

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Abou Bakr Belkaid**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Civil**



**Mémoire Pour L'Obtention Du Diplôme**  
**De Magistère**  
**Option: Seismic Risk & Earthquake Engineering**

Thème :  
**CONTROLE DE LA SANTE DES STRUCTURES**

Présenté en 2012 par :  
**Ing. AYAD MOHAMMED**  
Devant le Jury composé de :

Dr. A.MEGNOUNIF	Maître de conférences UABB- Tlemcen	Président
Dr. D. ZENDAGUI	Maître de conférences UABB- Tlemcen	Examineur
Dr. M.MATALLAH	Maître de conférences UABB - Tlemcen	Examineur
Dr. N.BOUMECHRA	Maître de conférences UABB- Tlemcen	Encadreur
Dr. K.HAMDAOUI	Maître de conférences UABB- Tlemcen	Encadreur

## Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements à nos encadreurs :*

*M. BOUMECHERA Nadir et M. HAMDAOUI Karim, pour les orientations et les conseils qu'ils ont sus nous prodiguer durant l'évolution de notre projet.*

*Nous voudrions aussi remercier Mr SALMI Mohammed Reda pour ses orientations et ses conseils.*

*Un remerciement à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.*

*Merci aussi à tous les membres du laboratoire de la mécanique structurelle de l'université de Pavie Italie pour leur soutien et leur aide.*

*Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de nos profonds respects pour avoir pris la peine d'examiner le manuscrit.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*

## Dédicace

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie  
Du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant  
La gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ceux que j'aime jusqu'à la frontière de l'imagination :  
Ma mère, mon père, sans eux, je n'aurais pas abouti à  
Ce stade d'étude, que dieu Puisse m'aider à les honorer,  
Les servir et les combler.*

*A ma famille et mes proches  
A mes frères et sœurs : Sid Ahmed ; Fouzia ; Nadjjet ; Diden*

*A tous mes collègues de travail.*

*Une spéciale dédicace à Mr METAHRI Chef de Projet de l'Autoroute Est Ouest Tlemcen  
ainsi que Mr SALMI Mohammed Réda Administrateur de Contrat à EGIS-ROUTE  
Tlemcen pour leurs soutiens*

*A tous mes amis(es), en particulier : Mokhtaria ; Nadjia ; Hayet ;  
Amina ; Fatima ; Sabah ; Samir, Yacine BOUSSOUFA .....*

*A tous mes enseignants.*

**Mohammed**

## Résumé

Le contrôle de la santé des structures est une technique qui permet à l'ingénieur d'identifier les caractéristiques dynamiques d'une structure et éventuellement identifier son niveau de dommages.

Pour contrôler la santé des structures, on utilise des méthodes pour la détection des dommages qui sont devenues par la suite un critère très important dans l'évaluation de la sécurité des ouvrages. Ces méthodes sont fondées soit sur des mesures continues ou des mesures périodiques.

Dans cette thèse, deux tests de vibration sont présentés : le premier sur un modèle réduit et le deuxième sur la structure du département de mécanique structurale de l'université de Pavie en Italie.

Pour la réalisation du premier test en laboratoire, des accéléromètres uni-axiaux ont été utilisés pour suivre le comportement dynamique du modèle soumis à une excitation dynamique forcée. Le deuxième test concerne une structure métallique réelle soumise à des excitations mineures ambiantes nécessitant plusieurs accéléromètres tri-axiaux. La lecture de la réponse dynamique des structures et leurs analyses permettent la détermination des caractéristiques dynamiques ainsi la possibilité de vérifier leur santé et aussi des dommages éventuels. Cette analyse repose d'une part sur une référence qui est un modèle numérique en éléments finis de la structure, et d'autre part une boîte à outils mathématiques pour la décomposition de la réponse dynamique et l'évaluation de la structure.

Ces deux exemples ont permis la reconnaissance de la structure et un contrôle de leur santé. Cet outil mathématico-technologique permet une évaluation d'une structure ou un ouvrage quelconque avec une précision appréciable.

### Mots clés :

Séisme, vibrations ambiantes, modèle réduit, modes propre, fréquences, SAP2000, MATLAB.

## Abstract

The Structural Health Monitoring (SHM) is a technique which allows the engineer to identify the characteristics of a structure and possibly to identify its level of damage.

To check (control) the structures health, we use methods for the damage detection of the damage which became afterward a very important criterion in the evaluation of the safety (security) of the works. These methods are based (established) either on continuous measures or periodic measures.

In this thesis, two tests of vibration are presented: the first one on a reduced model where the second on the structure of the department of structural mechanics of the university of Pavia in Italy.

For the realization of the first test in laboratory, accelerometers united - axial were used to follow the dynamic behavior of the model subjected to a forced dynamic excitation. The second test concerns a real steel structure subjected to ambient excitation requiring several accelerometers. The reading of the dynamic answer of the structures and their analyses allow the determination of the dynamic characteristics of the structure and so the possibility of verifying their health and also possible damage. This analysis rests(bases) on one hand on a reference which is a numerical model in elements finished by the structure, and on the other hand one limbs in mathematical tools for the decomposition of the dynamic response and the evaluation of the structure.

These two examples allowed the recognition of the structure and a control of their health. This tool mathematico-technological allows an evaluation of a structure or some work with a considerable precision

### **Key words :**

Seism, ambient vibration, reduced model, modes shape, frequency, SAP2000, MATLAB.

## ملخص

المراقبة الصحية للمباني هي أسلوب يسمح للمهندسين بتجديد الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية لأي مبنى معين, وخاصة تحديد حجم الضرر الموجود بهذا الأخير. لمراقبة صحة مبنى يوجد طريقتان لمعرفة الضرر و جعله معيار هام في تقييم أمن و سلامة المنشآت, وهذه الطرق تعتمد على إما اجراءات مستمرة او دورية. لانجاز هذه المذكرة قمنا بعرض تجربتين للاهتزاز, الاولى على نموذج مصغر و الثانية على مبني حقيقي بجامعة بافيا بايطاليا. لانجاز التجربة الاولى في المختبر قمنا باستخدام أجهزة قياس التسارع لتتبع الحالات الديناميكية لنموذج خاضع لقوة ديناميكية. بالنسبة للتجربة الثانية تخص هيكل حديدي خاضع لتأثير صغير ناتج عن حركة الطلبة داخل المبني. و لهذا إستعملنا عدة أجهزة لقياس التسارع ثلاثية المحاور. قراءة و تحاليل رد فعل الهيكل تسمح بمعرفة الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للهيكل. و تسمح لنا أيضا بمراقبة صحة المبني و معرفة الاضرار في حالة و جودها. هذه التحاليل تعتمد من جهة على النموذج الرقمي بعناصر محدودة للهيكل. و من جهة أخرى على أدوات رياضية لتحليل رد فعل الهيكل. هذان المثالين يسمحان لنا بمعرفة و مراقبة صحة أي هيكل معين.

