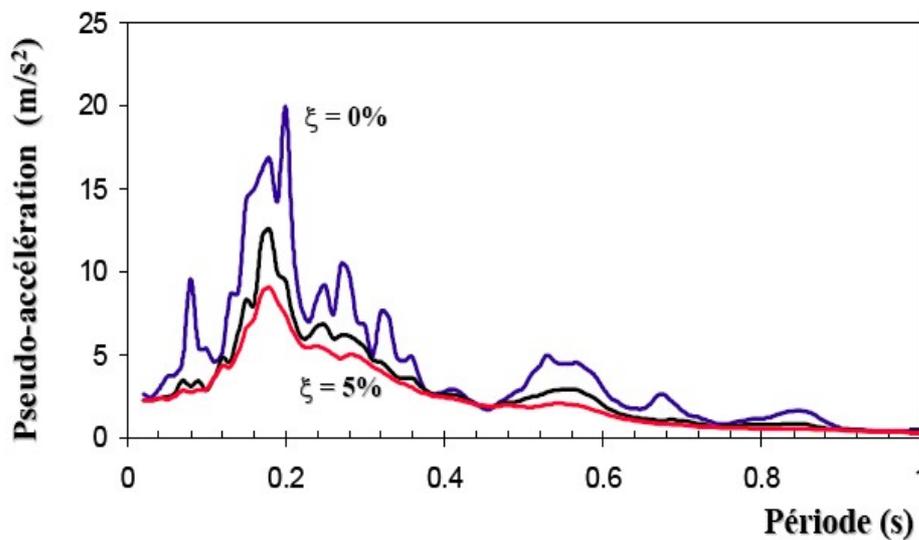


Fig. 5.4. Spectre de réponse en pseudo-accelération [30].

- Spectre enveloppe

Le spectre de réponse en pseudo-accélération permet de définir, dans une zone sismique, une sollicitation enveloppe pour le système. En effet, la variabilité du mouvement sismique est

grande et parmi un ensemble de sollicitations $z_i''(t)$, une sollicitation

$z_j''(t)$ peut être la plus défavorable pour une structure, alors que pour une autre

structure la sollicitation la plus défavorable sera représentée par $z_k''(t)$. Par contre,

en calculant les spectres de réponse $S_{Ai}(T, \xi)$ de ces sollicitations, il est possible de définir un spectre enveloppe qui en vertu de l'équation [30]

$$F_{\max} = M \cdot S_A(T, \xi) \quad (5.8)$$

Conduira aux efforts les plus élevés, la définition d'un spectre est très utile pour les règlements de construction parasismique. Ces spectres y sont définis à partir de traitements statistiques des spectres d'enregistrements de mouvements sismiques réels et possèdent généralement tous des formes identiques.

On a élaboré un programme de calcul du spectre de réponses d'accélération, vitesse et déplacement à partir des accélérogrammes réels. Pour cela nous avons utilisé la sous-routine la plus universellement utilisée, fondée par Nigam [26].

5.4. Quantification des effets de site sur les spectres de réponse

Les paramètres de tremblement de terre tels que le type de sol, la distance épacentrale, la magnitude, la durée et les caractéristiques de la source sismique influencent la forme et l'amplitudes des spectres de réponse.

Cependant, il est difficile de séparer ces effets et étudier l'effet de chaque paramètre individuellement, notamment, à cause du manque des données sur les sites qui vont être étudiés.

5.4.1. Effet de l'amortissement sur les spectres de réponse

L'amortissement est un paramètre très important dans l'étude des phénomènes vibratoires, en particulier au voisinage de la résonance. L'influence de l'amortissement du sol sur le mouvement sismique est remarquable et revêt plusieurs aspects qui causent une atténuation du mouvement sismique et une dissipation d'énergie affectant l'amplitude des ondes sismiques. Dans cette section on a étudié l'effet du coefficient d'amortissement ξ sur les spectres de réponse du séisme de Boumerdes 2003 des composantes E-W, N-S et V aux niveaux des deux stations de kedara1 et kedara2 (Figs. 5.5-5.6). Les spectres de réponse pour chaque composante des deux stations ont été calculés pour différents coefficients d'amortissement ($\xi = 2, 5, 10$ et de 15%). Les spectres de réponse représentés sur ces figures sont des spectres normalisés. Ces spectres peuvent être interprétés comme des facteurs d'amplifications de réponse. Ils sont obtenus en divisant le spectre en pseudo accélération $S_A(T, \xi)$ (ou spectre de pseudo vitesse: $S_V(T, \xi)$, spectre de pseudo déplacement ; $S_D(T, \xi)$ par l'accélération maximal (a_{\max}), la vitesse maximale (V_{\max}) ou le déplacement maximal (d_{\max}) [31].

Nous constatons que pour les différentes valeurs du coefficient d'amortissement, pour chacun des deux enregistrements des mouvements sismiques (Figs. 5.5 et 5.6), la forme du spectre de réponse est conservée mais l'augmentation du coefficient d'amortissement diminue l'amplitude des spectres de pseudo accélérations normalisés pour toutes les composantes des deux stations.

5.4.2. Effet des conditions locales de sol sur les spectres de réponse

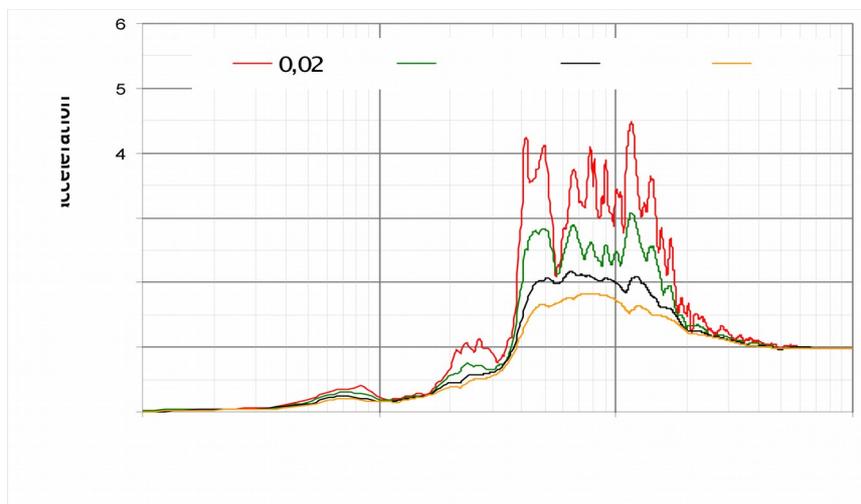
Beaucoup de chercheurs ont étudié l'influence de l'état de sol sur les spectres de réponse normalisés. Seed et al [32] ainsi que Mohraz [33] ont présenté les courbes qui montrent l'effet de différents types de sol sur l'amplification d'accélération d'un mouvement sismique

quelconque. La forme du spectre de réponse est très sensible à la nature du sol. En effet, les ondes sismiques se propagent dans le rocher, puis en certains endroits à travers des sédiments dont les caractéristiques vont influencer sur le mouvement du sol enregistré en surface. Pour une même secousse sismique les spectres de réponse seront différents selon qu'ils correspondent à un affleurement rocheux ou à un dépôt sédimentaire.

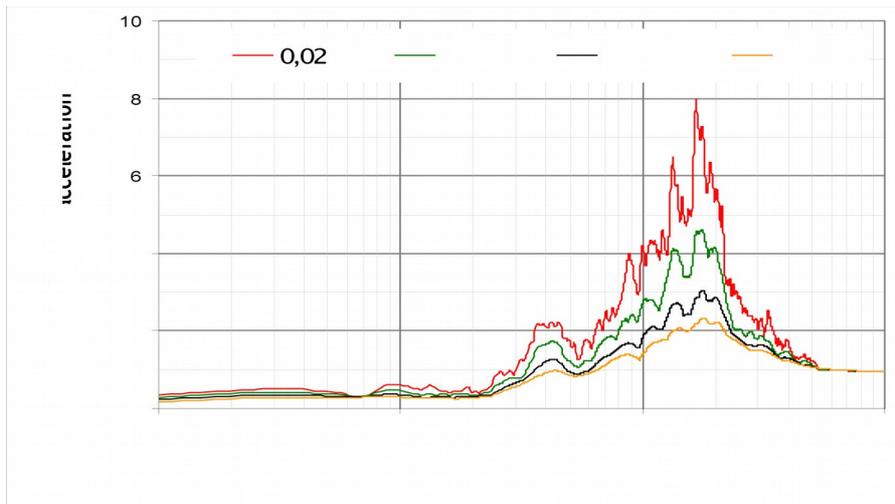
Dans le cas du séisme de Boumerdes 2003, on a présenté les spectres de pseudo-accélération normalisés à la surface libre au niveau des stations de Keddara1 (rocher), Keddara2 (sol) et Dar EL Beida des composantes (E-W), (N-S) et (V) dans la figure 5.7.

On peut constater que pour les composantes verticales, les spectres de pseudo-accélération normalisés sont peu influencés par les conditions de sol et gardent globalement une forme similaire.

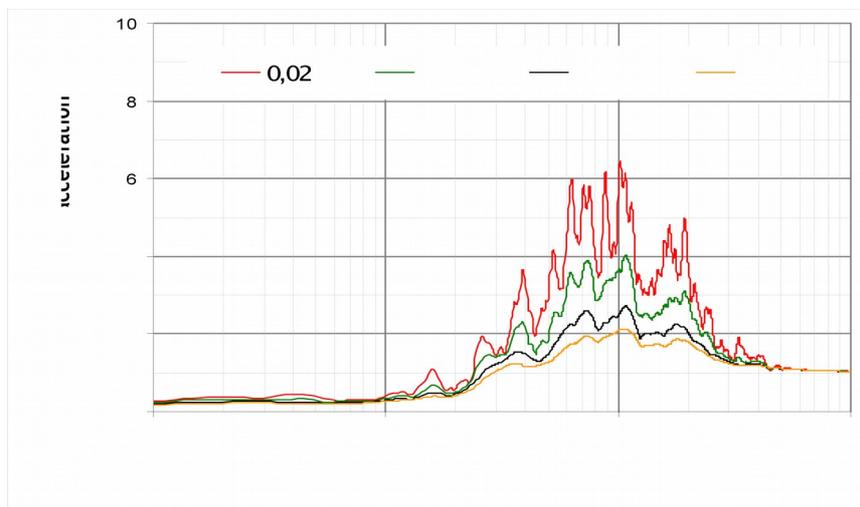
Tandis qu'elles affectent les composantes (E-W) et (N-S), pour le site de Dar ELBeida, situé dans la plaine de Métidja et distant de 29 km par rapport à l'épicentre du séisme, les valeurs maximales des pseudo accélération sont obtenues aux plus faibles fréquences pour les deux composantes (E-W) et (N-S) qui peut s'expliquer par l'effet de couches de sol meubles (de caractéristique mécaniques faibles par rapport à celles des couches sous-jacents) près de la surface [19].



a)-Composante E-W



b)-Composante N-S



c)-Composante V

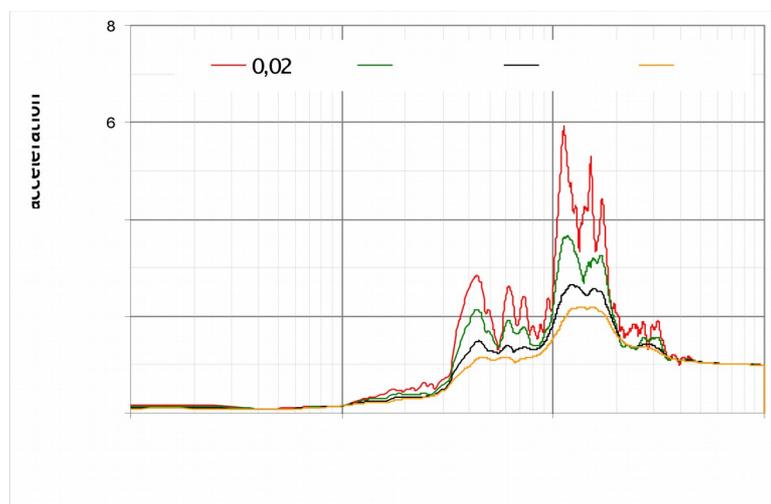


Fig. 5.5- Effet du coefficient d'amortissement sur les pseudo accélérations de l'accélérogramme de la station de Keddara1- rocher.

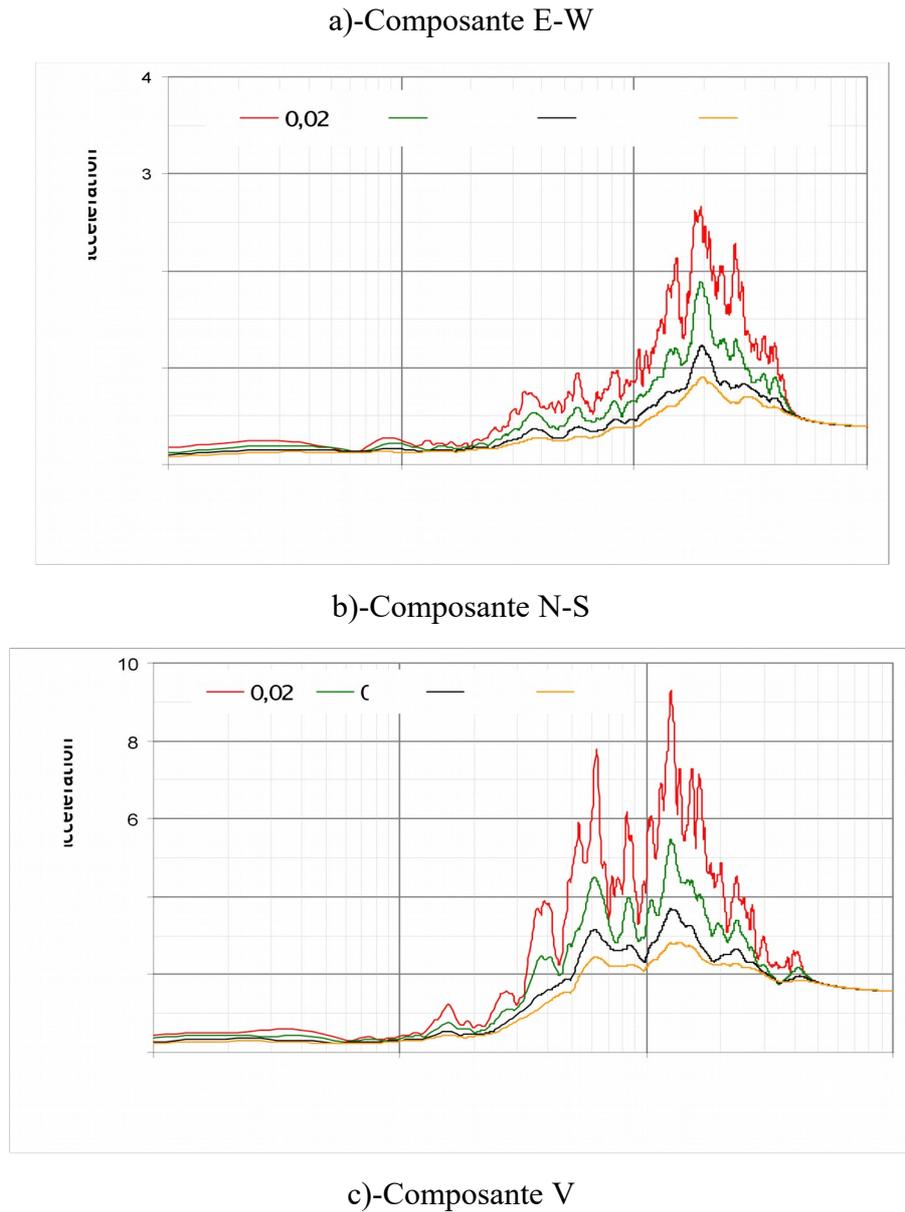


Fig.5.6- Effet du coefficient d'amortissement sur les pseudo accélérations de l'accélérogramme de la station de Keddara2- sol.

Alors que pour le site de Keddara1 (rocheux) situé à la même distance de l'épicentre (E-W) est légèrement plus bas par rapport à celui de la même composante pour Keddara2 (sol), ce qui est probablement dû à la direction de la faille. Cependant, pour les composantes (N-S), la valeur pic pour le site rocheux (Keddara1) est supérieure à celle du site de Keddara2 (sol), conformément à la courbe 1.3 (chapitre1). Les maxima pour les deux sites et pour les deux composantes (E-W) et (N-S) se passent aux mêmes fréquences.

En conséquence, lorsqu'il s'agit de choisir un spectre de réponse pour un site donné, il est très important de connaître la nature du sol, puisque les sols durs transmettent les hautes fréquences et les sol mous les basses fréquences [34].

Les conditions de sol gouvernent la forme du spectre de réponse. Pour des sols meubles les courbes seraient plus plates et pendant des périodes plus grandes (approximativement de 0.5 à 3 sec).

5.4.3. Effet de la magnitude sur les spectres de réponse

La magnitude d'un séisme est un paramètre d'origine expérimentale, directement lié à l'énergie libérée par le séisme au niveau de la source. Cette grandeur caractérise l'ampleur de l'événement sismique au niveau du foyer.

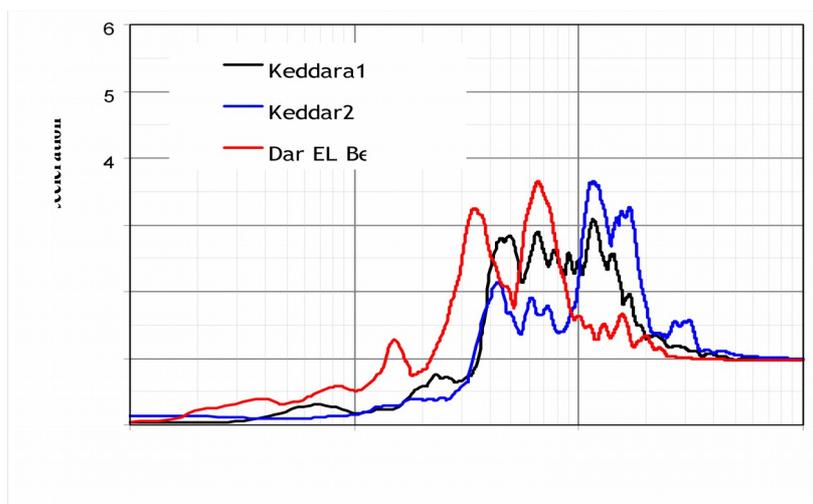
La magnitude est calculée comme le logarithme décimal de l'amplitude des ondes sismiques d'une certaine fréquence enregistrées sur un sismographe. Ainsi, la magnitude locale est égale au logarithme de l'amplitude maximale enregistrée sur un sismographe de type Wood-Anderson, ayant une période de 0.8 seconde et un pourcentage d'amortissement critique de 80%, situé à 100 kilomètres de l'épicentre. Des tables ont été construites empiriquement permettant la détermination de la magnitude à des distances autres que 100 kilomètres.

De façon générale, la magnitude est calculée par la formule [35]:

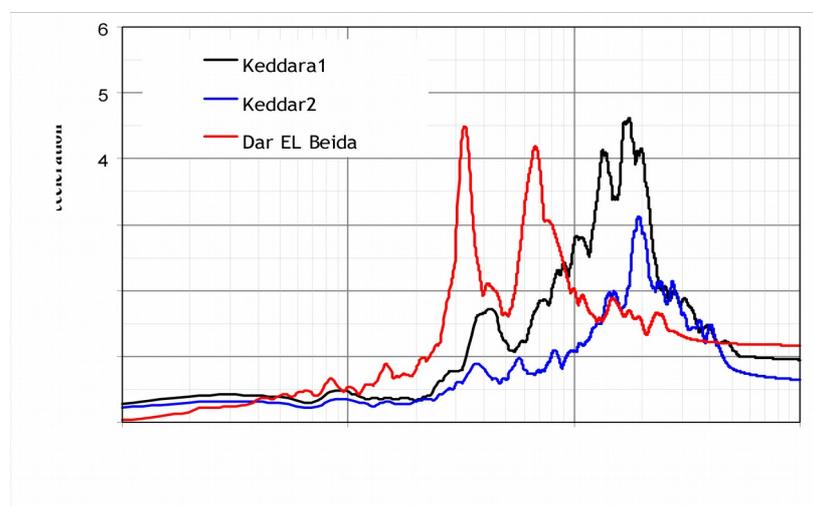
$$M = \log \frac{A}{T} + f(\Delta, h) + s$$

(5.8)

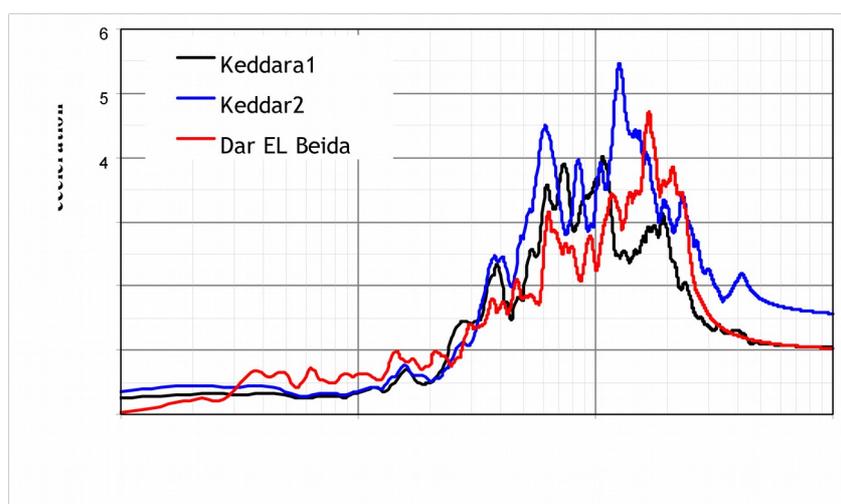
où A et T sont, respectivement, l'amplitude et la période prédominante de l'onde (lues sur l'enregistrement), f le facteur de correction fonction de la distance épacentrale Δ et de la profondeur focale H; s un facteur de site.



a)-Composante E-W



b)-Composante N-S



c)-Composante V

Fig. 5.7- Effet du type de sol sur les spectres de réponse normalisés des composantes E-W, N-S et V des stations Keddara (1), Keddara (2) et Dar EL Beida du séisme de Boumerdes 2003.

Pour un séisme donné, il n'y a pas une magnitude unique. On distingue la magnitude des ondes de volume M , la magnitude des ondes de surface M_s , la magnitude locale M_L définie par Richter. Une magnitude peut être négative et sa valeur maximale n'est liée qu'à la résistance des roches.

