

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des sciences de l'ingénieur
Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : construction

**CONCEPTION D'UN RESONATEUR MECANIQUE POUR
LES ESSAIS DES VIBRATIONS AMBIANTES**

Par

KHELLADI MOHAMED

Devant le jury composé de

S. Kenai	Professeur. U. de Blida	Président
M. Bensaïbi	Maitre de conférence. U. de Blida	Examineur
M. Abed	Professeur. U. de Blida	Examineur
M.Hadid	Maitre de conférence. E.N.T.P. Alger	Examineur
N. Bourahla	Professeur. U. de Blida	Rapporteur

Blida 2008

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier le bon Dieu le tout puissant de m'avoir redonné la chance, le souffle, le courage, la volonté et de m'avoir rafraîchi la mémoire et m'avoir aidé de mener à temps ce modeste travail.

Je souhaite exprimer, tout particulièrement, mes vifs remerciements et ma profonde reconnaissance au professeur Nourreddine Bourahla qui m'a fait l'honneur de m'encadrer et qui, avec sa grande compétence, sa patience exemplaire, ses critiques constructives et ses précieux conseils, que j'ai pu réaliser avec beaucoup de soin cette modeste thèse.

Qu'il me soit permis de remercier le président de jury le Professeur S.Kenai et les examinateurs le Dr M.Bensaïbi le Pr. M. Abed et le Dr M. Hadid qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon travail.

Je saisi également cette opportunité pour remercier beaucoup le Pr. Saïd Kenai, le Dr Abdel hamid Guendouz et le Dr. Cherif si Moussa de m'avoir stimuler et aider à rejoindre l'université.

En outre je souhaite exprimer mes remerciements à tous les enseignants de la post graduation du département du génie civil.

Qu'il me soit aussi permis de remercier beaucoup messieurs Boualem Nouar , Lyes Ahnou et Mounir Ait-Belkacem pour leurs gentillesse et leurs serviabilités.

Qu'il me soit permis aussi de remercier tous mes amis en particulier mon ami le docteur Messaoud Habelhames de m'avoir soutenu de loin ainsi que mon fils Abderrahmane et mon neveu Hamza pour leurs aides.

Une pensée très particulière à ma très chère mère, ma femme et à mes quatre enfants.

Résumé

La mesure de vibrations sur tous les genres de structures de génie civil n'est pas récente et de nombreuses études ont été menées depuis près d'un siècle. Ce qui est aujourd'hui nouveau, c'est l'accroissement des essais dynamiques réalisés sur des différents ouvrages (ponts, bâtiments, barrages etc.) à des fins de meilleure évaluation de leur comportement structural. Le premier objectif dans l'évaluation dynamique est la détermination ou l'identification avec une bonne précision des caractéristiques modales de la structure, cela inclut les fréquences propres, les coefficients d'amortissements et les déformées propres. Le recours quasi systématique à des essais sous excitations ambiantes est incité par l'efficacité et la simplicité de cette méthode qui permet de tester la structure dans ses conditions de service, de plus ces méthodes d'identification ne nécessitent pas la mesure de l'excitation. L'augmentation des capacités des systèmes d'acquisition et de stockage de données a également favorisé le développement de ces essais sous vibrations ambiantes

L'excitation peut être causée par le vent, le trafic de véhicules ou de piétons par toutes autres charges d'exploitation.

Les limites de cette méthode, cependant résident dans la faiblesse des vibrations d'excitation, ce qui conduit dans certains cas à des résultats peu fiables ou erronés quand les signaux sont fortement altérés par les bruits parasites. Ce travail consiste à concevoir un résonateur mécanique ayant des fréquences modulables qui permet d'amplifier des amplitudes des vibrations aux voisinages des fréquences propres de la structure sous essais. Le dispositif est conçu comme plate forme amovible en hauteur sur quatre colonnes qui servira de support pour le capteur des vibrations. Deux essais sur deux bâtiments différents ont démontré le potentiel de la technique à gagner en précision. Ce procédé a été utilisé pour la détermination expérimentale des spectres de plancher pour le calcul parasismique des équipements.

Mots clés

Résonateur Mécanique, Vibration Ambiante, Identification des Caractéristiques Dynamique, Essai à Echelle Réelle, Structures, Transformée Rapide de Fourier, Spectre Réglementaire, Fonction de Transfert, Spectre de Plancher, Sous Structures ou Equipement.

Abstract

Vibration measurement on all type of structurrs are not recent and many studies were carried out in the past. What is new today, is the increase of the number of dynamic tests carried out on differents structurrs (bridges, building, dampss etc.) for a better assessment of their sructural behaviour. The prime objectif in a dynamic assessmnet is the precise determination or identification of the modal characteristics that includes naturel frequencies, damping ratio and mode shapes. The increase in data storage acquisition systeme capacity and data storage also largely supported the developement of tests under ambient vibration.

The excitation can be induced by wind, predestrians or vehicles traffics or any other live loads.

The use of ambient vibration method becomes systematic because of the efficiency and the simplicity of this technique which permits to perform testing on building in service condition. However the major limits of this method is the low

amplitudes of the vibrations which may results less precise erreneous values of the identification parameters when the signals are noisy. This thesis presents a new technique based on physical amplification of ambient vibrations using a mechanical resonator. The latter is designed as a plat form supported on four steel rods which allows the resonator have a natural frequencis. The method has been used to test two different buildings. The obtained result showed the merits and the potential of the technique in enhancing the precision of the identified parameters. Moreover, floor spectra were experimentally determited for siesmic resisting desing of secondary system and equipement.

Key words

Mecanical Resonator, Ambient Vibration, Identificatio of Dynamic Characteritic, Structures, Fast Fourier Transformed, Reglementry spectra, Transfer Fonction, Floor spectra, Sub-structures or Equipement.

ملخص

القياسات الذبذبية لجميع هياكل الهندسة المدنية ليست بالحديثة , و كثير من الدراسات عمل بها منذ قرن تقريبا. و الجديد حاضرا هو تعدد التجارب الديناميكي المحقق في مختلف المنشأة مثلا الجسور, العمارات, السدود...إلى آخره.

الهدف الأول في التقييم الديناميكي هو التعريف مع دقة خصائص شكلية الهيكل, هذا يدخل ذبذبات خاصة, معامل التهادن و الأشكال الخاصة.

الالتجاء الشبه الفوري على التجارب تحت التأثير الطبيعي المذكور مع فعالية و سهولة هذه الطريقة التي تسمح بمعاينة الهيكل في ظروف الخدمة, زيادة على طرق التعرف لا نحتاج إلى قياس التأثير. ارتفاع قدرات نضام الكسب و تخزين المعطيات تفضل أيضا نمو هذه التجارب تحت ذبذبات طبيعية, التأثير من طرف الرياح, مرور السيارات و الراجلين أو أي حمولة استغلالية.

حدود هذه الطريقة ناتجة عن ضعف الذبذبات المؤثرة, هذا ما يقودنا في بعض الحالات إلى نتائج ضعيفة نوعا ما أو خاطئة عندما تكون الإشارات متمازجة مع الأصوات الطفيلية.

هذا العمل يعتمد على تصميم متجاوب ميكانيكي له ذبذبات خاصة يسمح بتضخيم مدى الاهتزازات في نواحي ذبذبات الخاصة للهيكل تحت التجربة.

هذا الأخير صمم كشكل مسطح متحرك أفقيا على أربعة أعمدة ليقوم بحمل راصد الذبذبات عمل به في تجربتين على عمارتين مختلفتين برهننا على الجهد التقني المربوح في الدقة.

هذا المنتوج عمل به في التعريف التجريبي لطيف على مستوى أرضية الطابق للحسابات الزلزالية للمرافق.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	
RESUME	
ABSTRACT	
LISTE DES ILLUSTRATIONS. GRAPHIQUES ET TABLEAUX	
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS	
INTRODUCTION	
Introduction.....	15
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1 Introduction.....	18
1.2 Source d'excitation.....	19
1.2.1 Excitation harmonique.....	19
1.2.2 Essais de vibration par la méthode du Lâcher.....	19
1.2.3 Essais de vibration par les chocs	20
1.2.4 Essais de vibration par explosif.....	21
1.2.5 Essai de vibration ambiante.....	22
1.3 Les vibrations ambiantes.....	23
1.3.1 Historique de l'utilisation des Vibrations ambiantes.....	23
1.3.2 Principe de mesure des vibrations ambiantes.....	24
1.3.3 Objectif d'application des vibrations ambiantes.....	24
1.3.3 Evaluation globale de la structure	25
1.3.3.1 Essais sur l'aérogare d'Alger.....	25
1.3.3.2 Essais sur le pont de Mila.....	25
1.3.3.3 Essais sur les bâtiments de 3 à 18 niveaux.....	26
1.3.3.4 Evaluation des structures.....	26
1.4 Méthodes d'extraction des caractéristiques dynamiques.....	27

1.4.1	Procédure d'identification.....	28
1.4.2	Méthode du décrétement aléatoire.....	30
1.4.3	Méthode de sous-espace.....	30
1.4.4	Méthode ARMA (Auto Régressive Moving Average)	30
1.4.5	Méthode POLYREFERENCE	31
1.4.6	Méthode d'IBRAHIM	32
1.4.7	Méthode FRA	32
1.4.8	Les méthodes récursives.....	32
1.4.9	Détermination des spectres à partir des enregistrements	32
1.4.10	Méthode d'analyse des vibrations aléatoire.....	35
1.4.11	Méthode probabiliste.....	35
1.5	Fonction de transfert.....	36
1.5.1	Analyse temporelle et fréquentielle.....	36
1.5.2	Bruit blanc.....	37
1.5.3	Notions de traitement des signaux.....	37
1.5.4	Création des signaux numériques.....	38
1.5.5	Création de signaux sismiques	39
1.5.6	Transformée de Fourier.....	39
1.6	Conclusion	40

2. CONCEPTION DU RESONATEUR MECANIQUE

2.1	Introduction	41
2.2	Description du résonateur mécanique.....	42
2.2.1	Plaque métallique.....	42
2.2.2	Tiges (colonnes)	42
2.2.3	Socle.....	42
2.3	Calcul de la réponse du résonateur.....	45
2.4	Calibrage fréquence hauteur du résonateur.....	46
2.5	Conclusion.....	47

3. ESSAIS A ECHELLE REELLE DE BATIMENTS

3.1	Introduction	48
3.2	Analyse modale analytique.....	48
3.2.1	Description de l'ouvrage 1	48
3.2.2	Description de l'ouvrage 2	53
3.5	Modélisation.....	53
3.6	Modélisation de la structure.....	53
3.7	Résultats de l'analyse modale.....	54
3.8	Analyse modale expérimentale.....	54
3.8.1	Méthode des vibrations ambiantes.....	54
3.9	Procédure expérimentale.....	55
3.10	Description des instruments de mesure.....	55
3.11	Chaîne de mesure.....	55
3.12	Le sismomètre ou capteur de vibrations.....	55
3.13	La station d'enregistrement	56
3.14	Calibrage des instruments de mesure.....	56
3.15	Choix de la position du résonateur mécanique.	56
3.16	Logiciel de traitement.....	57

3.17 Essais sur bâtiment 1.....	58
3.17.1 Traitement des signaux.....	59
3.18 Détermination du mode fondamental bâtiment 1.....	60
3.19 Résultat de l'analyse des mesures.....	61
3.20 Extraction des fréquences propres à partir des enregistrements	62
3.21 Essai sur le bâtiment 2.....	78
3.22 Résultat de l'analyse des mesures	79
3.23 Extraction des fréquences propres à partir des enregistrements bâtiment2.....	80
3.19 Conclusion.....	89

4. SPECTRE DE PLANCHER

4 Introduction	90
4.1 Origine et principe de la méthode spectrale.....	90
4.2 Spectre de plancher.....	91
4.3 Spectre de réponse pour planchers.....	91
4.4 Représentation des éléments non structuraux.....	91
4.5 Etude analytique du spectre de réponse.....	92
4.6 La fonction de transfert pour un système à un seul degré de liberté.....	93
4.7 Fonction de transfert.....	94
4.8 Calcul direct de spectre de plancher.....	95
4.9 Interaction « système -sous- système ».....	98
4.10 Transfert de spectre.....	103
4.11 Modélisation des équipements (Interface équipement structure)	104
4.12 Détermination expérimentale des spectres de plancher.....	104
4.13 Paramètres de l'ouvrage (département de génie civil)	105
4.14 Interprétation des résultats.....	109
4.15 Paramètres de l'ouvrage (bloc logement)	110
4.16 Conclusion	113

CONCLUSION

Conclusion générale et recommandations.....	114
Références.....	117

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 2.1	Enregistrement de bruit de fond sur une structure. Les zones grises sont des fenêtres sélectionnées comme stables.	34
Figure 2.2	Spectre sur les différentes fenêtres de l'enregistrement du bruit de fond sur une structure	34
Figure 3.1	Modèle en éléments finis du résonateur Mécanique en tridimensionnelle (3D)	43
Figure 3.2	1 ^{er} mode de vibration (translation)	44
Figure 3.3	Modèle à un seul degré de liberté	44
Figure 3.4	Schéma de résonateur mécanique	44
Figure 3.5	Périodes en fonction des hauteurs	47
Figure 4.1	Modèle en élément finis de la structure	49
Figure 4.2	Vue en 3D du modèle sous le mode 1	50
Figure 4.3	Vue en YZ du modèle sous le mode 1	50
Figure 4.4	Vue en 3D du modèle sous le mode 2	51
Figure 4.5	Vue en XZ du modèle sous le mode 2	51
Figure 4.6	Vue en 3D du modèle sous le mode 3	52
Figure 4.7	Vue en XZ du modèle mode 3	52
Figure 4.8	Organigramme des essais de vibrations ambiantes	57
Figure 4.9	Exemple d'un enregistrement	59
Figure 4.10	Exemple représentant un spectre de Fourier	59
Figure 4.11	Courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure selon xx	60
Figure 4.12	Courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure	60

	selon yy	
Figure 4.13	Spectre au niveau de la terrasse selon l'axe xx	62
Figure 4.14	Spectre au niveau de la terrasse selon l'axe yy	62
Figure 4.15	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	63
Figure 4.16	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	63
Figure 4.17	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	64
Figure 4.18	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	64
Figure 4.19	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	65
Figure 4.20	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	65
Figure 4.21	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	66
Figure 4.22	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	66
Figure 4.23	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	67
Figure 4.24	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	67
Figure 4.25	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	68
Figure 4.26	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	68
Figure 4.27	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	69
Figure 4.28	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	69
Figure 4.29	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	70
Figure 4.30	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT	70

	correspondant.	
Figure 4.31	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	71
Figure 4.32	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	71
Figure 4. 33	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	72
Figure 4.34	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	72
Figure 4.35	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	73
Figure 4.36	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	73
Figure 4.37	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	74
Figure 4.38	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	74
Figure 4.39	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	75
Figure 4.40	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	75
Figure 4.41	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	76
Figure 4.42	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	76
Figure 4.43	la courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure selon xx	78
Figure 4.44	la courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure selon yy	78
Figure 4.45	Spectre au niveau de la terrasse selon axe xx	79
Figure 4.46	Spectre au niveau de la terrasse selon axe yy	79
Figure 4.47	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	81
Figure 4.48	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT	81

	correspondant.	
Figure 4.49	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	82
Figure 4.50	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	82
Figure 4.51	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	83
Figure 4.52	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	83
Figure 4.53	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	84
Figure 4.54	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	84
Figure 4.55	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	85
Figure 4.56	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	85
Figure 4.57	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	86
Figure 4.58	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	86
Figure 4.59	Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	87
Figure 4.60	Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.	87
Figure 4.61	Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	88
Figure 4.62	Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.	88
Figure 5.1	Modèle mathématique d'un système à un degré de liberté	93
Figure 5.2	Modèle mathématique d'un système et sous système	99
Figure 5.3	Etapas de calcul sous chargement horizontal	102
Figure 5.4	Spectre de réponse réglementaire (R.P.A) Bâtiment 1	105
Figure 5.5	Resonateur posé sur la terrasse	105

Figure 5.6	Resonateur pose sur le R.D.C	105
Figure 5.7	Spectre de calcul réglementaire selon axe xx	107
Figure 5.8	La fonction de transfert selon axe xx	107
Figure 5.9	Spectre de plancher	108
Figure 5.10	Spectre de calcul réglementaire selon axe yy	109
Figure 5.11	La fonction de transfert selon axe yy	109
Figure 5.12	Spectre de plancher	109
Figure 5.13	Spectre de réponse réglementaire (R.P.A) Bâtiment 2	110
Figure 5.14	Resonateur posé sur la terrasse	110
Figure 5.15	Resonateur pose sur le R.D.C	110
Figure 5.16	Spectre de calcul réglementaire (R.P.A) selon axe xx	111
Figure 5.17	La fonction de transfert selon axe xx	111
Figure 5.18	Spectre de plancher	111
Figure 5.19	Spectre de calcul réglementaire selon axe yy	112
Figure 5.20	La fonction de transfert selon axe yy	112
Figure 5.21	Spectre de plancher	112
Tableau 3.1	Valeur de périodes Pour différentes hauteurs du résonateur	46
Tableau 4.1	Périodes et facteurs de participation massique de l'ouvrage	54
Tableau 4.2	Durées des enregistrements	58
Tableau 4.3	Amplitudes max des deux directions x et y	61
Tableau 4.4	Récapitulatif de valeur maximum des fréquences et des périodes de chaque oscillateur (R.D.C)	77
Tableau 4.5	Récapitulatif de valeur maximum des fréquences et des périodes de chaque oscillateur (TERRASSE)	77
Tableau 4.6	Amplitudes max des deux directions x et y au niveau de la terrasse	79
Tableau 5.1	Amplitudes max selon deux directions x et y Bâtiment 1	106
Tableau 5.2	Spectre de calcul ajusté selon axe xx	107
Tableau 5.3	Spectre de calcul ajusté selon axe yy	110
Tableau 5.4	La fonction de transfert selon xx Bâtiment 2	112
Tableau 5.5	La fonction de transfert selon yy	112
Photo 3.1	Vue globale du résonateur mécanique	43

Photo 4.1	Capteur de vibrations	56
Photo 4.2	Station d'acquisition	56

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Grandeurs caractérisant les mouvements

$x(t)$:Vecteur des DDL fonction du temps (x_i =composante i)
$x(r,t)$:Champ des déplacements
\dot{x} et \ddot{x}	:Champ de vitesses et des accélérations
$x(r,t)$:Champ des vecteurs déplacement (de composantes x,y,z ou u, v ,w en semi-polaire).

Grandeurs caractérisant les efforts

$f(t)$:Vecteur des forces extérieures (f_i =composante i)
$f(r,t)$ ou $F(r,t)$:Champ des densité des forces extérieures
$F(t)$ ou $F(t)$:Forces localisées aux limites

Grandeurs mécaniques

K et m	:Raideur et masse
K et M	:Opérateurs de raideur et d'inertie (matrice ou opérateur différentiel)
E	:Energie totale

Grandeurs modales

(r)	:Vecteur propre r ou X_r X
\bar{X}	:Matrice des vecteurs propres
ω_n et f	:Pulsation et fréquence de résonance
m_n et K_n	:Masse et raideur généralisée
K_G et M_G	: Matrices diagonales des raideurs et masses généralisées
ε_n	:Amortissement modal (par rapport à l'amortissement critique)
$a_n(t)$ et $F_n(t)$:Composantes modales du déplacement et force généralisée
$a(t)$ et $F(t)$:Vecteurs des composantes modales et des forces généralisées

Grandeurs associées aux processus aléatoires

X	:Variable aléatoire, x réalisation de cette variable
$X(t)$:Processus aléatoire temporel, $x(t)$ réalisation de ce processus
$F(x)$ et $p(x)$:Fonction de répartition et densité de probabilité de
$E(\cdot)$:Espérance mathématique ($E(X) = \mu =$ moyenne)
σ	:Ecart type (ou valeur quadratique moyenne)

$p(t_1, t_2)$:Fonction d'autocorrélation
$p(\tau)$:Fonction d'autocorrélation
$S(f)$:Densité spectrale de puissance (DSP)
$S_{xy}(f)$:Densité spectrale de puissance d'interaction (DSPI)
$s(x, y, f)$:Densité spectrale de puissance d'interaction (DSPI)
$F(s)$ et s DPS	:Adimensionnelle et fréquence adimensionnelle (nombre de strouhal).

INTRODUCTION

Objectif et plan de travail

Généralement les expertises, les études de vulnérabilité, la surveillance et la maintenance des ouvrages se font sur des structures existantes qui sont soumises à des vibrations ou ayant subi un désordre.

Afin de faire face à ce genre d'étude et d'intervenir dans l'immédiat et parfois d'assurer une surveillance ou une maintenance des ouvrages d'une manière continue, le meilleur moyen technique actuellement de part son aspect pratique et de la disponibilité de la chaîne de mesure pour l'enregistrement de la réponse de la structure, c'est la méthode des essais sous l'effet des vibrations ambiantes ou bruit de fond, qui ne nécessite aucun matériel d'excitation. Les enregistrements peuvent être obtenus rapidement avec un personnel et un équipement réduits.

Cependant, cette méthode présente un inconvénient majeur relatif aux faibles amplitudes d'excitation. Ainsi les signaux enregistrés peuvent être facilement altérés par les bruits parasites qui rendent la tâche d'identification difficile ou parfois conduit à des résultats peu fiables ou erronés.

L'objectif principal de ce travail est de surmonter cet handicap de la méthode des vibrations ambiantes en amplifiant physiquement les réponses des enregistrements aux environs des fréquences propres des ouvrages à tester.

En s'inspirant du principe des capteurs d'accélération (accéléromètres), un résonateur mécanique (oscillateur à un seul degré de liberté) à fréquences modulable a été conçu pour pouvoir balayer, sur une fourchette de fréquence, les zones de résonance de l'ouvrage permettant ainsi d'obtenir des réponses amplifiées. Les enregistrements obtenus à grandes amplitudes seront de meilleures qualités. En deuxième lieu, le résonateur mécanique peut servir aussi à déterminer expérimentalement les spectres des planchers. Ces derniers sont utilisés comme chargement de base pour le calcul et la vérification des équipements ou des éléments secondaires fixés à un niveau (plancher) de l'ouvrage.

Dans ce contexte, le travail est structuré en quatre chapitres que nous allons évoquer ci après.

-L'introduction présente une vision générale de la problématique et le motif justifiant l'initiative. Les objectifs sont clairement énoncés avec la méthodologie adoptée pour les concrétiser.

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique réunit quelques recherches et applications les plus prometteuses et les plus actuelles menées dans le domaine de l'analyse modale expérimentale. Les méthodes d'essai dynamique in situ ont été classées par source d'excitations et plus particulièrement la méthode des vibrations ambiantes a été revue en détail. Quelques méthodes d'identifications ont été brièvement présentées avec une description plus profonde de la technique adoptée pour le traitement des signaux enregistrés lors des essais effectués dans le cadre de ce projet.

- Dans le deuxième chapitre, le principe et la conception du résonateur sont présentés. Une étude analytique a été d'abord effectuée pour dimensionner les éléments constituant le résonateur afin de prédire les limites de variation de ces fréquences propres. Le modèle physique a été construit sur la base de cette étude, suivi d'une série d'essais de calibration du système qui a permis d'obtenir la courbe de variation de fréquences propres en fonction des hauteurs des tiges ainsi que les amortissements correspondants.

- Le troisième chapitre porte sur deux essais à échelle réelle de deux bâtiments différents. Il s'agit du bloc R.D.C+2 étages abritant l'institut de génie civil de l'université de Blida Saad Dahleb et un bâtiment R.D.C+4 étages à usage d'habitation des 520 logements à Blida.

L'étude analytique et expérimentale est présentée en mettant en évidence les zones d'amplification des enregistrements aux voisinages des périodes fondamentales des deux ouvrages par l'intermédiaire du résonateur mécanique.

- Dans le quatrième chapitre il y a quelques commentaires sur le spectre de plancher et la procédure de calcul des équipements et des éléments non structuraux. Il présente d'abord une approche analytique qui permet en fonction d'un rapport de masses soit d'inclure l'équipement dans le calcul de la modélisation général, soit de dimensionner

l'équipement par un calcul de spectre de plancher en utilisant la fonction de transfert. Les difficultés de cette méthode ont été soulignées, tout en proposant l'approche expérimentale par le résonateur mécanique. En utilisant les enregistrements effectués sur les deux bâtiments, des spectres de planchers ont été déterminés en transférant le spectre de calcul du R.P.A 99 à la base au plancher/ terrasse moyennant la fonction de transfert expérimentale.

-En dernier, nous récapitulons les éléments essentiels de ce travail sous forme d'une conclusion générale avec quelques recommandations.

1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Les expériences cumulées aux lendemains des séismes ont permis de tirer un certain nombre d'enseignements et de mettre en relief les insuffisances aussi bien en ce qui concerne les conceptions des ouvrages que la mise en œuvre de la qualité de matériaux.

Les séismes à travers le monde ont confirmé la nécessité d'approfondir d'avantage l'analyse du comportement des structures et les détections des défauts et des endommagements des ouvrages lors des inspections des ouvrages tels que : constructions stratégiques, constructions à différents usages, ouvrages d'art, routes etc. et dans la majorité des ouvrages à expertiser il n'est pas évident de constater ou de détecter la corrosion des aciers, les micros fissures, les défauts etc. de visu.

Par conséquent la maîtrise du comportement dynamique des ouvrages et l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages nécessitent la connaissance des caractéristiques dynamiques de la structure comme la période de vibration, formes modales, et le taux d'amortissement modaux.

Les caractéristiques sont obtenues par un modèle mathématique étalonné au préalable sur la base de données expérimentale à partir de modèles testés au laboratoire ou à partir d'enregistrements sur des ouvrages analogues.

La recherche dans le domaine de la dynamique est caractérisée par deux approches à savoir l'analytique et l'expérimental. Les essais expérimentaux sur les ouvrages existant utilisent plusieurs moyens d'investigations. Parmi ces moyens d'investigations nous citons quatre méthodes qui caractérisent une structure mécanique. Ces techniques permettent de connaître notamment les fréquences de résonances (fréquences pour lesquelles l'amplitude de la réponse du système est très supérieure à l'amplitude de l'excitation) et les modes de vibrations (la manière dont la structure se déforme).

Une des quatre sources de sollicitations dynamiques est l'objectif de notre projet (vibration ambiante).

- l'excitateur harmonique (vibration forcée).
- essais de vibration par la méthode du Lâcher.
- les chocs.
- les vibrations ambiantes.

Les vibrations relevées sur des ouvrages par les différentes excitations consistent à définir les propriétés du processus composé de l'ensemble des mesures. La valeur de chacune des mesures de chaque type d'excitation donne une idée globale de la sévérité de la vibration. En fonction des fréquences déterminées on peut comprendre les effets des vibrations sur la structure.

1.2 Source d'excitation

1.2.1 Excitation harmonique

La structure est mise en vibration au moyen d'un dispositif capable de générer une force sinusoïdale à une fréquence donnée, cette méthode a été mise en œuvre pendant les années soixante dix pour les ouvrages d'arts tel que les ponts [1].

L'enregistrement des amplitudes correspondant à chaque fréquence de vibration, permet d'établir la réponse fréquentielle en plusieurs points de la structure.

A partir des pics de résonance on peut déterminer les fréquences propres et les modes de vibrations correspondants.

Un des avantages de cette technique est que l'acuité des excitations mis en jeu exclu tout effet parasite pouvant être induit par d'autre source de bruit pendant l'enregistrement de la réponse de la structure.

Un autre avantage réside dans la possibilité d'étudier l'effet de l'interaction sol structure.

Plusieurs travaux [2] ont montré que les mesures des fréquences et des amortissements avec cette technique sont plus grandes que ceux mesurés par la méthode des essais de vibrations ambiantes.

1.2.2 Essais de vibration par la méthode du Lâcher

Cette méthode est une technique utilisée in situ et consiste à donner un déplacement statique appliqué à une structure à l'aide d'un câble tendu attaché au plancher de la structure et relié à l'autre extrémité à des vérins, après le lâcher du câble la structure oscille librement, l'analyse de ces vibrations enregistrées permet de déterminer les caractéristiques de la structure.

1.2.3 Essais de vibration par les chocs

Un choc est une excitation de courte durée qui induit dans les structures de contraintes dynamiques transitoire, ces contraintes sont fonctions [3] :

- des caractéristiques du choc (amplitude, durée et forme).
- des propriétés dynamiques de la de la structure (fréquences de résonance, amortissements).

La sévérité d'un choc ne peut donc être estimée qu'en fonction des caractéristiques du système qui le subit. L'évaluation de cette sévérité exige par ailleurs que l'on connaisse le mécanisme conduisant à une dégradation de la structure. Les deux mécanismes les plus courants sont les suivants:

- le dépassement d'une valeur seuil de la contrainte dans une structure pouvant entraîner soit des déformations permanentes (acceptable ou non), soit des ruptures, soit encore une défaillance fonctionnelle.
- si le choc est répété plusieurs fois, le dommage par fatigue accumulée dans les éléments structuraux pouvant conduire à terme à une rupture.

Il a été reconnu que les chocs mesurés dans le domaine des séismes ont une nature aléatoire. C'est pourquoi de nombreuses propositions [3], [4] ont été faites pour rechercher un processus aléatoire qui, après multiplication par une fenêtre adéquate, fournisse un choc comparable à ce type de choc.

Le but est de déterminer une forme d'onde présentant les mêmes caractéristiques statistiques que le signal mesuré [5], [6]. Cette forme d'onde est composée d'un bruit aléatoire modulé non stationnaire du même spectre de réponse que le choc à simuler. Il est cependant important de noter que ce type de méthode ne permet de reproduire un spectre de choc spécifié que dans un sens probabiliste.

Un choc mécanique est une excitation vibratoire dont la durée est de l'ordre de grandeur ou inférieur à environ deux fois la période propre du système mécanique sollicité. Il y a choc mécanique lorsqu'une force, une position, une vitesse ou une accélération est brusquement modifiée et que cela crée un régime transitoire dans le système considéré. La modification est normalement considérée comme brusque si elle se produit en un temps qui est court par rapport à la période naturelle concernée (définition Afnor) (NOR).

Les premiers travaux sur les chocs ont été effectués dans les années 30 à propos des séismes et de leurs effets sur les bâtiments. Ils ont conduit à la notion de spectre de réponse de choc.

Les essais sur les équipements ont commencé lors de la seconde guerre mondiale et les méthodes ont évolué avec l'augmentation de la puissance des excitations qui a permis la

réalisation de certain chocs sur ce moyen, puis dans les années 70, grâce au développement de l'informatique, avec le pilotage des essais sur excitateur directement à partir d'un spectre de réponse de choc qui est devenu un outil privilégié pour l'élaboration des spécifications. Un impact est appliqué au sommet de la structure l'impulsion est très brève ce qui permet à la structures d'entrer en oscillation libre afin de pouvoir enregistrer la réponse de ces oscillations. L'utilisation du choc permet aussi d'exciter la structure sur toutes les fréquences avec la même énergie pour une analyse modale de structure. La pièce étant excitée successivement en plusieurs points et la réaction vibratoire est mesurée à l'aide d'un capteur de vibration. L'analyse modale expérimentale permet de déterminer les déformations de la structure en fonction de la fréquence.

Les essais par les chocs sont multiples par exemple: chocs simple (parfait), choc demi-sinusoïdale, chocs en dent de scies à pic terminal, chocs en dent de scie à pic initial, chocs rectangulaire, chocs trapézoïdale, chocs semi verse, chocs sinus amorti etc.

1.2.4 Essais de vibration par explosif

La méthode d'excitation par explosifs est généralement appliqué in situ afin d'étudier l'interaction sol structure en utilisant des explosifs (soit enterrés directement ou mis dans des conteneurs. Les vibrations induites sont transmises par le sol de fondation. C'est une simulation au séisme de point de vue principe uniquement car le contenu fréquentiel est le temps d'excitation d'une explosion est de loin par rapport à un séisme.

Les trois procédés techniques présentent l'avantage d'utiliser une sollicitation connue, de même, on peut se permettre de connaître les réponses de la structure facilement, mais ces techniques nécessitent la mise en place d'un matériel encombrant et long à mettre en œuvre, elles sont onéreuses et peu commodes à reproduire les essais.

Finalement ces procédés techniques sont de nos jours difficiles surtout leur application sur les grands ouvrages.

Par contre les vibrations ambiantes (ou bruit de fond) induite par l'activité humaine (industrie, Trafic routier, Piéton, le vent, la houle etc.) présentent l'avantage d'exister en tout lieu et à tout instant sans la nécessité de les générer, malgré leur très faible amplitudes. Il est possible de mesurer la réponse des structures à ces sollicitations et d'en déduire leurs caractéristiques dynamiques dans le domaine des petites déformations [7]

1.2.5 Essai de vibration ambiante

La méthode des essais de vibration ambiante est une technique simple et efficace qui permet de déterminer les propriétés dynamiques d'une structure notamment les fréquences, l'amortissement et les formes modales de la structure.

Les vibrations ambiantes sont dues aux :

- vent,
- explosion,
- micro vibration du sol,
- trafic routier,
- piéton,
- circulation à l'intérieur de la structure,
- ou autre surcharge d'exploitation.

Ces mouvements aléatoires stationnaires existent en permanence et peuvent être considérés comme un bruit blanc à bande limitée, pour la quelle la réponse contient toutes les fréquences et par conséquent tous les modes de vibrations de la structure sont excités.

L'essai consiste à disposer de capteur sur une structure qui enregistre des excitations définies dans le domaine temporel en termes d'accélération ou de vitesses.

La transformée de Fourier permet le passage des mesures dans le domaine temporel vers le domaine fréquentiel, les pics de résonances obtenues sur le spectre représentent les fréquences de résonance de la structure, les modes de vibration et les amplitudes correspondants. Ces amplitudes obtenues en chaque point de mesure, nous permettent de tracer les formes modales par rapport à un point de mesure fixe.

Enfin le grand avantage des essais de vibrations ambiantes est exprimé :

- par ces mouvements en permanence, ce qui nous permet d'analyser et d'étudier toutes structures confondues rapidement et en plein service sans la nécessité de les générer malgré leurs très faibles amplitudes.
- par l'accroissement des essais dynamiques réalisés sur des ouvrages à des fins de meilleure évaluation de leur comportement structural. La réponse de la structure aux vibrations ambiantes est enregistrée pendant un temps bien défini à chaque essai que l'on souhaite réaliser puis l'enregistrement est interprété par un traitement de signal.

1.3 Les vibrations ambiantes

Définition

On désigne couramment par "vibration" les petits mouvements d'un système mécanique au tour d'une position d'équilibre ou d'un mouvement permanent. Ces mouvements induisent généralement:

- des petites vibrations de contraintes au sein du matériau qui peut occasionner des usures du matériau.
- Des frottements qui peuvent occasionner des usures du matériau.
- Des chocs qui peuvent détériorer localement le matériau.
- Des bruits qui sont émis à l'extérieure et posent parfois des problèmes importants d'environnement

Les structures sont sollicitées par les fluctuations locales de pression induite par des ondes de sollicitations ambiantes, par les ondes sismiques, les écoulements perturbés et par les machines tournantes etc.

Les vibrations ambiantes touchent toutes les branches comme:

- L'industrie (aéronautique, chemin de fer, automobile, industrie pétrolière etc.).
- Constructions (ouvrages stratégiques, habitations etc.).

L'industrie nucléaire n'échappe pas à cette règle du fait de la grande taille des installations et de la vitesse élevée des écoulements de fluide qui les parcourt.

Un aspect particulier de tous les ouvrages réside dans les impératifs très stricts de règle de sécurité.

Enfin les vibrations sont un domaine de recherche largement ouvert et les méthodes de prévision actuelles demandent encore de nombreux perfectionnements.

1.3.1 Historique de l'utilisation des Vibrations ambiantes

Les mesures des vibration ambiantes ont débuté au début des années 30 pour estimer la période fondamentale des immeubles [Ivanovic Etal , Roas], durant les années 60, Grawford et Ward 1964, ont relancé l'intérêt de telles mesures , puis dans les années 70 de nombreuses études apparaissent Trisfinac,1972 ; [7], ces mesures ont depuis le temps été utilisées pour identifier des paramètres dynamiques (fréquences, amortissement et déformées modales) de différents types de structures telles que les ouvrages d'art,les centrales nucléaires,les cheminées,les immeubles etc. On peut aussi noter l'étude sur des bâtiments

de Grenoble par [8], la comparaison du bruit de fond à d'autres sollicitations sur des bâtiments de Vauls en Velin par Boutin et al 1999). Des essais dynamiques sur le pont suspendu de Vincent Thomas Suspension Bridge à Los Angeles ont été rapportés par [9] ont conduit une recherche expérimentale sur le Golden Gate Suspension Bridge à San Francisco pour déterminer les paramètres dynamiques. De même que les tests sous l'effet des vibrations ambiantes ont été menés sur des ponts suspendus exemples le Humber Suspension Bridge en Angleterre et Bosphorus en Turquie par [10], au Japon, des tests ont été effectués sur des ponts à haubans de Honshu Shikoku en 1988.

L'étude d'un bâtiment nucléaire par [11] et l'étude du comportement dynamique d'un pont par Caremano 2004.

1.3.2 Principe de mesure des vibrations ambiantes

Le principe de la mesure consiste à enregistrer la réponse d'une structure quelconque à une sollicitation dynamique pour pouvoir en déduire des informations sur le comportement dynamique de la structure. Cette sollicitation dynamique se compose par des vibrations aléatoires (bruit de fond) qui sollicitent en permanence les structures, ces vibrations malgré leurs très faibles amplitudes en les mesurant, il est possible de déduire les caractéristiques dynamiques des structures dans le domaine de petites déformations (comportement élastique linéaire).

L'évaluation sismique d'une installation nucléaire peut se faire à l'aide des essais de vibrations ambiantes afin de concrétiser le comportement dynamique de la structure.

Comme, en général, les mouvements vibratoires sont petits, les équations de la mécanique linéarisées autour de la position d'équilibre du système, suffisent dans la plupart des cas.

La structure considérée comme un système répondeur linéaire peut être alors caractérisée indépendamment des sollicitations qui s'exercent sur elles.

1.3.3 Objectif d'application des vibrations ambiantes

L'étude expérimentale des essais sous les vibrations ambiantes a pour objectif d'évaluer les paramètres dynamiques dont les étapes relatives sont les suivantes :

- modélisation de la structure et vérification de la conformité des plans de génie civil,
- prise en compte des caractéristiques mécaniques des matériaux,
- enregistrement de la réponse de la structure sous vibrations ambiantes,
- traitement des enregistrements et détermination des caractéristiques dynamiques de la structure.

- détermination de la fonction de transfert.
- spectre de plancher.

L'objectif de toutes ces étapes permet de clarifier et d'évaluer l'état de la structure.

1.3.3 Evaluation globale de la structure

Plusieurs essais expérimentaux sous vibrations ambiantes ont été menés sur des grands ouvrages tels que : Aérogare d' Alger, pont de Mila et sur des bâtiments allant de 3 à 18 niveaux etc.

1.3.3.1 Essais sur l'aérogare d'Alger [12]

Des essais sous vibrations ambiantes ont été effectués sur les différents blocs de l'ouvrage. L'objectif de ces essais était l'identification des fréquences modales et la détection du tracé des formes modales des différents blocs, ainsi que d'autres séries d'essais ont été faits sur des gigantesques poutres caisson qui avait pour but la détermination aussi des fréquences de vibrations et les formes modales correspondantes.

Ces essais consistent à enregistrer les réponses de la structure en des points prédéfinis sous l'effet des vibrations ambiantes.

Les fréquences prédominantes des signaux enregistrés coïncidaient avec les fréquences propres de la structure, les amplitudes des pics sont normalisées par rapport à ceux envisagés sur les points de références. Ces amplitudes permettent de tracer les formes modales qui correspondaient aux fréquences propres de vibrations de la structure.

Les fréquences déterminées expérimentalement sur les grandes poutres caisson s'accordaient parfaitement avec les fréquences calculées analytiquement et de même que le tracé expérimental de la forme modale fondamental était proche à celui déterminé analytiquement par la modélisation en éléments finis.

Toutes ces constatations confirment les caractéristiques élastiques, géométriques et massiques utilisées dans le modèle de calcul.

1.3.3.2 Essais sur le pont de Mila [13]

La même procédure expérimentale d'application des vibrations ambiantes a été faite.

La méthode d'auscultation dynamique sous l'effet des vibrations ambiantes consiste à enregistrer les vibrations du pont qui sont dues essentiellement aux activités humaines (trafic routier) et aux activités naturelles (le vent). Malgré la faible amplitude de ces

sollicitations en permanence il est possible de mesurer la réponse du pont et d'en déduire les caractéristiques dynamiques.

La procédure expérimentale doit être faite avec une grande précaution à savoir la vérification au préalable de l'équipement de la chaîne de mesure (le sismomètre et la station d'enregistrement). Toute cette procédure de mesure est liée au calibrage des instruments et le choix de la position du capteur.

Tout compte fait, les fréquences calculées analytiquement à l'aide du modèle 3D en élément fini dans les directions verticale et transversale sont relativement comparables à celles mesurées expérimentalement

1.3.3.3 Essais sur les bâtiments de 3 à 18 niveaux [14]

La procédure expérimentale est la même, seulement les premiers essais se font sur tous les R.D.C des bâtiments et les autres essais se font sur les planchers recevant un équipement. Les enregistrements se font au niveau du R.D.C et au niveau du plancher à considérer afin de calculer le système d'ancrage ou de fixation de l'équipement au niveau du plancher par un spectre de plancher réglementaire ajuster par la fonction de transfert.

1.3.3.4 Evaluation des structures

La technique utilisée actuellement a évolué au point, ou l'essai dynamique peut s'en passer de l'utilisation de forces excitatrices. En suisse 1996 Felber et Cantieni [15] ont mené avec succès 0 d0es essais dynamiques (détermination des fréquences modales) du Ganter bridge, sous l'effet des vibrations ambiantes.

L'une des premières études ayant utilisés le changement des fréquences propres comme indicateur de l'endommagement dans une structure est celle de [16].

Les recherches les plus récentes étudient les résultats des fréquences analytiquement donnés par l'analyse du modèle d'élément finis d'une structure sur site, ces fréquences naturelles sont utilisées comme paramètres de contrôle basée avec la corrélation des résultats expérimentaux déduits des essais de vibrations ambiantes [17].

Il est évident aussi que les endommagements, les défauts et les dégâts de toutes genres de structures induisent un changement des caractéristiques mécaniques et influent sur le comportement dynamique de la structure et par conséquent provoquent un changement des caractéristiques dynamiques. Ces derniers sont essentiellement définis par les fréquences propres alors que les caractéristiques mécaniques sont définies par la résistance du béton.

Le module de déformation E (à travers la rigidité) et la densité du béton (à travers la masse) sont deux paramètres reliant les caractéristiques dynamiques et les caractéristiques mécaniques.

En conclusion, l'objectif de l'expérimentation est d'établir une méthodologie d'identification globale de la structure afin de pouvoir étudier la vulnérabilité, d'expertiser (pour d'éventuel confortement ou de renforcement), de surveiller, d'assurer la maintenance des ouvrages et enfin de dimensionner l'équipement au niveau d'un plancher considéré et le calcul du système de fixation ou de son ancrage.

1.4 Méthodes d'extraction des caractéristiques dynamiques

La réalisation d'essais dynamique n'est pas récente et date même du XIXe siècle.

Ces premières tentatives faisaient partie des procédures d'inspection et servaient déjà de base à la surveillance du comportement vibratoire des ouvrages.

Les essais modernes ne sont que des prolongements plus sophistiqués de ces toutes premières investigations à des fins d'amélioration des méthodes d'analyse, des règles de conception des ouvrages et de leur suivi.

Diverses raisons motivent la réalisation d'essais dynamiques. Les mesures vibratoires sur ouvrages permettent en effet :

- d'enrichir la connaissance sur le comportement dynamique de structures de même type,
- de vérifier les choix de la modélisation d'une structure.
- d'évaluer l'intégrité d'un ouvrage,
- de surveiller l'état d'un ouvrage par des mesures systématiques ou continues de sa réponse dynamique.

L'amélioration des capacités de calcul a conduit à un développement notable d'algorithmes performant et à la mise en oeuvre d'essais faisant de l'évaluation dynamique un outil utile pour la détermination des caractéristiques dynamique et de la performance d'un ouvrage. L'information obtenue peut alors aider à réduire l'incertitude associée aux caractéristiques de résistance de la structure et permet donc une évaluation plus pertinente de la fiabilité et de la vulnérabilité d'un ouvrage.

L'un des objectifs d'une évaluation dynamique est la détermination ou l'identification des caractéristiques modales de la structure dont nous présentons ci après quelques méthodes d'extraction des caractéristiques dynamiques.

C'est à dire fréquences propres, les coefficients d'amortissement, les déformées propres et les facteurs de participation associés. Afin de les identifier, il est nécessaire d'exciter la structure pour produire une réponse sur chaque mode pertinent.

1.4.1 Procédure d'identification

Un problème important en dynamique des structures réside donc dans la détermination précise des paramètres qui caractérisent les modes principaux d'une structure.

Ces paramètres (fréquences propres, modes propres, etc.) Sont alors des inconnues. De ce fait, l'identification modale signifie l'estimation des ces caractéristiques à partir des mesures des signaux d'excitation et de réponse. Une telle détermination rend possible la prédiction du comportement de la structure dans toutes les situations. Ceci est particulièrement le cas de structure à comportement linéaire, puisqu'il est possible de déduire la totalité des réponses pour tout type d'excitation à partir de la connaissance de la réponse à des excitations particulières synthétisées dans la matrice de transfert du modèle.

L'idée sous-jacente de l'identification modale relève donc plus de la détermination d'un modèle équivalent de la structure caractérisant le mieux possible son comportement dynamique que la seule estimation des paramètres modaux. Cette définition implique que l'identification modale n'est qu'un cas spécial d'un problème plus général : « l'identification des systèmes » le problème discuté est donc un problème inverse en analyse des systèmes : un historique de entrées/sorties entre un système et son environnement étant donnée qu'il faut déterminer les équations qui décrivent le comportement du système. Une telle définition laisse une grande liberté dans la construction de méthodes d'identification.

Ceci se reflète notamment dans l'abondance des techniques rencontrées dans la littérature. Le caractère du signal d'entrée (c'est-à-dire de l'excitation) peut donc affecter considérablement l'identification. Il est également nécessaire à ce stade de préciser trois hypothèses de bases, utilisées en partie dans les études dynamiques de structure de génie civil.

Ces hypothèses sont indépendantes de la technique d'identification, mais visent à fixer les propriétés physiques des structures ou des systèmes étudiés.

La structure a un comportement linéaire, impliquant l'existence de fonctions de transfert.

La seconde hypothèse concerne l'invariance temporelle des paramètres physiques (paramètres modaux). Cette caractéristique mérite quelques commentaires :

L'invariance temporelle est généralement inadéquate pour certaines applications industrielles ou mécaniques, les valeurs des paramètres peuvent varier, et dans de tels cas, la procédure d'identification peut être vue comme une procédure de poursuite de ces paramètres. La dernière hypothèse stipule une quantité suffisante d'informations disponibles durant l'identification. Ceci implique que tous les modes de liberté pertinents peuvent être mesurés. Cette hypothèse est à relier au problème d'observabilité et est conditionnée par les propriétés des signaux d'excitations.

Les premiers tests vibratoires d'identification ont été conçus par les ingénieurs allemands pendant la seconde guerre mondiale. Mais les techniques d'identification ne furent réellement développées que dans les années 1950 grâce à la disponibilité de sondes d'excitation électrodynamiques en 1949, de capteurs de vitesses en 1953 et d'accéléromètres en 1970. Les techniques classiques d'identification cherchent à déterminer les matrices de transfert du système, et travaillent dans le fréquentiel. Des techniques de minimisation de type moindres carrés sont alors utilisées pour estimer les paramètres des fonctions de transfert. Les réponses impulsionnelles sont ensuite estimées par déconvolution afin de disposer d'un modèle temporel à caractère prédictif. Cependant les procédures de déconvolution sont très sensibles aux bruits de mesure et conduisent à des oscillations numériques. De plus les signaux ne sont pas connus de façon continue et pour des structures en service, les signaux d'entrée sont parfois totalement inconnus et les paramètres modaux peuvent également subir des modifications. Pour ces diverses raisons, le recours à des techniques d'identification en régime temporel a été recherché.

Les techniques classiques d'identification en régime temporel utilisées en génie civil sont des techniques utilisant souvent des réponses impulsionnelle [18]. Ceci simplifie le développement numérique des routines d'identification, mais reste également très sensible aux bruits de mesure. Le recours à des mesures de réponse en régime forcé est plus délicat à mettre en œuvre, mais présente l'avantage d'assurer une excitation permanente, d'estimer plus correctement l'ensemble des modes pertinents, et dans le cas d'excitation ambiante, de placer la structure dans son environnement de service.

Pour des essais en laboratoire, le control des entrées et le choix des classes de ces dernières peuvent être correctement organisés. Pour une structure en service, l'excitation n'est pas forcément connue, ou même mesurable. Il est donc nécessaire de disposer à de Technique limitant à la seule connaissance et mesure de la réponse.

Durant ces dix dernières années, les utilisateurs ont commencé à étudier les capacités des algorithmes d'identification temporelle et ont été amenés à étudier ce qui e été développé

depuis de nombreuses années en théorie du contrôle ou en traitement du signal. Ceci a apporté un nouvel éclairage à l'identification modal. Les méthodes utilisées se placent dans cette approche de méthodes d'identification temporelle sans connaissance de l'excitation.

1.4.2 Méthode du décrétement aléatoire

La méthode du décrétement aléatoire est une méthode modale temporelle. Elle a été utilisée pour la première fois par H.Cole à la fin des années 1960. Depuis ce temps, cette méthode n'a pas cessé de se développer. Toutefois, elle repose sur un délicat calcul de probabilité, cette méthode est utilisée pour la détermination du coefficient d'amortissement et la détection de défauts mécaniques. Elle est en particulier, utilisée dans l'industrie aérospatiale pour analyse des essais expérimentaux de vibrations. Le succès de cette méthode tient à sa simplicité d'utilisation et la possibilité d'analyser les données en temps réel. La méthode du décrétement aléatoire est attractive car elle est simple d'incrémentation et peu gourmande en temps de calcul. Le principe est d'estimer des fonctions dites de décrétement aléatoire en moyennant les segments de mesures vérifiant des conditions précises dites de déclenchement. A partir de la construction de ces estimateurs, Il est alors possible d'extraire les paramètres modaux de la structure.

1.4.3 Méthode de sous-espace

Les méthodes de sous-espace identifient un modèle d'état sur la base de mesures de la réponse et de l'excitation. Certaines formes de ces méthodes sont des algorithmes qui ne nécessitent que la connaissance de la sortie du système dynamique. Ils sont alors conjugués avec des méthodes d'algèbre linéaire. Une représentation complète des méthodes est donnée dans [19], [20]. Des travaux sur cette méthode ont été développés dans [20], [21], [22] et [23].

1.4.4 Méthode ARMA (Auto Régressive Moving Average)

Il s'agit d'une méthode dont l'objectif est l'identification directe d'un modèle caractérisant le système dynamique pour un couple d'entrée (excitations) et de sorties (réponses) donné. Il est possible de démontrer que tout système dynamique peut être décrit par un modèle ARMA. Les paramètres modaux se déduisent des paramètres de ce modèle. Les pôles sont tirés des racines du polynôme formé par la partie autorégressive tandis que les déformées propres s'obtiennent à partir de la partie à moyenne mobile [24], La méthode ARMA a été

employée entre autres dans l'estimation des caractéristiques dynamiques de bâtiments excités par le vent.

La méthode ARMA est une méthode temporelle d'identification des systèmes mécaniques.

C'est un modèle mathématique caractérisé par deux aspects:

-La partie AR utilisée pour déterminer les caractéristiques modales du système étudié tels que les fréquences de résonances et les amortissements modaux.

-La partie MA, contient l'information sur les niveaux de réponses (ou amplitude) des différents points de la fonction de transfert.

La méthode ARMA peut être utilisée pour détecter les défauts dans la structure après leur mise en service. C'est une méthode temporelle d'identification des paramètres modaux. Les paramètres sont la base de l'identification.

Cette méthode utilise directement les équations différentielles de la structure à étudier afin d'identifier son comportement dynamique. C'est une méthode assez récente. En 1981 Leuridan et al présentèrent le premier exemple d'une identification directe à partir des données temporelles. Cette technique permet l'extraction des paramètres modaux à partir d'une séquence de mesure pouvant inclure plusieurs entrées et plusieurs sorties, son but est de déterminer un ordre minimal du modèle direct pour la structure.

La méthode ARMA nous permet aussi de construire la fonction de transfert d'une structure en utilisant en général, une rentrée et une sortie, le problème d'identification des paramètres modaux consistera à la recherche des paramètres de modèle par résolution d'un système linéaire.

L'avantage de la méthode ARMA fournit simultanément le numérateur et le dénominateur de la fonction de transfert. [25].

1.4.5 Méthode POLYREFERENCE [26] et [27]

C'est probablement la plus connue des méthodes, présentée en 1982 par Volt, elle présente une généralisation de la méthode exponentielle complexe ou de plusieurs entrées, plusieurs sorties. Quand les paramètres du modèle sont estimés la matrice de ce modèle peut être aussi construite et les paramètres modaux déduits. On obtient la méthode Poly référence. Cette méthode modélise le bruit par le modèle $1/U(Z)$.

Cette méthode est fort utilisée en industrie, elle constitue une référence pour les comparaisons entre les méthodes d'identification existante et nouvelles.

1.4.6 Méthode d'IBRAHIM [27], [28] et [29]

Présentée pour la première fois en 1977, cette technique est utilisée afin d'identifier les paramètres modaux (pôles et déformées modales) à partir d'excitation impulsionnelles, cette méthode permet d'utiliser plusieurs points de mesure de réponse de la structure.

La méthode traite des réponses libres des systèmes, mais est aussi applicable à des réponses impulsionnelles. La relation entre les modes physiques et modes mathématiques ou pseudo modes fournit un outil appelé "facteur de confiance modal" (IBR, 78) qui permet de corrélérer les résultats obtenus et d'évaluer la qualité des déformées modales. D'autres développements de cette méthode ont conduit à une méthode de "double moindres carrés" afin de réduire les erreurs de biais et améliorer ainsi la précision des amortissements.

1.4.7 Méthode FRA [27] et [29]

Bien que la théorie de la réalisation ait été formulée en théorie de contrôle par Ho et Kalman en 1965 et qui est définie comme étant un processus permettant de reconstruire une représentation dans l'espace d'état à partir des enregistrements. Son application à l'analyse modale n'est introduite qu'en 1984 par Juang et Papa. Cette application consiste en la décomposition d'une matrice en deux matrices, une orthogonales et l'autre diagonale, ensuite construire une matrice à partir de ces dernières et enfin identifier les paramètres modaux à partir des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice.

1.4.8 Les méthodes récursives

Le modèle est mis à jour à chaque instant ou de nouvelles mesures deviennent disponibles. Cette mise à jour ne peut être réalisée que par des méthodes récursives temporelles dont les noms changent suivant le domaine d'application :

- méthodes récursives d'identification en théorie de contrôle,
- méthodes adaptives en traitement de signal,
- estimation séquentielle de paramètres en statistiques.

2.4.9 Détermination des spectres à partir des enregistrements [30]

L'analyse de la réponse dynamique de l'ouvrage au bruit de fond consiste à calculer les spectres de Fourier sur plusieurs fenêtres du signal de la réponse et à les moyennner en calculant leur écart type. Cependant toutes fenêtres du signal ne peuvent pas être utilisées car le bruit de fond est une sollicitation en permanence autour de la structure à étudier.

Pour pouvoir être utilisée dans l'analyse dynamique, il est nécessaire qu'elles représentent un bruit blanc au moins dans la plage de fréquence de génie civil.

Cependant des perturbations du bruit de fond peuvent apparaître comme étant :

- le passage d'un véhicule près de la structure, provoquant une sollicitation du niveau sortant du bruit,
- la circulation d'une personne autour du capteur, provoquant des impacts qui ne correspondent pas à la réponse de la structure soumise au bruit de fond.

Pour que l'hypothèse de bruit blanc soit validée, il est nécessaire de supprimer du signal toutes ces perturbations. Pour pouvoir les supprimer, ils ont utilisé un test qui permet de les repérer.

Ces perturbations sont caractérisées par une amplitude sortant de l'amplitude moyenne du bruit de fond. Le test utilisé repose sur la comparaison de moyennes du signal calculées sur deux durées différentes: (1) une moyenne de courte durée STA (Short Time Average) de l'ordre de la seconde, dont la valeur est sensible aux variations d'amplitudes et (2) une moyenne de longue durée LTA (Long Time Average) de l'ordre de 20 à 30 secondes, dont la valeur est peu sensible aux variations d'amplitude.

Le rapport de ces deux moyennes STA/LTA, donne une idée sur la stabilité du signal.

En effet, si le signal est stable c'est-à-dire il est sans variation de niveau moyen, ce rapport est voisin de l'unité. Par contre, si le signal est instable c'est-à-dire avec des variations de niveau moyen, ce rapport est différent de l'unité. Afin de qualifier la stabilité du signal, il est défini des bornes entre lesquelles ce rapport peut varier, typiquement ces bornes sont de l'ordre de 0.5 et 2.0. Pour qu'une fenêtre de signal soit qualifiée de stable, il faut que le rapport STA/LTA soit compris entre ses valeurs limites sur toute la fenêtre.

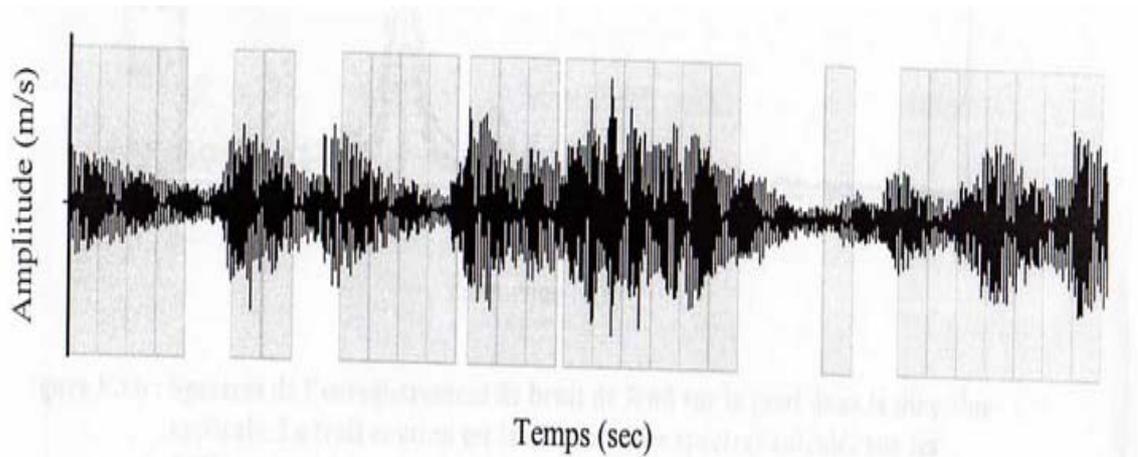


Figure 1.1 : Enregistrement de bruit de fond sur une structure. Les zones grises sont des fenêtres sélectionnées comme stables.

Une fois les fenêtres de signal choisies, l'amplitude spectrale est calculée sur chaque fenêtre par une transformée de Fourier. Les spectres sont ensuite lissés avec une fenêtre glissante dont la forme et la largeur dépende de la fréquence [Konno and Ohmachi, 1998]. Puis ces spectres sont moyennés et un écart type est calculé.

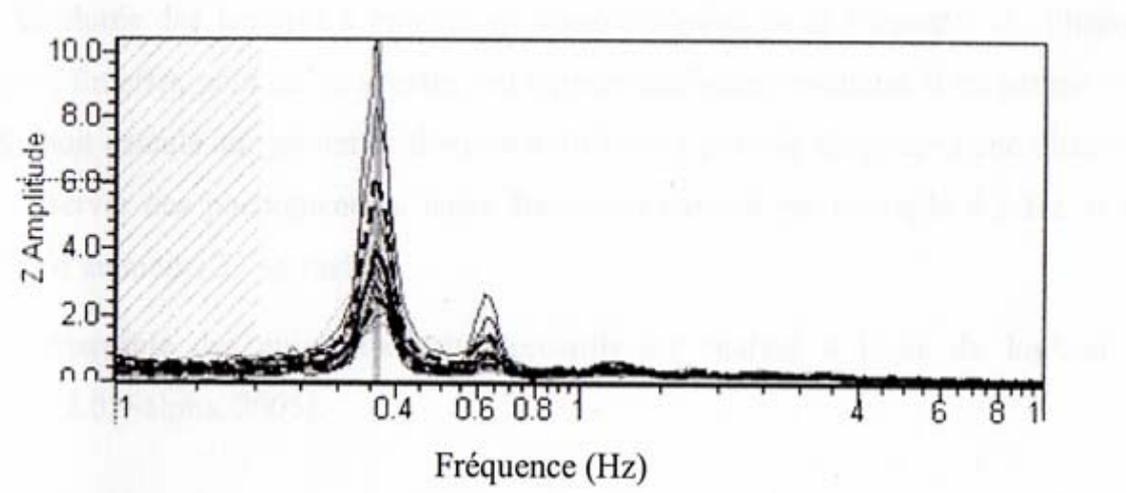


Figure 1.2 : Spectre sur les différentes fenêtres de l'enregistrement du bruit de fond sur une structure

L'ensemble des enregistrements recueillis est analysé à l'aide du logiciel Geopsy [31].

Le bruit de fond est une excitation aléatoire, et l'analyse dynamique de l'ouvrage consiste à calculer les spectres de Fourier sur plusieurs fenêtres du signal de la réponse et à les moyenner en calculant l'écart type. Toutes les fenêtres du signal ne peuvent pas être utilisées car le bruit de fond est une sollicitation qui provient de l'activité ambiante de la structure étudiée.

1.4.10 Méthode d'analyse des vibrations aléatoire

Compte tenu de leur caractère aléatoire et de leur contenu en fréquence, ces vibrations ne peuvent être étudiées qu'à l'aide de méthode statistique appliquée sur des signaux en fonction du temps, en utilisant des courbes tracées dans le domaine des fréquences (spectre).

On peut schématiquement distinguer quatre manières d'aborder l'analyse des vibrations aléatoires [32] et [33], l'analyse des propriétés statistique d'ensemble du processus,

- les méthodes de corrélation,
- l'analyse spectrale,
- l'analyse des propriétés statistiques du signal en fonction du temps.

1.4.11 Méthode probabiliste [34]

Pour les méthodes linéaires la théorie de ces méthodes se fonde sur la représentation du mouvement sismique sous forme d'un bruit blanc stationnaire pur ou filtré caractérisé par sa densité spectrale de puissance ce qui constitue une simulation acceptable d'un ensemble d'enregistrement, la connaissance de cette densité spectrale de puissance permet de déterminer la réponse de la structure en termes probabiliste c'est-à-dire en faisant appelle aux notions de moyenne et d'écart type, ce qui fournit des éléments suffisant pour apprécier le degré de sécurité procuré par le dimensionnement de la structure et qui est une mesure de la distribution dans le domaine des fréquences de la moyenne de la valeur carré $E(x^2)$.

Pour chaque fréquence le carré de l'amplitude est proportionnelle à la puissance (énergie /unité de temps), provenant de la composition harmonique considérée.

Pour un processus stationnaire la densité spectrale fournit une décomposition fréquentielle locale de l'énergie du processus en ce sens que la valeur locale de la densité par filtrage idéal passe bande. La largeur du filtre étant unitaire et centrée sur la fréquence considérée.

Le choix de la résolution dans un domaine (temps ou fréquence) fixe automatiquement la résolution dans l'autre domaine, cette notion de compromis entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle est le principe d'incertitude.

En conclusion, la méthode d'extraction et la détermination des caractéristiques des paramètres modaux des structures peuvent se faire par ces différentes méthodes qui ont un seul dénominateur commun la technique de traitement de signal et par la suite divergent soit vers l'identification temporelle soit vers l'identification fréquentielle.

1.5 Fonction de transfert

Une fonction de transfert est une représentation mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie d'un système linéaire invariant ou le rapport de la transformée de Laplace du signal de sortie à celui de l'entrée. Elle est utilisée dans l'analyse des systèmes SISO (single input, single output), en traitement de signal, en théorie des communications et en automatisme. Elle contient toutes les informations de la structure, c'est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle, elle est exprimée en décibels [24].

La réponse impulsionnelle, exprime la même entité mais dans le domaine temporel.

Il existe deux méthodes essentielles pour mesurer les fonctions de transfert :

-La méthode harmonique : elle donne la fonction de transfert pour chaque fréquence.

-La méthode stochastique : elle donne la fonction de transfert globale dans une gamme de fréquence.

Physiquement, la fonction de transfert caractérise la dynamique du système, elle ne dépend que de ses caractéristiques physiques. Ainsi dorénavant, un système sera décrit par sa fonction de transfert (excitation génère une réponse).

1.5.1 Analyse temporelle et fréquentielle

L'utilisation de l'une ou de l'autre de ces techniques d'analyse dépend de plusieurs aspects, tels que le comportement numérique de la méthode d'estimation, la bande d'analyse ou bien la nature des données. On peut passer du domaine temporel au domaine fréquentiel et vice versa par les équations classiques. Dans le domaine fréquentiel on utilise pour le traitement numérique la transformée de Fourier, alors que dans le domaine temporel on utilise la transformée en z.

1.5.2 Bruit blanc

Un cas particulier très riche d'applications est celui dans lequel le spectre de puissance de la fonction aléatoire est constant sur toute l'étendue des fréquences. Un processus ayant un tel spectre est nommé bruit blanc par analogie avec la lumière blanche qui le spectre visible plus ou moins uniformément.

Pour un tel bruit, la puissance dans une gamme de fréquences donnée ne dépend pas de la place de cette bande de fréquences sur toute l'étendue possible du spectre.

Pratiquement, un tel bruit n'existe pas, mais on parlera souvent de bruit blanc en considérant un bruit dont le spectre de densité de puissance est constant à l'intérieur de la bande passante utile infinie.

La fonction d'auto corrélation d'un tel bruit pratiquement blanc ne sera pas réellement une impulsion de Dirac, mais sera représentée par une courbe très étroite à l'échelle des temps de corrélation considérés. Un bruit blanc est un processus sans mémoire.

1.5.3 Notions de traitement des signaux

Par définition un signal est un support et est une représentation physique de l'information, par exemple les signaux sonores sont des fluctuations de la pression de l'air transportant un message à notre oreille, les signaux visuels sont des ondes de lumières apportant une information à notre œil.

Généralement les signaux doivent être traités soit pour extraire de l'information soit pour les rendre porteurs de l'information, ces traitements sont effectués à l'aide de système que l'on appelle système des traitements des signaux. Un tel système agit sur un signal d'entrée et présente à sa sortie un signal qui est sous forme plus appropriée pour l'utilisation envisagée.

Le traitement du signal est une activité pluridisciplinaire au confluent de la recherche en mathématique (pures et appliquées) et en physique (des ondes et des matériaux), il bénéficie et participe à l'innovation en électronique et en informatique.

Cette discipline est donc un carrefour par les outils qu'elle emprunte à d'autres disciplines (mathématiques appliquées, informatique, automatisme) et par les méthodes qu'elle fournit à de nombreux secteurs d'application (télécommunication, sismique, géophysique).

Pendant plusieurs décennies, le traitement de signal a gardé la marque de la discipline qui lui a donné naissance, « l'électronique ». Les moyens de traitement mais aussi les méthodes et parfois jusqu'aux concepts ont été influencés par cette origine.

Ainsi, les premières méthodes ont été centrées sur ce que l'électronique dominait bien, l'invariant. Il a fallu attendre le milieu des années 60, et la diffusion de moyens de calculs numériques, pour voir un enrichissement très important de l'éventail de méthodes, entraînant des recherches théoriques nouvelles libérées de toute référence aux moyens matériels d'application.

L'adoption de système de calcul numérique comme outil de base a eu un second effet très novateur, la discipline a importé des méthodes issues d'horizons scientifiques divers, tels que l'automatique, l'analyse numérique ou l'analyse de données. Après une période d'importation servile, la spécificité des problèmes rencontrés a conduit la communauté du traitement du signal à faire évoluer ces méthodes, et avoir un apport original dans ces domaines traditionnels.

C'est encore en raison du caractère spécifique de ses applications que sont développés des processeurs spécialisés pour le traitement numérique du signal (Digital Signal Processing) et des images. Le traitement de signal est sans doute l'une des seules disciplines à posséder son propre parc de processeurs.

La souplesse que confèrent ces moyens numériques de calcul, les limites sans cesse reculées de ce qu'il est convenu d'appeler Traitement en Temps Réel, ont étendu le domaine territorial de sa discipline est la suivante : Mais dans quel problème de traitement n'y a-t-il pas de traitement de signal.

L'une des caractéristiques de la discipline est le niveau mathématique qu'elle requiert pour pouvoir être appliquée. Il est courant, dans le domaine des sciences de l'ingénieur, d'observer un décalage important entre le niveau théorique nécessaire à la recherche et celui qu'on utilise effectivement pour les applications industrielles. Dans le domaine du traitement, ce décalage est beaucoup plus faible qu'ailleurs, ou autrement dit, le niveau théorique que doit posséder l'ingénieur pour conduire des applications très concrètes est vastes, et s'étend au rythme de l'introduction de nouvelles applications. Il s'est pendant longtemps limité à l'analyse fonctionnelle (pensons à l'incontournable Transformée de Fourier), au calcul des probabilités et à la théorie des processus stochastiques.

1.5.4 Création des signaux numériques [35]

Par définition un signal discret est une suite des valeurs numériques réelles ou complexes. S'il est formé par des valeurs réelles, il est appelé signal réel, alors s'il est composé de valeurs complexes on l'appelle signal complexe.

Un signal numérique est un signal discret dont l'amplitude est quantifiée.

1.5.5 Création de signaux sismiques

Pour certaines applications, les experts ont besoin d'une représentation temporelle du mouvement du sol :

- c'est obligatoire pour les analyses sismiques expérimentales (mouvement à imposer à une table vibrante).
- c'est presque toujours indispensable quand le comportement de la structure à étudier est non linéaire.
- cela peut être moins coûteux dans le cas de structures linéaire à forte densité modale.

Cette façon de générer des signaux sismiques est certainement la meilleure puis qu'elle a le souci de donner une représentation fidèle des phénomènes physiques.

Actuellement dans la pratique la donnée sismique est imposée aux ingénieurs sous la forme d'un ensemble de spectre de réponse de l'oscillateur (SRO) réglementaires.

Le problème qui se pose est donc de définir un processus aléatoire lui permettant d'obtenir les réalisations temporelles dont il a besoin afin de les ajuster au spectre de réponse de l'oscillateur réglementaire.

Un signal sismique peut être caractérisé par son accélérogramme ou la transformé de Fourier de cet accélérogramme. Un signal sismique, définit la façon la plus pratique un spectre de réponse d'un oscillateur.

1.5.6 Transformée de Fourier

La transformée de Fourier est un outil très précieux en traitement de signal que se soit sur le plan théorique ou expérimental. Elle intervient en particulier dans l'analyse spectrale, qui une application fondamentale. Avec les méthodes classiques, le calcul de cette transformation par voie numérique nécessite un temps de calcul prohibitif. L'algorithme de calcul rapide connu sous le nom de transformation de Fourier rapide (FFT) a permis de réduire considérablement ce temps de calcul. Toute fois, dans certains cas les limites des capacités de la transformée de Fourier sont atteintes le besoin ainsi de créer un outil plus puissant est comblé par la transformation en Z (Domaine temporel).

La transformée de Fourier permet le passage des mesures temporelles vers le domaine fréquentielle qui est exprimée par le spectre de Fourier. Les pics de résonance obtenus sur le spectre représentent les fréquences de résonances de la structure, les modes de vibrations et les amplitudes correspondantes. Les amplitudes obtenues en chaque point de mesure, nous permettent de tracer les formes modales par rapport à un point de mesure fixe.