### الكلمات الرئيسية

الزلازل, الاهتزاز الطبيعية, نموذج مصغر, النموذج خاضع لقوة ديناميكية.

MATLAB,SAP200

**SOMMAIRE****CHAPTER I Contrôle de la santé des structures**

1.1 Introduction sur le contrôle de la santé des structures .....	1
1.2 Méthodes de suivi périodique .....	1
1.2.1 Inspection visuelle périodique.....	1
1.2.2 Vibration basé sur l'inspection.....	3
1.2.3 Contrôle de la sante basé sur les signaux de vibration.....	7
1.3 Classification des techniques du contrôle de santé des structures.....	9
1.4 Contrôle de santé des structures et l'identification du système .....	10
1.5 Excitation des Structures de Génie Civil.....	11
1.6 Test de Vibration ambiante pour les Structure de Génie Civil.....	12
1.7 Méthodologies de la thèse .....	13

**CHAPITRE II Recherche bibliographie**

2.1 Critiques des littératures techniques.....	14
2.2 Les investigations pour la détermination des caractéristiques dynamiques .....	16
2.3 Les différentes techniques de contrôle de santé des structures .....	21

**CHAPITRE III Contrôle de la santé des structures et les techniques d'identification du système**

3.1 Introduction .....	24
3.2 Généralités sur l'identification du système .....	24
3.2.1 Définition .....	24
3.2.2 Les types de modèles.....	25

3.2.3 La modélisation mathématique .....	25
3.3 Les approche de l'identification du système.....	26
3.3.1 Modèle d'identification avec entrée et sortie (Input Output).....	26
3.3.2 Modèle d'Identification avec sortie uniquement (Output Only).....	28
3.3.2.1 Méthodes non paramétriques.....	29
3.3.2.2 Méthodes paramétriques .....	29
3.4 Rappel théorique sur les méthodologies de l'identification du systeme .....	29
3.4.1 Processus stochastiques.....	29
3.4.1.1 Classification des processus stochastiques.....	30
3.4.1.2 Propriétés statistiques du processus stochastique.....	31
3.4.1.3 La fonction de densité spectrale .....	31
3.4.1.4 Fonction de corrélation.....	34
3.4.2 Traitement du signal en dynamique des structures par la transformé de Fourier.....	35
3.4.2.1 Principe de la transformée de Fourier .....	35
3.5 Etape pour l'identification du système de sortie uniquement .....	36
3.6 Le logiciel MATLAB comme outil d'analyse de sortie.....	37
3.6.1 Import de données .....	37
3.6.2 La Phase d'estimation .....	37
3.6.3 Importation des données.....	38
3.6.4 Estimation du modèle.....	40
3.6.5 L'estimation des propriétés dynamiques.....	40



**CHAPITRE IV – Teste d’un modèle réduit sur la table vibrant**

4.1 Introduction .....	42
4.2 Description générale de la structure .....	43
4.3 Caractéristiques des matériaux .....	44
4.4 Description de l’équipement de mesure .....	44
4.4.1 Table vibrante.....	45
4.4.2 Régulateur numérique du signal.....	45
4.4.3 La boîte de jonction de quatre canaux.....	46
4.4.4 L’accéléromètre uni-axial.....	46
4.4.5 Un micro-ordinateur comme unité centrale de traitement.....	48
4.5 Procédure du test .....	49
4.5.1 L’acquisition des données .....	49
4.5.2 Résultats de l’essai expérimental .....	50
4.5.3 Identification du système par l’algorithme N4Sid “MATLAB” .....	50
4.5.4 Résultats identifiés par la méthode de sortie uniquement (Output only) .....	53
4.5.5 Résultats identifié par la méthode avec entrer et sortie (Input Output) .....	55
4.5.6 Résultats identifié par la méthode de la fonction de densité spectrale.....	57
4.6 Modèle éléments finis .....	60
4.6.1 Méthode des Eléments Finis .....	61
4.6.2 Principales hypothèses introduits sur le modèle .....	61
.....	
4.6.3 Propriété du matériau .....	61
4.7 Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes.....	63

4.8 Conclusion.....	64
---------------------	----

## **CHAPITRE V Application du contrôle de santé des structures**

5.1 Introduction .....	65
5.2 Description de la structure étudiée .....	65
5.2.1 Propriété initial du matériau .....	68
5.2.2 Description de l'équipement de mesure .....	68
5.3 Procédure du test de vibration ambiante .....	69
5.3.1 Identification du modèle.....	69
5.4 Construction du modèle éléments finis .....	74
5.4.1 Résultats de calcul du SAP2000 .....	75
5.5 Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes.....	76
5.6 Conclusion.....	78

## **Conclusion**

## Liste des figures

Figure 1.1 : Cycle de vie typique pour les structures de génie civil .....	2
Figure 1.2 : Principe de l'essai ultrasonique .....	4
Figure 1.3 : Principe de l'essai courant de Foucault .....	6
Figure 1.4 : Variation de la réponse d'une structure avant endommagement.....	7
Figure 1.5 : Variation de la réponse d'une structure après endommagement .....	8
Figure 1.6 : Schéma du système global du contrôle de la santé des structures .....	9
Figure 1.7: Table vibrante pour le test de vibration forcé.....	12
Figure 3.1: Système dynamique d'entrée avec $u(t)$ , la sortie $y(t)$ et les perturbations $v(t)$ et $w(t)$ .....	25
Figure 3.2 : marteau Impulsion .....	27
Figure 3.3 : Vibreur hydraulique pour exciter les ponts verticalement et les barrages latéralement .....	27
Figure 3.4: Exemple d'ensemble de fonction aléatoire .....	30
Figure 3.5: La fenêtre d'informations "Ident" principale .....	38
Figure 3.6: La fenêtre dialogue pour importer des données.....	38
Figure 3.7: La boîte de dialogue pour évaluer des modèles paramétriques .....	40
Figure 3.8: La fenêtre "Ident" après évaluation modèle.....	41
Figure 4.1: Le modèle réduit sur la table vibrante .....	42
Figure 4.2: Le modèle éléments finis 3-D de la structure étudiée.....	43
Figure 4.3: Mode de fixation des éléments dans les nœuds .....	44
Figure 4.4: Dimension des plaques métalliques.....	44
Figure 4.5: Table vibrante MTS 2.8 de $(1 \times 1) \text{m}^2$ .....	45