Dans cette section nous allons étudier l'effet de la magnitude sur les spectres de réponse d'accélération de sept stations de différentes magnitudes, deux stations en Turquie, deux aux Etats Unis d'Amérique (USA) et trois autres en Algérie. Le tableau 5.1 donne la date et la magnitude des séismes dans les six stations, Duzce et Izmit en Turquie, Loma Prieta et Northridge aux USA, et Keddara1, Keddara2 et Dar EL Beida en Algérie.

Tableau 5.1 : Dates et magnitudes quelques séismes.

Lieu	Date	Magnitude	Distance épicentrale (km)	a_{\max} (m/s ²)		Type de sol
				E-W	N-S	
Duzce -Bolu	12/11/99	7,2	17,6	8,08	7,46	Argile siliteuse
Loma Prieta – Gilroy 4	17/10/89	6,9	16	2,19	0,27	roche
Loma Prieta – Gilroy 6	17/10/89	6,9	19	2,09	1,66	sol
Northridge – Pacoina down	17/01/94	6,7	19	4,46	1,26	roche
Northridge – Pacoina upper	17/01/94	6,7	19	4,25	2,95	sol
Kedarra 1	21/05/03	6,8	20	3,34	2,5	roche
Keddara 2	21/05/03	6,8	20	5,8	2,2	sol
Dar El Beida	21/05/03	6,8	29	5,2	1,6	sol

Dans le passé, l'influence de la magnitude d'un tremblement de terre sur les spectres de réponse était généralement, prise en compte en indiquant l'accélération maximale au sol à un site. En conséquence, la forme et l'amplification des spectres obtenus étaient indépendantes de la magnitude du tremblement de terre. Mohraz [33] a étudié l'effet de la magnitude du séisme sur l'amplification des spectres de réponse.

La magnitude peut influencer la forme spectrale et peut être considérée en développant des spectres réglementaires pour un site spécifique. Su et al [36] ont comparé des spectres de réponse provenant de six séismes de magnitude allant de 3 à 8, enregistrés à Guerrero (Mexique) sur des roches dures. Ils ont montré la forte influence de la magnitude sur la forme des spectres de réponse et que les grands séismes génèrent beaucoup plus d'énergie aux périodes longues (fréquences faible) par rapport aux petits séismes. Ils ont également comparé

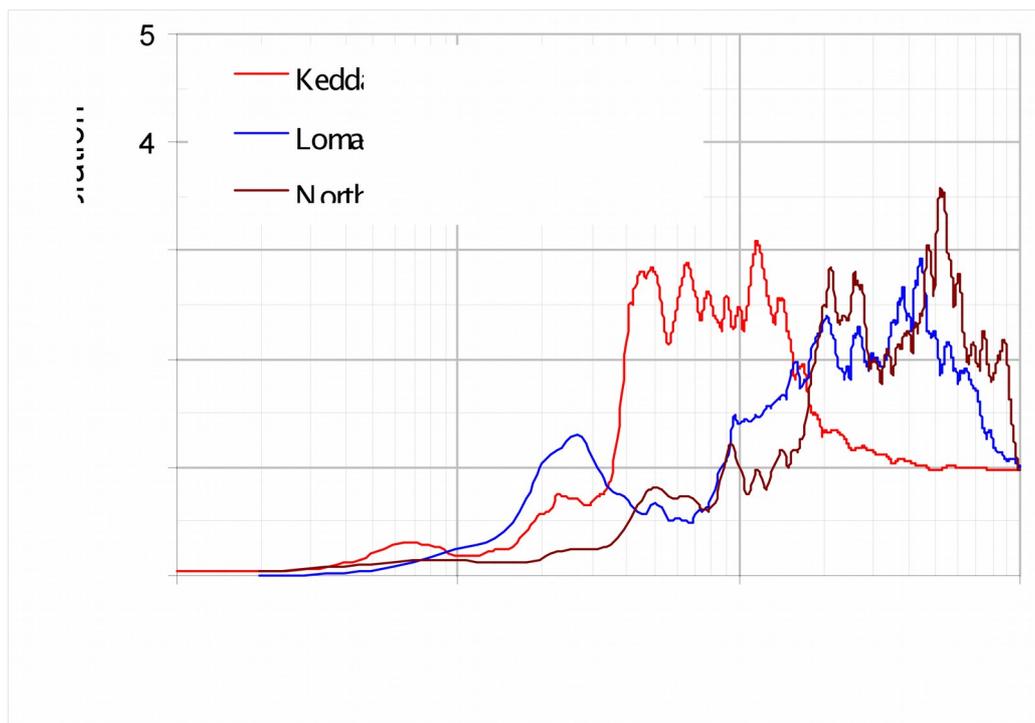
des pseudo-accélérations normalisés moyens obtenus à 50km de l'événement sismique provenant de séismes récentes chi-chi, Kocaeli, Landes, Kobe, Loma prita et Northridge ; d'une part sur des sols et d'autre part sur des roches. Cette étude comparative a révélé que les séismes de grande magnitude ont proportionnellement de l'énergie aux faibles fréquences.

Nous avons étudié dans cette phase l'effet de la magnitude de séismes destructeurs qui ont frappé des endroits de la terre durant la dernière décennie sur les spectres de réponse d'accélérations. La figure.5.8 montre que la magnitude influence la forme spectrale des spectres de réponse normalisés.

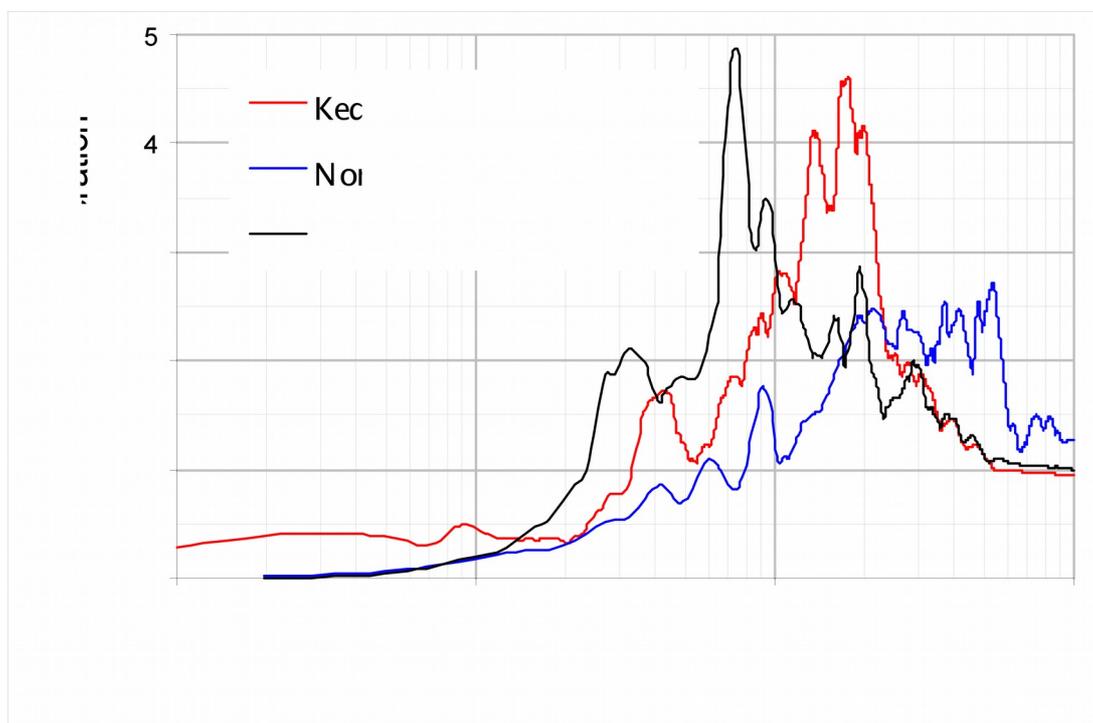
5.4.4. Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse

Des études récentes ont considéré l'effet de la distance épacentrale sur la forme et l'amplitude des spectres de réponse déduits des données de séisme [36,37]. En utilisant les données du séisme du 21 Mai 2003 en Algérie, nous avons étudié l'effet de la distance épacentrale (d) sur les spectres de réponse en pseudo accélération normalisé pour un coefficient d'amortissement ξ pris égal à 5%. Pour cela nous avons classé les sites étudiés en quatre groupes : champ principal très proche ($d \leq 20km$), champ proche ($20km < d < 50km$), champ intermédiaire ($50km < d < 100km$) et champ loin ($d > 100km$).

Le tableau 5.2 donne les valeurs des accélérations maximales enregistrées par le réseau national d'accélérographes pendant le séisme de Boumerdes 2003, conformément aux groupe choisis.

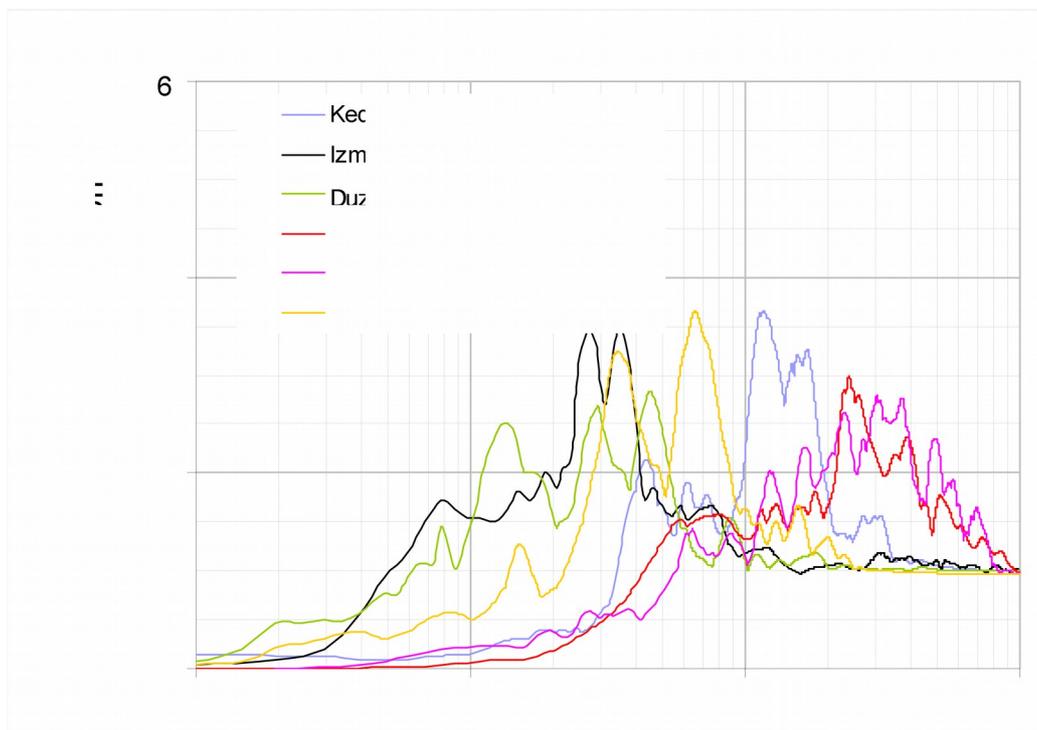


(a) (E-W) sur rocher

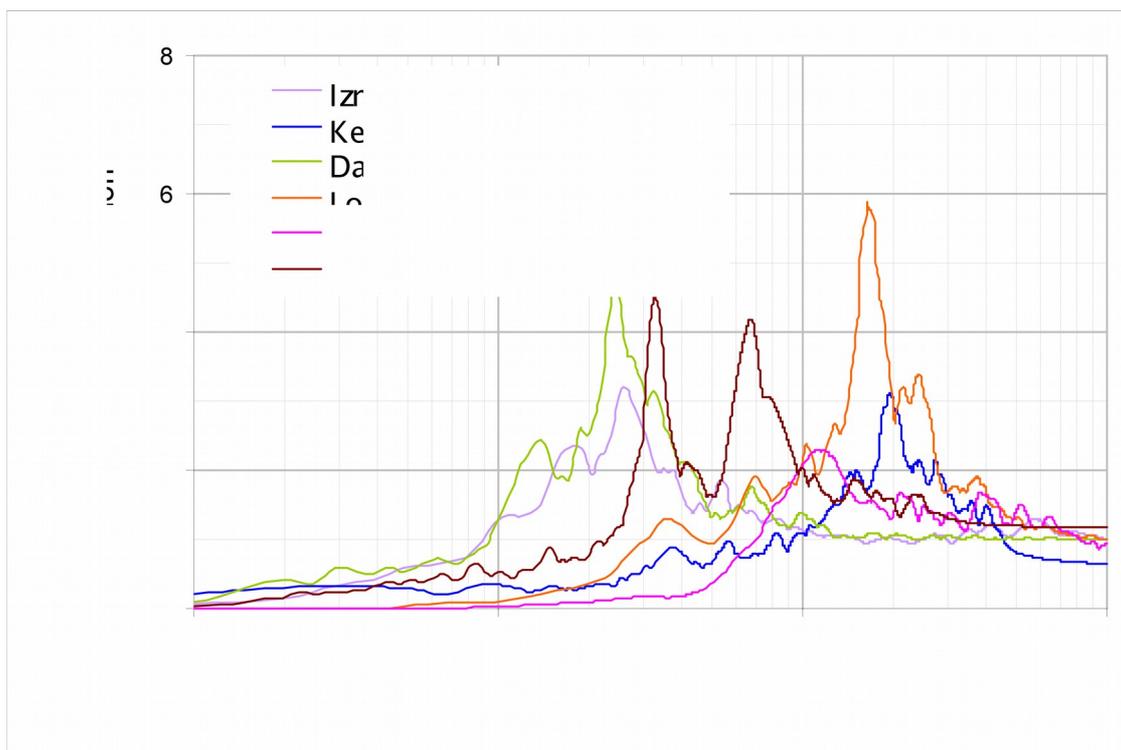


(b) (N-S) sur rocher

Fig. 5.8- Effet de la magnitude sur les spectres de réponses normalisés des composantes (E-W) et (N-S) pour des sites rocheux.



(c)-(E-W) sur sol



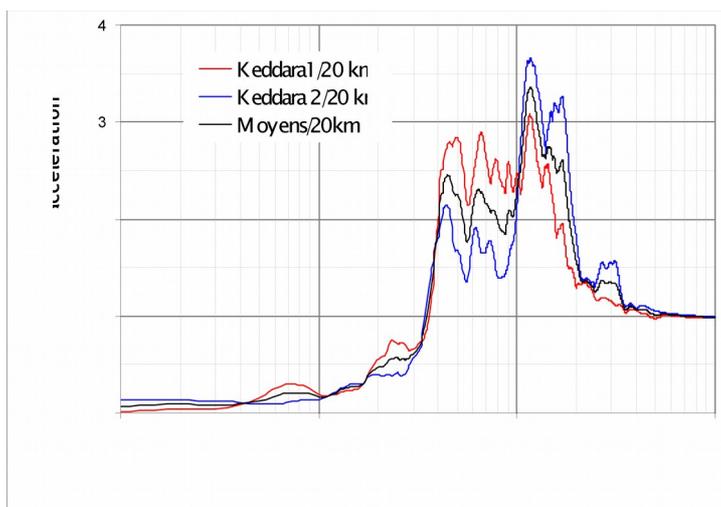
(d)-(N-S) sur sol.

Fig. 5.9- Effet de la magnitude sur les spectres de réponses normalisés des composantes (E-W) et (N-S) pour des sites meubles.

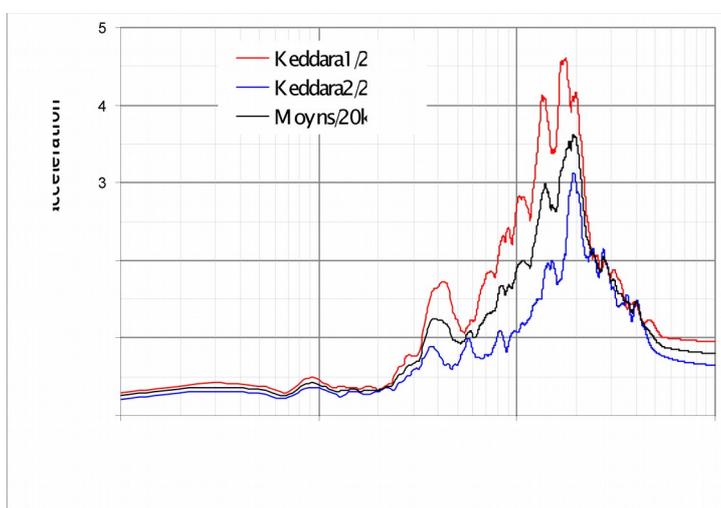
Tableau 5.2 : Valeurs des accélérations maximales enregistrées lors du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 (M=6.80).

	Station/Distance (km)	A_{max}		
		Est-ouest (E-W)	Nord-Sud (N-S)	Verticale (V)
Champ principal D < 20km	Keddara 1/20	0.34	0.24	0.26
	Keddara 2/20	0.58	0.22	0.35
Champ proche 20km < D < 50km	Dar EL Beida/29	0.52	0.46	0.16
	Hussein Dey/36	0.27	0.23	0.09
	Kouba/41	0.31	0.16	0.15
	Tizi ouzou/49	0.20	0.19	0.09
Champ intermédiaire 50km < D < 100km	Blida/72	0.046	0.038	0.28
	EL Afroun/86	0.16	0.09	0.03
Champ loin D > 100km	Hammam Righa/110	0.10	0.07	0.06
	Miliana/130	0.03	0.026	0.016
	Ain Defla/151	0.03	0.02	0.01

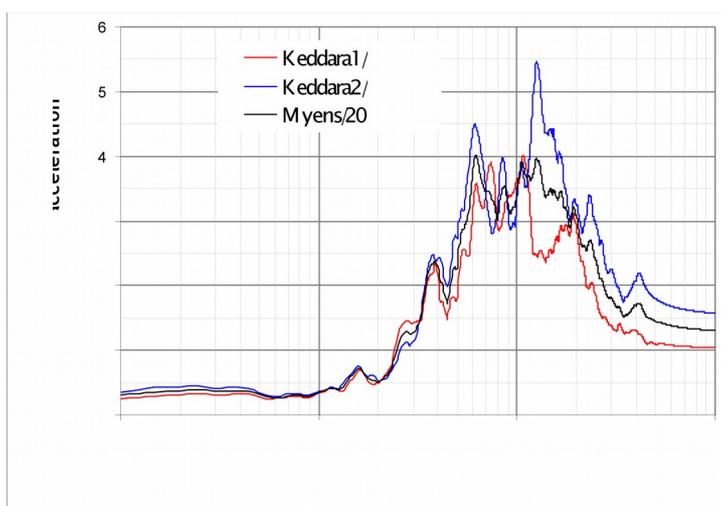
Les amplitudes des spectres d'accélération normalisés pour toutes les stations et toutes les composantes pour les quatre groupes sont montrées sur les figures (5.10) à (5.13).



a)- Composante E-W

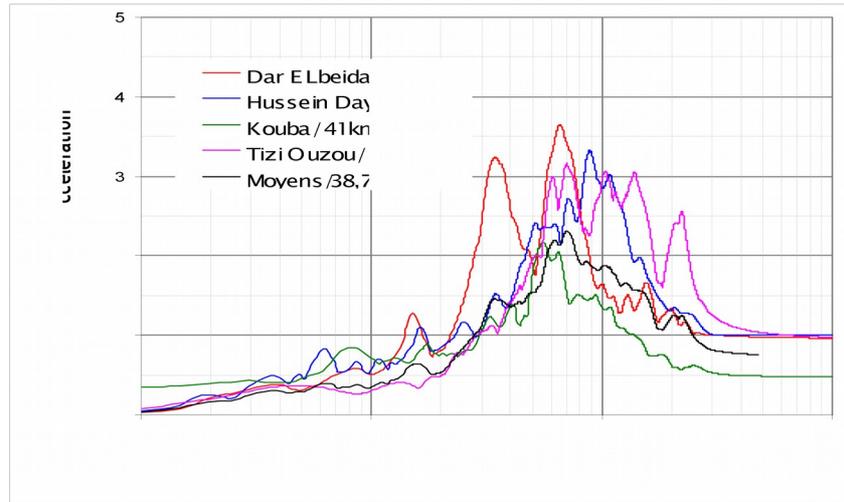


b)- Composante N-S

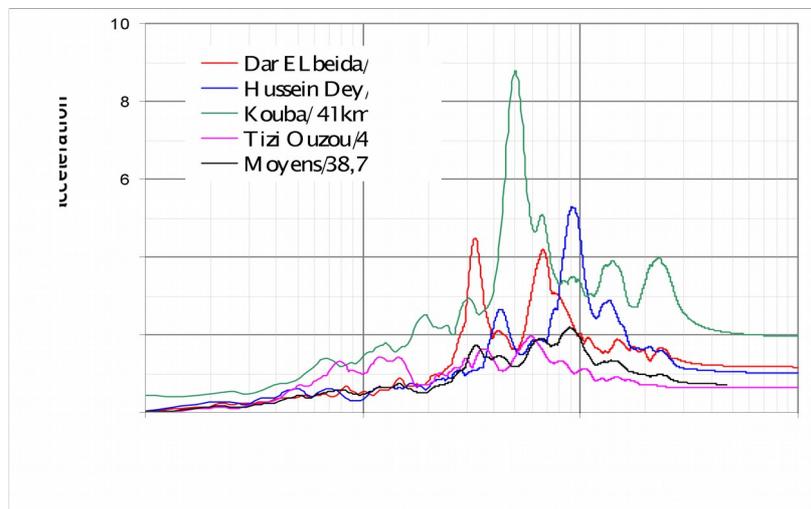


c)- Composante V

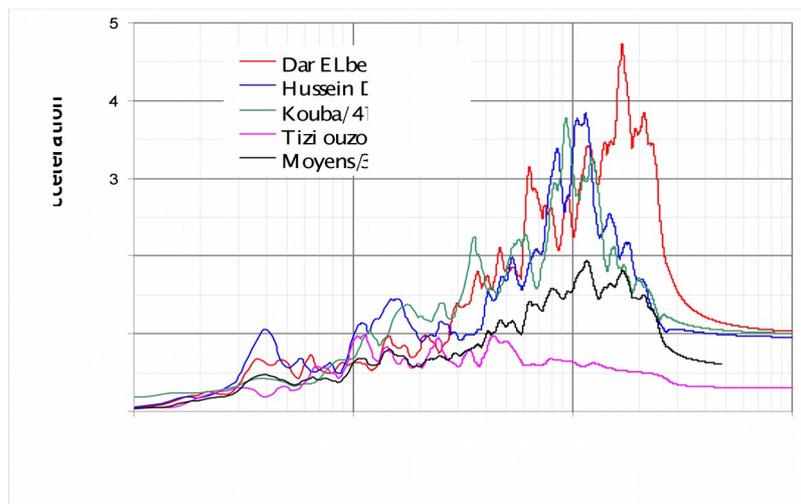
Fig. 5.10- Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance inférieur ou égale 20km lors du séisme de Bboumerdes 2003.