La transformée de Fourier d'une fonction réelle $f(t)$ est définie par :

$$X(\omega) = F$$

La transformée de Fourier est le passage de la représentation en temps d'un signal à la représentation fréquence de ce dernier.

Pour qu'une fonction $f(t)$ ait une transformée de Fourier il faut que :

1-la fonction $f(t)$ soit bornée,

$f(t)$ ait une valeur finie. Pour autant que cette $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$ intégrale [37]

Intégrale existe pour tout ω . C'est une fonction à valeurs complexes de paramètre réel ω . L'existence de cette intégrale est garantie si $f(t)$ est absolument intégrable.

3-les discontinuités de $f(t)$ ainsi que ses maxima et minima soient en nombre fini.

La transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle est la fonction de transfert en régime permanent.

1.6 Conclusion

Un problème important en dynamique des structures réside dans la détermination précise des paramètres caractérisant les modes principaux d'une structure existante.

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques concepts de base qui identifient par les différentes méthodes les caractéristiques dynamiques d'une structure sous vibrations ambiantes. Le choix entre méthode temporelle et fréquentielle dépend des avantages et des inconvénients qu'elles présentent.

L'ensemble des travaux de recherche en dynamique des structures utilise la méthode des essais de vibrations ambiantes. Ces auscultations dynamiques diffèrent d'une publication à une autre, il y a ceux qu'ils utilisent les fréquences modales pour :

- les faire comparaître aux fréquences déterminées expérimentalement avec celles calculées analytiquement,
- déterminer une fonction de transfert afin d'établir un spectre de plancher,
- assurer la maintenance d'un ouvrage (exemple ouvrage d'art, ouvrage stratégique etc.).

Les essais dynamiques sous vibration ambiante peuvent être aussi utilisées dans les études de vulnérabilité et dans l'expertise des ouvrages et cela sous deux aspects :

- l'évaluation globale des structures,
- l'identification des dégâts.

Le contenu en fréquence du signal doit apporter des informations utiles sur sa sévérité par comparaison aux fréquences propres du système mécanique qui subit la vibration.

CONCEPTION DU RESONATEUR MECANIQUE

2.1 Introduction

Afin d'étudier plus clairement et avec une précision la technique des phénomènes d'un système en vibration et l'identification du comportement dynamique du système, la méthode des essais des vibrations ambiantes en génie parasismique est actuellement la plus utilisée pour la détermination des caractéristique dynamiques, cette méthode est simple et efficace, elle permet de déterminer les fréquences, les modes propres et l'amortissement à basse amplitudes.

Seulement les limites de cette méthode résident dans la faiblesse des vibrations d'excitations, ce qui conduit dans certains cas à des résultats peu fiables ou parfois erronés quand les signaux sont fortement altère par les bruits parasites.

Le résonateur mécanique qu'envisage cette étude constitue une solution utile pour améliorer la précision des résultats des essais.

Il sert essentiellement à amplifier les amplitudes des vibrations aux voisinages des fréquences propres de la structure sous essais et permet d'obtenir plusieurs enregistrements des vibrations effectuées sur le même endroit en faisant varier progressivement la hauteur du résonateur mécanique.

Il nous permet aussi de mesurer avec précision les plus grandes amplitudes de chaque enregistrement donné.

Il sera aussi utilisé comme outil pour la détermination expérimentale des spectres de réponse des planchers pour le calcul parasismique des équipements, qui est enfin un des objectifs de notre projet.

2.2 Description du résonateur mécanique

Le résonateur est conçu comme un système à un seul degré de liberté caractérisé par une période variable dans une fourchette d'intérêt.

Ainsi le dispositif conçu d'une plate forme (plaque métallique) amovible en hauteur supportée par quatre tiges comme colonnes encastrées à la base dans un socle en béton (figure 2.1).

2.2.1 Plaque métallique

C'est une tôle en acier de forme carrée trouée à ces quatre coins (emplacement des tiges), les dimensions et l'épaisseur de la plaque seront déterminées en fonction d'un calcul statique de période du résonateur et dont la valeur maximale soit aux environs de 1sec. Si la période du résonateur s'avère inférieur à celle de l'ouvrage que l'on souhaite faire des essais on se voit contraint soit :

- d'augmenter la masse de la tôle ou d'ajouter des masses posées symétriquement sur la tôle,
- de diminuer la raideur des tiges.

2.2.2 Tiges (colonnes)

Elles sont au nombre de quatre également en acier, fûtées du haut jusqu'en bas pour permettre le déplacement de la tôle à une hauteur variable. La fixation des tiges au niveau de la plaque dans le socle est assurée par des écrous.

2.2.3 Socle

C'est une assise en béton de forme carrée, de 10cm d'épaisseur et de 30cm de côté. Elle est composée de :

- 04 tubes en acier rond plein troués et fûtés à l'intérieur de 4 cm de profondeur là où doivent s'ancrer les tiges. Les tubes sont reliés entre eux par soudure avec du fer plat de 3mm d'épaisseur et de 3cm de largeur,
- une tôle en acier formant la base de l'assise de 1cm d'épaisseur ou les tubes sont reliés à la tôle par soudure ; de même, les fers plats sont aussi reliés par soudure à la tôle par des aciers ronds lisses en diagonales.

Le béton est coulé dans l'ensemble de ces éléments afin d'assurer un bon encastrement des tiges figure 3.4



Photo 2.1 : vue globale du résonateur mécanique

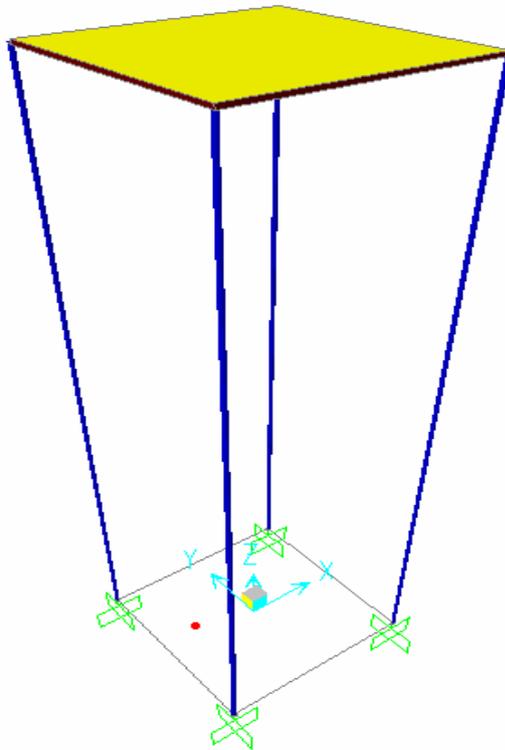


Figure 2.1 : Modèle en éléments finis du résonateur Mécanique en tridimensionnelle (3D)

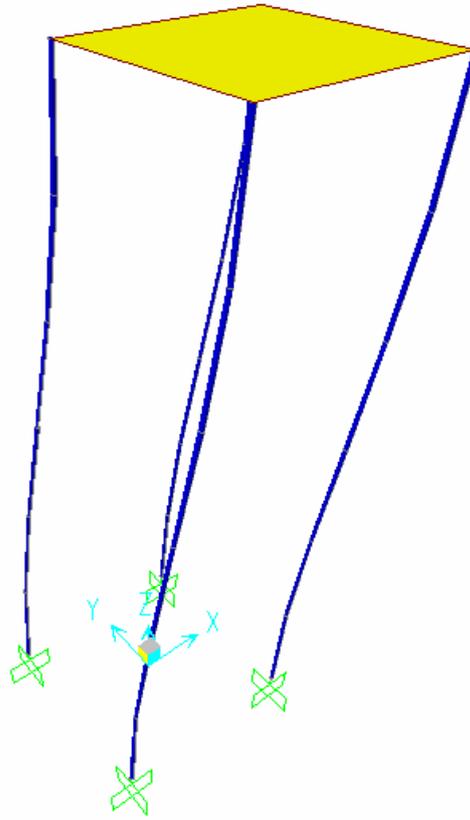


Figure 2.2 : 1^{er} mode de vibration (translation)

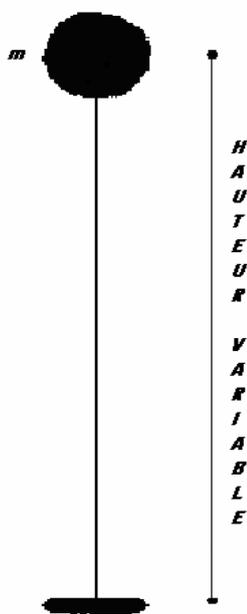


Figure 2.3 : Modèle à un seul degré de liberté

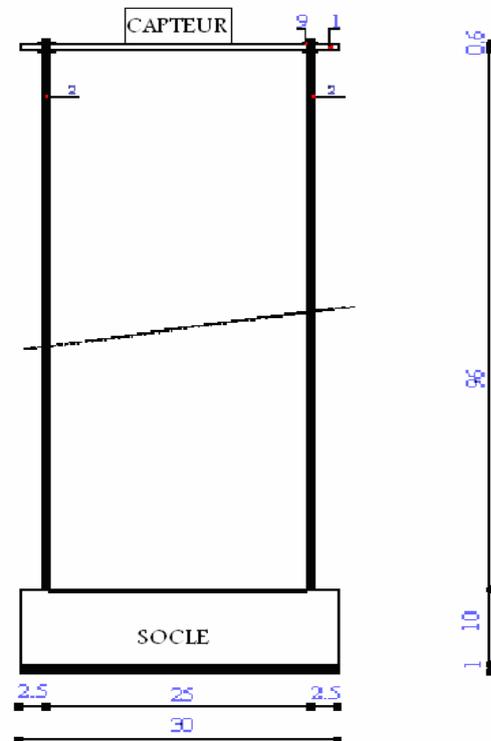


Figure 2.4 : Schéma de résonateur mécanique

2.3 Calcul de la réponse du résonateur

Le résonateur mécanique peut être modélisé par un système à un seul degré de liberté.

Il est assimilé à un oscillateur simple constitué d'une masse m fixée au bout d'une tige (de rigidité K et caractérisée par un amortissement ξ).

Le moment d'inertie d'une tige est :

$$I = \pi D^4 / 64 \quad (3.1)$$

La rigidité des quatre tiges :

$$K = 4 \times 12EI / L^3 \quad (3.2)$$

On obtient alors la période :

$$T = 2\pi \sqrt{m/k} \quad (3.3)$$

Les caractéristiques géométriques et massiques du système étant connues, un essai d'identification à longueur max des tiges a été effectué pour déterminer le module d'élasticité de la nuance de l'acier des tiges.

La période déterminée expérimentalement $T=0.9\text{sec}$ pour $L=96\text{cm}$

Cet essai préliminaire nous révèle que le module de Young doit être corrigé et qui devient enfin $E=0.938 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2$.

M : étant la somme des : masse de la plaque, la moitié de la masse des tiges, la masse du sismographe.

Exprimée en Kg d'où $M=6.65 \text{ kg}$

$$K : \text{étant la rigidité} = \sum 12EI / L^3 \Rightarrow 4 \times 12EI / L^3 \text{ exprimée en } \text{N/mm}^2$$

E : étant le module de Young à déterminer

I ; étant l'inertie des tiges $\pi D^4 / 64$ exprimée en mm^4

L : étant la hauteur du résonateur mécanique exprimé en mètre

$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{mL^3 / 48EI} \Rightarrow (0.9/6.28)^2 \Rightarrow \\ (0.9/6.28)^2 &= 6.65 \times (960)^3 / 48 \times E \times 63.62 \times 10^3 \\ \text{D'où} &\Rightarrow E = 0.938 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Par conséquent la valeur de la période pour les différentes hauteurs de résonateur mécanique est :

$$T=6.28 \sqrt{6.65 \times L^3 / 48 \times 0.938 \times 10^5 \times 63.62 \times 10^3}$$

$$\text{Donc } T=3.03 \times 10^{-5} \times L^{3/2}$$

2.4 Calibrage fréquence hauteur du résonateur

Le résonateur mécanique est un système à fréquence modulable variable. L'objectif du calibrage est de déterminer la relation entre les périodes et les hauteurs des tiges.

On effectue des calculs analytiques à différentes hauteurs et on détermine la période à chaque hauteur du résonateur.

Autant d'oscillateurs à hauteurs variables pour autant de périodes correspondantes, dont les valeurs sont indiquées sur le tableau conformément à la formule $T=3.03 \times 10^{-5} L^{3/2}$.

Tableau 2.1 : valeur de périodes
Pour différentes hauteurs du résonateur

Hauteur (cm)	Période (sec)
96	0.90
92	0.86
88	0.79
84	0.74
80	0.69
76	0.63
72	0.59
65	0.50
61	0.46
57	0.41
53	0.37
49	0.33
45	0.29
40	0.24
37	0.22
34	0.19
31	0.17
28	0.14
25	0.12
22	0.11

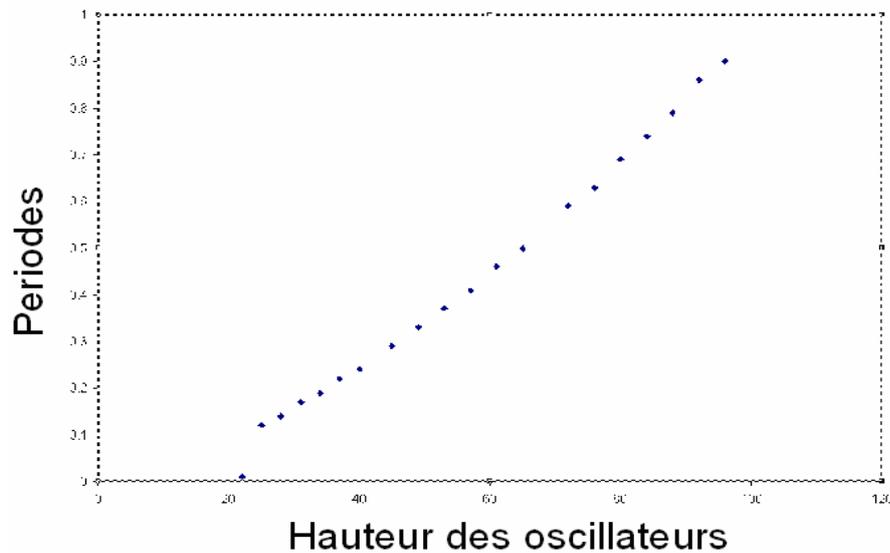


Figure 2.5 : Périodes en fonction des hauteurs

2.5 Conclusion

Compte tenu des valeurs de périodes du résonateur mécanique variant sur une plage de fréquences de 1 à 10 Hz, il convient de l'utiliser sur des bâtiments dont la fréquence ne soit pas inférieure à 1Hz (c'est à dire constructions non élancées).

Si on se voit contraint d'utiliser ce résonateur mécanique pour des bâtiments élancés, ponts, barrages etc. et dont la fréquence propre de la structure à étudier le dépasse, on serait dans ces conditions obligé de travailler sur une large bande de fréquence et par conséquent on serait amené à :

- soit augmenter la masse de la plaque et reprendre les calculs de périodes,
- soit diminuer la raideur des tiges.

Reprendre les calculs des périodes du nouveau résonateur jusqu' à ce que la valeur de la période soit supérieure à la période de la construction à étudier et garder la même hauteur du résonateur pour la bonne maîtrise des essais.

3. ESSAIS A ECHELLE REELLE DE BATIMENTS

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré en premier lieu à une analyse modale analytique d'un bâtiment abritant le département de génie civil de l'université de Blida et d'un autre bâtiment à usage d'habitation, les deux bâtiments situés dans la cité des 520 logements à Blida et en deuxième lieu une analyse expérimentale en utilisant le résonateur mécanique pour une auscultation dynamique du bâtiment par des essais sous l'effet des vibrations ambiantes.

L'analyse modale analytique de cet ouvrage en procédant par un modèle numérique en élément fini moyennant le SAP 2000 [37], nous permet la détermination des fréquences propres et les modes de vibrations de l'ouvrage afin que l'on puisse connaître l'ordre de grandeur de ces fréquences pour nous permettre de concevoir notre résonateur mécanique et de mettre la fréquence du premier mode des deux ouvrages à l'intérieur de la bande de fréquences du résonateur mécanique.

Cette analyse sert aussi à bien positionner le résonateur mécanique dans l'ouvrage lors des essais.

La méthode consiste à placer un capteur de vitesse ou d'accélération sur le résonateur mécanique dans les différents niveaux de la structure de l'ouvrage, afin de nous permettre d'enregistrer la réponse de la structure à des sollicitations par le bruit de fond (vibration ambiante) au moyen d'une chaîne de mesure.

Enfin l'avantage de ces essais c'est qu'ils ne portent ni préjudice ni un gêne pour les structures en service.

3.2 Analyse modale analytique

3.2.1 Description de l'ouvrage 1

L'immeuble du département de génie civil est une construction réalisée au début des années quatre vingt dix et conçu par un bureau d'étude américain (Skidmore-Awings & Meri). La structure ayant une configuration simple présentant une symétrie dans un sens et non dans l'autre.

La construction est un bâtiment en R.D.C+1étage à usage de bureau en béton armé constitué de portiques auto stables et de voiles épousant la forme des cages d'escalier et des salles d'eaux.

L'immeuble possède une cage d'escalier de secours en charpente métallique séparée par un joint.

Les dimensions de la structure sont comme suit:

Longueur totale: 52.5m

Largeur totale: 22.5m

Hauteur d'étage: 3.5m

Entraxe des portiques : 7.5m dans les deux sens.

Poteaux: 60x60

Poutres principales et secondaires : 50x50

Poutres à mi travée: 50x50

Planchers à corps creux: 20+4

Voiles : 20cm d'épaisseur.

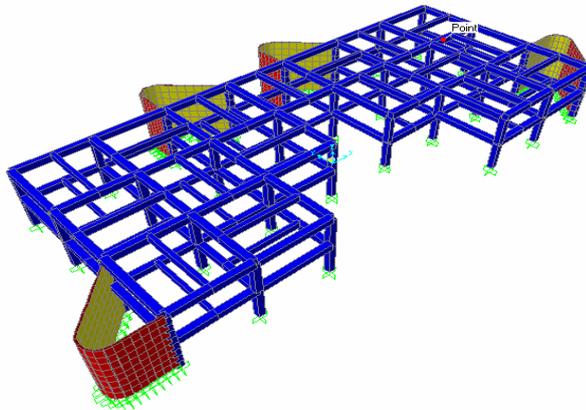


Figure 3.1 : modèle en élément finis de la structure

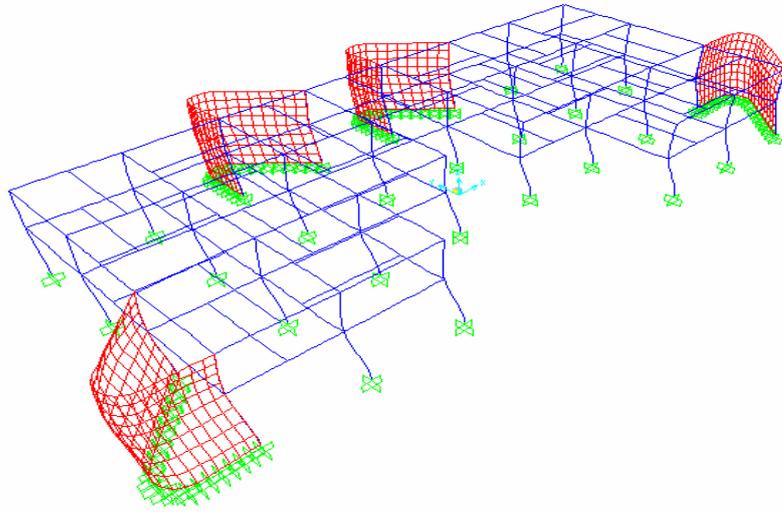


Figure 3.2 : Vue 3D du modèle sous le mode1

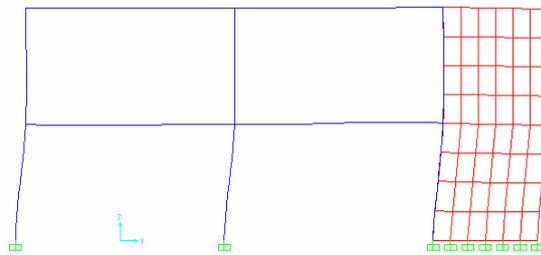


Figure 3.3: Vue YZ du modèle sous le mode1

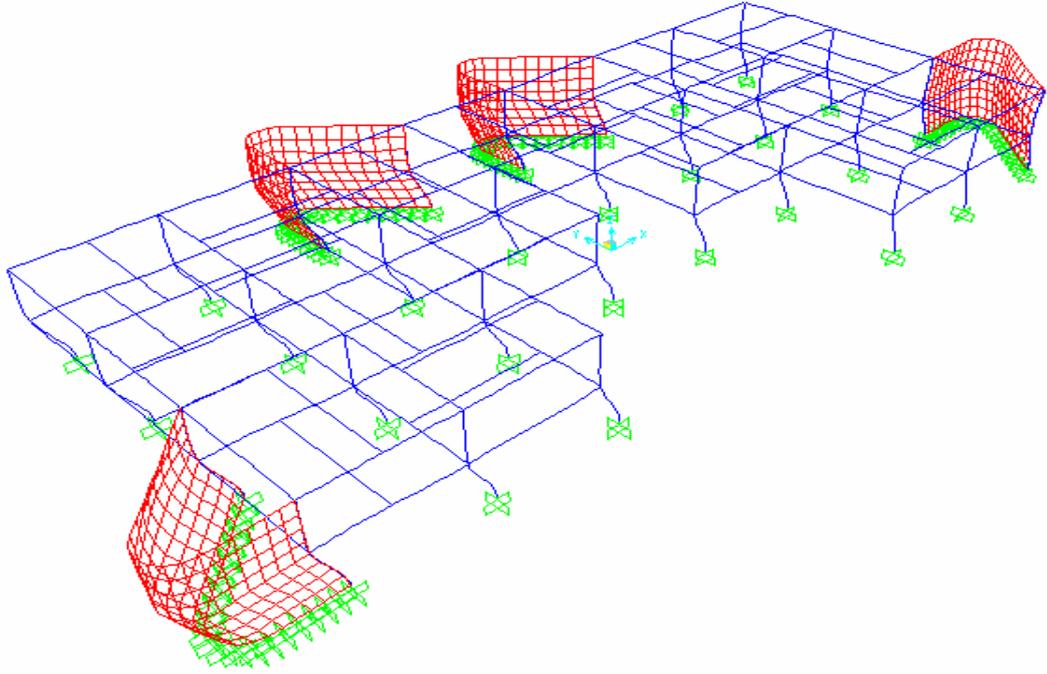


Figure 3.4: Vue 3D du modèle sous le mode 2

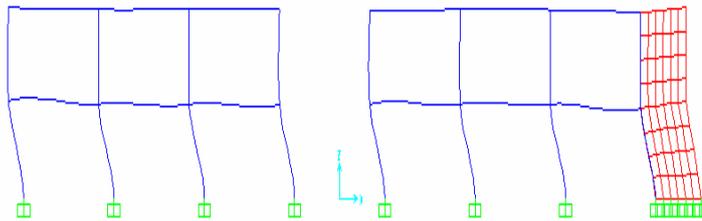


Figure 3.5: Vue XZ du modèle sous le mode 2

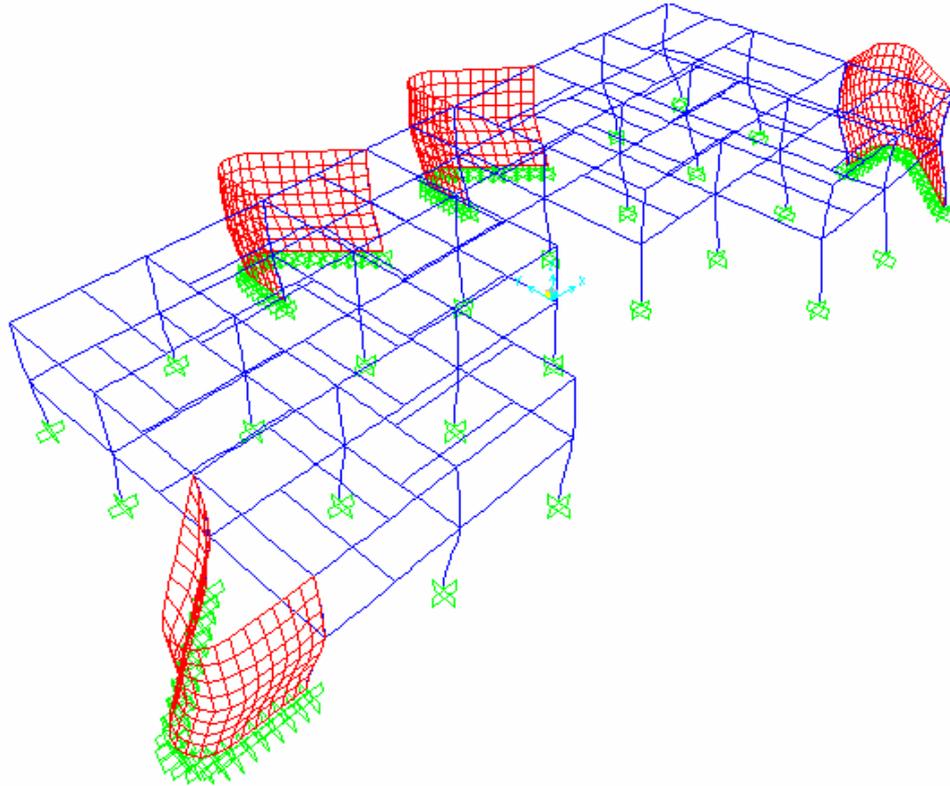


Figure 3.6: vue 3D du modèle sous le mode 3

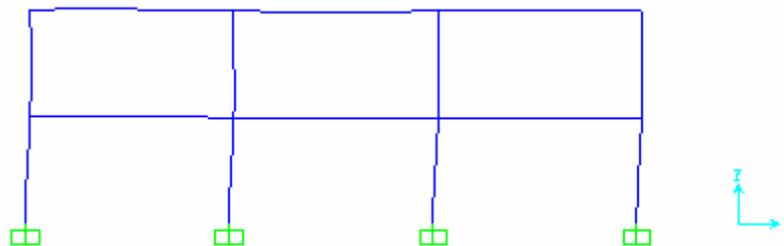


Figure 3.7: vue XZ du modèle mode 3

3.4.2 Description de l'ouvrage 2

Bâtiment à usage de logement, construction réalisée au début des années quatre vingt dix et conçu par un bureau d'étude algérien. La structure ayant une configuration simple présentant une symétrie dans un sens et dans l'autre.

La construction est un bâtiment en R.D.C+5étages à usage de logement, en béton armé constitué uniquement par des voiles dans les deux sens.

Les dimensions de la structure sont comme suit:

Longueur totale: 21.00m

Largeur totale:9.30m

Hauteur d'étage: 3.06m

Entraxe des voiles : 3.00m dans les deux sens.

Planchers en dalle pleine

Voiles : 20cm d'épaisseur.

3.5 Modélisation

La modélisation est la détermination d'un modèle tenant compte le plus correctement possible de la masse et de la raideur de tous les éléments porteurs de la structure. C'est la phase essentielle pour la réponse à un chargement horizontal donné.

Lorsqu'il s'agit de modéliser une construction existante, le calcul des masses et de leur position peut être effectué avec une bonne précision, par contre celui des raideurs le calcul est très approché (inertie des sections peuvent être modifiée par le phénomène des fissures éventuelles dans le béton, la largeur de la table de compression parfois elle n'est pas précise etc.)

Comme on n'a pas pu accéder à l'intérieur des logements du bâtiment 2 (faute de relevé) la modélisation a été faite uniquement pour le bâtiment 1.

3.6 Modélisation de la structure

La structure est modélisée à l'aide des barres ou d'éléments finis (poutre équivalente) reliant les nœuds entre eux. On concentre aux nœuds principaux les masses des planchers considérés comme rigide dans leurs plans. La masse des éléments verticaux est alors concentrée aux nœuds principaux les plus proches.

En général la méthode des éléments finis constitue la méthode la plus efficace pour exprimer les déplacements de configuration arbitraire de structure au moyen d'un ensemble coordonnés discrets.

Pour ce est qui du bâtiment 1, tous les éléments structuraux linéaires sont modélisés par des éléments poutres par contre les voiles et planchers sont modélisés en éléments shells. La structure est supposée encastrée au sol.

L'analyse modale prend en compte la masse provenant uniquement du poids propre de l'ouvrage tel qu'il existe ainsi que les charges d'exploitations.

3.7 Résultats de l'analyse modale

Les résultats de l'analyse modale montrent que le bâtiment 1, dominé selon chaque direction par les modes fondamentales évaluées à 0.16 et 0.10 sec selon l'axe x et y respectivement. Une modeste contribution du deuxième mode selon l'axe y est estimée à 10. Dans ce cas on positionnera le capteur des vibrations au centre du plancher le plus haut pour pouvoir capter les deux modes selon les deux axes.

Tableau 4.1 : périodes et facteurs de participation massique de l'ouvrage

Mode	Période(s)	Facteurs de participation massique (%)			
		UX	UY	SumUX	SumUY
1	0.16	0.0067	0.8734	0.0067	0.8734
2	0.10	0.9766	0.0055	0.9833	0.8789
3	0.08	0.0001	0.1045	0.9834	0.9834

3.8 Analyse modale expérimentale

3.8.1 Méthode des vibrations ambiantes

Définition: une vibration ambiante est une fluctuation locale de pression induite par des ondes provenant de l'extérieur, qui sont dues aux trafic routier, piétons, vent machine tournante, micro secousses etc. Qui sollicitent les structures d'une manière permanente.

L'une des méthodes d'identification des caractéristiques dynamiques des structures est la méthode des vibrations ambiantes, cette méthode présente l'avantage de la simplicité et d'économie.

L'intérêt des essais in situ est d'intégrer un ensemble de paramètre jouant un rôle important dans le comportement vibratoire de la structure qu'il est très difficile ou impossible de

reproduire en laboratoire (exemple le rôle du sol, les dispositions constructives etc.). Le but aussi de ces essais est de valider les modèles d'éléments finis par l'ajustement des fréquences propres théoriques sur la base des valeurs expérimentales réelles.

3.9 Procédure expérimentale

Les bâtiments à étudier sont décrits et présentés précédemment.

Pour étudier les bâtiments nous avons mis en œuvre la méthode des essais de vibration ambiante afin d'ausculter dynamiquement la structure et enregistrer ses vibrations sous sollicitations ambiantes (trafic routier, piétons, le vent, micro secousses etc.) sans lui appliquer d'autres contraintes, ses sollicitations ont des amplitudes très faibles ce qui ne permettent pas à la structure de se comporter hors de son domaine élastique, cela n'empêche pas la faible amplitude de ces sollicitations de rendre possible la mesure de la réponse de la structure à ces sollicitations et d'en déduire les caractéristiques dynamiques dans le domaine des petites déformations. La facilité de mise en œuvre de la méthode nous permet de répéter les essais autant de fois.

3.10 Description des instruments de mesure

Les essais de vibrations ambiantes ont été effectués par nos soins en utilisant le résonateur mécanique et la chaîne de mesure.

3.11 Chaîne de mesure

L'équipement utilisé pour les test in situ se compose de sismomètre (capteur) à trois composantes (vertical, nord-sud et sud –est) et d'une station d'enregistrement Cityshark (Figures 4.1 et 4.2)

3.12 Le sismomètre ou capteur de vibrations

Le capteur de vibration est un sismomètre de type LE-3D (Figure 4.1), de fréquence naturelle de 1.0Hz et d'amortissement négligeable. La plage des fréquences mesurables varie de 1.0 à 100Hz. Il est destiné à enregistrer des fréquences de mouvement dus au vent, circulation etc. Il est très adapté aux ouvrages de génie- civil.



Photo 3.1 : Capteur de vibrations

3.13 La station d'enregistrement

la station Cityshark I, permet la connexion d'un seul capteur à trois composantes .Quant à la station Cityshark II, elle permet la connexion simultanée de six capteurs à trois composantes. Elle autorise plusieurs modes d'enregistrement manuel ou automatique (acquisition synchrone).

Les signaux captés par le sismomètre sont transmis à cette station d'acquisition, possédant une carte mémoire réservée pour le stockage des enregistrements.



Photo 3.2 : Station d'acquisition

3.14 Calibrage des instruments de mesure

Des essais préliminaires sont effectués dans le but d'arriver à assurer un calibrage optimal du capteur il en de même pour le réglage du gain, ce dernier permet d'obtenir un signal mesurable et exploitable.

3.15 Choix de la position du résonateur mécanique

Le choix des positions et de l'orientation du résonateur mécanique est très important pour l'enregistrement et éventuellement l'identification des modes de vibrations expérimentaux.

Lorsque les formes des structures sont complexes cela nous incite à faire une modélisation analytique très précise et conforme à la structure existante.

Le calcul modal ainsi que le taux de participation massique correspondant est fait précédemment.

Les formes modales théoriques calculées serviront à déterminer les amplitudes de chaque point de la structure et le résonateur mécanique doit être positionné dans l'endroit présentant la plus grande amplitude modale du niveau de la structure.

3.16 Logiciel de traitement

Le traitement des signaux a pour objectif la détermination des périodes et les modes de vibrations de la structure ce qui correspond aux pics de fréquences dominant dans le spectre de Fourier.

Les logiciels de traitement sont le logiciel Origin v7.0 et le logiciel Geopsy, il permettent d'effectuer plusieurs opérations de traitement de signaux telles que:

- le calcul de la transformée rapide de Fourier (FFT),
- l'analyse des systèmes linéaires comme les opérations de convolution et de corrélations ainsi que d'autres opérations.

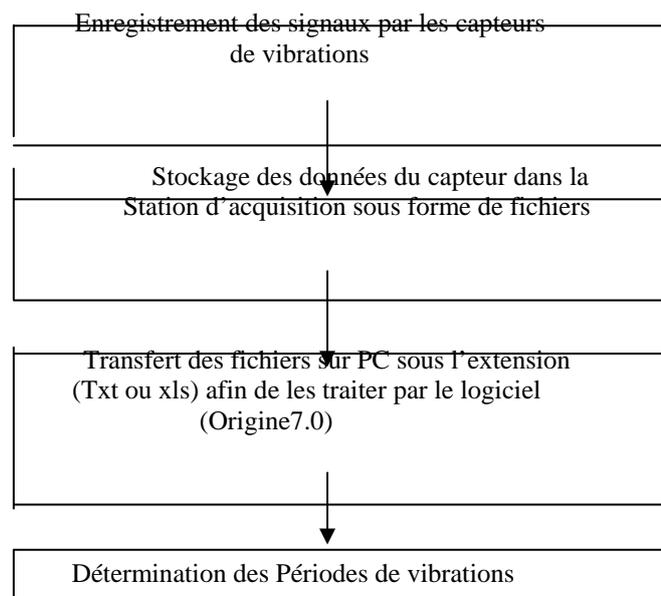


Figure 3.8 : Organigramme des essais de vibrations ambiantes

3.17 Essais sur bâtiment 1

Les essais de l'expérimentation sur le bâtiment se sont déroulés pendant deux jours. Les enregistrements ont été effectués le premier jour au niveau du rez-de-chaussée et le deuxième jour au niveau de la terrasse.

La hauteur maximum du résonateur mécanique est de 96cm.

On a procédé à faire des enregistrements tous les quatre centimètre à partir de la hauteur 96cm jusqu'à 45cm, tous les trois centimètre à partir de 40cm jusqu'à 22cm et tous les deux centimètre de 20cm jusqu'à 14cm.

Le temps d'enregistrement s'est fait toutes les trois minutes de la hauteur 22 cm jusqu'à la hauteur 37 cm, de la hauteur 37cm à la hauteur 49cm le temps d'enregistrement était toutes les cinq minutes et de la hauteur 49cm jusqu'à la hauteur 96cm le temps d'enregistrement étais toutes les dix minutes comme indiqué sur le tableau ci-dessous.

Tableau 3.2 : durées des enregistrements

Durée des essais (minute)	3	5	10
Hauteurs du RM (cm)	de 22 à 37	de 14 à 22 et de 37 à 49	de 49 à 96

La réponse de la structure est enregistrée à l'aide du sismomètre sous l'effet des excitations des vibrations ambiantes. Le sismomètre est tellement très sensible qu'il peut capter les bruits de fond qui ont une très faible amplitude (de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} g) dans les deux sens et il peut même capter les faibles perturbations qui peuvent engendrer des signaux transitoires allant hors du niveau du bruit de fond et qui ne correspondent pas à la réponse dynamique de la structure, c'est ce qui nous a mené à fixer une durée des essais de trois cinq et dix minutes afin d'éliminer par moyennage les effets des bruits et des parasites, et d'autre part assurer que la réponse (output) correspond effectivement à une excitation (input) stationnaire à large bande fréquentielle.

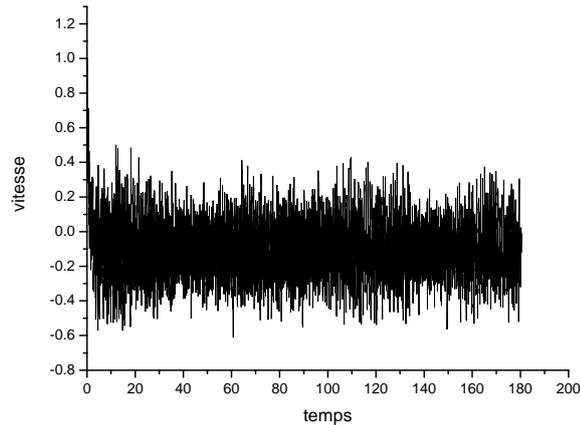


Figure 3.9 : Exemple d'un enregistrement

3.17.1 Traitement des signaux

Une fois la réponse de la structure est enregistrée sous forme d'un enregistrement temporel (accélérogramme), le transfert du signal du domaine temporel au domaine fréquentiel est assuré par le logiciel origin7.0 à travers la transformé rapide de Fourier. Le spectre de Fourier représente le contenu fréquentiel du signal où les modes de vibrations sont représentés par des pics.

On constate parfois l'apparition d'un pic autour de 1Hz dans tous les spectres de Fourier des divers enregistrements représentent la fréquence de résonance du géophone.

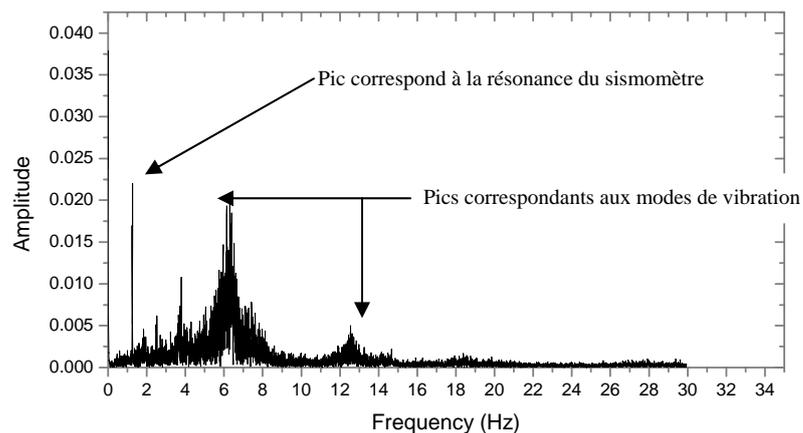


Figure 3.10 : Exemple représentant un spectre de Fourier

3.18 Détermination du mode fondamental bâtiment 1

On constitue la courbe du spectre au niveau de la terrasse à partir de la transformé rapide de Fourier pour la détermination du mode fondamental de la structure, pour se faire en pose le capteur directement sur le plancher terrasse pendant dix minutes. On obtient alors une fréquence maximum et une amplitude maximum correspondante dans les deux directions.

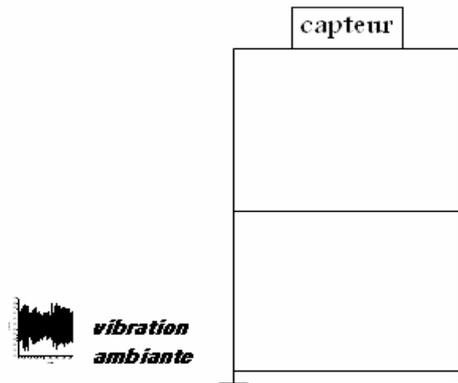


Figure 3.10: Capteur posé sur le plancher terrasse

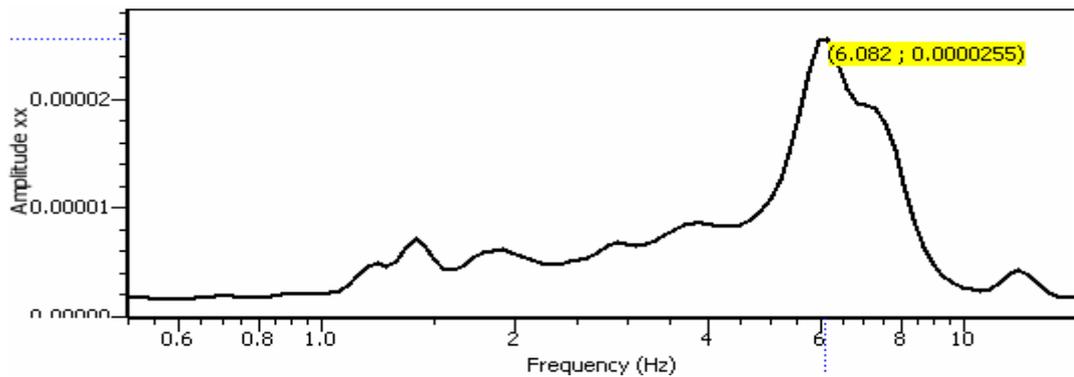


Figure 3.11: Courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure selon xx

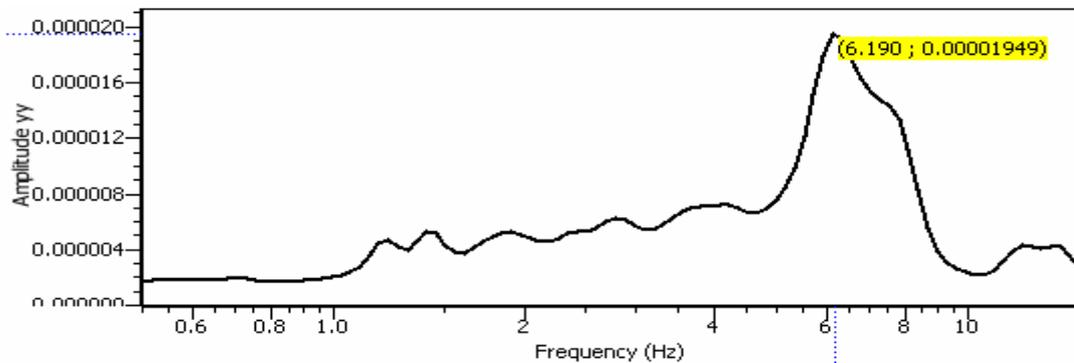


Figure 3.12: Courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure selon yy

3.19 Résultat de l'analyse des mesures

On procède à la présentation des résultats prélevés à partir des courbes des enregistrements et des courbes des spectres de chacun des directions du niveau de la terrasse des bâtiments testés.

Les valeurs des amplitudes max des fréquences max pour les différentes hauteurs du résonateur mécanique sont mentionnées sur le tableau ci-dessous.

Tableau 3.3: Amplitudes max des deux directions x et y

Hauteur de l'oscillateur (cm)	Fréquences (xx)	Amplitudes (xx)
14	7.45	1.95
16	7.28	2.24
25	6.56	3.14
28	6.56	2
31	5.90	2.16
34	5.37	9.9
37	5.15	0.6
40	3.08	2.07
45	2.9	2.9
57	1.70	3.56
61	1.43	5.25
72	1.28	1.75
76	1.22	1
80	1.1	2.2
88	0.95	1.83
92	0.90	5.97
96	0.84	3.47

Hauteur de l'oscillateur (cm)	Fréquences (yy)	Amplitudes (yy)
14	7.04	3.98
16	6.26	3.09
25	6.17	3.91
28	6.11	5.08
34	5.18	17.2
37	5.04	0.8
40	3.13	0.21
45	2.7	1.83
49	1.96	5.76
53	1.78	2.88
57	1.71	1.47
61	1.45	5.10
65	1.36	8.08
72	1.36	1.3
76	1.18	1.52
80	1.07	1.7
88	0.96	2.29
92	0.93	2.56
96	0.89	5.75

Certains points du tableau ne figurent pas sur les courbes, ce sont des points singuliers dus aux signaux parasites qu'on a éliminés.

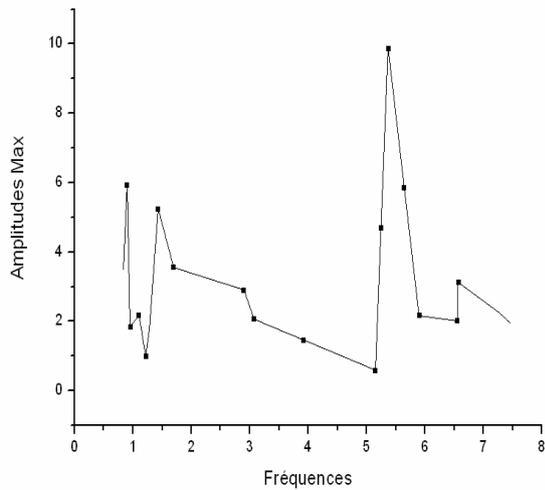


Figure 3.13: Spectre au niveau de la terrasse
selon l'axe xx

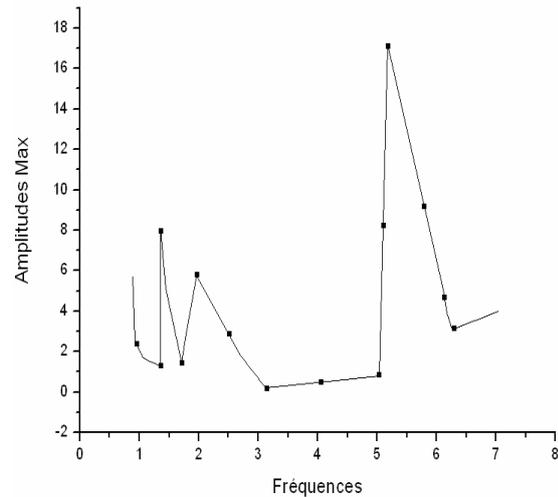


Figure 3.14: Spectre au niveau de la terrasse
selon l'axe yy

3.20 Extraction des fréquences propres à partir des enregistrements

On procède ensuite à extraire des fréquences propres et des amplitudes correspondantes dans les deux sens du bâtiment 1, à partir du spectre de Fourier pour les différentes hauteurs du résonateur mécanique.

Nous présentons quelques enregistrements et leurs transformées rapide de Fourier correspondantes selon chaque direction et les autres enregistrements sont portés en annexe. Notons que les amplitudes sont données en terme d'un facteur d'accélération non pondéré car elles seront normalisées par rapport aux amplitudes enregistrées à la base.

Bâtiment 1

Hauteur de l'oscillateur est de 14cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

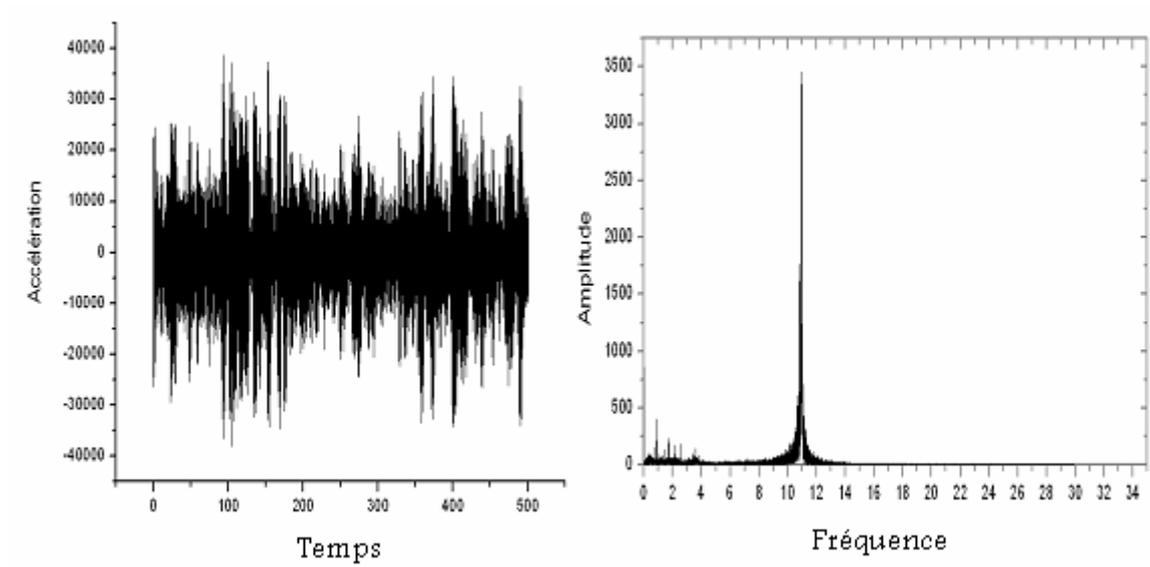


Figure 3.15 : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

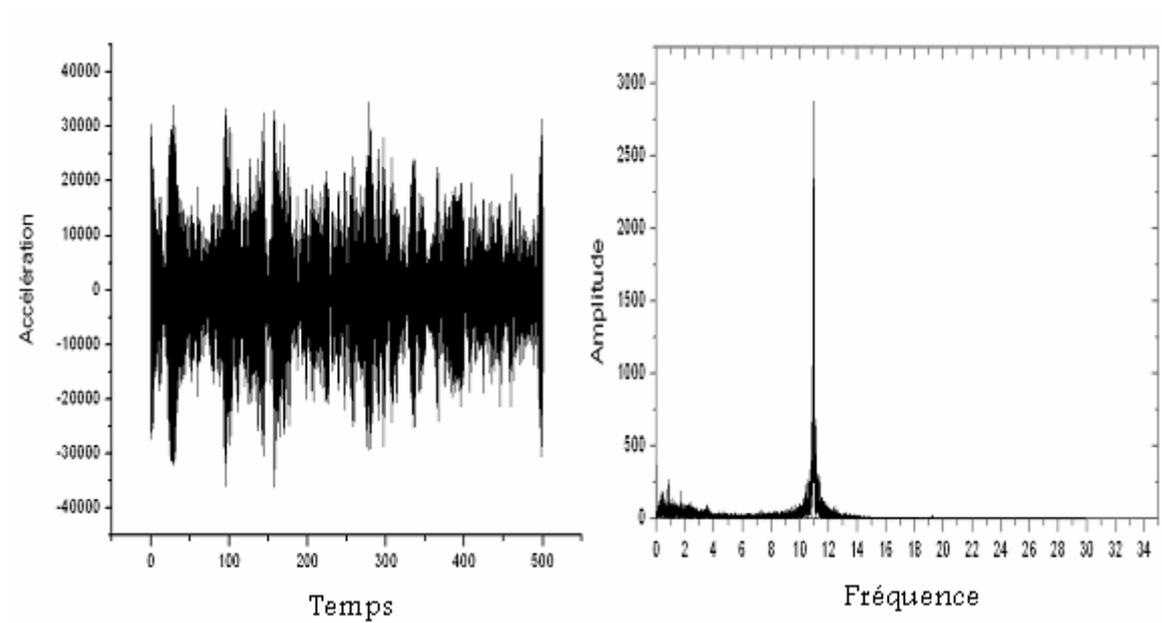


Figure 3.16: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 14cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

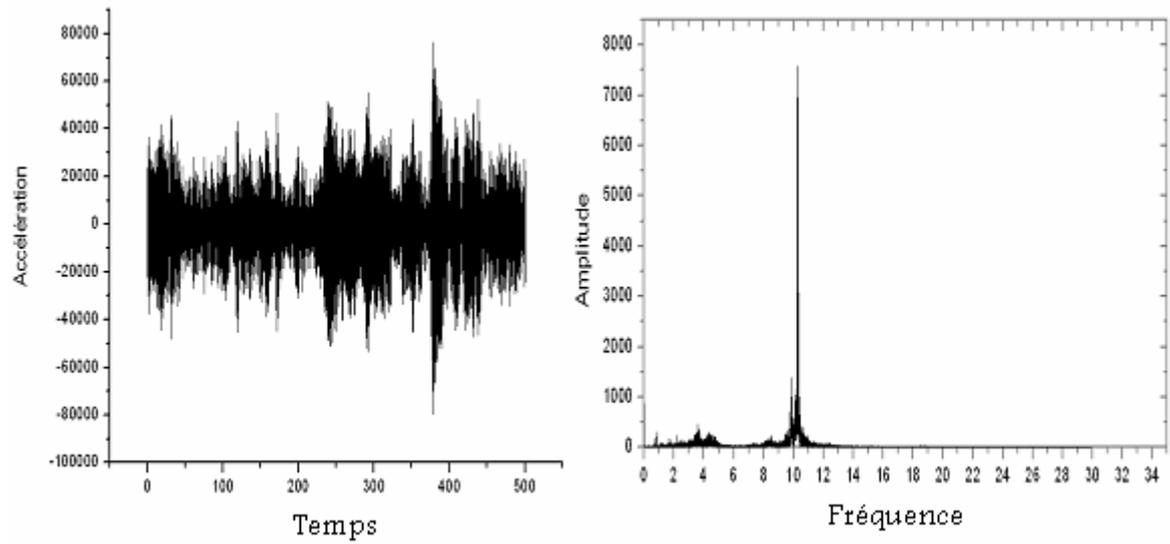


Figure 3.17 : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

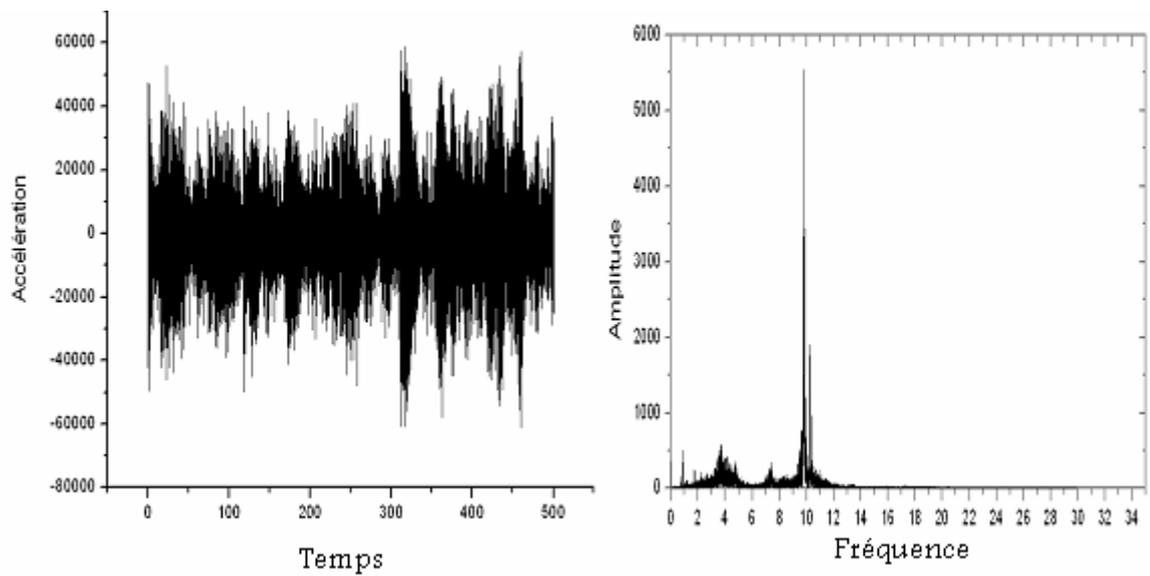


Figure 3.18: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 16cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

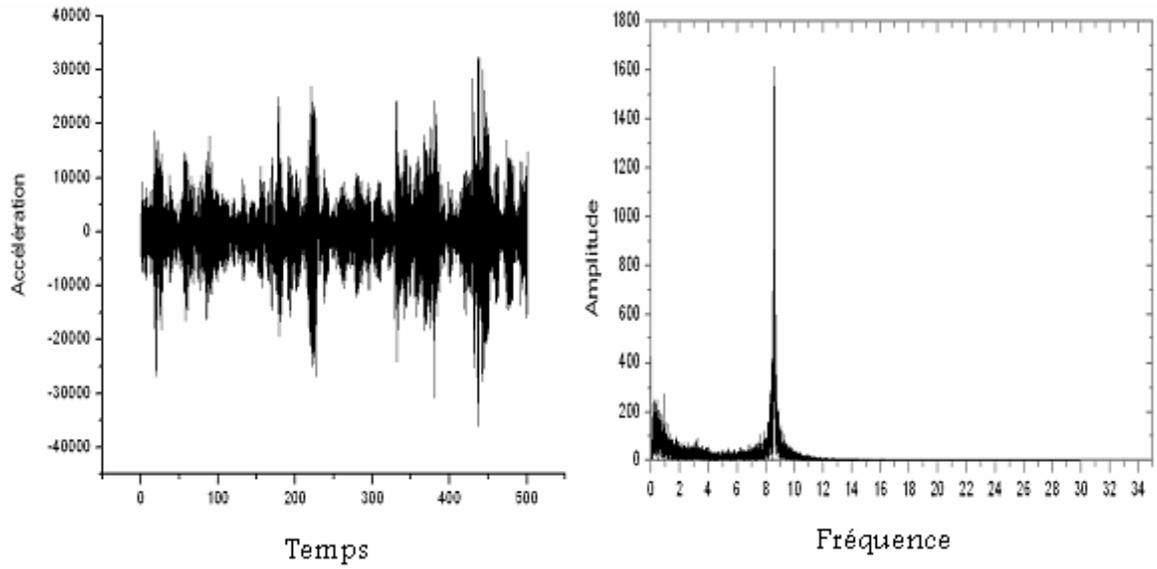


Figure 3.19 : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

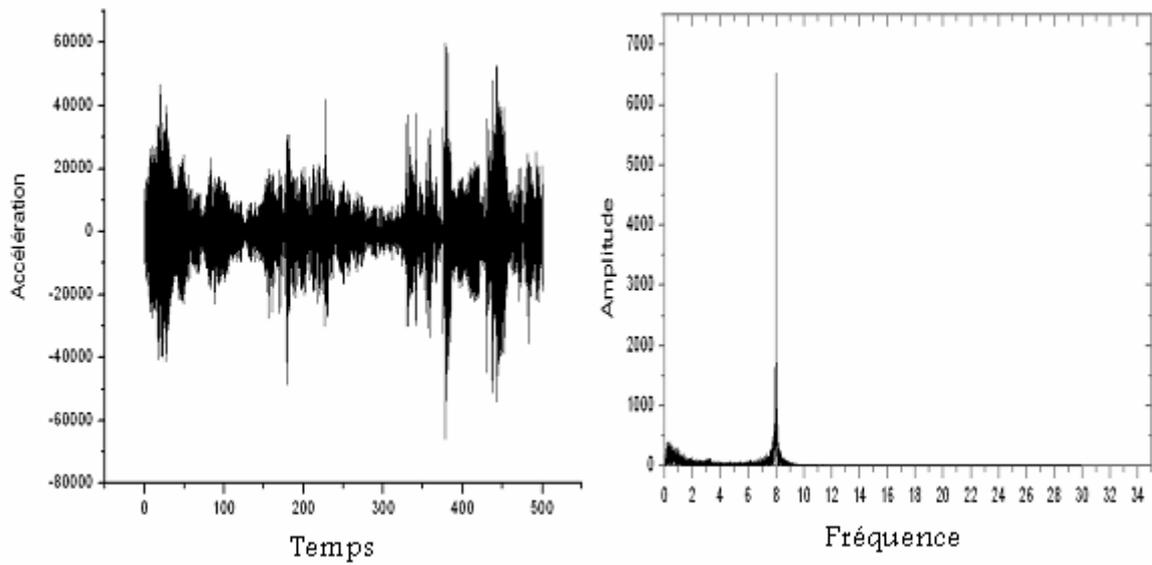


Figure 3.20: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 16cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

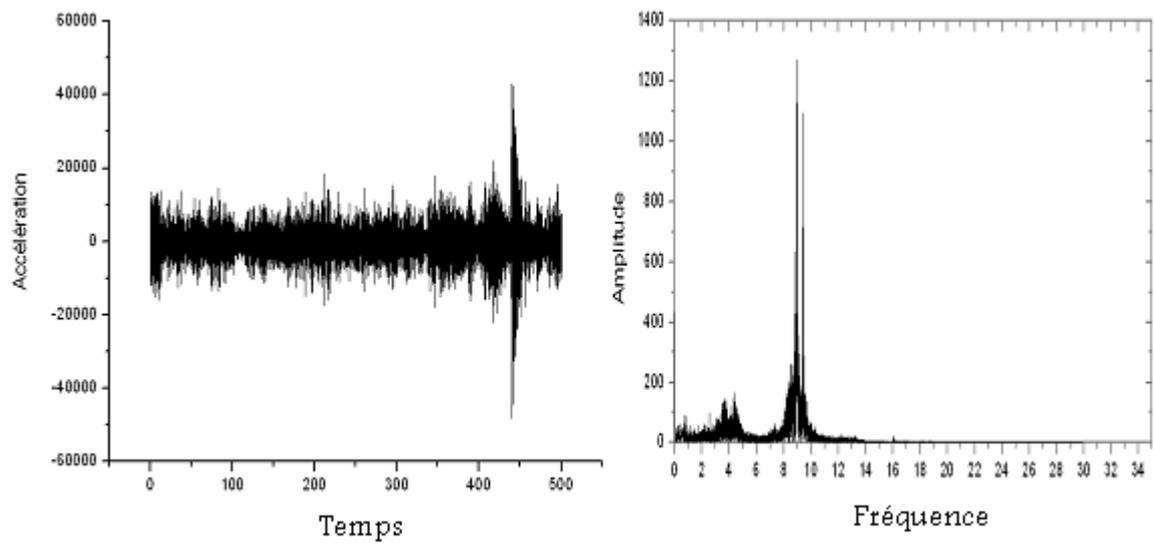


Figure 3.21 : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

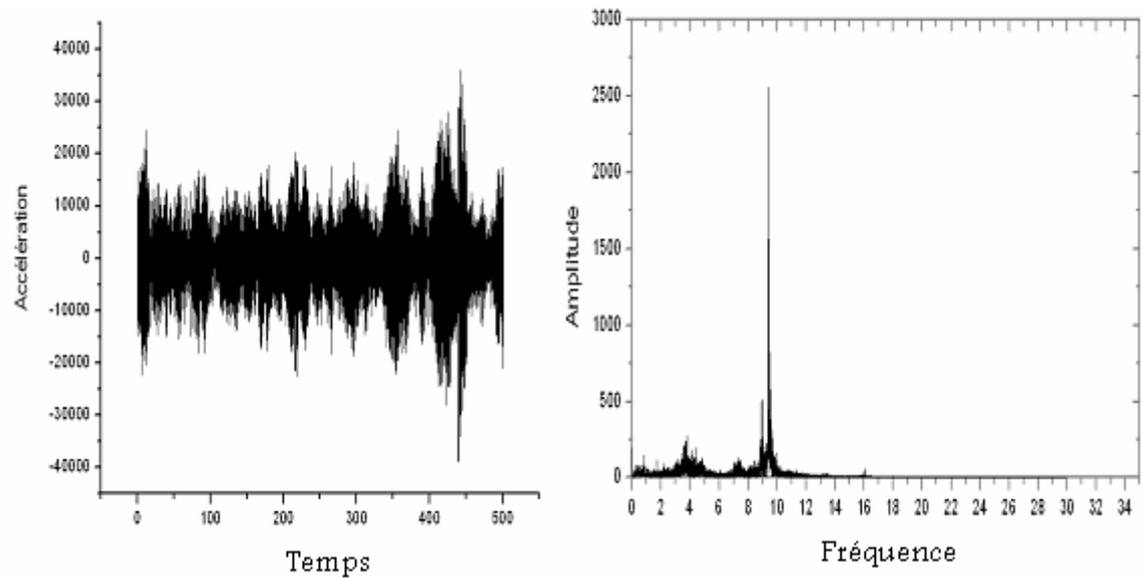


Figure 3.22: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 22cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

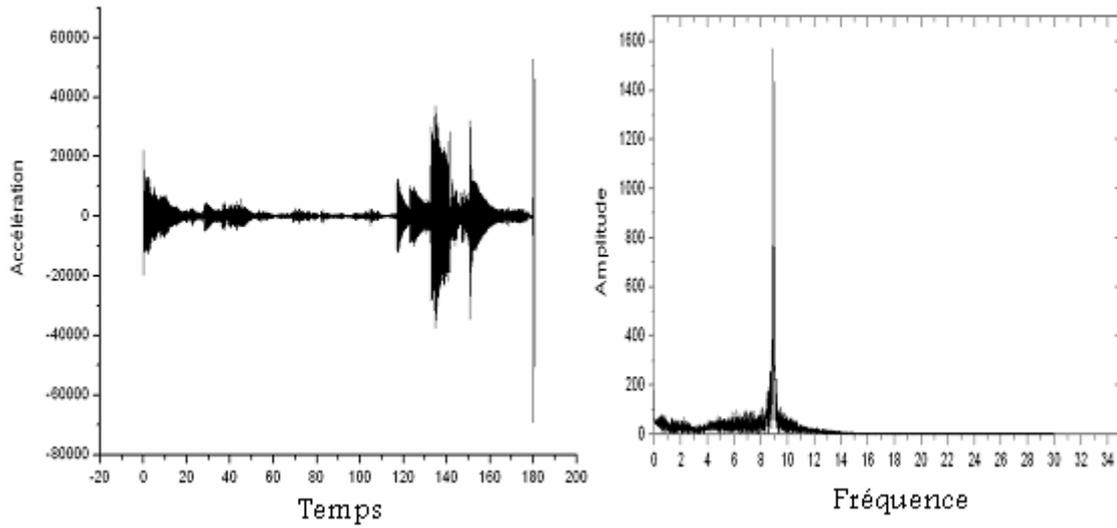


Figure 3.23: Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

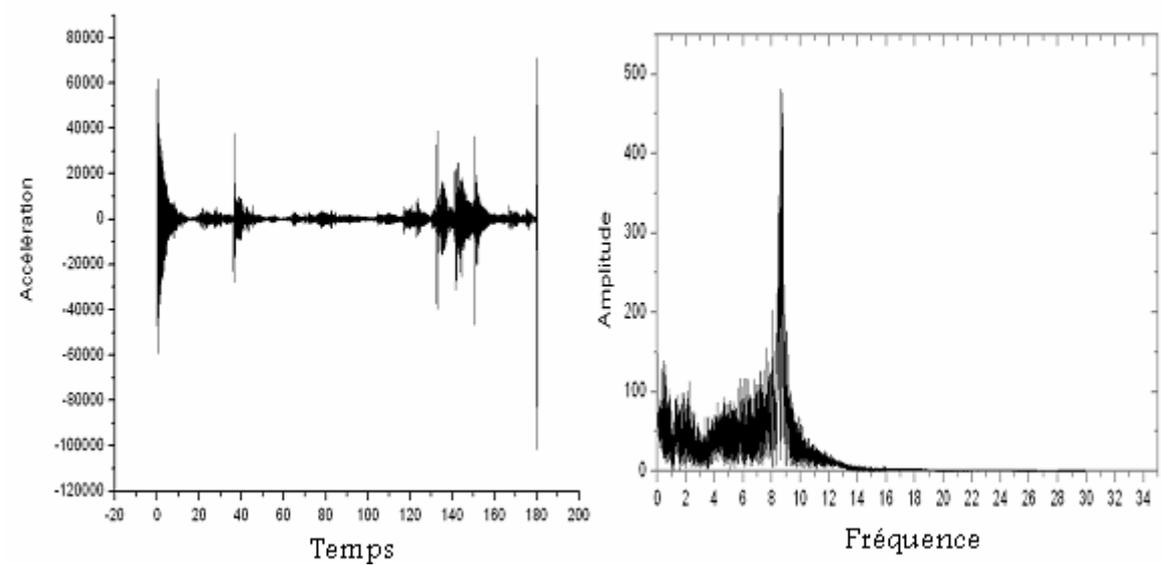


Figure 3.24: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 22cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

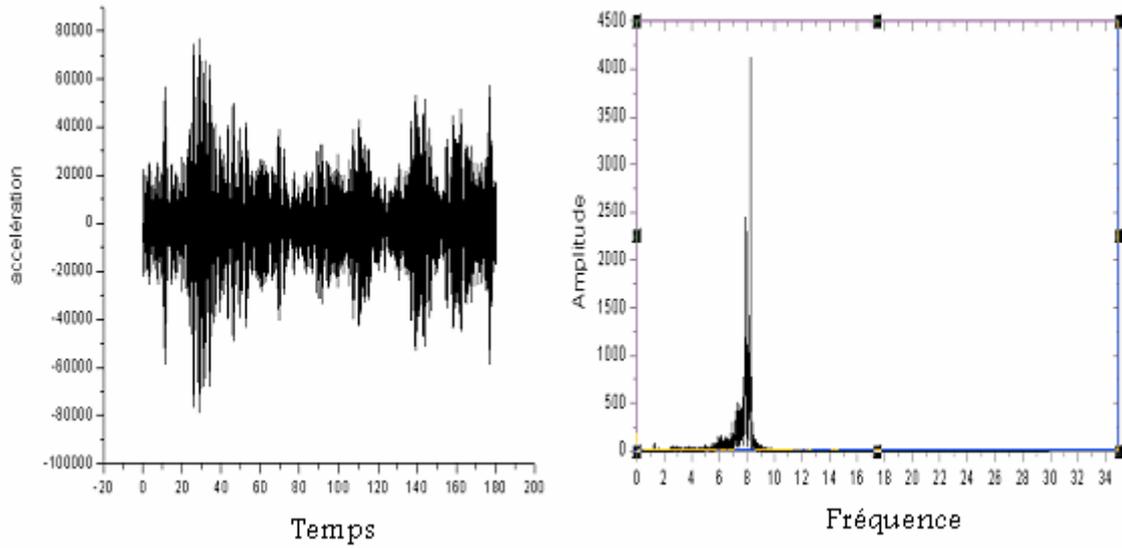


Figure 3.25: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

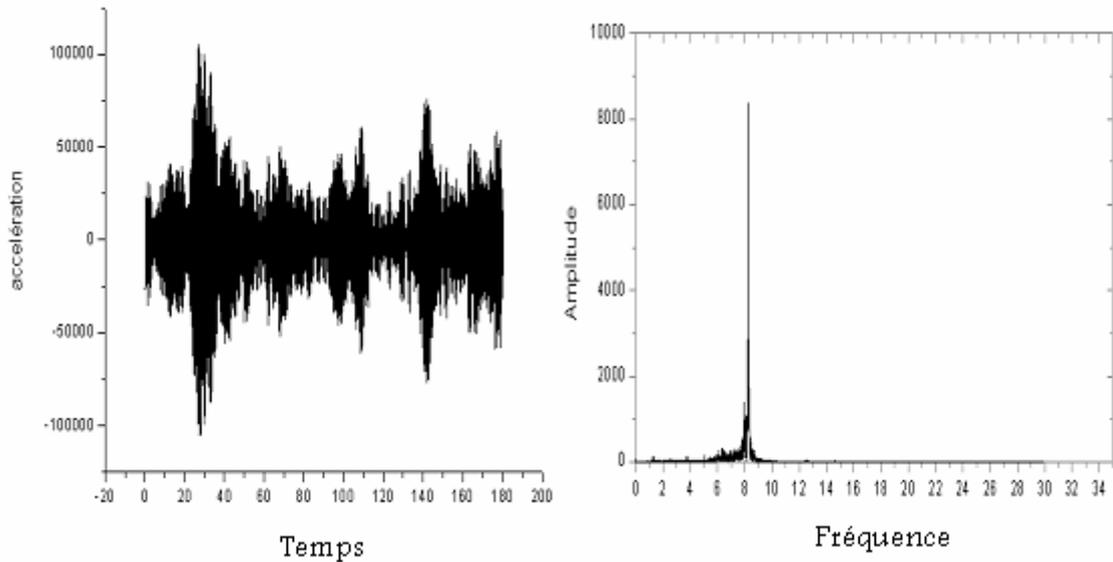


Figure 3.26: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 45cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

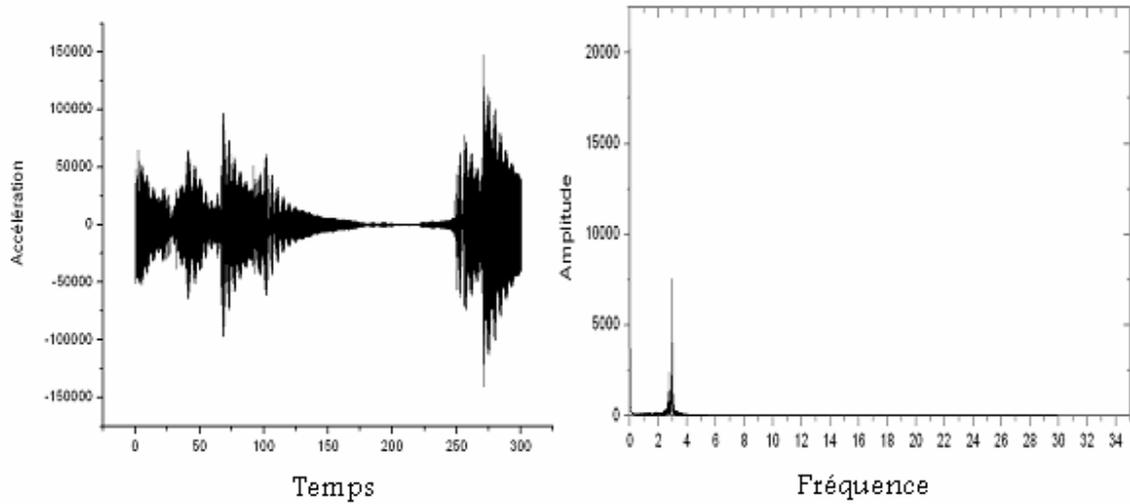


Figure 3.27 : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

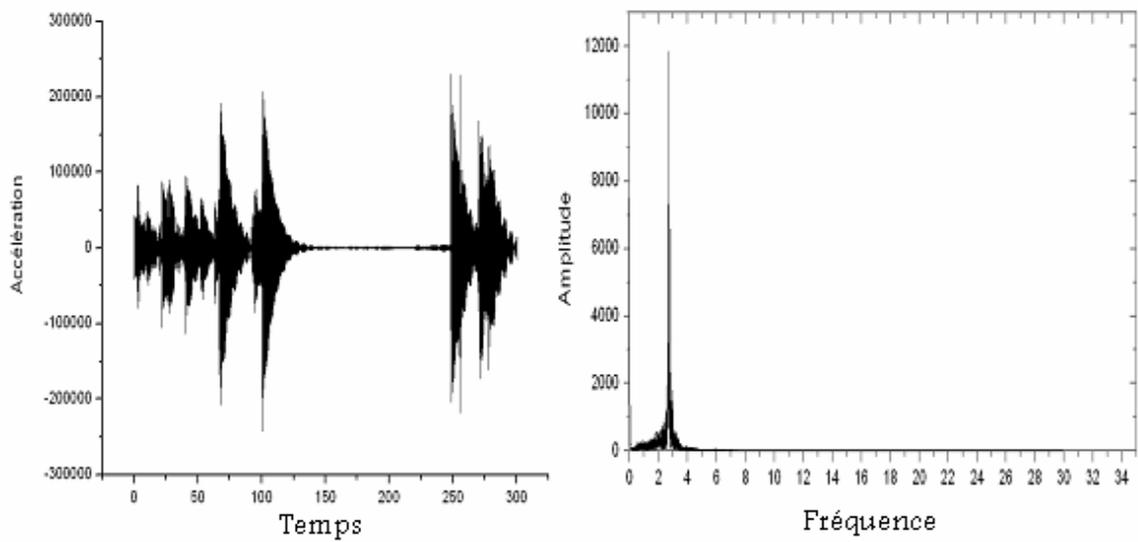


Figure 3.28: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 45cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

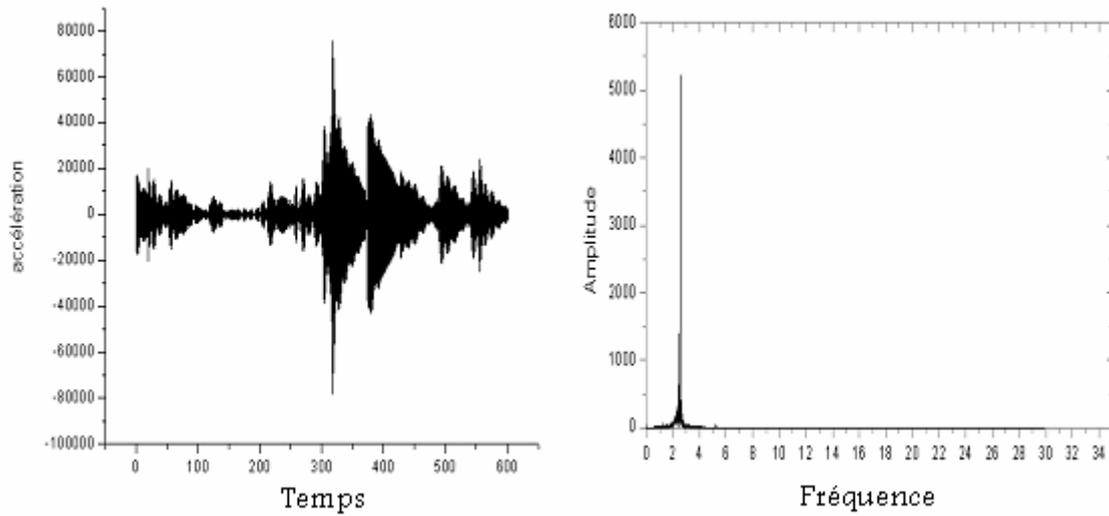


Figure 3.29: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

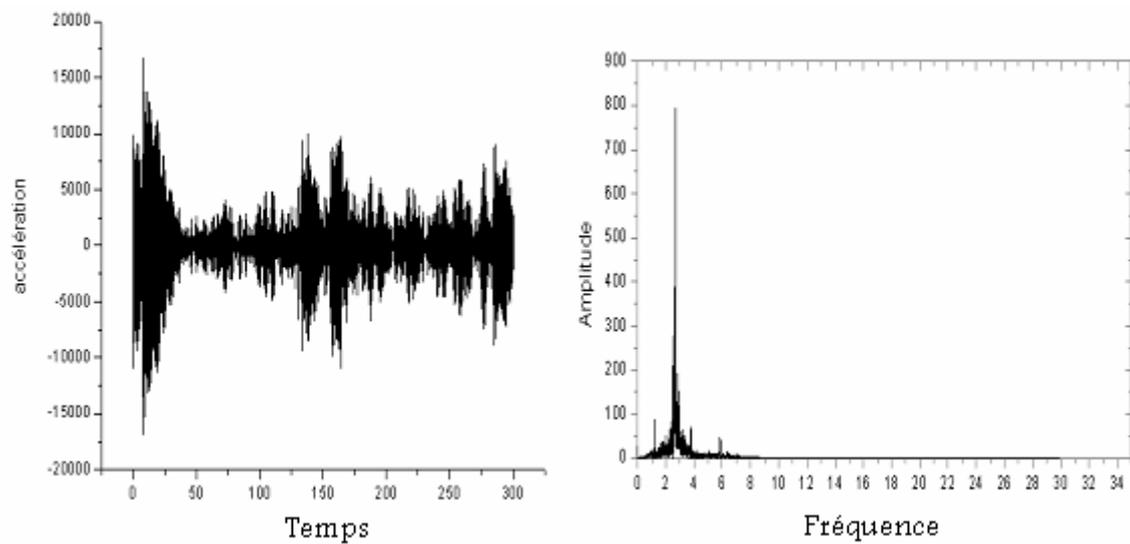


Figure 3.30: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 57cm pour une durée d'essai de 10 minutes.