Figure 4.6: Régulateur du signale .....	46
Figure 4.7 : Boîte de jonction.....	46
Figure 4.8 : Accéléromètre uni-axial ES-U2.....	47
Figure 4.9 : L'acquisition des données.....	49
Figure 4.10 : Signale de la table vibrante .....	50
Figure 4.11 : le signal de vibration sur les premiers accéléromètres .....	51
Figure 4.12 : le signal de vibration sur le deuxième accéléromètres .....	51
Figure 4.13 : le signal de vibration sur le troisième accéléromètre.....	52
Figure 4.14 : La fenêtre d'informations "Ident" principale après transformation .....	52
Figure 4.15 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre I .....	53
Figure 4.16 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre II.....	54
Figure 4.17 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre III.....	54
Figure 4.18 : histogrammes de comparaison entre les trois accéléromètres des fréquences et des périodes par la méthode «Output only» .....	55
Figures 4.19 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre I.....	55
Figures 4.20 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre II .....	56
Figures 4.21 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre III .....	56
Figure 4.22 : histogrammes de comparaison entre les trois accéléromètres des fréquences et des périodes par la méthode «Input Output».....	57
Figures 4.23 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre I.....	57
Figures 4.24 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre II .....	58
Figures 4.25 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre III .....	59
Figure 4.26 : histogrammes de comparaison entre les trois accéléromètres des fréquences et des périodes par la méthode «PSD» .....	59

Figure 4.27 : histogrammes de comparaison des fréquences et des périodes entre les trois méthodes de calcul .....	60
Figure 4.28 : Model éléments finis en 3D .....	62
Figure 4.29 : Forme des cinq premiers modes de vibration .....	62
Figure 4.30 : Résultats des fréquences et des périodes propre obtenus par le logiciel SAP2000 .....	63
Figure 4.31 : Histogrammes de comparaison des fréquences et des périodes entre les trois premiers modes .....	64
Figure 5.1 : Vus globale sur la structure étudiée .....	66
Figure 5.2 : Détails de la structure sens longitudinale .....	66
Figure 5.3 : Détails de la structure sens transversal .....	67
Figure 5.4 : Détails de la structure. (a) Contreventement au niveau de la toiture, (b) Contreventement vertical.....	67
Figure 5.5 : L'emplacement des accéléromètres .....	67
Figure 5.6: System d'acquisition des données avec afficheur du signal .....	68
Figure 5.7: Accéléromètres tridimensionnels.....	69
Figure 5.8: Les fréquences propre détectées par la fonction PSD sous forme des graphes du premier accéléromètre .....	70
Figure 5.9: Les fréquences propres données par la fonction PSD sous forme des graphes du deuxième accéléromètre .....	71
Figure 5.10: Les fréquences propre données par la fonction PSD sous forme des graphes du troisième accéléromètre.....	72
Figure 5.11 : Comparaison entre les dix premières fréquences du signale enregistré les trois accéléromètres.....	73

Figure 5.12: Comparaison entre les dix premières périodes du signale enregistré les trois accéléromètres.....	
.....74	
Figure 5.13 Modèle élément finis en 3D de la structure.....	74
Figure 5.14 Les dix premiers modes propres de vibration.....	75
Figure 5.15: comparaison ,en termes de périodes ,entre les résultats expérimentalement et analytiquement trouvés. ....	77
Figure 5.16: comparaison ,en termes de périodes ,entre les résultats expérimentalement et analytiquement trouvés. ....	77

## Liste des tableaux

Tableau 1.1:Description du temps pour faire le prochain contrôle d'un pont en béton.....	6
Tableau 1.2:Classification des techniques de surveillance des structures .....	10
Tableau 4.1:Propriétés mécaniques initiaux du matériau.....	44
Tableau 4.2: Les caractéristiques de l'accéléromètre uni-axial "ES-U2" .....	48
Tableau 4.3: résultats des fréquences et des périodes propres du premier accéléromètre .....	53
Tableau 4.4:résultats des fréquences et des périodes propres du deuxième accéléromètre .....	54
Tableau 4.5: résultats des fréquences et des périodes propres du troisième accéléromètre.....	54
Tableau 4.6: résultats des fréquences et des périodes propres du premier accéléromètre .....	56
Tableau 4.7:résultats des fréquences et des périodes propres du deuxième accéléromètre .....	56
Tableau 4.8: résultats des fréquences et des périodes propres du troisième accéléromètre.....	57
Tableau 4.9: résultats des fréquences et des périodes propres du premier accéléromètre .....	58
Tableau 4.10:résultats des fréquences et des périodes propres du deuxième accéléromètre .....	58
Tableau 4.11 : résultats des fréquences et des périodes propres du troisième accéléromètre.....	59
Tableau 4.12:résultats récapitulatifs des fréquences et des périodes propres .....	60
Tableau 4.14:Résultats des fréquences et des périodes propre obtenus par le logiciel SAP2000.....	63
Tableau 4.15:Comparaison des fréquences calculées numériquement et expérimentalement sur les trois premiers modes.....	64
Tableau 5.1:Propriété mécaniques des matériaux .....	68
Tableau 5.2:Résultats des fréquences propres des dix(10) premier modes de du 1er accéléromètre .....	71
Tableau 5.3:Résultats des fréquences propres des dix (10) premier modes de du 2 eme accéléromètre .....	72

Tableau 5.4:Résultats des fréquences propres des dix (10) premier modes de du 3eme accéléromètre .....	73
Tableau 5.5:tableau récapitulatif des résultats des fréquences propres.....	74
Tableau 5.6:Résultats des fréquences propres des dix (10) premier modes par le programme Sap2000.....	77
Tableau 5.7:Tableau récapitulatif des fréquences propres expérimentaux et calculer.....	77



## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

#### 1.1 Introduction sur le contrôle de la santé des structures:

Le contrôle de la santé des structures est une technique qui permet à l'ingénieur d'identifier les caractéristiques d'une structure et identifier son niveau d'endommagement (Boller C., Staszewski WJ., 2044). Au cours des dernières décennies, la recherche de la performance dans la surveillance et la réhabilitation des structures sont devenues plus rentables au lieu de la démolition et la reconstruction de ces dernières. En plus, le montant des dommages dans ces constructions peut s'amplifier en raison des effets négatifs induites qui peuvent être combinés à une augmentation des charges appliquées et de la densité du trafic dans le cas des ouvrages d'arts à titre d'exemple.

Pour contrôler la santé des structures, on utilise des méthodes pour la détection des dommages qui sont devenues par la suite un critère très important dans l'évaluation de la sécurité de tout ouvrage (Rytter A., 1993). Pour cette raison, différents chercheurs ont déployé des efforts considérables dans cette approche.