a)- Composante E-W

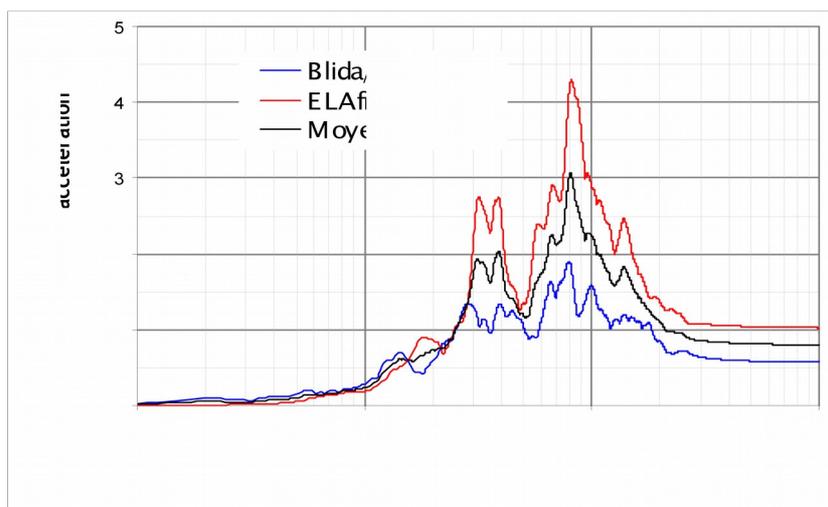


b)- Composante N-S

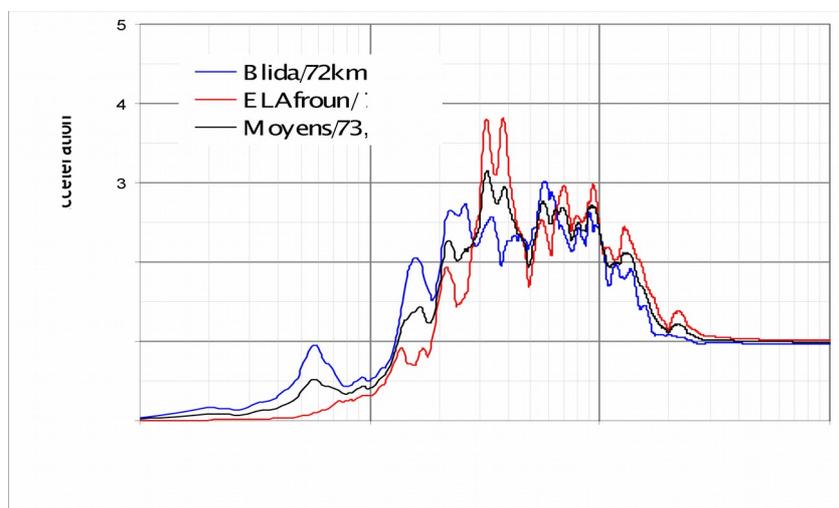


c)- Composante V

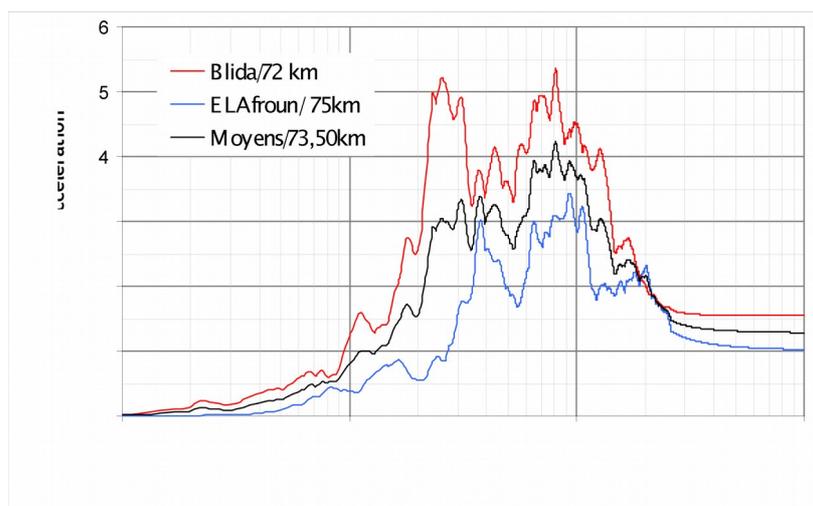
Fig. 5.11- Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance épacentral entre 20 et 50 km lors du séisme de Boumerdes 2003.



a)- Composante E-W

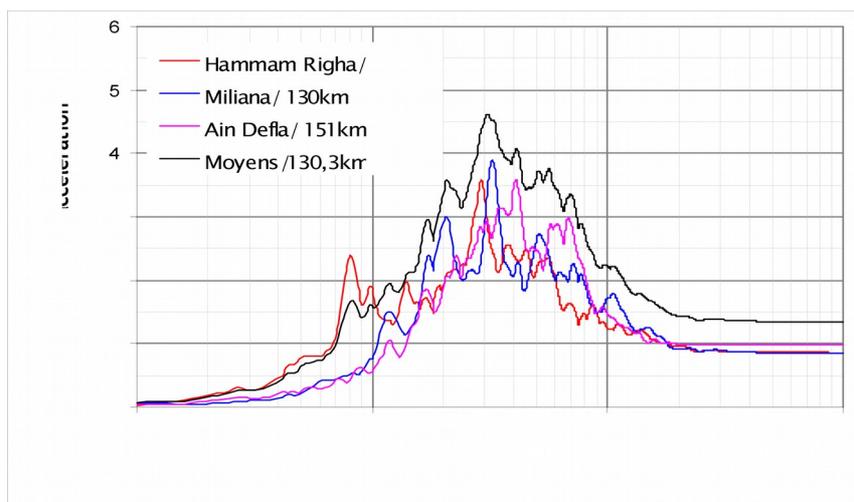


b)- Composante N-S

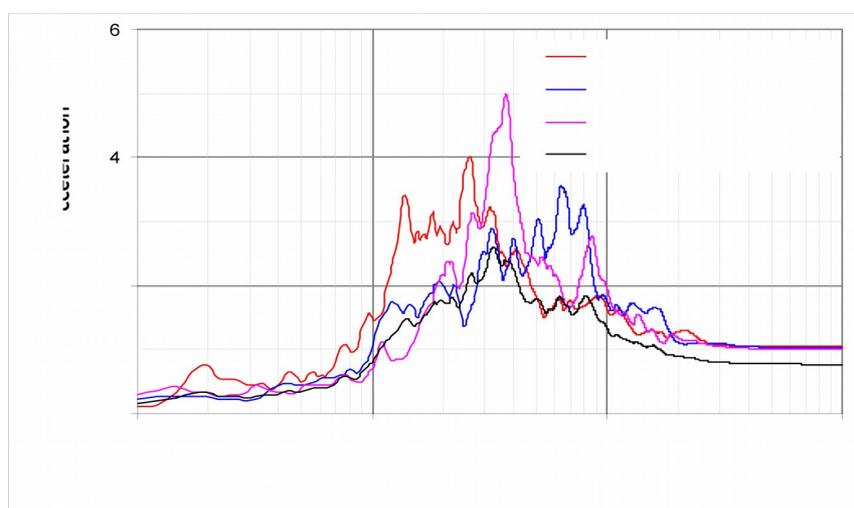


c)- Composante V

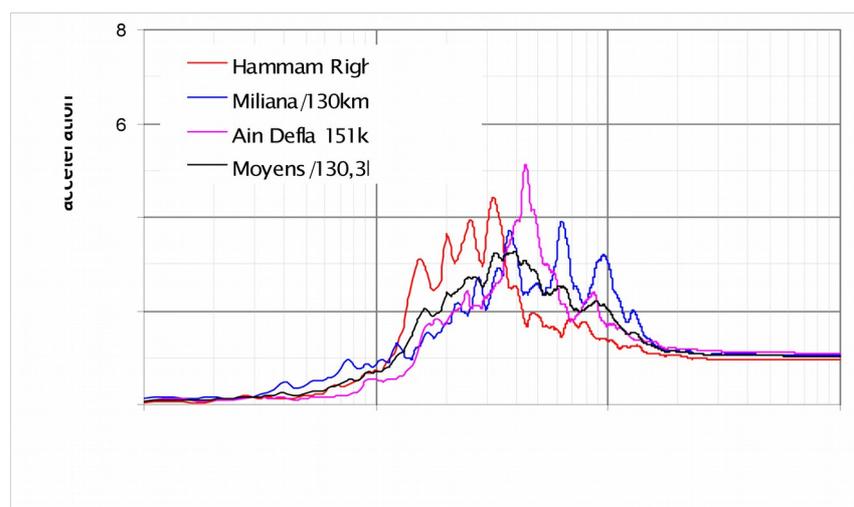
Fig. 5.12- Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance épacentral entre 50 et 100 km lors du séisme de Boumerdes 2003.



a)- Composante E-W

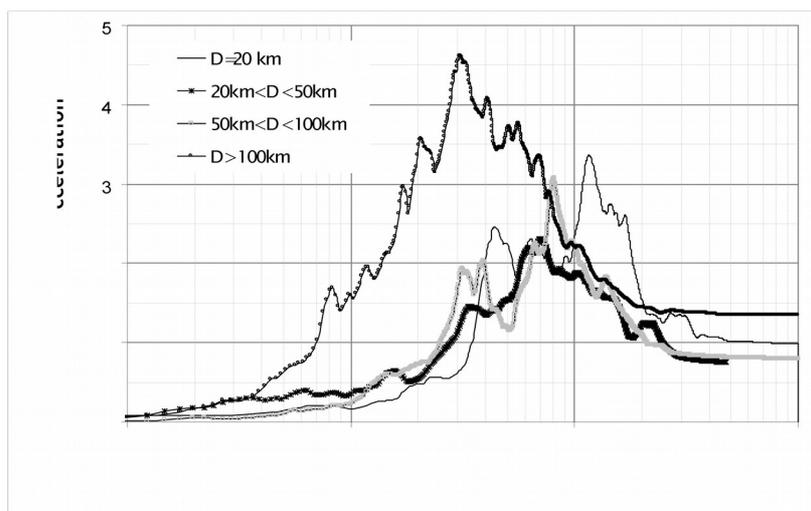


b)- Composante N-S

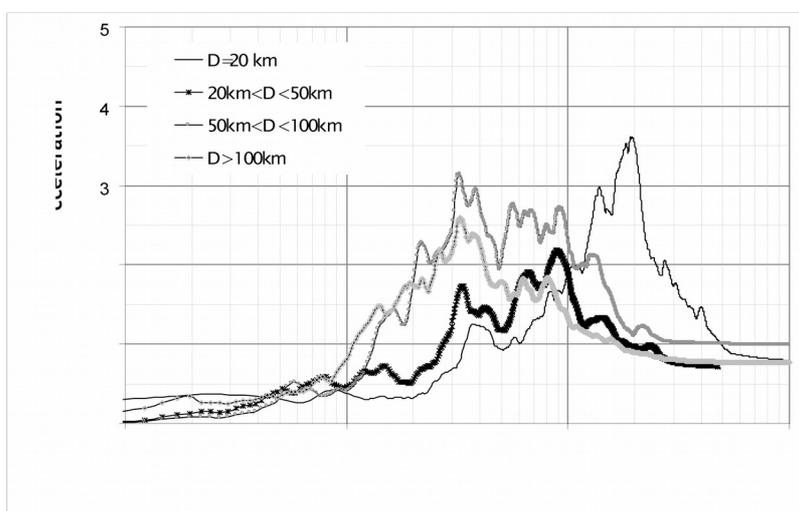


c)- Composante V

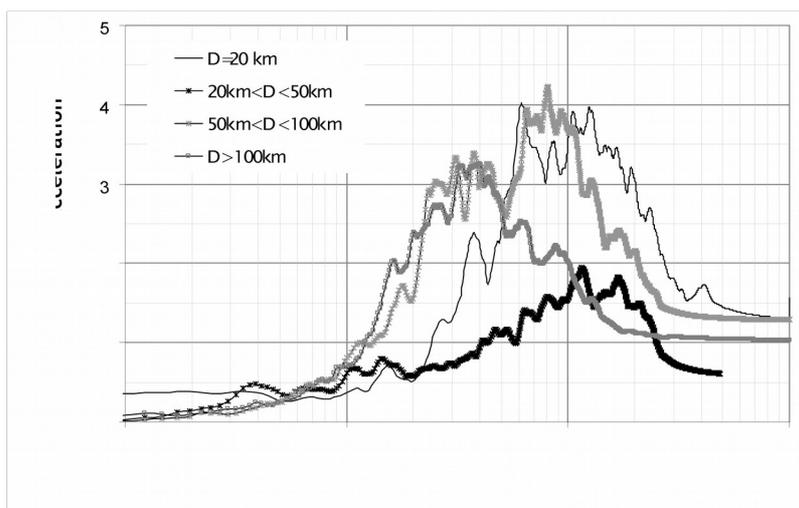
Fig. 5.13- Effet de la distance épacentrale sur les spectres de réponse d'accélération pour un coefficient d'amortissement 5% et une distance épacentral supérieur à 100km lors du séisme de Boumerdes 2003.



a)- Composante E-W



b)- Composante N-S



c)- Composante V

Fig. 5.14- Comparaison des spectres en pseudo accélérations normalisées pour différentes distances épicentrales.

Les ordonnées spectrales diminuent avec l'augmentation de la distance épacentrale. Puisque les formes spectrales sont presque similaires pour la gamme de la distance épacentrale de 20 à 41 km, donc la distance épacentrale n'affecte pas de manière significative la forme spectrale mais influe sur les ordonnées spectrales par l'atténuation de l'accélération au sol.

Dans les station E-W, N-S et V du site de Keddara1 (rocher) malgré la distance épacentrale égale à 20km mais le pseudo spectre d'accélération est inférieur au site de Dar EL Beida et Hussein Dey pour des distance épacentrales de 29 et 36km, respectivement. Ce qui montre que l'amplification du spectre de réponse au rocher est inférieure par rapport aux sites alluvionnaires. Les deux paramètres, le type de sol et la distance épacentrale influent sur l'amplitude du spectre de réponse.

Dans la figure 5.10, en champ principal ($d \leq 20km$), nous avons présenté deux spectres de réponse, l'un sur sol rocheux (Keddara1) et l'autre sur sol meuble (Keddara2). La composante verticale n'est pas réellement affectée et le pic est obtenu pour le sol ayant enregistré une accélération maximale plus grande.

Tandis que pour les composantes horizontales, ce sont les conditions de sol qui les gouvernent (section 5.4.2). L'accélération spectrale croît avec l'augmentation de la fréquence, atteint un pic à environ (5.30.Hz) pour le sol meuble, et la composante (N-S) du sol rocheux en suite décroît vers leur a_{max} aux fréquences élevées. Cependant pour les composantes (E-W) et (V) de Keddara1 (rocher), les accélérations spectrales sont uniformes sur une plage de fréquences de 3 Hz à 15 Hz puis décroissent vers a_{max} aux fréquences élevées.

Dans la figure 5.11, nous avons présenté les spectres correspondant à quatre distances épacentrales. Toutes sont situées dans la plaine de Metidja qui signifie que leurs conditions de sol ne changent pas radicalement.

Pour les composantes verticales, les amplitudes spectrales augmentent avec la fréquence, atteignent un pic puis décroissent vers a_{max} moyenne. Ces amplitudes décroissent avec l'augmentation de la distance épacentrale. Pour les composantes (E-W) et (N-S) cette variation n'est pas uniforme.

Dans la figure 5.12, nous remarquons que le site d'ELAfroun, plus distant que celui de Blida, où on a enregistré une accélération maximale plus importante, les amplitudes spectrales sont inversement proportionnelles à la distance épacentrale.

Dans la figure 5.13, exceptionnellement, pour la composante V, on constate que les amplitudes spectrales sont plus importantes pour le site le plus éloigné (Ain Defla). Mais pour les champs intermédiaires (Fig. 5.12) et lointain (Fig. 5.13), les amplitudes maximales sont à des fréquences moyennes (1 à 5Hz).

La forme du spectre de réponse est généralement similaire pour les différents groupes des distances épacentrales. L'accélération spectrale augmente graduellement avec l'augmentation la fréquence, atteint un maximum à environ 1 Hz puis diminue lentement vers l'accélération maximale moyenne aux hautes fréquences. L'amplitude spectrale pour chaque groupe de distance épacentrale diminue avec l'augmentation de la distance quelque soit le type de sol.

5.4.5. Effet de la durée sur les spectres de réponse

La durée d'un séisme est délicate à définir directement à partir de l'accélérogramme. Certains sismologues ont proposé de la définir à partir du diagramme d'HUSIDE, qui est un moyen commode de quantifier la variation du niveau d'excitation dans le temps. Par définition, si $a(t)$ est l'accélération fonction du temps, T la durée totale du séisme, la variation de l'intégrale [35] :

$$h(t) = \frac{\int_0^t [a(t)]^2 dt}{\int_0^T [a(t)]^2 dt}$$

(5.9)

Constitue le diagramme d'HUSIDE. Le terme « $\int_0^T [a(t)]^2 dt$ » mesure l'énergie contenue dans l'accélérogramme.

On peut alors définir la durée significative du séisme comme le temps requis pour passer du niveau 5% au niveau 95% [35,38]. Par ailleurs, il y a tendance à considérer la durée « tronquée », qui est la durée comprise entre les instants où l'accélération atteint pour la

première et la dernière fois une valeur de (0.05g ou 0.10g). La durée du mouvement du sol dépend du type de rupture de la faille, la direction et la vitesse de propagation de l'onde, et la nature du sol (ferme, meuble ou rocheux).

La durée du mouvement fort sur les spectres de réponse a été étudiée par plusieurs chercheurs, dont on cite Mohraz [33] et Tehranizadeh [37]. Il s'avère qu'une augmentation de la durée fait que le spectre de réponse soit plus aplatis et de plus faibles pentes. Généralement l'augmentation de la durée cause l'augmentation des amplitudes spectrales.

5.5. Rapport spectral normalisé NHVSR

Dans le chapitre 3, nous avons étudié les effets de site sur le contenu fréquentiel des mouvements sismiques aux moyens du rapport HVSR ainsi que le rapport spectral standard (SSR). Cependant, chacun des deux rapport spectraux HVSR et SSR dépend de la méthode de lissage utilisée. A cet effet, nous allons utiliser, dans cette section, une deuxième méthode pour étudier empiriquement les effets de site sur le contenu fréquentiel d'un accélérogramme mais cette fois sur le rapport de deux spectres de réponse en pseudo-ccélération normalisé, une composante horizontale (E-W ou N-S) et une composante verticale pour une même station. Nous obtenons ainsi un rapport HVSR normalisé que nous notons NHVSR [16].

La méthode NHVSR est appliquée pour l'ensemble des enregistrements (Tableau 3.1) en calculant les spectres de réponse élastiques normalisés ($\xi = 5\%$).

La fonction NHVSR (Rapport des spectres de réponse normalisés) est montrée sur les figures (5.15-a à 5.25-a) en comparant NHVSR avec HVSR pour les enregistrements sur Keddara1, Keddara2, Dar EL Beida, Hussein Dey, Kouba, Tizi ouzou, Blida, EL Afroun, Hammam Righa, Meliana et Ain Defla.

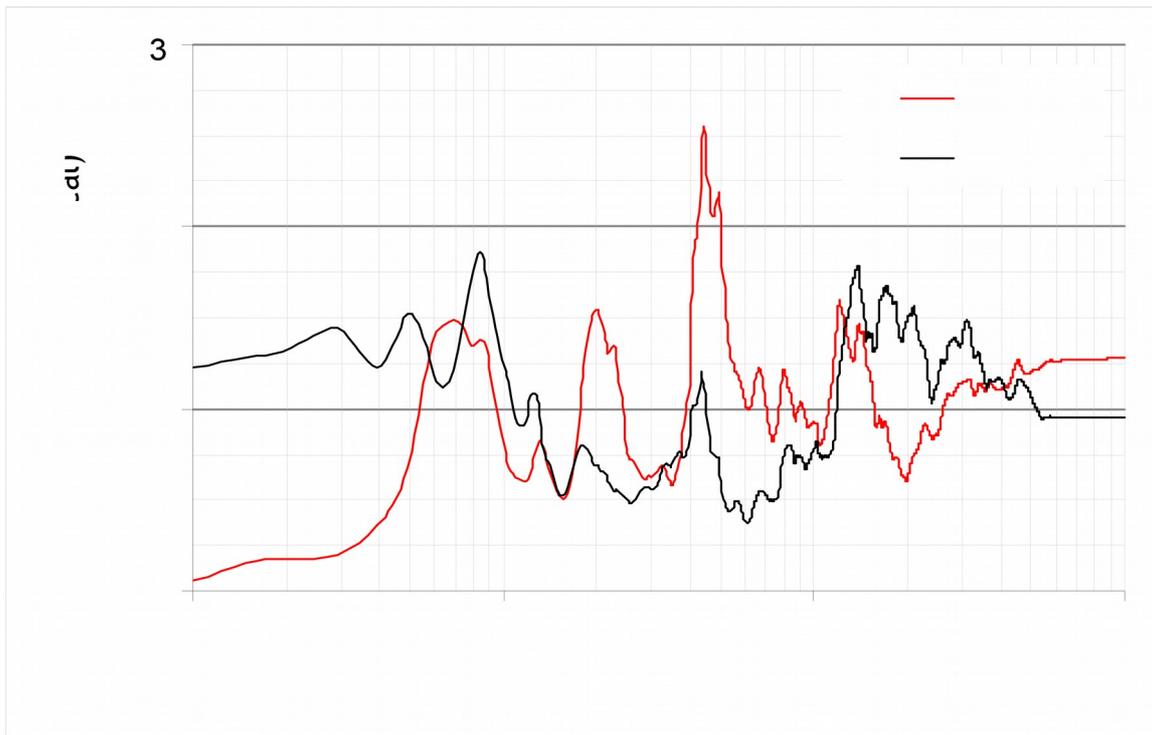
On constate que les fonctions HVER et NHVSR sont globalement similaires mais la fonction HVSR est plus sensible au lissage et ne peut être interprétée aussi clairement que la fonction NHVSR. Dans NHVSR, les fréquences propres sont plus claires et leurs pics aussi.

La seconde technique pour la caractérisation des sols est basée sur le rapport (V_{\max}/a_{\max}) pour des mouvements harmoniques.