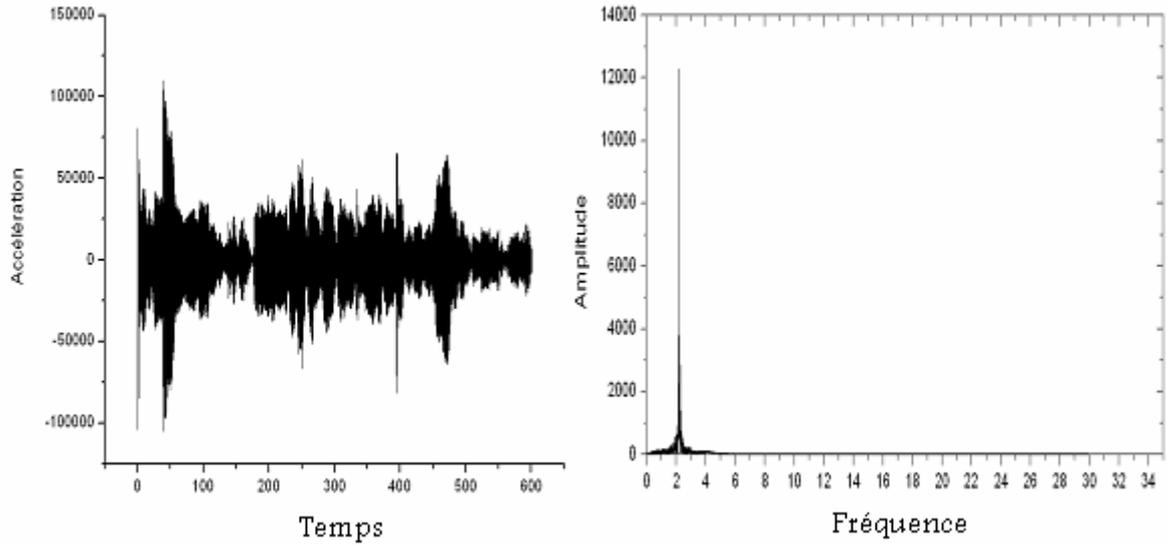


Figure 3.31: Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

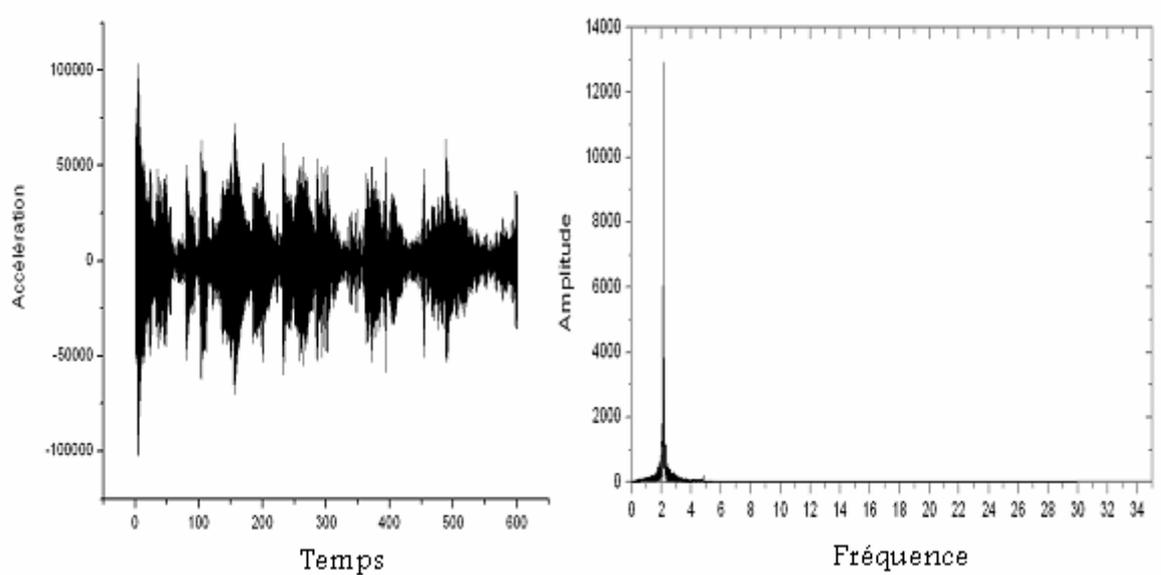


Figure 3.32: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 57cm pour une durée d'essai de 10 minutes.

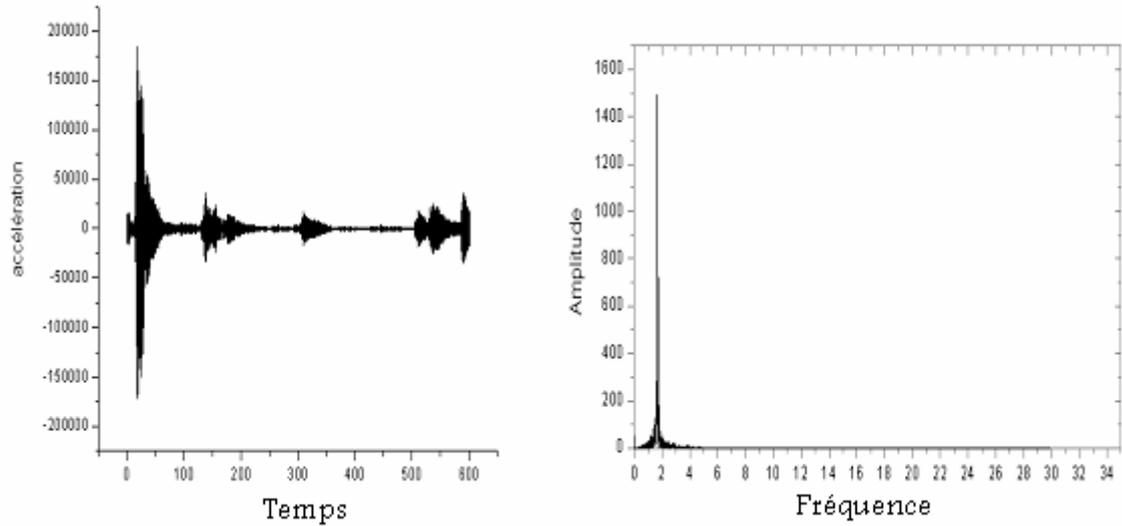


Figure 3.33 : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

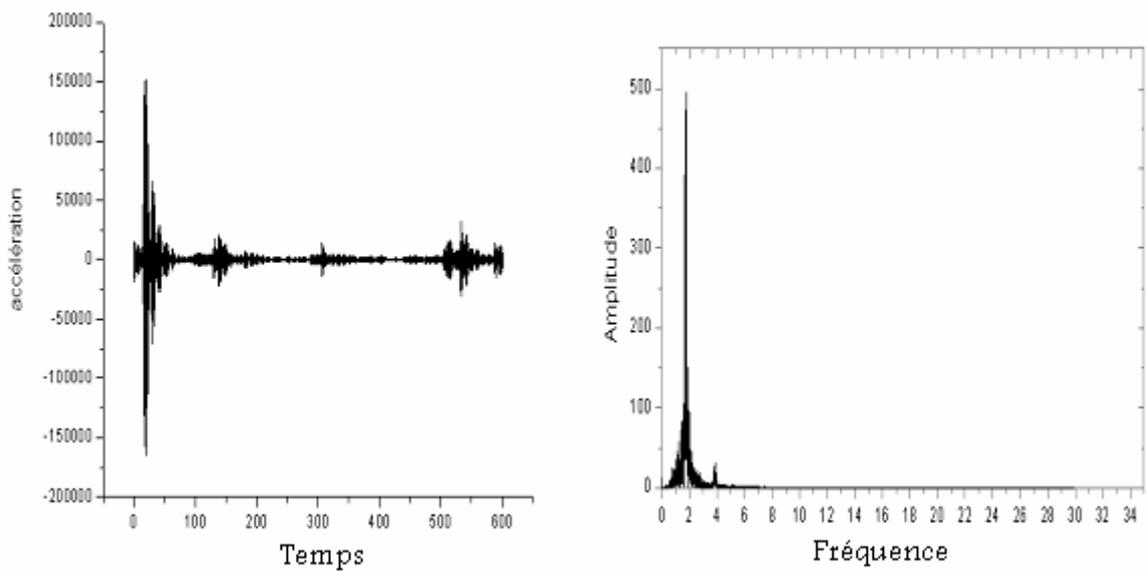


Figure 3.34: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 76cm pour une durée d'essai de 10 minutes.

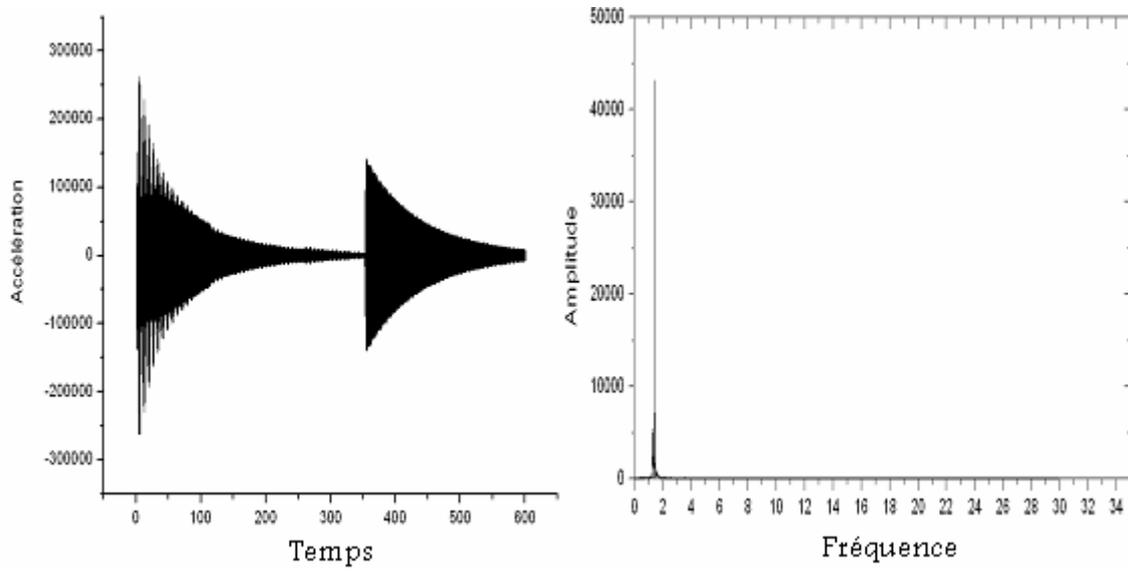


Figure 3.35: Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

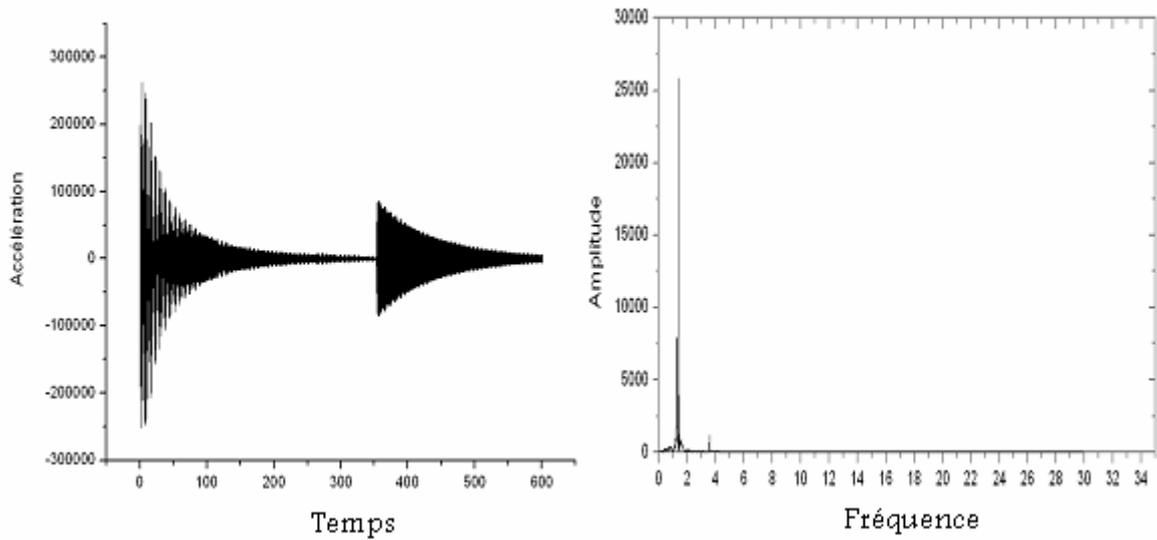


Figure 3.36: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 76cm pour une durée d'essai de 10 minutes.

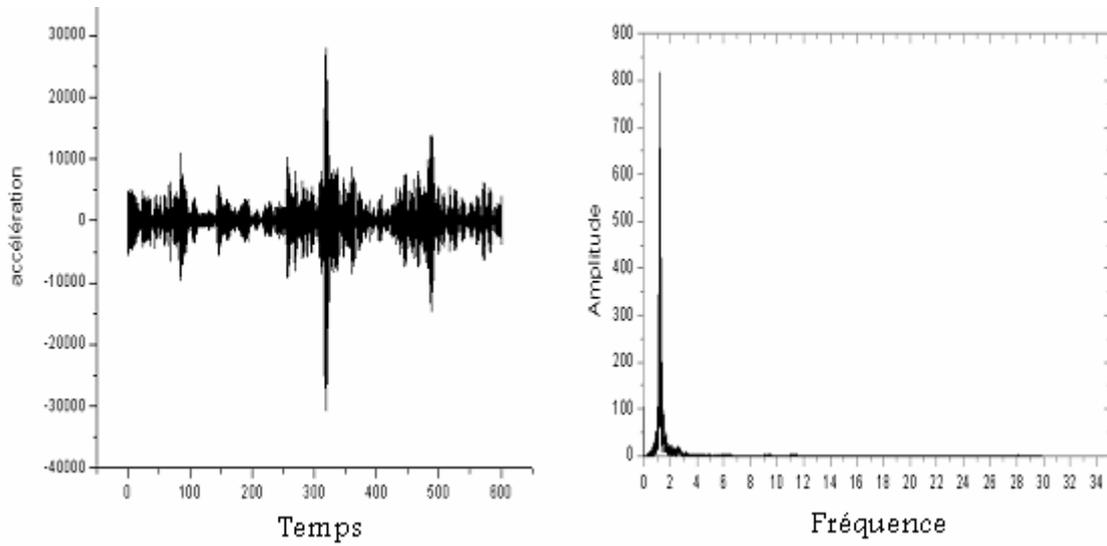


Figure 3.37: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

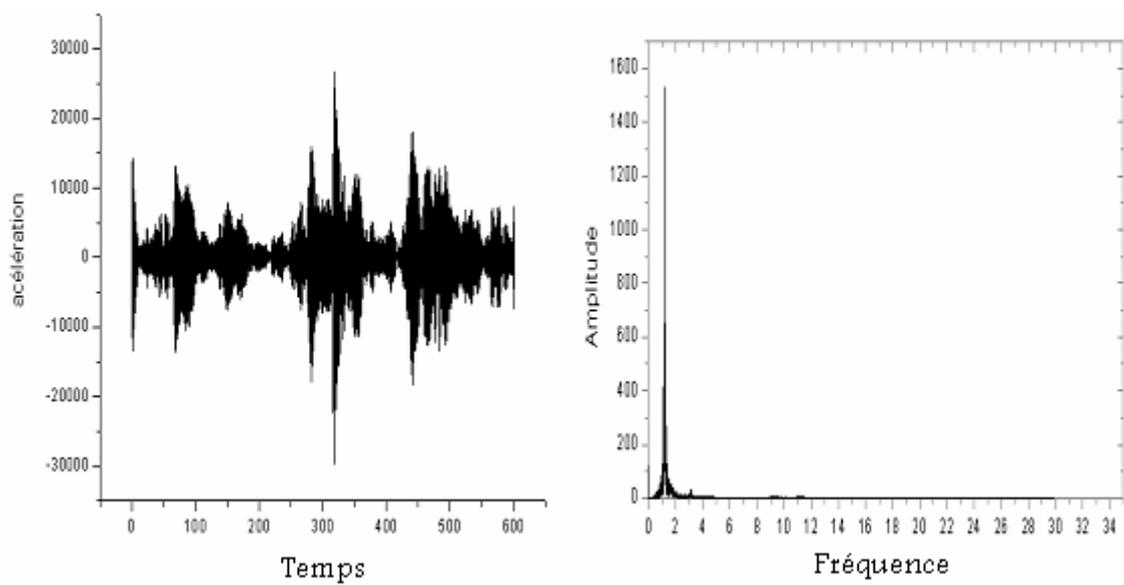


Figure 3.38: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 96cm pour une durée d'essai de 10 minutes.

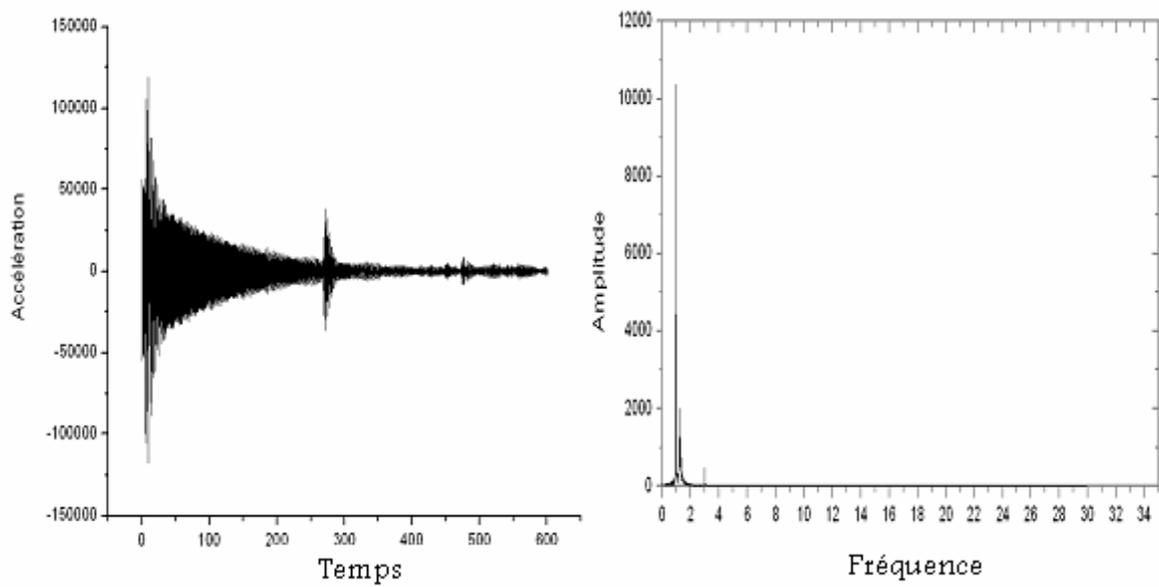


Figure 3.39 : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

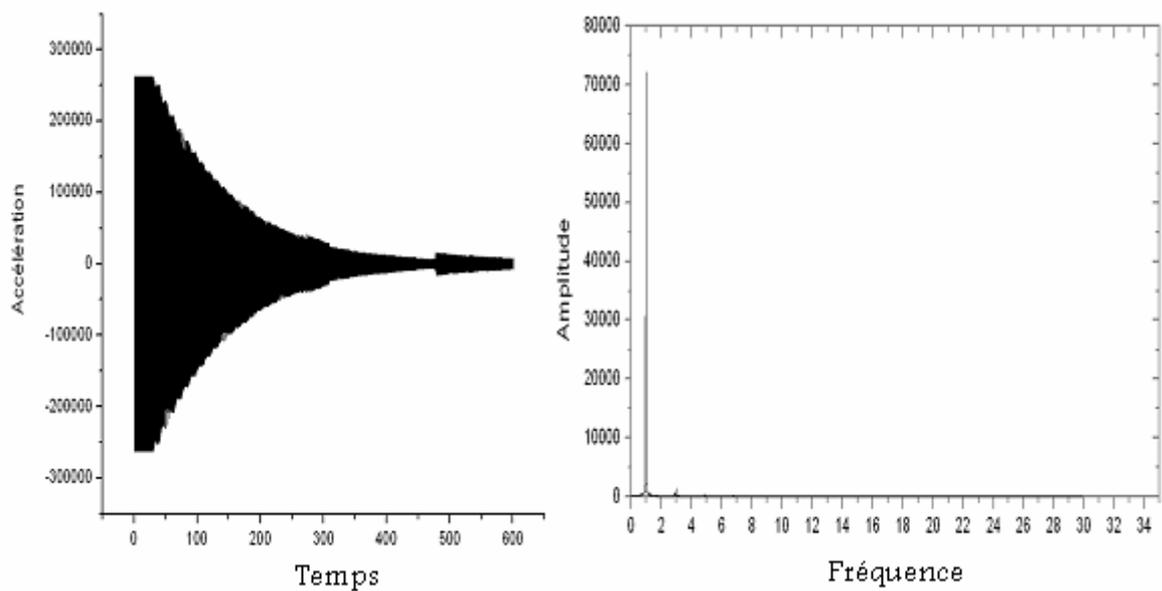


Figure 3.40: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 96cm pour une durée d'essai de 10 minutes.

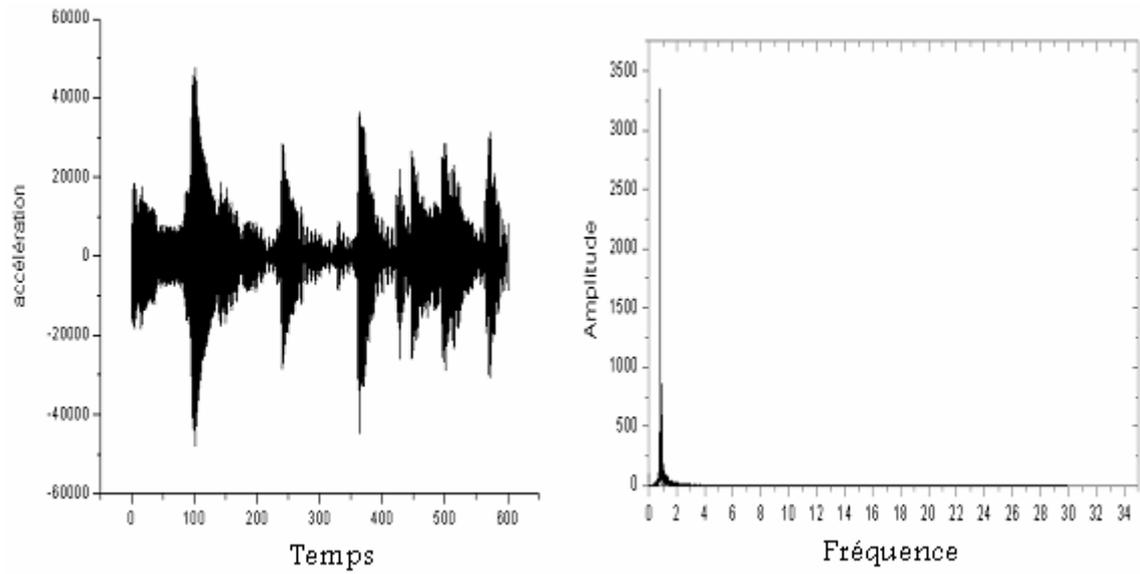


Figure 3.41: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

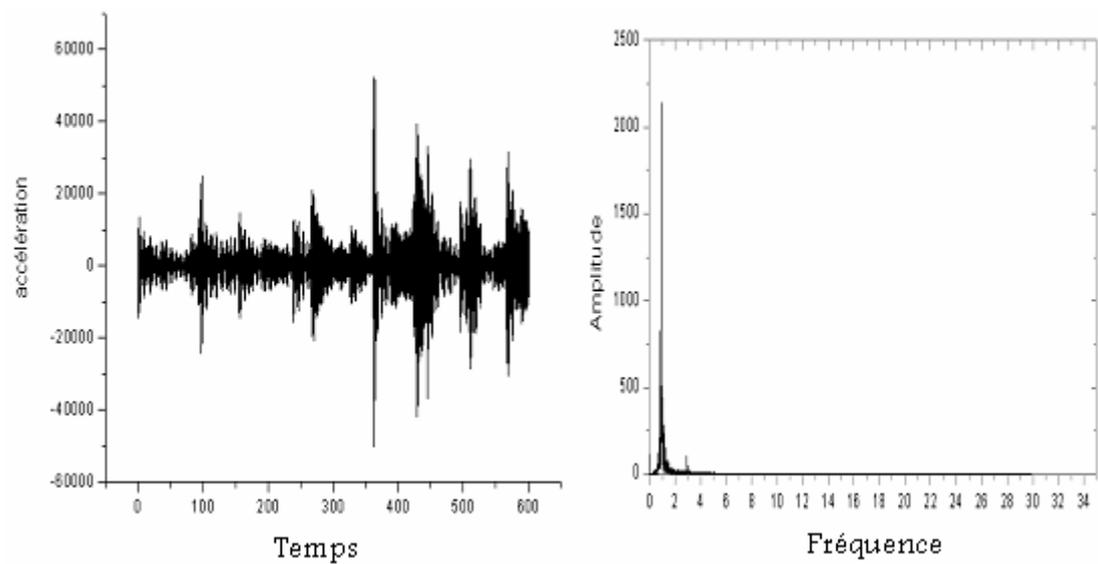


Figure 3.42: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Tableau 3.4 : Récapitulatif de
valeur maximum des fréquences et des périodes
de chaque oscillateur (R.D.C)

Hauteur		14	16	22	25	28	31	34	37
Fréquence	x	10.9	8.56	8.92	6.61	4.62	4.58	3.98	3.65
	y	10.94	7.96	9.60	5.28	4.86	4.58	3.99	3.65
Période	x	0.09	0.11	0.11	0.15	0.22	0.22	0.25	0.27
	y	0.09	0.12	0.12	0.19	0.21	0.22	0.25	0.27

Hauteur		40	45	49	53	57	61	65	71
Fréquence	x	3.21	2.95	2.54	2.39	2.20	1.88	1.61	1.56
	y	3.32	2.73	2.54	2.38	2.11	1.87	1.61	1.55
Période	x	0.31	0.34	0.39	0.42	0.45	0.53	0.62	0.64
	y	0.30	0.37	0.39	0.42	0.47	0.53	0.62	0.65

Hauteur		76	80	84	88	92	96
Fréquence	x	1.41	1.41	1.32	1.23	1.07	0.97
	y	1.40	1.17	1.32	1.23	1.07	0.97
Période	x	0.71	0.70	0.76	0.81	0.93	1.03
	y	0.71	0.85	0.76	0.81	0.93	1.03

Tableau 3.5 : Récapitulatif de
valeur maximum des fréquences et des périodes
de chaque oscillateur (TERRASSE)

Hauteur		14	16	22	25	28	31	34	37
Fréquence	x	10.27	8.90	8.27	6.60	6.52	6.02	5.15	5.04
	y	9.80	9.43	8.27	5.29	6.02	6.02	5.16	4.91
Période	x	0.09	0.11	0.12	0.15	0.15	0.17	0.19	0.20
	y	0.10	0.10	0.12	0.19	0.14	0.17	0.19	0.20

Hauteur		40	45	49	53	57	61	65	71
Fréquence	x	3.18	2.55	2.23	1.74	1.68	1.43	1.34	1.29
	y	3.12	2.67	2.23	1.74	1.8	1.41	1.34	1.36
Période	x	0.31	0.39	0.45	0.57	0.59	0.7	0.75	0.78
	y	0.31	0.37	0.45	0.57	0.56	0.69	0.75	0.74

Hauteur		76	80	84	88	92	96
Fréquence	x	1.19	1.09	0.93	0.93	0.9	0.84
	y	1.36	0.97	0.93	0.93	0.9	0.97
Période	x	0.84	0.92	1.07	1.07	1.11	1.19
	y	0.74	1.07	1.07	1.07	1.11	1.03

3.21 Essai sur le bâtiment 2

La même procédure a été appliquée pour les essais et le traitement des signaux enregistrés sur le bâtiment 2. La valeur de la fréquence fondamentale a été déterminée expérimentalement, pour cela nous avons effectué d'abord un essai d'identification sans le résonateur (c'est-à-dire $h=0$) nous avons obtenu une fréquence fondamentale selon x $f=3.94$ Hz et selon y $f=3.34$ Hz et leurs amplitudes correspondantes.

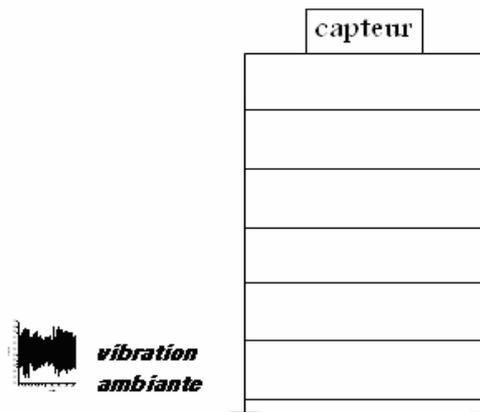


Figure 3.43 capteur posé sur le plancher terrasse

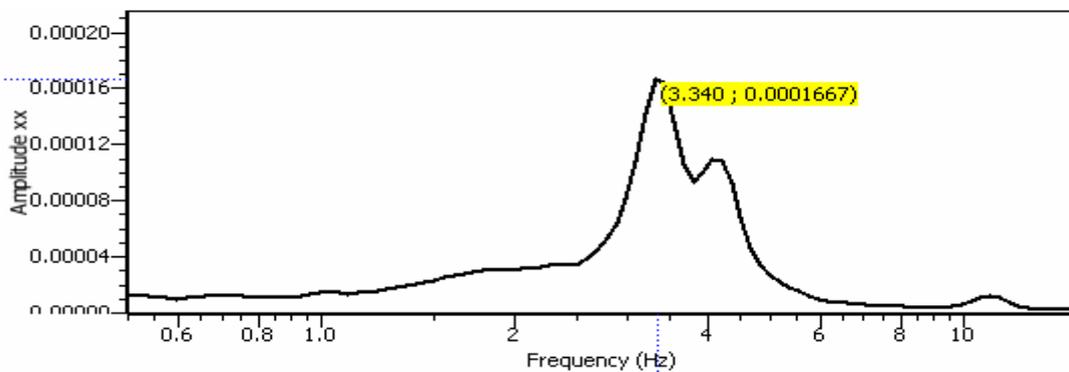


Figure 3.43 la courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure selon xx

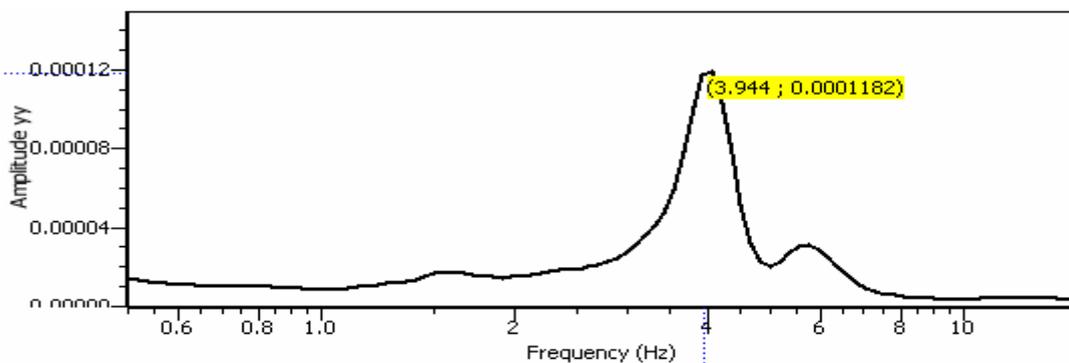


Figure 3.44: la courbe (FFT) indiquant le mode fondamental de la structure selon yy

3.22 Résultat de l'analyse des mesures

On procède de la même manière que le bâtiment 1. Les valeurs des amplitudes max des fréquences max au niveau de la terrasse pour les différentes hauteurs du résonateur mécanique sont mentionnées sur le tableau ci-dessous.

Tableau 3.6 Amplitudes max des deux directions x et y au niveau de la terrasse

Hauteur	Fréquences(xx)	Ampl(Txx)	Fréquences(Tyy)	Ampl(Tyy)
96	0.84	8.80	0.87	8.10
88	0.99	4.74	0.93	2.25
80	0.99	4.10	0.97	2.00
76	1.02	19.5	1.00	7.55
72	1.22	3.43	1.26	3.46
75	1.30	37	1.31	29.70
65	1.55	25.5	1.60	7.81
61	1.67	7.7	1.69	4.60
57	1.93	10.1	1.82	6.15
53	2.89	16	2.05	2.35
49	2.90	12.51	2.79	13.0
43	2.99	13.34	2.89	21.8
42	3.08	14.39	2.90	9.26
41	3.42	14.32	2.99	4.70
40	3.48	9.95	3.42	19.29
39	3.79	13.46	3.55	14.71
38	4.19	28.6	3.60	12.30
37	4.19	28.8	3.65	4.22
36	4.22	33	3.80	20.40
35	4.22	23	3.90	26.30
34	4.30	7.78	4.11	25.10
33	4.36	16.9	4.14	35.10
32	4.65	9.2	4.50	14.21
31	7.04	2.3	6.47	3.70
28	8.90	1.4	8.90	1.40

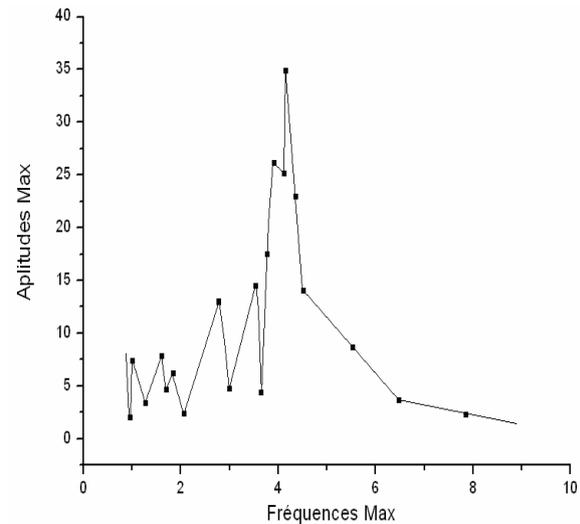
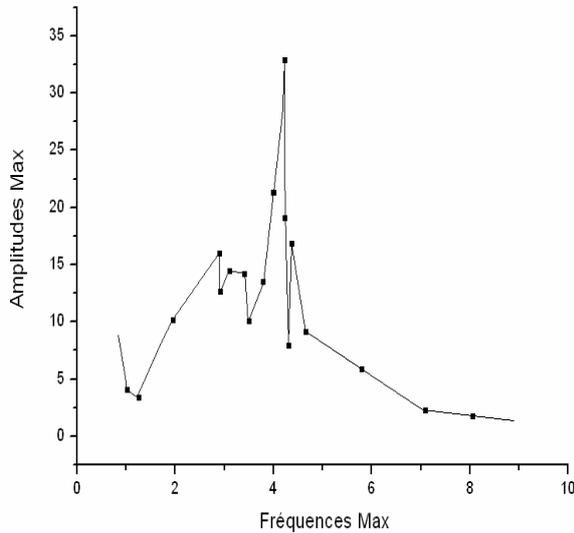


Figure 3.45: Spectre au niveau de la terrasse selon axe xx Figure 3.46: Spectre au niveau de la terrasse selon axe y

Ces valeurs maxima des fréquences obtenues en utilisant le résonateur mécanique pour les différentes hauteurs (figures ci-dessus) ne font que confirmer les fréquences maxima dans les deux sens de la structure obtenues lorsqu'on avait posé le géophone directement sur le plancher terrasse du bâtiment 1 et du bâtiment 2. Certains points du tableau ne figurent pas sur les courbes, ce sont des points singuliers dus aux signaux parasites qu'on a éliminé.

3.23 Extraction des fréquences propres à partir des enregistrements bâtiment 2

On procède ensuite de la même manière que le bâtiment 1, en utilisant le résonateur mécanique. Nous présentons quelques enregistrements et leurs transformées rapide de Fourier correspondantes selon chaque direction et les autres enregistrements sont portés en annexe.

Notons que les amplitudes sont données en terme d'un facteur d'accélération non pondéré car elles seront normalisées par rapport aux amplitudes enregistrées à la base.

Ainsi nous avons choisi des valeurs des hauteurs du résonateur de telle manière qu'on obtient le maximum de point autour de ces fréquences propres. Les enregistrements ainsi que les spectres correspondant sont présentés ci-après.

Notons que le logiciel Geopsy a été utilisé et les tracés des spectres montrent en plus de la moyenne, les spectres de tous les fenêtres ainsi que l'écart type.

Hauteur de l'oscillateur est de 31cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

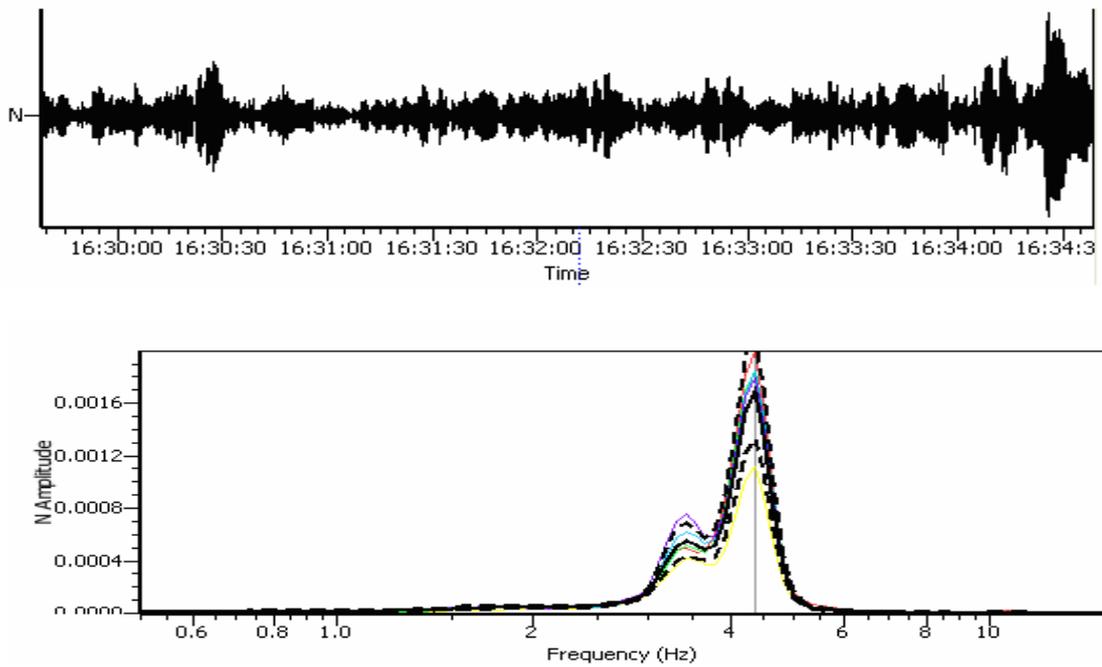


Figure 3.47: Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

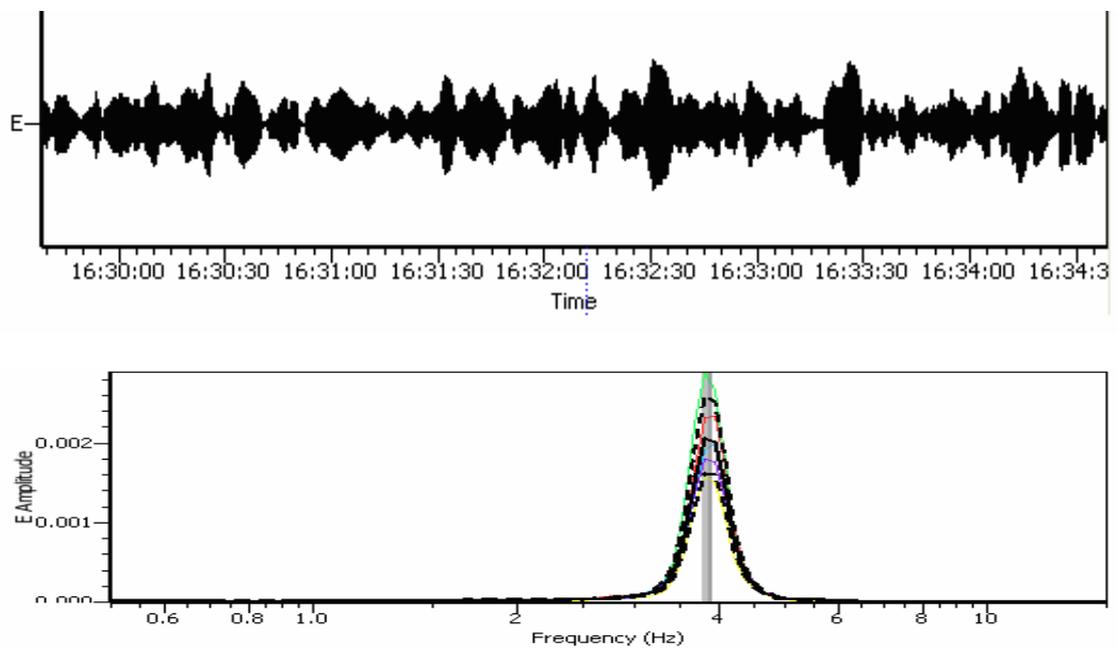


Figure 3.48: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 31 cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

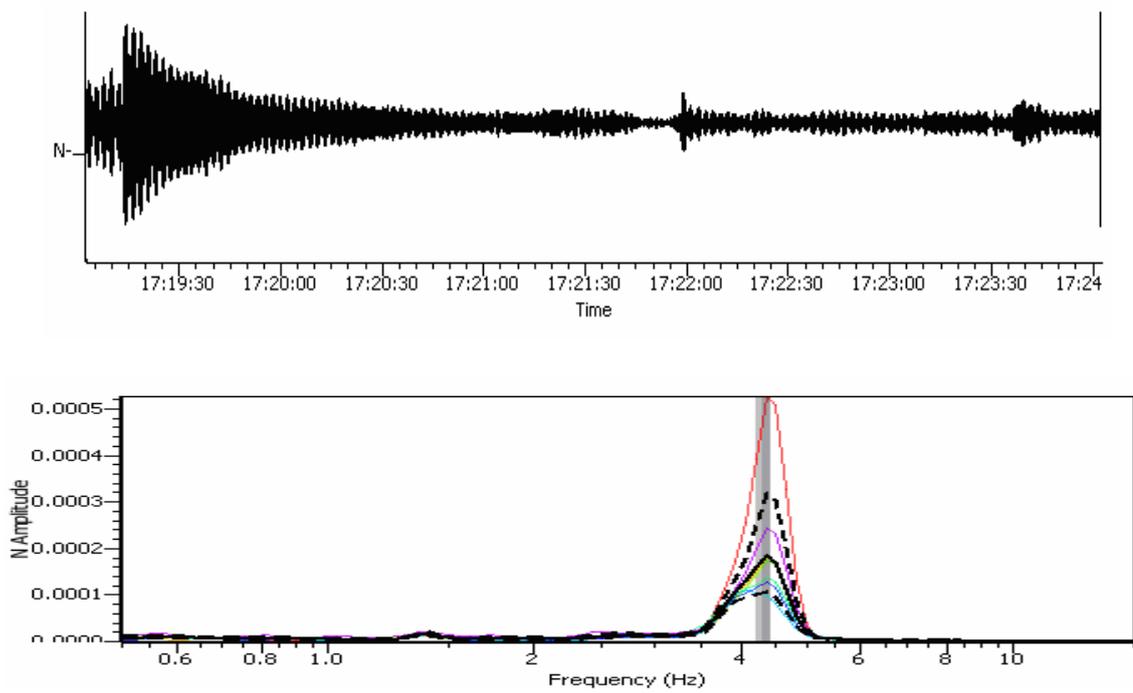


Figure 3.49: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

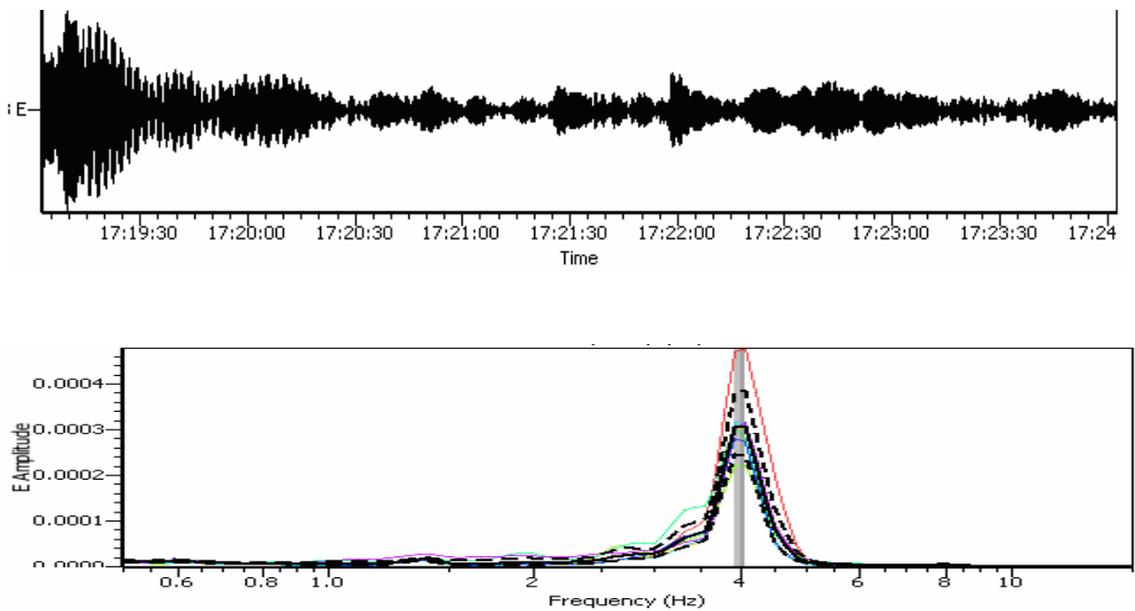


Figure 3.50: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 57cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

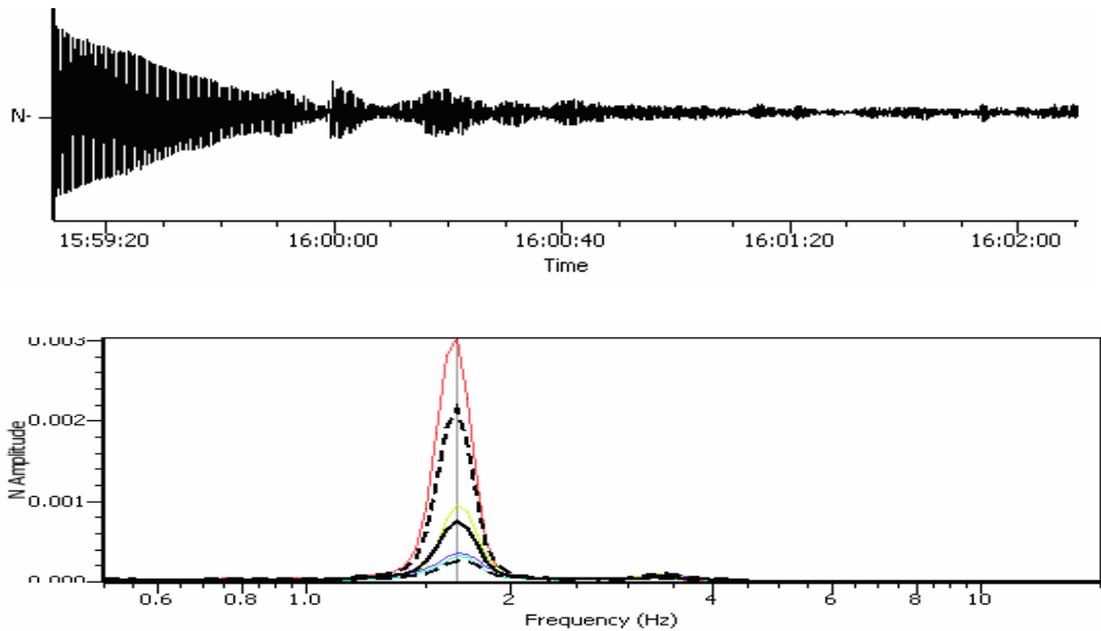


Figure 3.51: Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

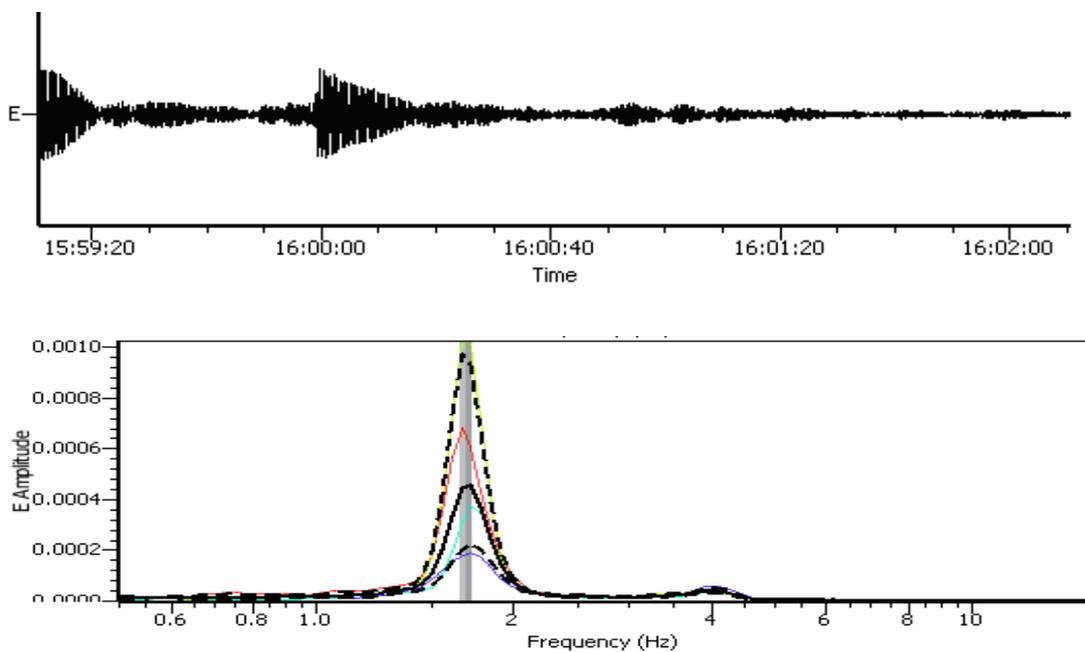


Figure 3.52: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 57cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

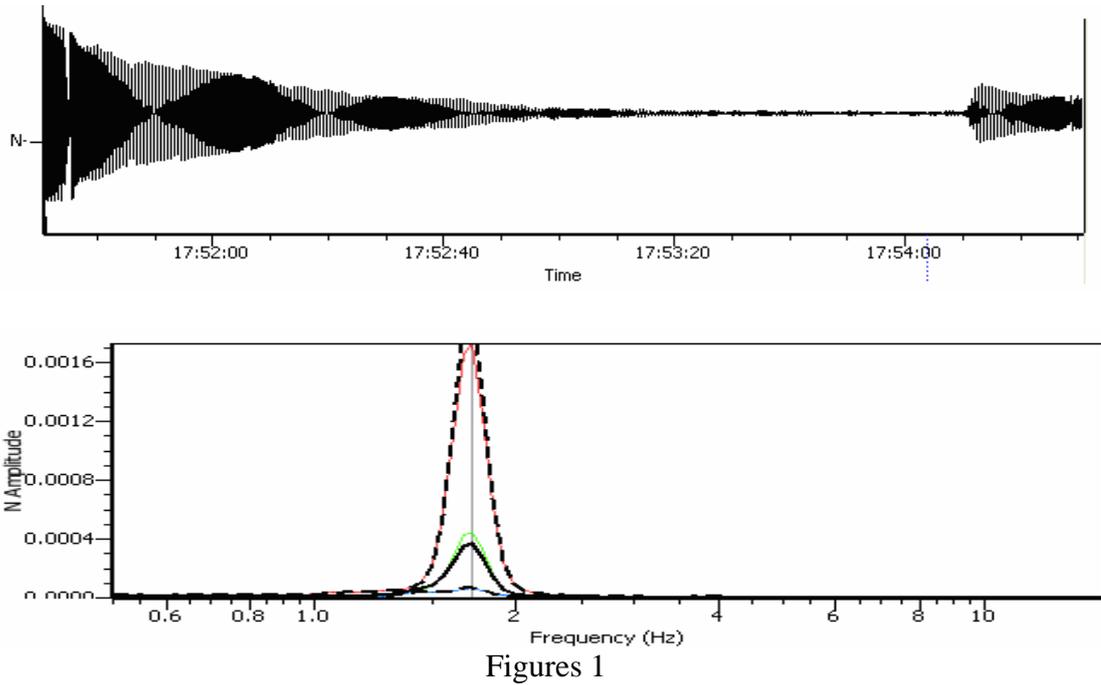


Figure 3.53: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

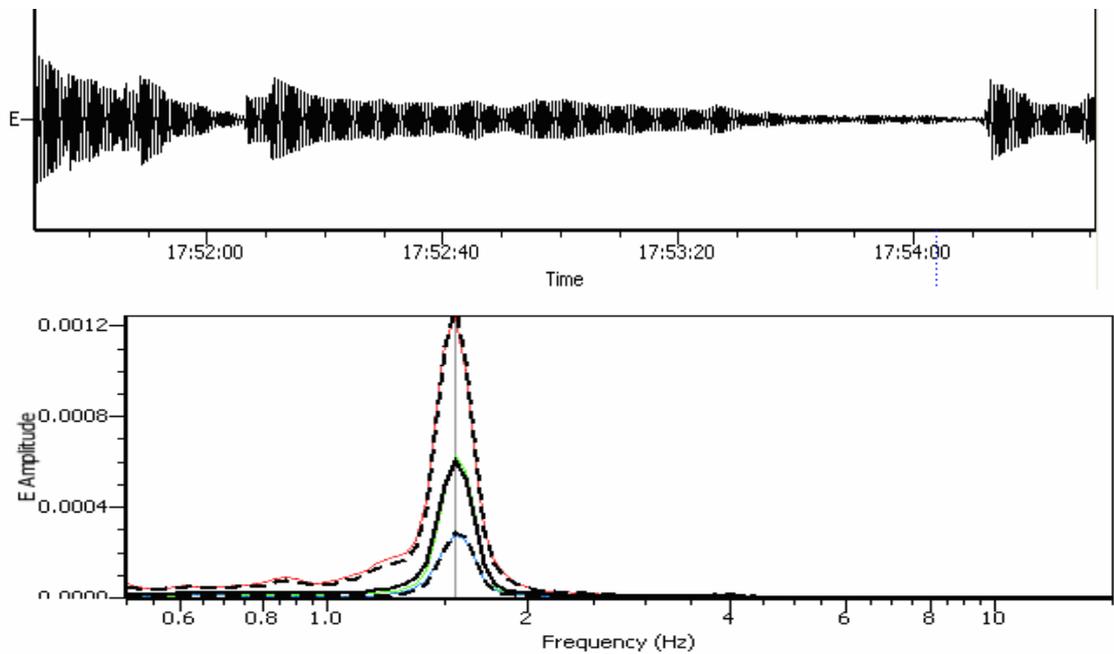


Figure 3.54: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 80cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

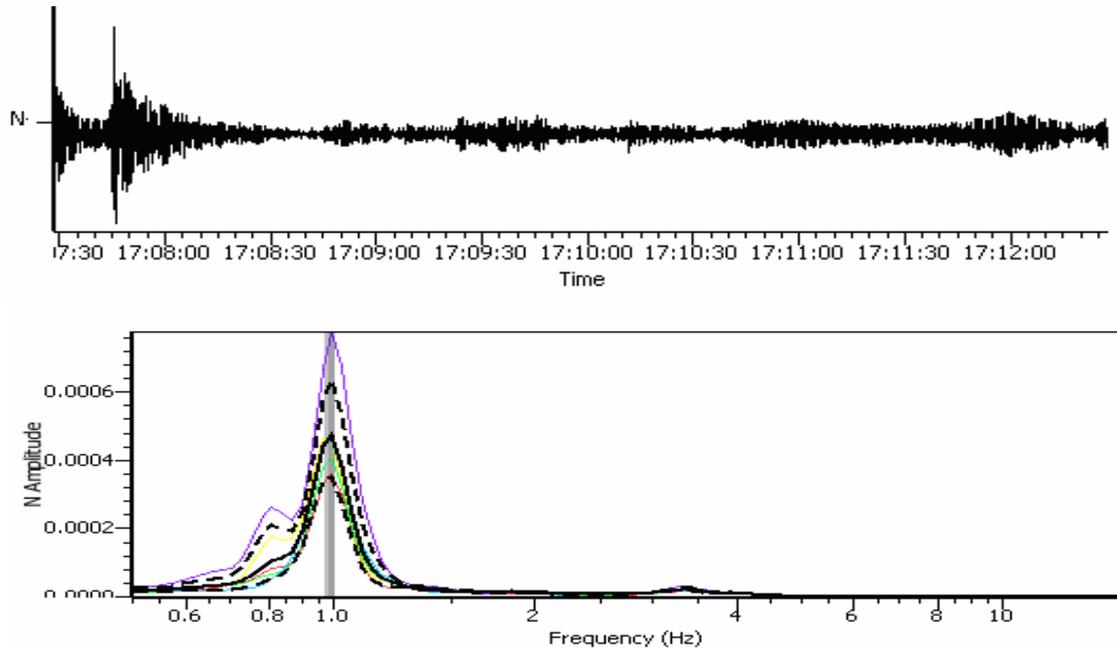


Figure 3.55: Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

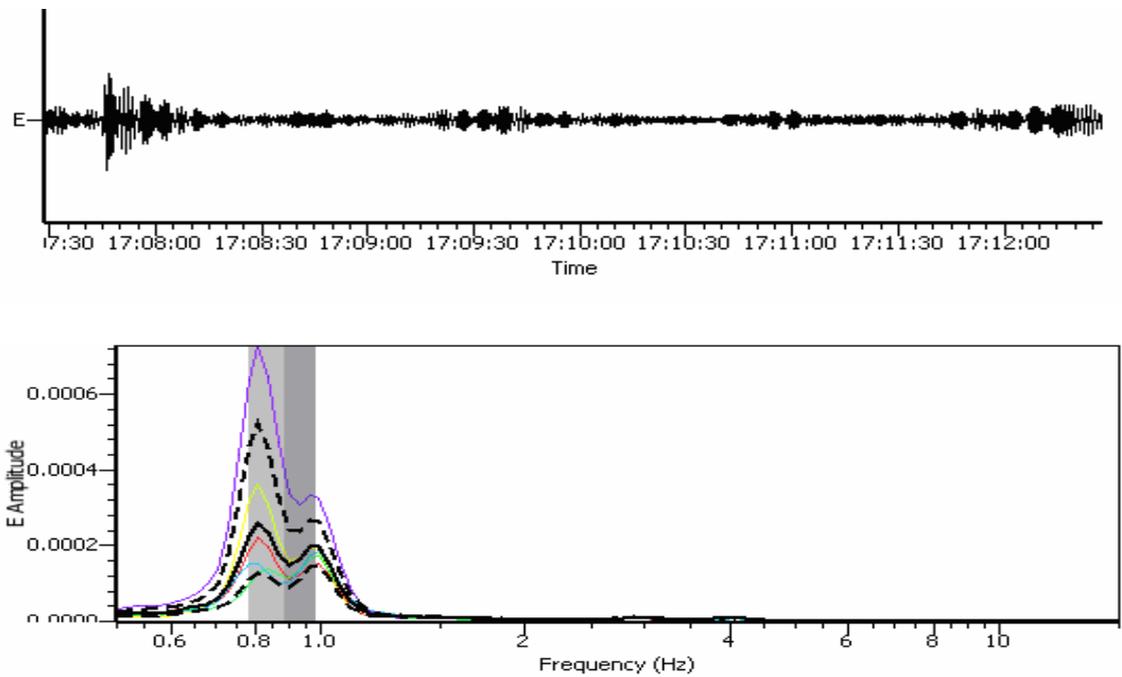


Figure 3.56: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 80cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

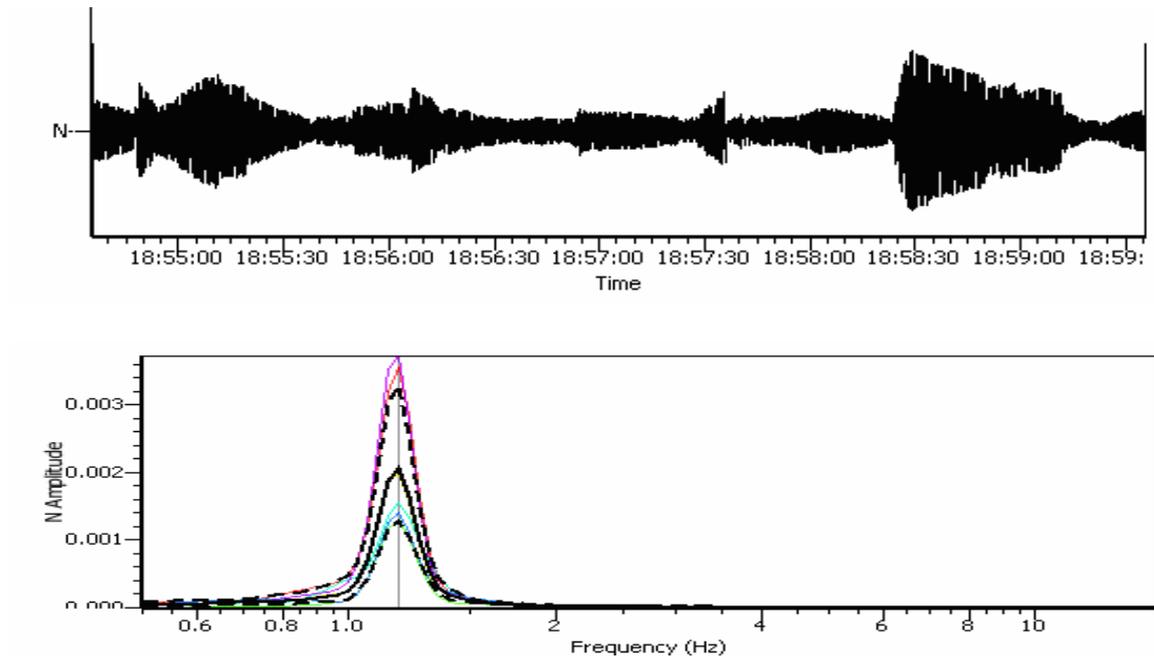


Figure 3.57: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

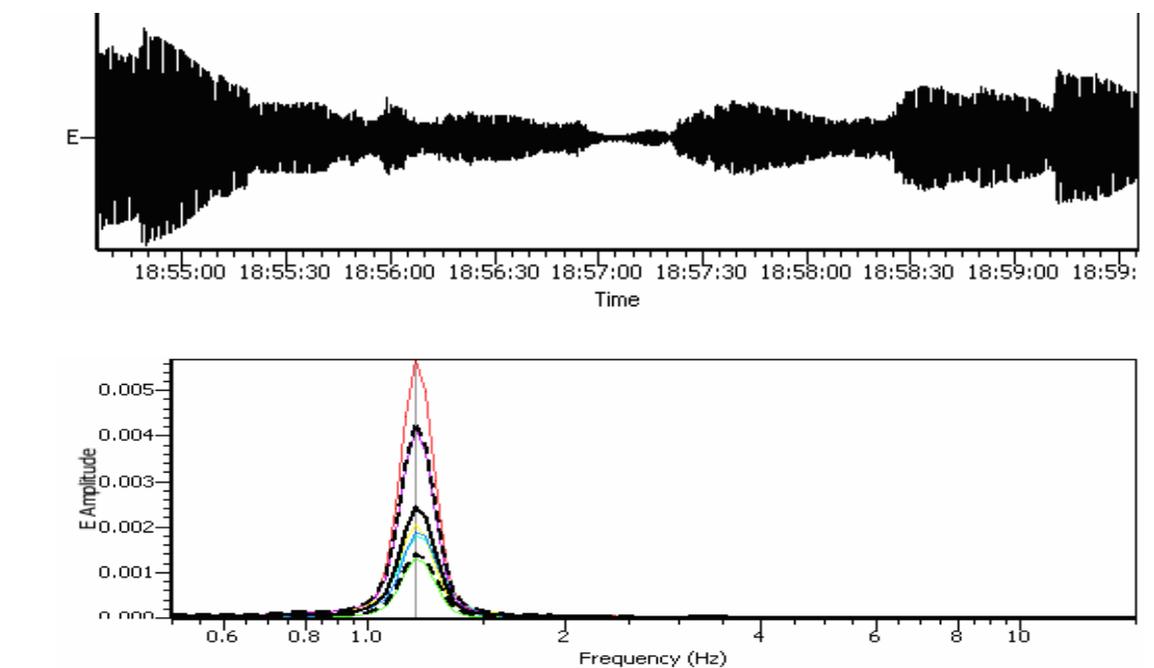


Figure 3.58: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 96cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

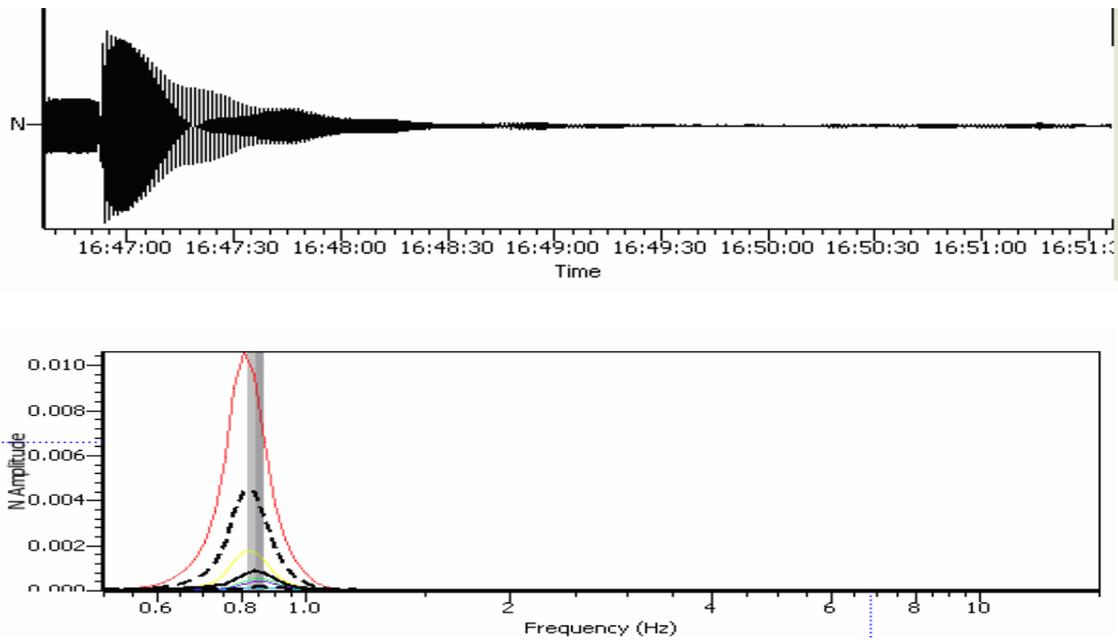


Figure 3.59: Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

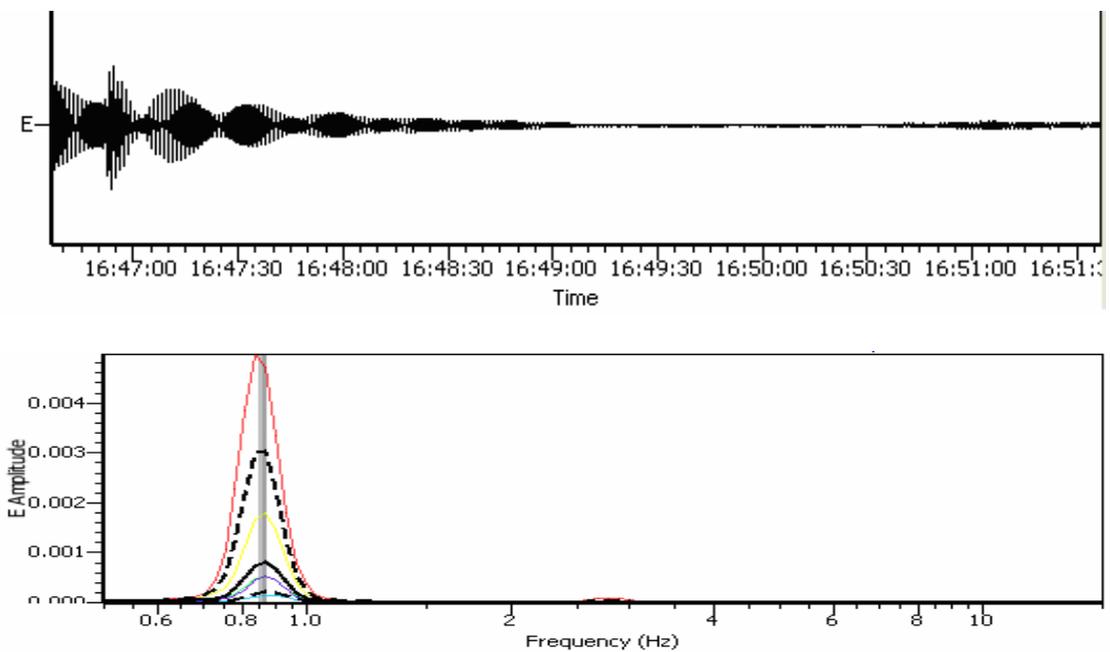


Figure 3.60: Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 96cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

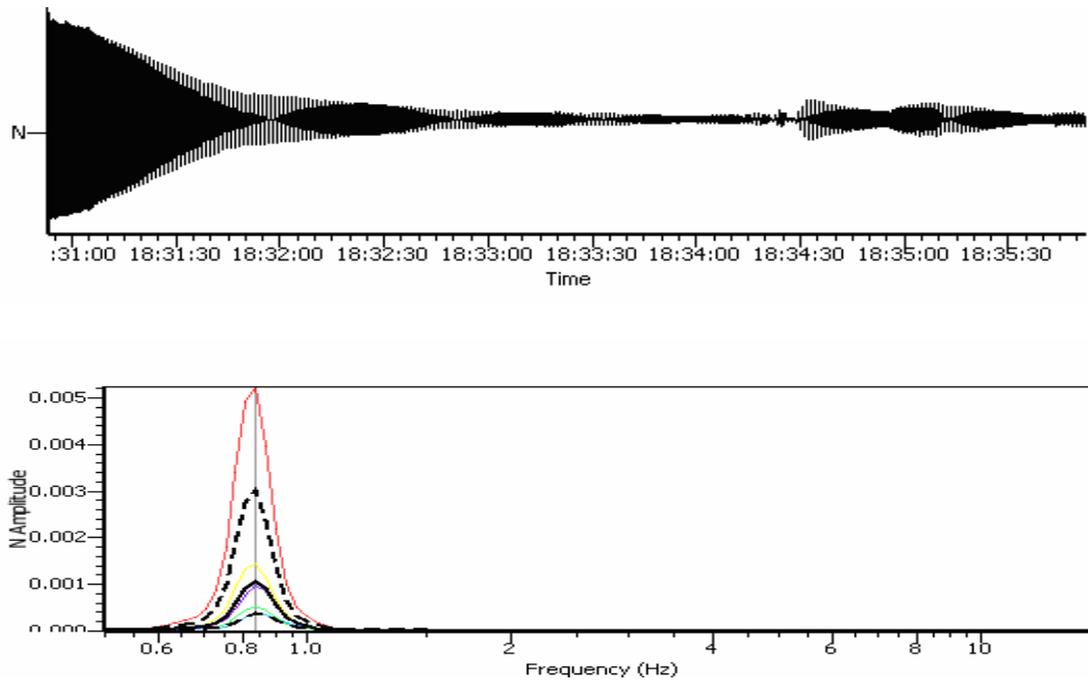


Figure 3.61: Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

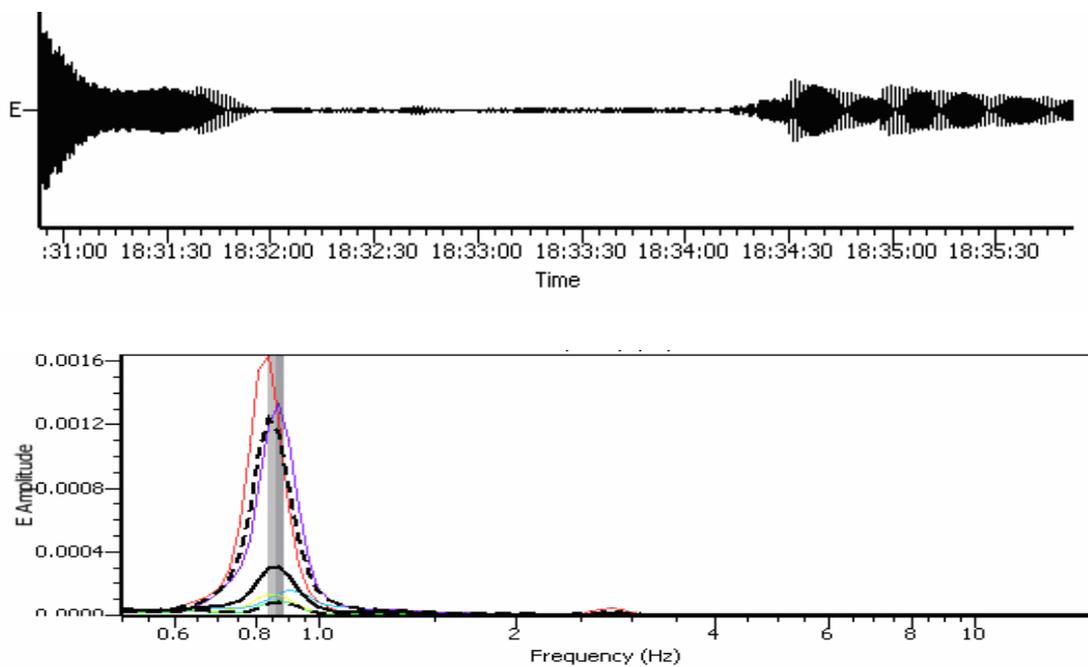


Figure 3.62: Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant.