Ces méthodes sont fondées soit sur les mesures continues ou mesures périodiques. Les mesures continues représentent la catégorie la plus fiable, mais aussi la plus coûteuse (Kullaa J., 2003). C'est pourquoi de nombreux scientifiques ont concentré leurs recherches sur des méthodes basées sur l'inspection périodique.

#### 1.2 Méthodes de suivi périodique :

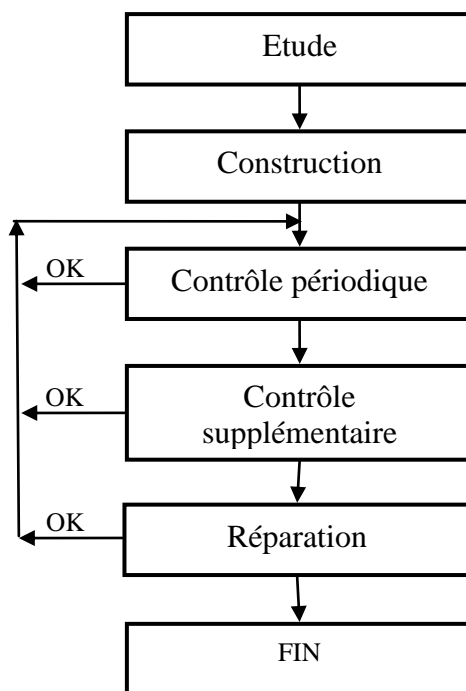
Le paragraphe suivant présente une description détaillée de la méthode d'inspection périodique utilisé pour la surveillance de la santé des structures.

##### 1.2.1 Inspection visuelle périodique :

L'approche de l'examen prédominant utilisé dans les structures de génie civil tel que les différents types de bâtiments, les ponts, les barrages et les plates-formes off-shore est l'inspection visuelle périodique (Beck J., Dionisio B., 2001). Cette inspection est

indispensable pour déterminer les dommages et aussi le niveau de résistance d'un ouvrage à une secousse ou à un tremblement de terre qui se produit au fil des années.

En Algérie, et à la suite d'un séisme, l'inspection se fait par l'organisme de contrôle technique des constructions (CTC) et les équipes d'ingénieurs. Le travail consiste en un examen général basé sur deux phases (Abed M., et al., 2005). La première, appelée «phase A», consiste à une évaluation des dommages; à ce stade, les ingénieurs établissent des fiches techniques d'évaluation sur l'état des dégradations et détériorations suivi par la rédaction des rapports portant adoption des premières mesures d'urgence tout en classant les constructions en fonction de leur préjudice en trois catégories: vert, orange et rouge. La deuxième phase, appelée «phase B», consiste à des études complémentaires et des techniques de réparations pour les constructions signées orange. Toutefois, dans la plupart des cas, cette opération est entravée par le fait que les éléments structurels (poteaux, poutres, planchers ...) sont généralement couverts. À ce moment, des efforts importants sont nécessaires pour accéder à ces zones pour une inspection visuelle (Dyke SJ., et al., 2000). L'existence des situations non détectées poserait un danger extrême pour les occupants lors et après une catastrophe à venir. Des inspections périodiques sont généralement effectuées en conformité avec l'organigramme représenté sur la figure 1.1. Elles visent à détecter les détériorations à un stade précoce pour garantir la sécurité adéquate et un coût raisonnable pour la réparation.



**Figure 1.1:** Cycle de vie typique pour les structures de génie civil (Rytter A., 1993).

### **1.2.2 Inspection basée sur la vibration :**

L'idée fondamentale de l'inspection et la surveillance des vibrations est d'obtenir des informations sur la résistance d'une structure et de sa réponse dynamique soit artificielle ou à des charges de service. La méthode est relativement nouvelle dans le cadre des structures de génie civil, mais il a été largement utilisé pour l'inspection des machines par le biais de nombreuses années.

La réponse de la structure sera généralement mesurée au moyen d'accéléromètres et / ou de jauges de contrainte. Un défaut local quelque part dans une structure sera en principe conduire à un changement dans les caractéristiques dynamiques de la structure. Cela signifie qu'une auscultation par l'intermédiaire des capteurs pouvant être placés n'importe où dans la structure et loin de la défektivité serait un bon moyen d'évaluation de ces caractéristiques, ce qui rend ainsi la méthode très attirante. Cependant, cette forme de mesure globale est seulement applicable à la détection de défauts d'une certaine intensité, car les petits défauts n'aura pas d'influence significative sur l'ensemble des paramètres dynamiques. La détection de quantités des petits dommages doit donc être utilisée sur la mesure locale. La distinction entre la mesure globale et locale n'est pas très importante. Comme les méthodes de diagnostic sont les mêmes pour les deux.

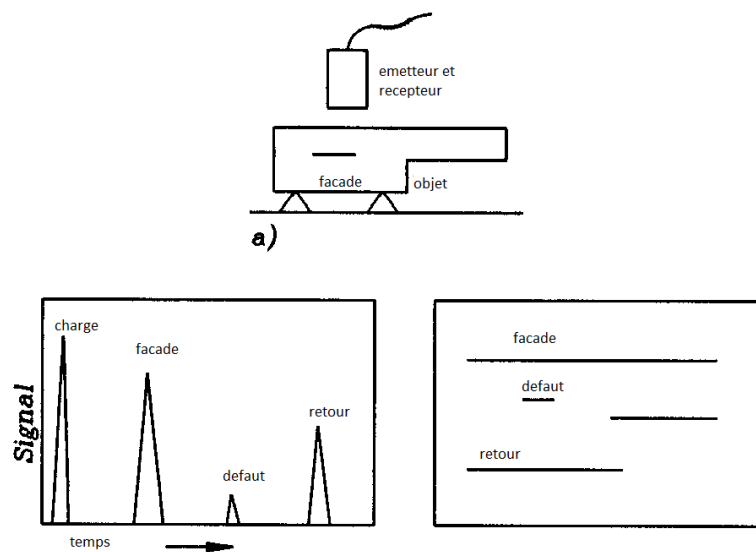
Différentes méthodes existent pour l'interprétation de la mesure, mais ils ne sont pas encore pleinement développés. Cela signifie que l'inspection et la surveillance des vibrations au moment réel doivent être complétées par d'autres méthodes d'inspection pour obtenir une vue globale de la solidité de la structure. En plus, la méthode est peu coûteuse et rapide.

Dans certains cas, des inspections visuelles peuvent être effectuées en utilisant des méthodes localisées expérimentales (connues sous le nom de techniques localisées de contrôle de la santé des structures) telles que les radiographies, les rayons X, les méthodes magnétiques ou les ultrasons. Mais ceux-ci sont de nature locale et ne peuvent pas fournir des informations sur la santé globale de la structure. Cela signifie que l'inspection et la surveillance des vibrations doivent être complétées par d'autres méthodes d'inspection pour obtenir une vue globale de la résistance de la structure.