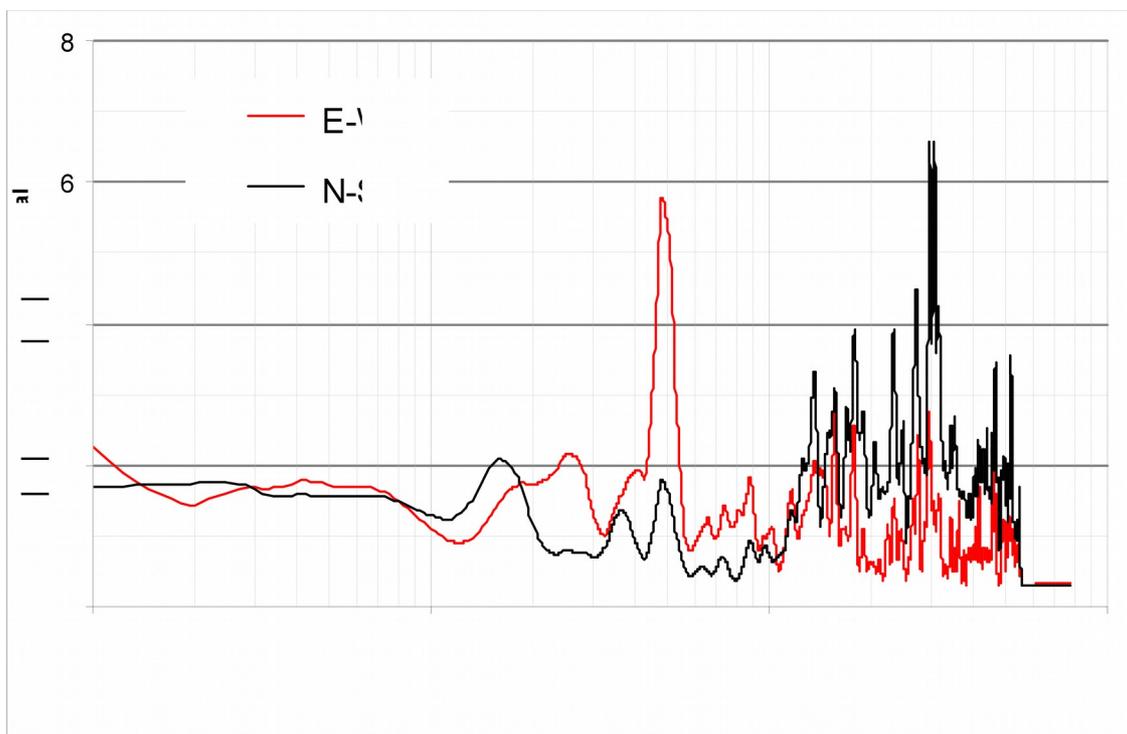
Théoriquement le rapport (V_{\max}/a_{\max}) est proportionnel à la période T . Donovan, (1989) dans [16] a travaillé avec des relations d'atténuation empiriques où il a montré que cette hypothèse est indirectement supportée par l'évidence sismologique. Il a proposé aussi que les valeurs moyenne de V_{\max}/a_{\max} prennent les valeurs 61cm/s/g et 122cm/s/g au rocher et sol meuble, respectivement.

Le tableau 5.3 donne les paramètres de caractérisation de site obtenu de l'interprétation des enregistrements sismiques du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003.

Parmi les deux méthodes (HVSr) et (NHVSR), la méthode NHVSR est plus sensible aux conditions de sol.

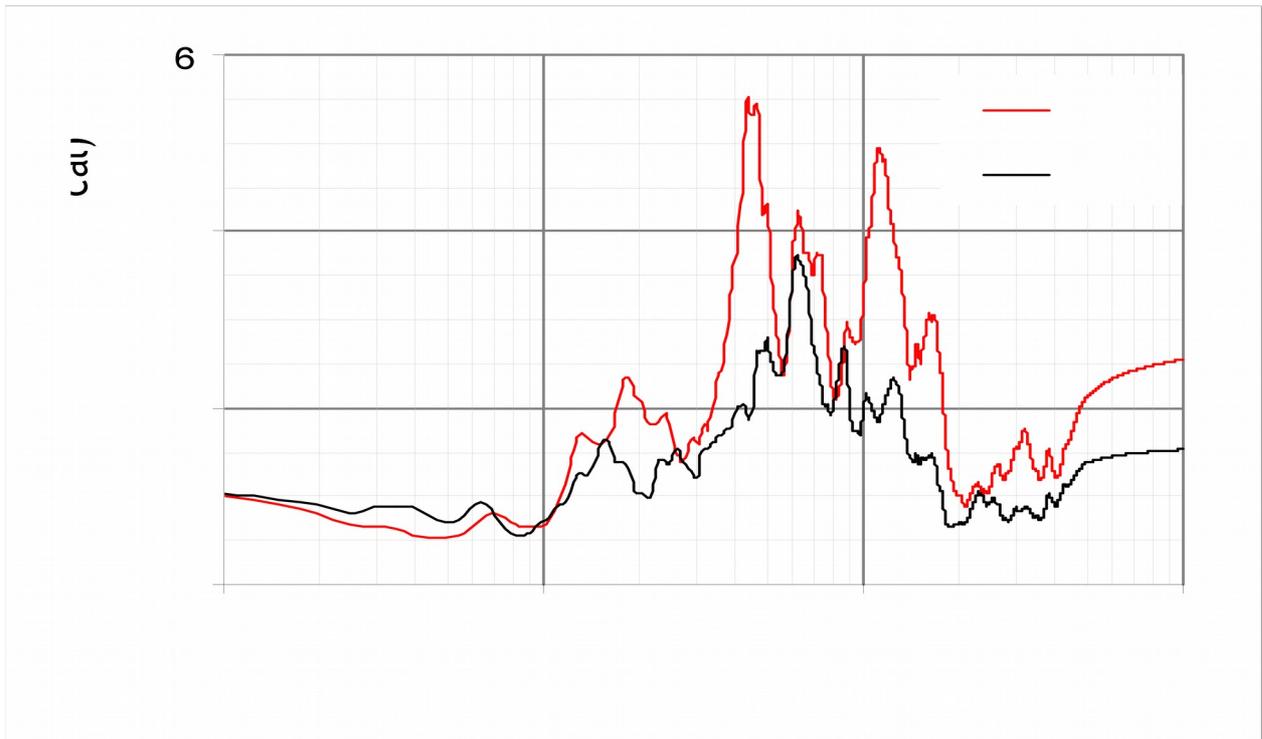


(a) -NHVSR

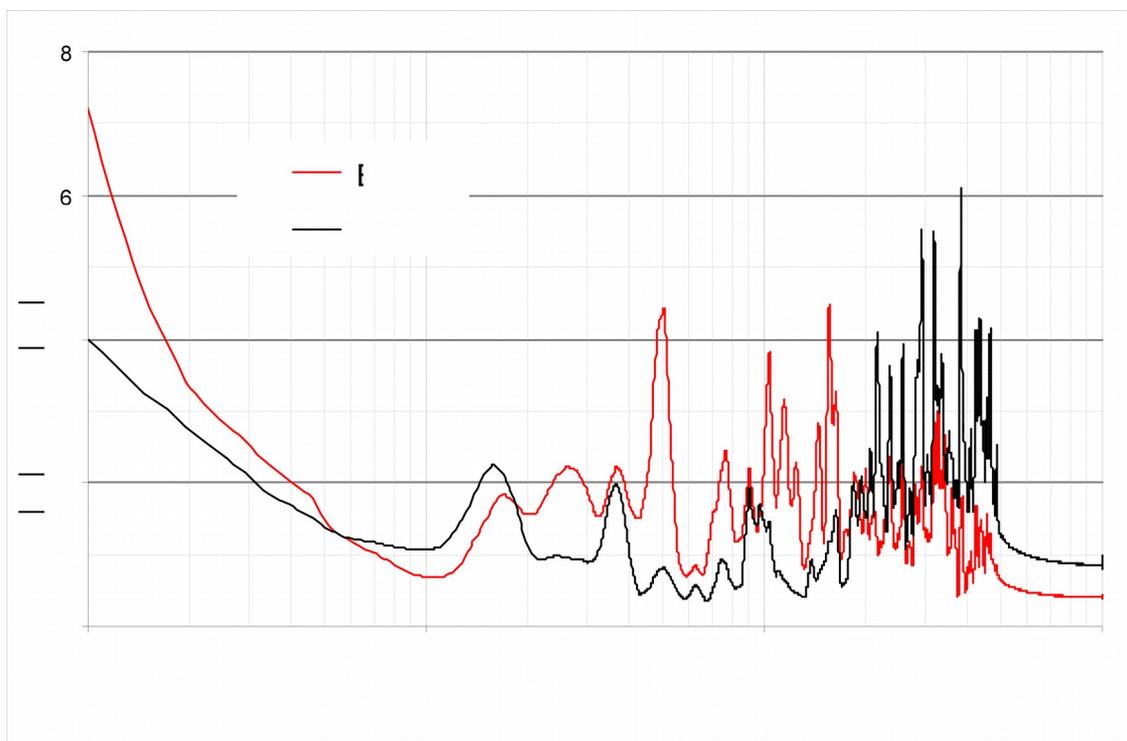


(b) -HVSZ

Fig. 5.15- Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSZ des accélérations en champ libre du séisme de Bouterdes 2003 au niveau du site de Keddara1.

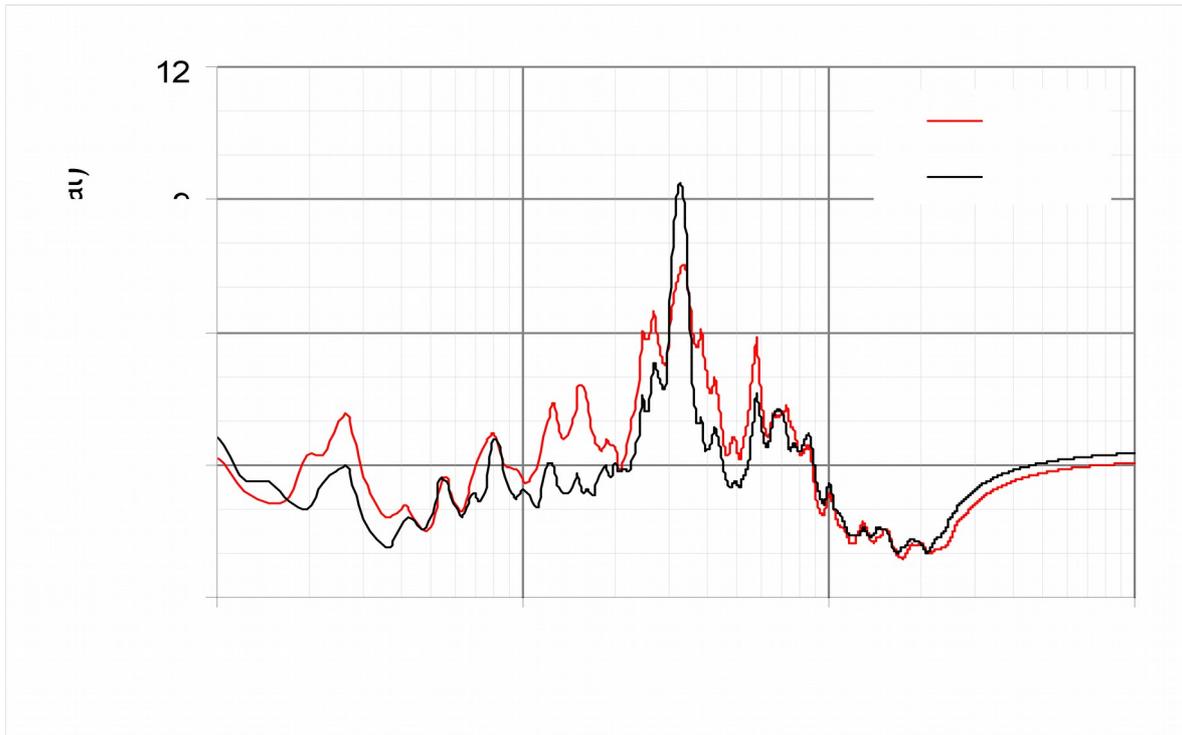


(a) -NHVSR

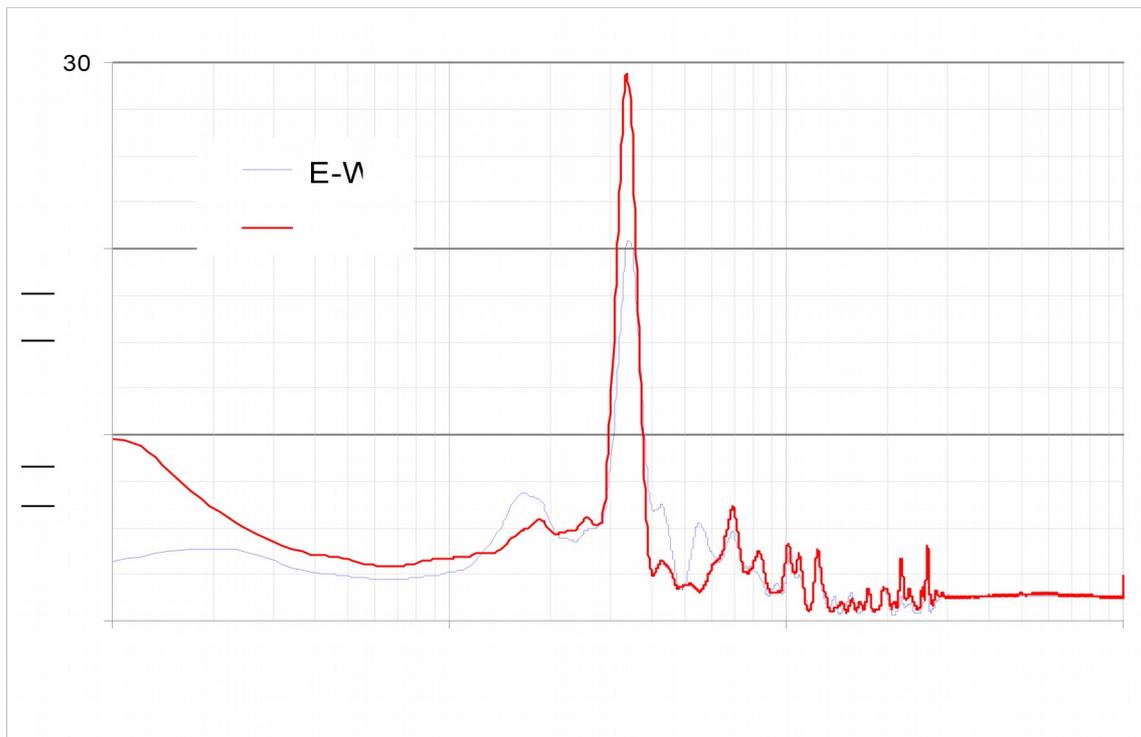


(b) -HVSR

Fig. 5.16- Comparaison entre les fonctions d’amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Keddara2.

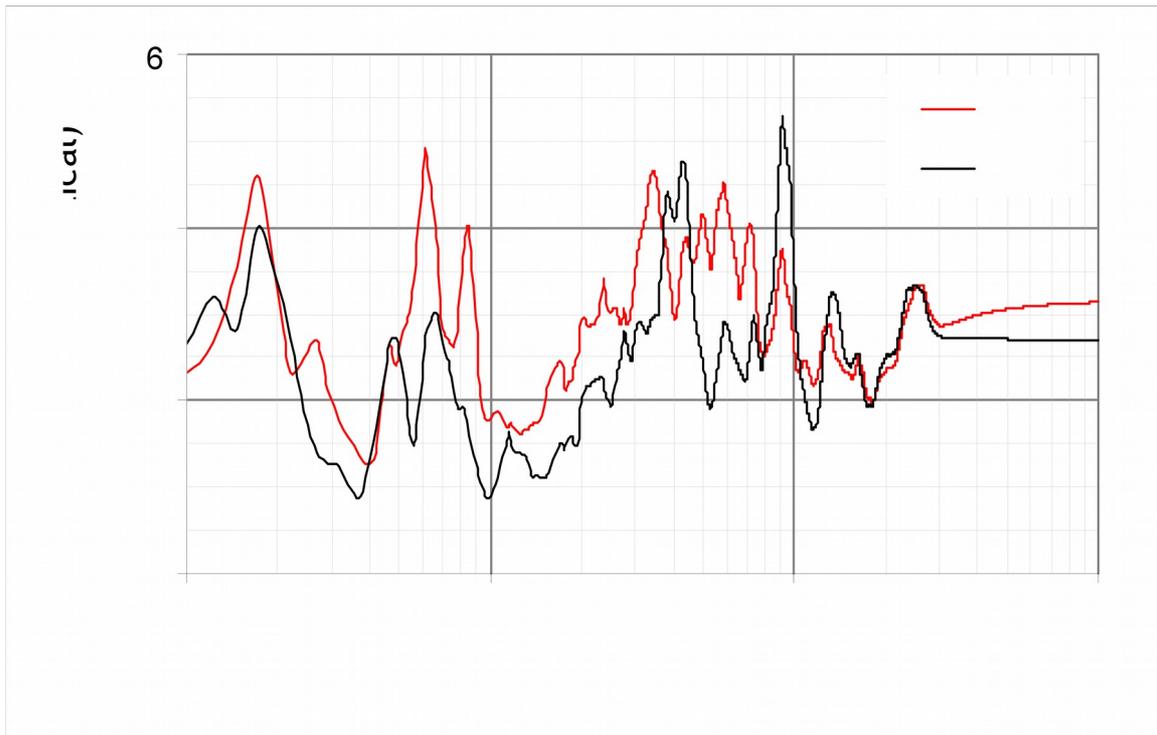


(a)–NHVSR

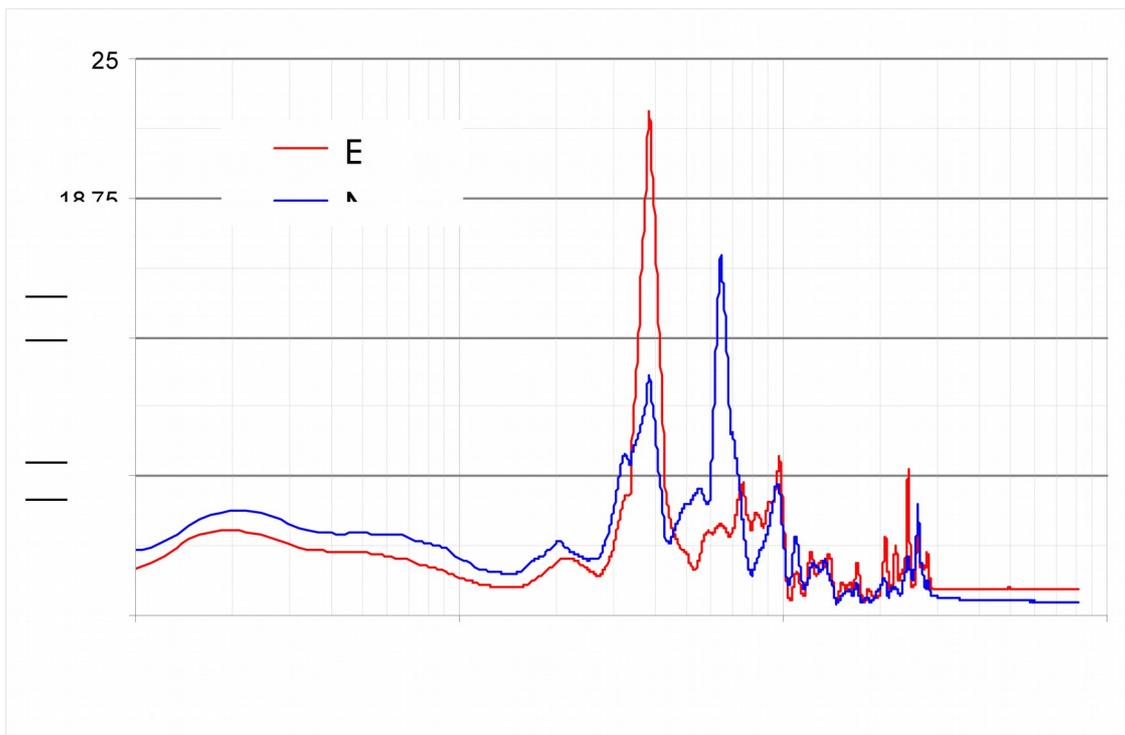


b) –HVSR

Fig. 5.17- Comparaison entre les fonctions d’amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Dar EL Beida.