3.19 Conclusion

Dans ce chapitre la phase expérimentale est une application en même temps une validation de la procédure d'essai par le résonateur mécanique des deux bâtiments.

Le bâtiment du département de génie civil de l'université Saad Dahleb de Blida présente une fréquence propre se situant à la limite inférieure de l'intervalle des fréquences du résonateur mécanique, par contre le deuxième bâtiment qui est en R + 5 étages à usage d'habitation présente une fréquence qui se situe au centre du même intervalle.

Une étude modale a été effectuée pour le premier bâtiment juste pour confirmer l'ordre de grandeur de la fréquence propre du bâtiment avec celle de l'expérimental.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'amplification des amplitudes des vibrations du résonateur mécanique dans la résonance des deux bâtiments.

Seulement il faut noter que le pas de variation de la fréquence du résonateur mécanique est limité physiquement par la différence des hauteurs des tiges qui de l'ordre du centimètre.

Il s'agit aussi de mettre en évidence les modes propres du mouvement de la structure par le biais des contenus fréquentiels correspondants aux différents accélérogrammes aux niveaux des R.D.C et des terrasses des deux bâtiments.

4. SPECTRE DE PLANCHER

Introduction

4.1 Origine et principe de la méthode spectrale

L'idée de cette méthode pour l'estimation des forces sismiques a été mentionnée pour la première fois par M.A Biot en 1933. Cette idée a été développée et perfectionnée dans les recherches de GW Housner, JL Alfond, J.Lkontchinsky, R.H Martel, etc.[38]

Au lieu d'utiliser le processus complet des vibrations sismiques des constructions en fonction du temps, la méthode spectrale ne considère que les valeurs maximales de leurs caractéristiques cinématiques (élongation, Vitesse et accélération). On étudie à cet effet le comportement dynamique d'oscillateurs ayant mêmes caractéristiques dynamiques (période et amortissement) que les structures réelles, et sollicités par un processus vibratoire conforme à un sismogramme réel ou présumé. On en déduit les courbes spectrales ou spectres de réponse qui donnent des valeurs maximales des accélérations, vitesses ou déplacement de l'oscillateur en fonction de sa période propre et de son amortissement.

Ces courbes spectrales seront directement utilisées pour le calcul des constructions. La technique traditionnelle utilisée afin de générer l'historique de l'accélération horizontale à ce plancher, ensuite utiliser cet accélérogramme pour construire un spectre de réponse. Si on désire construire un spectre simplifié de calcul pour un plancher, il faut recommencer la procédure pour un ensemble d'accélérogramme à la base et lisser les spectres obtenus.

Dans le cas d'une structure soumise à des vibrations ambiantes, la sollicitation dynamique ne découle pas d'une force explicite appliquée au système mais d'une force implicite causée par le mouvement de base.

L'analyse spectrale se base sur des spectres de réponse pour des systèmes à un degré de liberté sollicités à leur base par des accélérations provenant des vibrations ambiantes, séisme etc.

Un spectre de réponse est une caractéristique fondamentale d'un accélérogramme en ce qui concerne la réponse maximale qu'il produit pour un système linéaire.

4.2 Spectre de plancher

La méthode d'analyse dans le temps permet de calculer à tout instant le déplacement relatif d'un nœud quelconque d'une structure et d'en déduire la valeur de l'accélération absolue de ce nœud dans une direction donnée.

L'accélérogramme ainsi obtenu, permet de calculer un spectre de plancher qui représente la réponse d'un oscillateur simple lié au nœud considéré de la structure.

Le spectre de plancher sert à calculer la réponse d'un équipement léger pour ne pas perturber le mouvement d'un nœud auquel il est lié; le calcul est identique à celui utilisé pour un oscillateur simple lié au sol lorsqu'une oscillation est définie par un spectre de réponse.

Lorsque l'équipement est lourd, la méthode du spectre de plancher ne peut être utilisée; il faut alors inclure l'équipement dans la modélisation générale de la structure.

4.3 Spectre de réponse pour planchers

Il est clair que l'intensité des vibrations des planchers est étroitement liée à la configuration géométrique et aux caractéristiques dynamiques de la structure.

Par conséquent on peut obtenir la réponse maximale d'un équipement situé dans un bâtiment à l'aide d'un spectre de réponse correspondant au plancher sur lequel est situé l'équipement.

Car certaines parties de la structure et plus particulièrement les équipements ne sont généralement pas modélisés avec la structure support soit :

- par ce qu'on ignore dans quel plancher cet équipement va être éventuellement posé.
- par ce qu'on ne veut pas compliquer inutilement la modélisation globale.
- l'équipement ne vérifie pas certain critère de rapport de masses (structure et équipement).

4.4 Représentation des éléments non structuraux

D'une manière générale, les éléments non structuraux sont ceux qui ne contribuent pas à la résistance de l'ouvrage : éléments de remplissage, divers équipements, liquide contenues, etc.

Pour l'analyse dynamique, il y a lieu d'apprécier leur influence sur la réponse de l'ouvrage :

- amplification des réactions d'appui des équipements due à leur réponse propre,
- pression dynamique et oscillations de la surface libre des liquides contenus.

Cette appréciation conduit à classer ces éléments en deux catégories :

- ceux qui suivent le mouvement et peuvent n'être représentés que par leur masse, c'est-à-dire qu'on cherche à soustraire les éléments en question à toute mise en charge des dispositifs d'attache adaptés et/ou rigidité suffisante de la structure principale,
- ceux dont la raideur doit être intégrée au modèle, c'est-à-dire qu'on les fait explicitement participer au comportement dynamique de la structure.

En d'autres termes les éléments considérés comme secondaires sont ceux qui n'apportent pas une contribution significative à la résistance aux actions des charges horizontales d'ensemble ou à leur distribution à condition que leur résistance à ces actions soit effectivement négligeable.

L'analyse des données expérimentales a fourni la base d'une nouvelle méthode des théories dynamiques de génie sismique: la méthode des spectres de planchers.

4.5 Calcul analytique du spectre de réponse

Un ensemble d'oscillateurs (résonateur mécanique à différentes hauteurs) ayant même amortissement et différentes périodes propres, et excité simultanément par des vibrations ambiantes données, correspond à un enregistrement réel. A Partir de ces derniers on peut obtenir une famille de courbes dont l'ensemble représente le spectre de réponse. Il existe d'ailleurs une relation entre les différents spectres, que l'on établit analytiquement lors d'un mouvement du à une sollicitation. On admet que les fondations d'une construction suivent le déplacement du sol. Le mouvement absolu de la masse considérée par rapport à une origine fixe est alors la résultante de deux mouvements, l'un relatif au mouvement de la base (mouvement d'entraînement), l'autre relatif au mouvement de la masse (dus aux déformations élastiques de la construction par rapport à la base).

$$Y(t) = y_0(t) + y_r(t) \quad (4.1)$$

L'équation différentielle du mouvement est de la forme:

$$\begin{aligned} m(\ddot{y}_0 + \ddot{y}_r) + c\dot{y}_r + ky_r &= 0 \\ m\ddot{y}_r + c\dot{y}_r + ky_r &= -m\ddot{y}_0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

L'équation différentielle du mouvement relatif est celle d'un mouvement de vibration avec une résistance visqueuse, dans lequel la force d'inertie d'entraînement ($-m\ddot{y}_0$) joue le rôle de la force éxitatrice ou de chargement dynamique.

4.6 La fonction de transfert pour un système à un seul degré de liberté

La connaissance d'un oscillateur à un seul degré de liberté est essentielle en analyse de vibration, un système mécanique possède par construction un mode de vibration fortement dominant, c'est ce mode qui est pris en considération dans la dynamique du système.

En fait un système à un degré de liberté joue le rôle de modèle pour interpréter des phénomènes de vibrations.

Schématiquement, un système à un seul degré de liberté, correspond au modèle dit masse, ressort et amortissement.

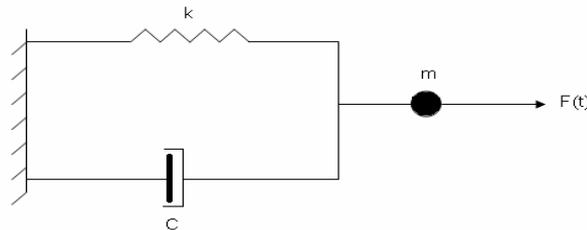


Figure 4.1: Modèle mathématique d'un système à un degré de liberté

m : masse rigide en du mouvement du système.

K : rigidité du système (force statique requise pour obtenir un déplacement unitaire). Pour un bâtiment soumis à des charges latérales, K représente la rigidité latérale de la structure.

C : coefficient d'amortissement visqueux du système (force dynamique requise pour obtenir une vitesse unitaire), on introduit cet amortissement visqueux pour représenter l'énergie dissipée durant la vibration du système. Les sources de cette perte d'énergie sont multiples et ne sont pas facile à quantifier de façon individuelle, on utilise l'amortissement visqueux pour son élégance mathématique.

$F(t)$: chargement dynamique qui varie avec le temps.

L'équation du mouvement (Principe dynamique de Newton) s'écrit:

$$F(t) - kx - c \dot{x} = m \ddot{x} \Leftrightarrow m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F(t) \quad (4.3)$$

Amortissement visqueux)

$$f_c = Cx$$

Pulsation propre du système

$$\Omega = \sqrt{k/m}$$

Taux d'amortissement

$$\xi = \frac{c}{2\Omega m} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

$$\ddot{x} + 2\Omega\xi\dot{x} + \Omega^2x = \frac{1}{m} f(t) \quad (4.4)$$

4.7 Fonction de transfert

La fonction de transfert du système est la transformée de Laplace de sa réponse en un point à une impulsion unité localisée en un autre point.

Le domaine de la transformée de Laplace est utilisée pour des données continues. La transformée de Laplace transforme une équation différentielle dans le domaine temporel, en une équation polynomiale comme une fonction de P dans le domaine de Laplace.

La transformée de Laplace de l'équation

$$f(p) = \frac{1}{mp^2 + cp + k} x(p) = \quad (4.5)$$

On définit la fonction de transfert en déplacement du système comme $h(p) = (mp^2 + cp + k)^{-1}$

Il est intéressant de faire une analyse dimensionnelle de terme du dénominateur.

P a la dimension de l'inverse du temps donc celle d'une fréquence ou d'une pulsation.

On peut donc poser $K = m\omega_0^2$, ω_0 étant une pulsation et $C = 2\varepsilon\omega_0 m$, ε étant un nombre sans dimension, petit devant 1, H (p) peut s'écrire ainsi :

$$H(p) = \frac{1/m}{p^2 + 2\varepsilon\omega_0 p + \omega_0^2} \quad (4.6)$$

La réponse de l'oscillation à une sollicitation transitoire quelconque est donnée par l'équation :

$$M\ddot{x} + A\dot{x} + Kx = f(t) \quad (4.7)$$

En transformant par Laplace nous avons :

$$(Mp^2 + Ap + K) x(p) = F(p) \quad (4.8)$$

$$X(p) = H(p) F(p) \quad (4.9)$$

La connaissance de la fonction de transfert $H(p)$ permet donc de calculer la transformée de Laplace de la réponse à une oscillation quelconque.

La fonction de transfert caractérise la dynamique du système, elle ne dépend que de ces caractéristiques physiques. Un système est décrit par sa fonction de transfert qui est une représentation mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie de ce système linéaire invariant.

Elle est utilisée dans l'analyse des systèmes continus SISO (single- input single output). $H(p)$ est le symbole de la fonction de transfert, $X(p)$ la fonction de sortie, et $F(p)$ la fonction d'entrée.

Dans le domaine fréquentiel la fonction de transfert est défini comme: $h(\omega) = \frac{y(\omega)}{x(\omega)}$

Par sa définition la fonction transfert élimine les caractéristiques de l'excitation et ne conserve plus que celle de la structure

4.8 Calcul direct du spectre de plancher [39]

Quand on doit calculer la tenue sismique d'une structure légère (s) fixée sur une structure porteuse (S) plus massive (ex : composant fixé sur un plancher de bâtiment). On a besoin de connaître le spectre de réponse de l'oscillateur (SRO) associé au mouvement de (S) au niveau des ancrages de (s), mouvement que l'on considère alors comme « source sismique » pour (s) ce SRO est appelé « spectre de plancher ».

Si l'on effectue le calcul sismique de (S) à l'aide de la méthode classique on n'accède qu'au maximum de la réponse.

Pour accéder au spectre de plancher on peut effectuer des calculs temporels de (S), ce qui pose un certain nombre de problèmes par exemple interaction sol fondation.

En effet si l'on reprend la représentation du signal sismique à l'aide d'un processus séparable, la fonction de corrélation et la densité spectrale de puissance nous permettent d'obtenir directement les caractéristiques spectrales de la réponse de (S) au cours du temps.

Pour passer de ces caractéristiques aux SRO de la réponse, ce qui correspond au passage d'une variance à un maximum moyen, on utilisera les considérations sur le facteur de pic.

Il faut également noter que la donnée du mouvement du sol étant les SRO, la première étape consiste à en déduire les caractéristiques du processus séparable.

Examinons d'une façon plus détaillée les différentes étapes de la méthode :

a) passage des SRO de l'accélération $y(t)$ du sol, aux caractéristiques du processus séparable associées. Le séisme est donné par les SRO: $S(f, \varepsilon)$ le processus séparable associés est caractérisé par :

$$\tau(t) = a(t) \cdot F(t) \quad (4.10)$$

$a(t)$ est une enveloppe déterministe de forme standard, elle conditionne en fait la durée T de l'excitation sismique.

$F(t)$ est formée d'une somme de sinusoïdes d'amplitudes déterministes

A_i et de phases aléatoire \mathcal{G}_i Indépendantes et équiprobables dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$,

$$F(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i t + \mathcal{G}_i) \quad \text{les } f_i \text{ sont un ensemble de fréquences discrètes décrivant la}$$

gamme étudiée on prend souvent $f_i = i\Delta f$ avec $\Delta f = \frac{1}{T}$, T est la durée du signal d'après le

théorème de Shannon. La de fréquence étudier entre $[0, f_{\max}]$ est constituée par le de discrétisation temporelle $1/2f_{\max} = T/2N$ avec $f_{\max} = N \Delta f$.

Le problème est de déterminer les A_i et T à partir des spectres de réponses de l'oscillateur (SRO).

On peut montrer pour cela que la densité spectrale de puissance discrétisée (avec le pas Δf) correspondant au processus $F(t)$ est donnée par:

$$S(i \Delta f) = A_i^2 T/2 \quad (4.11)$$

On est donc ramené au problème ou on suppose une variation lente de $a(t)$:

$$\left| S_{pv}(t, \omega) \right|^2 = \frac{1}{2} S(f) \int_0^T a^2(t) dt \quad (4.12)$$

$F(t)$ est un processus stationnaire de la densité spectrale de puissance (DSP) $S_F(f)$.

Pour déduire $S_F(f)$ et T des $S(f, \varepsilon)$, on utilise la propriété que le module de la transformée de Fourier $\tau(f)$ de $\tau(t)$ est voisin du SRO en pseudo vitesse pour $\varepsilon = 0$, ceci étant en fait à prendre au sens d'une moyenne quadratique :

$$S_{pv}^2(f, 0) \approx E[\tau(f)^2]$$

$$E[\tau(f)^2] = \int_0^T \int_0^T \alpha(t)\alpha(t')E[F(t)F(t')]e^{-2i\pi f\tau} dt d\tau$$

$$= \int_0^T \int_0^T \alpha(t)\alpha(t+\tau)\rho_F(\tau)e^{-2i\pi f\tau} dt d\tau$$

Comme $\alpha(t)$ est lentement variable devant $F(t)$:

$$E[\tau(f)^2] \approx \left(\int_0^T \alpha^2(t) dt \right) \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \rho_F(\tau) e^{-2i\pi f\tau} d\tau \right)$$

$$S_{pv}^2(f, 0) = \frac{1}{2} s_F(f) \int_0^T \alpha^2(t) dt = \frac{T}{2} s_F(f) \int_0^1 A^2(u) du \quad (4.13)$$

$A(u)$ étant une enveloppe normalisée standard définie dans l'intervalle $[0, 1]$.

D'autre part, on peut établir une autre relation entre T et $S_F(f)$ en utilisant ce que l'on sait sur les facteurs de pic, sont directement liés à la durée T du signal.

En effet, on connaît le maximum moyen de la réponse d'un oscillateur de fréquence de résonance f^0 et d'amortissement ε : $S(f^0, \varepsilon)$ et on peut calculer d'autre part la valeur quadratique moyenne $\sigma(f^0, \varepsilon)$ de cette même réponse (considérée à la fin de l'excitation) à l'aide de la formule de la variance de la réponse appliquée au temps $t^0 = T$.

En supposant que l'oscillateur a atteint un régime quasi-stationnaire à la fin de l'excitation, on peut appliquer les abaques.

On a alors :

$$\frac{S(f_0, \varepsilon)}{\sigma(f_0, \varepsilon)} = \mu(N_0, \varepsilon) \text{ avec } N_0 = 2 f_0 T \quad (4.14)$$

(4.12) et (4.14) permettent de déterminer T et $S_F(f)$

Calcul de la DSP de la réponse

Connaissant T et S_F on peut obtenir la DSP de la réponse du système à l'aide de la formule :

$$s_R(r, f, t_0) = |H_0(r, f, t_0)|^2 s_F(f)$$

$$|H_0(r, f, t_0)| = \int_0^{T_0} G(r, \tau) a(t_0 - \tau) e^{-2i\pi f\tau} d\tau \quad (4.15)$$

La fonction de green $G(r, \tau)$ qui représente la réponse au point r à une excitation sismique impulsive unitaire, peut être représentée par une somme de contributions modale.

Soient $X^i(r)$, f^i , ε^i et c^i les déformées modales, fréquences de résonance amortissements réduits et coefficients de participation associés à chaque mode.

Nous pouvons écrire :

$$|H_0(r, f, t_0)| = \sum c_i H_{ai}(f, t_0) X_i(r) \quad (4.16)$$

Les $H_{ai}(f, t_0)$ correspondent aux fonction H_a des oscillateurs modaux définis par:

$$H_0(f, t_0) = \frac{c(t_0)}{m[\omega_0^2 + 2i\varepsilon(t_0)\omega_0\omega - \omega^2]} \quad (4.17)$$

Et
$$A^2(t_0) = \frac{c^2(t_0)}{4\varepsilon(t_0)\omega_0^2}$$

En conclusion, la caractérisation des processus instationnaires est nettement plus compliquée que celle des processus stationnaires. Elle implique évidemment l'identification d'un nombre beaucoup plus grand de paramètre. C'est pour ces raisons que l'on a coutume de représenter les signaux sismiques à l'aide du modèle séparable $a(t)F(t)$ décrit précédemment et de se ramener ainsi à l'aide des formules (4.17) à une analyse stationnaire.

4.9 Interaction « système -sous- système »

Pour effectuer le calcul du système muni de ses impédances de sol, on procède en fait en plusieurs étapes.

En effet, un système (installation industrielle) est un ensemble complexe qui comprend :

- les bâtiments
- les gros composants (par exemple : cuve, générateur de vapeur, etc. ...pour les centrales nucléaires).
- les composant secondaire et les tuyauteries.

On effectue donc tout d'abord un calcul d'ensemble des bâtiments et des gros composants représentés par leurs masses. Ce calcul fournit des spectres de plancher qui sont ensuite utilisés comme source d'excitation dans un calcul plus fin des gros composants.

De même, le calcul des gros composants fournit des spectres aux « piquages » utilisés comme source d'excitation dans un calcul des composants secondaires et des tuyauteries.

Une telle méthode suppose en fait que la réponse de la structure « portée » (sous-système) n'ait pas d'interaction, c'est-à-dire ne modifie pas la réponse de la structure « porteuse »

(système), au niveau des points d'ancrage. Ceci n'est pas toujours vrai et si la réponse du système n'est pas globalement mal estimée par cette méthode, celle du sous-système en est notablement affectée. Précisons d'une façon plus quantitative ses conditions d'application.

Représentons le système et le sous-système par deux oscillateurs à 1DDL comme l'indique la figure ci-dessous

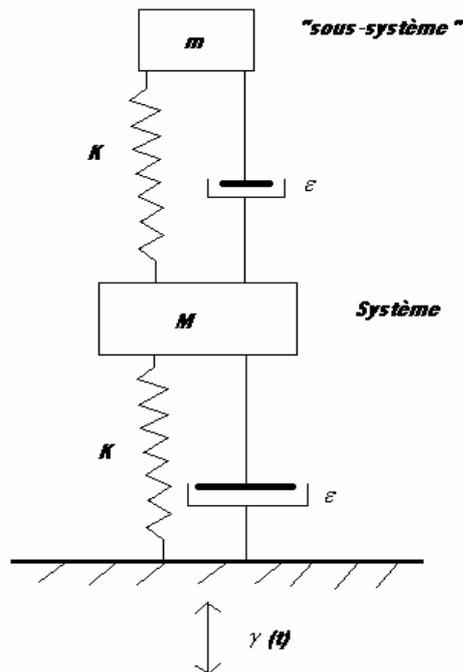


Figure 4.2: Modèle mathématique d'un système et sous système

Soit : $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ la pulsation propre du système, ε son amortissement réduit et $\omega_1 = \sqrt{k/m}$ la pulsation propre du sous-système et ε son amortissement réduit (suppose identique à celui du système).

Nous supposons que le rapport des masses : $4\alpha^2 = m/M$ est petit devant 1.

Dans ce cas l'interaction entre les 2 oscillateurs n'est importante que si ω_0 et ω_1 sont voisines.

Nous posons donc : $\omega_1 = \omega_0(1+u)$ avec $u \ll 1$.

Les équations du mouvement des 2 oscillateurs couplés sous l'effet d'une accélération sismique sont (en transformée de Fourier) :

$$(-\omega^2 + 2i\omega\omega_0\varepsilon + \omega_0^2)X$$

$$-\alpha^2 [2i \omega \omega_0 \varepsilon (1+u) + \omega_0^2 (1+u) + \omega_0^2 (1+u)^2] x = -y$$

$$[-\omega^2 + 2i \omega \omega_0 \varepsilon (1+u) + \omega_0^2 (1+u)] x = -y + \omega^2 X$$

X étant le déplacement relatif de la structure

x étant le déplacement de la sous structure relatif à la structure.

En développant au premier ordre en : $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} - 1$

On a

$$(-\Omega + i\varepsilon)X - 2\alpha^2 x = -\frac{y}{2\omega_0^2}$$

$$-\frac{X}{2} + (\Omega + i\varepsilon + u)x = -\frac{y}{2\omega_0^2}$$

Les carrés du module de X et x sont donnés par :

$$|X|^2 = \left(\frac{y}{2\omega_0^2}\right)^2 \frac{(\Omega + \alpha^2 - u) + \varepsilon^2}{(\omega^2 - \varepsilon^2 - \Omega u - \alpha^2)^2 + \varepsilon^2(2\Omega - u)^2} \quad (4.18)$$

$$|x|^2 \approx \left(\frac{y}{4\omega_0^2}\right)^2 \frac{1}{(\omega^2 - \varepsilon^2 - \Omega u - \alpha^2)^2 + \varepsilon^2(2\Omega - u)^2}$$

Si maintenant on adopte l'hypothèse de découplage système-sous-système, les déplacements X_0 et x_0 des oscillateurs sont :

$$X_0 = -\frac{y}{2\omega_0^2} \frac{1}{-\Omega + i\varepsilon - \alpha^2}$$

$$x_0 = \frac{X_0 - y/\omega_0^2}{2} \frac{1}{-\Omega + i\varepsilon + u}$$

En solidarissant la masse m de la masse M pour le calcul du premier oscillateur.

D'où :

$$|X_0|^2 = \left(\frac{y}{2\omega_0^2}\right)^2 \frac{1}{(\Omega + \alpha^2)^2 + \varepsilon^2}$$

$$|x_0|^2 \approx \left(\frac{y}{4\omega_0^2}\right)^2 \frac{1}{[(\Omega + \alpha^2)^2 + \varepsilon^2][(\Omega - u)^2 + \varepsilon^2]} \quad (4.19)$$

Examinons les maxima de $|x|^2$ et $|x_0|^2$ on peut distinguer deux cas :

-si ε est assez grand :

$$\varepsilon^2 \gg \alpha^2 + \frac{u^2}{4} \quad (4.20)$$

Et

$$\varepsilon^2 \gg \left(\frac{u + \alpha^2}{2} \right)^2$$

Les fonction de transfert en Ω ont un seul pic pour : $\Omega = \frac{u}{2}$ pour l'une et $\Omega = \frac{u - \alpha^2}{2}$ pour l'autre.

Le rapport des maxima est donné par :

$$R = \frac{|x|_{\max}}{|x_0|_{\max}} = \frac{4\varepsilon^2 + (u + \alpha^2)^2}{4\varepsilon^2 + 4\alpha^2 + u^2}$$

Compte tenu des conditions, R reste toujours de l'ordre de 1

-si ε est petit :

$$\varepsilon^2 \ll \alpha^2 + \frac{u^2}{4}$$

Et

$$\varepsilon^2 \ll \left(\frac{u + \alpha^2}{2} \right)^2 \quad (4.21)$$

Les fonction de transfert en Ω présentent deux pics pour :

$$\Omega = \frac{u \pm \sqrt{4\alpha^2 + u^2 - 4\varepsilon^2}}{2} \quad \text{pour l'une et}$$

$$\Omega = \frac{u - \alpha^2 \pm \sqrt{(u + \alpha^2)^2 - 4\varepsilon^2}}{2} \quad \text{pour l'autre}$$

Le rapport des maxima est donné par :

$$R = \frac{|x|_{\max}}{|x_0|_{\max}} = \frac{u + \alpha^2}{\sqrt{u^2 + 4\alpha^2}}$$

Si $\alpha \leq u$, R est de l'ordre de 1, mais si $\alpha \geq u$, $R \ll 1$.

Ceci veut dire l'hypothèse du découplage conduit à une importante surestimation du niveau de la réponse du sous-système si le rapport des masses $\frac{m}{M}$ est relativement grand devant le carré de la différence relative des fréquences $(f_1 - f_0)^2$ de résonances du système et du sous-système, ainsi devant le carré de l'amortissement $(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)^2$.

Ce rapport nous mène à un critère qui nous permet de faire un choix soit d'inclure le sous-système (équipement) dans le modèle général système porteur et le considéré comme équipement lourd par conséquent la méthode du spectre de plancher ne peut être utilisée, soit d'effectuer un calcul de la réponse selon l'hypothèse du découplage.

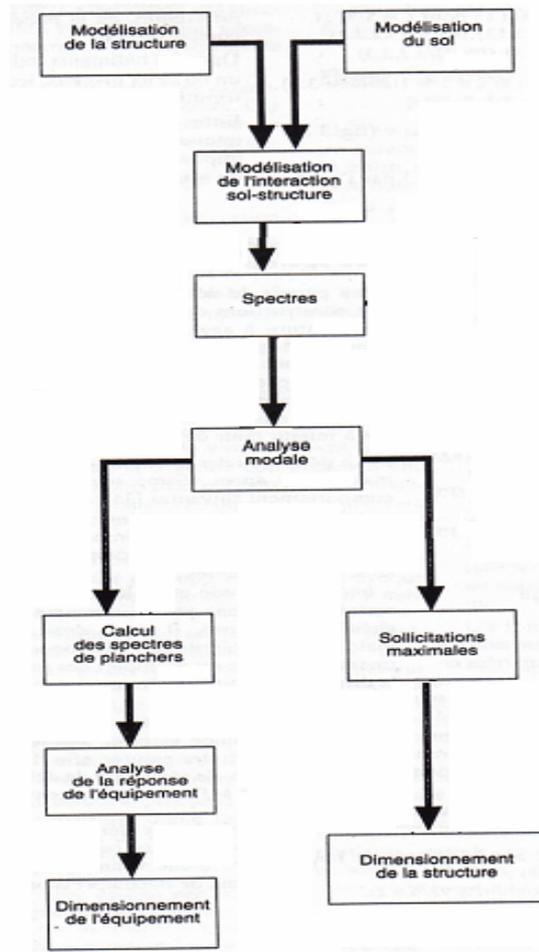


Figure 4.3: Etapes de calcul sous chargement horizontal [40]

4.10 Méthodes de calcul sismique des équipements et des éléments secondaires

Certaines parties de structure et plus particulièrement les équipements, ne sont généralement pas modélisés avec les structures support. Pour ne pas compliquer inutilement la modélisation globale.

Il s'agit dans cette situation de déterminer en même temps que le calcul de la structure principale, le niveau de l'excitation des vibrations ambiantes ou sismique à laquelle les équipements ou parties de structure seront soumis. Pour ce faire on transfère le spectre du niveau de sol au niveau où se trouve l'équipement.

Pour effectuer ce transfert, on peut utiliser deux méthodes de calcul en fonction des données de base utilisées pour les calculs de structure, la première méthode est de faire un :

a) Calcul temporel pour chacune des trois directions de l'excitation par analyse modale transitoire ou intégration directe.

Il est admis de n'utiliser qu'un seul accélérogramme au niveau du sol si les modèles comportent une variation suffisamment large des paramètres (plage de modules de Young du sol) et que le spectre résultant est un majorant du spectre de dimensionnement.

Si le calcul est spécifique d'un site, il doit être réalisé avec trois accélérogrammes du site, tels que la moyenne de leur spectre associé soit un majorant du spectre de dimensionnement.

Le calcul permet de définir l'accélération en fonction du temps, donc le spectre de réponse au nœud de fixation de l'équipement. C'est cette donnée qui servira de base au calcul de l'équipement.

Dans le cas de trois accélérogrammes, on détermine la moyenne des spectres qui en sont issus.

La deuxième méthode est un Calcul par analyse modale spectrale pour chacune des trois directions des vibrations sur la base d'un spectre de réponse au niveau du sol, cette procédure est de loin la plus répandue; le calcul de l'équipement sera alors effectué à partir du spectre transféré, couramment appelé spectre de plancher.

Les techniques actuelles de transfert de spectre permettent le passage du spectre de sol au spectre de plancher, simplement par l'utilisation des caractéristiques modales de la structure (déplacement correspondant à chaque mode propre), l'équipement n'intervenant que comme un paramètre variable de calcul (fréquence et amortissement).

Quelle que soit la méthode de calcul retenue, temporelle ou modale, compte tenu de la sensibilité de la réponse de l'équipement à son support (structure et sol), il est de bon usage

d'introduire les incertitudes en déterminant les spectres transférés par des calculs enveloppes:

- un calcul de spectre résultant des trois directions de séisme.

- détermination d'un spectre enveloppe des spectres calculés pour différent module du sol.

L'allure des premiers modes des vibrations constitue en effet un excellent diagnostic de la qualité de la modalisation.

4.11 Modélisation des équipements (Interface équipement structure)

Pour ne pas compliquer le modèle d'ensemble et souvent par ce qu'ils ne sont pas définis au stade du projet de génie-civil. Les équipements (tuyauterie, gaines armoires électrique, diverses installations, etc.), situés dans un bâtiment industriels sont souvent calculés au séisme dans une phase ultérieure à partir des spectres de planchers transférés par rapport au sol. Cette démarche est d'autant plus justifiée que les résultats de la modélisation globale ne seraient pas faibles à cause de trois facteurs:

- l'augmentation du nombre de degrés de liberté, donc des modes propres,

- l'écart entre les masses des équipements et de la structure peut provoquer des écarts liés à la précision des calculs et ne permet pas une sélection précises des modes utiles.

- les problèmes rencontrés en cas de mise en résonance.

Cette procédure doit être adaptée en fonction de la masse et de la raideur de l'équipement.

Le calcul dynamique s'effectue en deux étapes:

- calcul dynamique de la structure avec le transfert de l'action sismique au niveau où est posé l'équipement.

- calcul dynamique de l'équipement : masse et raideur comparable à celle de génie-civil on procède à une étape de calcul dynamique avec un modèle unique pour la structure et pour celui de l'équipement.

4.12 Détermination expérimentale des spectres de plancher

Cette partie est consacrée à la description de la procédure expérimentale telle qu'elle à été adaptée afin d'obtenir la fonction de transfert, en utilisant le résonateur mécanique.

Le rapport des spectres de signaux permet d'accéder à la fonction de transfert du bâtiment relative à des vibrations ambiantes exercées à la base de la structure.

Fondamentalement, les problèmes de vibration peuvent être de nature linéaire ou non linéaire. Dans ces deux cas les techniques de résolution peuvent être classées en deux catégories, celles qui relèvent de l'approche fréquentielle, basée sur la transformée rapide

de Fourier, et celles qui relèvent de l'approche temporelle, opérant sur les enregistrements temporels.

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser uniquement l'approche fréquentielle dans le domaine linéaire.

Bâtiment 1

4.13 Paramètres de l'ouvrage (département de genie civil)

- bâtiment R.D.C +1 étages (auto stable),
- zone trois,
- coefficient de comportement $R=5$,
- groupe d'usage 2,
- amortissement $\xi = 7\%$,
- facteur de qualité $Q=1.15$,
- site S2 (sol ferme).

Ces paramètres permettent de donner le spectre réglementaire selon le R.P.A

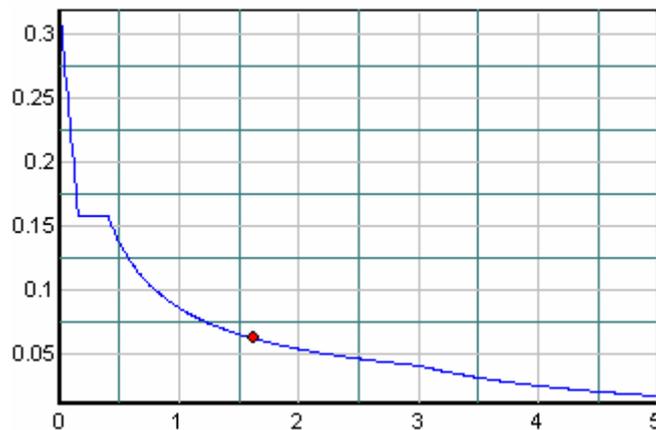


Figure 4.4: Spectre de réponse réglementaire (R.P.A)

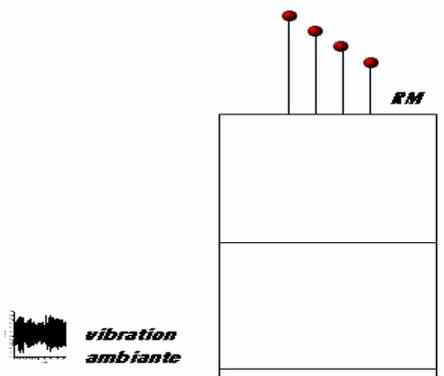


Figure 4.5: Résonateur posé sur la terrasse

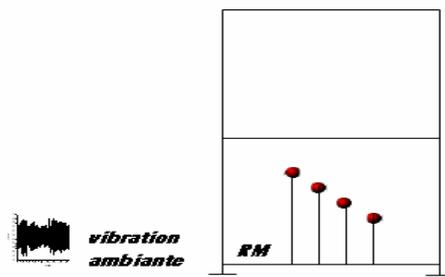


Figure 4.6: Résonateur pose sur le R.D.C

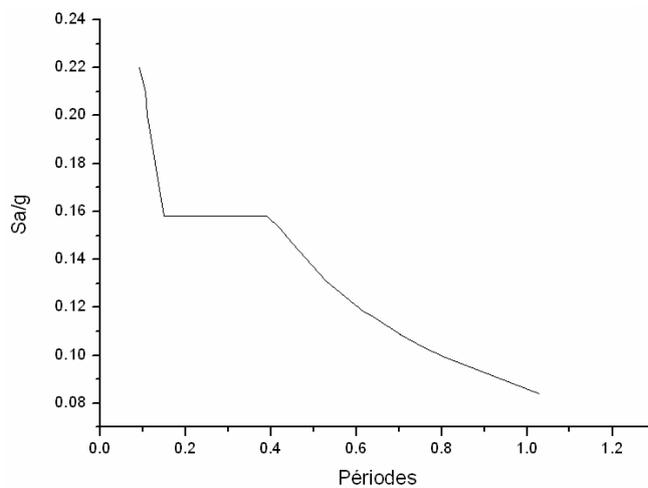
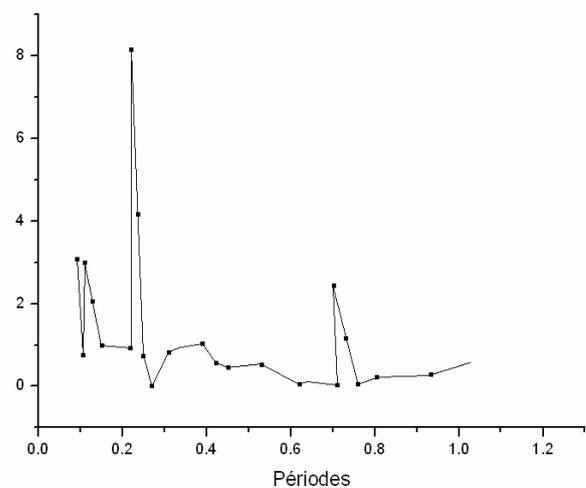
Tableau 4.1: Amplitudes maximum selon deux directions x et y

Hauteur de l'oscillateur(cm)	Période sec	Terrasse (xx)	R.D.C (xx)	Terrasse (yy)	R.D.C (yy)
14	0.092	7578.87	2456.71	5527.94	2881.29
16	0.106	1268.96	1618.01	2552.27	6532.98
22	0.11	4107.47	1386.12	8345.18	479.54
25	0.15	243.96	245.36	330.41	333.02
28	0.22	3346.23	3613.57	14098.93	3523.49
31	0.22	2373.15	291.60	6535.47	2576.72
34	0.25	1228.63	1567.3	5383.83	2498.3
37	0.27	291.31	14353.9	258.24	6113.8
40	0.31	2156.75	2588.1	2141.96	5239.8
45	0.34	7123.57	7548.1	1211.86	11841.15
49	0.39	7433.14	7196.7	3851.72	6969.18
53	0.42	9708.95	16703.16	6880.2	2206.16
57	0.45	5504.77	12253.53	2691.55	12907.38
61	0.53	2113	3818.16	1677.57	6865.79
65	0.62	1306.72	21405.8	1388.83	6870.83
72	0.64	4448.85	40731.27	3148.35	23737.1
76	0.71	1284.98	43065.96	1527.26	25773.91
80	0.70	5073.22	2096.44	1780.76	45760.71
84	0.76	1749.54	29681.5	1942.54	33525.45
88	0.81	5787.31	25234.93	7105.74	11434
92	0.93	7993	29220.13	11333.63	71554
96	1.03	6049.16	10396.67	3523.95	72697.1

On constitue d'abord les courbes des fonctions de transfert à partir des rapports des amplitudes maximum.

Tableau 4.2: Spectre de calcul ajusté selon axe xx

Hauteurs	Période sec	Spectre de calcul Sa/g	Acc(Tx/Rx)	Sa/g x Acc(Tx/Rx)
14	0.092	0.220	3.0849	0.6786
16	0.106	0.210	0.7842	0.1646
22	0.11	0.2	2.9632	0.5926
25	0.15	0.158	0.9942	0.1570
28	0.22	0.158	0.9260	0.1463
31	0.22	0.158	8.1383	1.2858
34	0.25	0.158	0.7839	0.1238
37	0.27	0.158	0.0202	0.0032
40	0.31	0.158	0.8333	0.1316
45	0.34	0.158	0.9437	0.1491
49	0.39	0.158	1.0328	0.1631
53	0.42	0.153	0.5812	0.0889
57	0.45	0.147	0.4492	0.0660
61	0.53	0.131	0.5534	0.0724
65	0.62	0.118	0.0610	0.0072
72	0.64	0.116	0.1092	0.0126
76	0.71	0.108	0.0298	0.0032
80	0.70	0.109	2.4199	0.2637
84	0.76	0.103	0.0589	0.0060
88	0.81	0.099	0.2293	0.0227
92	0.93	0.091	0.2735	0.0248
96	1.03	0.084	0.5818	0.0488

Figure 4.7: Spectre de calcul réglementaire
Selon axe xxFigure 4.8: La fonction de transfert
Selon axe xx

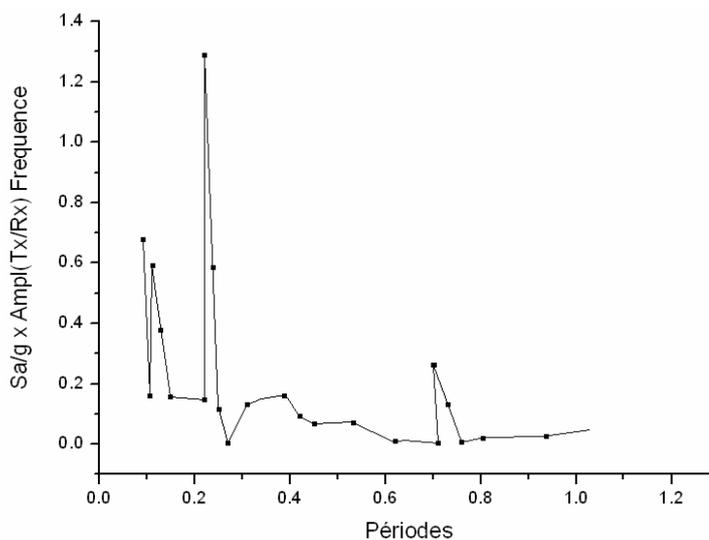


Figure 4.9: Spectre de plancher

Tableau 4.3: Spectre de calcul ajusté selon axe yy

Hauteur de l'oscillateur(cm)	Période sec	Spectre de calcul Sa/g	T(yy)/R (yy)	Sa/g x Acc(Ty/Ry)
14	0.092	0.220	1.9185	0.4220
16	0.106	0.210	0.3906	0.0820
22	0.11	0.2	17.4024	3.4804
25	0.15	0.158	0.9921	0.1567
28	0.22	0.158	4.0014	0.6322
31	0.22	0.158	2.5363	0.4007
34	0.25	0.158	2.1549	0.3404
37	0.27	0.158	0.0422	0.0066
40	0.31	0.158	0.4087	0.0645
45	0.34	0.158	0.1023	0.0161
49	0.39	0.158	0.5526	0.0873
53	0.42	0.153	3.1186	0.4771
57	0.45	0.147	0.2085	0.0306
61	0.53	0.131	0.2443	0.0320
65	0.62	0.118	0.2021	0.0238
72	0.64	0.116	0.1326	0.0153
76	0.71	0.108	0.0592	0.0063
80	0.70	0.109	0.0389	0.0042
84	0.76	0.103	0.0579	0.0059
88	0.81	0.099	0.6214	0.0615
92	0.93	0.091	0.1583	0.0144
96	1.03	0.084	0.0484	0.0040

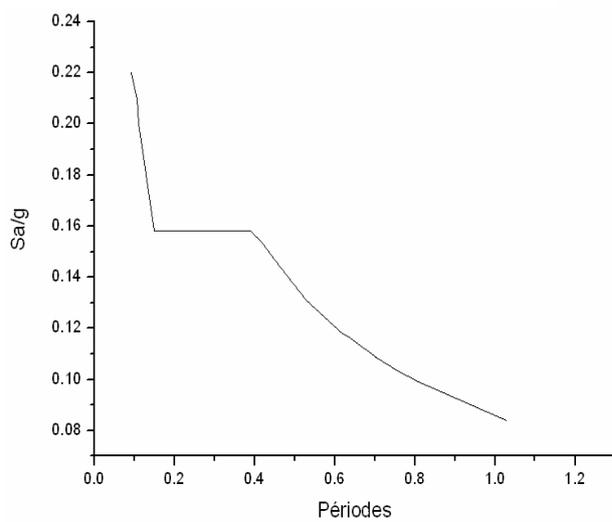


Figure 4.10: Spectre de calcul réglementaire
Selon axe xx

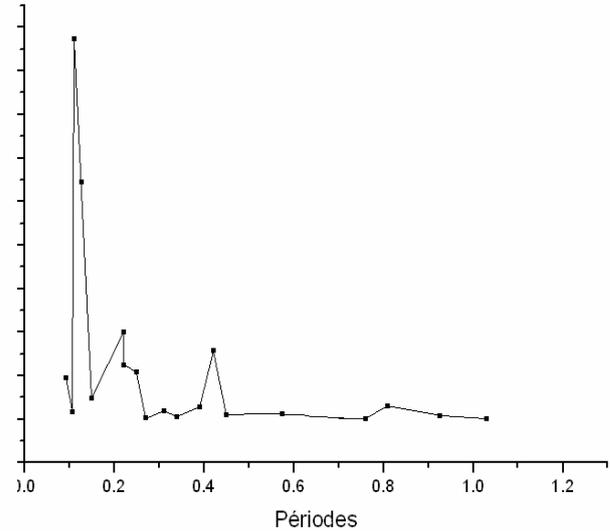


Figure 4.11: La fonction de transfert
Selon axe xx

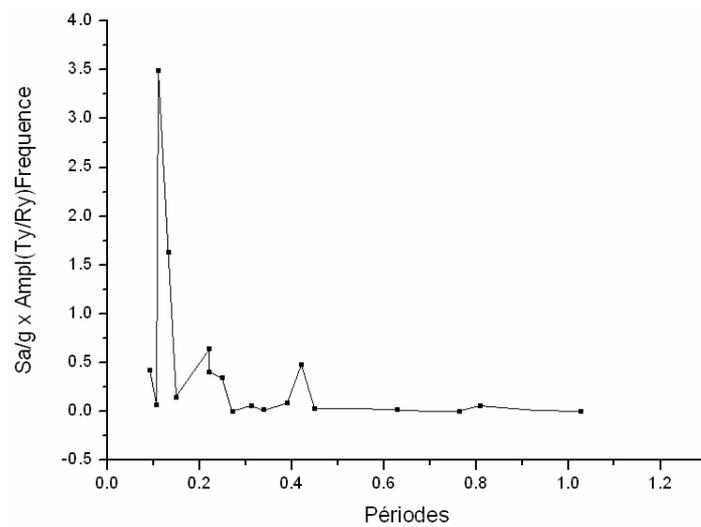


Figure 4.12: Spectre de plancher

4.14 Interprétation des résultats

C'est une technique qui peut être appliquée pour déterminer les spectres de planchers qui sont obtenus par simple transfert des spectres réglementaires (R.P.A 99) vers le niveau de la terrasse en multipliant par la fonction de transfert déterminée expérimentalement.

Bâtiment 2

4.15 Paramètres de l'ouvrage (bloc logement)

- bâtiment R.D.C + 5 étages contre venté par voiles dans les deux sens,
- zone trois,
- coefficient de comportement $R=3.5$,
- groupe d'usage 2,
- amortissement $\xi = 7\%$,
- facteur de qualité $Q=1.25$,
- site S2 (sol ferme).

Ces paramètres permettent de donner un spectre réglementaire selon R.P.A 99.



Figure 4.13: Spectre de réponse réglementaire (R.P.A)

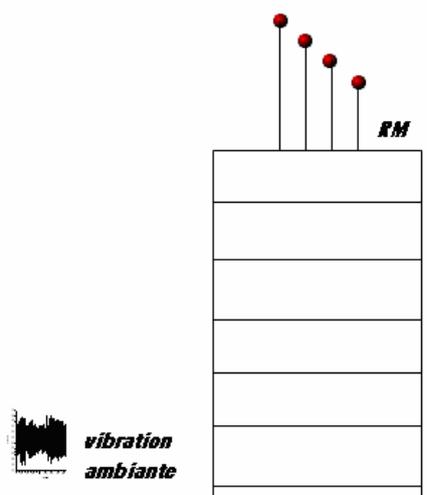


Figure 4.14: Résonateur posé sur la terrasse

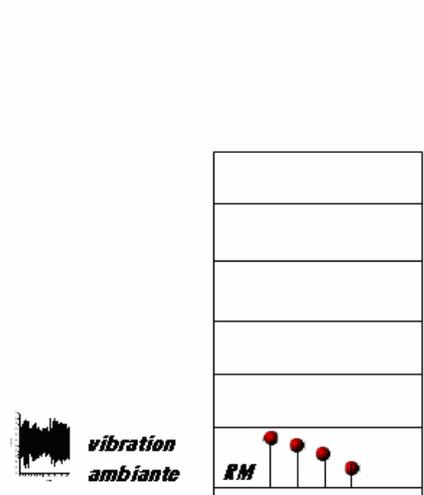


Figure 4.15: Résonateur pose sur le R.D.C

Tableau 4.4: La fonction de transfert selon xx

Hauteurs	Périodes	Ampl(Txx/Rxx)	Sa/g	Sa/g x Ampl(Txx/Rxx)
20	0.108	0.2528	0.264	0.0667
25	0.142	0.6925	0.250	0.1731
31	0.229	9.2896	0.246	2.2852
40	0.346	6.4509	0.246	1.5869
49	0.396	0.7095	0.246	0.1745
53	0.399	0.3968	0.246	0.0976
57	0.587	2.0486	0.190	0.3892
61	0.599	2.8583	0.188	0.5373
65	0.640	1.5740	0.180	0.2833
72	0.737	0.4621	0.163	0.0753
80	0.846	2.3317	0.149	0.3474
88	1.196	0.2529	0.118	0.0298
96	1.276	0.8073	0.114	0.0920

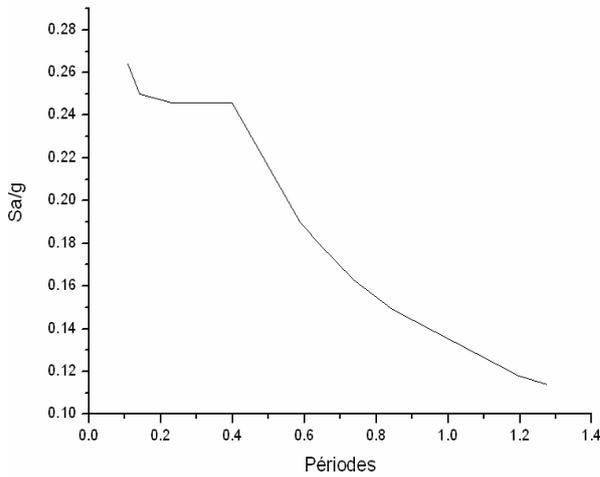


Figure 4.16: Spectre de calcul réglementaire
Selon axe x x

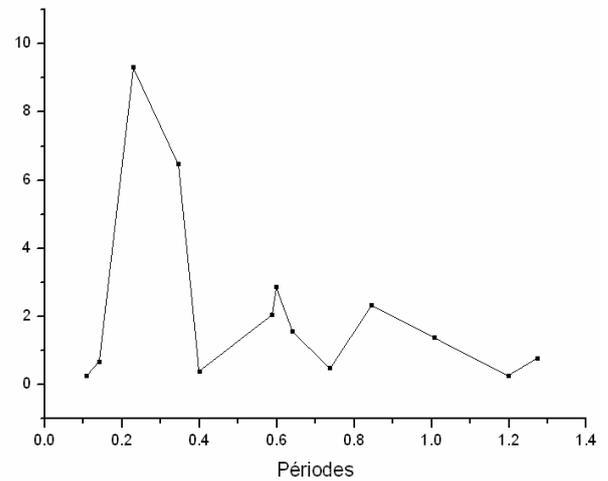


Figure 4.17: La fonction de transfert
Selon axe x x

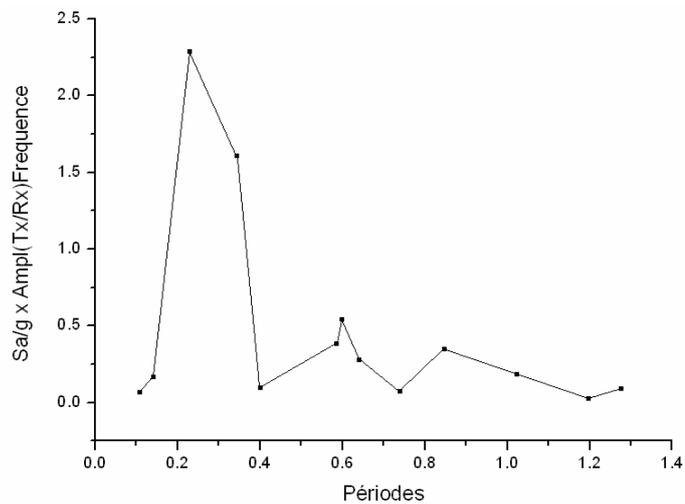


Figure 4.18: Spectre de plancher
Selon axe x x

Tableau 4.5: La fonction de transfert selon yy

Hauteurs	Périodes	Ampl(Tyy/Ryy)	Sa/g	Sa/g x Ampl(Tyy/Ryy)
96	1.28	0.7570	0.114	0.0862
88	1.19	2.6785	0.118	0.3160
80	0.85	0.0816	0.149	0.0121
76	0.85	0.4902	0.163	0.0799
72	0.73	0.2703	0.18	0.0486
65	0.65	0.4338	0.188	0.0815
61	0.58	0.6442	0.19	0.1224
57	0.57	0.9855	0.246	0.2424
53	0.48	0.8768	0.246	0.2157
49	0.40	1.3402	0.246	0.3296
40	0.35	9.0140	0.246	2.2174
25	0.14	0.9002	0.246	0.2214
20	0.11	0.1925	0.25	0.0481

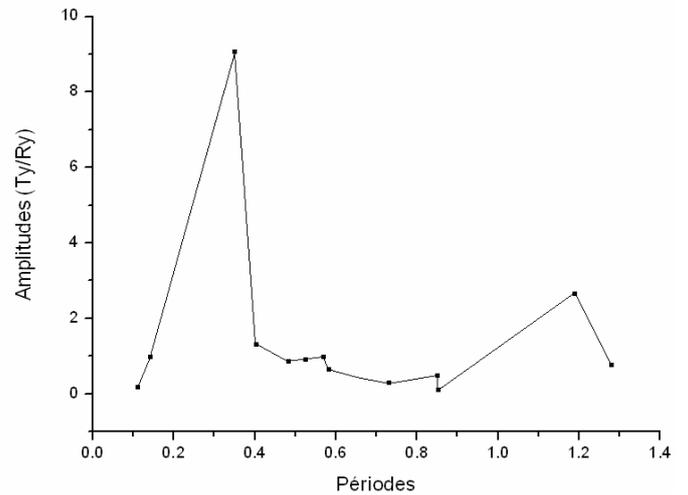
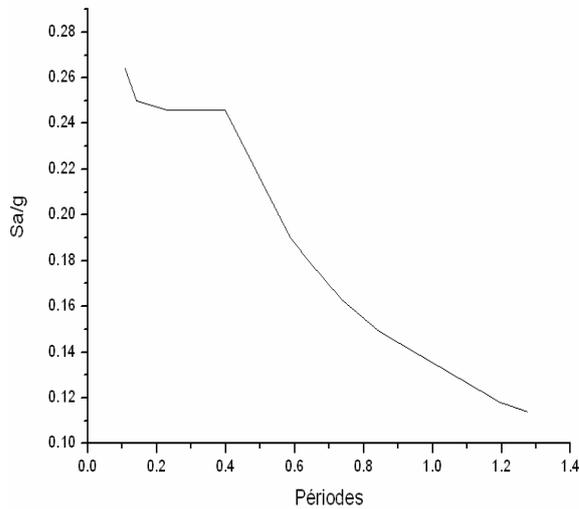


Figure 4.19: Spectre de calcul réglementaire
Selon axe yy

Figure 4.20: La fonction de transfert

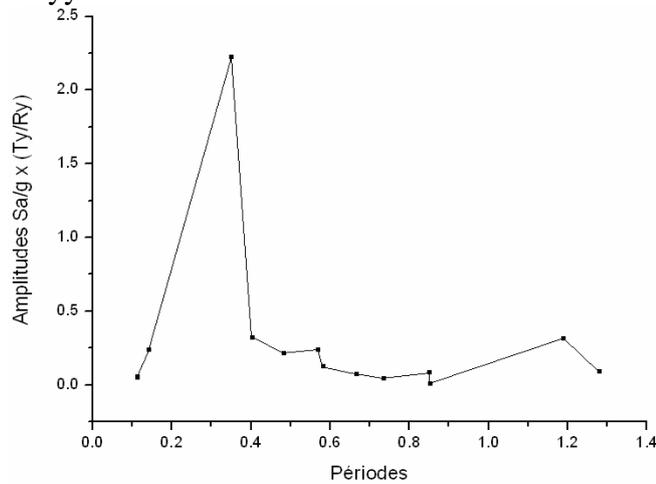


Figure 4.21: Spectre de plancher

4.16 Conclusion

Dans ce chapitre l'importance de travail est comment protégé les équipements et les éléments secondaires ou non structuraux se trouvant dans un bâtiment lors d'un séisme.

Afin d'assurer une rigoureuse protection de ces derniers, une technique du résonateur mécanique a été développée pour exploiter les résultats afin d'obtenir expérimentalement le spectre de plancher.

Pour déterminer le spectre de plancher des différents bâtiments, on a transféré le spectre de réponse réglementaire du R.P.A 99 au plancher (à étudier) relatifs aux vibrations ambiantes exercées à la base de chaque bâtiment, afin de l'ajuster on a multiplié ce dernier par une fonction de transfert déterminée expérimentalement par le résonateur mécanique au niveau des différents bâtiments.

En d'autres termes on doit transférer le spectre du niveau de sol au niveau où se trouve l'équipement. Enfin le calcul permet de définir l'accélération en fonction du temps donc le spectre de réponse au nœuds de fixation de l'équipement, c'est cette donnée qui servira de base au calcul de l'équipement.

Enfin à titre de recommandation, avant de calculer le spectre de plancher il faut s'assurer sur la différence de la masse de l'équipement avec celle de la structure, si l'équipement est lourd, la méthode du spectre de plancher n'est plus applicable ; il faut alors inclure l'équipement dans la modélisation générale de la structure [41].

CONCLUSION

Deux objectifs essentiels sont à l'origine de ce travail de recherche :

- Conception et réalisation d'un résonateur mécanique pour amplifier physiquement les amplitudes des réponses d'un ouvrage sous vibrations ambiantes afin d'améliorer la précision des signaux enregistrés aux voisinages des fréquences de résonance.
- Détermination expérimentalement de la fonction de transfert d'un niveau (plancher) d'un ouvrage par rapport au sol pour le calcul du spectre de plancher.

L'étude bibliographique a été principalement axée sur les méthodes d'essais dynamique à échelles réelles et l'évolution des outils d'extraction et de traitement des signaux.

Après avoir présenté et classé par source d'excitation les méthodes d'essais dynamiques in situ, la méthode des vibrations ambiantes qui se distingue par son efficacité et sa simplicité a été revue en détail tout en passant par les techniques d'identification propres à cette méthode. Les mérites et les limites de cette méthode à travers son domaine d'utilisation pour l'évaluation structurelle des ouvrages de génie civil ont été examinés. La faiblesse des amplitudes des signaux enregistrés sur certains types de structures constitue une lacune importante de cette méthode. Ainsi, on s'inspirant du principe de fonctionnement des capteurs d'accélération (accéléromètre), un résonateur mécanique a été conçu pour permettre d'amplifier les amplitudes des enregistrements aux voisinages des périodes propres des ouvrages sous essais. Le résonateur a un degré de liberté par plan. Une étude analytique a été menée pour dimensionner les tiges en fonction du poids de la plateforme et le capteur (géophone) tout en optimisant les hauteurs des tiges pour atteindre la plus grande bande de variation de la fréquence. Ainsi on a obtenu une fréquence modulable dans un champ de fréquence entre 0.1 et 1 seconde. Cette fourchette couvre des bâtiments ayant des hauteurs jusqu'à 10 étages environ.

Une première série d'essais d'identification et de calibrage a été effectuée pour déterminer les caractéristiques mécaniques réelles des tiges du support et établir une relation entre la hauteur de la plateforme et la fréquence propre du résonateur.

En guise d'application, deux bâtiments différents ont été testés en utilisant le résonateur. Il s'agit du bâtiment abritant le département de génie civil de l'université Saad Dahlab de Blida dont la fréquence propre est située près de la limite inférieure de l'intervalle de variation des fréquences du résonateur et le deuxième est un bâtiment en R+5 à usage

d'habitation avec une période propre situé au centre de l'intervalle. Une analyse modale analytique préliminaire a été effectuée pour une structure du bloc de génie civil à titre de confirmation pour permettre d'optimiser le nombre d'essais. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'amplification des amplitudes des vibrations du résonateur dans la zone de résonance même pour le cas de l'ouvrage ayant la fréquence proche de la limite de l'intervalle de fréquence du résonateur.

Il faut souligner, cependant, que cette technique présente deux difficultés majeures :

- Le pas de variation de la fréquence du résonateur est limité physiquement par la différence des hauteurs des tiges qui est de l'ordre du centimètre.
- L'hypothèse prise lors de cette étude concernant l'uniformité de la fonction de densité spectrale de l'excitation (vibrations ambiantes) est approximative et risque de ne pas être vérifiée pour des cas de perturbations environnementales. Cette contrainte peut être surmontée en utilisant un enregistrement simultané par deux géophones dont un servira de référence.

Le deuxième volet de ce travail concerne un aspect très important et souvent négligé dans la conception parasismique qui est la protection sismique des équipements et éléments secondaires. Ces derniers sont généralement calculés en utilisant la méthode des spectres de planchers. Dans ce sens, l'assise théorique de la méthode de détermination directe des spectres de réponse a été exposée, tout en investiguant le cas des systèmes secondaires légers sans interaction avec le système primaire. Pour ce cas, une méthodologie a été développée pour exploiter les résultats obtenus par la technique du résonateur mécanique en vue de l'obtention expérimentale des spectres de plancher.