### 1.2.2.1 Ultrasons :

L'idée de base dans la technique de contrôle par ultrasons est d'introduire des ondes sonores dont la fréquence est supérieure à 20 kHz dans l'élément du test par l'intermédiaire d'un émetteur et un récepteur. La vitesse des ultrasons est une propriété du matériau, ce qui signifie que l'écho reçu peut être utilisé pour détecter les discontinuités et les failles dans l'élément. Des nombreuses techniques de contrôle par ultrasons existent, qui diffèrent tout d'abord les unes des autres dans le nombre, l'emplacement et la technologie du récepteur et de l'émetteur.

L'ultrason est utilisé pour la détection des défauts dans les soudures et le laminage de produits en acier, la surface de l'élément doit être propre dans la zone du test. L'ultrason sera fiable et pratique seulement si leur utilisation se fait proche des défauts, une inspection globale fondée uniquement sur ultrasons, nécessite beaucoup du temps et un cout très chère. Pour cette raison, les ultrasons ne peuvent pas être autonomes, mais peuvent être utilisés comme des techniques complémentaires à d'autres méthodes d'inspection.



**Figure1.2:** Principe de l'essai ultrasonique.

### **1.2.2.2 Inspection des particules magnétiques :**

La méthode d'inspection des particules magnétiques est adaptée pour la détection de défauts de surface par exemple les fissures de fatigue dans les matériaux ferromagnétiques. La méthode fonctionne comme suit : un champ magnétique d'une puissance appropriée est fourni à l'élément du test. Le champ magnétique est alors rendu visible par des particules magnétiques. Les défauts parallèles ou presque parallèles ne seront pas détectés ; ce qui signifie qu'il est nécessaire pour magnétiser le point dans deux directions perpendiculaires pour obtenir une vue complète de l'évolution des défauts. Cela peut parfois être gênant en raison de la géométrie de l'élément. La méthode d'inspection de particules magnétiques est applicable à l'inspection sous l'eau. La surface de l'élément doit être propre dans le domaine du test. Une inspection de particules magnétiques ne peut révéler de défauts électroniques près des surfaces accessibles.

### **1.2.2.3 Radiographie :**

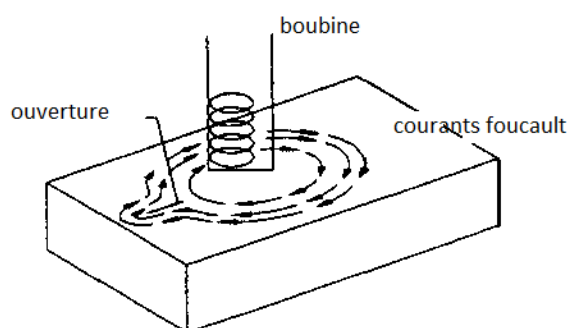
Une inspection radiographique est basée sur la propriété des rayons X et rayons Gamma pour pénétrer à travers les solides et noircir un film. La quantité de rayonnement qui passe à travers l'élément dépend de son épaisseur. Cela signifie que les défauts, les cavités, à l'intérieur de l'élément apparaissent comme des taches sombres sur le film. L'inspection radiographique peut être utilisée pour l'inspection de tous types du matériel sans aucun nettoyage des surfaces. Cependant, la méthode nécessite que les deux côtés de l'élément sont accessibles, ce qui réduit le champ d'application considérablement ; en plus, il sera trop fastidieux et coûteux d'effectuer une inspection globale basée sur la radiographie. L'inspection radiographique ne peut être jamais réalisée seule, mais elle doit être complétée par d'autres techniques d'inspection.

### **1.2.2.4 Courants de Foucault :**

L'idée principale de la méthode de courant de Foucault est de produire un courant de Foucault dans l'élément d'essai par l'intermédiaire d'un courant alternatif dans la bobine est tenue près de la surface de l'élément. Le courant alternatif dans la bobine soulève un champ magnétique appelé champ primaire qui produit le courant de Foucault dans l'élément. Ce dernier soulève un champ magnétique secondaire inverse au champ primaire.

Un défaut de surface va provoquer un changement dans le courant de Foucault et par là aussi dans le domaine secondaire. Un changement dans le domaine primaire, entraîne un changement dans le courant dans la bobine. Ce changement de courant est mesuré au moyen d'un ampèremètre et utilisé pour détecter les défauts de surface.

La technique du courant de Foucault est très attirante car elle n'a pas besoin de nettoyage et de contact à la surface de l'élément. La méthode est donc très rapide, mais son zone d'application est limitée à une inspection des zones de test sur les petits objets métalliques. Il sera trop fastidieux et coûteux d'effectuer une inspection globale basée sur le courant de Foucault ; par conséquent, l'inspection ne peut jamais être autonome, mais elle doit être complétée par d'autres techniques d'inspection.



**Figure1.3:** Principe de l'essai du courant de Foucault.

Dans le domaine des ponts, il a été établi des critères par des ingénieurs spécialisés pour quantifier le temps nécessaire pour faire un prochain contrôle. Le tableau ci dessous montre ces critères.

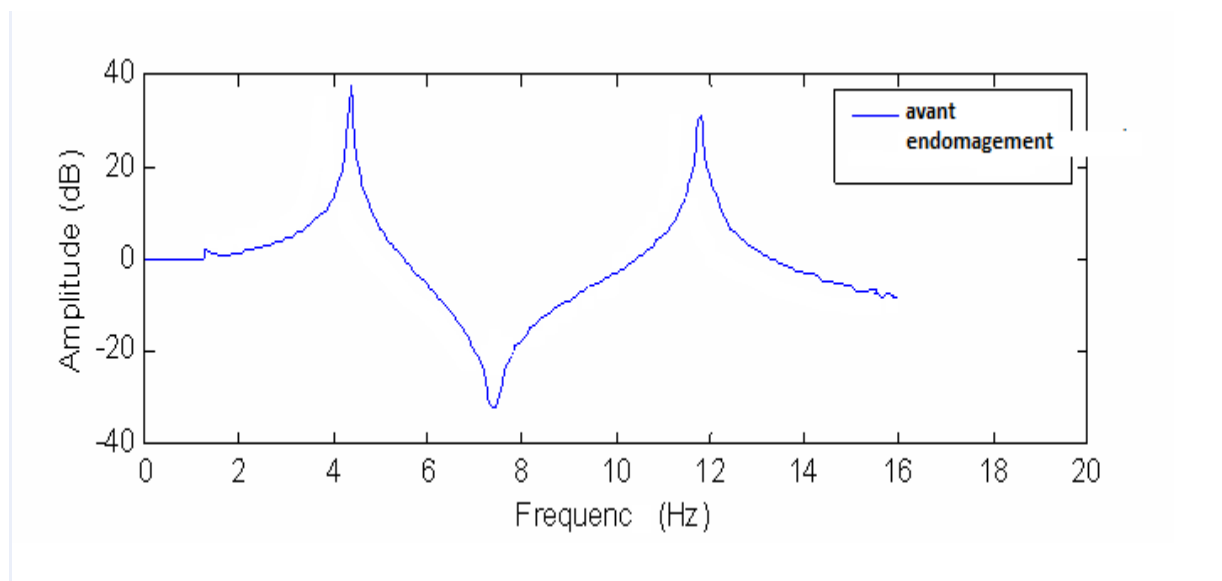
**Tableau 1.1** Description des périodes de contrôle d'un pont en béton (Rytter A., 1993)