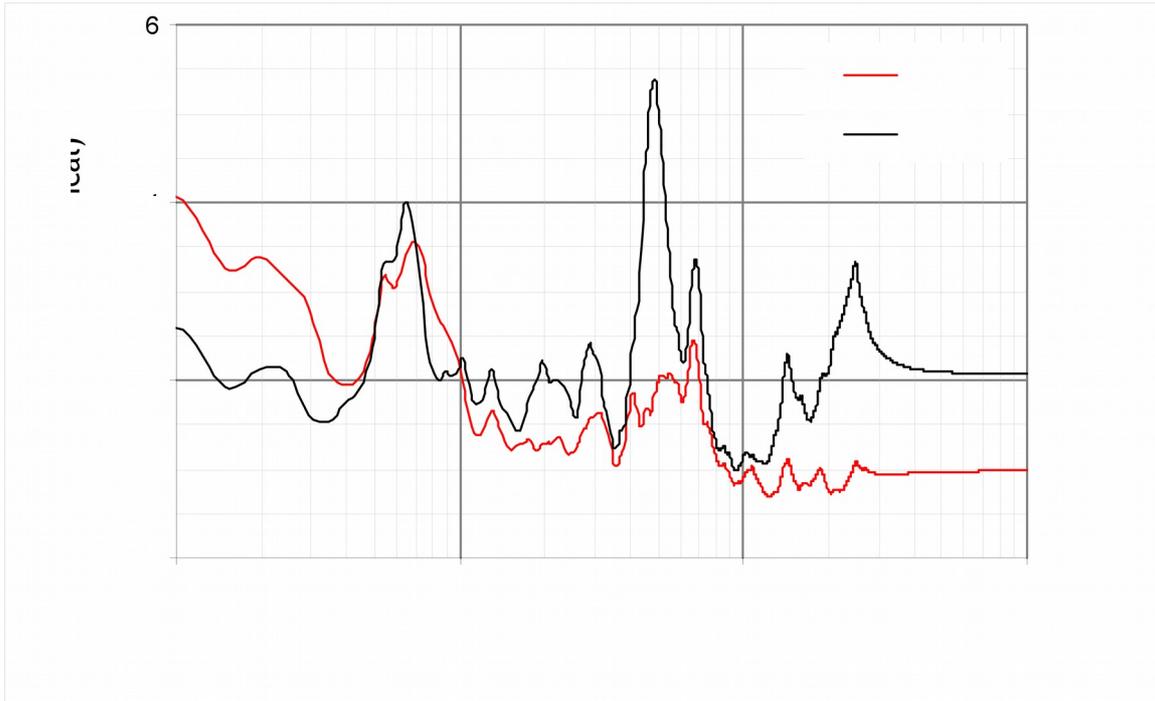


(a)-NHVSR

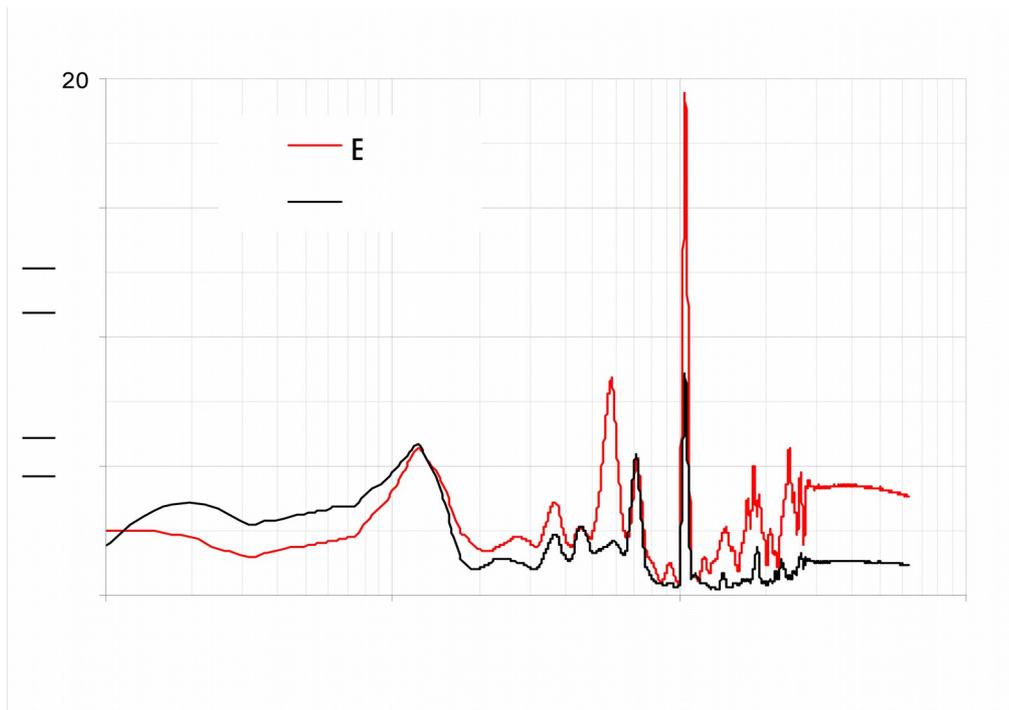


b) -HVSR

Fig. 5.18- Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Hussein Dey.

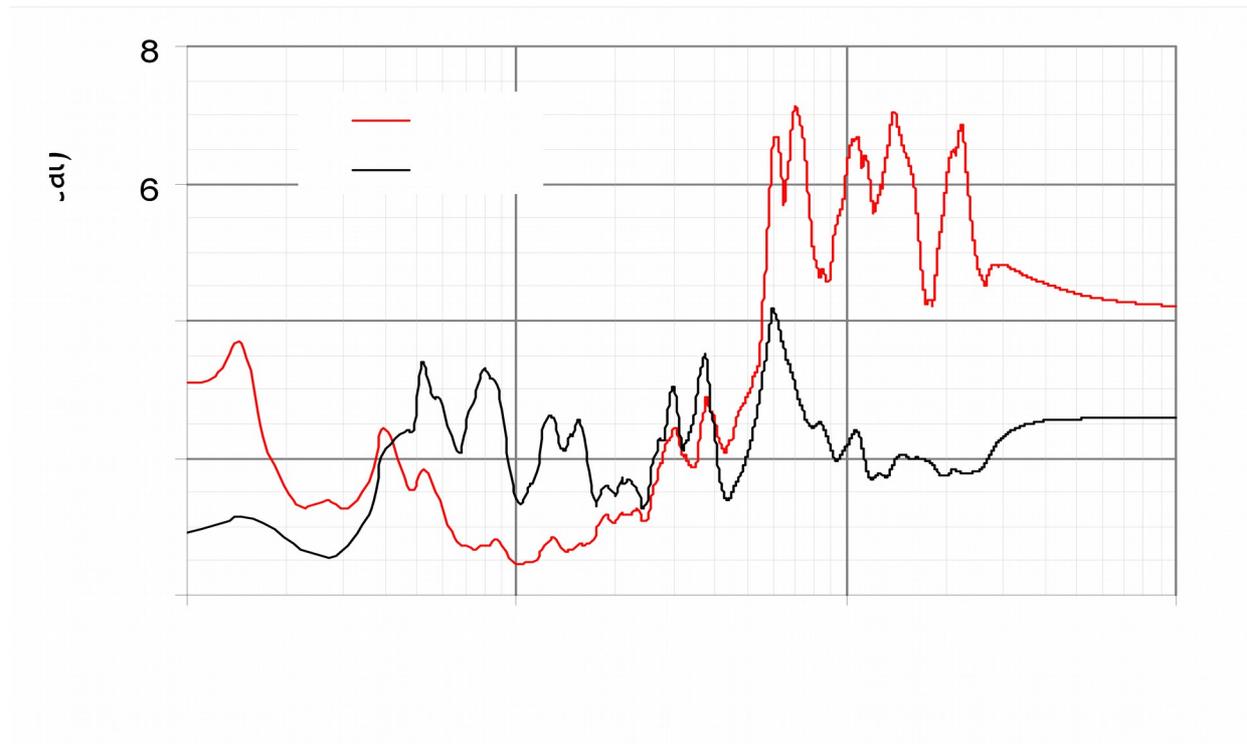


(a)-NHVSR

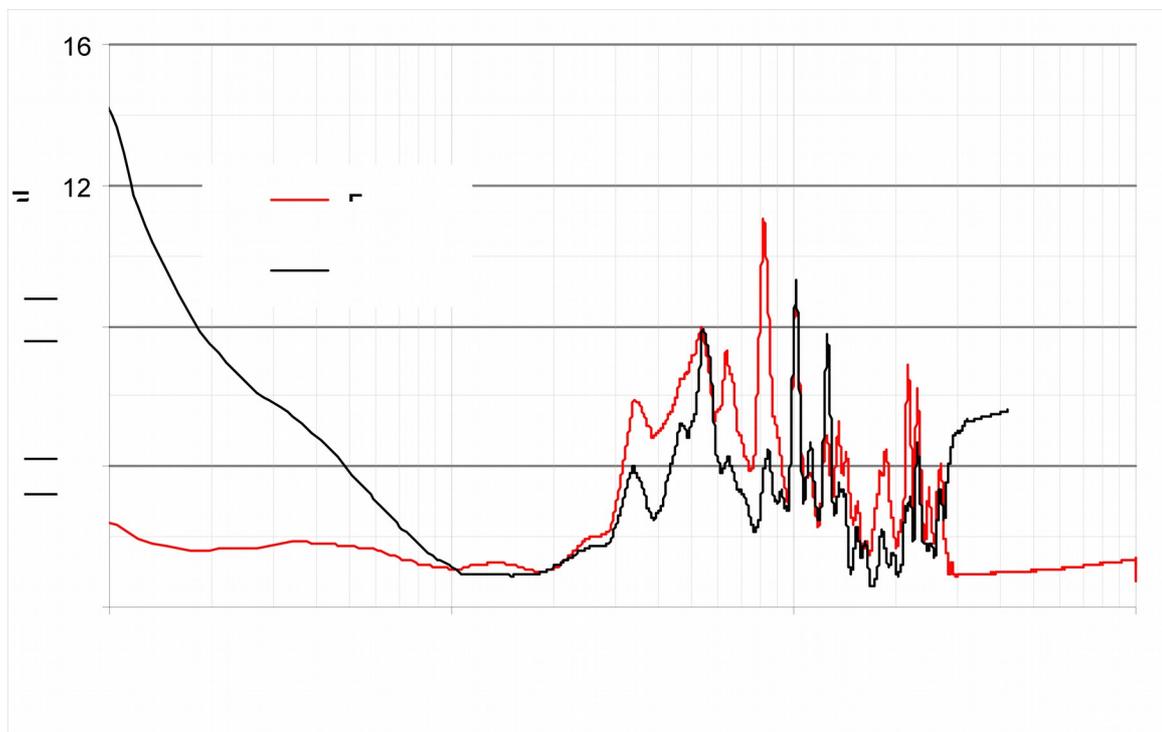


b) -HVSR

Fig. 5.19- Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Kouba.

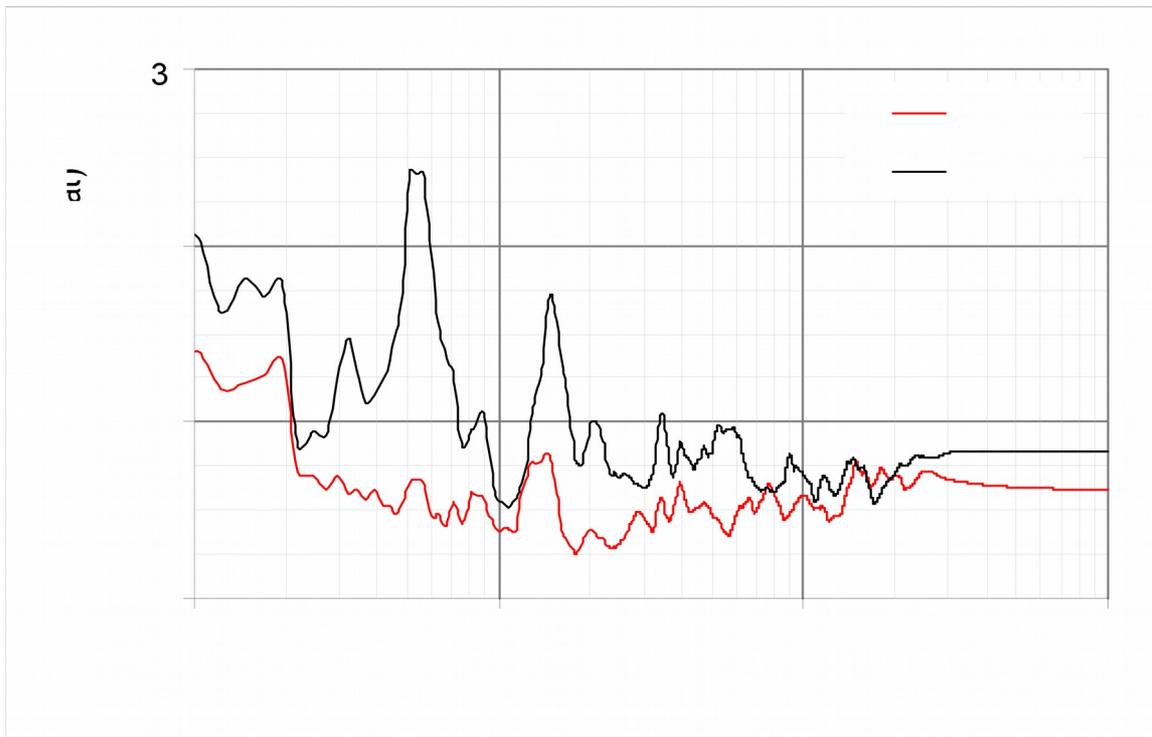


(a)-NHVSR

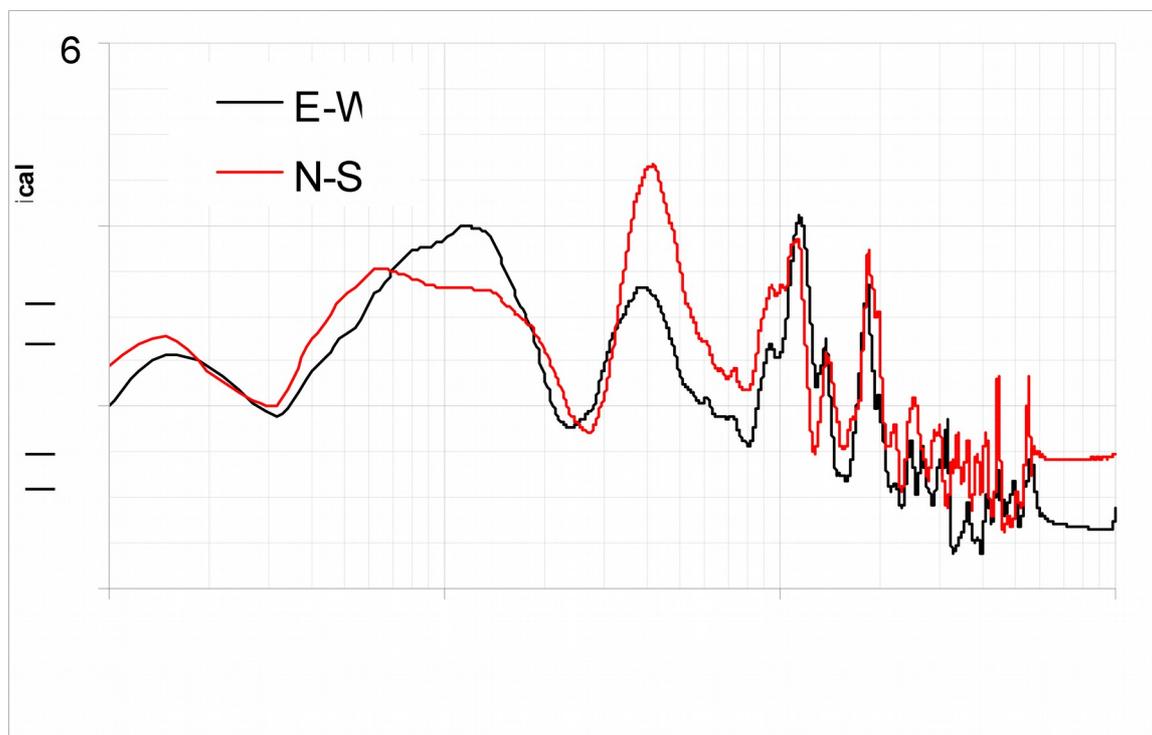


b) -HVSR

Fig. 5.20- Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Tizi Ouzou.

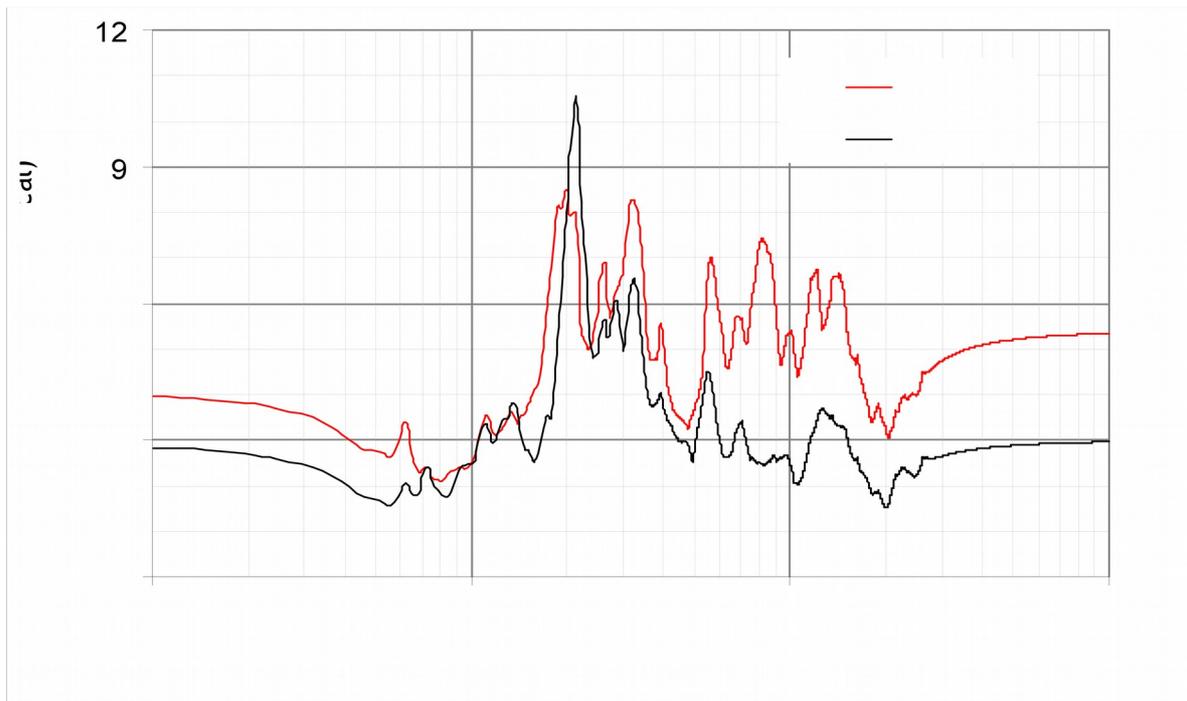


(a)-NHVSR

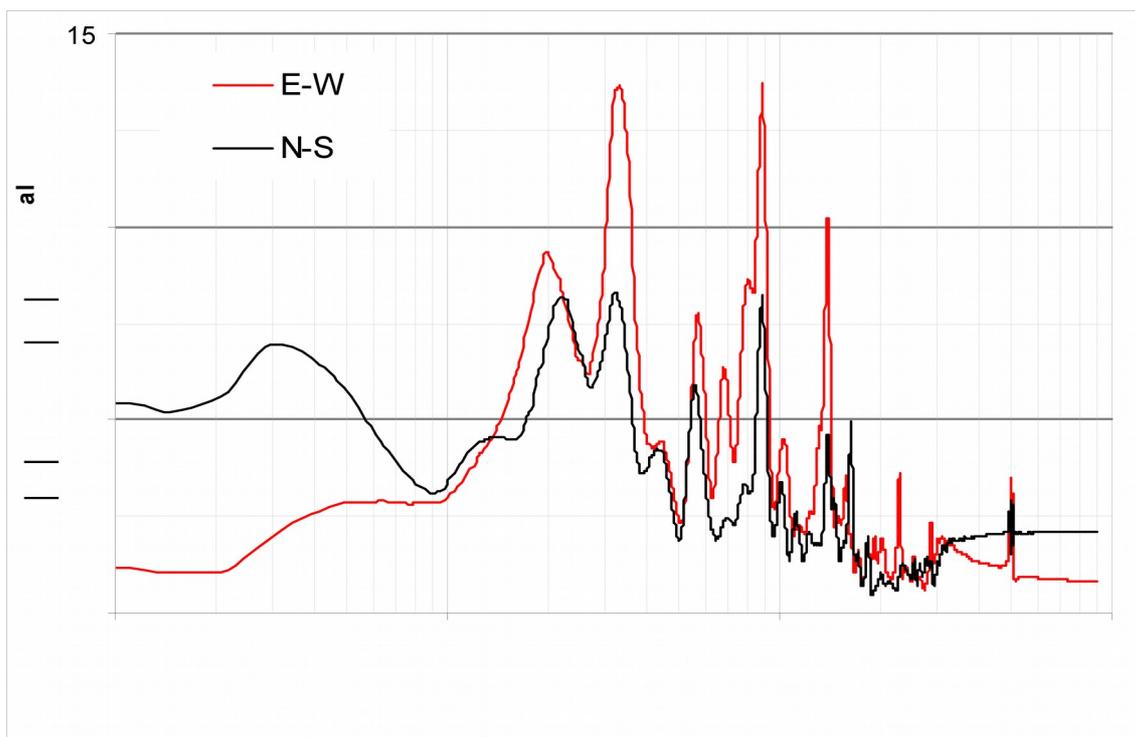


b) -HVSr

Fig. 5.21- Comparaison entre les fonctions d'amplification NHVSR et HVSr des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Blida.

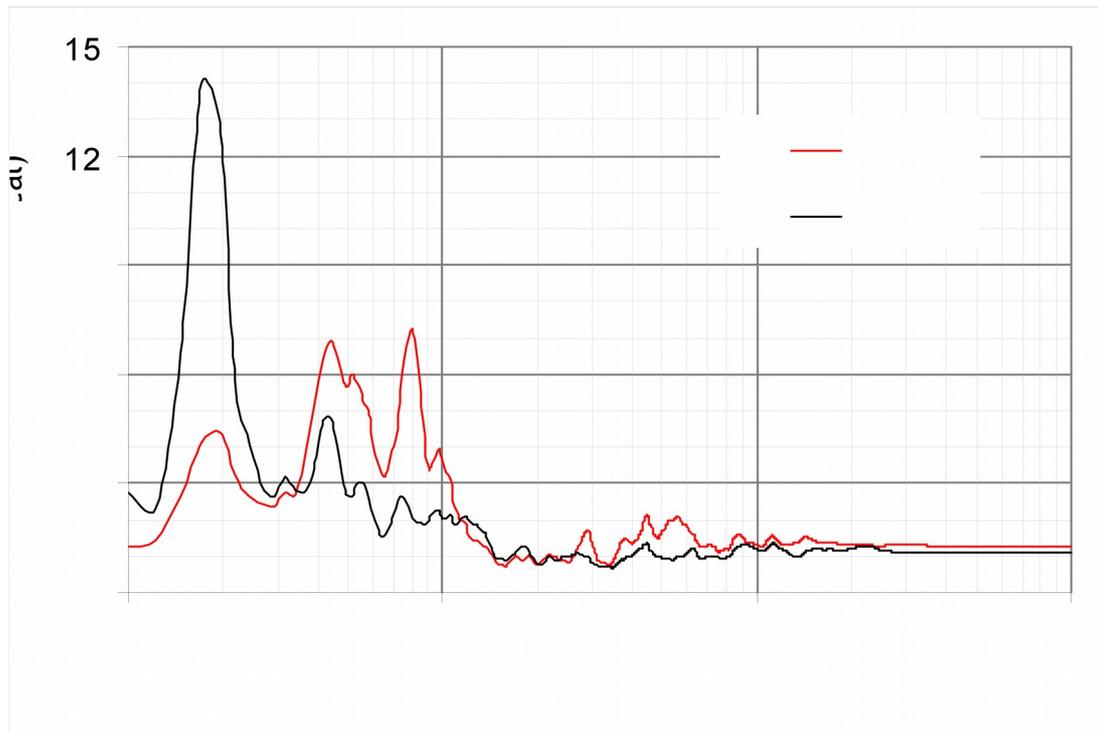


(a)–NHVSR

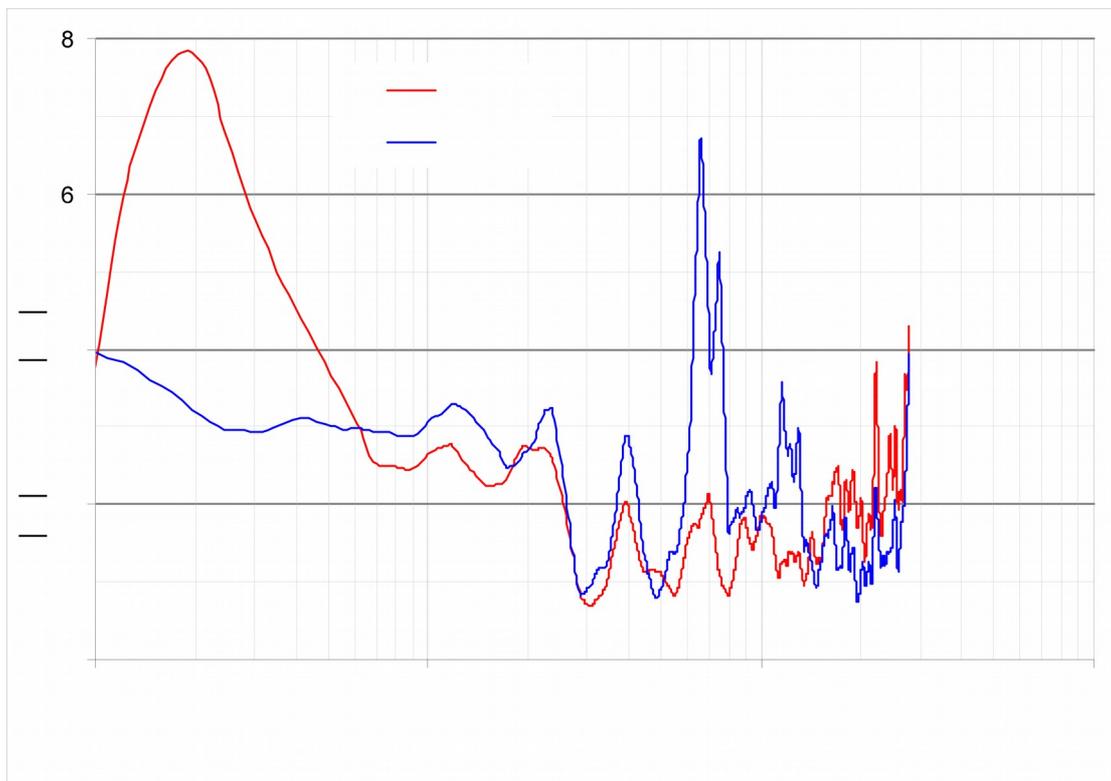


b) –HVSR

Fig. 5.22- Comparaison entre les fonctions d’amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de EL Afroun.