Les enregistrements obtenus des essais de vibrations ambiantes par le résonateur mécanique sur les deux bâtiments ont été utilisés pour déterminer les fonctions de transfert. Les spectres de réponse de planchers des derniers étages ont été calculés sur la base du spectre de calcul du RPA99 appliqué à la base. Les tracés des spectres présentent quelques points singuliers qui correspondent à des perturbations parasites locales au niveau du résonateur (mouvement de l'opérateur, souffle de vent etc.) ou à des fluctuations de la fonction de densité spectrale de l'excitation (vibrations ambiantes). L'apport le plus significatif de cette technique réside dans la possibilité d'évaluer expérimentalement du spectre de calcul de plancher d'un édifice existant sans connaître ses caractéristiques structurales.

RECOMMANDATIONS

Pour remédier aux insuffisances constatées sur les mesures, il serait d'un grand intérêt d'investiguer le développement de cette technique par :

- Amélioration du dispositif du résonateur et notamment le mode de glissement en hauteur de la plate forme et les tiges (dimension/nuance variable) afin d'étendre la plage de variation des fréquences et la diminution du pas.
- Corroboration des résultats obtenus par un système d'enregistrement bi voies bi résonateurs

Références bibliographiques

1. Tezcan S.S., Ipek M., Petrovski J., and Pasklov T., Forced vibration survey of Istanbul Bogazici Bridge, Proc. 5 th Eur. Conf. Earthquake eng. Istanbul 2,1975.
2. Taskov L.A., Dynamic testing of bridge structures applying forced and ambient vibration methods, Proc. Conf. On Civil Engineering Dynamics, Society For Earthquakes and Civil Engineering Dynamics, London, UK, 1988.
3. Christian. Lalanne, Vibrations et chocs mécaniques.2 chocs Mécaniques, Paris : Hermès Sciences Publications, 1999
4. Bar 73. Barnoski R.L. and Maurier J.R. « Transient characteristic of single system modulated random noise ». Journal of application mechanics March 1973, P 73/77
5. Levy R. Kozenf and Moorman R.B.B. « Random processus for earthquake simulation ».Journal of engineering mechanics division, preceding of American society and civil engineers, April 1974, P495/517.
6. Small Wood D.O. “Method used to match shock spectra using oscillatory transient ».I.E.S. Proceeding. 1974, April28, May 1. P.409/420.
7. Small Wood D.O. and Witte A.F. « The use of shaker optimized period transient in Watching field shake spectra ». The shake and vibration bulletin N° 43, Part 1, June 1973 P130/150.
8. Stubbs I.R. and Maclamor V.R., The ambient vibration survey, Proceeding of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Italy, Rome, 1973.
9. Farsi M.N., Identification des structures de génie civil à partir de leurs réponses vibratoires. Vulnérabilité du bâti existant, thèse de doctorat. Université de Grenoble, France, 1996.
10. Abdel-Ghaffar A .M and Housner G.W; Ambient vibration tests on suspension bridge, j. eng.Mech.Div. ASCE 104, p 983-999, 1978.
11. Brown John. J.M; Dumanoglu A.A; Severn R.T and Black borough ; Ambient vibration survey of the Bosphorus Suspension Bridge, Earthquake eng. Strut. Dyn 18,263-383, 1989.
12. Volant P, Orbovic N., and Dunand F., Seismic evaluation of existing nuclear facility using ambient vibration test to characterize dynamic behavior of the structure and micro tremor measurements to characterize the soil : a case study. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22: 1159-1167, 2002.
13. Bourriche, F., L’analyse modale expérimentale dans l’expertise des constructions, cas de la nouvelle gare, Thèse de Magistère, Université Saad Dahleb, Blida, juin 2002.

14. Kibboua. A, Analyse dynamique sous vibrations ambiantes d'un pont à Haubans sur l'oued Dib à Mila, Thèse de Magistère, Ecole nationale des travaux publique Alger juin 2005
15. Ricardo. A. Medina. , Ragunnath Sankaranarayanan A., Kevin M. Kingston. Floor response spectra for light components mounted on regular moment-resisting frame structures. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, college Park. MD 20742, United state. Engineering Structures 28 (2006) 1927-1940.
16. Cowley. P et Adams R. D. The mechanics of the Coin-Tap method of non destructive testing, Journal of sound of vibration, 1988, vol. 112, No 2, pp299-316.
17. Skrinar. M et Strukelj .A., Eigen frequency monitoring during bridge erection Structural engineering international, 1996, vol 6, N°3, pp191-194.
18. Ibrahim. S.R, Double least squares approach for use in structural modal identification, AIAA Journal, Vol.24, N°3, PP.499-503, 1986
19. M. Abdelghani, B.Crosnier, Une nouvelle méthode d'identification: vers le contrôle des structures adaptative, Mécanique Industrielle et Matériaux, Vol.47, No.4 pp.436-438, 1994
20. M. Abdelghani, M. Verhaegen, performance of subspace methods for identification of flexible structures, Internat Report, LMGC-CS-R195-03, 1995
21. D. Westwick, M. Verhaegen, Identifying MIMO wiener systems using subspace model identification methods, Invited Paper for signal Processing Special issue, 1995
22. M. Verhaegen, D. Westwick, Identifying MIMO Hammerstein systems in the context of subspace model identification methods, Submitted to the international Journal of control, 1994
23. Verhaegen. M, Identification of the deterministic and stochastic part of MIMO state space models under the presence of process and measurement noise, Internal Report, Delft University of technology, Dept. of Electrical Engineering, 1994
24. Bensaibi M; Identification de la fonction de transfert d'une structure par méthode fréquentielles et temporelles, Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Paris, France, 1996
25. Halfaya F.Z ; Génération des fonctions de transfert par la méthode ARMA : Application à la mise en évidence des défauts dans les structures, Thèse de Magistère, Université Saad Dahleb, Blida, juin 2003.
26. Lembregts F, J. Leuridan, H Vanbrussel, Frequency domain direct parameter identification for model analysis: state space formulation, Proceeding of IMAC, pp1271-1277, 1985
27. Swevers J, W. Heylen, P.Sas, Time domain identification methods for model analysis, Revue Française de mécanique, pp. 29.34, 1994

28. Lembregts F, Parameter estimation in model analysis, Model Seminar, LMS Document, 1994
29. Ibrahim S.R., Modal confidence factor in vibration testing, AIAA Journal of Spacecraft and Rockets No15, p. 313-316, 1978.
30. Kibboua. A, Analyse dynamique sous vibrations ambiantes d'un pont à Haubans sur l'oued Dib à Mila, Thèse de Magistère, Ecole nationale des travaux publique Alger juin 2005
31. Geopsy, Geophysical signal Database For Noise Array Processing. Version 2.00-Alpha Octobre 2005. [http://www. Geopsy.org](http://www.Geopsy.org). copyright 2002-2005 by Marc Wathlet (marc@geopsy.org).
32. Curtis. A.J, "Random and complex theory". Les proceedings. 1964. p35/52
33. Rapin. P, « Application de la statistique mathématique aux problèmes vibratoires de la mécanique industrielle ». Mécanique No 240. Décembre 1969. p30/39.
34. Pr Berrah.M K., cours sur les vibrations aléatoires, Ecole nationale polytechnique , ENP 2005/2006.
35. Christian. Lalanne, Vibrations et chocs mécaniques.1 vibration Sinusoïdale, Paris : Hermès Sciences Publications, 1999
36. Christian. Lalanne, Vibrations et chocs mécaniques.3 vibration Aléatoire, Paris : Hermès Sciences Publications, p 25/61, 1999
37. SAP 2000. Structural Analysis Program: Non Linear Version 7.40, Computers and Structures, Inc. Berkeley, USA, 1997.
38. Tzenov et Bonneville., Calcul des structures parasismiques, N° Edition 1824/84. Entreprise nationale du livre, p14/33, Alger, 1985
39. René Jean Gilbert., Vibrations Des Structures (Interactions avec Les fluides (Sources d'excitation aléatoires), Professeur à l'institut National des sciences et techniques nucléaires CEA- EDF (INRIA) No 69.p 662/667, France. 1988
40. Victor Davidovici., La construction En Zone Sismique Moniteur référence technique. Approche réglementaire, Modèles d'analyse des structures, Diagnostic des bâtiments existants et Exemples de calculs. P 46/109, Le Moniteur.
41. Alain Capra et Victor Davidovici., Calcul Dynamique des Structures en Zone Sismique. Edition Eyrolles 2° édition, p 2/61, Paris, 1982
42. Clough R.W and Penzien J; Dynamics of structures, McGraw-Hill Book; Inc, New York N.Y, p 59/79, 1975.

Annexes

Annexe 1

Notion sur les vibrations aléatoires

INTRODUCTION

L'objet principal des vibrations aléatoires est de déterminer comment les caractéristiques statistiques du mouvement d'un système sollicité de manière aléatoire dépendent des caractéristiques statistiques de l'excitation ainsi que des propriétés dynamique du système vibratoire.

L'incertitude est inhérente à tous les phénomènes qu'il soit naturel ou provoqué par l'homme seul le niveau d'incertitude peut varier.

Le degré de l'aléatoire dépend du niveau de l'aléatoire, si le niveau est faible l'approche est déterministe si le niveau est fort l'approche est probabiliste.

L'approche déterministe utilise les valeurs moyennes et des coefficients de sécurité (l'approche déterministe est semi-probaliliste)

En résumé la théorie de vibration aléatoire est une combinaison d'une part de la dynamique des structures appliquée et d'autre part de la théorie de probabilité.

En vibration aléatoire input et output sont décrits par le biais du processus stochastique ou processus aléatoire.

Processus aléatoire (stochastique)

Si un phénomène physique est aléatoire si chaque échantillons $x(t)$ de ce phénomène (enregistrement ou histoire temporelle est le résultat de circonstance unique qui ne va pas se répéter à l'occasion d'autre mesure indépendante de ce même phénomène on ne pourra jamais superposé les enregistrements du même phénomène car chaque expérience à ces propres conditions est ces propres données.

L'ensemble des échantillons constitue un processus stochastique dont le nombre de variable aléatoire est infinie. Un processus aléatoire est constitué de l'ensemble complet des échantillons.

On décrit le processus aléatoire.

En décrivant les variables en nombre infini.

Variable aléatoire et notion de probabilités

On décrit le processus aléatoire en décrivant les variables aléatoire $x(t)$ qui sont des grandeurs pouvant prendre lors d'une expérience telle ou telle valeur inconnue .ces variables peuvent être discrets ou continues.

Pour décrire une variable aléatoire on décrit d'abords sa loi de répartition qui établit une relation correspondante entre les valeurs possibles d'une variable aléatoire et de probabilité.

Dans le cas on l'on s'intéressent à la probabilité pour que cette variable aléatoire se trouve dans un certain intervalle on peut définir alors la densité de probabilité comme étant la dérivée de la fonction de répartition

$$f(x)=f'(x)$$

$$P(x_n)=\text{prob}(x \leq x_n \leq x+dx)$$

La description des propriétés fondamentales d'un processus aléatoire se fait selon une loi de répartition qui permet de décrire complètement le variable aléatoire de point de vue probabiliste.

La principale caractéristique d'un processus aléatoire est dans la irrégularité.

Parmi les paramètres qui caractérisant la loi de répartition sont :

- l'espérance mathématique.
- la variance.
- la loi de répartition.
- La fonction de corrélation et d'autocorrélation.
- la fonction de densité spectrale.

a) L'espérance mathématique

L'espérance mathématique d'une fonction $x(t)$ ayant une loi de répartition donnée par :

$$U = E(x(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)p(x)dx \text{ fonction continue}$$

$$E(x(t)) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \text{ fonction discontinue (discrète)}$$

N : nombre de réalisation

b) Moyenne et moyenne quadratique

on définit la moyenne de $P(x)$ lorsque $P(x)=x$

$$E(x(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(t)dx$$

-on définit la moyenne quadratique lorsque $P(x)$ est égale à x^2

$$E(x^2(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2p(x)dx$$

c) Ecart type

Ecart type caractérise la dispersion autour de la valeur moyenne.

$$\tau^2(t) = E[x(t)-u(t)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [x-E(x)]^2p(x)dx$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i(t)-u(t))^2$$

d) corrélation et auto corrélation

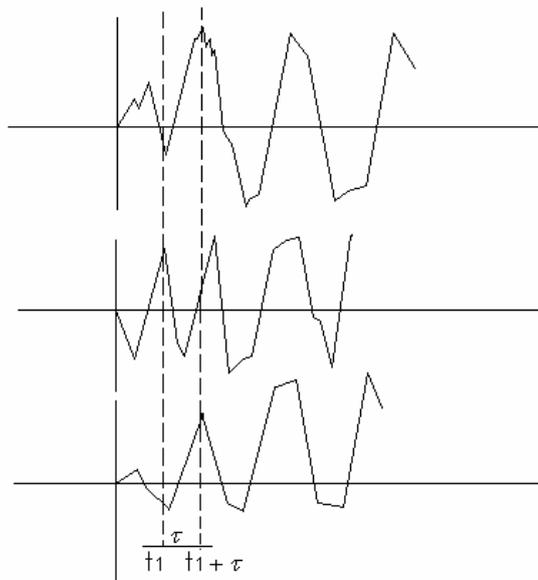
La fonction d'autocorrélation définit le degré de parenté entre un même processus pris à deux instants différents où la corrélation caractérise la similarité de deux quantités être interprète

$(t)_2$ (t) et x_1 x

Analyse spectrale

Il est d'usage pour l'ingénieur de faire une analyse spectrale (décomposition fréquentielle) par le biais de la quelle une fonction périodique dans la temps s'écrit comme étant la somme des différentes fonctions harmoniques.

La méthode temporelle bien qu'elle déterministe dans le principe mais elle comporte des éléments probabiliste (combinaison des modes et des composants dans la méthode spectrale prise en compte dans plusieurs enregistrement).



Echantillon 1

Echantillon 2

Echantillon 3

Cet ensemble d'échantillon constitue un processus aléatoire

$$x(t_1) \neq x(t_2) \neq x(t_3)$$

$$x(t_1) = x_1, P_{x_1}$$

$$x(t_1) = x_2, P_{x_2}$$

Le qualificatif aléatoire n'est pas du à l'aspect irrégulier des échantillons il est du faite que les échantillons soient différents les uns des autres et qu'ils ne sont superposables.

Fonction de densité spectrale de puissance

Dans le cas de processus stochastiques stationnaires, la fonction de densité spectrale est une mesure de la distribution dans le domaine des fréquences de la moyenne de la valeur carrée c'est à dire $E(x^2)$ ou le carré du module de la transformée de Fourier.

La densité spectrale de puissance d'un signal est la transformée de Fourier de la fonction d'auto corrélation. Elle représente la répartition de la puissance sur l'axe des fréquences.

Dans la théorie des processus aléatoires, cette définition constitue le théorème suivant.

Théorème de Wiener-Kintchine: la densité spectrale de puissance d'un processus aléatoire

dont la valeur moyenne et la fonction d'auto corrélation sont invariantes dans le temps (stationnarité au sens large) est égale à la puissance à la transformée de Fourier de sa fonction d'auto corrélation.

La densité spectrale de puissance est quadratique c'est-à-dire qu'elle est indépendante de la phase du signal. De plus elle est toujours réelle et positive. Soit $x(t)$ un processus stochastique (input) et soit $y(t)$ un processus stochastique représentant la réponse du système (output)

y_m échantillon $x(t) \longrightarrow$ échantillon $y(t)$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)x(t-\theta)d\theta$$

$$E[y(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} E[h(\theta)x(t-\theta)]d\theta$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)E(x(t-\theta)]d\theta$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta)mx \longrightarrow H(0)$$

$$E[y(t)] = mxH(0)$$

$$2) R_y(\tau)$$

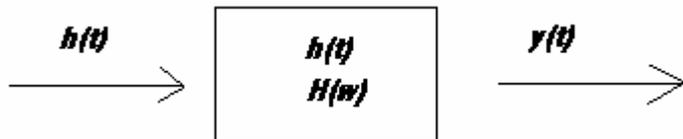
$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) x(t - \theta_1) d\theta_1$$

$$y(t) * y(t + \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) x(t - \theta_1) d\theta_1 \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_2) x(t + \tau - \theta_2) d\theta_2$$

$$R_y(\tau) = E[y(t)y(t + \tau)]$$

$$E(y(t) \cdot y(t + \tau)) = E\left[\int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) x(t - \theta_1) d\theta_1, \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_2) x(t + \tau - \theta_2) d\theta_2\right]$$

$$R_y(\tau) = E[y(t)y(t + \tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) h(\theta_2) E[x(t - \theta_1) * x(t + \tau - \theta_2)] d\theta_1 d\theta_2$$



$$R_y(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) h(\theta_2) R_x(\tau + \theta_1 - \theta_2) d\theta_1 d\theta_2$$

$$M_y = h_0 m_x$$

$$R_y(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) h(\theta_2) R_x(\tau + \theta_1 - \theta_2) d\theta_1 d\theta_2$$

Relation entre $S_y(\omega)$ et $S_x(\omega)$

$S_y(\omega)$ = TF de $R_y(\tau)$

$$S_y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_y(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega\tau} d\tau \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) h(\theta_2) R_x(\tau + \theta_1 - \theta_2) d\theta_1 d\theta_2 \right)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_1) e^{i\omega\theta_1} d\theta_1 \int_{-\infty}^{+\infty} h(\theta_2) e^{i\omega\theta_2} d\theta_2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau + \theta_1 - \theta_2) e^{i\omega(\tau + \theta_1 - \theta_2)} d\tau$$

$$H^*(\omega) = H(-\omega)$$

$$S_y(\omega) = H^*(\omega) H(\omega) S_x(\omega)$$

$$S_y(\omega) = H(\omega) H(\omega) S_x(\omega)$$

$$S_y(\omega) = H(\omega)^2 S_x(\omega)$$

$$S_y(\omega) = |h(\omega)|^2 S_x(\omega)$$

Pour un processus stationnaire la densité de puissance spectrale fournit une décomposition fréquentielle locale de l'énergie de processus, en ce sens que la valeur locale de la densité de puissance spectrale représente l'énergie moyenne de processus obtenu par filtrage idéal passe-bande.

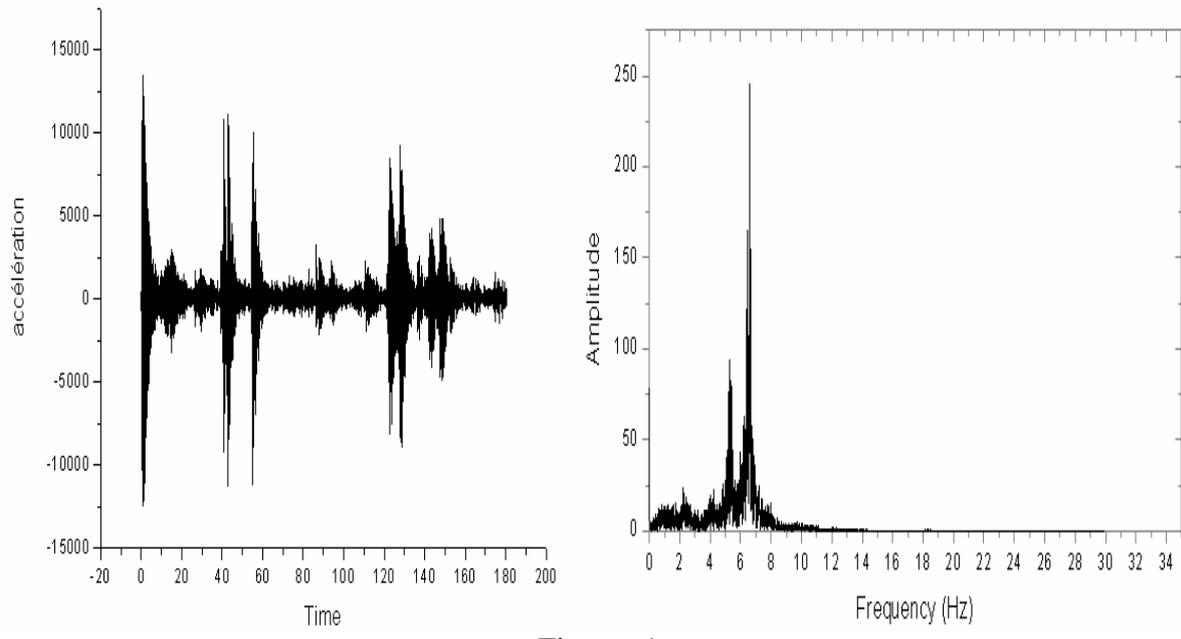
La largeur du filtre unitaire est centrée sur la fréquence considérée.

Le choix de la résolution dans un domaine (temps ou fréquence) fixe automatiquement la résolution dans l'autre domaine. Ce compromis entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle est le principe d'incertitude.

Annexe 2

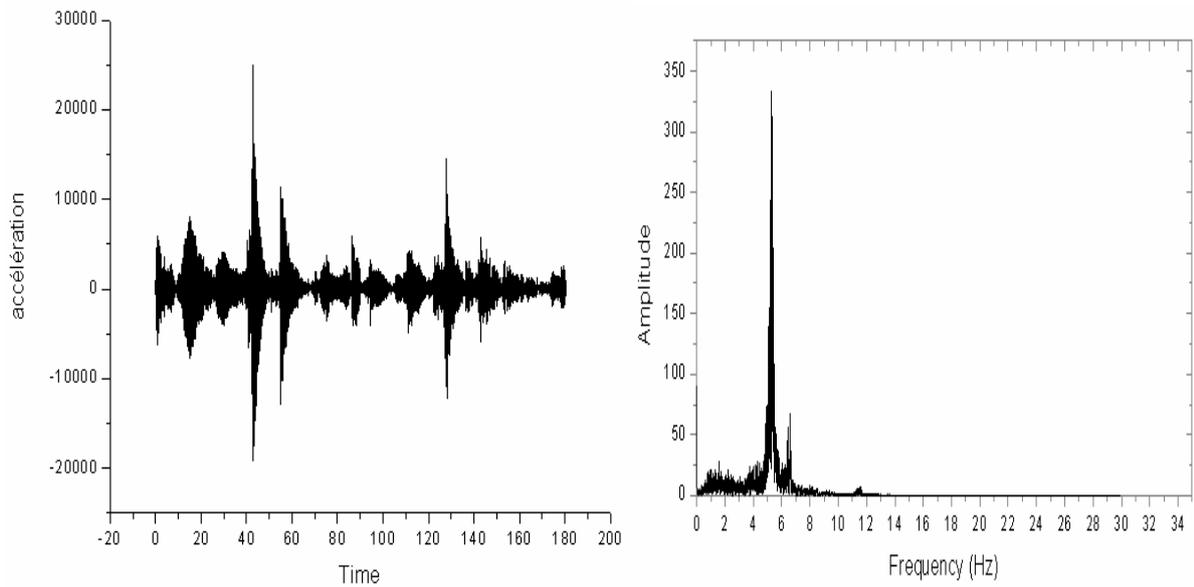
Les essais ont été effectués sur le bâtiment du département de génie civil de l'université de Blida et le logiciel utilisé est Origin version 7.

Hauteur de l'oscillateur est de 25cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



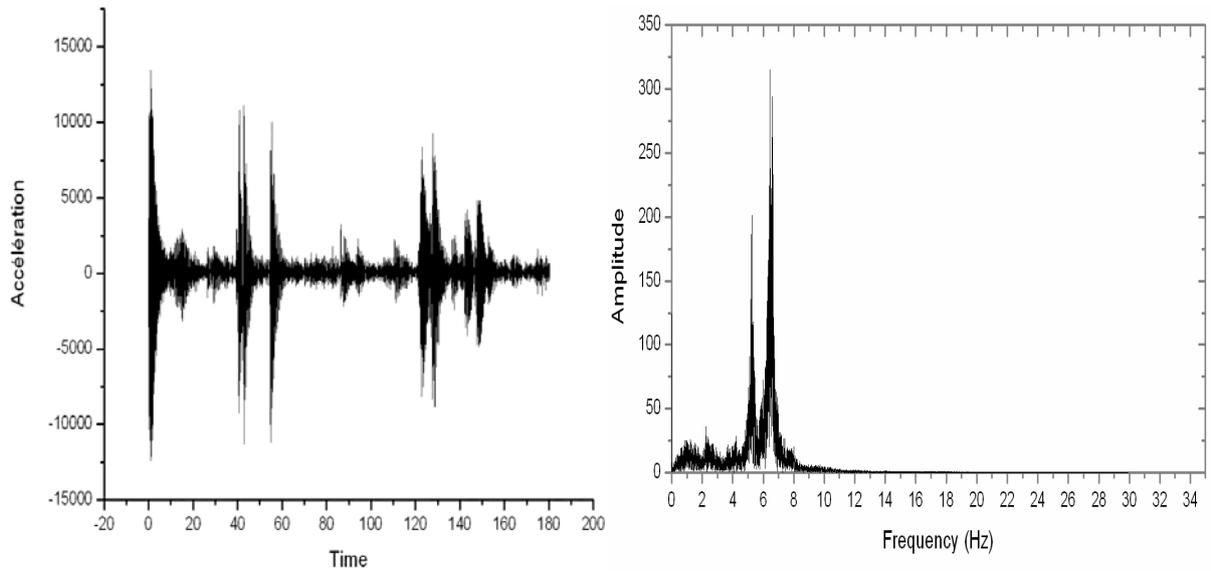
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



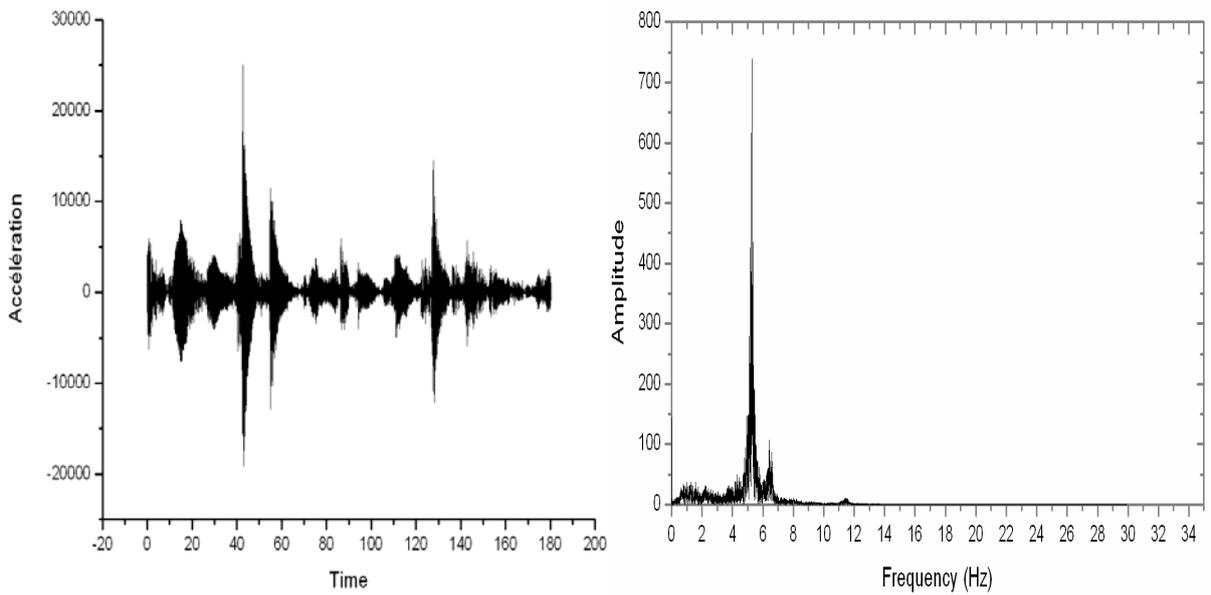
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 25cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



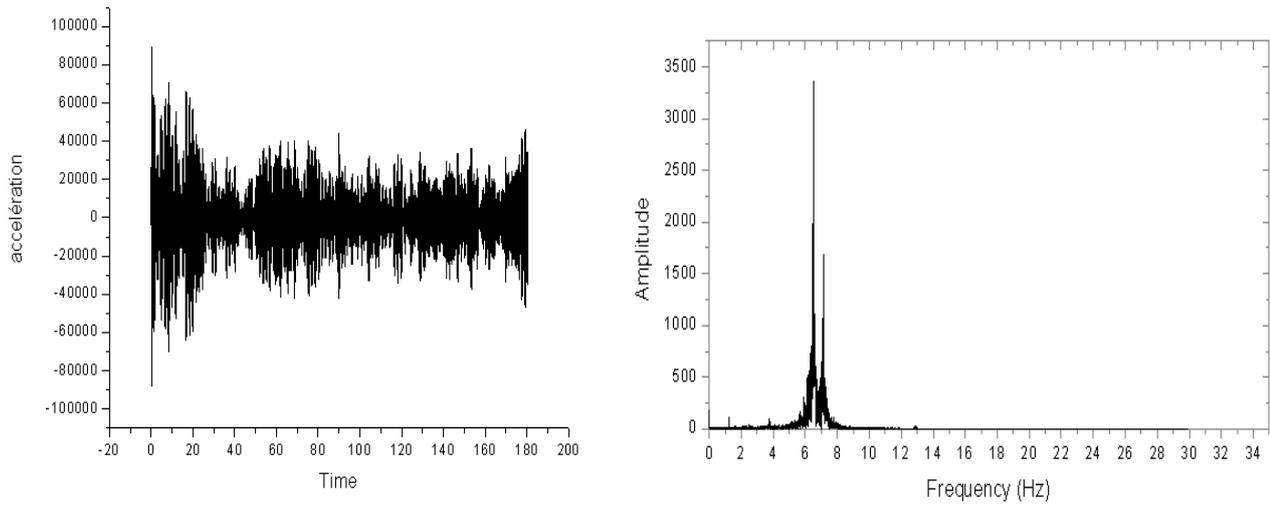
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



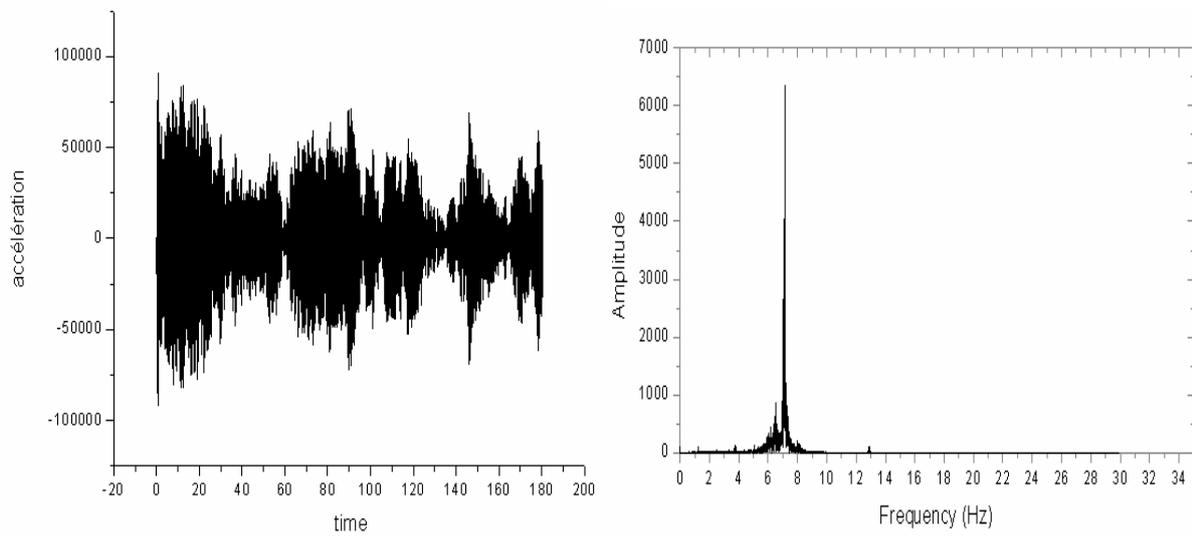
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 28cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



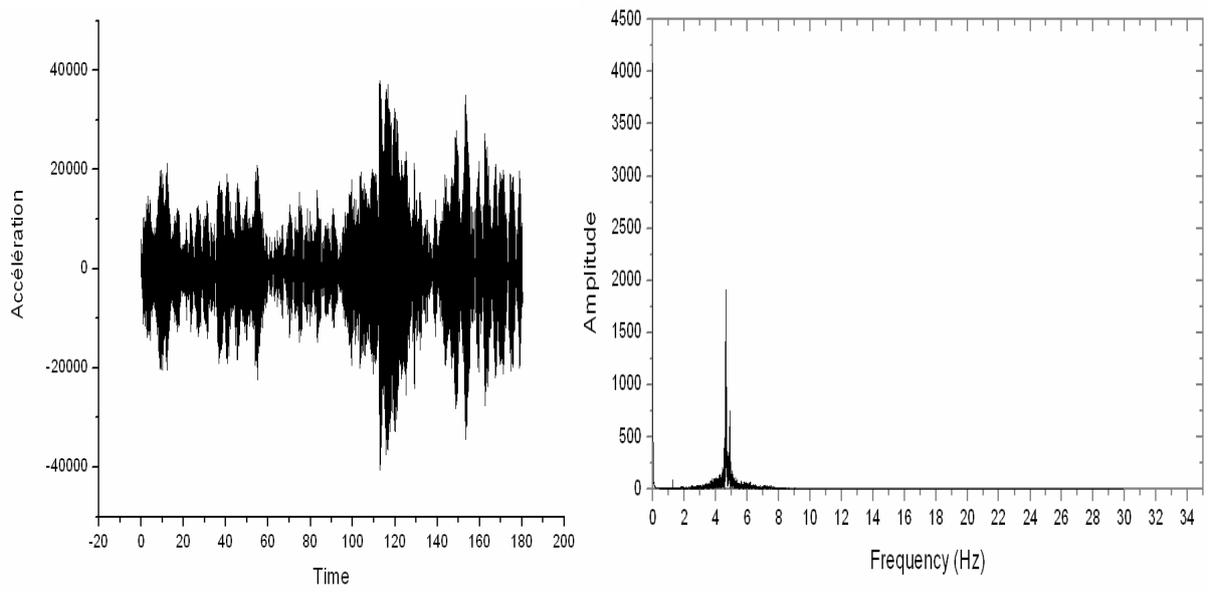
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



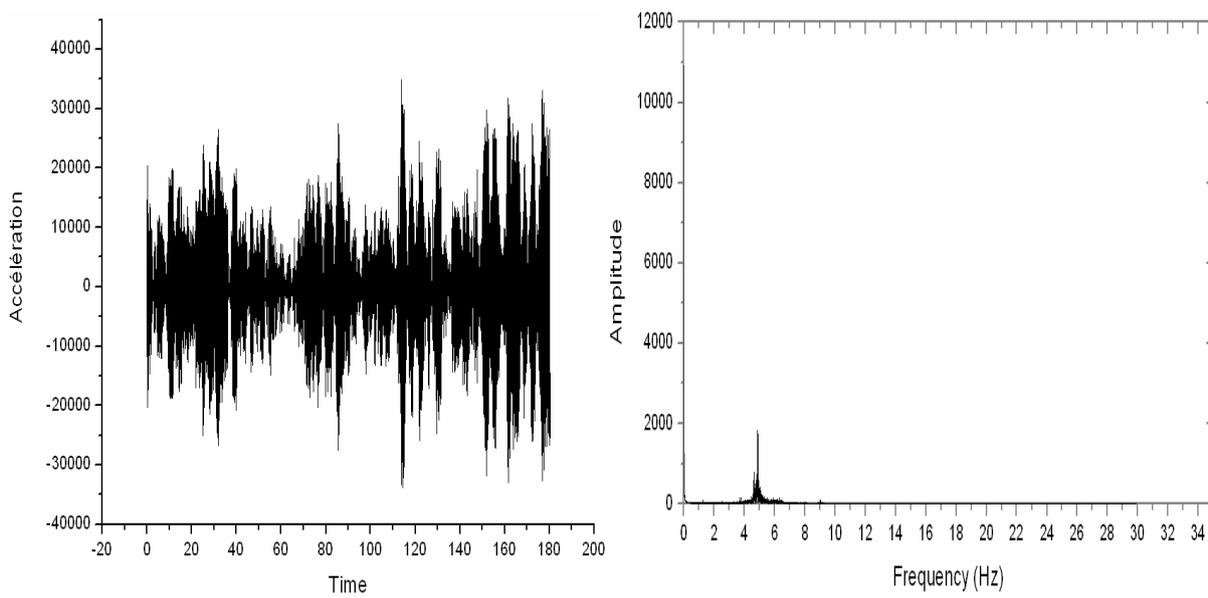
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 28cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



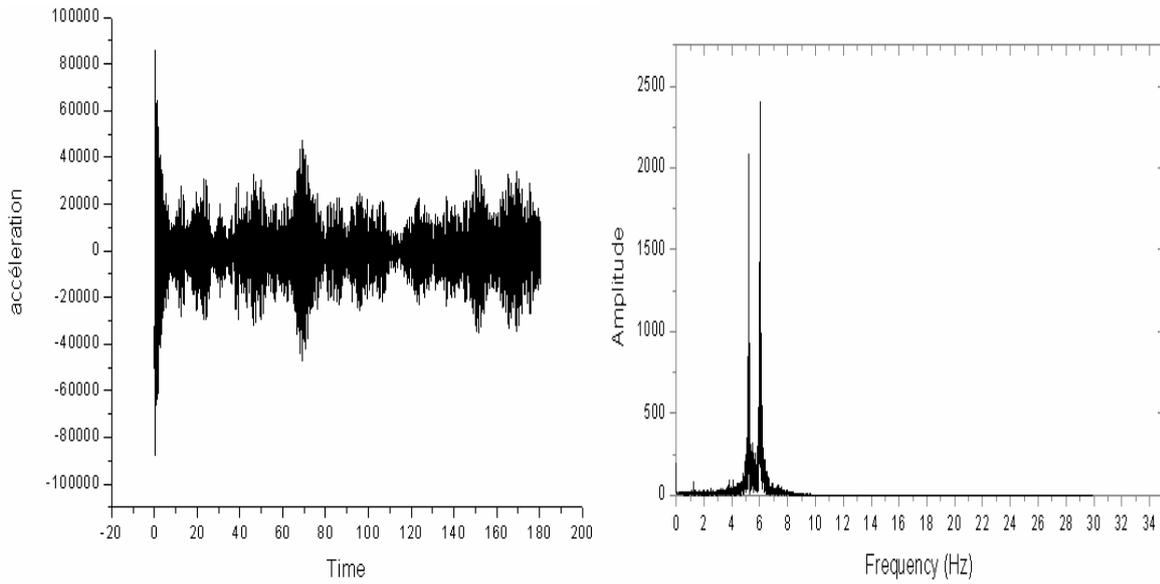
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



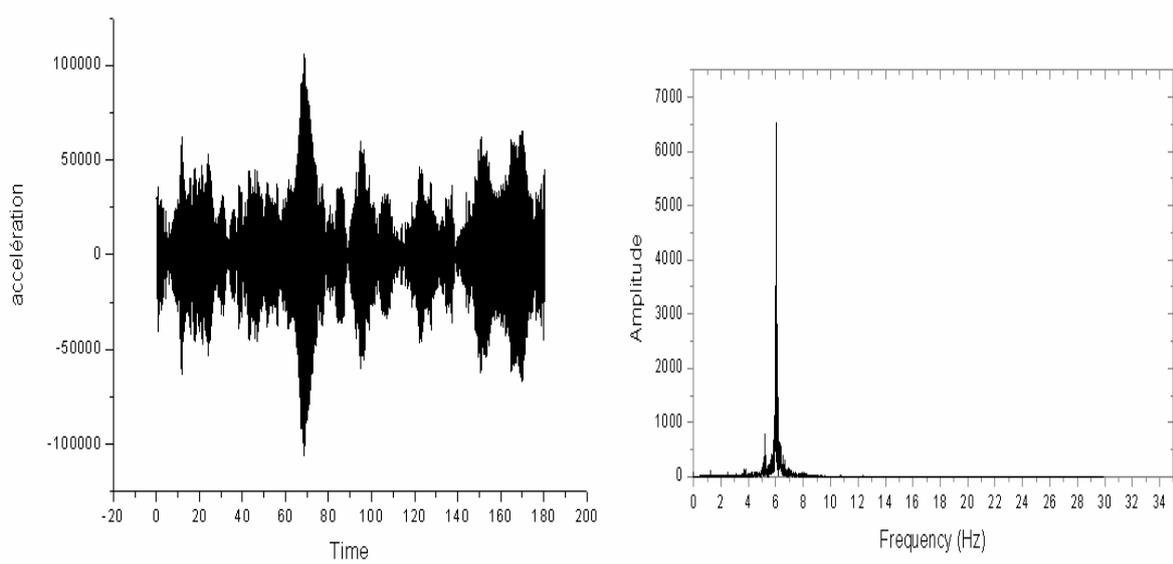
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 31cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



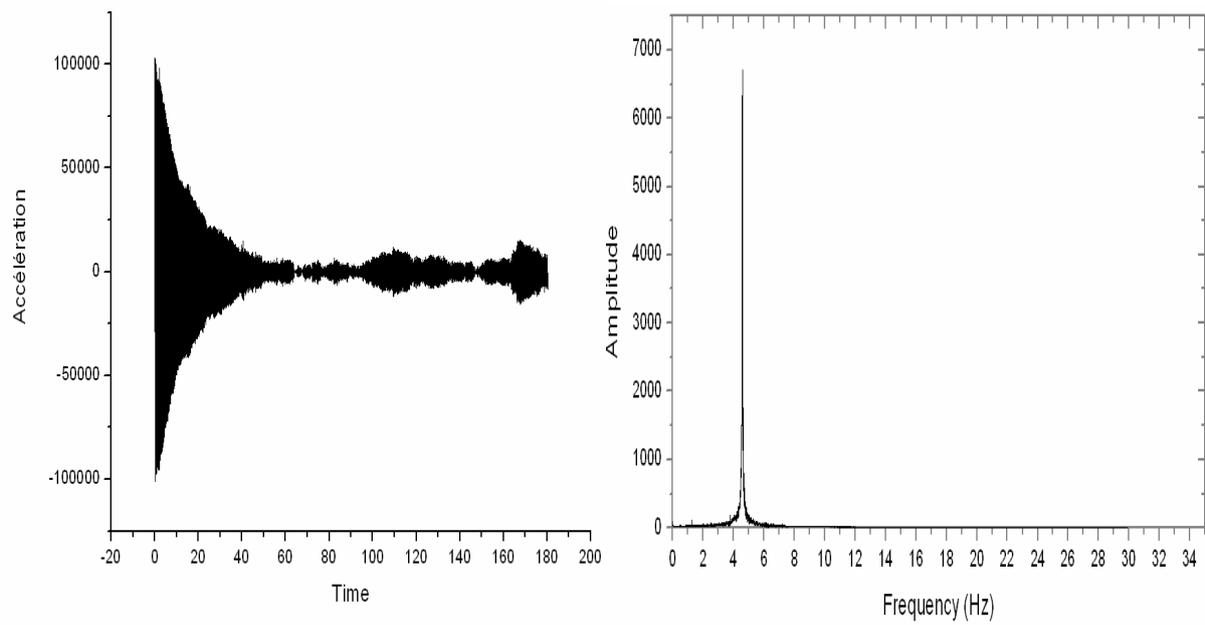
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



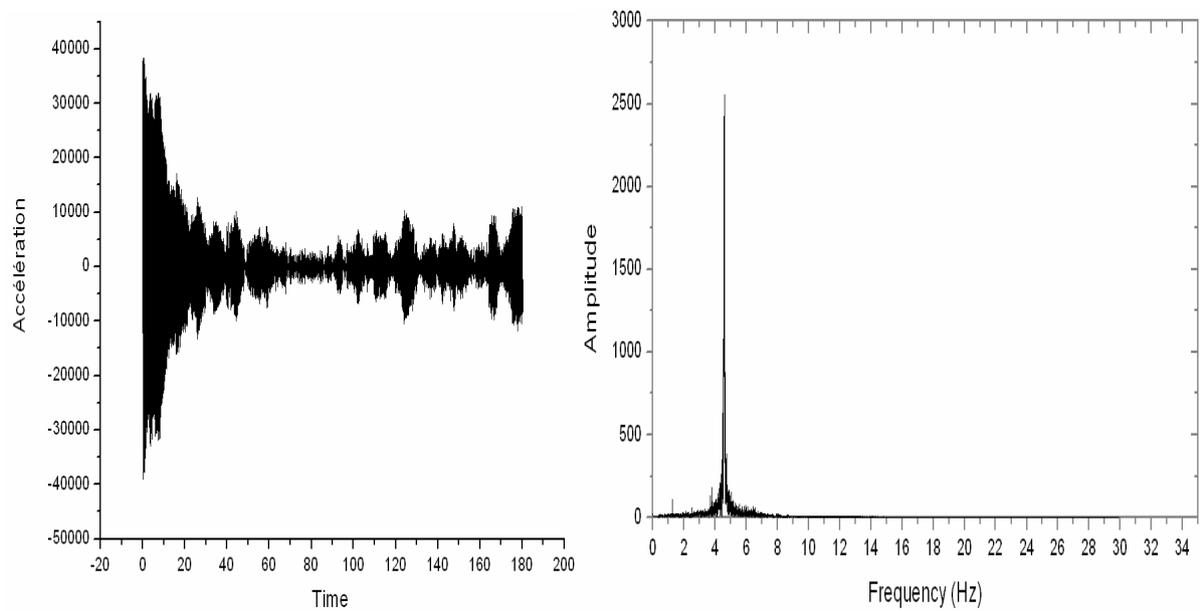
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 31cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



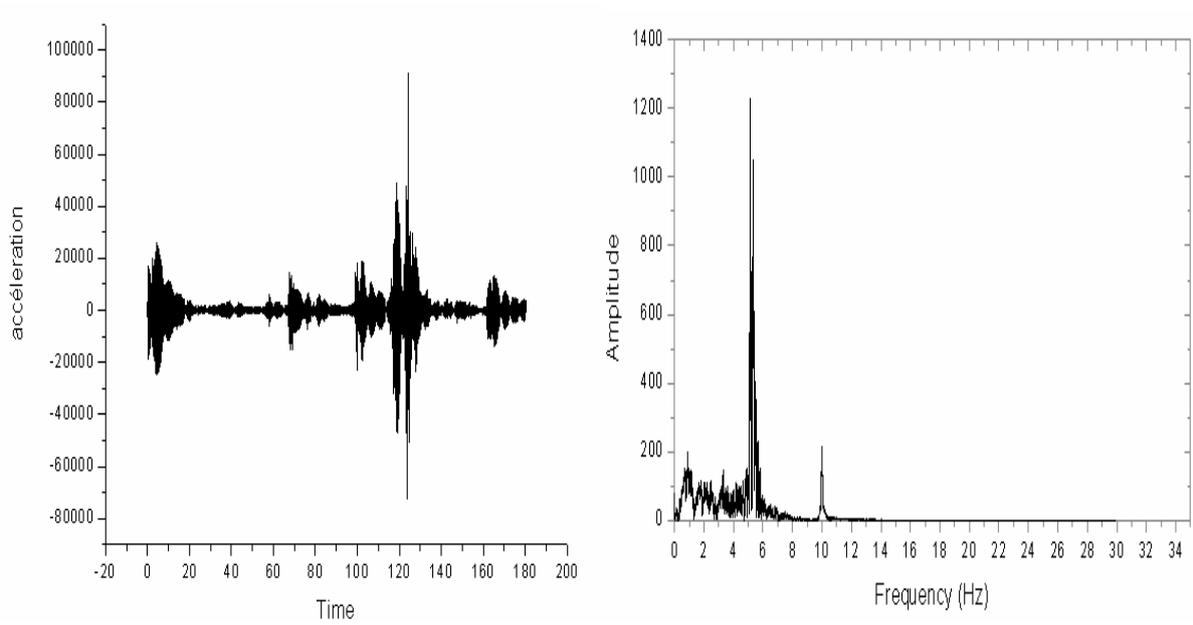
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



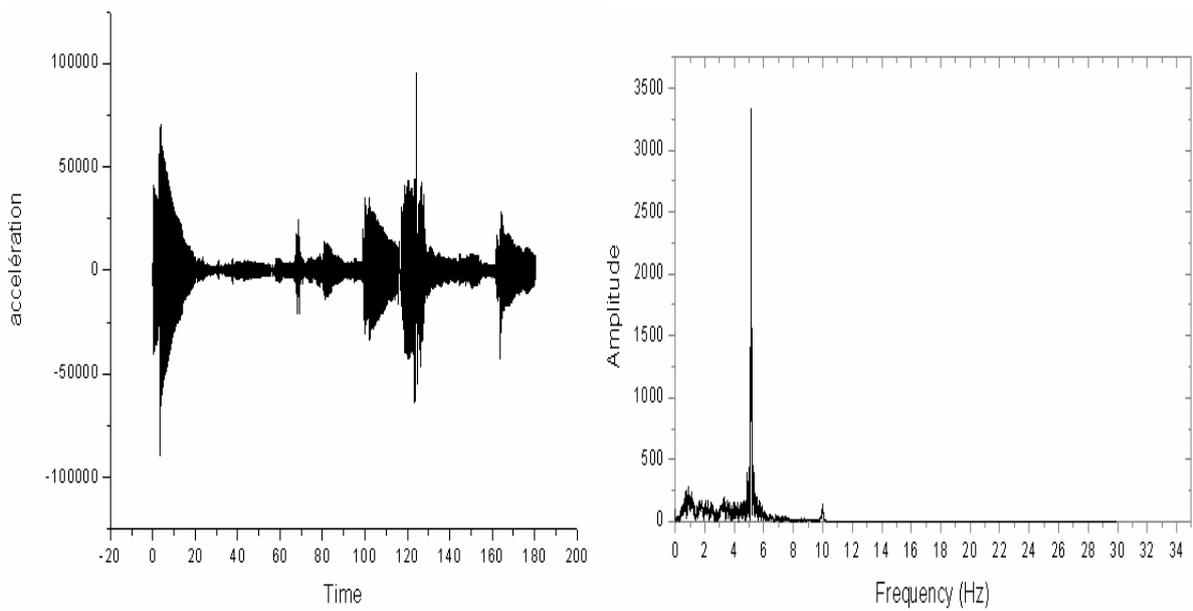
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 34cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



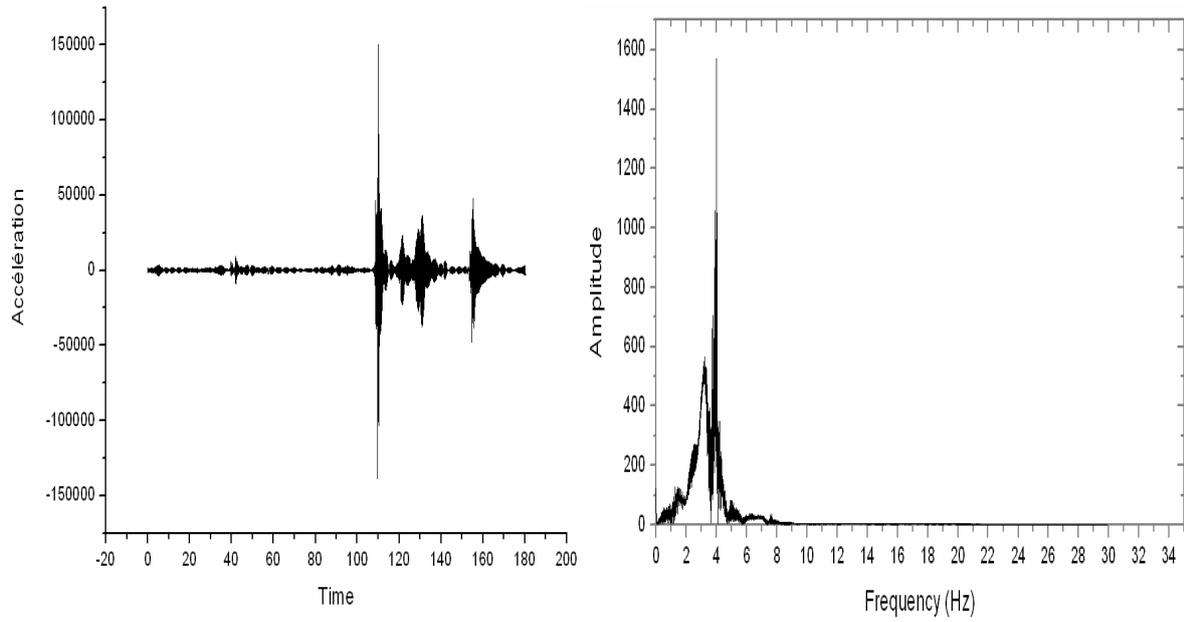
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



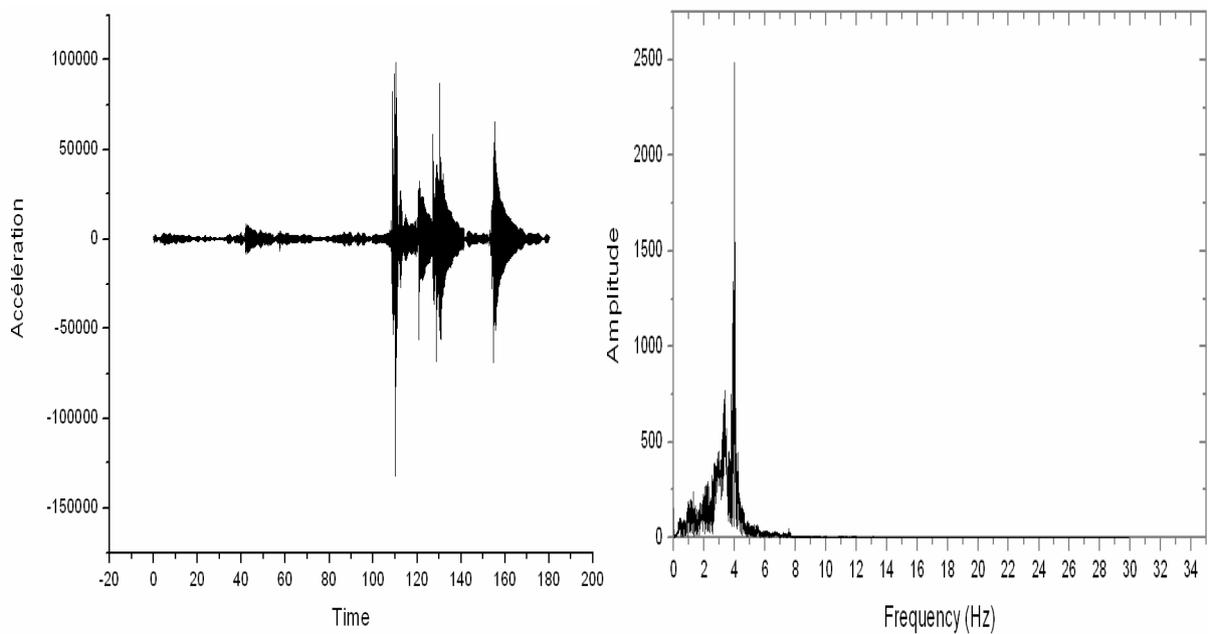
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 34cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



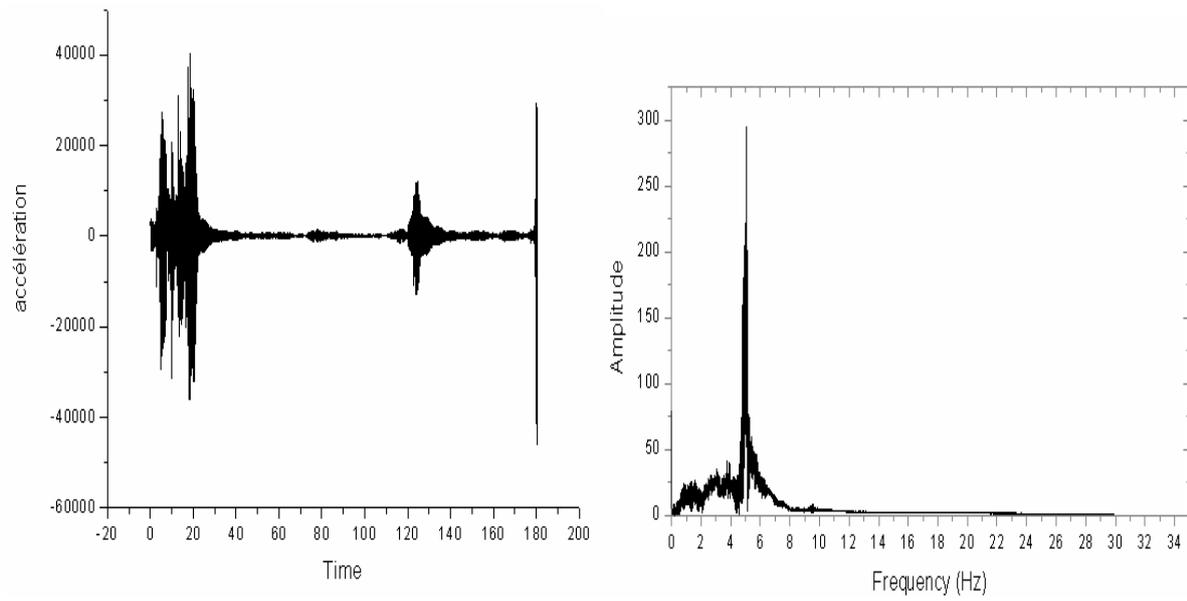
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



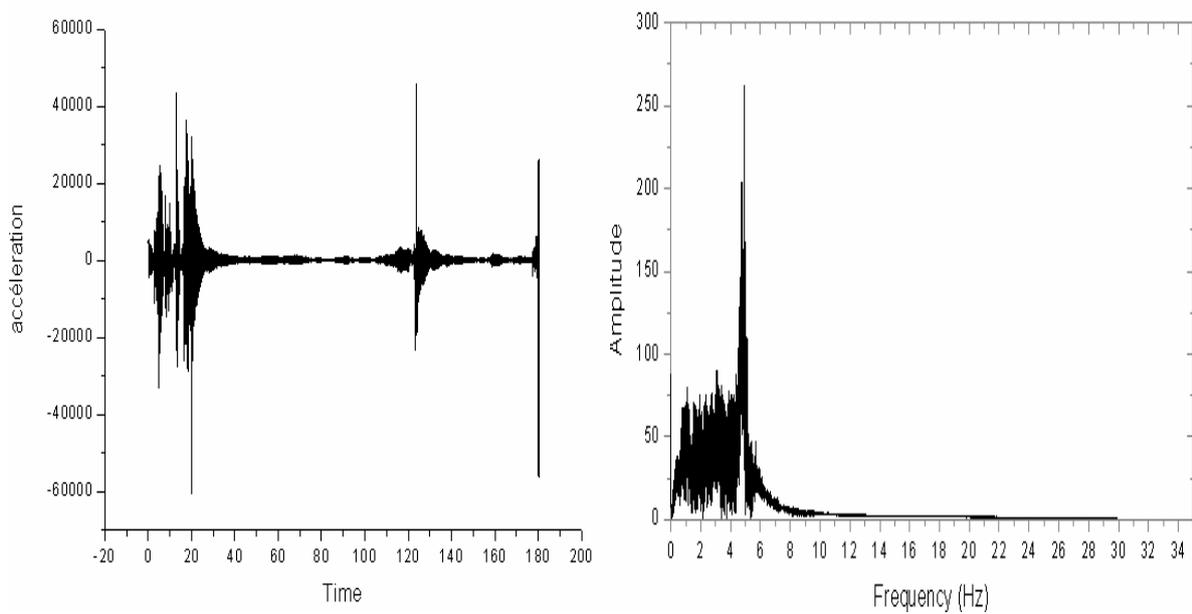
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 37cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



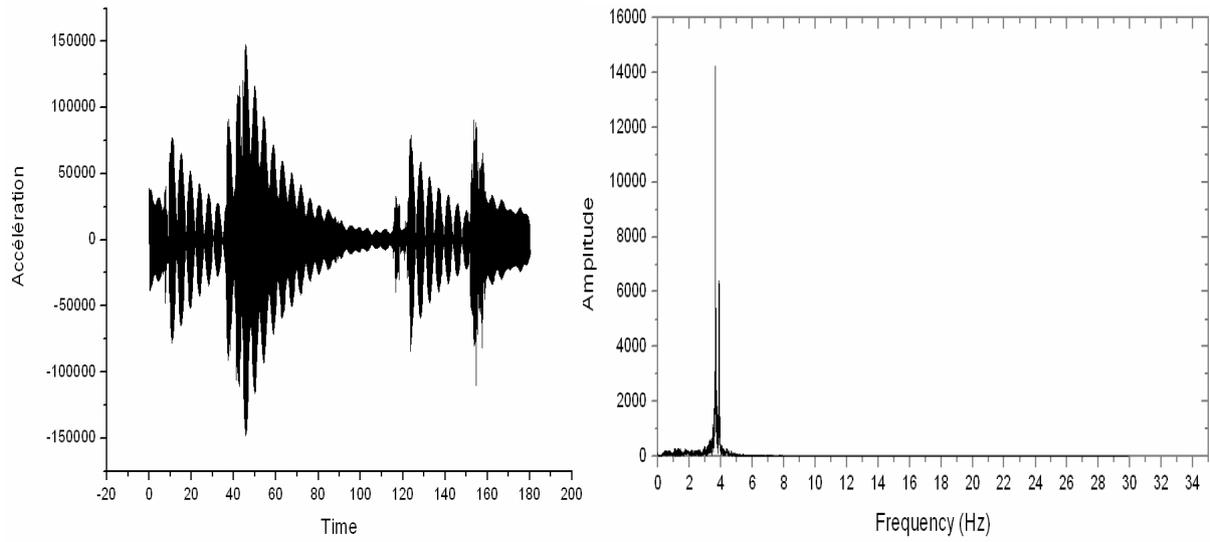
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



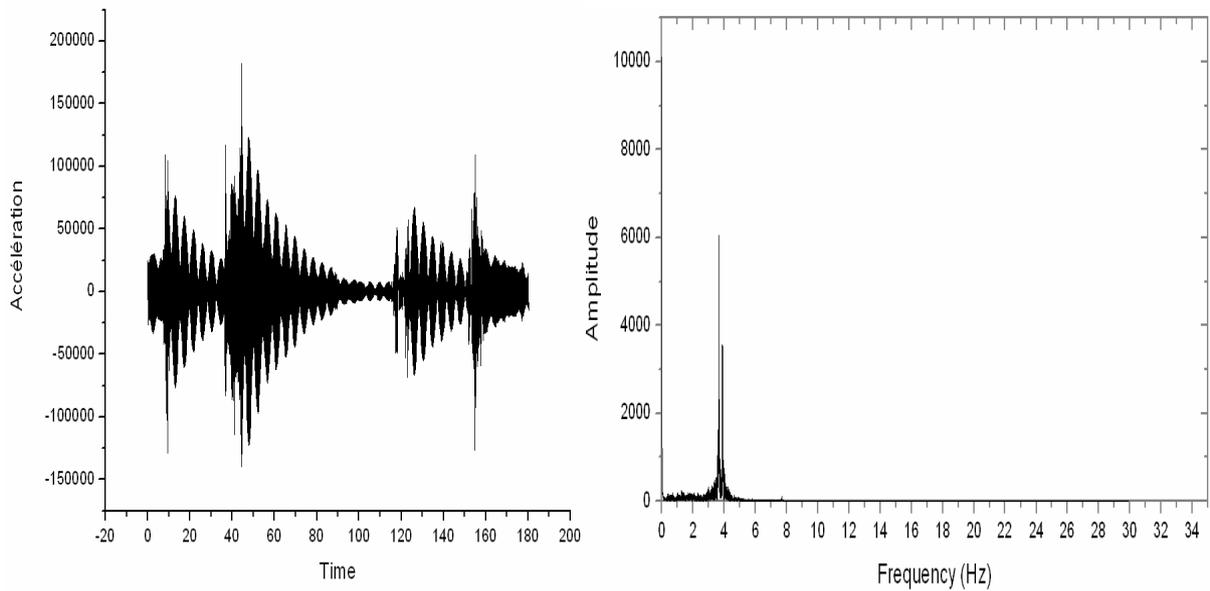
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 37cm pour une durée d'essai de 3 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



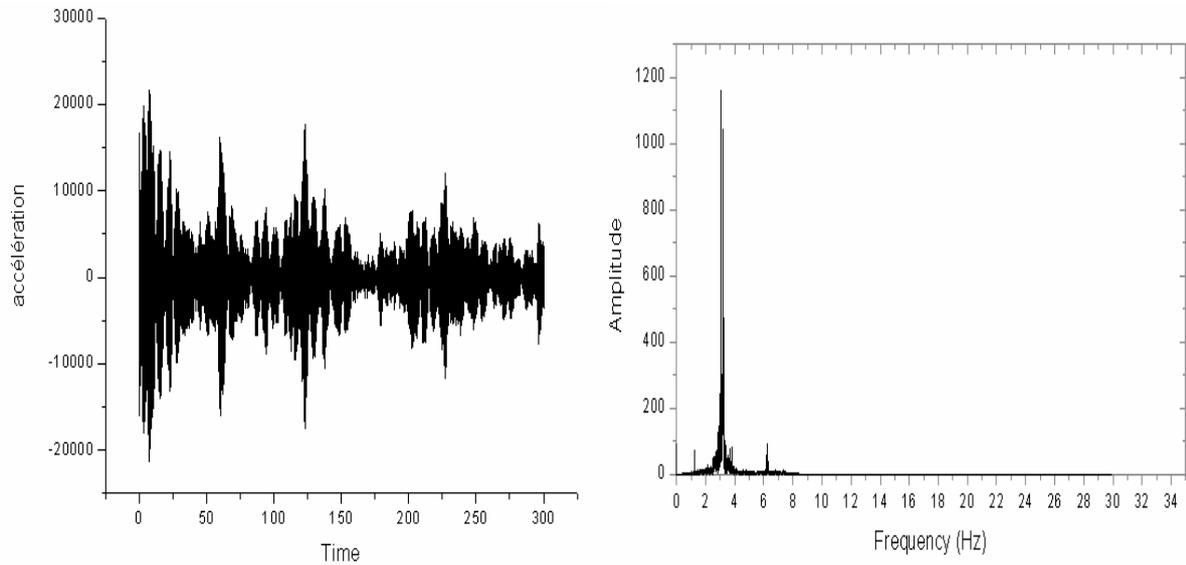
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



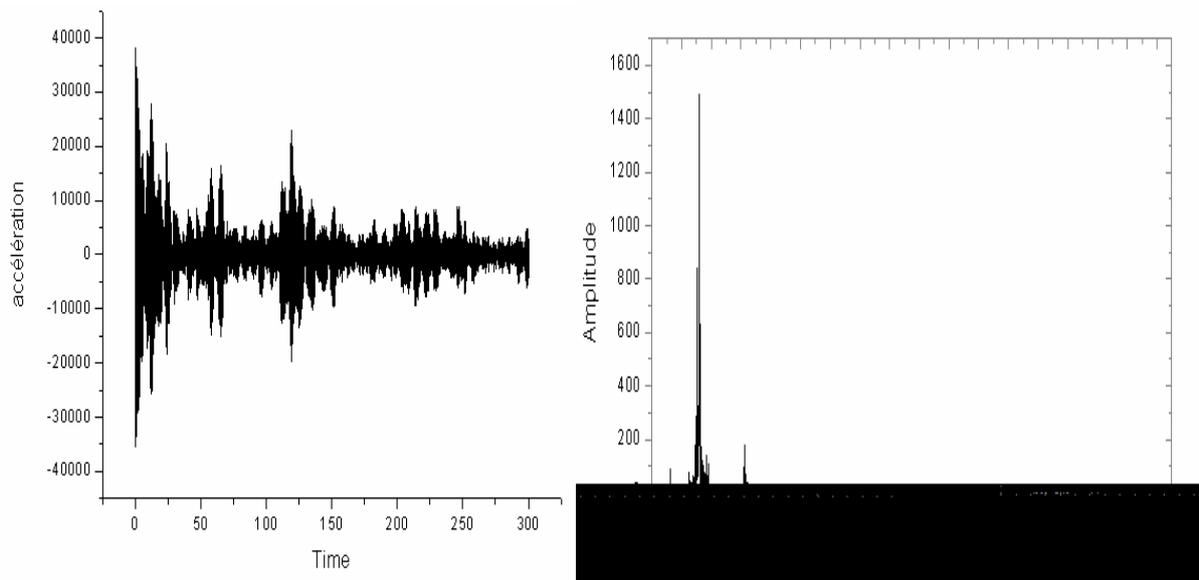
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 40cm pour une durée d'essai de 5 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



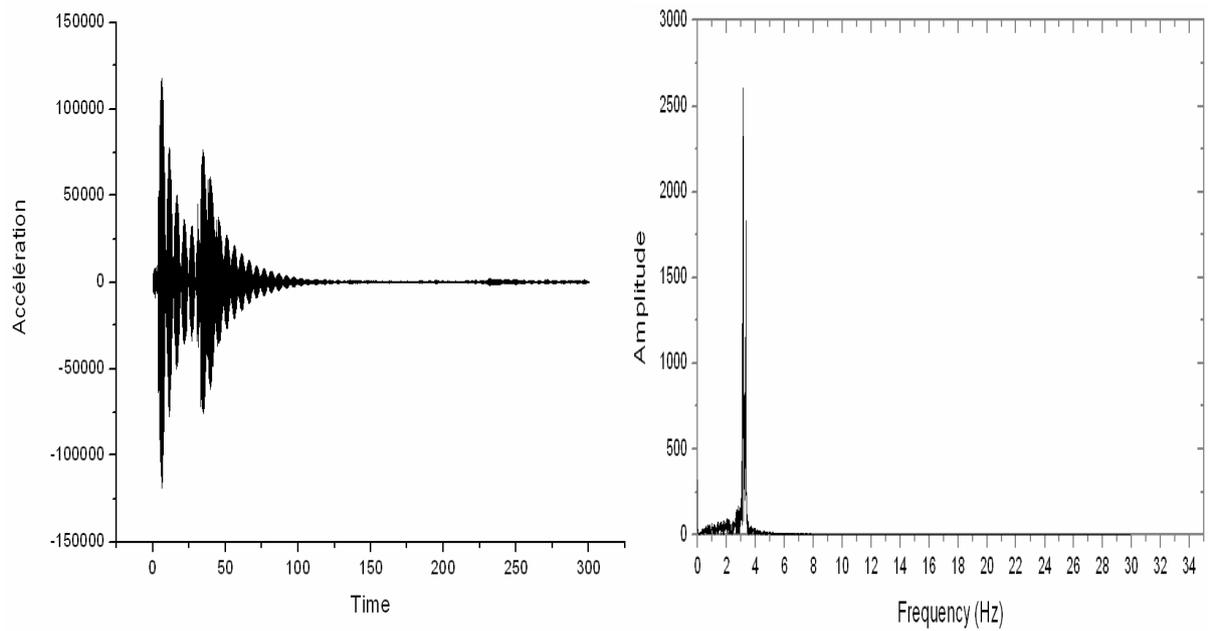
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