Numéro	Action	Prochaine inspection
1	Domage négligeable	8 ans
2	Aucune réparation	6 ans
3	réparation de tous temps convenable	4 ans
4	Réparation des que possible	2 ans
5	Réparation immédiate	variable
6	Alarme	variable

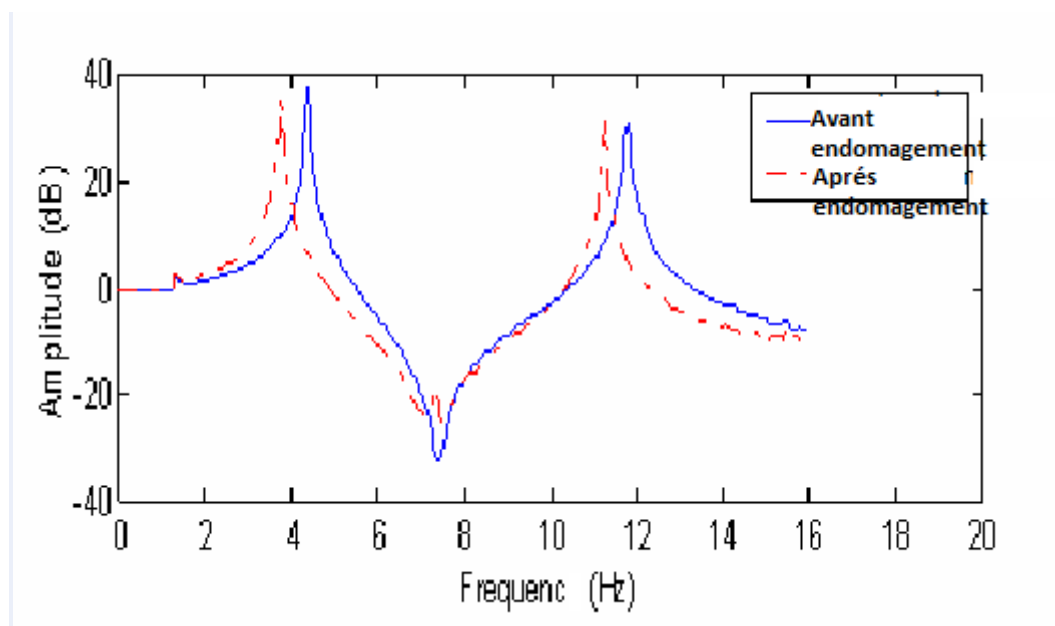
### 1.2.3 Contrôle de la sante basé sur les signaux de vibration :

Une alternative à des inspections visuelles et les techniques de tests localisés, est le contrôle de la sante basée sur les signaux de vibration (ou techniques globales du contrôle de la santé). Cette méthode est profondément étudiée dans différentes disciplines de la technologie (Fritzen CP., 2005), basée sur la théorie spécifiant que chaque structure a son comportement dynamique type qui peut être traitée comme une signature vibratoire, et tout dommage conduit à des changements (diminution) de la capacité ; par conséquent, des changements dans les propriétés physiques (masse, rigidité ou l'amortissement). Cette modification a un impact significatif sur le comportement dynamique de la structure toute entière.

Un test se fait sur une construction mixte, un bâtiment de trois niveaux, soumis à des charges dynamiques. La figure (1.2) montre la lecture de la fréquence propre du bâtiment avant la dégradation et la figure (1.3) est celui de la même structure après une légère dégradation.