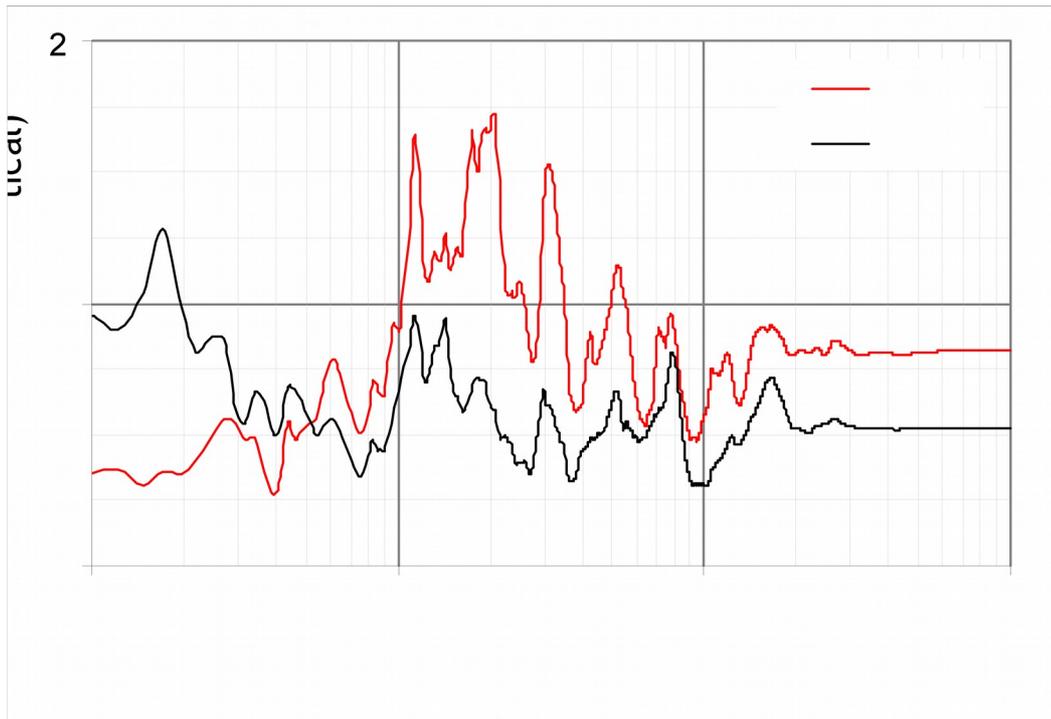


(a)–NHVSR

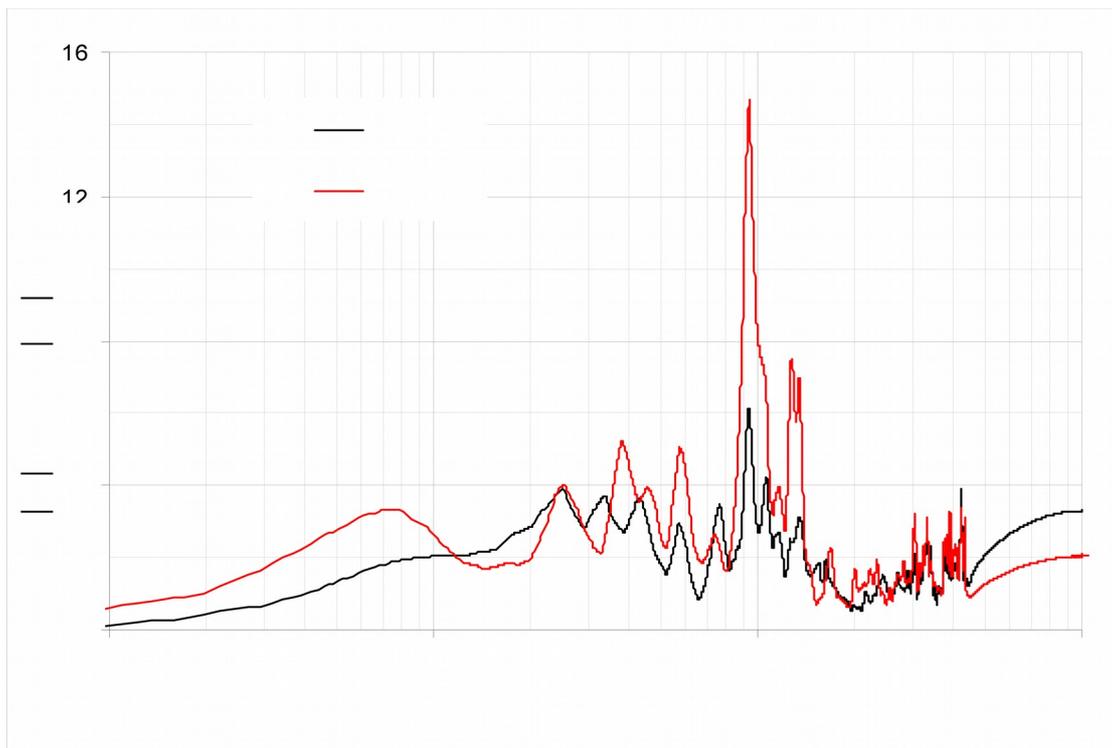


b) –HVS

Fig. 5.23- Comparaison entre les fonctions d’amplification NHVSR et HVS des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Hammam Righa.

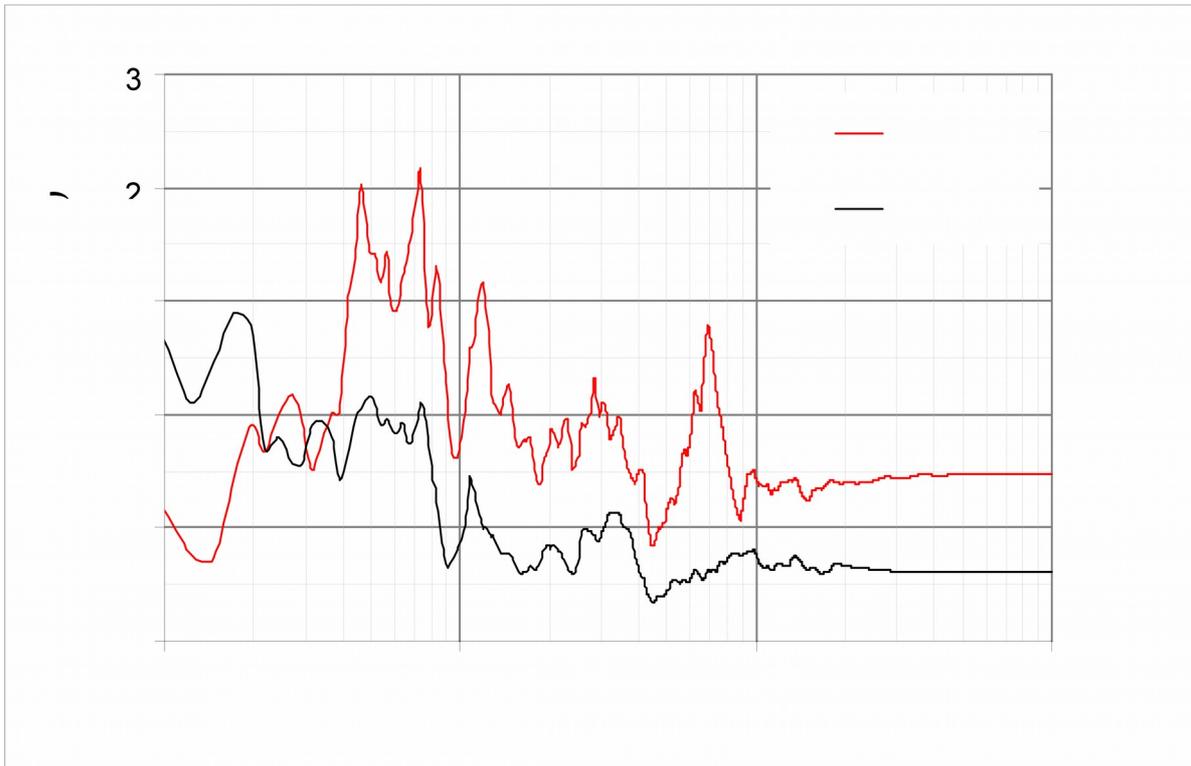


(a)–NHVSR

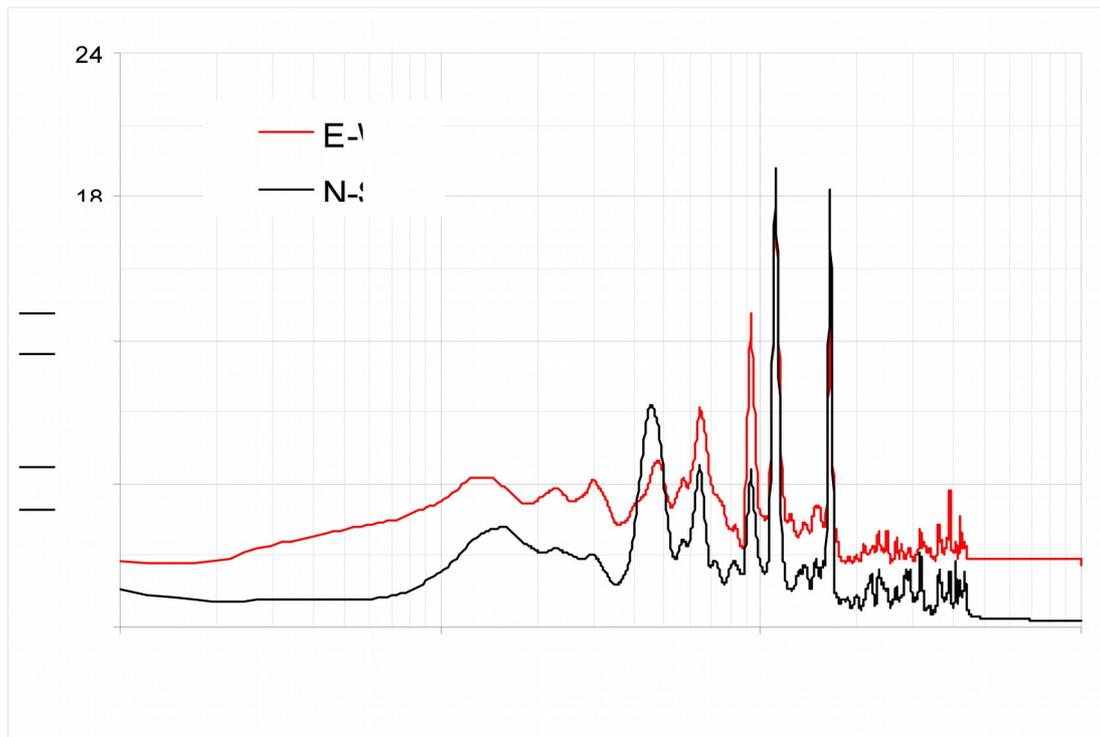


b) –HVSR

Fig. 5.24- Comparaison entre les fonctions d’amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Meliana.



(a)–NHVSR



b) –HVSR

Fig. 5.25- Comparaison entre les fonctions d’amplification NHVSR et HVSR des accélérations en champ libre du séisme de Boumerdes 2003 au niveau du site de Ain Defla.

Tableau 5.3 : les paramètres de caractérisation de site obtenu de l'interprétation des enregistrements sismiques du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003.

Station/ Distance épicentrale (km)	$T = 2\pi \frac{v_{\max}}{a_{\max}}$	T_{NHVSR}	A_{NHVSR}
Keddra1/20	0.338	0.638	1.45
	0.402	0.491	1.52
Keddra2/20	0.205	1.27	1.66
	0.438	1.52	1.59
Dar ELbeida/29	0.142	0.269	4.13
	0.477	0.244	2.84
Hussein Dey/36	0.658	0.17	4.59
	0.503	0.17	3.99
Kouba/41	0.366	0.68	3.63
	0.667	0.63	3.99
Tizi ouzou/49	0.653	0.14	3.67
	0.327	0.51	3.36
Blida/72	0.885	0.195	1.36
	0.545	0.147	1.814
EL Afroun/86	0.194	2.00	8.57
	0.374	2.12	10.56
Hammam Righa/110	0.622	0.20	4.39
	1.069	0.17	14.01
Meliana/130	0.474	0.27	0.56
	0.655	0.17	1.28
Ain Defla/151	0.342	0.464	2.02
	0.766	0.171	1.446

5.6. Conclusions

Nous avons étudié dans le présent chapitre l'influence des effets de site sur les spectres de réponses en pseudo accélération normalisés et aussi sur le rapport spectral normalisé (NHVSR).

Nous avons montré une influence significative des effets de site locaux sur les spectres de réponse du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003.

Les conditions de sol influencent la forme des spectres de réponse. Pour des sols meubles les courbes seraient plus plates et pendant des périodes plus grandes approximativement.

Les amplitudes des spectres de réponse sont plus élevées pour les sites meubles que pour les sites rocheux.

6.1. Introduction

Les règles parasismiques sont révisées et mises à jour en fonction de l'amélioration de la représentation des mouvements du sol, des sols et des structures. Ces révisions sont plus fréquentes ces dernières années. Un des principaux changements dans les règles parasismiques se fait sur les spectres de réponse réglementaires. Les règles Parasismiques Algériennes RPA [24] ont été également mises à jour en 2003 (après le séisme de Boumerdes 2003).

La plupart des spectres réglementaires ont été formulés en se basant sur des données enregistrées sur des sites alluvionnaires. Ces dernières fournissent une grande base de données pour étudier l'influence des différents paramètres du séisme comprenant l'état de sol sur les spectres de réponse.

L'influence des conditions locales de sol sur la forme spectrale peut aussi être montrée au moyen des spectres réglementaires. Les codes actuels (*RPA 99/2003* [24], *EUROCODE8* [39], et *UBC* [40]) donnent une importance à la classification des sites en fonction des conditions de site.

Dans le présent chapitre, une comparaison entre les Règles Parasismiques Algériennes *RPA99* [24] (version 2003) et deux autres règlements parmi les plus utilisés de part le monde, l'*EUROCODE8* [39] et l'*UBC1997* [40] est menée. L'objectif principal de cette étude comparative est d'étudier les différences qui peuvent être observées par l'utilisation des différents règlements pour estimer les effets de site selon une excitation sismique.

6.2. Classification des sites selon les règlements parasismiques

Les effets de sites sont pris en charge dans les règlements parasismiques par l'introduction des catégories définissant des types de sol.

Les paramètres géotechniques les plus utilisés dans les codes parasismiques, sont la vitesse de l'onde de cisaillement et la fréquence caractéristique de site f_0 . La vitesse de cisaillement moyenne sur les trente premiers mètres de profondeur V_{s30} à partir de la surface libre est un paramètre de classification économique et efficace pour un profil de sol peu profond.

En revanche, un profil de sol plus profond tels que les bassins sédimentaires, peut avoir une forte influence sur l'amplification sismique qui n'est pas prise en considération si une classification de site est basée uniquement sur des mesures à 30m de profondeur. De ce fait, une classification de sites basée sur les deux paramètres : V_{s30} donnée par l'équation (6.1) (Lussou [41]) et f_0 par l'équation (6.2) et adoptée.

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_i^n \frac{h_i}{V_{si}}}$$

(6.1)

$$f_0 = \frac{V_m}{4XH}$$

(6.2)

où H représente l'épaisseur totale du profil de sol, et V_m la vitesse moyenne de cisaillement définie par l'équation suivante [24]

$$Vm = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n \frac{h_i}{V_{si}}}$$

où h_i est l'épaisseur de la couche i du profil de sol et V_{si} la vitesse de l'onde de cisaillement dans la couche i.

6.2.1. Règles Parasismiques Algériennes RPA99

6.2.1.1. Classification des sites

Dans les Règles Parasismiques Algériennes RPA99 [24], les sites sont définis en fonction de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur une profondeur de 30 mètres du sol ($V_{s,30}$). Ces classes sont illustrées dans le tableau 6.1. Cependant, outre les valeurs des vitesses des ondes de cisaillement, les valeurs d'autres résultats d'essais (pénétromètre statique, SPT, pressiomètre....) peuvent être utilisés pour classier un site.

Tableau 6.1- Classification des sites d’après le RPA99 [24].

Type du site	Description du site	Vitesse de l'ondes de cisaillement (m/s ²)
S ₁	Rocheux	V _s ≥ 800
S ₂	Ferme	400 ≤ V _s < 800
S ₃	Meuble	200 ≤ V _s < 400
S ₄	Très meuble ou présence de 3 m au moins d’argile molle	100 ≤ V _s < 200

6.2.1.2. Spectre de réponse élastique

La forme du spectre de réponse élastique normalisé en accélération en fonction de la période T, pour un amortissement critique de 5% et sans tenir compte ni du type ni de la qualité de l’ouvrage, se calcule à l’aide des expressions suivantes :

$$\begin{cases}
 1,25 * A * \left(1 + \frac{1,5 * T}{T_1} \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\
 2,5 * (1,25 * A) & T_1 \leq T \leq T_2 \\
 2,5 * (1,25 * A) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3,0s
 \end{cases}$$

(6.3)

Où A est l’accélération nominale au rocher pour chaque zone d'activité sismique et T₁ et T₂ sont des périodes caractéristiques (Tab. 6.2).

Tableau 6.2- Périodes caractéristiques selon le RPA99 [24].

Site	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
T ₁ (Sec)	0,15	0,15	0,15	0,15
T ₂ (Sec)	0,30	0,40	0,50	0,70

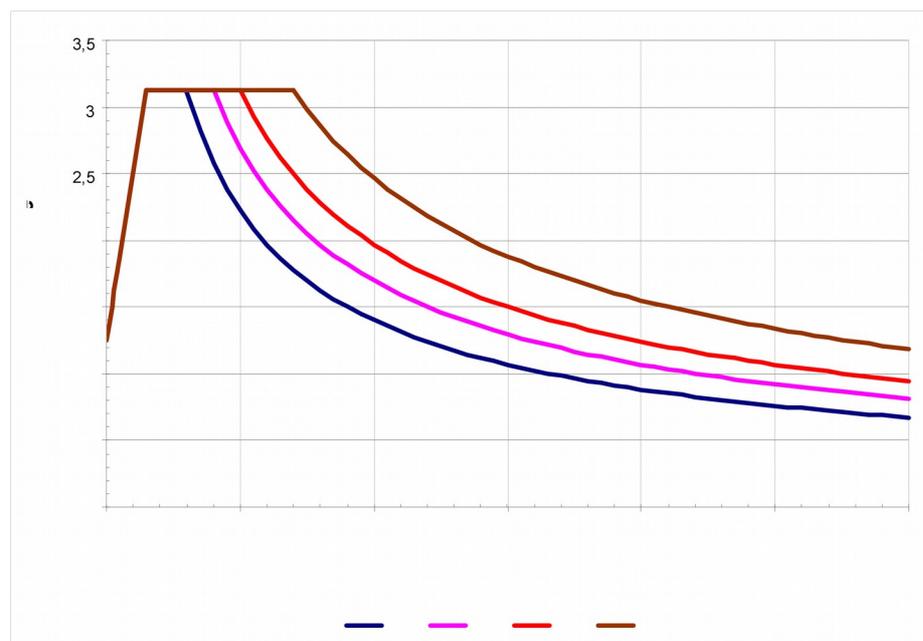


Fig. 6.1- Spectres de réponse élastiques réglementaires pour les 4 catégories de sites des Règles Parasismiques Algériennes [25].

6.2.2. Eurocode 8

6.2.2.1. Classification des sites

La classification des sites dans la définition du spectre de réponse élastique a été modifiée dans la nouvelle version de l'*Eurocode 8* [39] selon deux points: (1) il y a maintenant cinq classes de sites au lieu de trois, (2) les classes sont définies selon la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement dans les 30 mètres supérieurs du sol ($V_{s,30}$), par l'amélioration de la description de la stratigraphie et par l'introduction des valeurs des paramètres géotechniques non inclus auparavant. Les nouvelles classes sont illustrées dans le tableau 6.3.

La définition des deux nouvelles classes de sol est le résultat de deux modifications fondamentales: la première est la division de l'ancienne classe A en deux catégories, A et B ; la deuxième résulte en deux sous classes spéciales S_1 et S_2 . Pour les sites avec des conditions de terrain correspondant à ces dernières catégories, des études spéciales pour la définition de l'action sismique sont nécessaires. Pour les deux catégories et notamment pour le site S_2 , la possibilité d'une rupture du sol sous l'action sismique doit être considérée.