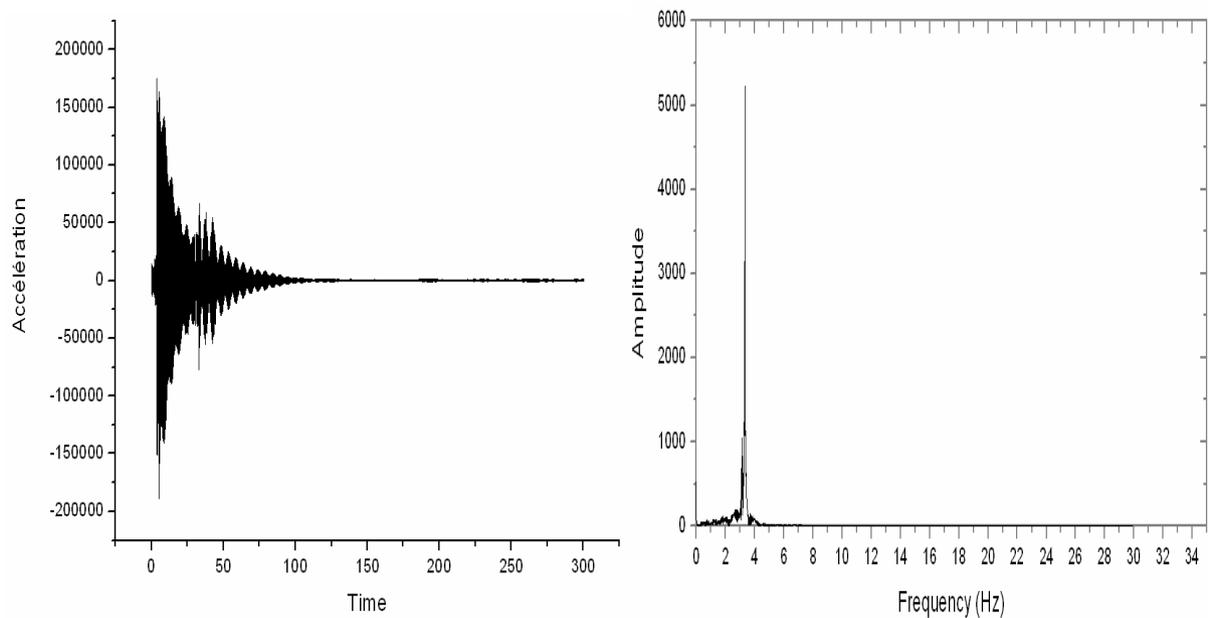
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 40cm pour une durée d'essai de 5 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



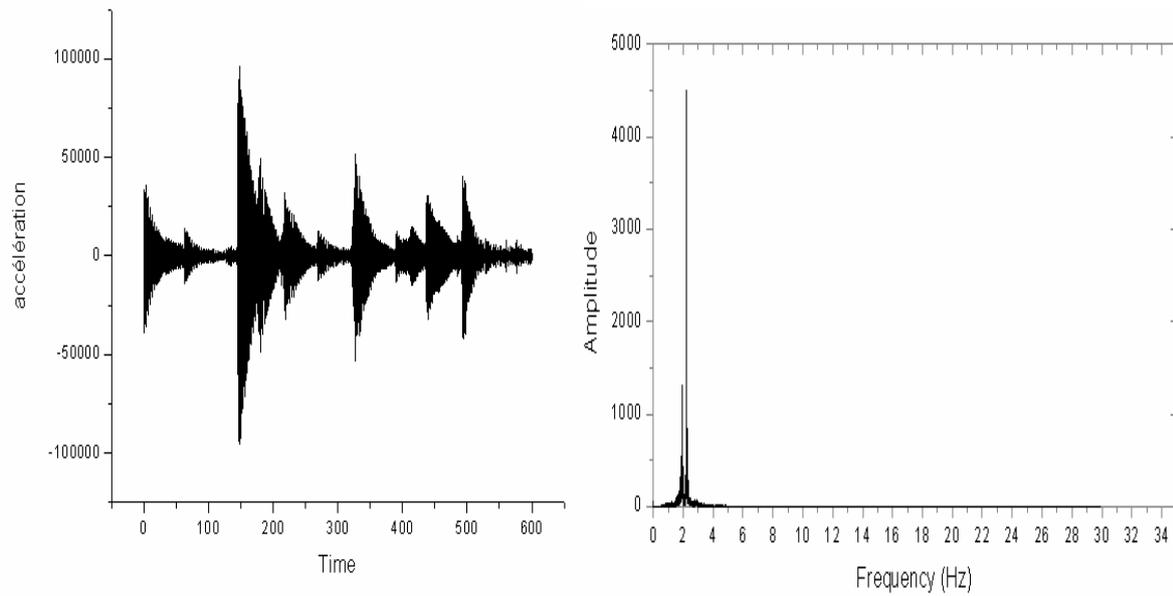
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



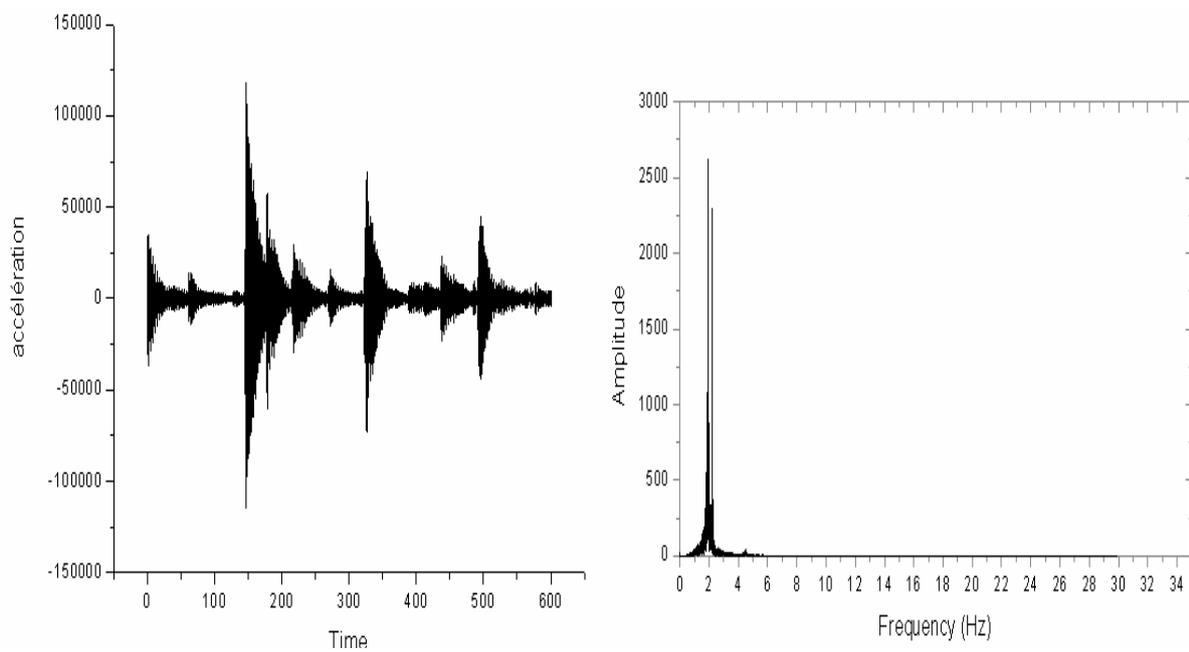
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 49cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



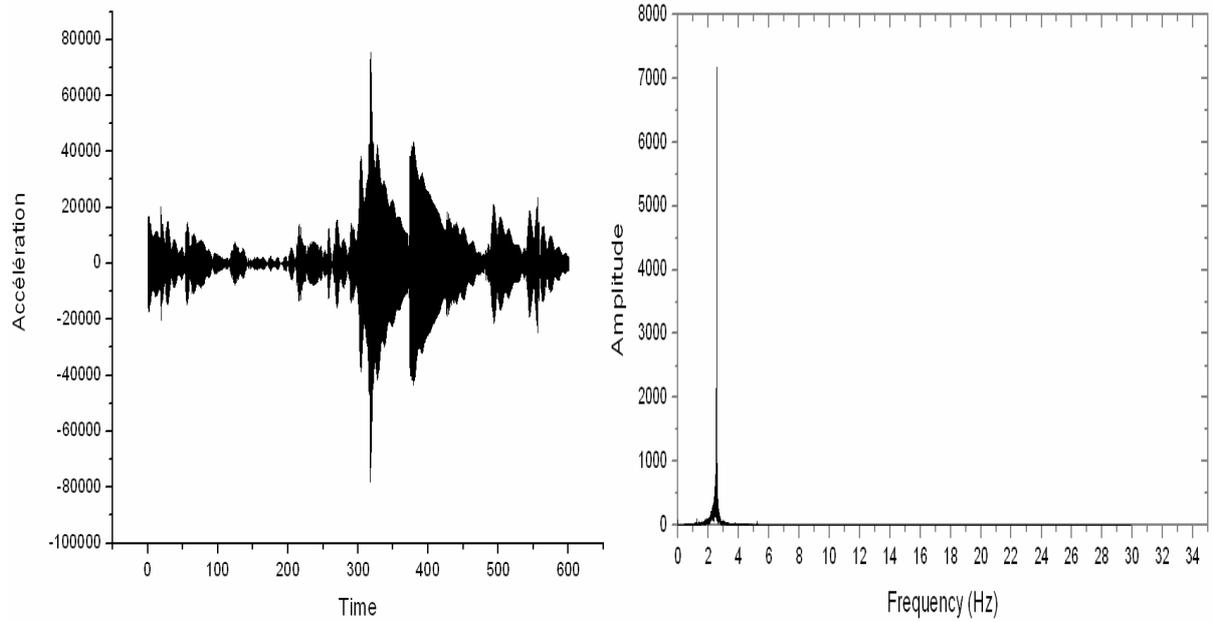
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



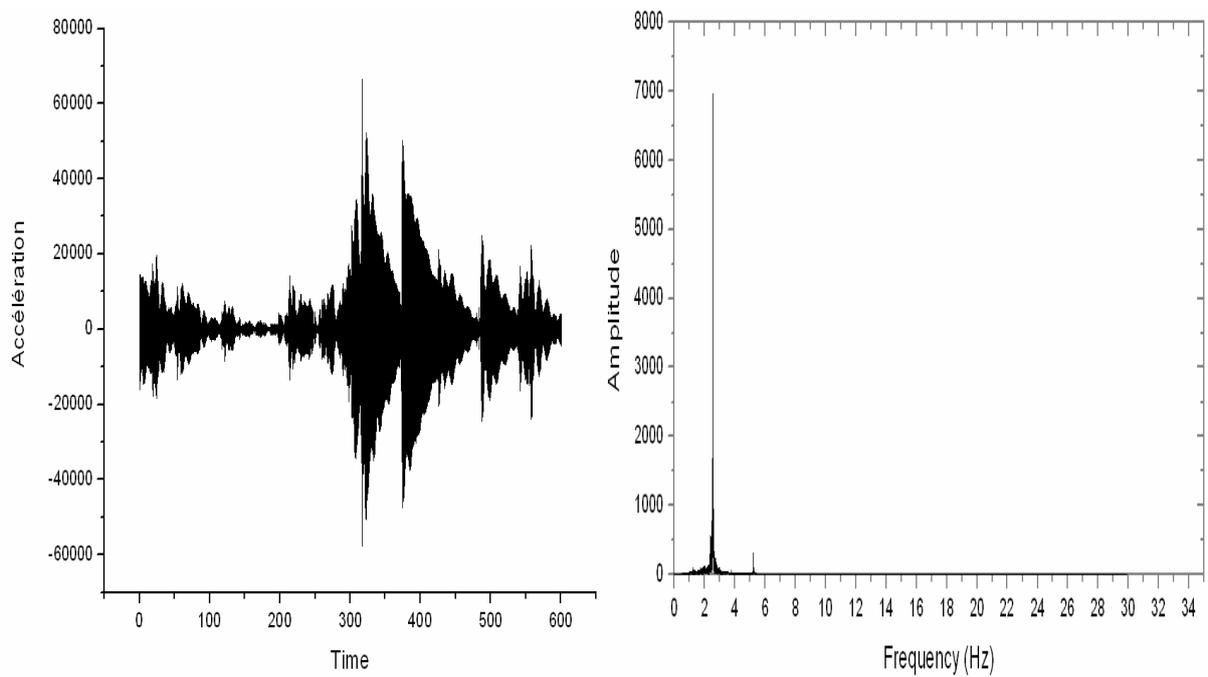
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 49cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



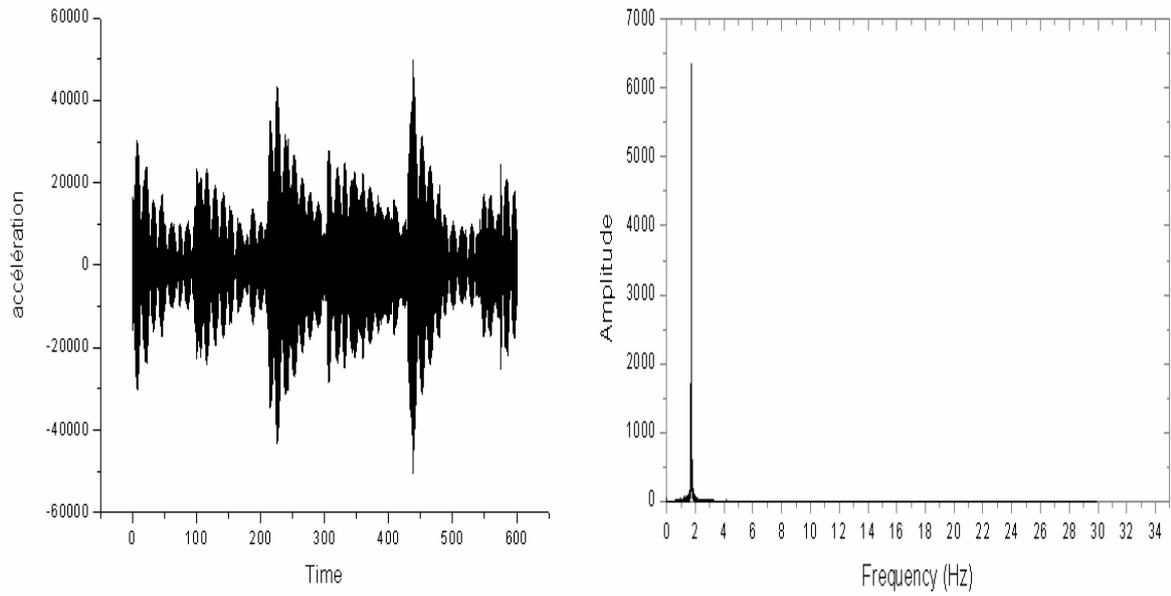
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



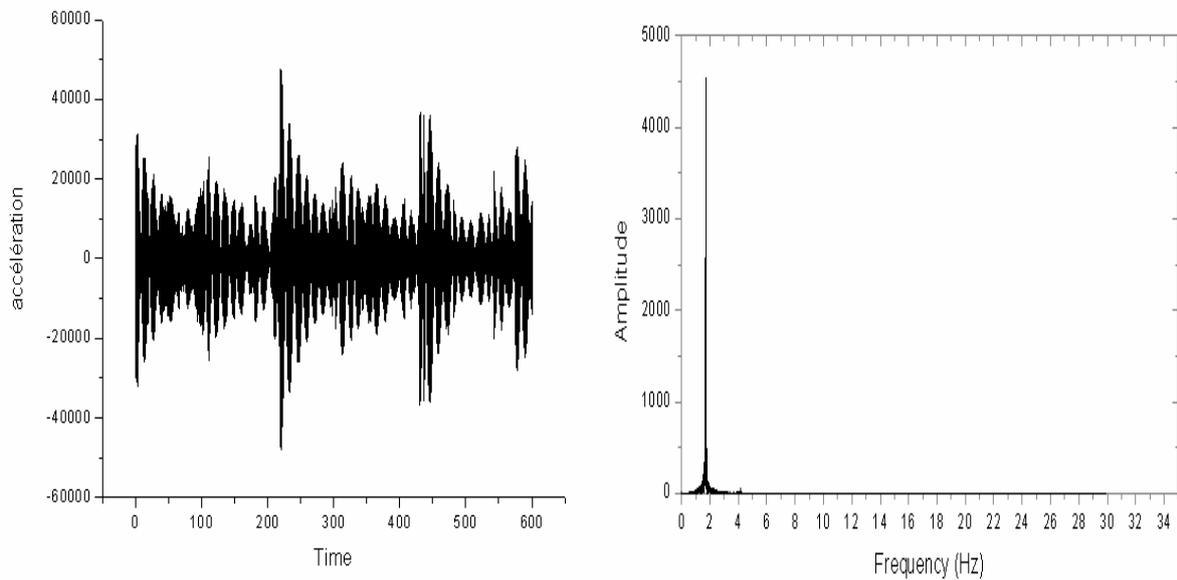
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 53cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



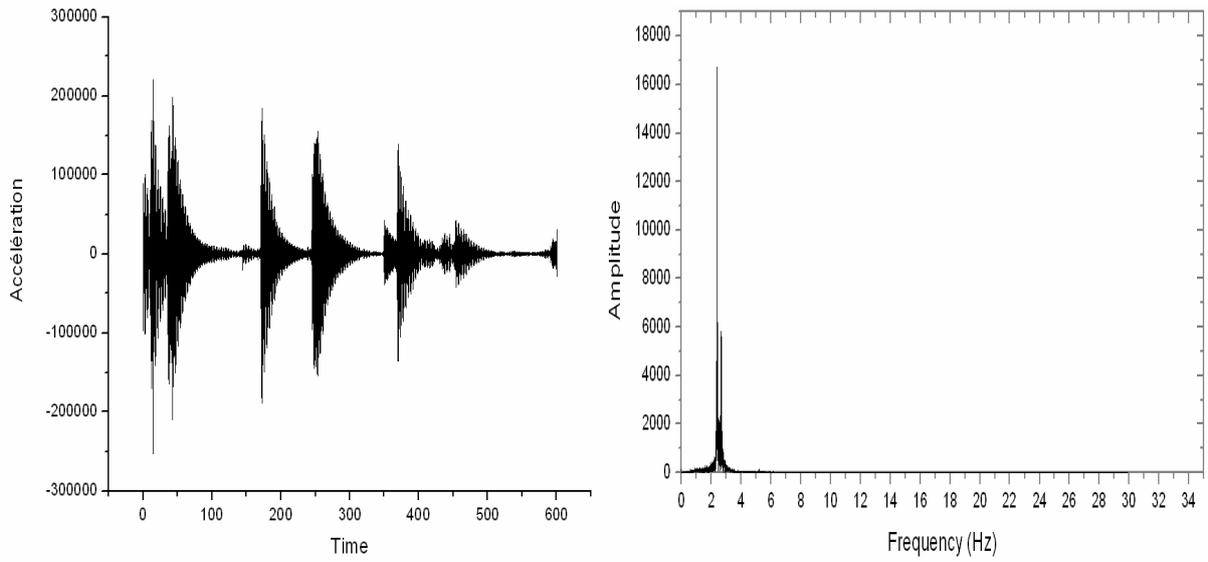
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



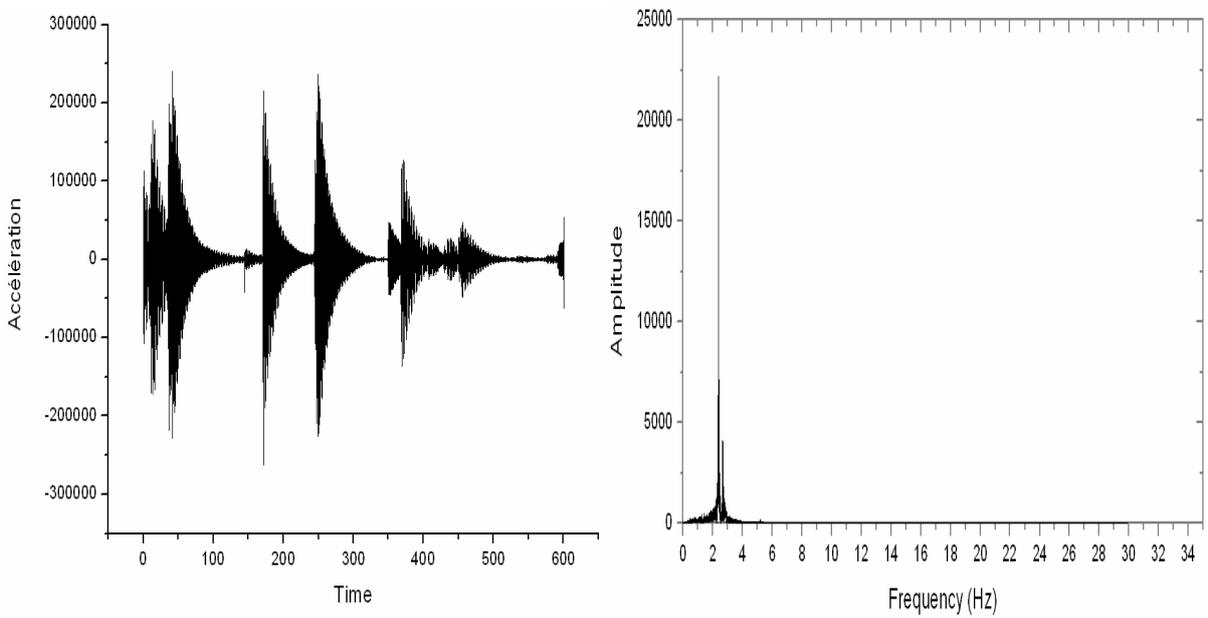
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 53cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



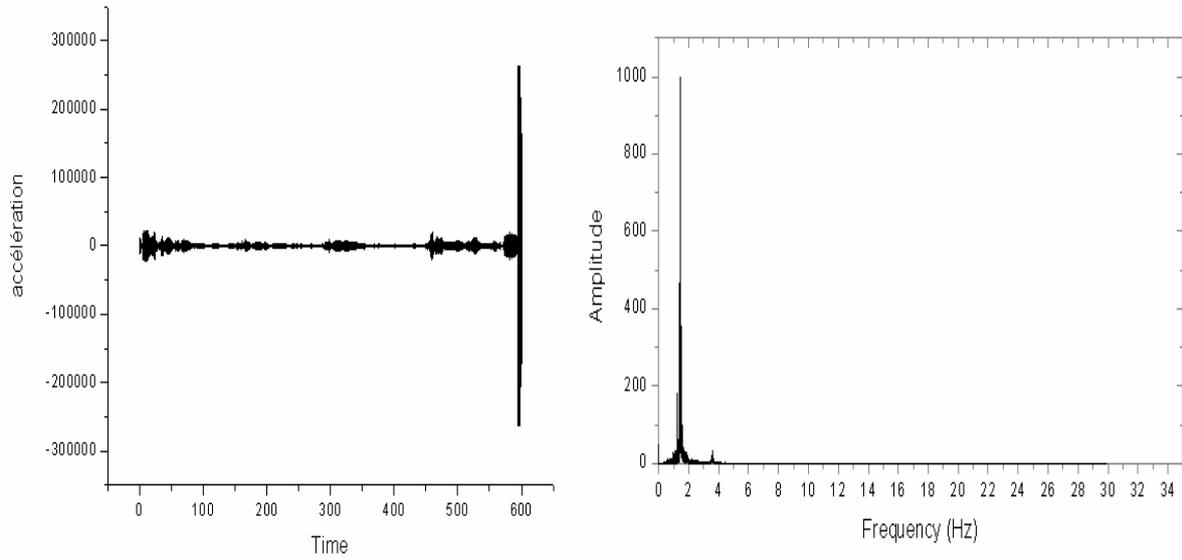
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



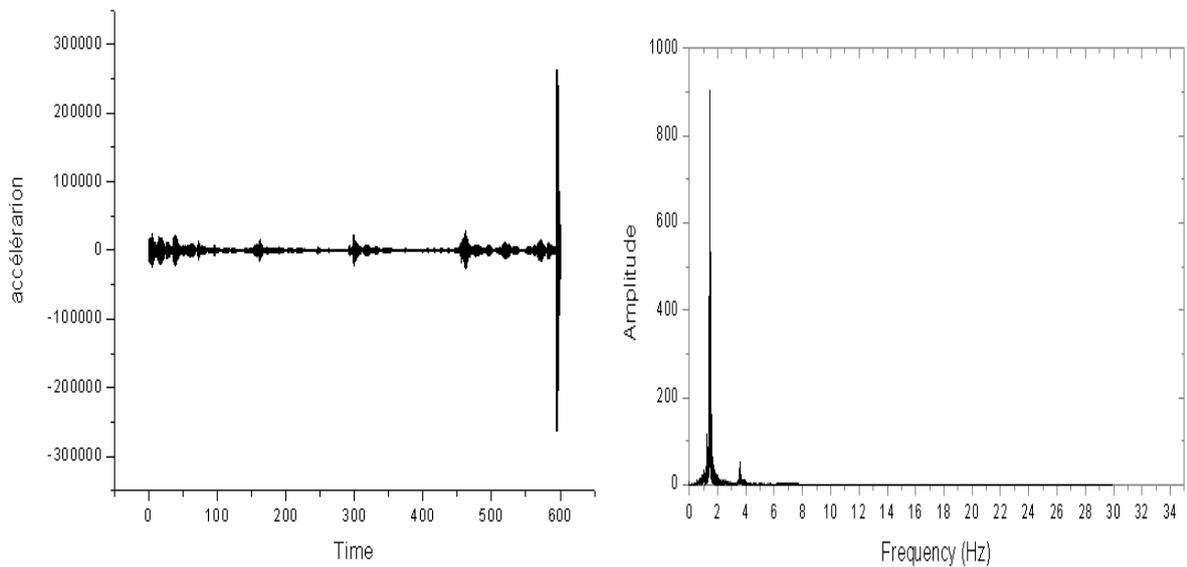
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 61cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



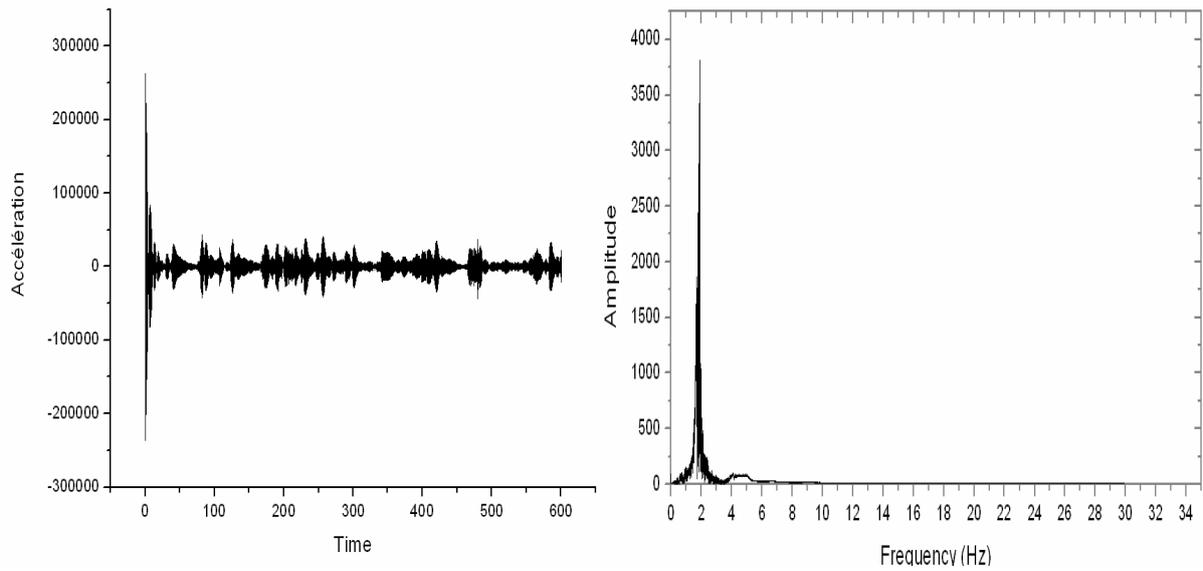
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



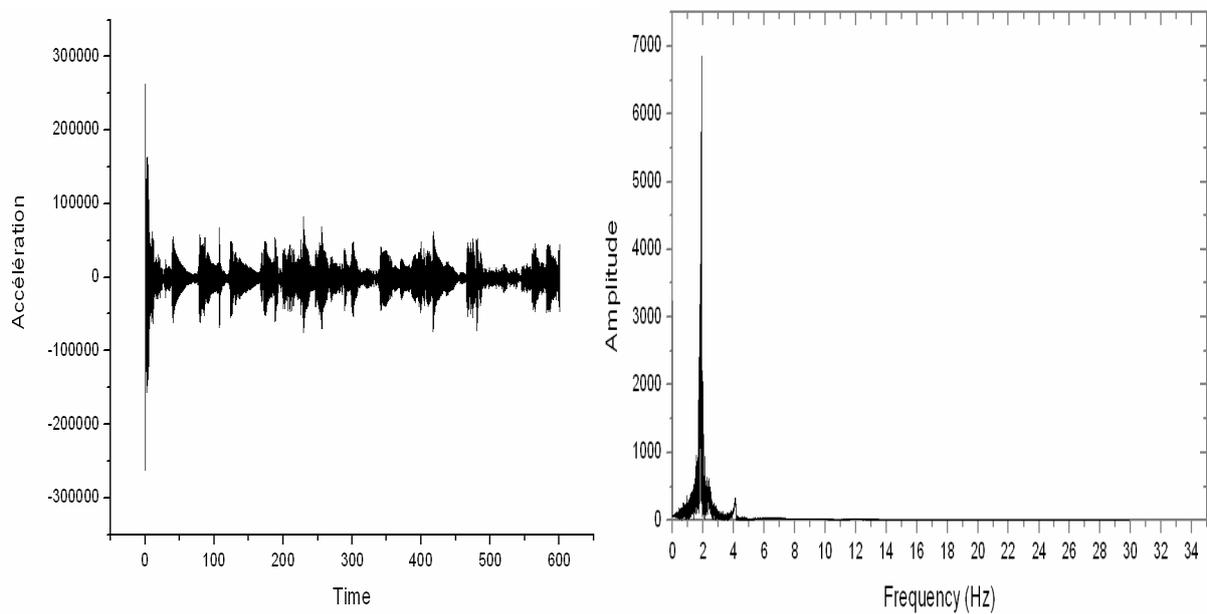
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 61cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



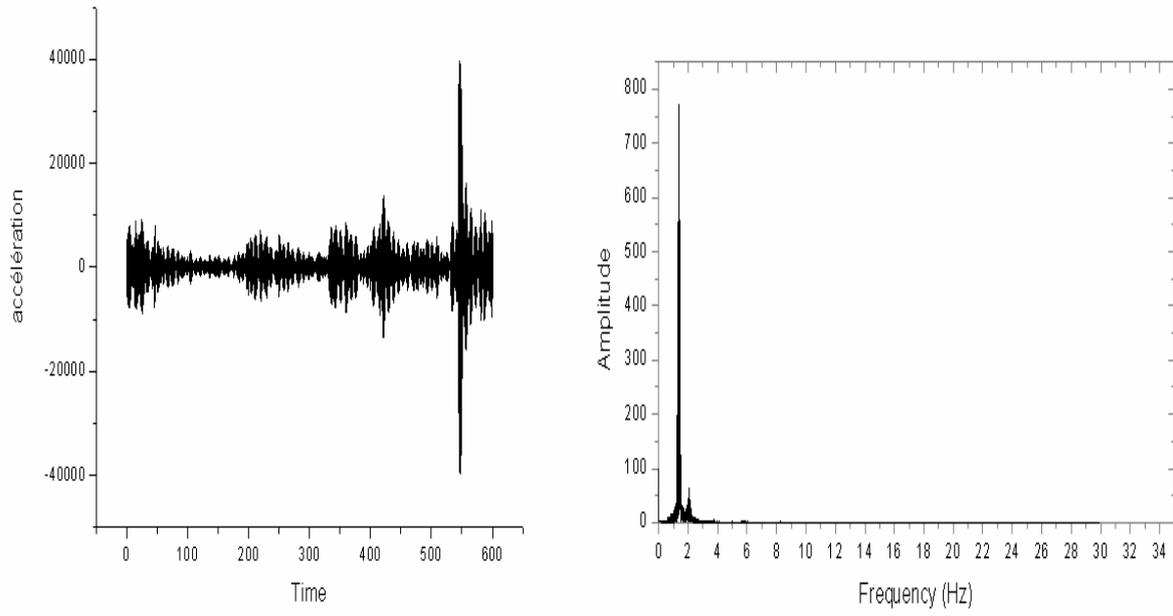
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



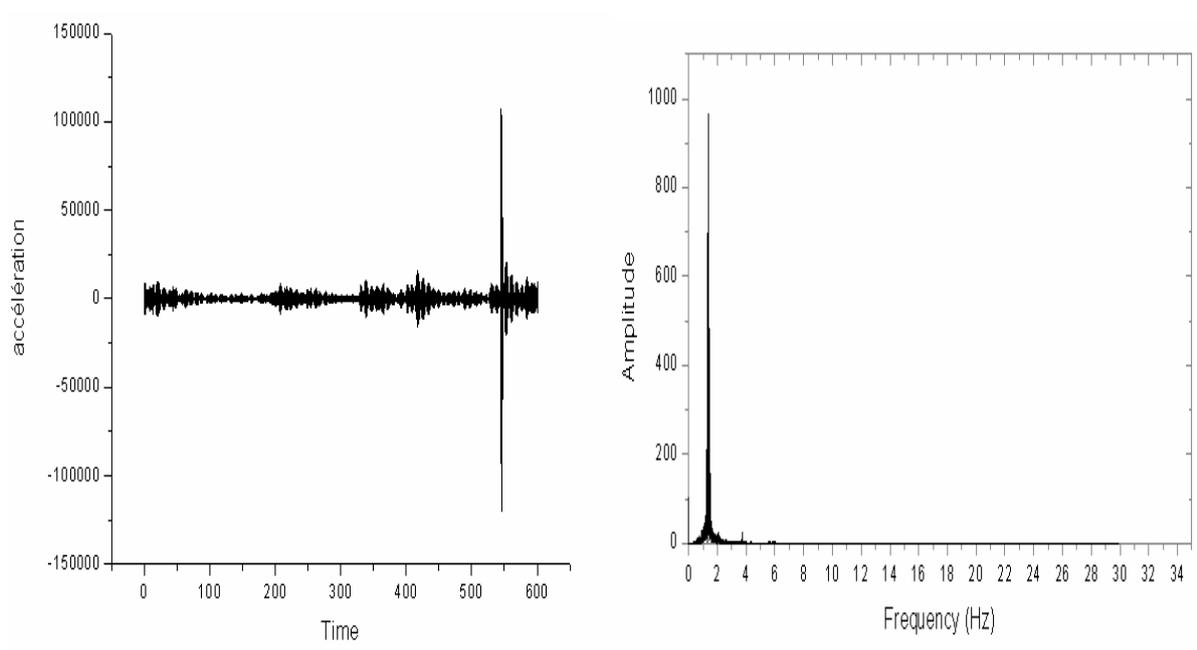
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 65cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



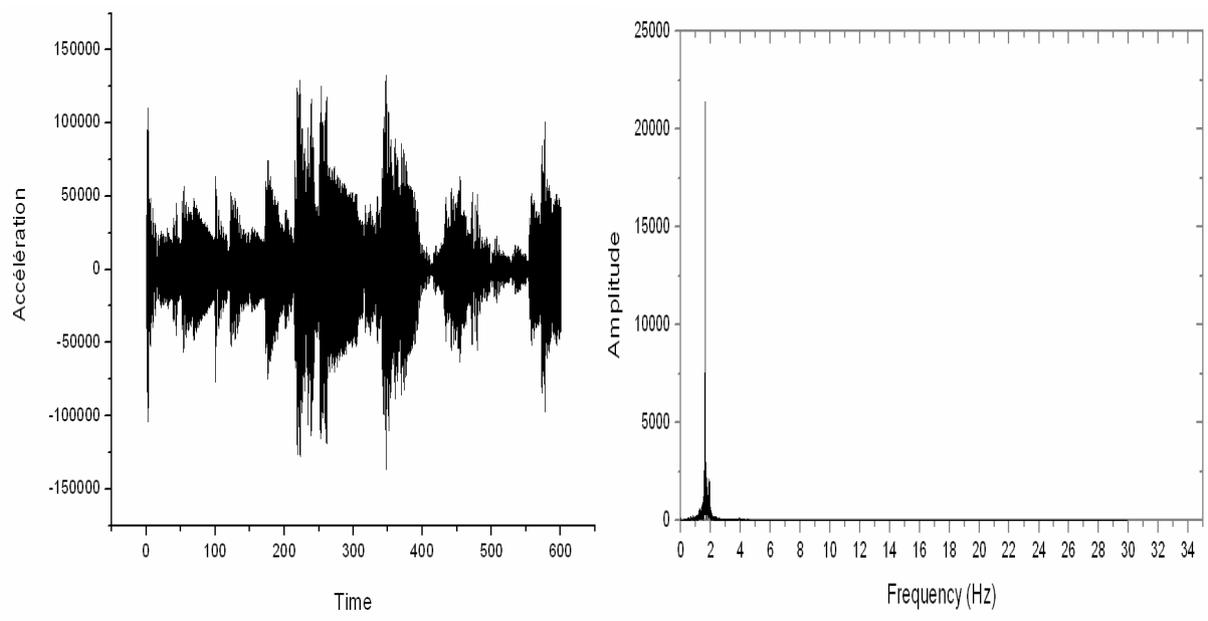
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



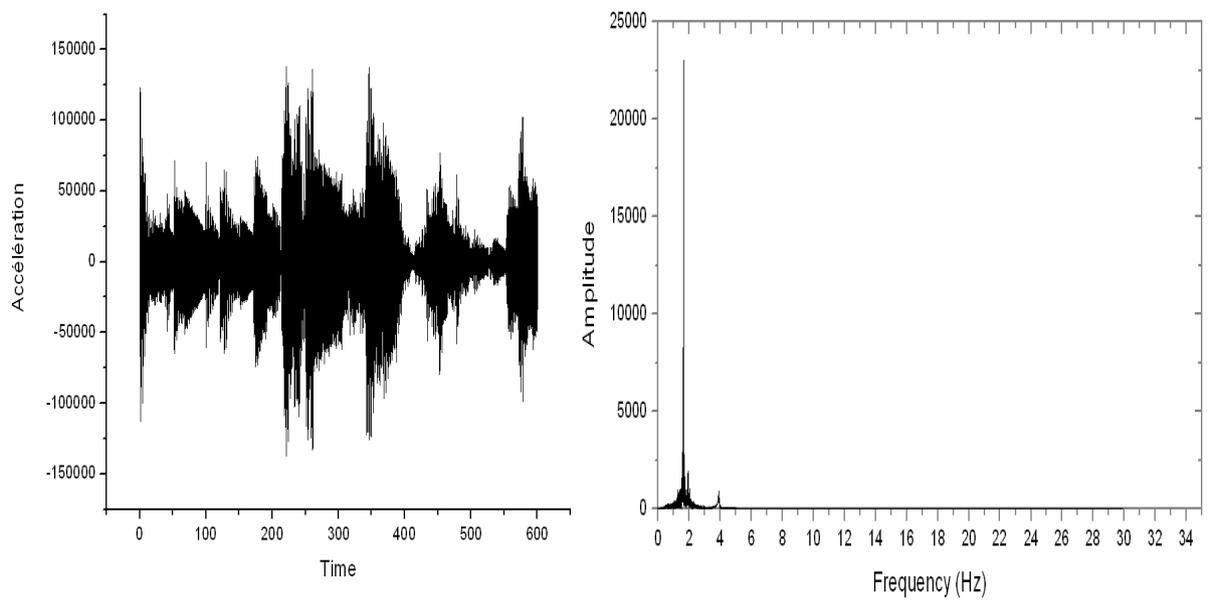
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 65cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



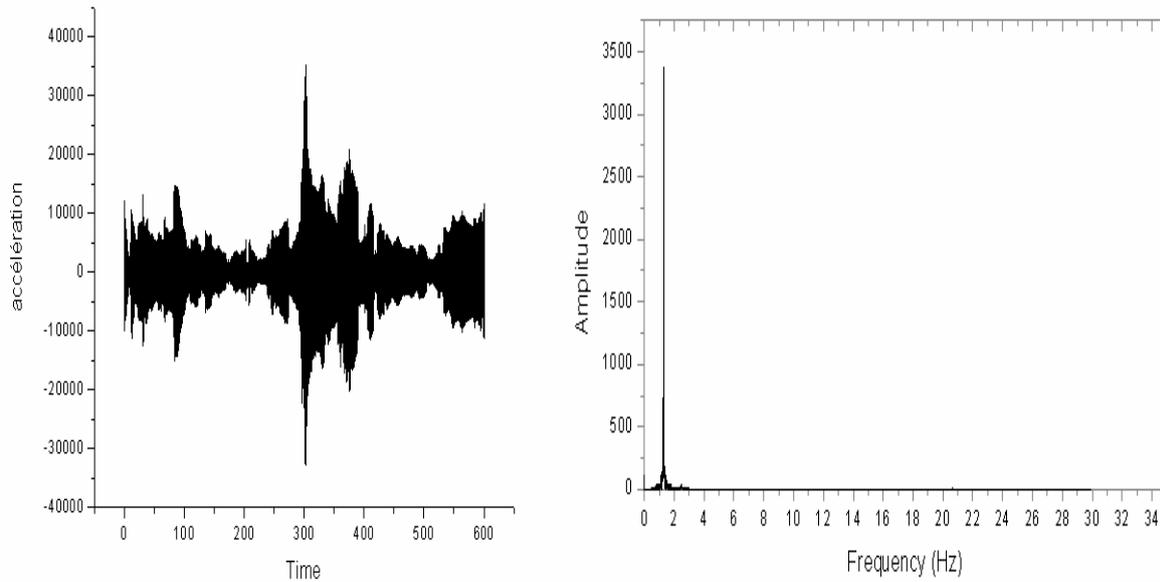
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



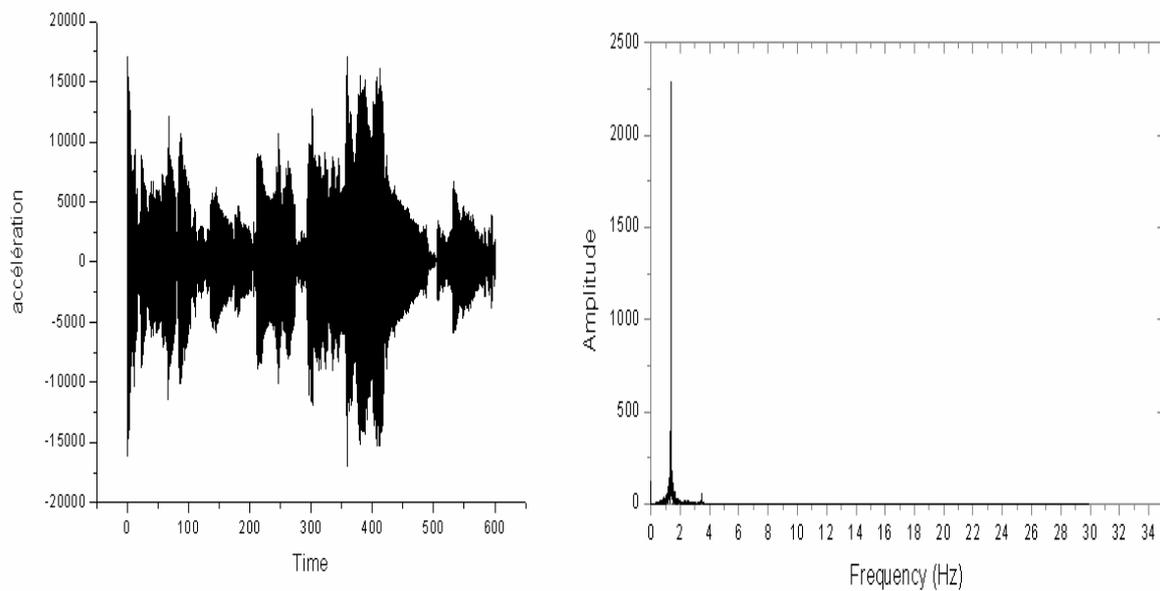
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 71cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



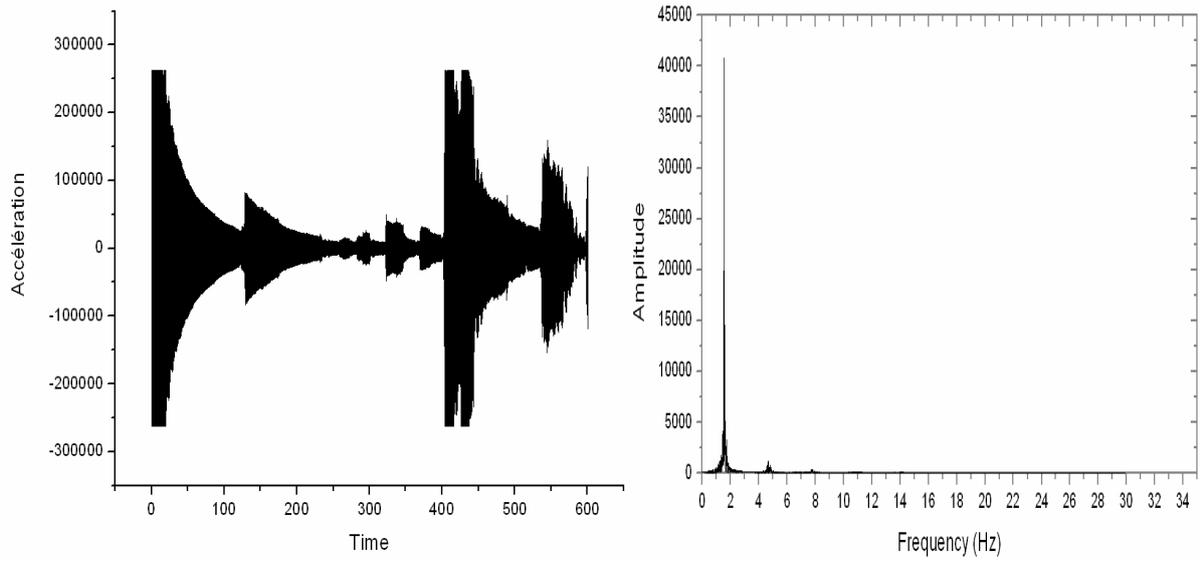
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



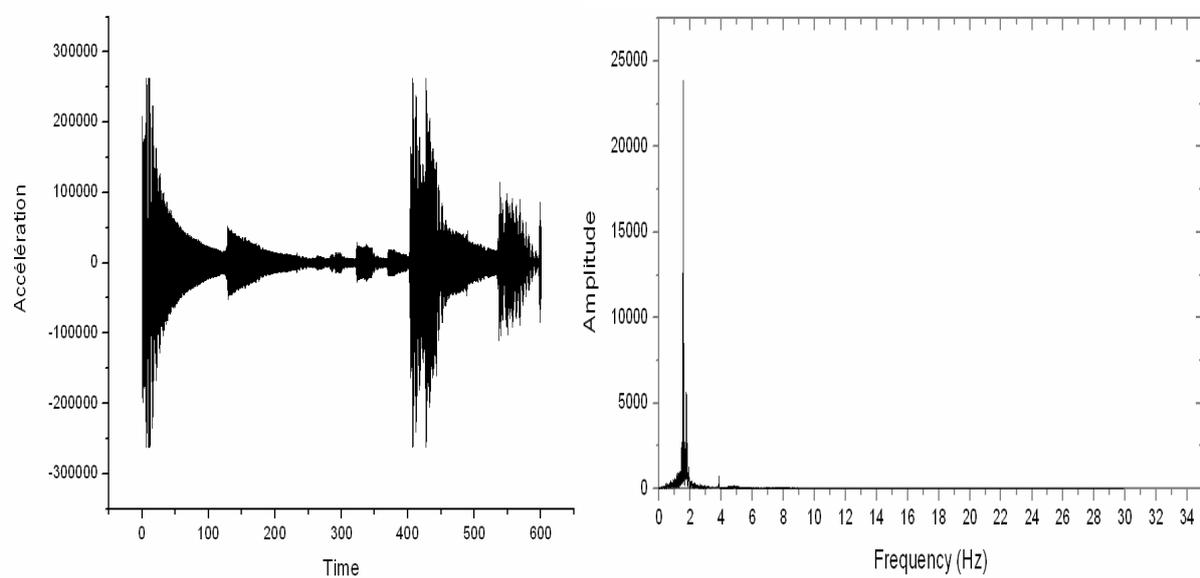
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 71cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe xx au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



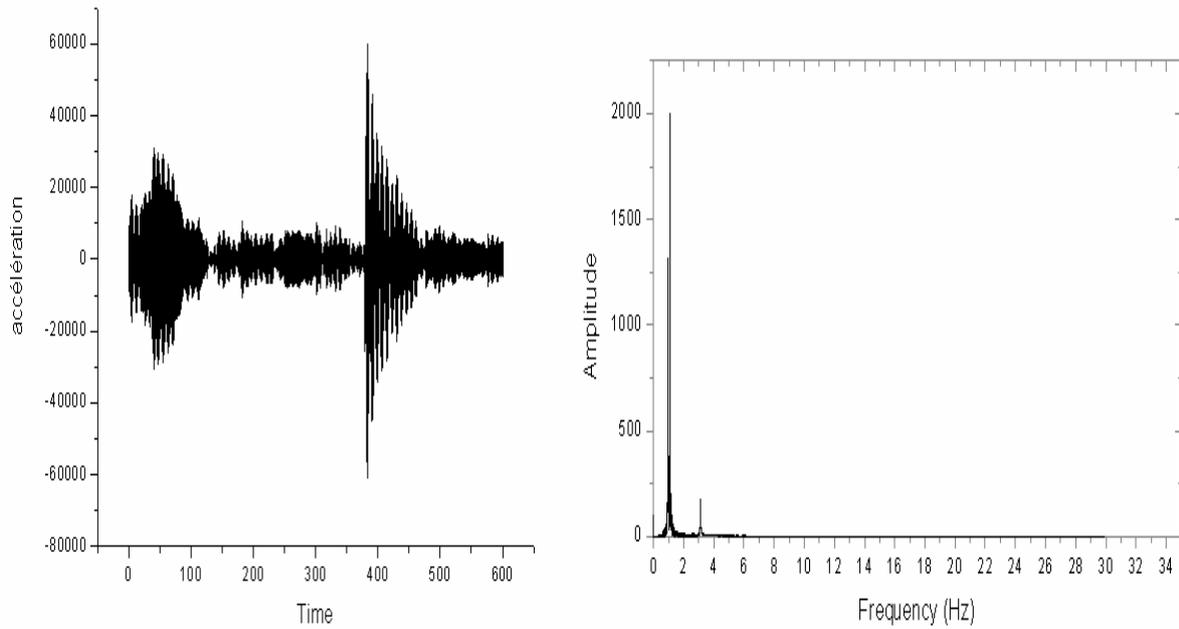
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



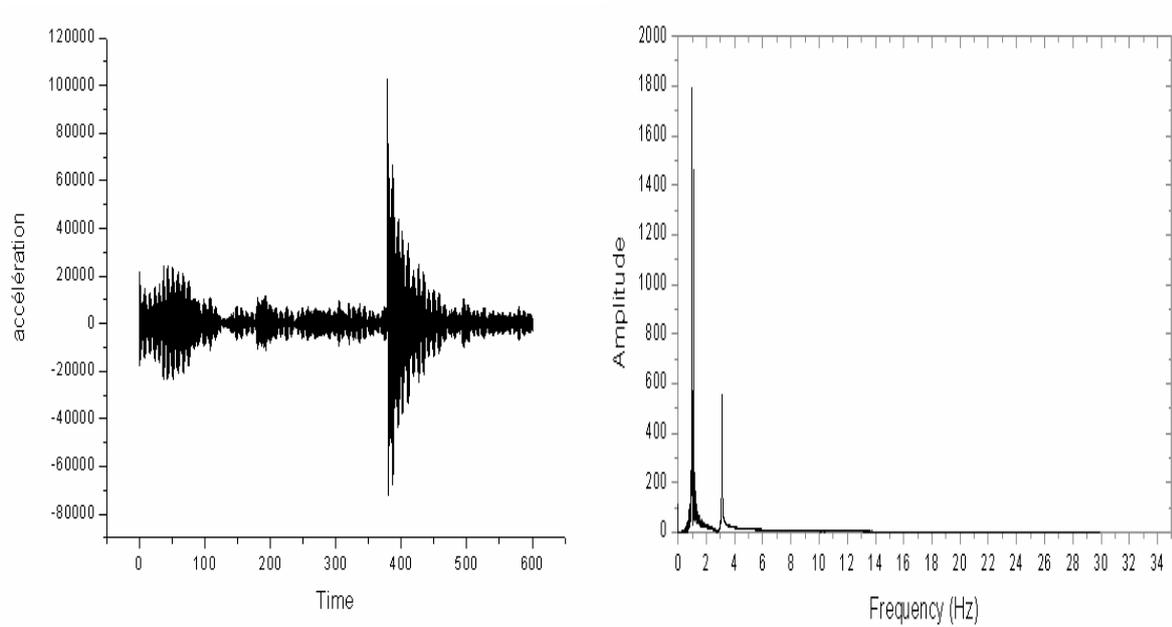
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 80cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



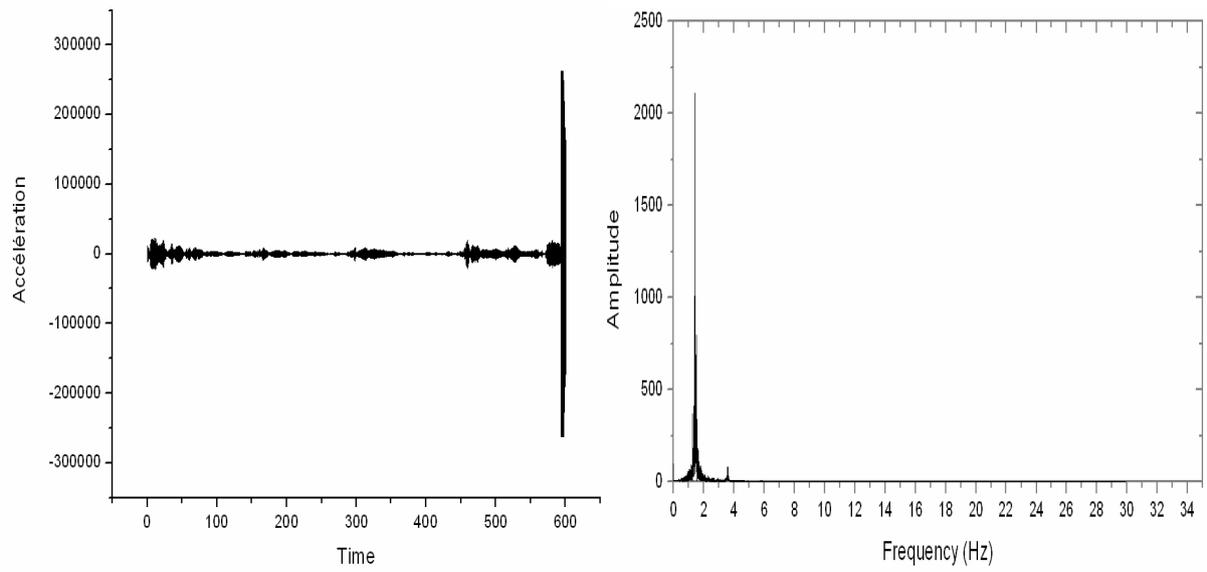
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



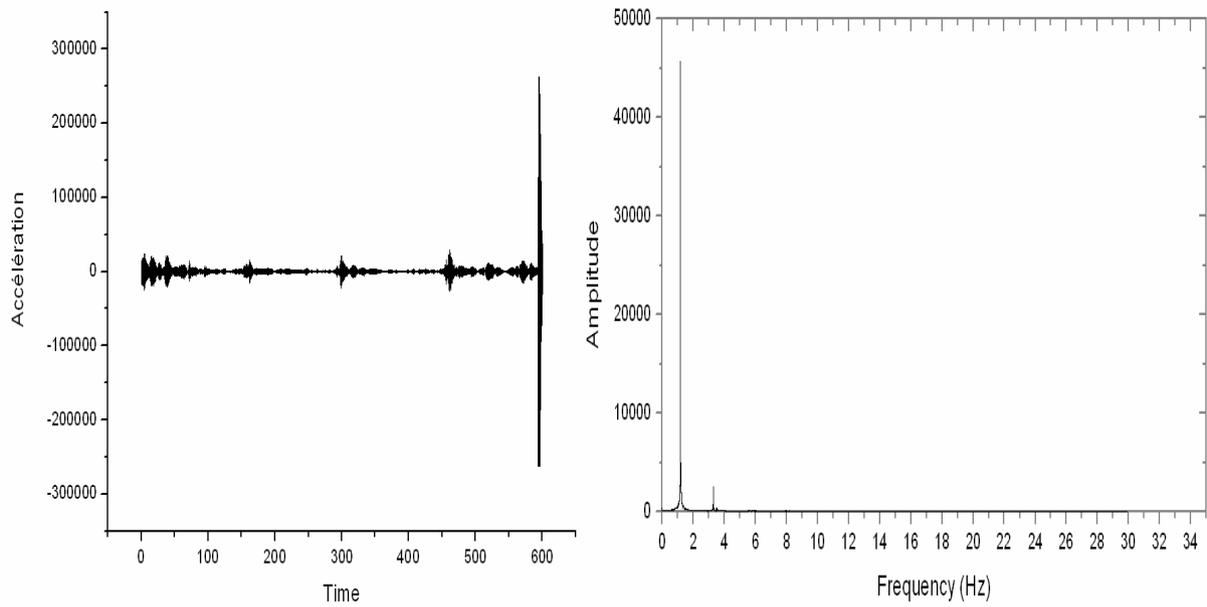
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 80cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



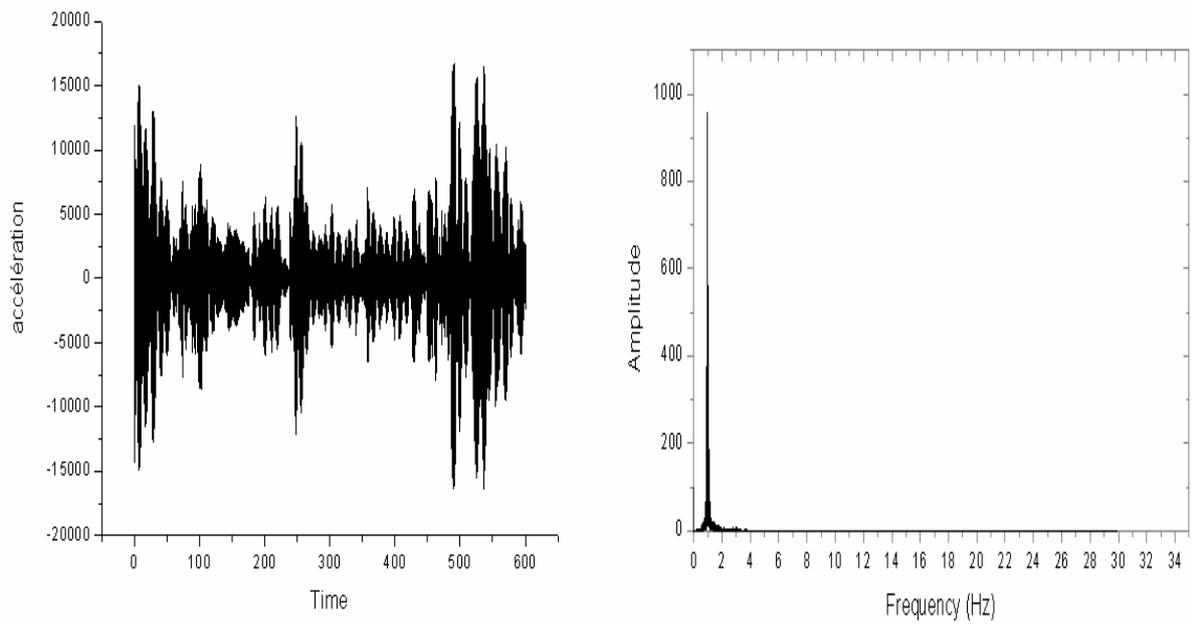
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



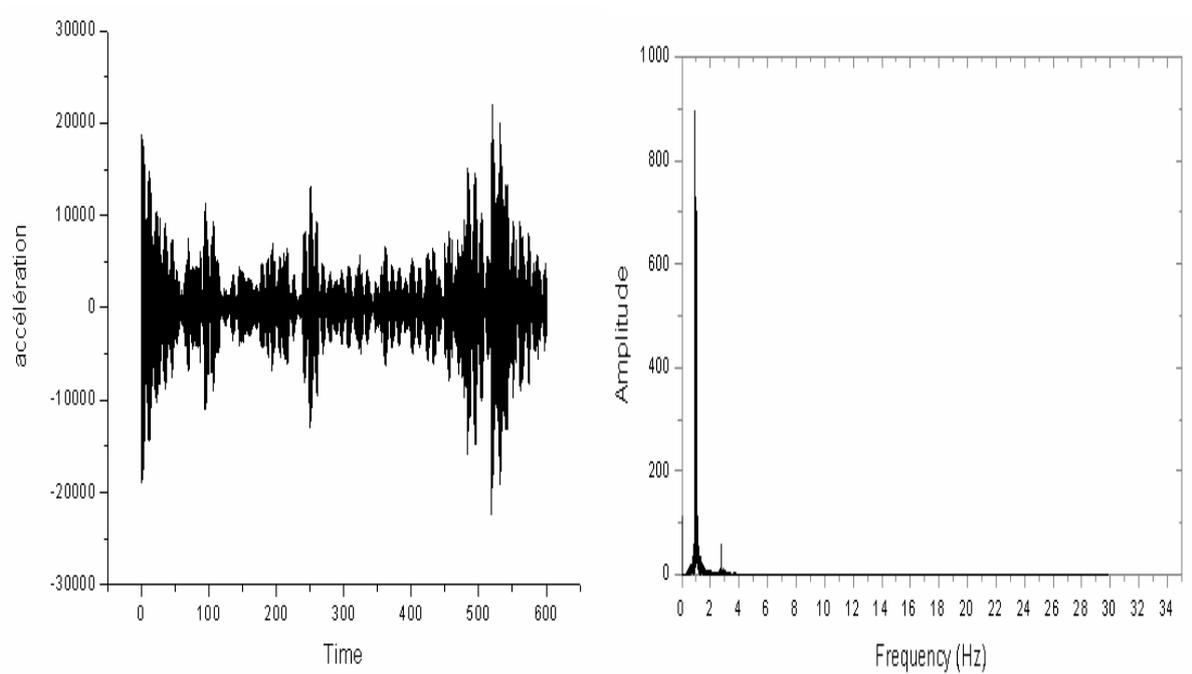
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 84cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



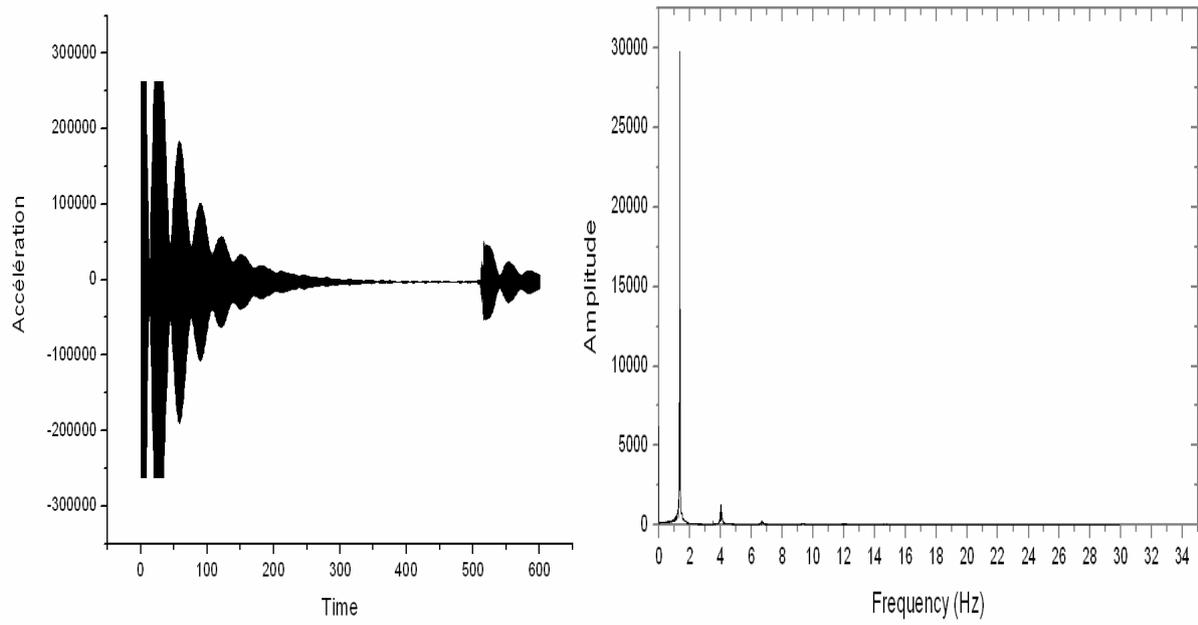
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



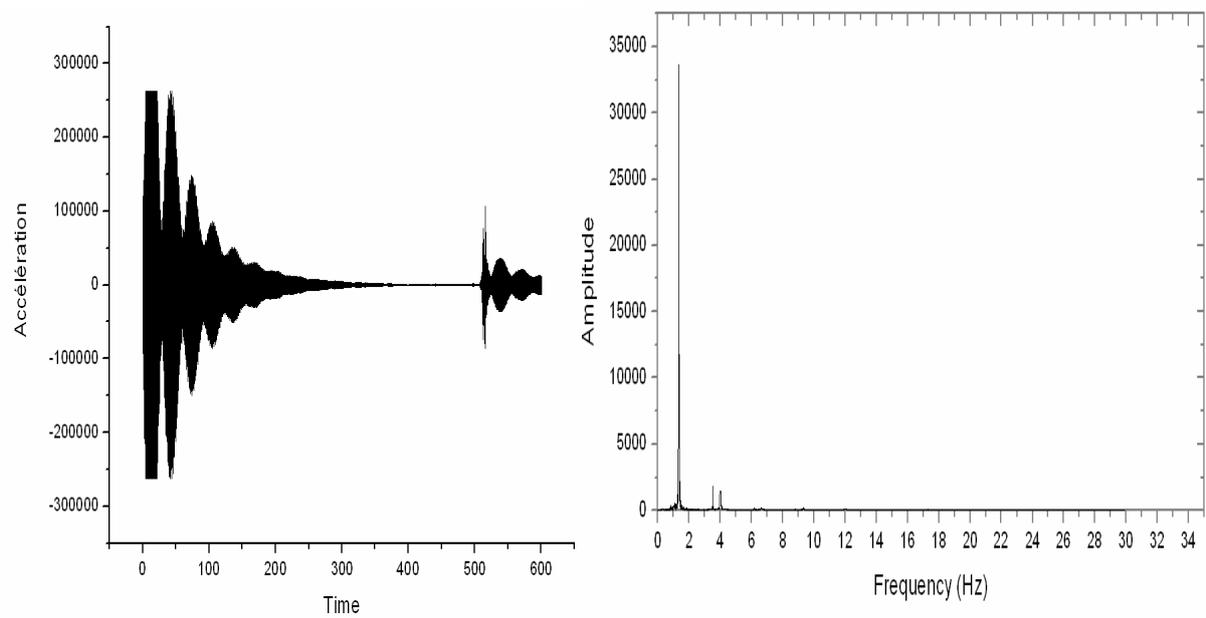
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 84cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



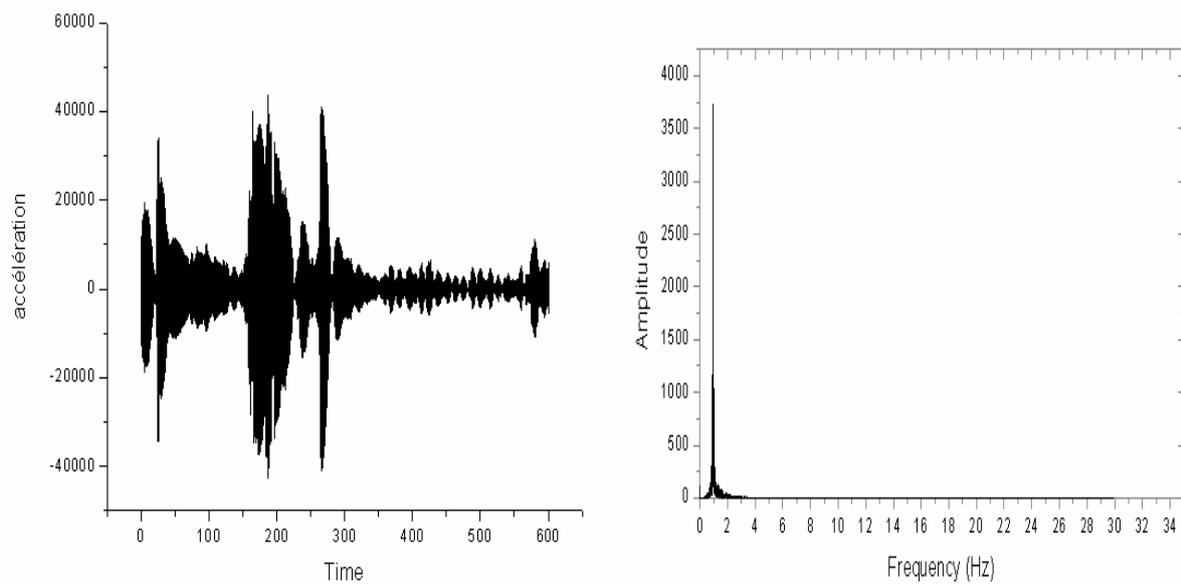
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



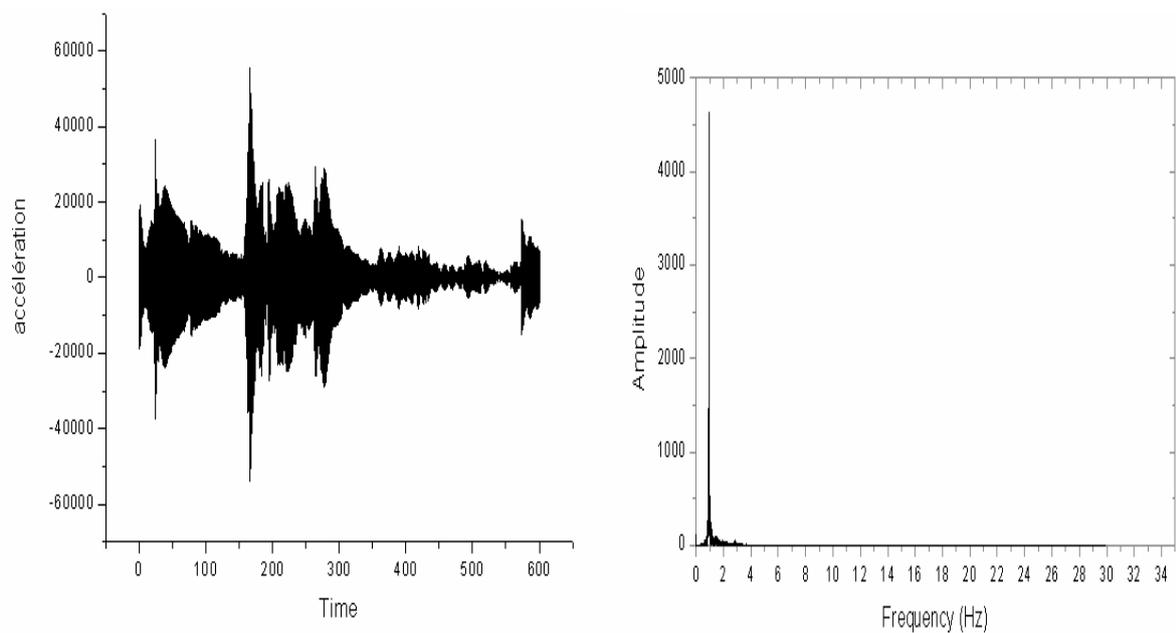
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 88cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