**Figure 1.4 :** Variation de la réponse d'une structure avant endommagement.

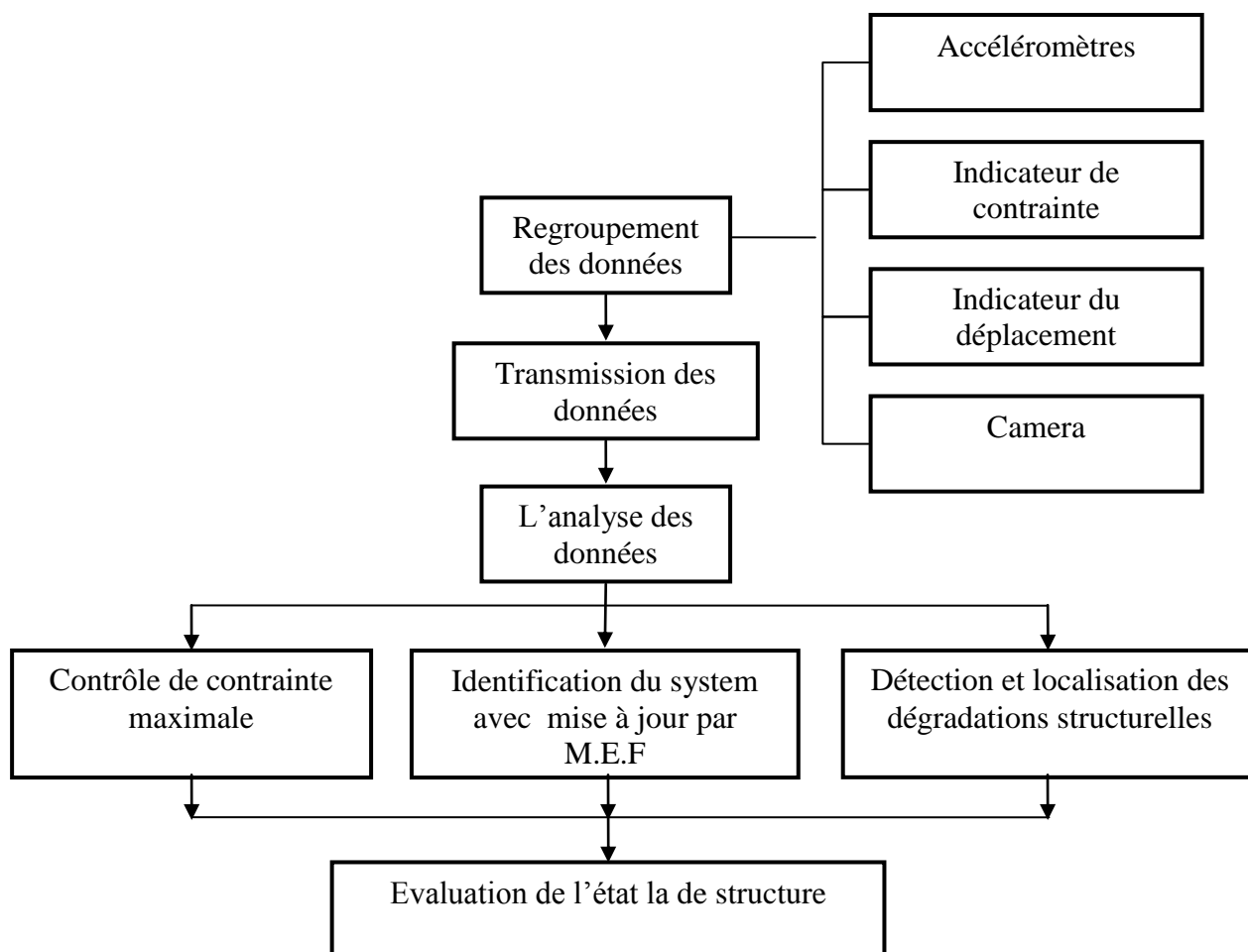


**Figure 1.5 :** Variation de la réponse d'une structure après endommagement.

Les systèmes de contrôle de la santé se composent généralement d'un ensemble de capteurs (accéléromètres, anémomètres, inclinomètres, capteurs de déplacement, capteurs de température, et jauges de contrainte) réparties sur la structure pour l'identification du système. En utilisant des câbles, chaque capteur communique avec un système d'acquisition de données qui est reliée à une unité centrale de traitement.

Le principal avantage des techniques globales du contrôle de la santé est que les mesures dans un seul endroit sont suffisantes pour évaluer l'état de la structure toute entière. En outre, ils sont très intéressants pour les ingénieurs en génie civil, car ils peuvent être utilisés sans accès direct à la structure et aucune information antérieure de dommages dans la structure n'est nécessaire, par conséquent, le temps et les coûts pour évaluer les dommages dans cette dernière est réduite au minimum. Le processus de techniques globales de contrôle de la santé est résumé dans la figure (1.4).





**Figure 1.6 :** Schéma du système global du contrôle de la santé des structures  
(Seible F., 2003).

Dans le paragraphe qui suit une présentation de la classification des techniques du contrôle de la santé de structure est présentée.

### 1.3 Classification des techniques du contrôle de santé des structures :

Les techniques de contrôle de santé des structures peuvent être classées sous différentes formes. Sur la base de leur capacité, Rytter classe ces techniques dans quatre niveaux différents (Rytter A., 1993).

- Niveau I: *Détection*, la méthode donne une indication qualitative que les dommages pourraient être présents dans la structure.

- Niveau II: *Localisation*, la méthode donne des informations sur la localisation probable des dégâts.
- Niveau III: *Evaluation*, la méthode donne des informations sur la taille des dommages.
- Niveau IV: *Conséquence*, la méthode donne des informations sur la sécurité réelle de la structure (définie comme un état de préjudice).

**Tableau 1.2.** Classification des techniques de surveillance des structures.

<b>Paramètres</b>	<b>Classification</b>
<b>Niveau d'identification</b>	Niveau I: Existence des dommages
	Niveau II: Existence des dommages et de l'endroit
	Niveau III: Existence des dommages, de l'endroit et la quantité du dommage
	Niveau IV: Existence des dommages, de l'endroit, la quantité du dommage et espérance de vie de la structure
<b>Données utilisées</b>	Domaine du temps
	Domaine de fréquence
<b>Excitation</b>	Excitation connue
	Excitation inconnue
<b>Modèle d'identification</b>	Modèle nécessaire pour l'identification de la structure
	Aucun modèle structurel requis pour l'identification

#### **1.4 Contrôle de santé des structures et l'identification du système :**

L'idée principale de l'identification du système est la modélisation des systèmes dynamiques, et d'étudier leur comportement à partir des données expérimentales. Elle contient toutes les techniques courantes pour calibrer les caractéristiques dynamiques d'un modèle. Elle permet également d'examiner les propriétés des modèles, et à vérifier si elles sont acceptables. Cette définition indique que l'identification du système est applicable sur plusieurs domaines en génie civil (Andersen P., 1997).

Les étapes de l'identification des propriétés dynamiques de structures de génie civil sont:

La première étape pour faire l'identification du système des ouvrages de génie civil est l'analyse modale. Elle est basée sur l'analyse des paramètres modaux des structures déterminés à partir des données expérimentales. Elle consiste à appliquer une amplitude suffisante de la force à la structure pour voir la réponse et détecter les fréquences et les modes propres de vibration réelle de la structure.

La deuxième étape de contrôle de la santé des structures, consiste à déterminer les caractéristiques dynamiques de la structure en service, utilisées comme base pour l'identification des modèles de calcul. L'analyse dynamique de ces modèles fournit des informations sur l'état des dommages sur la structure.

### **1.5 Excitation des Structures de Génie Civil :**

Les mesures des paramètres structurels parfaits peuvent être réalisées au moment d'un tremblement de terre (Aghakouchak A., et al., 2000). Toutefois, prédire la survenue de tremblements de terre est encore loin d'être expliquée par la science. Heureusement, plusieurs techniques expérimentales sont disponibles pour exciter artificiellement les structures. L'idée de base de ces tests est d'appliquer une intensité suffisante de la force à la structure en vue de produire des amplitudes de réponse utile.

L'identification du système nécessite des méthodes pour la détermination des caractéristiques dynamique de la structure, et pour cela on a besoin d'un moyen pour exciter la structure et avoir des signaux de vibration. Certaines des méthodes utilisées sont présentées comme suit :

- Test de vibration forcé: Pour ce type de test, la source de vibration peut être un appareil placé dans la structure ou proche d'elle, voir la figure (1.5).
- Test de la table vibrante: Par cette technique, les modèles réduits peuvent être testés.
- Essais de vibrations ambiantes: Pour la réalisation de cet essai l'excitation utilisée est sa dépend de l'ouvrage soumis au test. Par exemple pour les bâtiments, on utilise la charge du vent ; pour les structures off-shore, on utilise les vagues et pour les ponts, on prend la charge de trafic routier ou ferroviaire. Pour ces types d'essais, les données sur les signaux d'entrée ne sont pas nécessaires.