TABLEAU 6.3- CLASSIFICATION DES SITES D'APRÈS L'EUROCODE 8 [39].

Types	Description	Vitesse de l'onde de cisaillement (m/s ²)
A	Rocher comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant.	$V_s \geq 800$
B	Dépôt de sable très dense, de gravier ou d'argile très raide, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseurs.	$360 \leq V_s < 800$
C	Dépôts profonds de sable dense ou mi-dense, de gravier ou d'argile raide avec une épaisseur de plusieurs dizaines à centaines de mètres.	$180 \leq V_s < 360$
D	Dépôts de sol non cohésif lâche à mi-lâche, ou de sol cohérent principalement mou à ferme.	$V_s < 180$
E	Couche supérieure d'alluvion avec de $V_{s,30}$ des classes C ou D et une épaisseur variant de 5 à 20 m, sur une matériau plus raide $V_{s,30} > 800$ m/s	
S ₁	Dépôts contenant une couche d'au moins 10 m d'argile molle envasée (PI > 40) et forte teneur en eau.	$V_s < 100$
S ₂	Dépôts de sols liquéfiable, d'argiles sensibles, ou tout autre profile non inclus dans les types A-E ou S ₁	

Où h_i et V_{s_i} sont, respectivement, l'épaisseur et la vitesse de l'onde S pour la formation i , sur un total de N couches, présent dans les 30 mètres à partir de la surface. Les sites sont classés suivant cette valeur $V_{s,30}$ si elle est disponible. Si non, le nombre N_{SPT} (Nombre de coups de l'essai : Standard Penetration Test) sera utilisé. Pour les sites dont les caractéristiques se réfèrent aux classes S₁ et S₂, des études spécifiques sont nécessaires afin de déterminer les paramètres de référence.

6.2.2.2. Spectre de réponse élastique

Le spectre de réponse élastique $S_e(T)$ pour la période de retour de référence est défini par les expressions suivantes et les figure 6.2 et 6.3:

$$S_c(T) = a_g \cdot S \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad 0 \leq T \leq T_B$$

(6.4- a)

$$S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad T_B \leq T \leq T_C$$

(6.4- b)

$$S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_c}{T} \right] \quad T_c \leq T \leq T_D$$

(6.4- c)

$$S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_c T_D}{T^2} \right] \quad T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$$

(6.4- d)

Où $S_c(T)$ est l'ordonnée du spectre de réponse élastique, T est la période de vibration du système linéaire à un seul degré de liberté, avec a_g l'accélération de sol de calcul pour la période de retour de référence. T_B , T_C et T_D sont des valeurs définissant la gamme des périodes dans les courbes et sur le plateau formant le spectre. S est le paramètre de sol et η le facteur de correction d'amortissement. Pour les sols des classes A, B, C, D et E, les valeurs des paramètres S , T_B , T_C et T_D sont donnés pour deux types de tremblements de terre: (1) un tremblement de terre de type 1, correspondant à une magnitude $M_s > 5,5$ (Tab.6.4). (2) un tremblement de terre d'une magnitude de type 2 correspondant à $M_s < 5,5$ (Tab. 6.5).

Tableau 6.4- Valeurs des paramètres décrivant le spectre de réponse élastique de type 1 de l'Eurocode8 [39].

EC8 Type 1	S	T _b	T _c	T _d
Sol A $V_{s,30} > 800 \text{m/s}$	1.00	0.15	0.40	2.00
Sol B $360 < V_{s,30} < 800 \text{m/s}$	1.20	0.15	0.50	2.00
Sol C $180 < V_{s,30} < 360 \text{m/s}$	1.15	0.20	0.60	2.00
Sol D $V_{s,30} < 180 \text{m/s}$	1.35	0.20	0.80	2.00
Sol E $h \leq 20 \text{m}$; $V_{s,30}$ pour C et D d'autres matériaux de $V_{s,30} > 800 \text{m/s}$	1.40	0.15	0.50 0.40	2.00

Tableau 6.5- Valeurs des paramètres décrivant le spectre de réponse élastique de type 2 de l'Eurocode8 [39].

EC8 Type 2	S	T_b	T_c	T_d
Sol A $V_{s,30} > 800\text{m/s}$	1.00	0.05	0.25	1.20
Sol B $360 < V_{s,30} < 800\text{m/s}$	1.35	0.05	0.25	1.20
Sol C $180 < V_{s,30} < 360\text{m/s}$	1.50	0.10	0.25	1.20
Sol D $V_{s,30} < 180\text{m/s}$	1.80	0.10	0.30	1.20
Sol E $h \leq 20\text{m}$; $V_{s,30}$ pour C et D d'autres matériaux de $V_{s,30} > 800\text{m/s}$	1.60	0.05	0.25	1.20

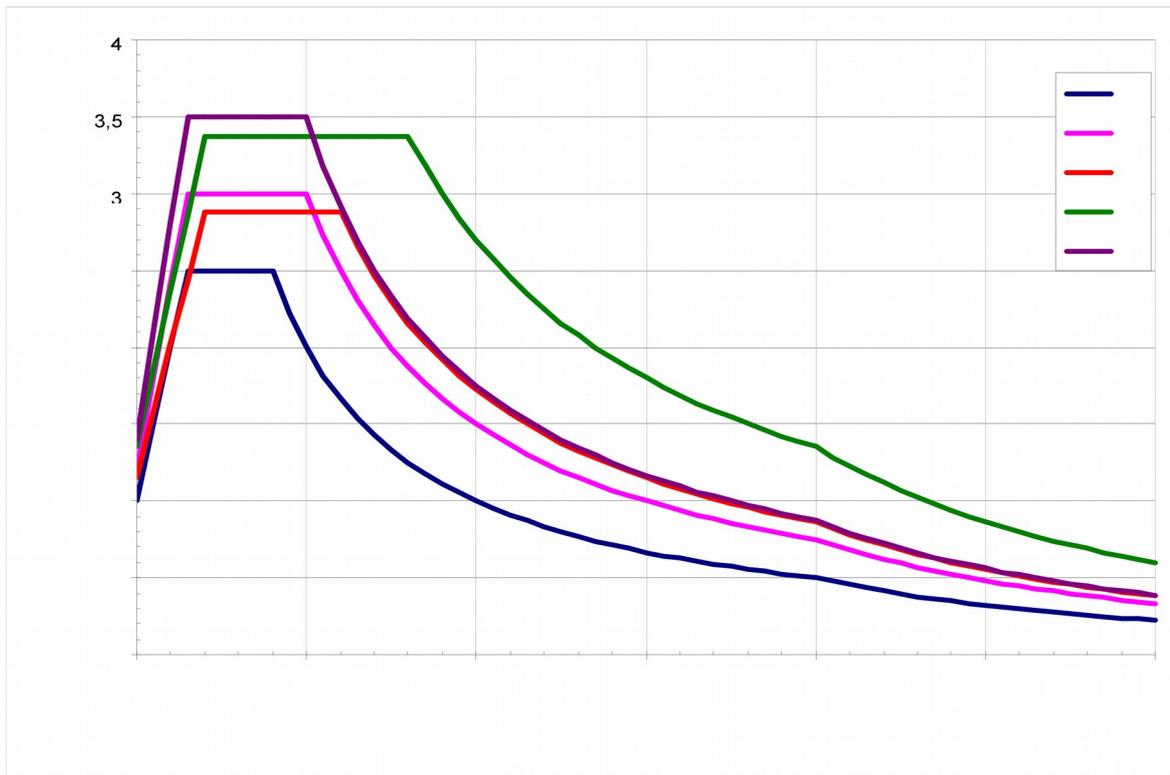


Fig. 6.2- Spectres de réponse élastiques du type 1 pour les 5 classes de sol de l'EC8 [39].

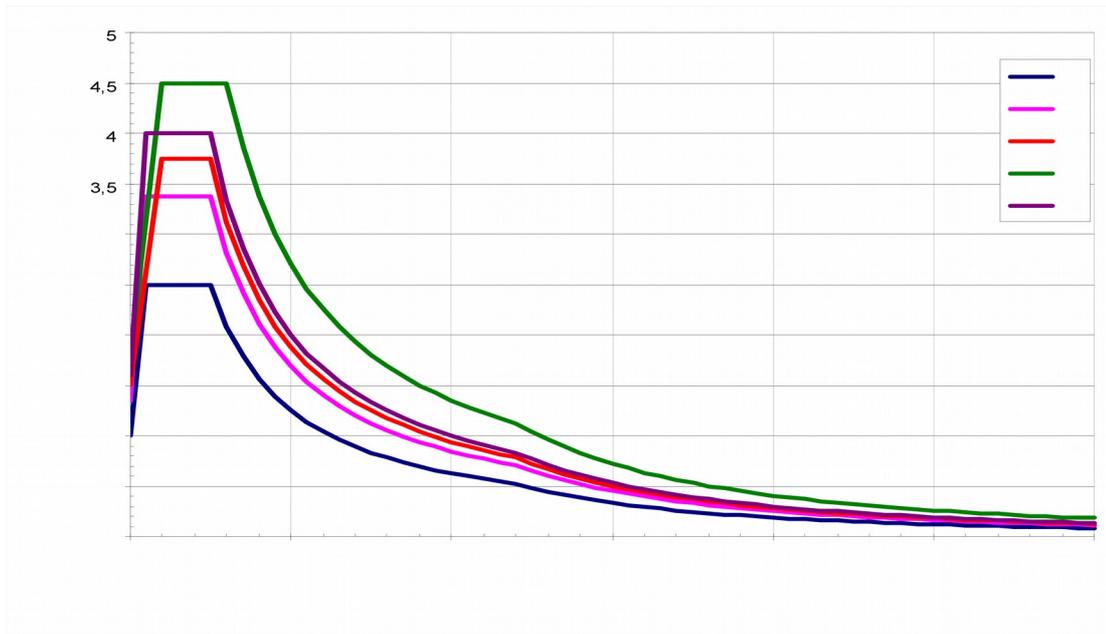


Fig. 6.3- Spectres de réponse élastiques du type 2 pour les 5 classes de sol de l'EC8 [39].

6.2..3. Uniform Building Code (UBC1997)

6.2.3.1. Classification des sites

En 1997, l'UBC [40] a adapté une nouvelle classification contenant six types de sol (Tab.6.6), S_A jusqu'à S_F . Cinq de ceux-ci S_A à S_E , sont considérés comme profils stables. Les catégories de sol sont basées sur la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement dans les 30 premiers mètres ou moins contrairement aux éditions précédentes. UBC 1997 n'utilise pas directement les profils de sols dans l'équation de la force de cisaillement à la base. Les classes S_A à S_F sont utilisées en combinaison avec le facteur de zone sismique Z et les facteurs de proximité à la source N_a et N_v [40].

Tableau 6.6 - Classification des sols d'après l'UBC1997 [40].

Type de site	Description du site	Vitesse des ondes de cisaillement (m/s)
S_A	<i>Roche dure</i>	$V_s \geq 1500$
S_B	<i>rocher</i>	$760 \leq V_s < 1500$
S_C	<i>Sol très dense</i>	$360 \leq V_s < 760$
S_D	Sol raide	$180 \leq V_s < 360$
S_E	Sol mou	$V_s < 180$
	Sol nécessitant une évaluation spécifique	

6.2.3.2. Spectre de réponse élastique

Le spectre de réponse élastique $S_e(T)$ pour la période de retour de référence est défini par les expressions suivantes et la figure 6.4 [40]:

$$S_e = \begin{cases} \left(C_a + \frac{1,5 C_a T}{T_B} \right) & T \leq T_B \\ 2,5C_a & T_B \leq T \leq T_C \\ \frac{C_v}{T} & T \geq T_C \end{cases}$$

C_a et C_v sont les coefficients sismiques et les paramètres T_B et T_C sont donnés par les deux expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_C = \frac{C_v}{2,5C_a} \\ et \\ T_B = 0.2T_C \end{array} \right.$$

(6.6)

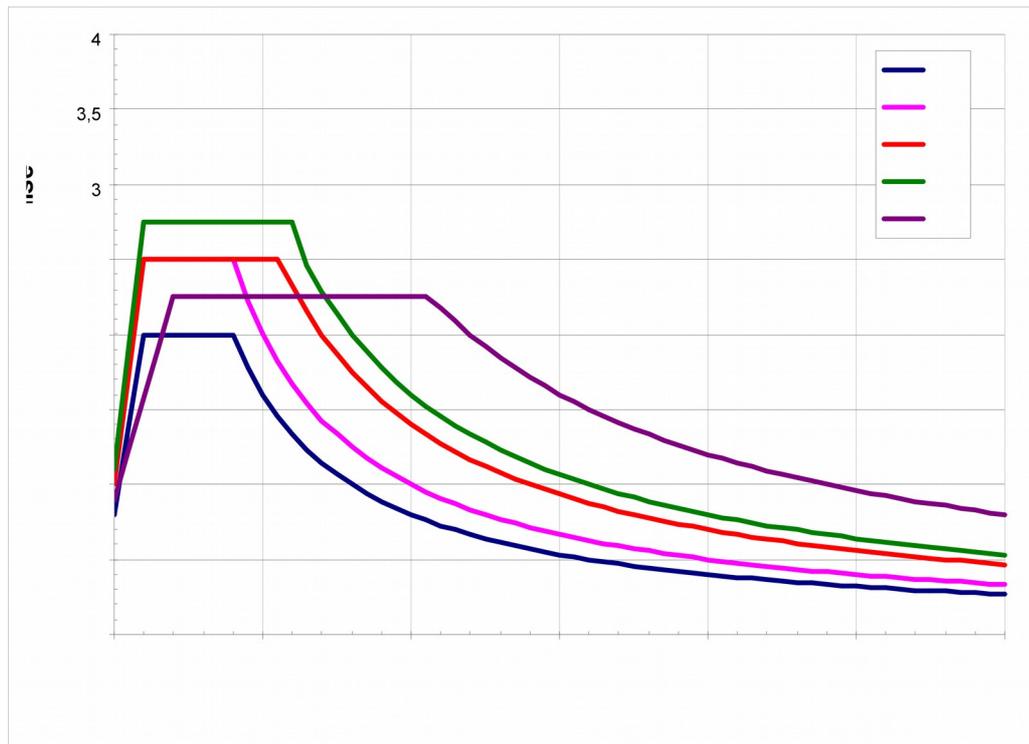


Fig. 6.4. Spectre de réponse élastique de l'UBC97 [40].

6.3. Applications

L'objectif principal des applications ci-dessous est de mener une étude comparative entre les spectres de réponse normalisés calculés à partir des accélérogrammes enregistrés lors du séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003, d'une magnitude de 6.8 à des stations situées à des distances épacentrales comprises entre 20 et 40km ($20\text{km} \leq d \leq 40\text{km}$). Les stations répondant à cette catégorie sont : Keddara1 et Keddara2 ($d=20\text{km}$), Dar EL Beida ($d=29\text{km}$), Hussein Dey ($d=36\text{km}$) et Kouba ($d=40\text{km}$).

Afin de mener l'étude comparative, nous allons tracer le spectre de réponse normalisé moyen des composante E-W, N-S et nous allons le comparer aux spectres de réponse élastiques du l'RPA99 (version 2003) [24], Eurocode 8 [39] et UBC97 [40].

Les différences significatives dans la forme spectrale entre les données du tremblement de terre de Boumerdes 21 Mais 2003 et les spectres réglementaires (*RPA99 (version 2003), Eurocode 8 et UBC97*) sont produites aux fréquences à environ 0.1 et 2 Hz pour une distance épacentral de 40 km. Les amplitudes des spectres de réponse moyens du

tremblement de terre de Boumerdes du 21 Mai 2003 à ces distances sont sensiblement inférieures à celles des réglementaires.

A partir de cette comparaison, nous constatons que pour les faibles fréquences (plus longues périodes), le spectre de réponses normalisé concorde avec ceux de règles parasismiques Algériennes et couvert par ceux-ci pour des fréquences allant de 0.3 Hz à 20 Hz.

Nous remarquons que les périodes caractéristiques T_1 et T_2 sont décalées par rapport à celles du RPA.

Tandis que les spectres réglementaires de l'Eurocode 8 couvrent le spectre normalisé moyen pour des fréquences de 0.5 Hz à 20 Hz pour les types 1 et à partir de 1Hz pour le type 2, pour les fréquences faibles (inférieurs à 0.3 Hz ou 0.5 Hz) le spectre normalisé moyen dépasse ceux de l'Eurocode 8.

Pour l'UBC97, les valeurs spectrales normalisées moyennes sont au dessous de celles correspondant au classe S_D , S_C , S_B et dépassent celles des classes S_A (roche dure) et S_E (sol mou) à partir d'une fréquence voisine de 5 Hz.

Notes que par rapport à tous les règlements (RPA99, Eurocode8 et UBC97), les fréquences caractéristiques correspondant aux périodes T_1 et T_2 sont décalé (Tableau 5.6).

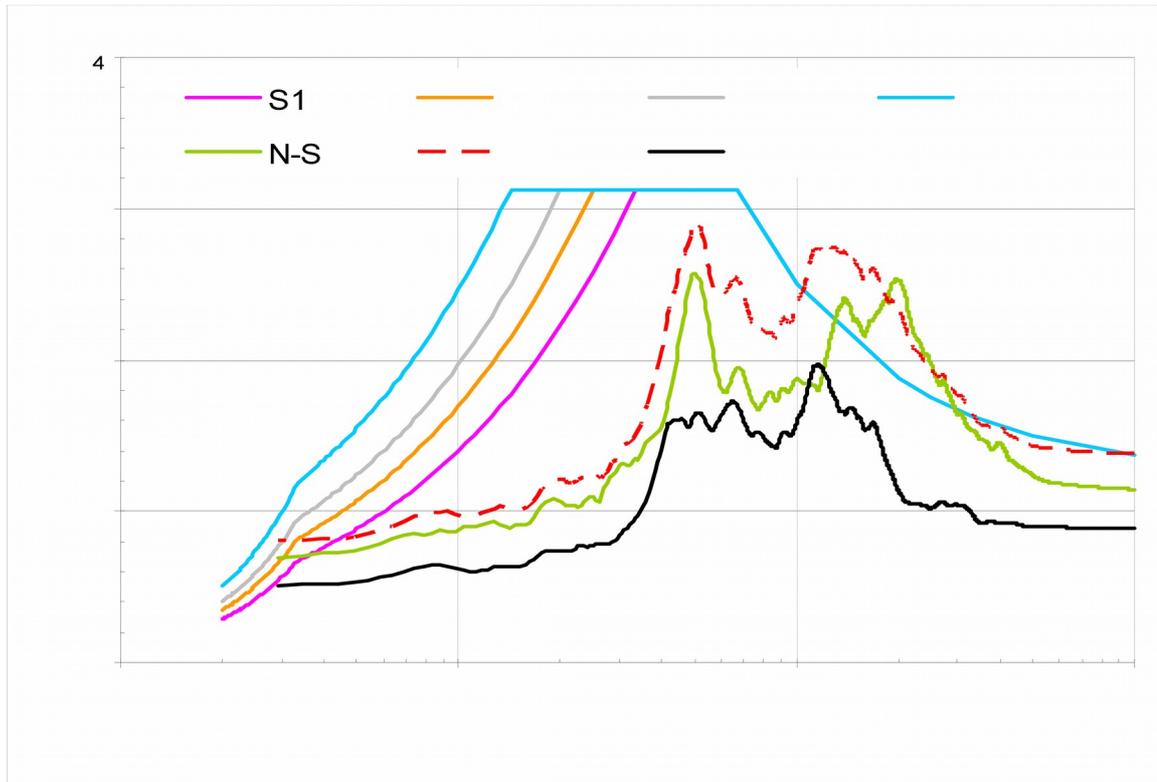


Fig. 6.5- Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W, N-S et les spectres de réponse élastiques des Règles Parasismiques Algériennes.

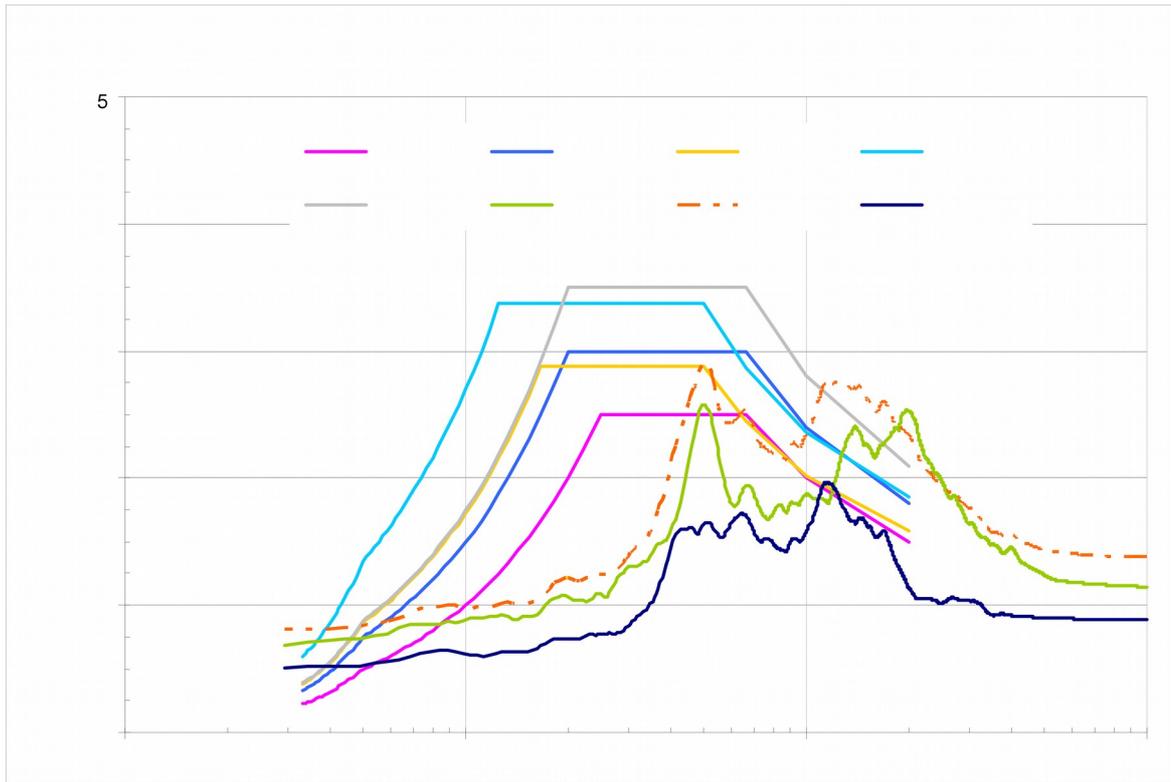


Fig. 6.6- Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W et N-S et les spectres de réponse élastiques du type 1 pour les 5 classes de sol de l'EC8.