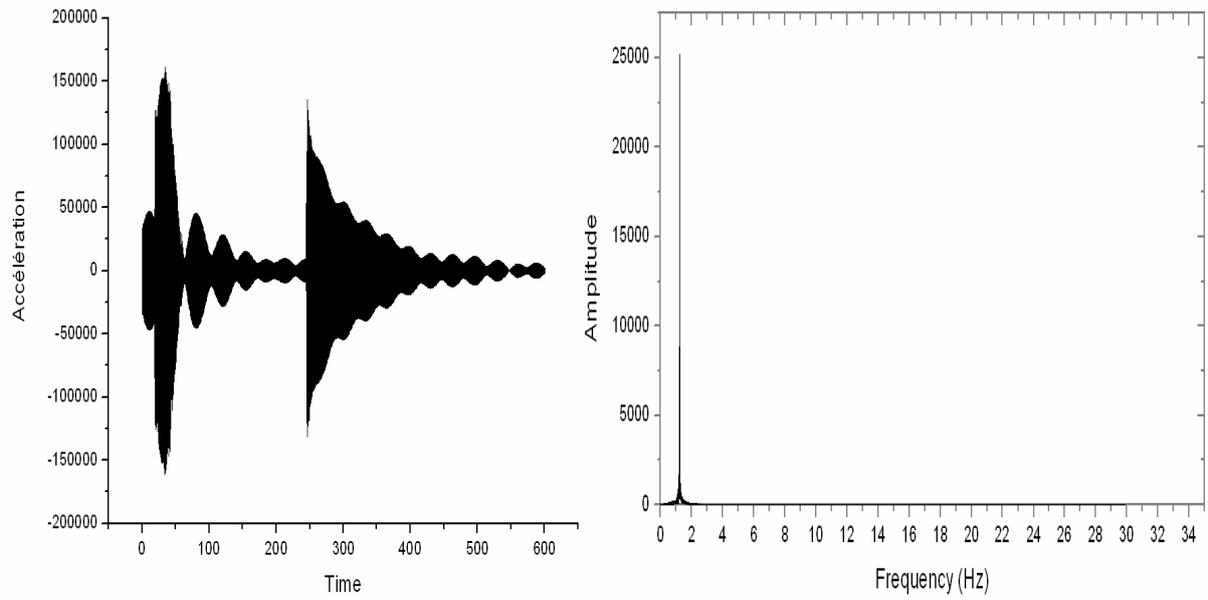
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



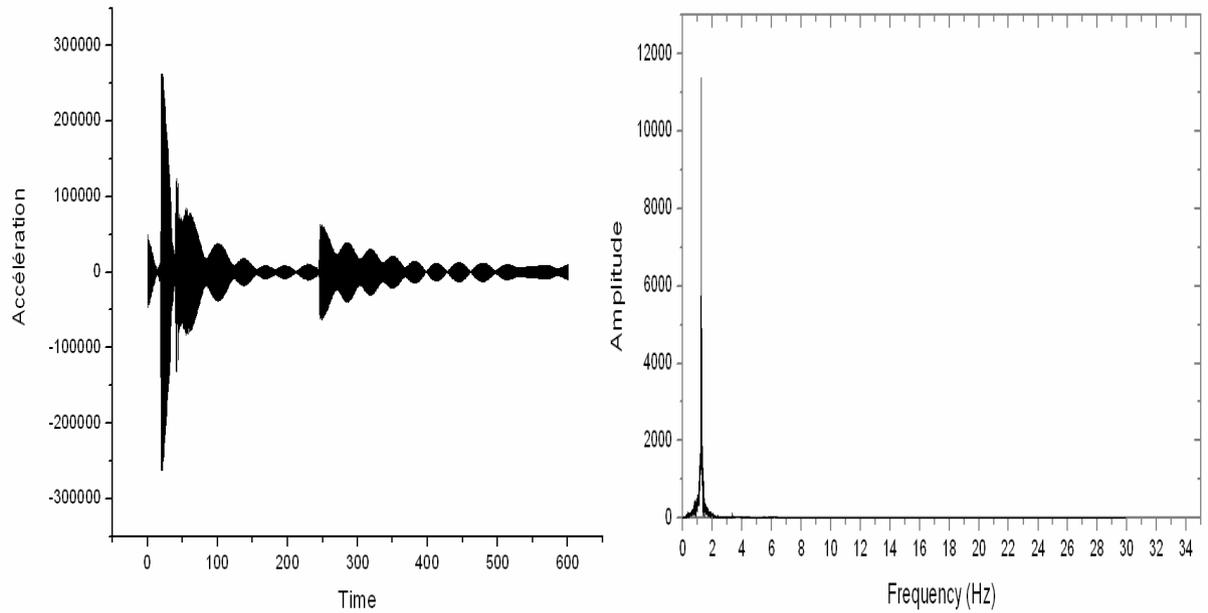
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 88cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



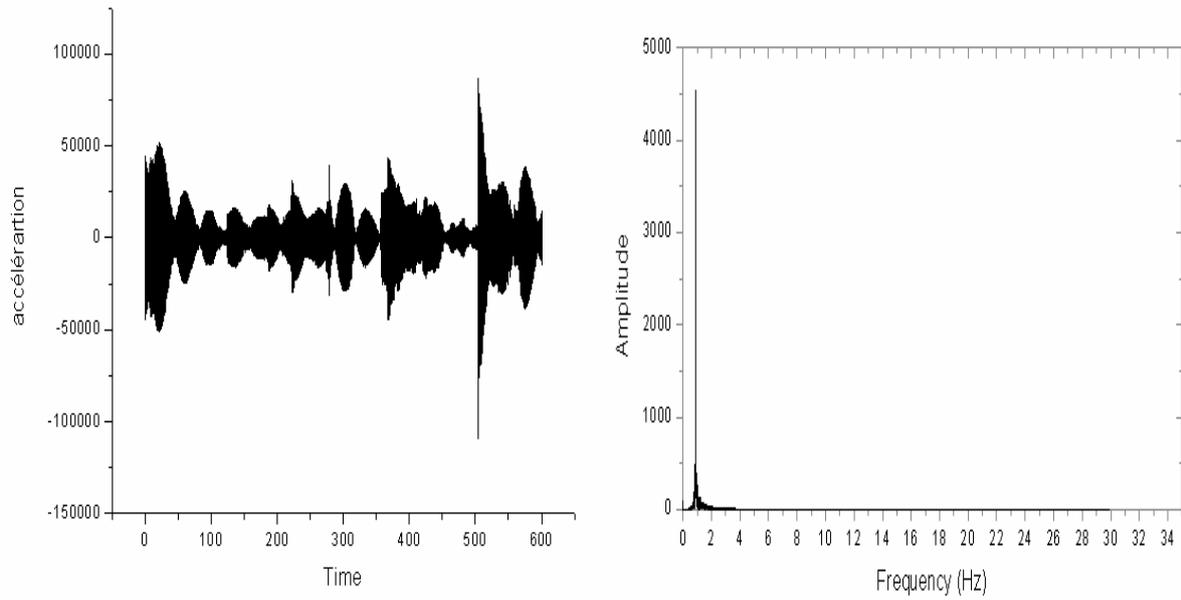
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



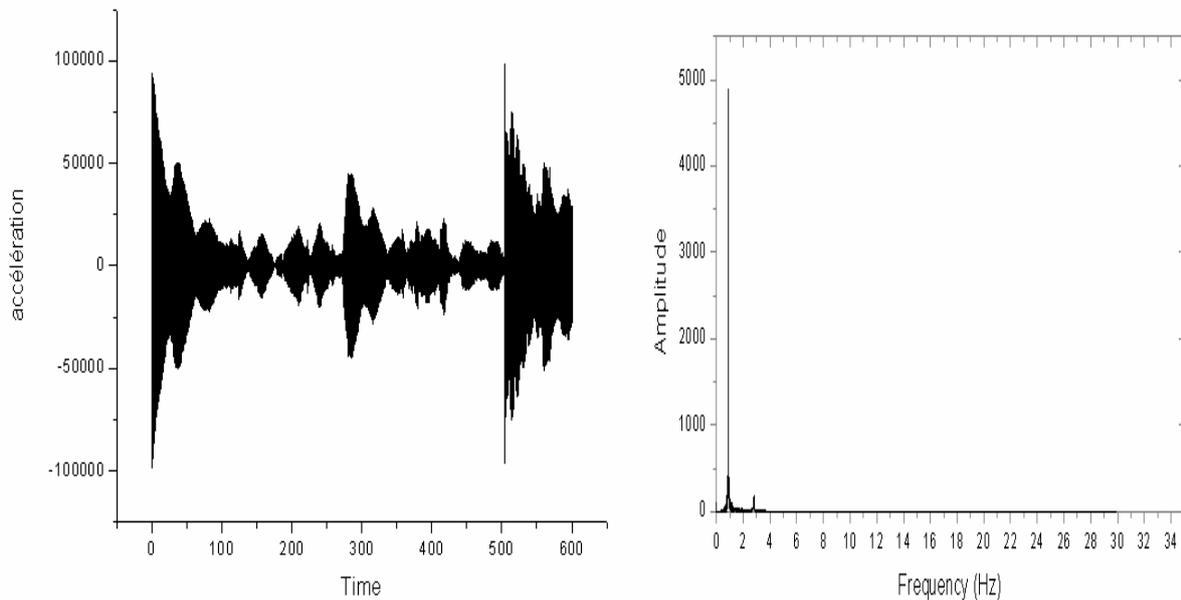
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 92cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



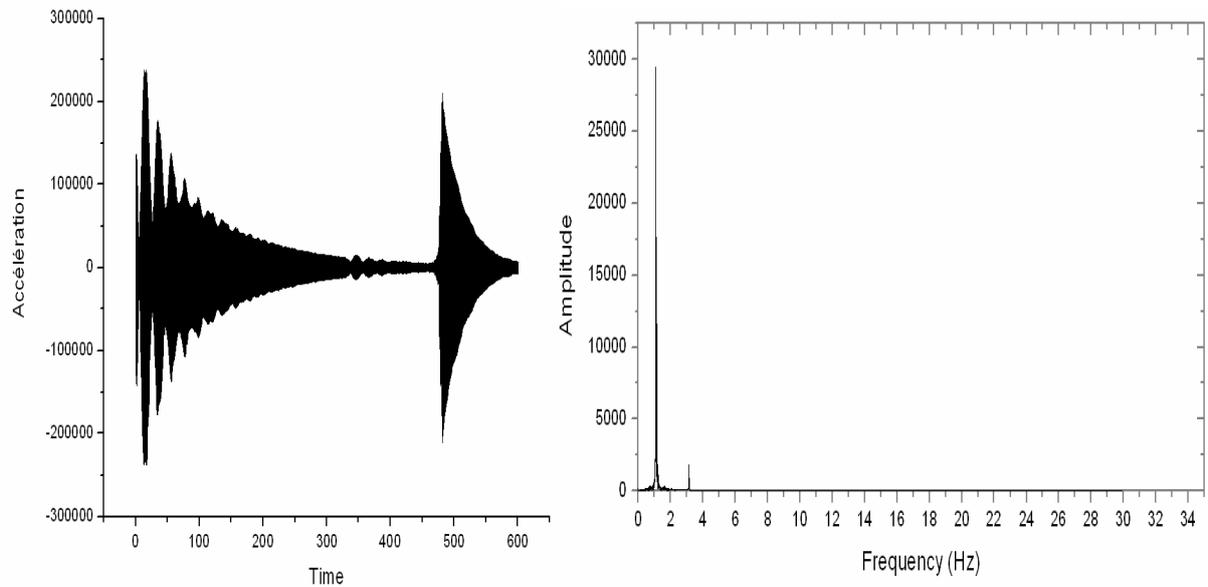
Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le FFT correspondant.



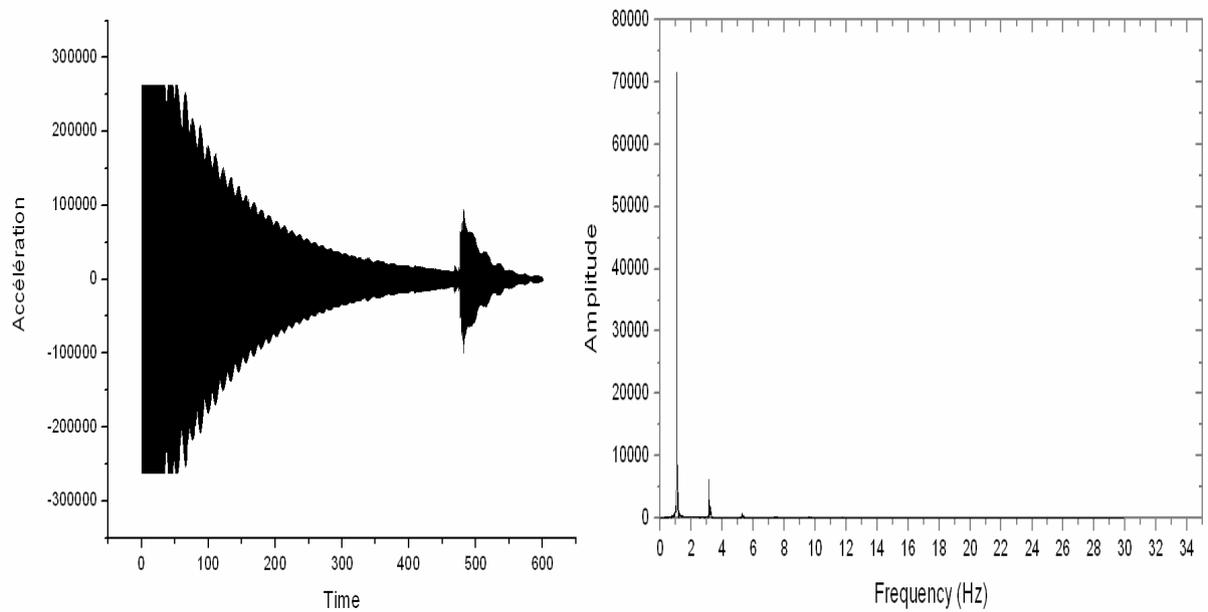
Figures 2

Hauteur de l'oscillateur est de 92cm pour une durée d'essai de 10 minutes.
Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



Figures 1

Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le FFT correspondant



Figures 2

Annexe 3

Les essais ont été effectués sur le bâtiment à usage de logement (RDC+5 étages) le logiciel utilisé est le Geopsy.

Hauteur de l'oscillateur est de 32 cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

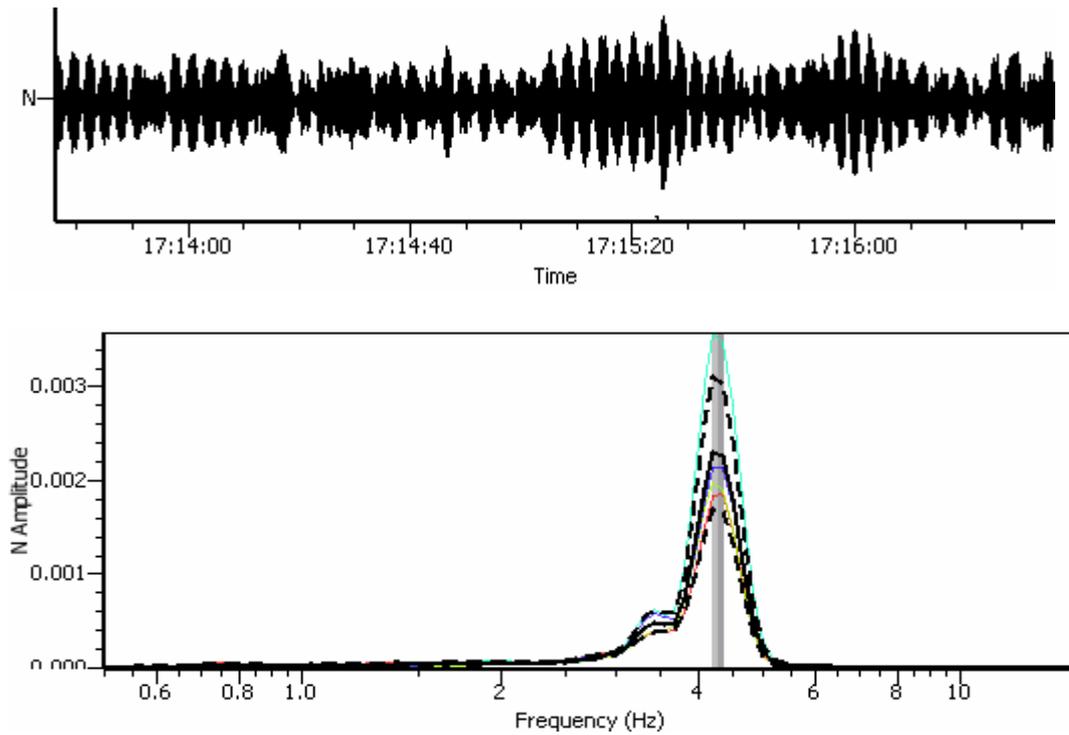


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

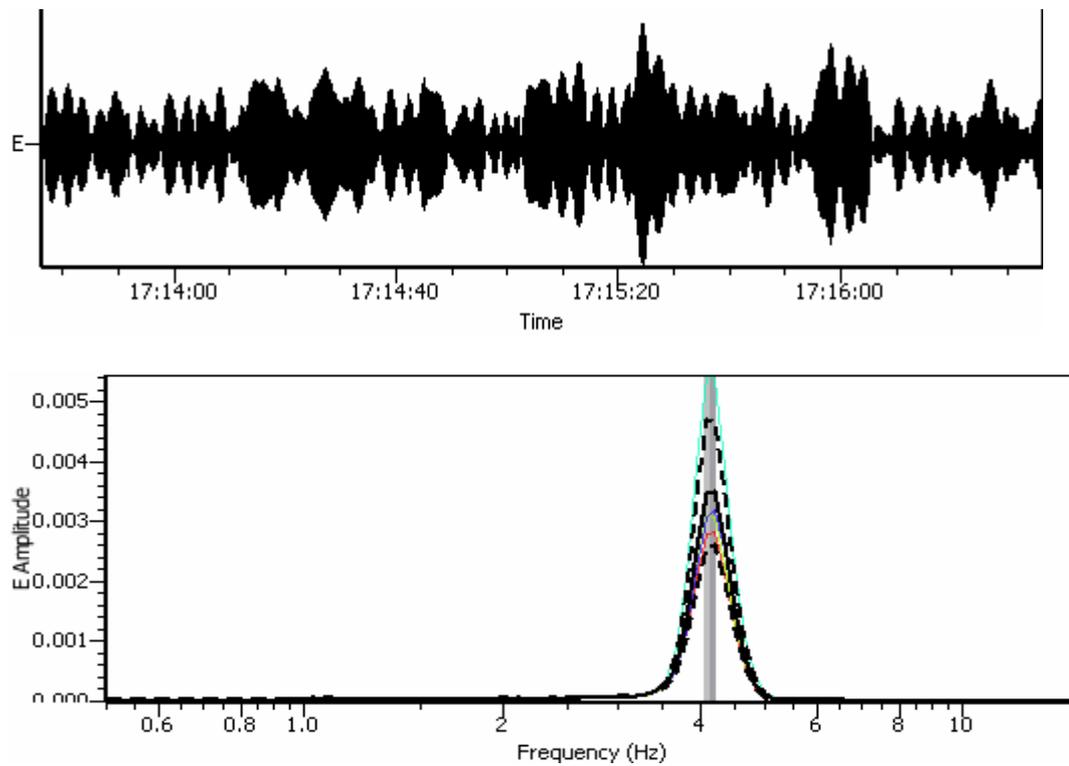


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 33cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

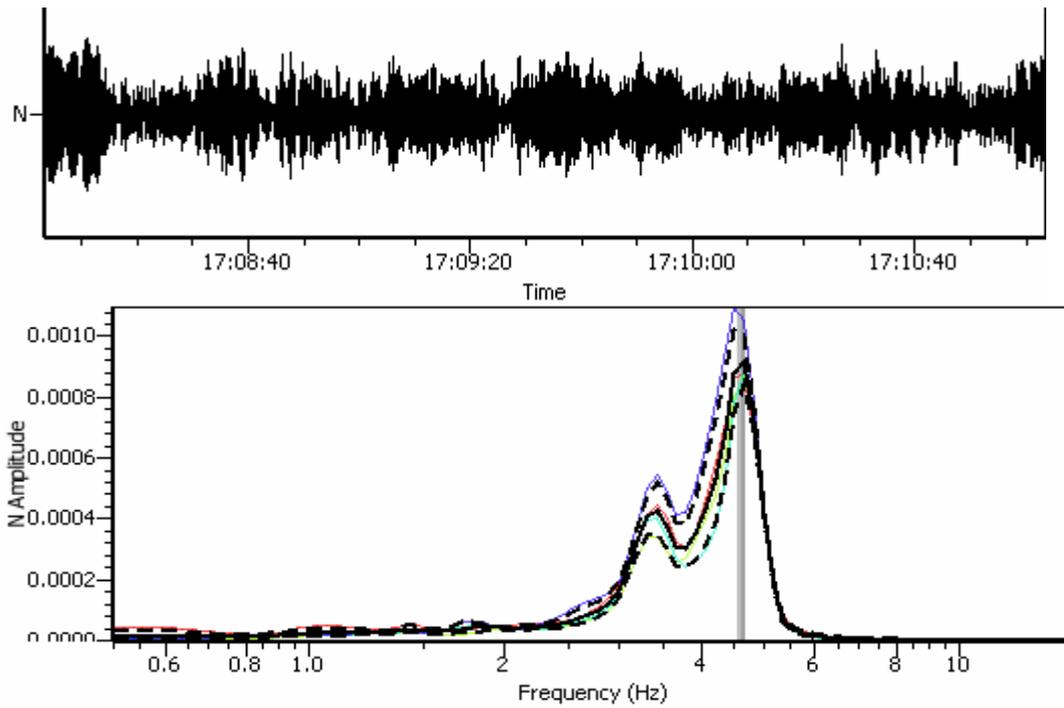


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

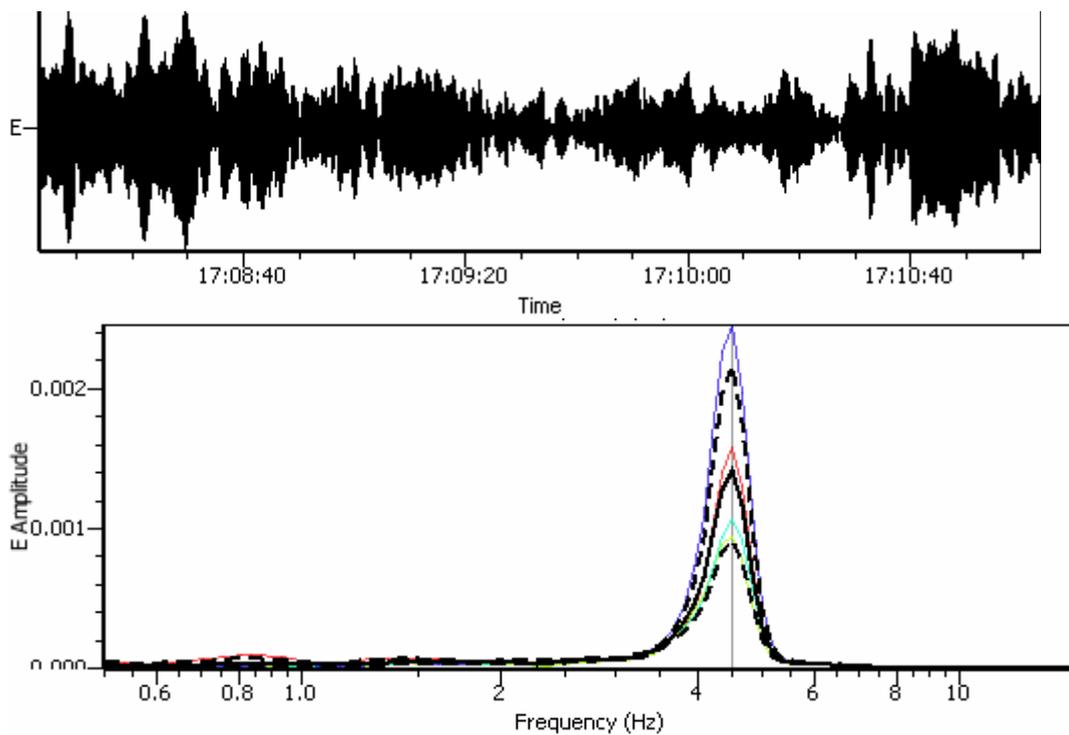


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 35cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

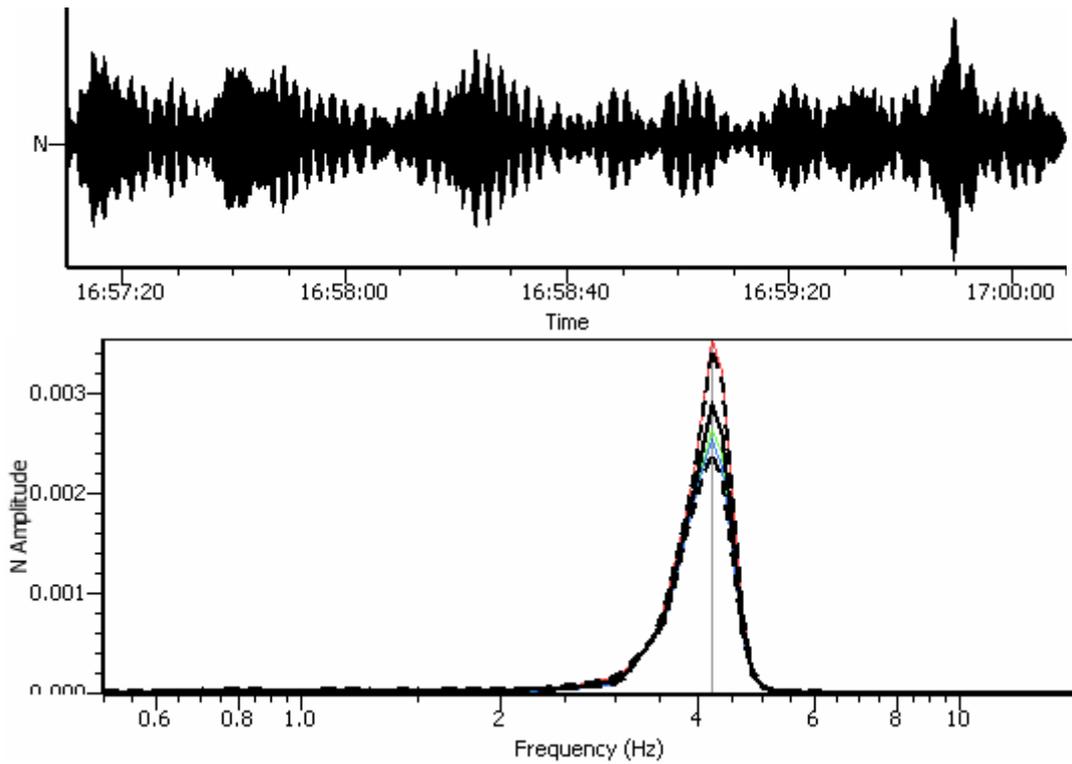


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

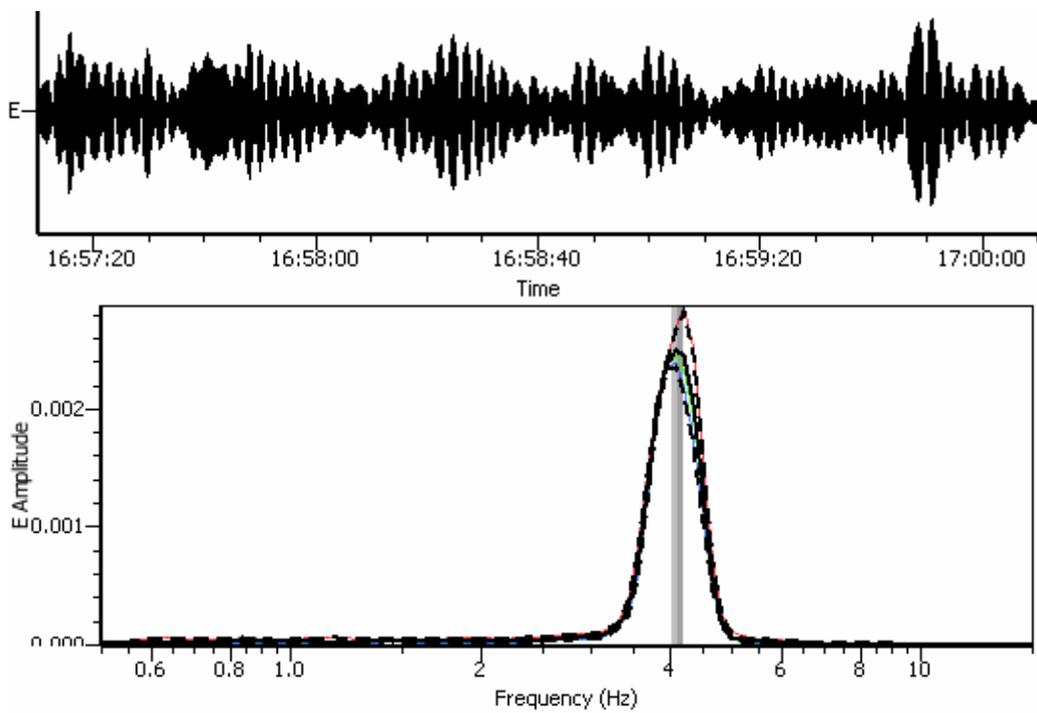


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 36cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

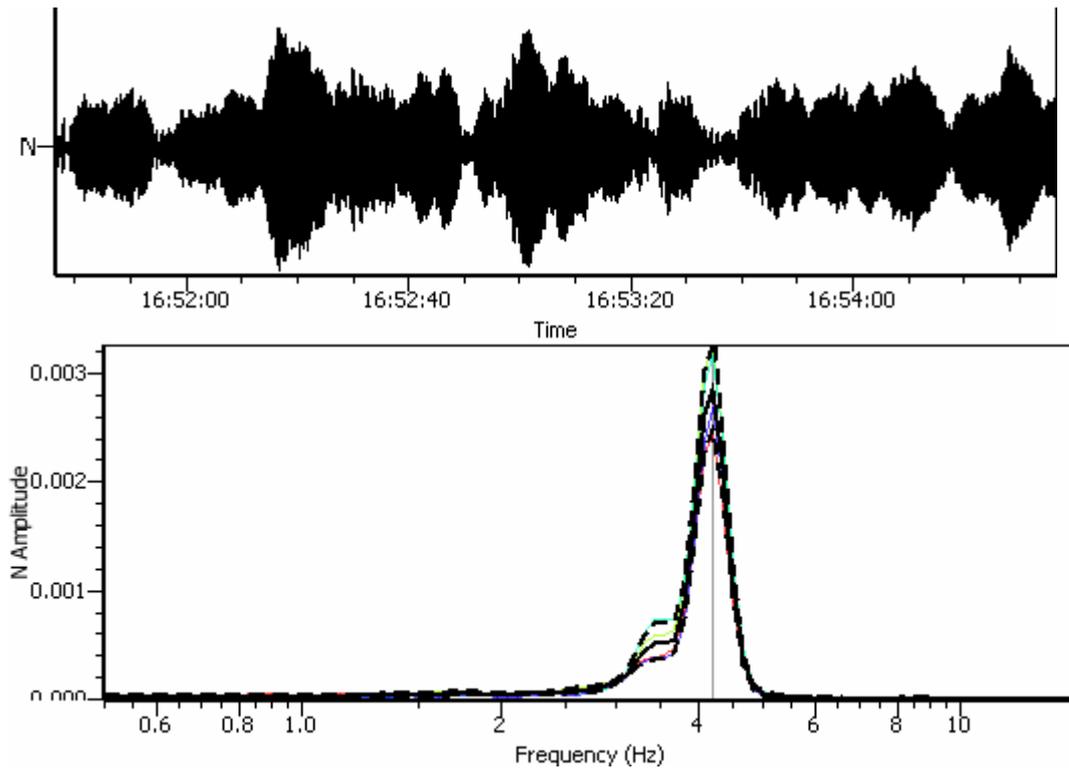


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

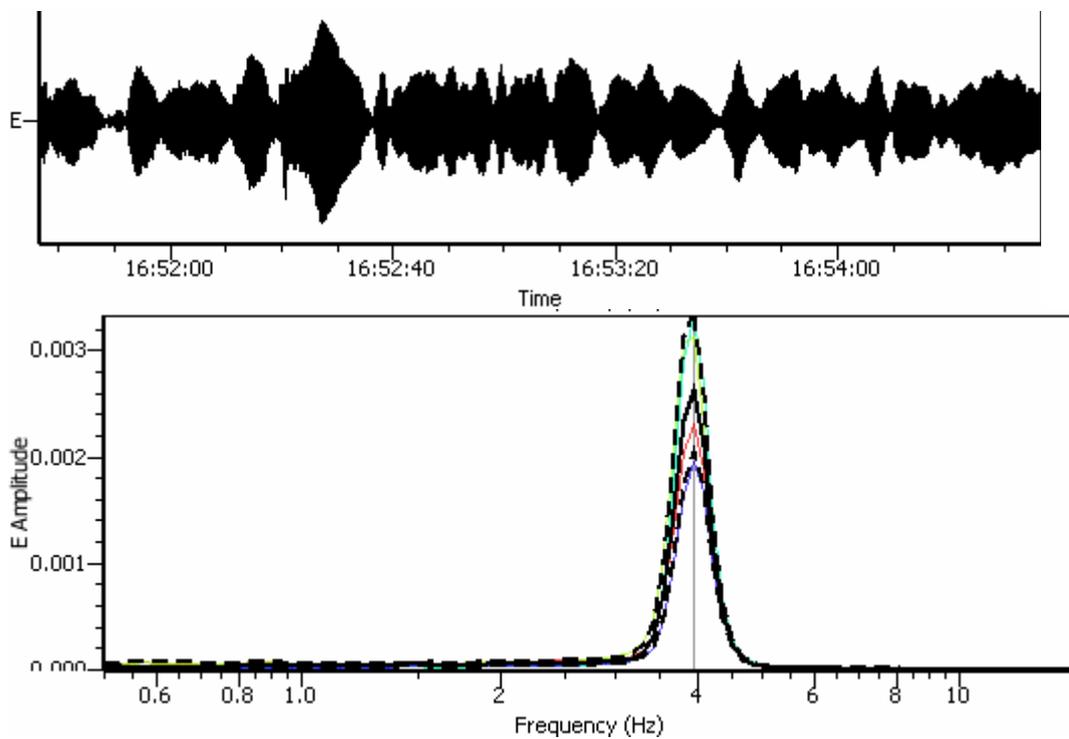


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 37cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

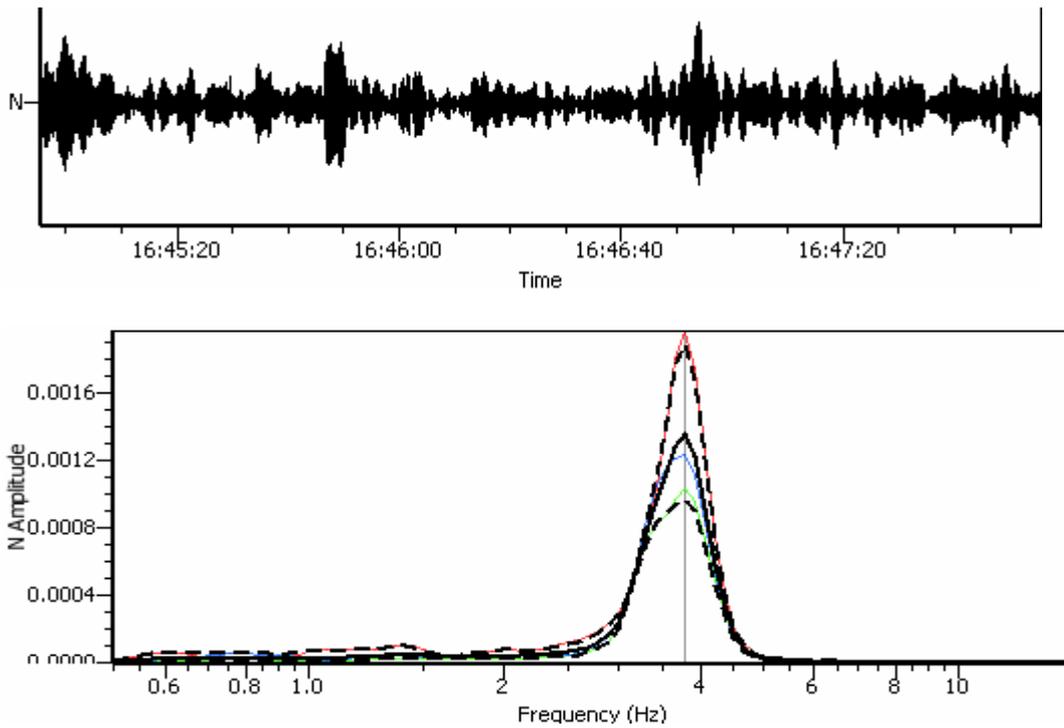


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

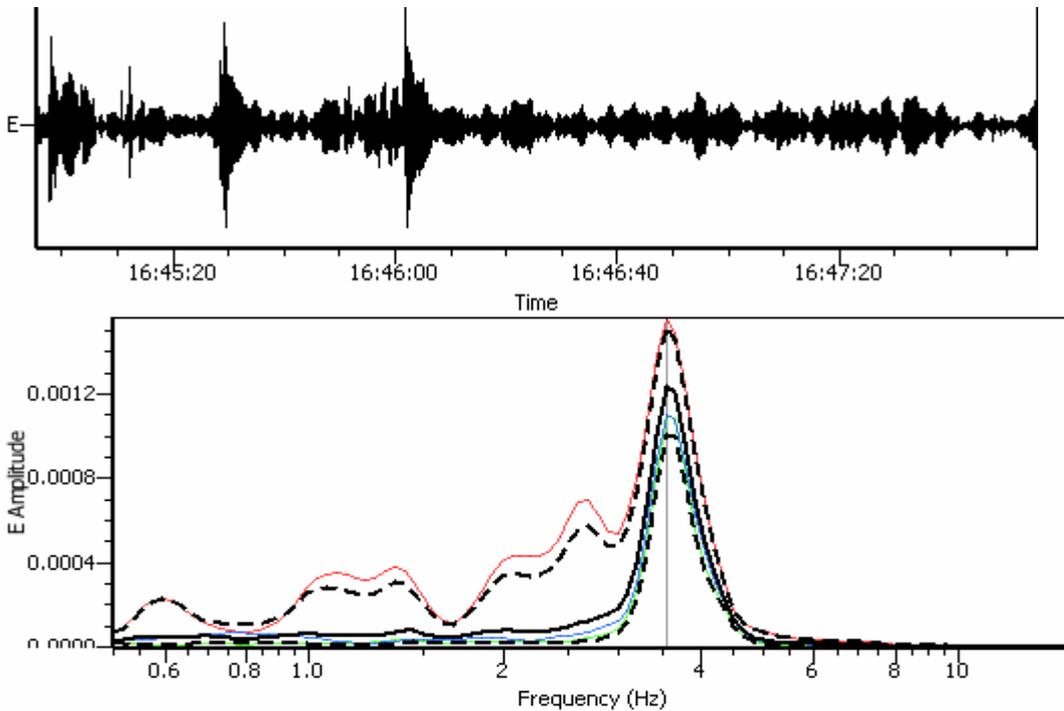


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 38cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

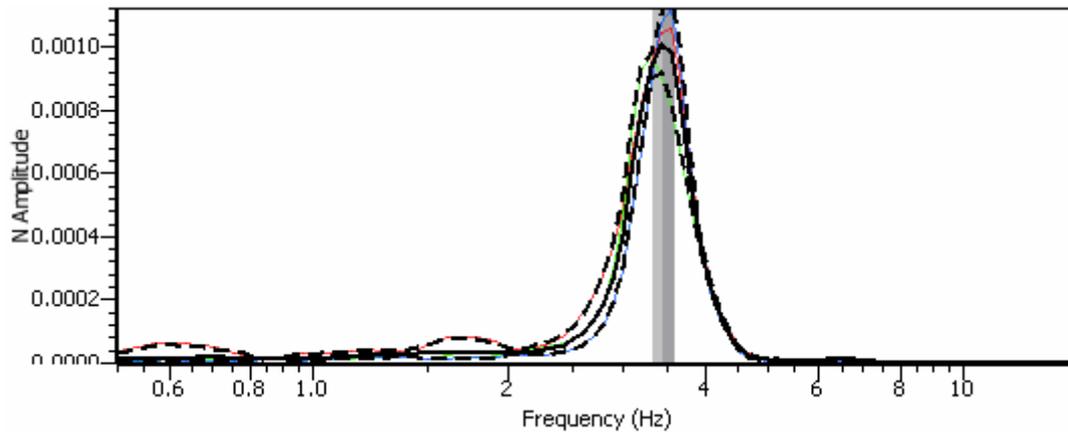
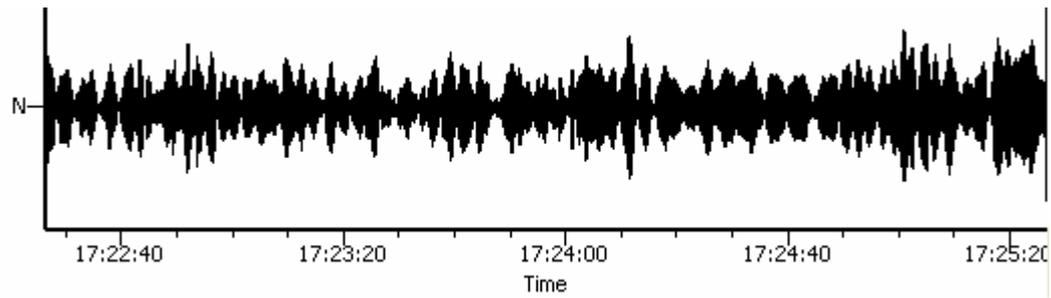


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

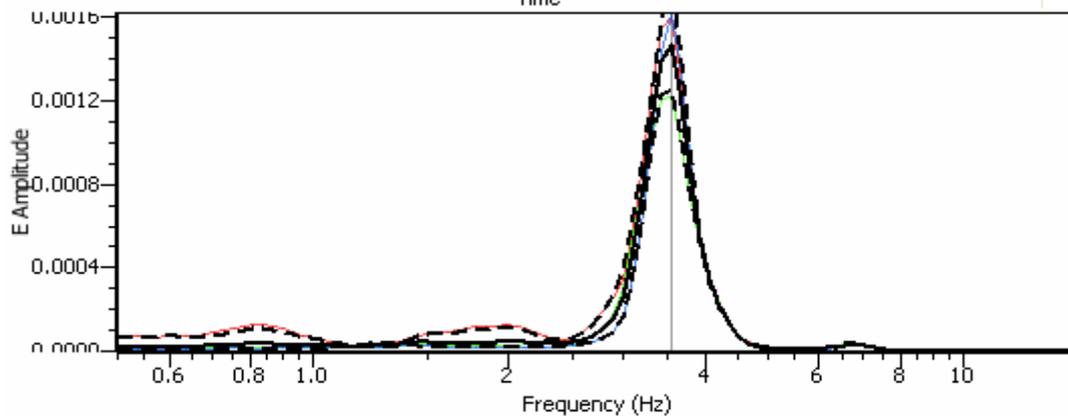
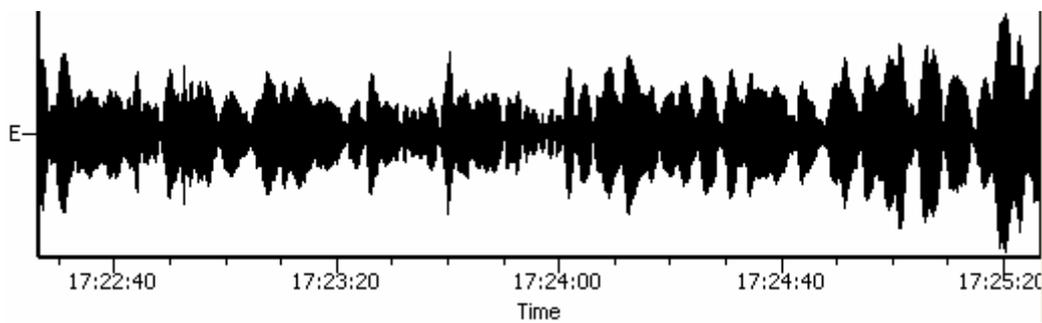


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 39cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

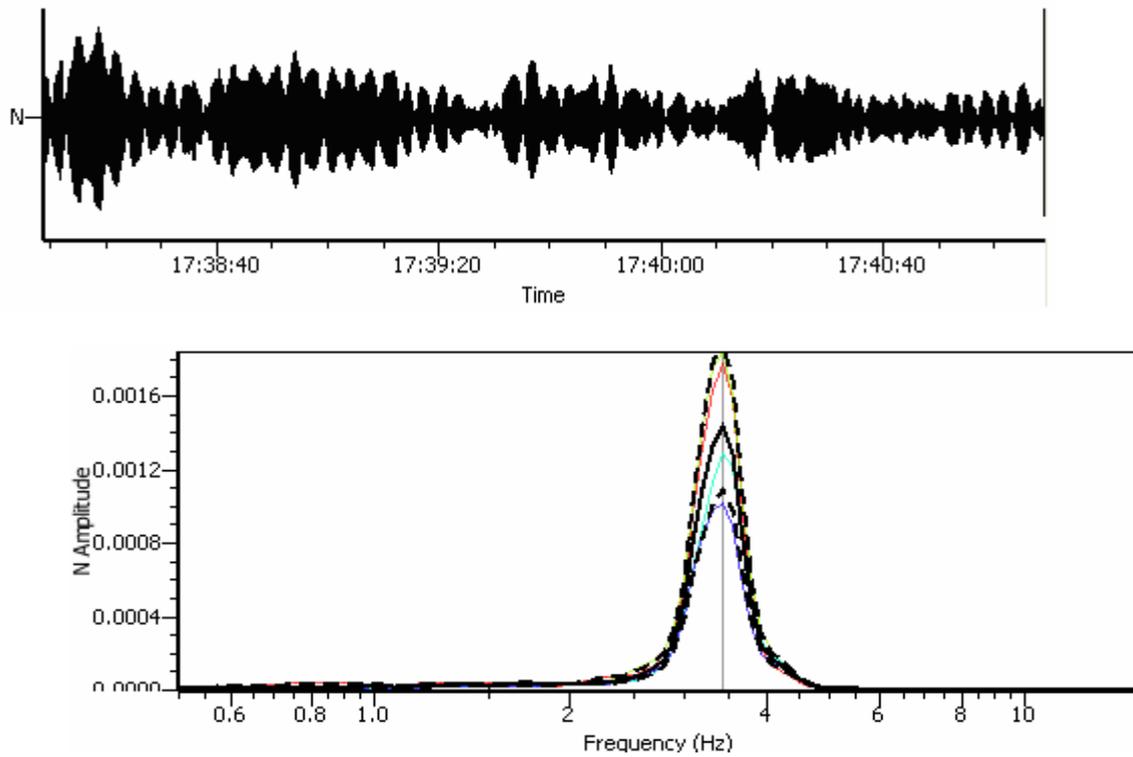


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

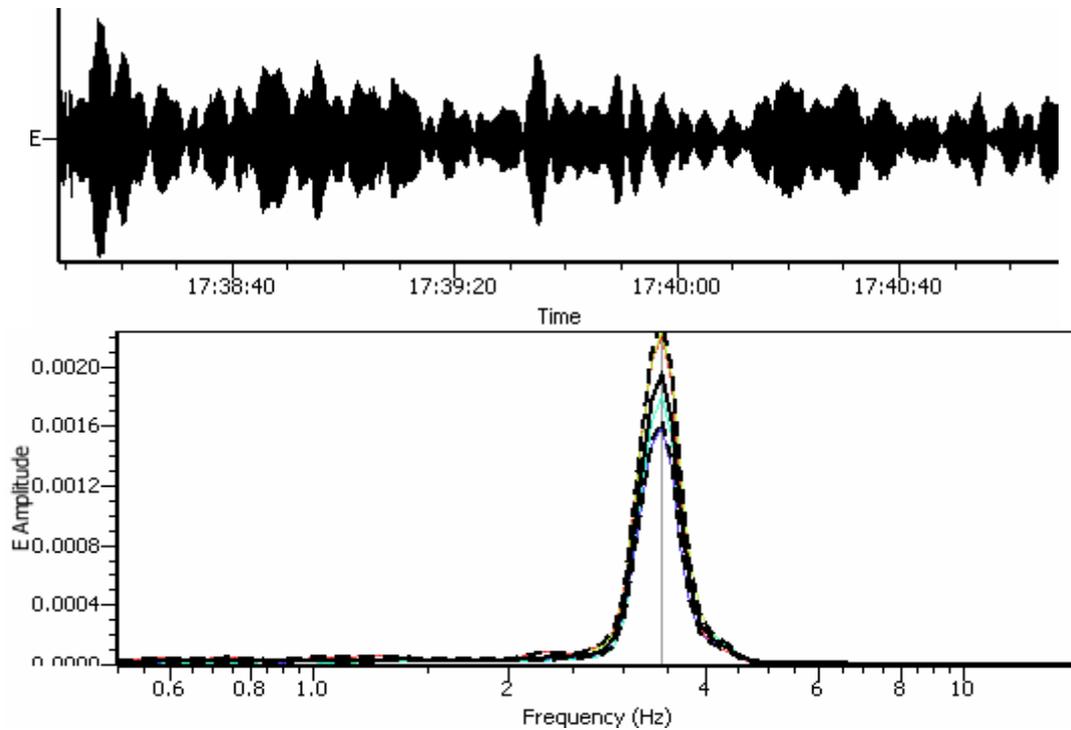


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 40cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

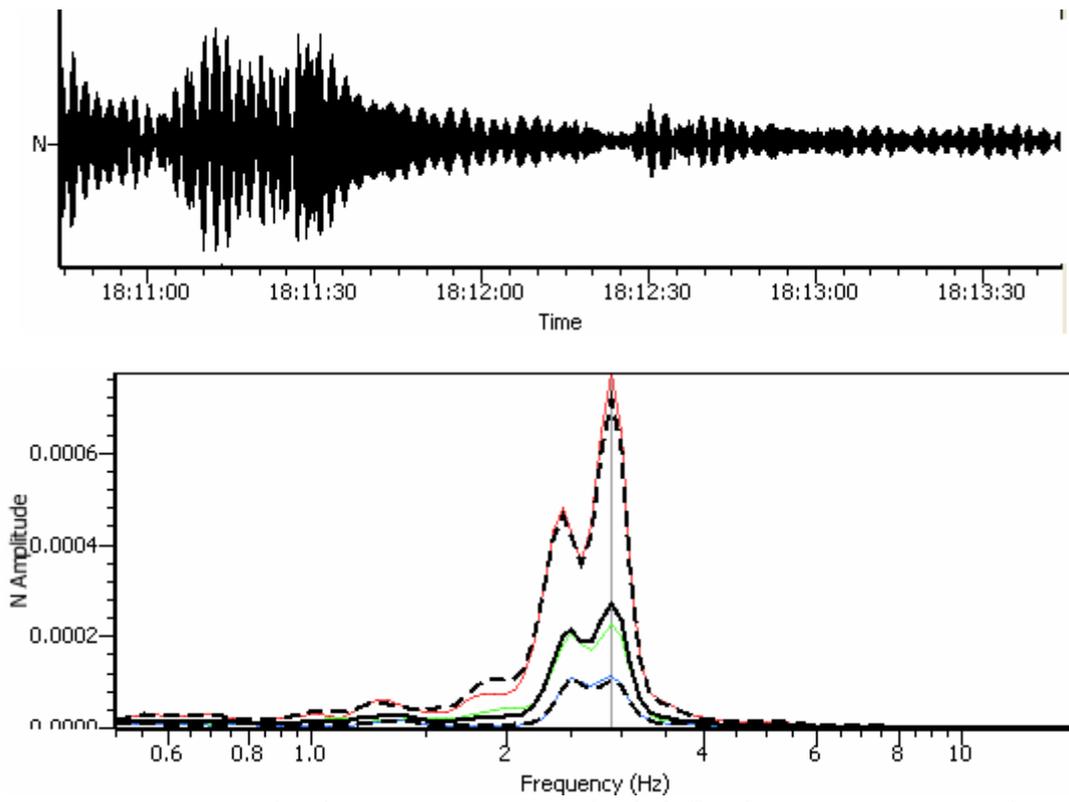


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

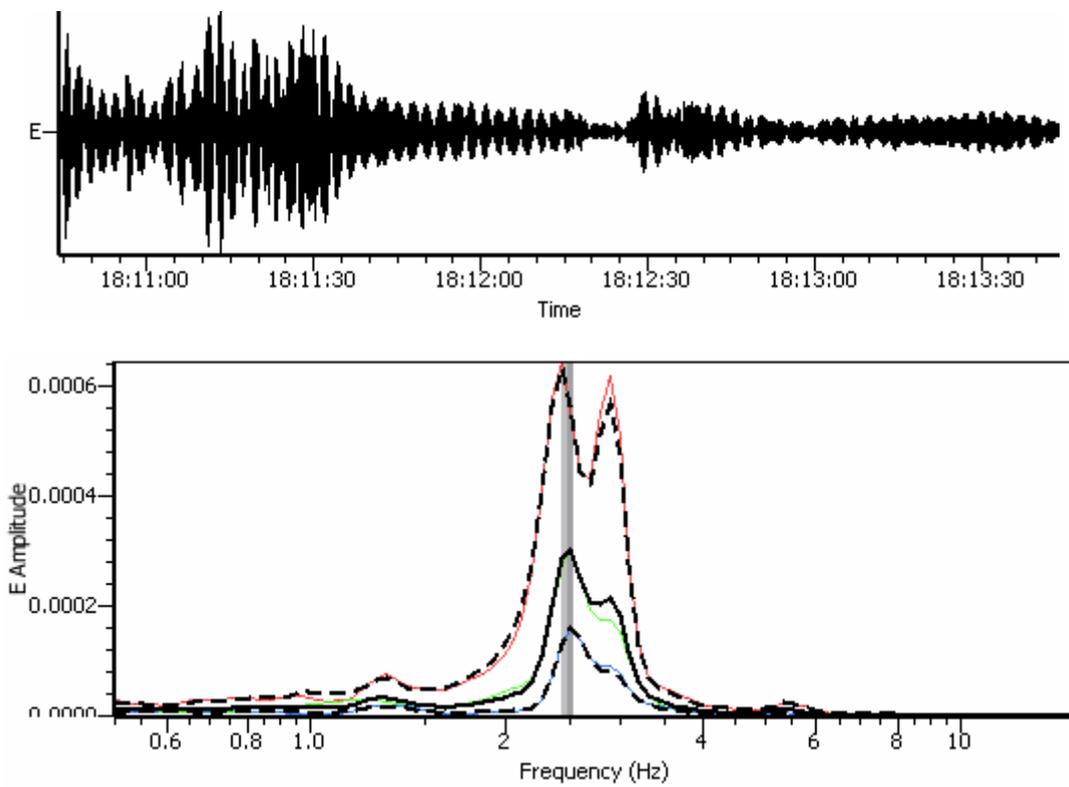


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 40cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

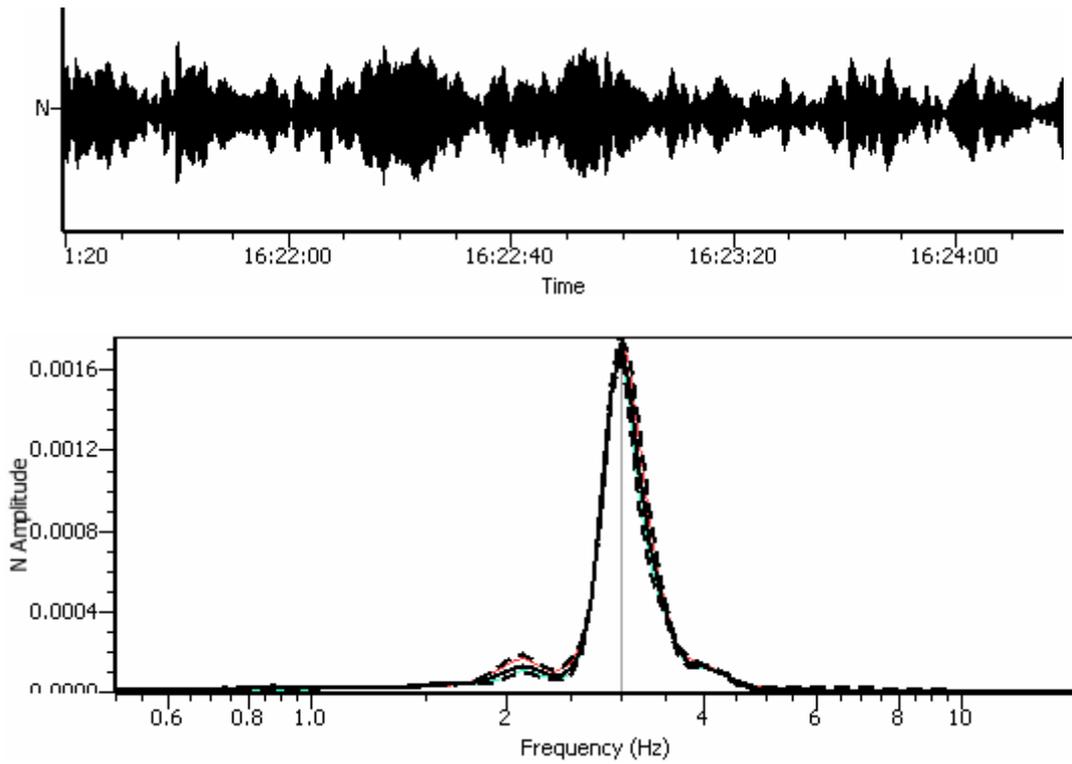


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

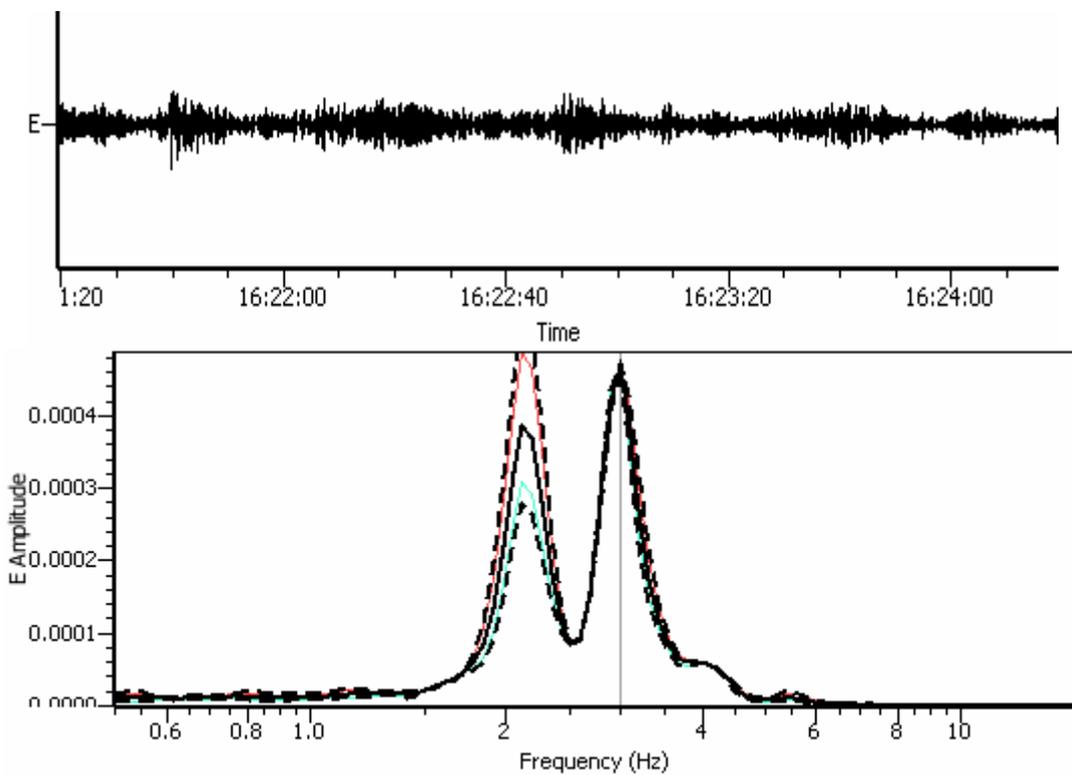


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 41cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

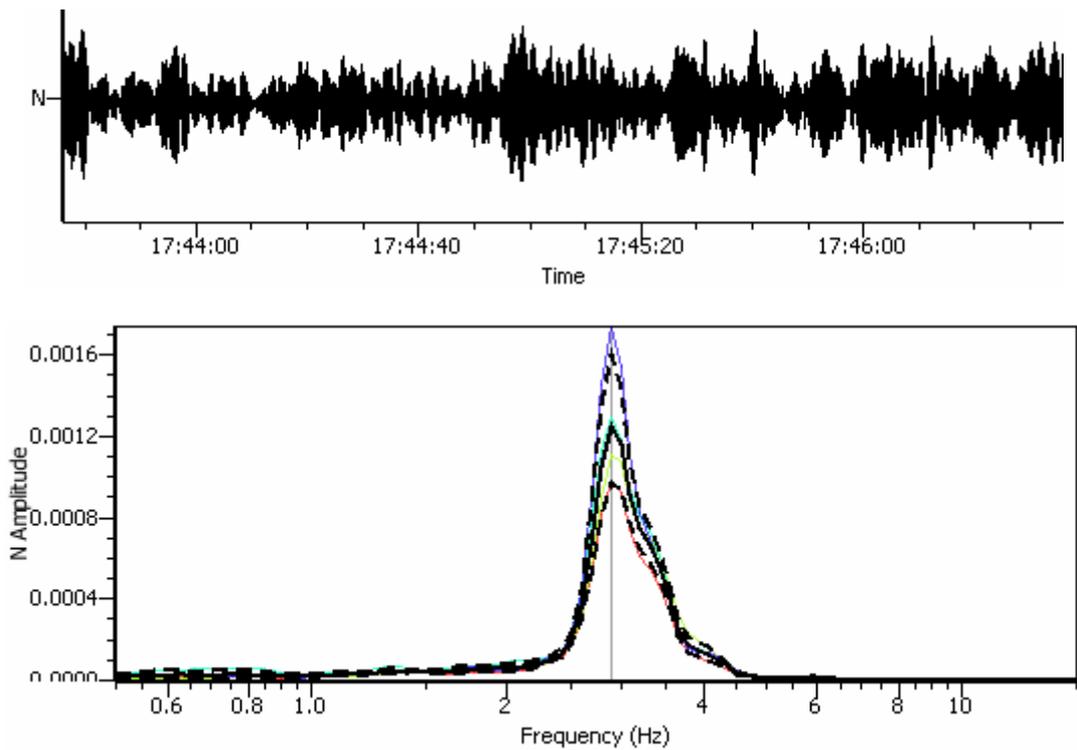


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

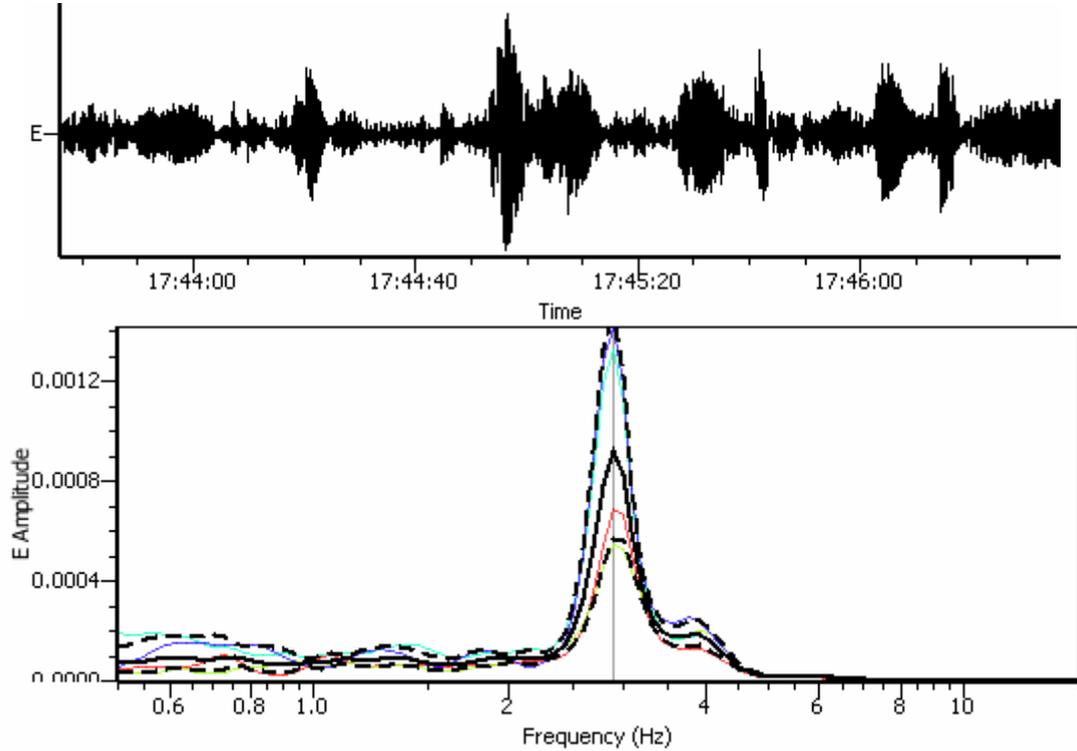


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 42cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

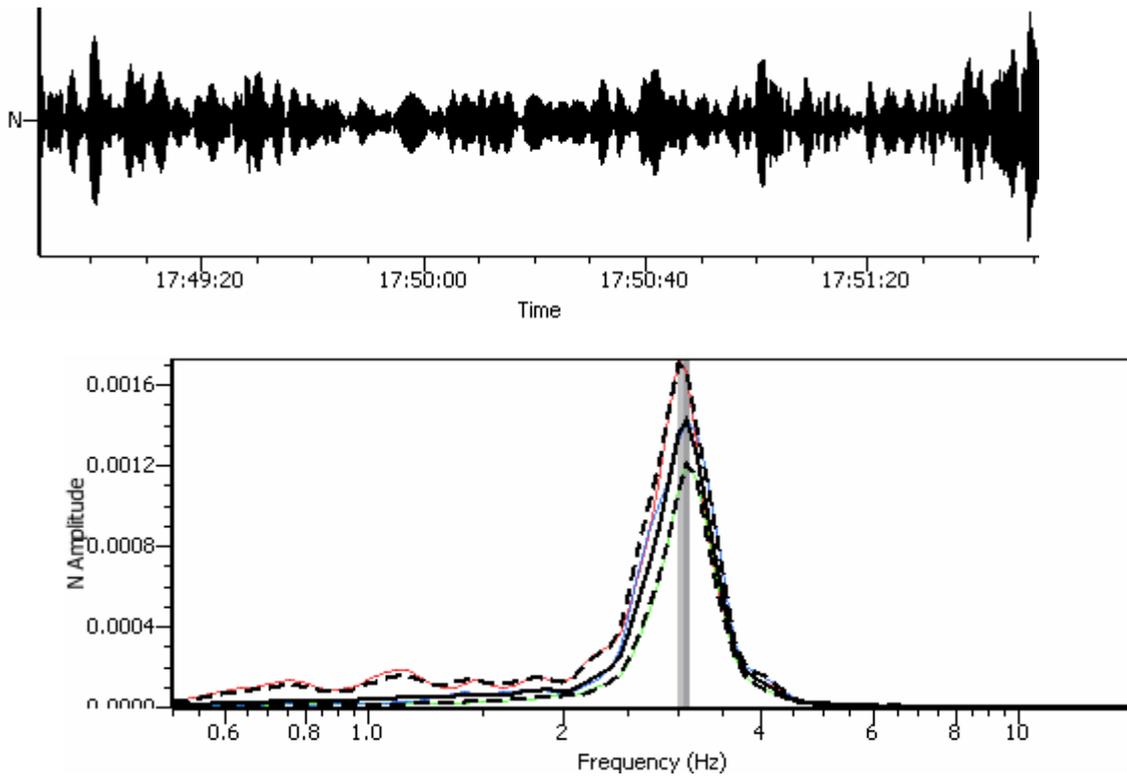


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

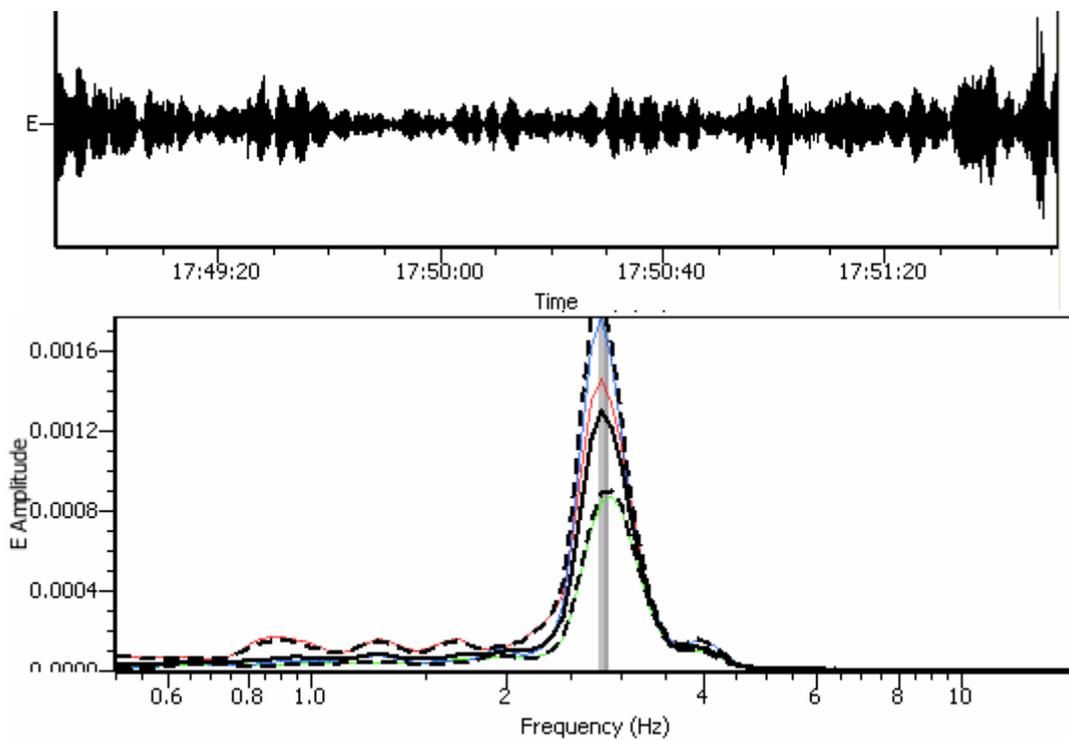


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 43cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

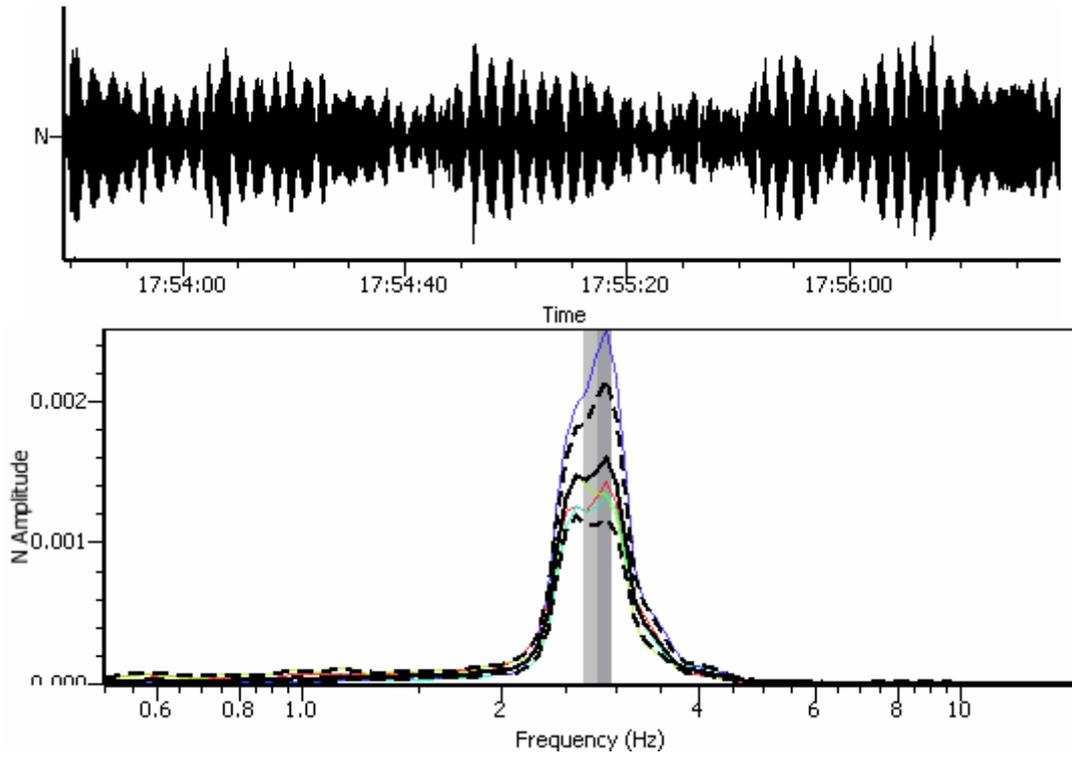


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

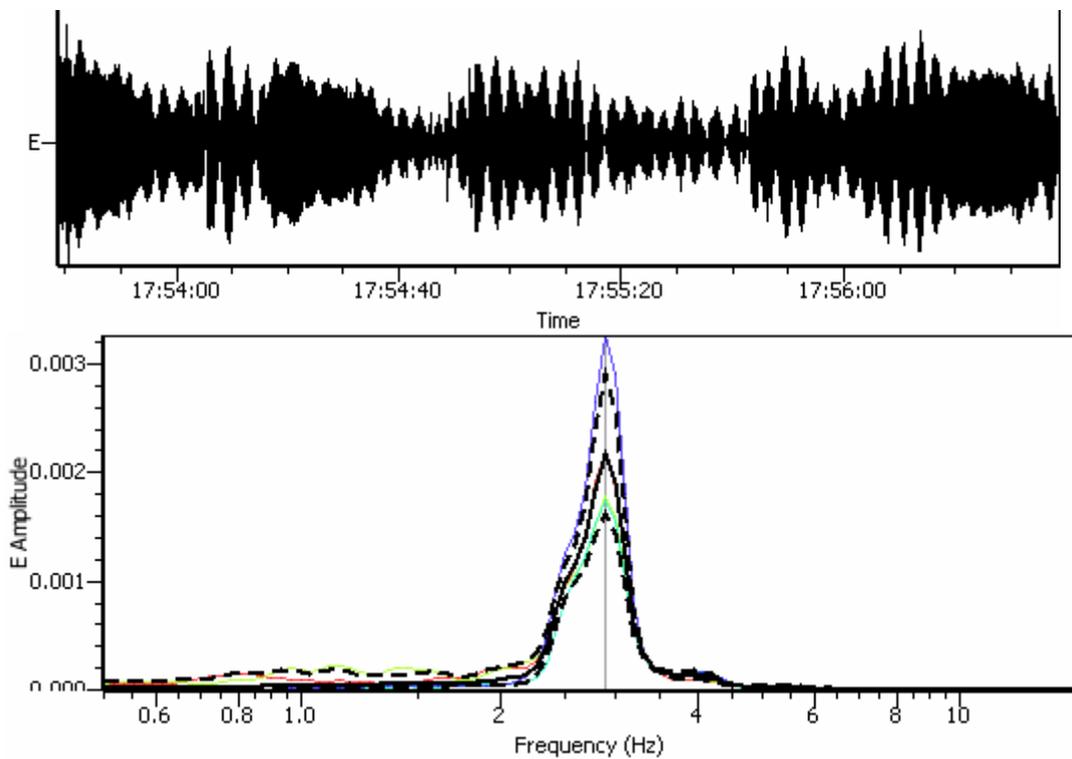


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 49cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

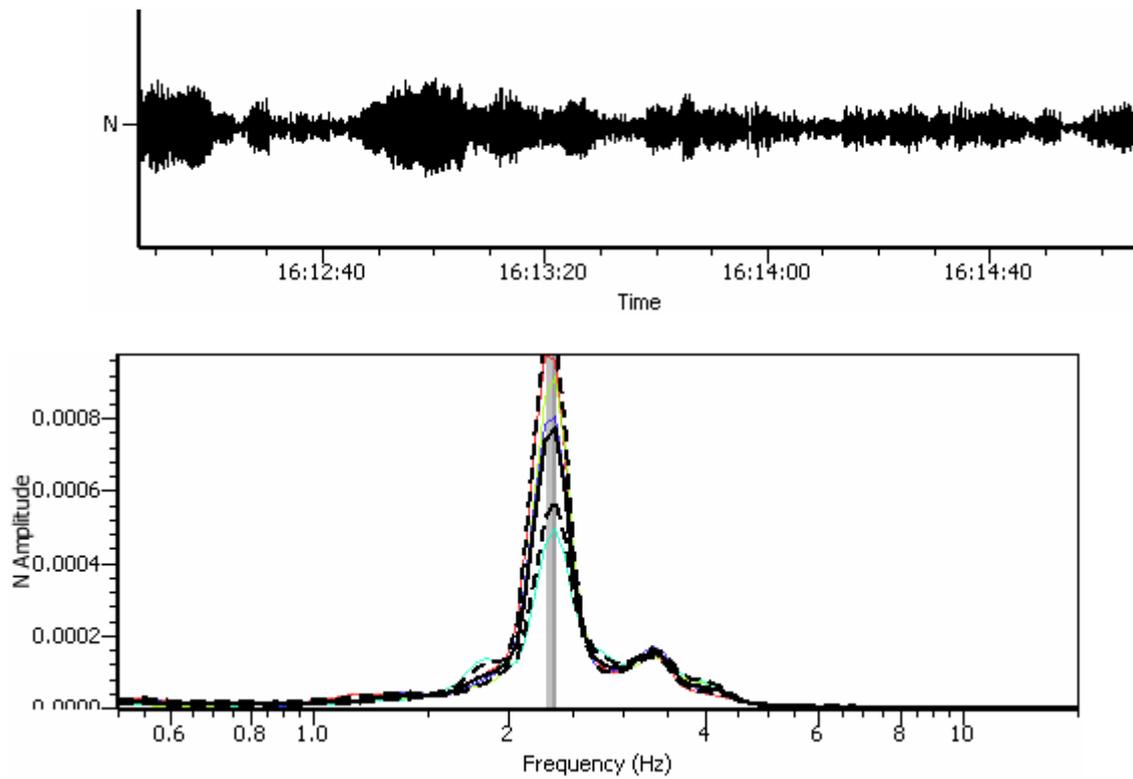


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

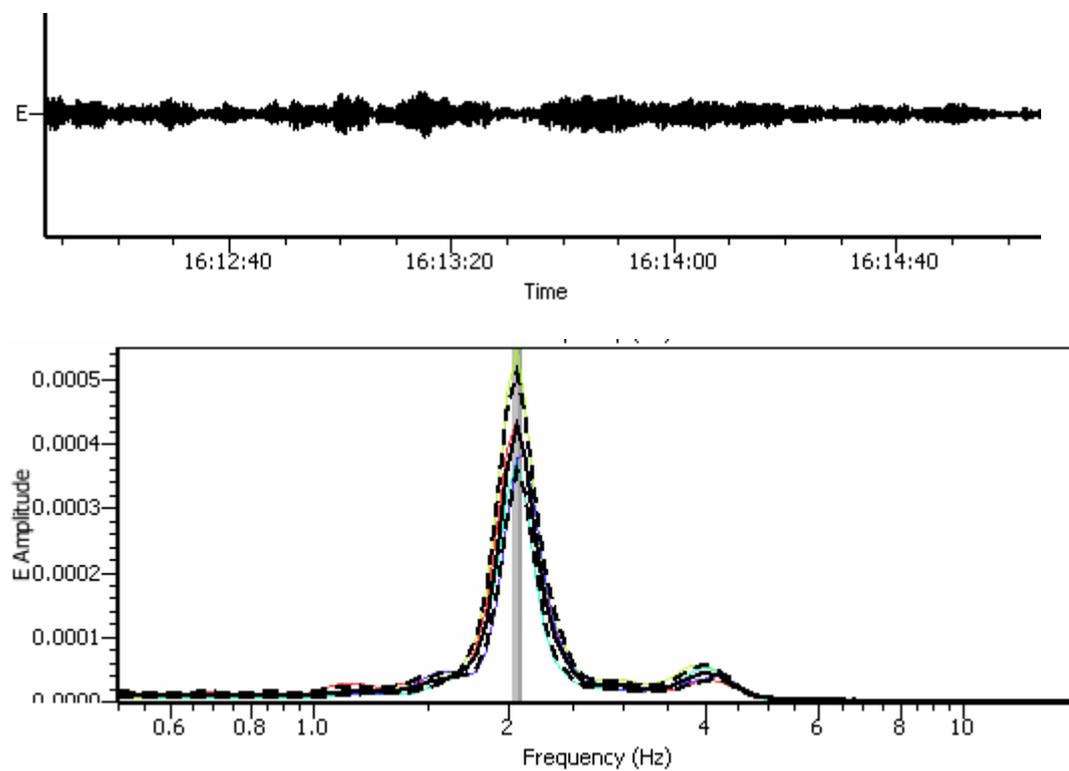


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 49cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

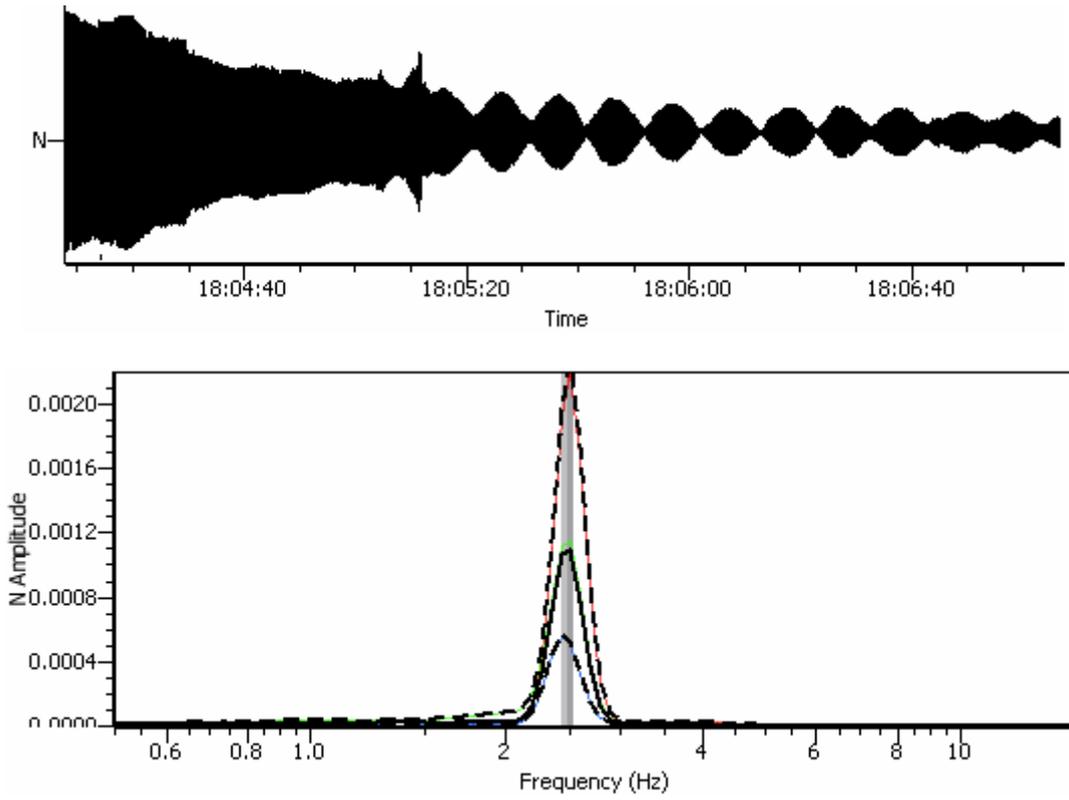


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

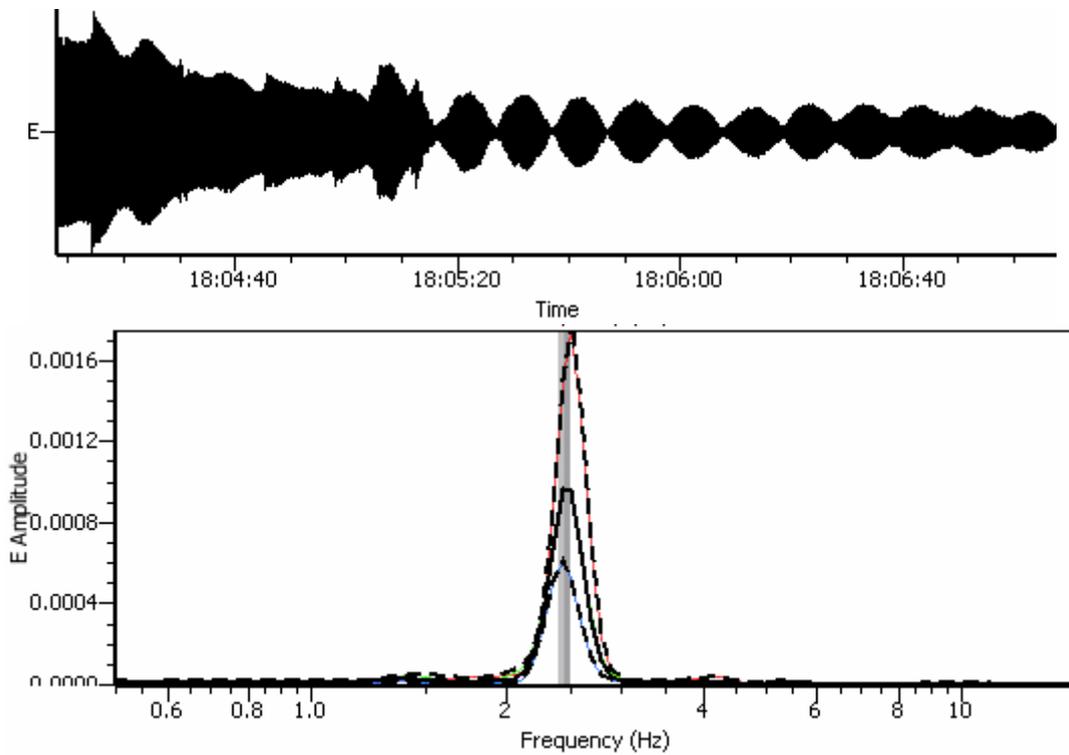


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 49cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

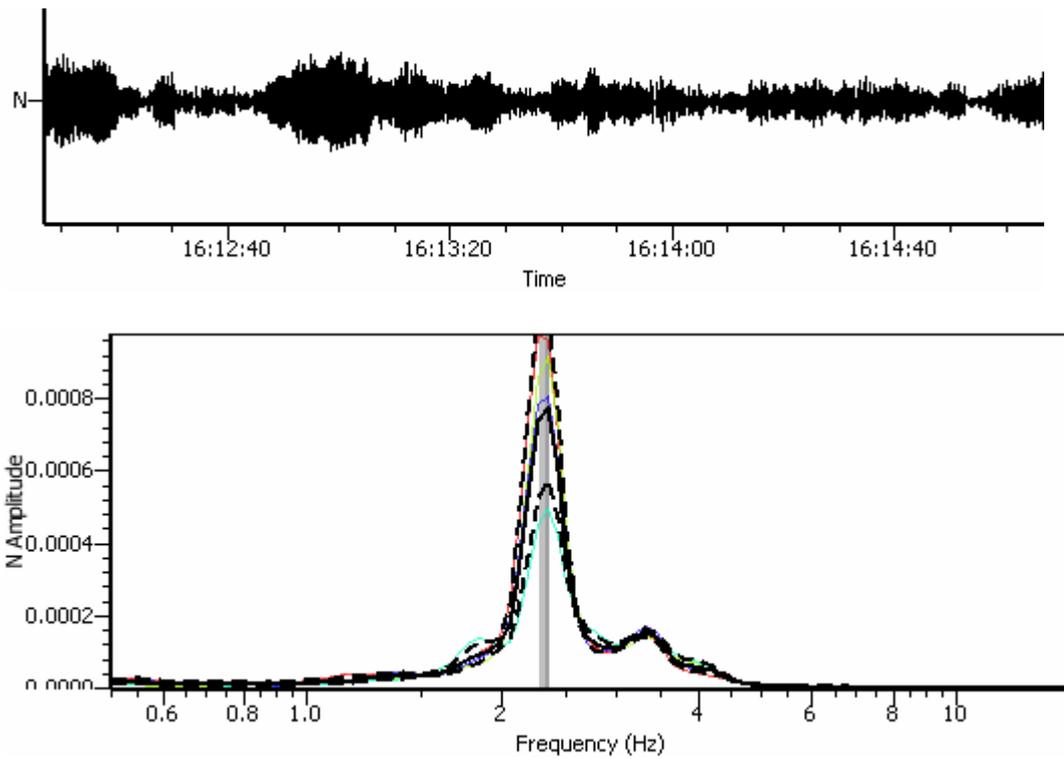


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

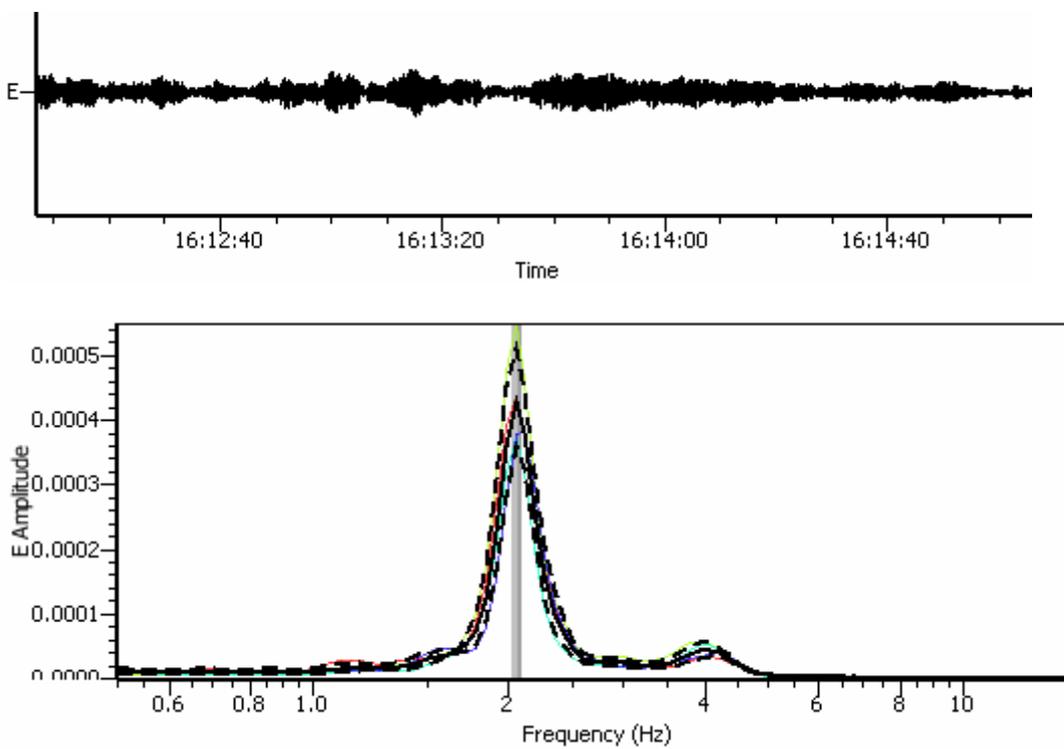


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 53cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

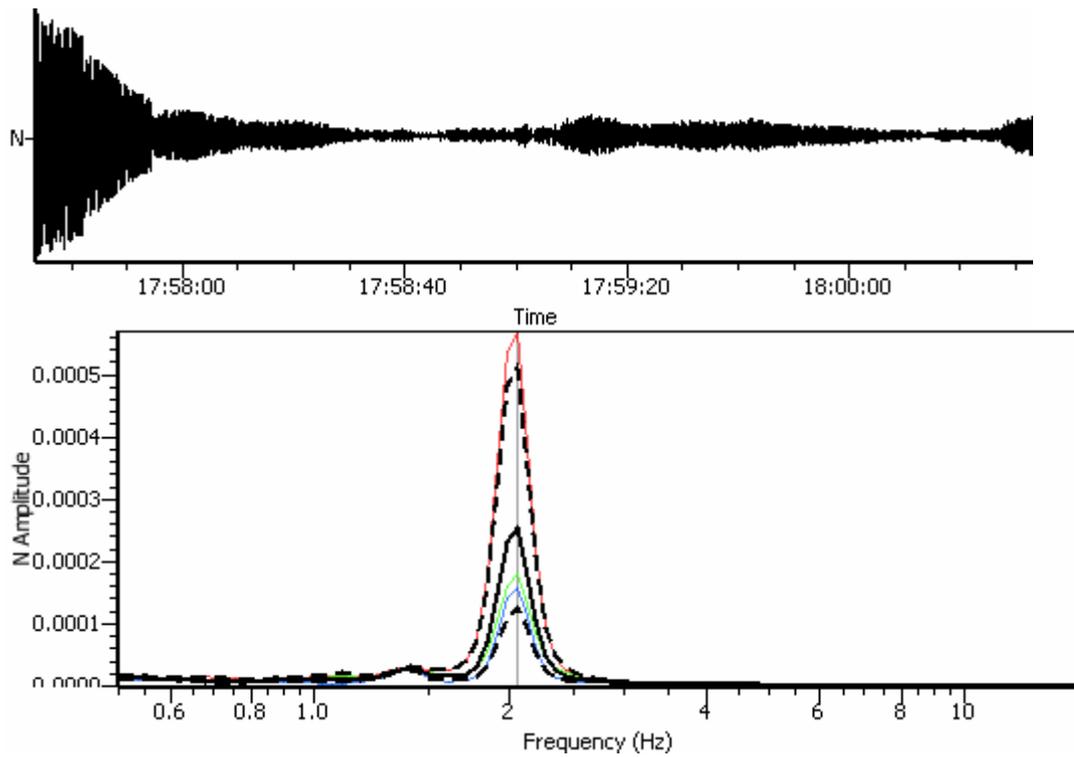


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

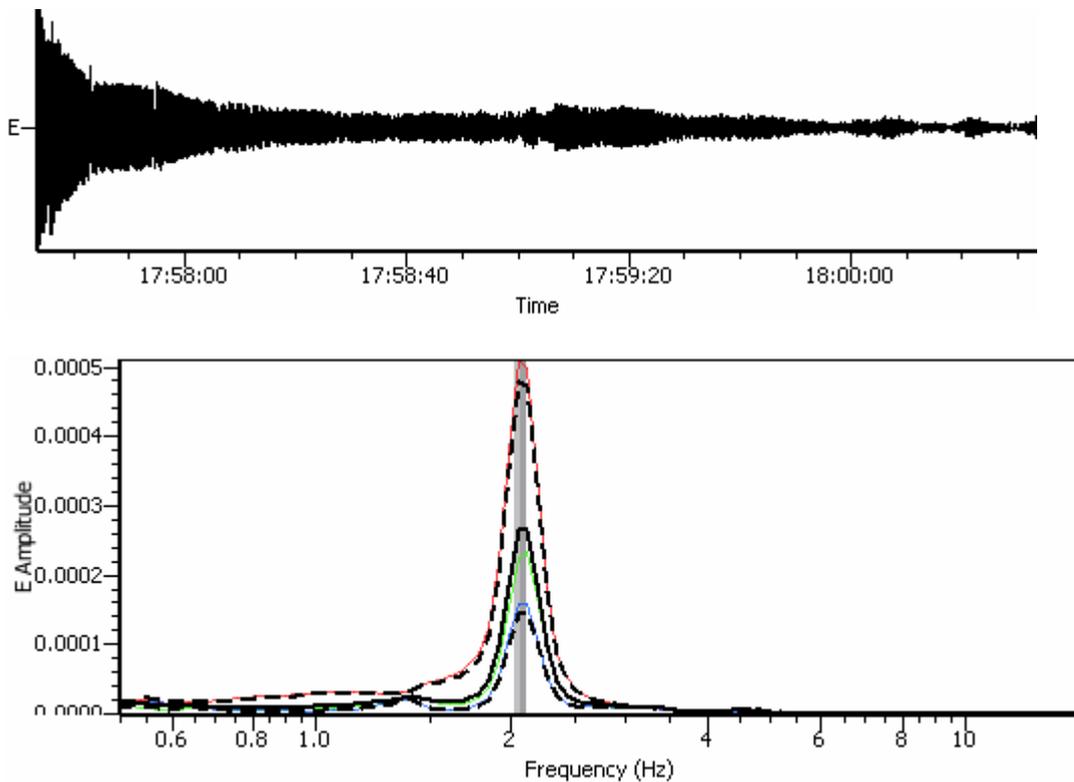


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 53cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

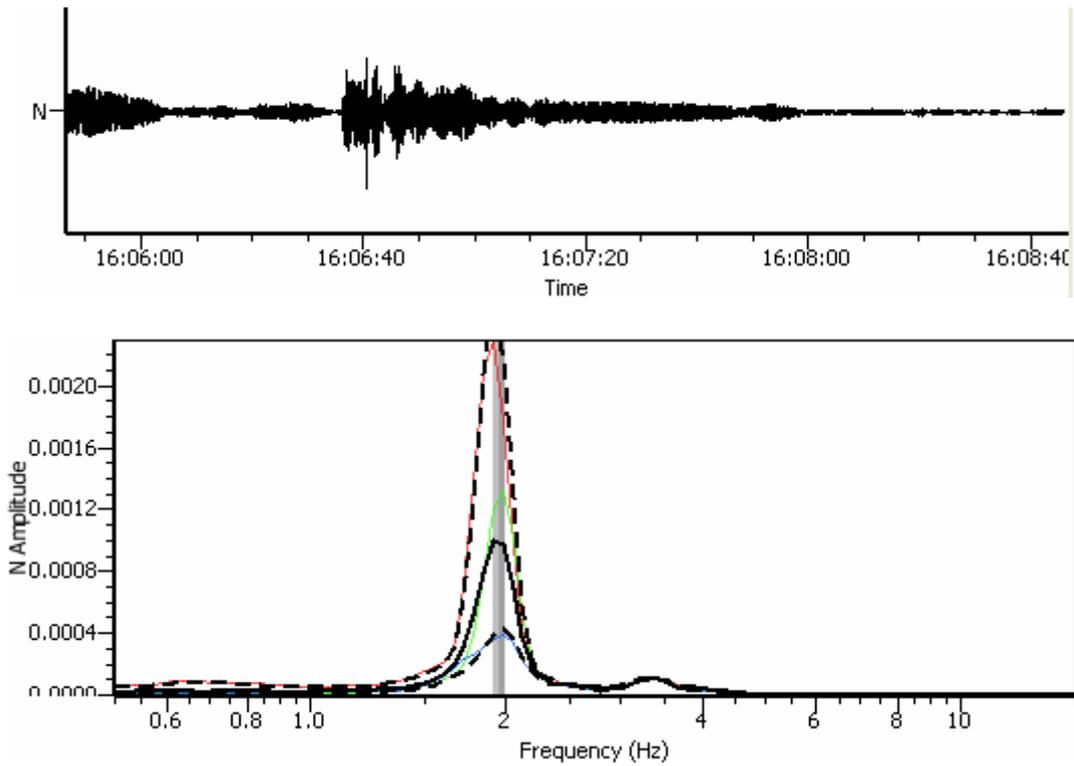


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

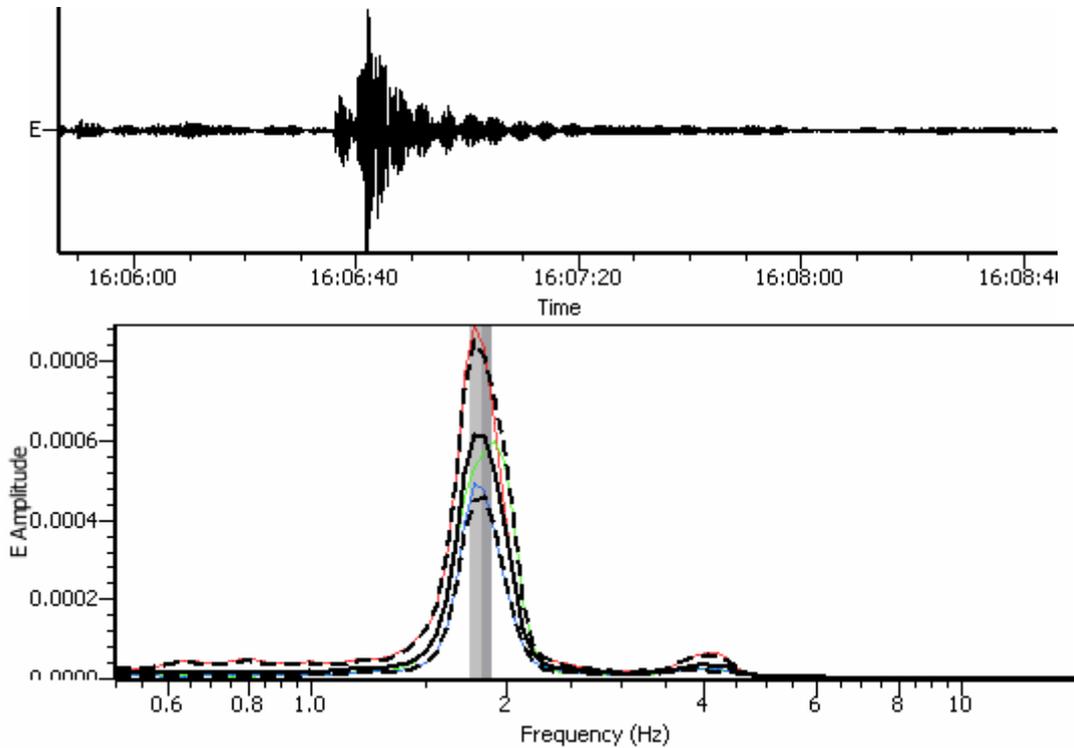


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 61cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

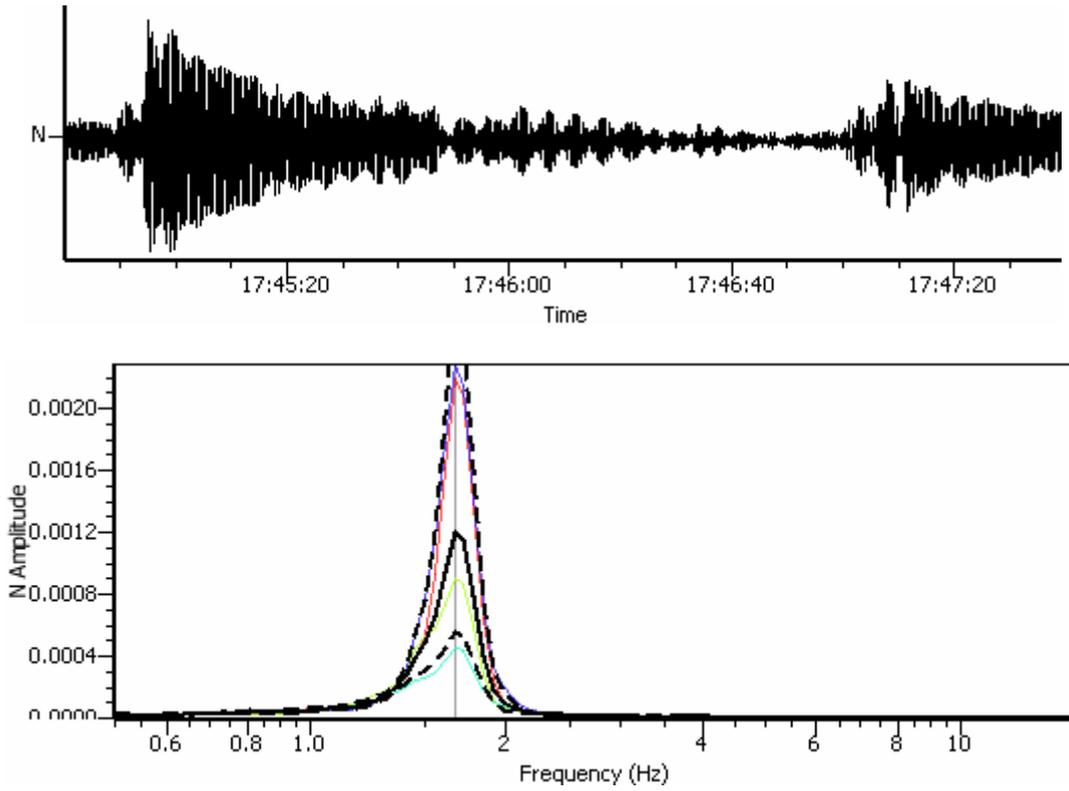


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

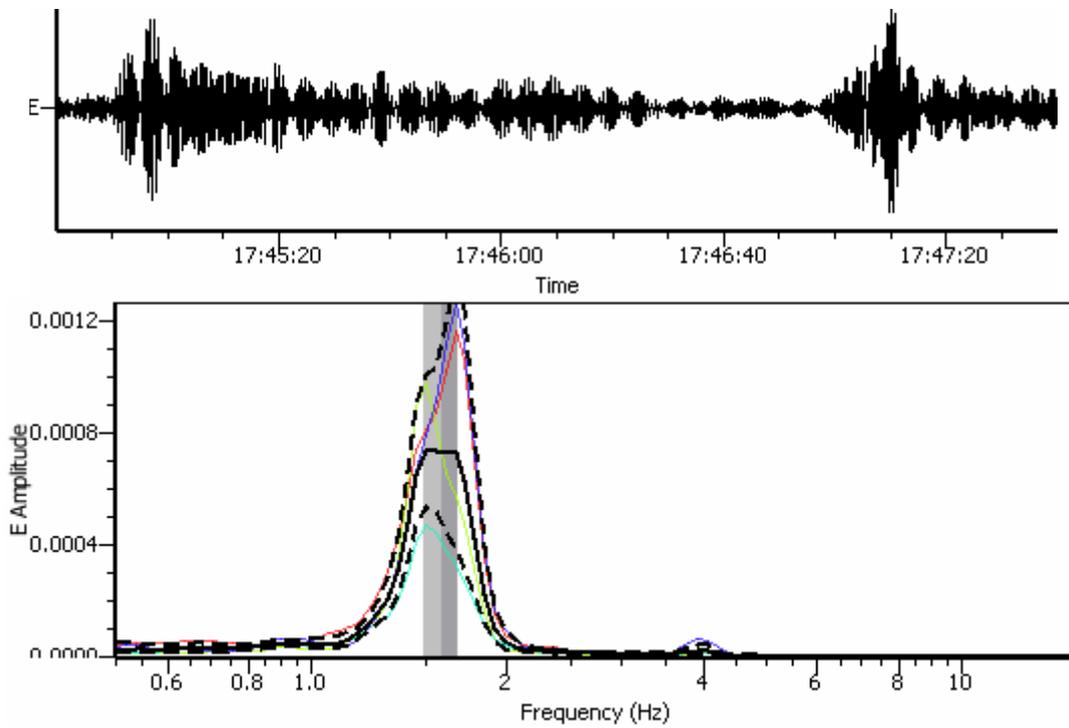


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 61cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

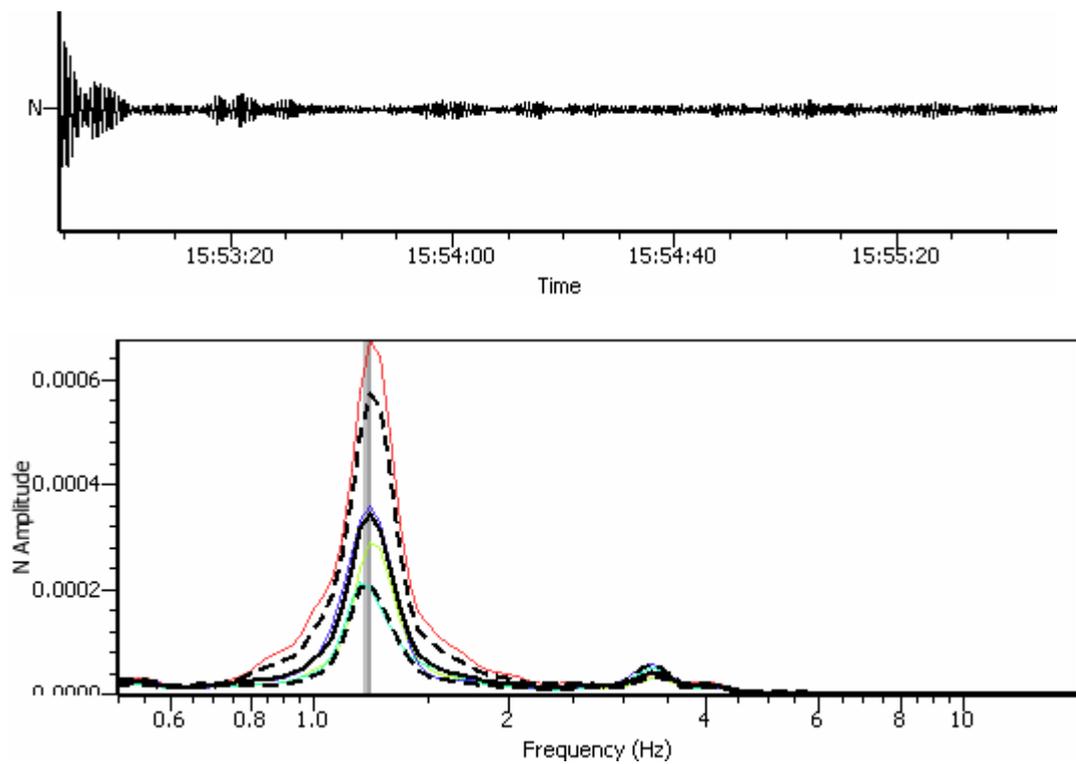


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

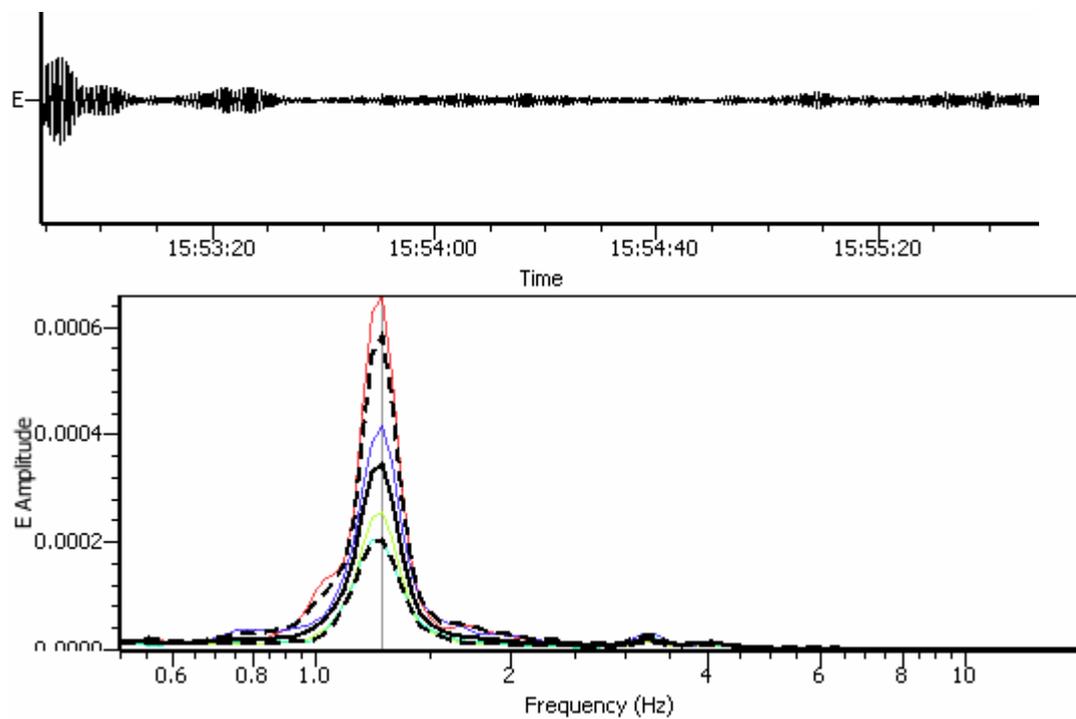


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 65cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

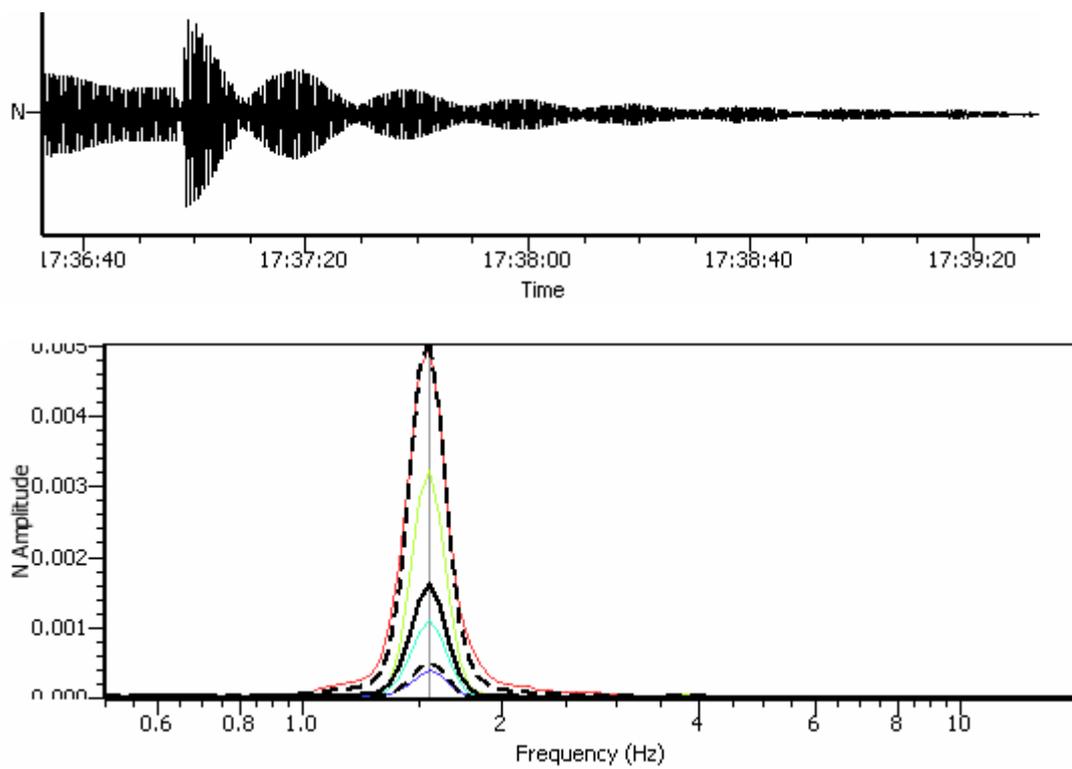


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

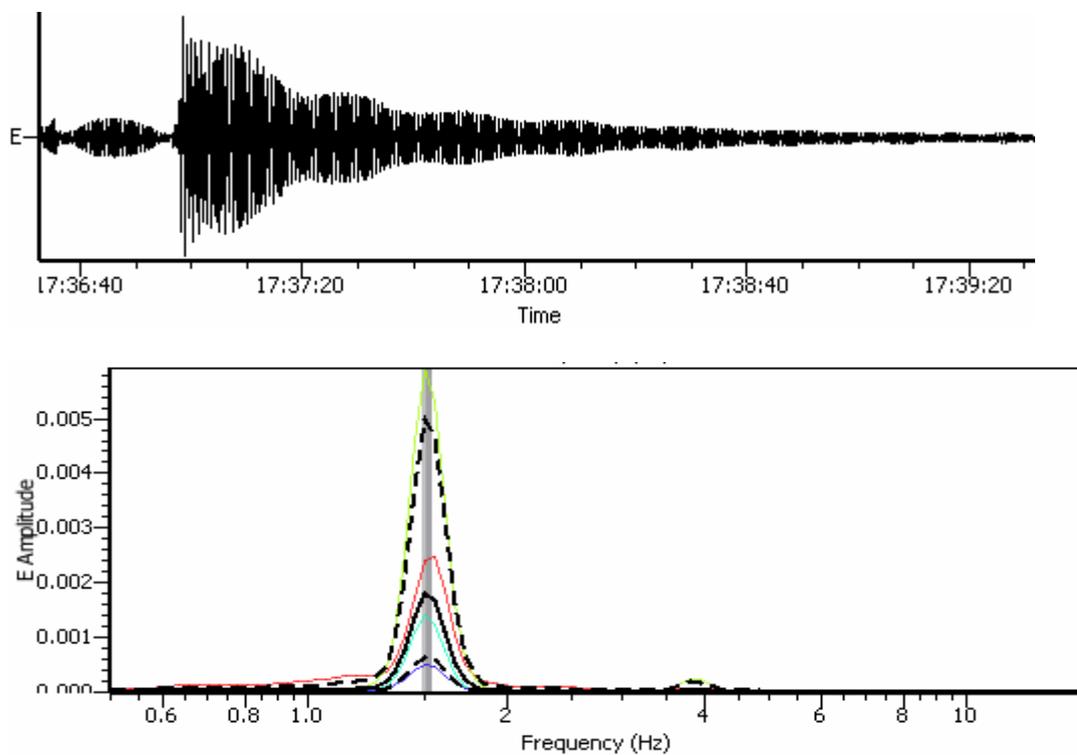


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 65cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

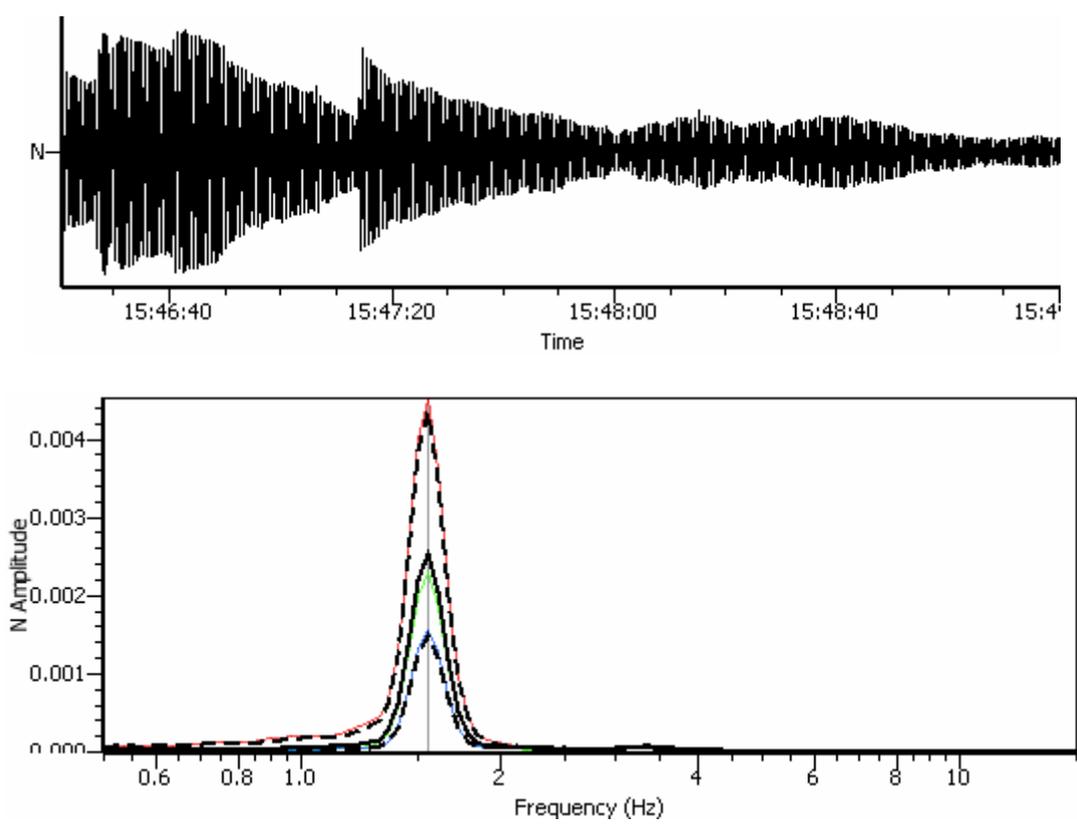


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

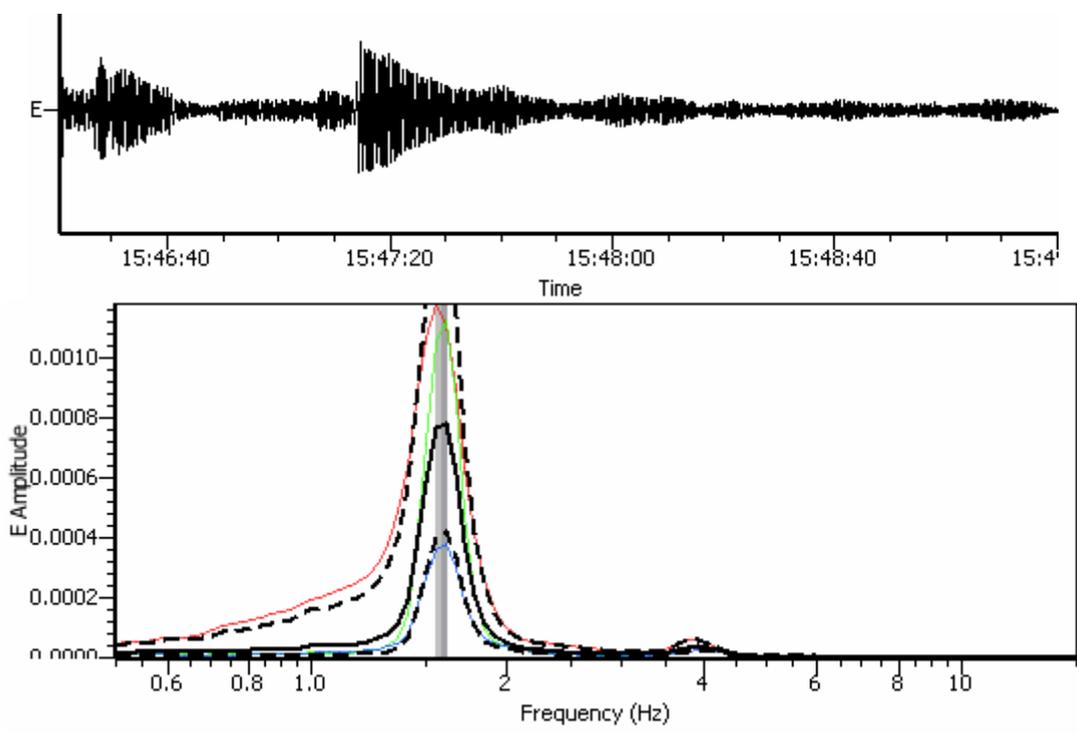


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 72cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

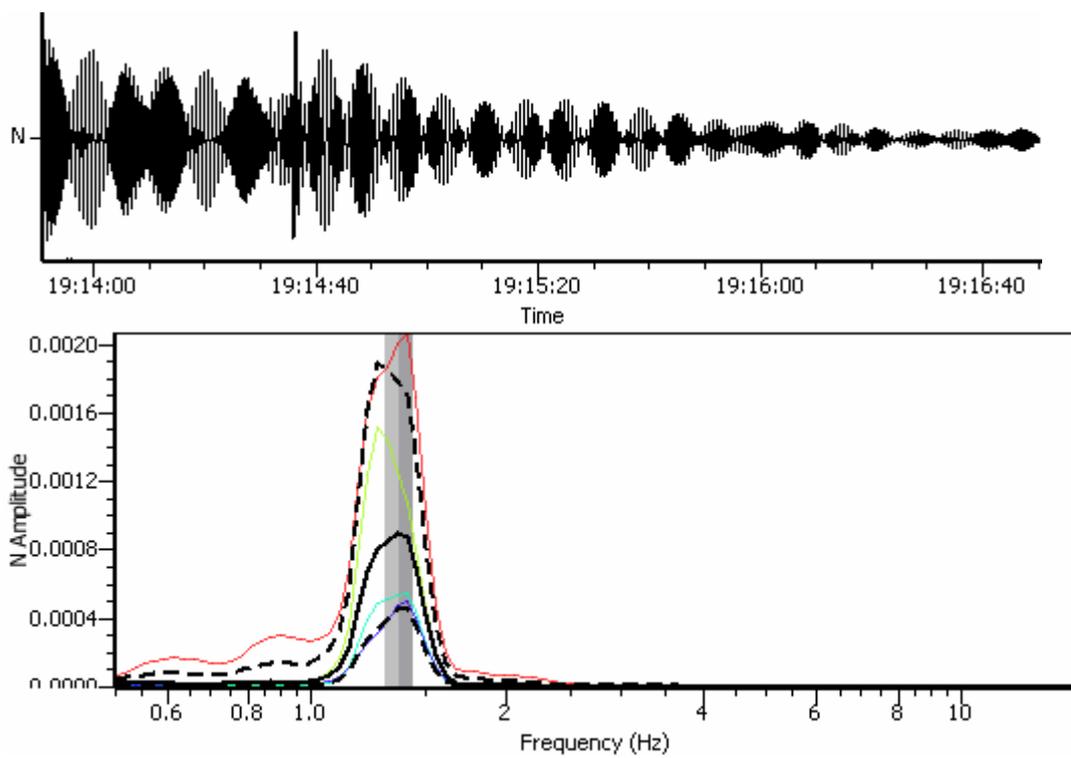


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

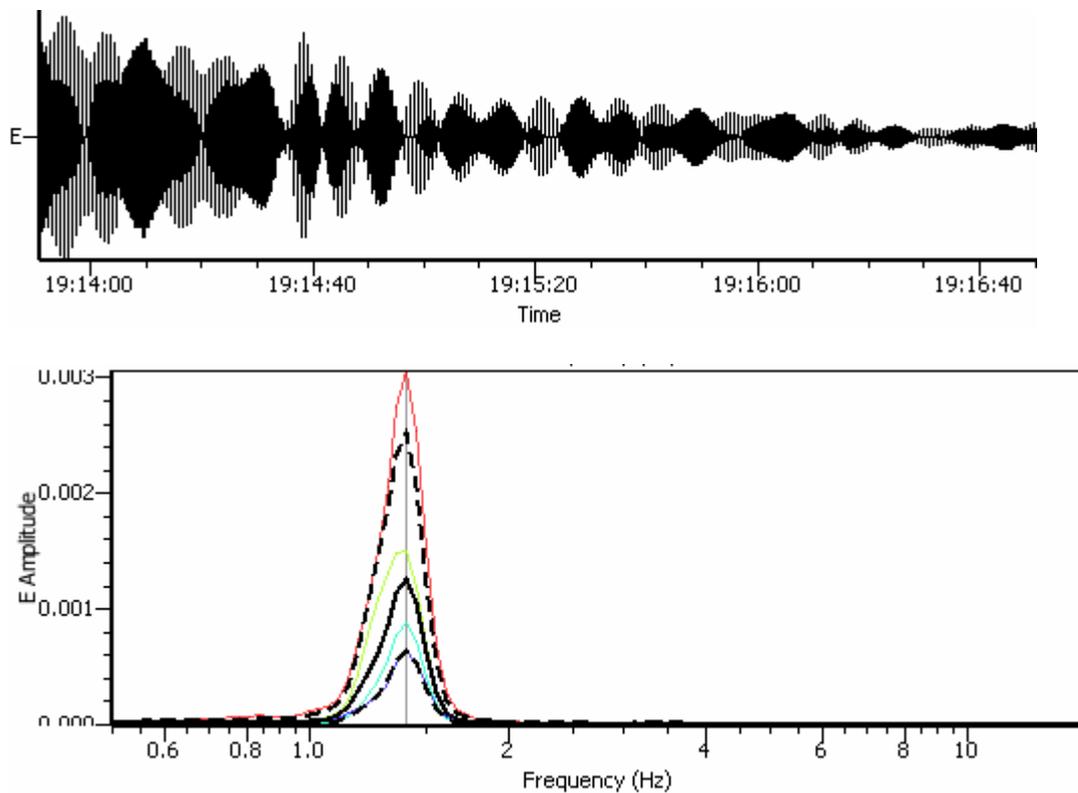


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 72cm pour une durée d'essai de 3 minutes.

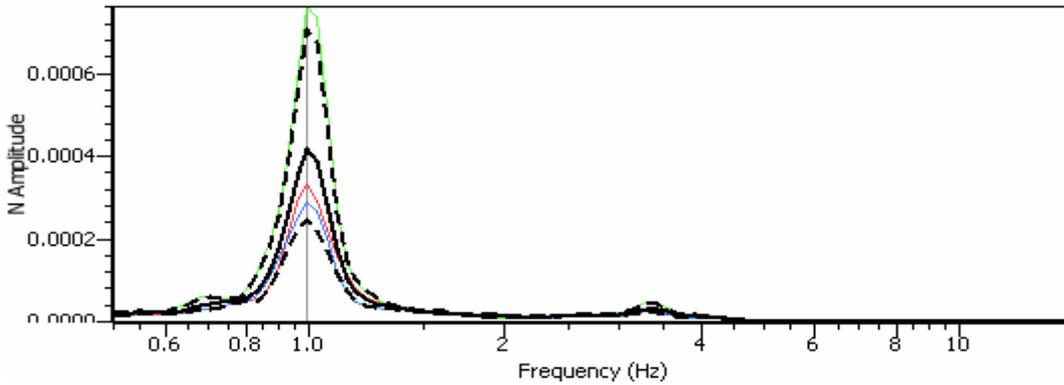
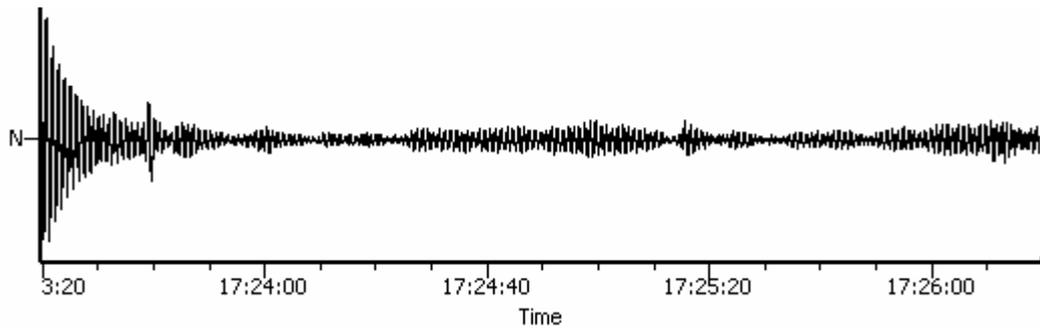


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

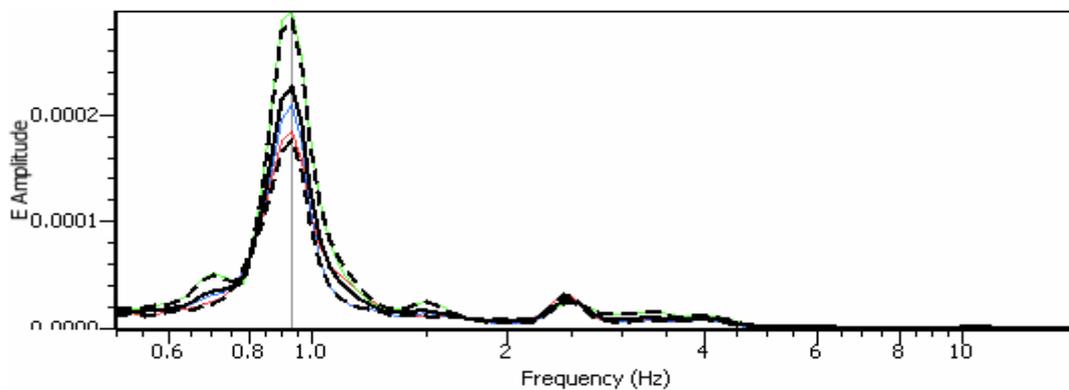
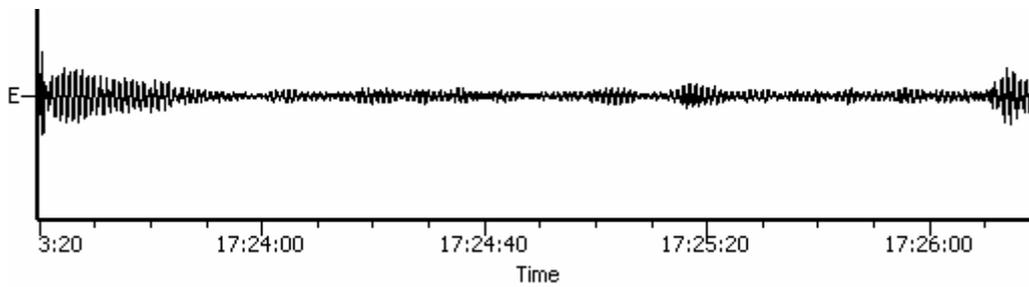


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

Hauteur de l'oscillateur est de 88cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

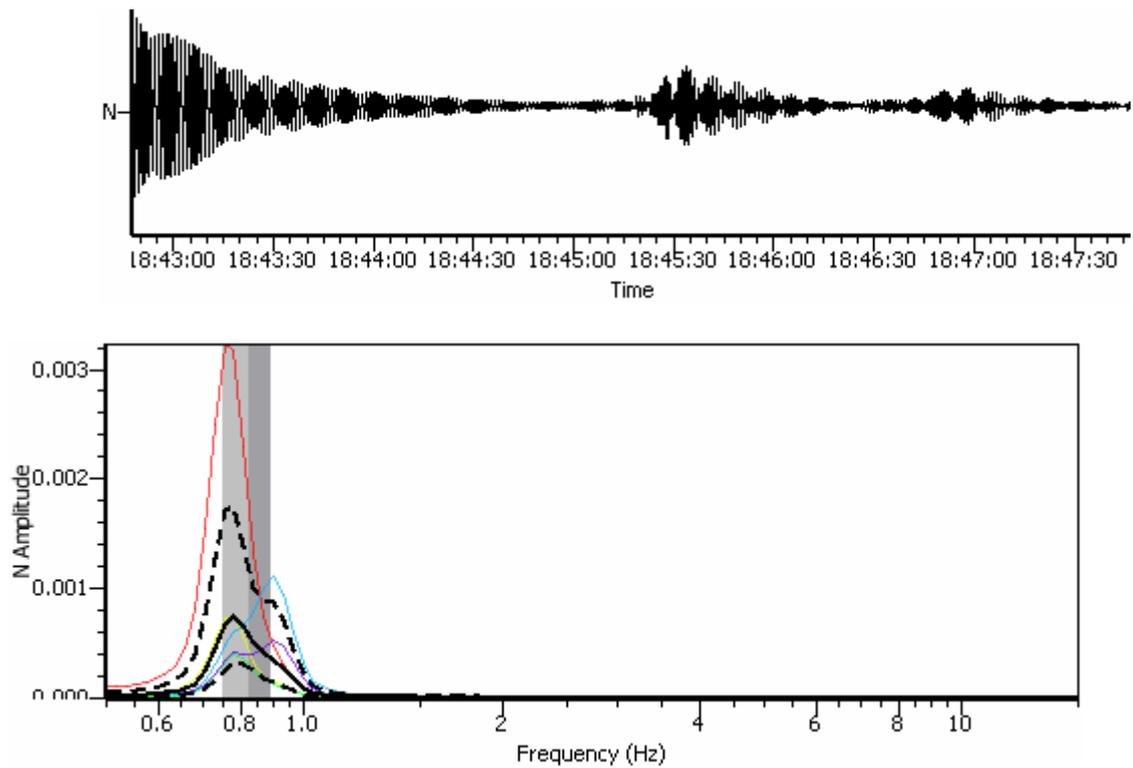


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau du R.D.C et le spectre correspondant.

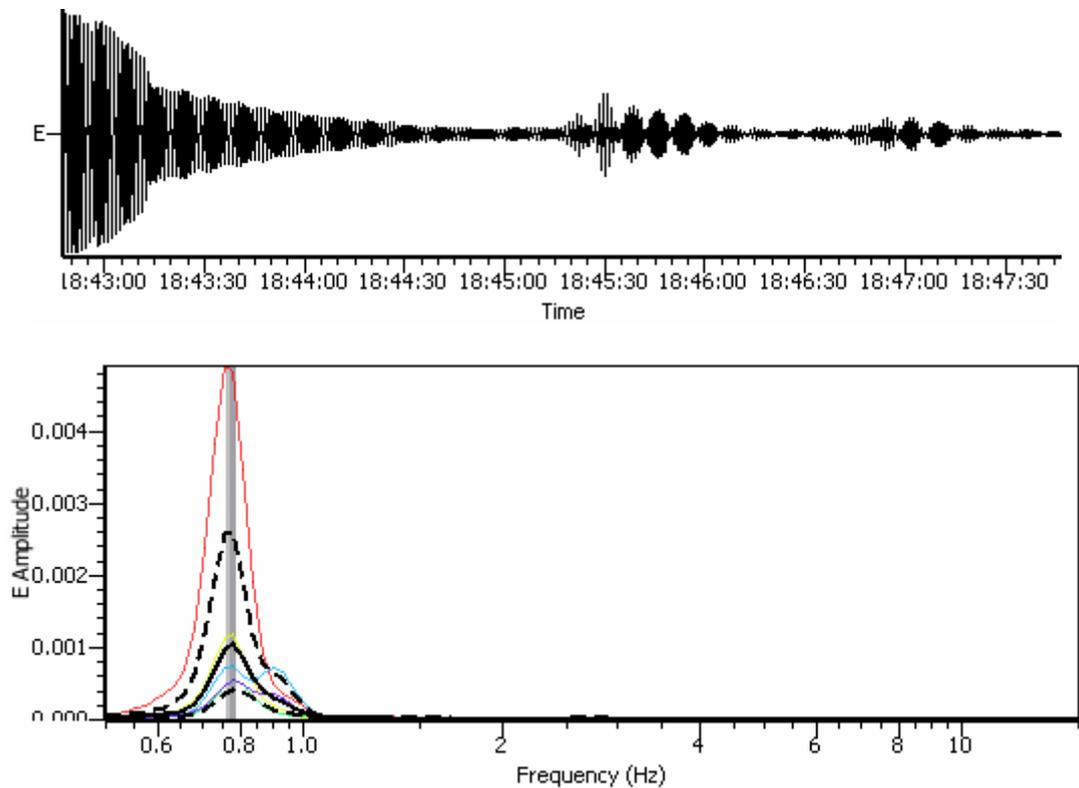


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau du R.D.C et le spectre correspondant. Hauteur de l'oscillateur est de 88cm pour une durée d'essai de 5 minutes.

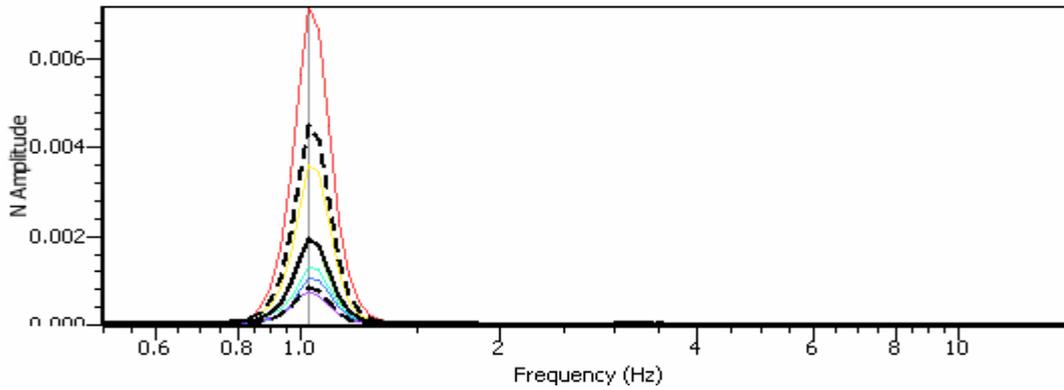
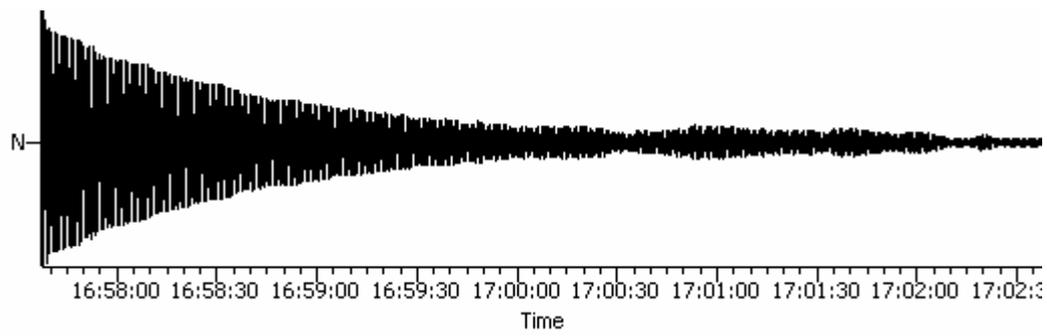


Figure : Enregistrement selon l'axe XX au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.

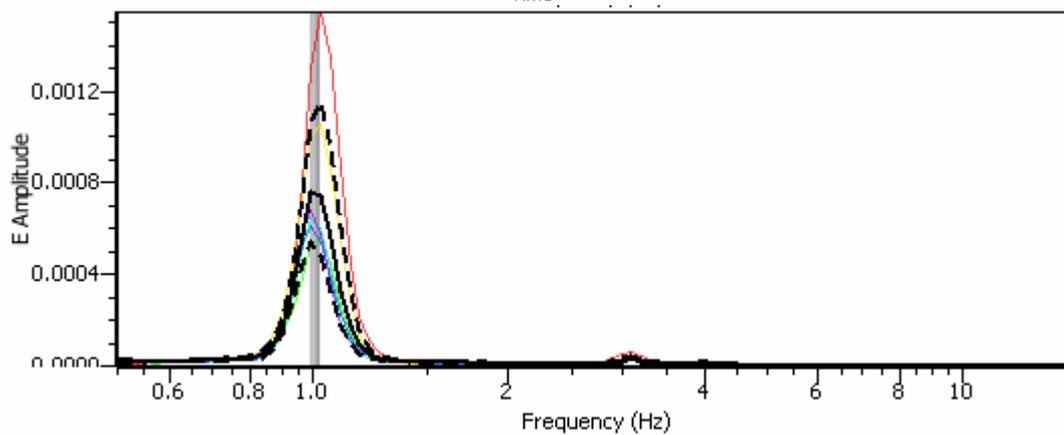
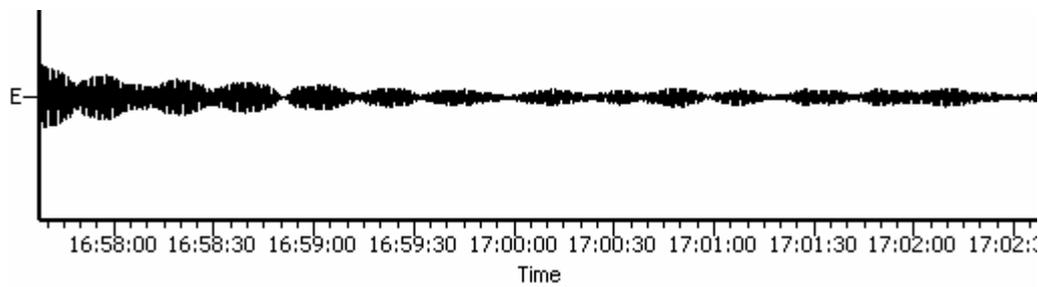


Figure : Enregistrement selon l'axe YY au niveau de la terrasse et le spectre correspondant.