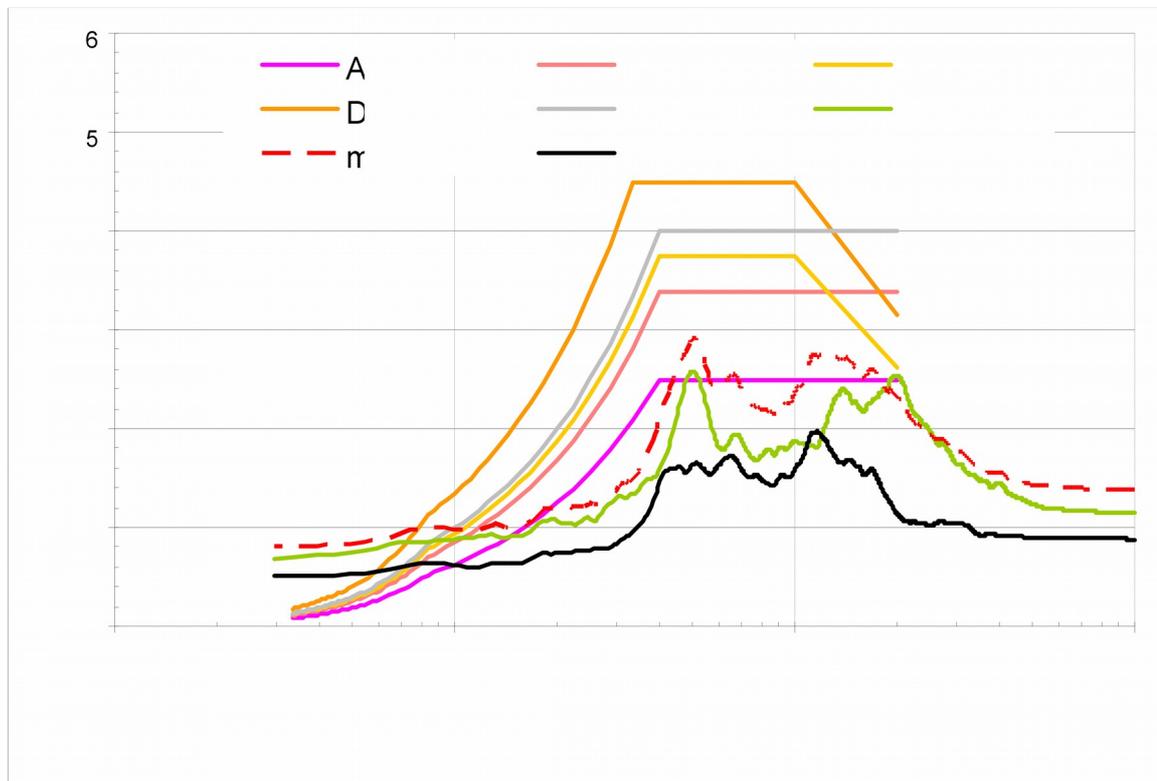


Fig. 6.7- Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W et N-S et les spectres de réponse élastique du type 2 pour les 5 classes de sol de l'EC8.

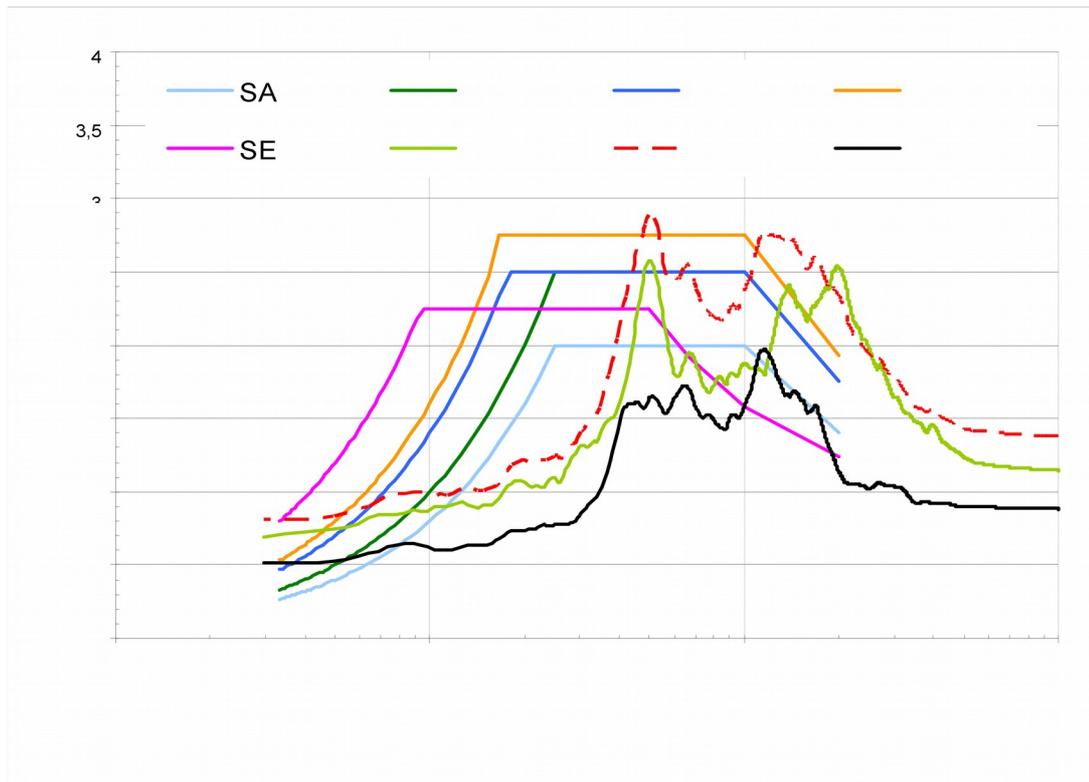


Fig. 6.8- Comparaison entre le spectre de réponse moyen des composantes E-W et N-S et les spectres de réponse élastiques de l'UBC97.

6.4. Conclusions

Les différences significatives dans la forme spectrale entre les données du tremblement de terre de Boumerdes 21 Mai 2003 et les spectres réglementaires (*RPA99-version 2003, Eurocode8 et UBC97*) sont produites aux fréquences à environ 0.1 et 2 Hz pour une distance épicyclique de 40 km. Les amplitudes des spectres de réponse moyens du tremblement de terre de Boumerdes 21 Mai 2003 à ces distances sont sensiblement inférieures à celles des réglementaires.

A partir de cette étude, nous constatons que par rapport à tous les règlements (*RPA99, Eurocode8, UBC97*) les périodes caractéristiques T1 et T2 relatives au spectre sismique en champ proche du séisme de Boumerdes sont décalées.

1. Conclusions

Le travail réalisé dans ce mémoire a visé, essentiellement, de quantifier les effets de site sur l'amplification des mouvements sismiques des sols.

Dans un premier chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique, particulièrement, sur les méthodes de quantification des effets de site.

Nous avons commencés par étudier les effets de site sur les mouvements sismiques, dans le chapitre 2. Pour cela nous avons choisi de simuler les enregistrements des mouvements de sol pendant un séisme qui a frappé le nord de l'Algérie, récemment. Il s'agit du séisme de Boumerdes (*connu communément sous le nom du séisme de **Zemouri***) du 21 Mai 2003 de magnitude 6.8 sur l'échelle de Richter. Nous avons, en effet, mis en évidence des effets de site qui ont accompagné ce séisme à partir des valeurs maximales des accélérations (a_{\max}), vitesses (v_{\max}) et déplacement (d_{\max}). Nous avons ensuite tenté de caractériser les sites étudiés à partir du rapport v_{\max}/a_{\max} .

Puis, dans le chapitre 3, nous avons caractérisé empiriquement, les effets de sites à partir des méthodes couramment sollicitées par les chercheurs ; la méthode du rapport spectral *Horizontal/Vertical* (HVSr) et la méthode du rapport spectral standard (SSR) en cas de disponibilité des enregistrements des mouvements de sol sur un site de référence. Au site de Keddara1, assumé à la crête du Barrage de Keddara une accélération de sol de 0,58g a été enregistrée pour la composante E-W. Ce qui a laissé avoir en la présence d'un effet de site, précisément, lorsque à environ seulement 150m de cette station assumée à la base rocheuse du Barrage, une accélération de 0,34g (E-W) a été enregistrée. Tandis qu'aux niveaux des stations de Dar EL Beida et EL Afroun la présence des effets de site a été attribuée à la situation de ces deux sites dans le bassin de Métidja comme un dépôt quaternaire mou.

Nous avons également étudié, dans le chapitre 5, les effets de site sur les spectres de réponse en termes de la distance épacentrale, la magnitude et la durée du séisme.

Puis à travers quelques exemples de monocouche nous avons montré, l'effet de site traduit en terme de contrat d'impédance entre une couche de sol et le rocher sous-jacent. Nous avons aussi transféré le mouvement de sol enregistré au niveau du site de Keddara (Rocher) vers

deux autres sites qui ont fait l'objet d'investigations géologiques après le séisme de Keddara où nous avons mis en évidence la présence de l'effet de site dans les sols meubles par opposition aux sols fermes.

En dernier lieu, dans le chapitre 6, nous avons choisi de comparer les spectres de réponses en pseudo accélération normalisés par rapport aux accélérations maximales aux sites étudiés, en champ proches, aux spectres de réponses réglementaires.

Pour ce la, nous avons choisi de faire cette comparaison d'une part avec les spectres élastiques des règlements parasismiques Algériennes et d'autre part avec deux autre règlements, les plus connus, qui sont l'Eurocode 8 et l'UBC 97.

2. Recommandations

Dans cette étude empirique et analytique sur les effets de site qui accompagnent les séismes, nous avons choisi, pratiquement, de travailler sur un seul événement sismique qui est le séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003.

Cependant, nous n'avons pas étudié les effets de site non linéaires qui se font efficacement à partir d'enregistrements de mouvements forts et de mouvements faibles aux mêmes sites étudiés.

Ainsi, la multiplication des stations d'accélérographes sur le territoire national et la mise à disposition aux chercheurs des données sismiques collectées pourrait beaucoup contribuer à une bonne étude des effets de site et à leur intégration dans les règlements parasismiques en vigueur afin de préserver des vies humaines lors des événements sismiques.

En revanche, en l'absence des données accélérométriques en nombre suffisant et aussi la non disponibilité de ces données mais si elles existent, incite à simuler numériquement des mouvements sismiques afin de pouvoir apporter une compréhension des effets de site et à les intégrer dans les spectres de réponse dans le but d'obtenir des coefficients liés aux effets de site pour les prendre en compte lors du dimensionnement des structures et ouvrages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. H. Lang. *Damage potential of seismic ground motion considering local site effects*, Weimar 2004, 202p.
- [2] J. Francisco. Sánchez-Sesma, Víctor J. Palencia and Francisco Luzón. *Estimation of local site effects during earthquakes: an overview*. ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 423, Vol. 39, N°. 3, 2002, pp. 167-193.
- [3] Trifunac. M. D and Brady .A. G. *A Study On The Duration Of Strong Earthquake Ground Motion*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 65, N°. 3, pp. 581- 626. 1975
- [4] Idriss I.M, Sun J.I. **SHAKE91**: *A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits*. Centre of Geotechnical Modelling Department of Civil & Environmental Engineering, University of California Davis, California, 1992.
- [5] Harichane.Z. *Dynamique des Sols*, Cours de Magister en Génie Civil, Département de génie civile, Université de Chlef, 2009.
- [6] Aaron J. Snider. *Site amplification measurements for ontario seismic stations based on ground motion relations and horizontal to vertical ratios*. Department of earth sciences Carleton university Ottawa, Ontario. 2005, 64p.
- [7] Tuladhar R. *Seismic microzonation of greater Bangkok using microtremor observations*. Asian institute of technology school of civil engineering, Thailand, 2002, 101p.
- [8] Pagliaroli. A. Lanzo G. D'Elia B. *Numerical study of the topography effects at the Nicastro (Southern Italy) cliff and comparison with EC8 recommendations*. Depatement of Engineering Structure and Geolecnica, University of Rome, Italy, pp.1-9.
- [9] Stewart J.P, Sholtis S.E. *Topographic effects on seismic ground motions above and below a cut slope in sand*. Department of Civil & Environmental Engineering. University of California, Los Angeles, California, 1999, 84p.
- [10] Merm S. *Microzonation in Turkey, Reference Information, State of the Art, Chapter 1*. 2003, 128 p.
- [11] Hernandez B. Nicolas M. *La non linéarité des sols en sismologie*. Direction des applications militaires centre ADM-ile de France, département analyse surveillance, environnement laboratoire de la détection et de géophysique.
- [12] Laouami N, Slimania A, Bouhadad Y, Chatelain G.L and Nour A. *Evidence for fault related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: Consequences on damage distribution and the*

- Algerian seismic code*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 26, 2006, pp.991–1003.
- [13] Bendimerad F. *The Boumerdes, Algeria, Earthquake of May 21, 2003*, EERI Learning from Earthquakes Reconnaissance Report, 2003, 71p.
- [14] Tsai C. P. *Characteristics of ground motions. International training PROGRAMS FOR Seismic Design of Building Structures*, 4p.
- [15] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A. and Vetterling W.T. *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing (Fortran Version)*, Cambridge University Press, 1989, 702p.
- [16] Bouckovalas .G.D and Kouretzis .G.P. *Site specific analysis of strong motion data from the September 7, 1999 Athens, Greece Earthquake*. National Technical University of Athens, Greece, pp.105-114.
- [17] Maouche .S, Harbi .A, and Meghraoui. M. *Attenuation of Intensity for Earthquake of 21 May 2003 (Mw 6.8): Insights for the Seismic Hazard and Historical Earthquake Sources in Northern Algeria*.
- [18] Afra H. *Identification du comportement sismique de batiments a partir de leur réponses accélérométriques*, Thèse de l'Ecole National des Ponts et Chaussées de Paris, France 1991, 128p.
- [19] Ptilakis K. *Chapitre 5: sites effects in Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation*. Ed Ansal A, Springer 2004, pp. 139-197.
- [20] Harichane Z. *Modélisation du comportement sismique des sols à partir de données accélérométriques*, Thèse de Doctorat, Faculté d'Architecture et Génie Civil, USTO, Algérie, 2005.
- [21] Lysmer J., Udaka. T., Tsai C., Seed H.B., FLUCH : A computer program for approximate 3D analysis of soil-Structure interaction problems, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, 1975.
- [22] Kramer S. *Geotechnical earthquake Engineering*. Prntice-Hall Ed., 1996, 653p.
- [23] Bahar R, *Rapport géotechnique: CMA CGM ALGERIE, D-Geot 20/05*, Département Géotechnique, Société de Construction et d'Engineering, 2006. 84p.
- [24] RPA 99. *Règles Parasismiques Algériennes*, Document technique réglementaire DTR BC 2 48, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S), Alger, 2000, 89p.
- [25] Sultan. N. Savoye. B. and Yelles. K *Quantifying the role of sandy-silty sediments in generating slope failures during earthquakes: example from the Algerian margin*. Int J Earth Sci (Geol Rundsch) (2009), pp.769–789.
- [26] Nigam N.C, Jennigs P.C. *Calculation of Response Spectra from Strong-Motion Earthquake Records*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 59, 1969, pp.909-922.

- [27] Trifnac M.D. Biot reponse spectrum. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. N° 26, 2006, pp. 491-500.
- [28] Trifnac M.D. Brief history of computation of earthquake response spectra. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. N° 26, 2006, pp. 501-508.
- [29] Trifnac M.D. Historical review. Early history of the response spectrum spectra. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- [30] Pecker A. Dynamique des structures. Polycopiés, ENPC, Paris, 2008.
- [31] Bakir P.G., De Roeck, G., Degrandeb G., Wong K.K.F. Site dependent response spectra and analysis of the characteristics of the strong ground motion due to the 1999 Duzce earthquake in Turkey. Engineering Structures, Vol. 29, 2007, pp.1939–1956.
- [32] Seed H.B, Idriss I.M. *Ground motion and soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Insitute, Monograph Series, Vol.5, 1983.140p.
- [33] Mohraz. B. *Recent studies of earthquake ground motion and amplification*. *Earthquake Engineering*. Tenth World Conference, 1994 Balkema, Rotterdam, ISBN 9054100605. southern Methodist University, Dalas, Tex, USA.
- [34] Febres Cedillo. H. E, Asghar Bhatti. M. *Parametric modeling of earthquake response spectra*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1991, Volume 10, Number 6, August 291.
- [35] Pecker A. *Dynamique des sols*. Ed. Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1984, 262p.
- [36] Su. F, Anderson J. G, Zeng Y. Characterisatics of ground motion response spectra from recent large earthquakes and their comparaison With IEEE standard 693.
- [37] Tehranizadeh M., Hamedi F., Influence of earthquake source parameters and damping on elastic response spectre for Iranian earthquakes. Engineering Structurezs, N° 24, 2003, pp. 933-943.
- [38] Kavazangian E., Matasovic N., Hadi-Hamou T., Sabatini P.J. Geotechnical Earthquake Engineering For Highways, Volum I, Rapport N) FHWA-SA-97-076.
- [39] EUROCODE 8. *Design provisions for earthquake resistance of structures- Part 1-1: General rules – Seismic actions and general requirements for structures*. ENV 1998-1-1, CEN European Committee for Standardization, May, Brussels, 1998.
- [40] U.B.C. 1997. *Uniform Building Code*. International conference of building officials, Whittier, California, 1997.

	Spectre Moyens			RPA				EC8 (Type 1)					EC8 (Type 2)					UBC97				
	E-W	$\sqrt{(E - W)}$	N-S	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	S _A	S _B	S _C	S _D	S _E
T ₁ (sec)	0.06	0.078	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2	0.2	0.15	0.05	0.05	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.10	0.1	0.2
T ₂ (sec)	0.24	0.466	0.40	0.30	0.40	0.50	0.70	0.4	0.5	0.6	0.8	0.5	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25	0.4	0.4	0.55	0.6	1.05

Tableau 6.7- Périodes caractéristiques des spectres moyens des composantes (E-W) et (N-S) et les différents règlements parasismiques (RPA99, Eurocode8 et UBC97).

ظاهرة تأثير التربة على تضخيم الحركة الزلزالية للأرض

ملخص

يعتبر ظاهرة تأثير التربة في تضخيم الحركة الزلزالية للأرض من الأسباب الرئيسية للخسائر الفادحة في الأرواح والبنىات لذا يجب أخذها بعين الاعتبار في حساب القوة الزلزالية المؤثرة على ا لبنية.

الهدف من هذه الدراسة هو إظهار خصائص تأثير التربة من خلال استعراض الطرق المطورة في هذا المجال و تطبيقها على احد المواقع التي شهدت هذه الظاهرة خلال زلزال بومرداس المنصرم. التسجيلات المحصل عليها يتم تحويلها إلى موقع ثان ذو خصائص معروفة و مراقبة تجاوبه من خلال استعراض مخططات التسارع و طيف التجاوب .

طيف التجاوب المحصل عليه يتم اعتماده في المقارنة بين النظام الزلزالي الجزائري (RPA99) و الأنظمة العالمية الأكثر استعمالا ((8 Eurocode, UBC 1997) م٢٠٠١ اجل حساب القوة الزلزالية في قاعدة المباني و ذلك من اجل إظهار مدى حضور تأثير التربة في هذه الأنظمة وتكميم هذا التأثير من خلال تجاوب البنىات الخاضعة للقوة الزلزالية .

المفتاحية : تأثير التربة، مخطط التسارع، طيف فورييه، طيف التجاوب، دالة التضخيم، قوانين التهوين، فئة الموقع، الأنظمة الزلزالية، التجاوب الزلزالي.

Influences des effets de site sur l'amplification du mouvement sismique du sol

Résumé

Les effets de site sont souvent responsables de dégâts majeurs sur les sols, les structures et les conséquences sur les vies humaines lors des tremblements de terre. Ils se doivent donc d'être pris en compte dans les calculs parasismiques des structures.

L'objectif du présent travail est, en premier lieu, de caractériser, de façons empirique et analytique, ces effets aux moyens des techniques universellement utilisées. Cette caractérisation s'est portée sur des sites qui ont été à des tremblements de terres antérieurs, en particulier ceux correspondants aux stations d'accélérographes qui ont enregistré les mouvements de sol du séisme de Boumerdes qui a frappé le nord d'Algérie le 21 Mai 2003 avec une magnitude de 6.8. Puis, dans une deuxième phase, en faisant un transfert du mouvement de référence au niveau d'un site rocheux (site de référence) vers d'autres sites dont les caractéristiques géotechniques sont disponibles, nous avons déterminé sa réponse en termes d'accélération et spectres de réponse, à sa surface libre que nous avons comparé avec celle enregistré à un site avoisinant afin de mettre en évidence des effets de site probables.

L'influence des conditions locales de sol peut aussi être montrée sur la forme spectrale au moyen des spectres réglementaires. A cet effet, le spectre de réponse moyen en champ proche par rapport à l'épicentre du séisme de Boumerdes est comparé, d'une part, avec les spectres de réponses élastiques des Règles parasismiques Algériennes : RPA99 (version 2003) et d'autre part, avec ceux de deux Règlements parmi les plus connus : l'Euro code 8 et l'UBC97.

Mots clés: Séisme ; effet de site; mouvement de sol ; amplification ; spectre de Fourier ; spectre de réponse; catégorie de site ; RPA, Eurocode8, UBC97.

Influents of site effects on seismic ground motion amplification.

Abstract

Site effects are often responsible of major damage on soil and on structures and consequences on human lives during earthquakes. There must well be taken into account in seismic design of structures.

The objective of this work is, firstly, to characterize, in an empirical and analytical ways, these effects with means of universally used techniques. This characterization went on sites which were hit by earlier earthquakes, particularly those corresponding to stations of accelerographs which recorded the ground movements of the Boumerdes earthquake which struck the north of Algeria on May 21, 2003 (M=6.8). Then, secondly, by making a transfer ground movement at referencial site (Rock) towards other sites whose geotechnical characteristics are available. There responses in terms of accelerations and spectra, at free surfaces are evaluated and compared with recorded ones at neigh bay site.

Influence of local soil conditions on spectral form can also be shown by design spectrum. For this purpose, the near-field mean response spectra of Boumerdes earthquake is compared with the Algerian regulatory design spectra and with other two well known design spectra: Eurocode 8 and UBC97.

Keywords: Earthquake; site effect; ground motion; amplification; Fourier spectrum; response spectra ; site category; RPA, Eurocode 8, UBC97.