- Test de vibration Transit: Cette méthode de test est similaire à l'essai de vibration ambiante mais elle nécessite une énergie importante. Il est possible de suivre les modes élevés de vibration des structures étudiées et aussi des effets de comportement non-linéaires.

- Micro-excitations sismiques: Il est généralement utilisé pour les bâtiments, les fondations ou la surveillance des sols et des problèmes d'interactions. Les micro-excitations sismiques et les explosions souterraines sont utilisées dans ce type d'épreuves et de tremblements de terre qui sont parfois enregistrés.

-Essais de vibration libres: Elle est l'une des meilleures méthodes pour l'identification du système, les tests de recul pour les cheminées et les tests de mémoire RAM pour les ponts.



**Figure 1.7 :** Table vibrante pour le test de vibration forcé.

## **1.6 Test de Vibration ambiante pour les Structure de Génie Civil :**

Pour les structures complexes, volumineuses et lourdes, l'excitation artificielle est tout simplement impossible (cas des grands bâtiments, tours, ponts ...). Pour cela, on utilise des méthodes qui permettent d'identifier la structure exclusivement sur la base de mesures de la production provoquée par des vibrations naturelles (Wenzel H., Pichler D., 2005). Pour les tests de vibrations ambiantes, les vibrations sont enregistrées en fonction des charges de vent (pour les bâtiments), les charges de trafic (pour les ponts), les charges vagues (pour les structures off-shore). Pour ce type d'essais les signaux d'excitation sont enregistrés.

Le test de vibration ambiante a pour but de recueillir et d'enregistrer des vibrations qui sont à peine ressenties par le sens humain (en raison de leur faible amplitude). Le chargement naturel est utilisé comme source de chargement au lieu d'exciter la structure artificiellement.

Le principe utilisé pour évaluer les paramètres modaux d'un bâtiment en utilisant des tests de vibration ambiante est que l'excitation de la construction induite par le vent se compose d'un nombre presque infini d'harmoniques avec des périodes de vibrations différentes.

De plus, chaque composante harmonique dont la période correspond à une période naturelle de l'édifice est amplifiée dans la réponse du bâtiment en raison de la résonance.

Les principaux avantages de la technique des vibrations ambiantes sont (<http://www.cse.polyu.edu.hk/~dynamics/si.htm>):

- Le premier avantage de cette technique est le temps puisque l'équipement de l'excitation de la structure n'est pas nécessaire.
- L'essai n'interrompt pas le fonctionnement de la structure.
- La réponse mesurée est représentative des conditions réelles de fonctionnement de la structure.
- Moins coûteux que les autres tests de laboratoire.

## **1.7 Méthodologies de la thèse :**

Cette thèse se compose de six (6) chapitres principaux.

Après le chapitre introductif, le deuxième chapitre présente une revue bibliographique sur la thématique du contrôle de la santé des structures. Dans le troisième chapitre, la méthodologie du test de vibration est développée en détail.

Dans le quatrième chapitre, un test de vibration forcé par la table vibrante sur un modèle réduit en acier, réalisé dans laboratoire de Mécanique structurelle de l'université de Pavie en Italie, est présenté et discuté.

Le cinquième chapitre est consacré à une présentation d'un essai de vibration ambiant d'une structure réelle et son analyse. Elle concerne la structure métallique du hall du laboratoire du département de Mécanique structurelle de l'université de Pavie, Italie.

Enfin le mémoire est finalisé par une synthèse et une conclusion générale.

## CHAPITRE II

### Revue bibliographique

#### 2.1 Synthèse des littératures techniques :

Plusieurs documents et rapports ont été faits pour offrir au chercheur des littératures détaillé dans le domaine de contrôle de santé des structures. L'étude présentée par Richardson en 1980 (Richardson MH., 1980) axée sur la surveillance de l'intégrité structurelle pour les centrales nucléaires, les grandes structures, les plateformes offshore, et les machines tournantes à été associée avec une grande partie de littérature. Richardson a montré que la surveillance des niveaux de vibration globale pour les machines tournantes était devenue monnaie courante. Les tentatives de dommages structurels relatifs à l'évolution modale mesurée étaient encore au stade préliminaire

Une des littératures liées à la mise a jour des modèles élément finis, a été présentée par Mottershead et Friswell en 1993 (Mottershead JE., Friswell MI., 1993). Ce document, contient une longue liste des références sur le sujet, qui se rapporte aussi à la détection des dommages structuraux.

Le rapport rédigé par Doebling et al, en 1996 (Doebling SW., et al., 1996) contient une revue de la littérature technique concernant la détection, la localisation et la caractérisation des dommages structurels en utilisant des techniques qui examinent les changements dans la réponse aux vibrations mesurée sur les structures. Le rapport classe les méthodes selon les éléments des données mesurées et les technique d'analyse: les changements dans les fréquences modales, dans les formes de mode de mesure (et leurs dérivés), et les coefficients de flexibilité mesurés. En plus, le rapport classe et résume l'application des différentes méthodes pour le contrôle de la santé des structure, y compris les poutres, poutrelles, plaques, coquilles, cadres, ponts, plates-formes offshore, et d'autres structures civiles.

Housner, et al. (Housner GW., et al., 1997), ont proposé deux conditions : la première est d'évaluer l'état actuel de la technique dans le contrôle et la surveillance des ouvrages de génie civil, et la deuxième est de mettre un lien entre le contrôle structurel et d'autres domaines de la théorie du contrôle, en soulignant les différences, les similarités et les points

où la future recherche et les efforts d'application sont susceptibles de se révéler fructueux. Le contrôle de la santé des structures a été présenté comme une technologie importante. Une partie de l'étude a été consacrée à la surveillance de la santé et le sujet de détection des dommages, donnant un aperçu de l'évolution dans le domaine du contrôle de la santé des structures jusqu'en 1997. Des études de cas ont été présentées avec une discussion des besoins de recherche spécifiques à ce domaine.

Salawu (Salawu OS., 1997) a présenté en 1997 l'examen d'un certain nombre de méthodes pour identifier les dommages structurels en fonction des changements des fréquences naturelles. Plusieurs exemples ont été élaborés pour l'identification des dommages, et dans certains cas où sont situés, en utilisant seulement les variations des fréquences de résonance. Dans cette référence, une partie est incluse consacrée aux facteurs à considérer lors de l'utilisation des fréquences naturelles pour la détection des dommages.

Aghakouchak et al, (Aghakouchak AA., et al., 2000) a proposé en 2000 un aperçu des méthodes d'identification du système structurelle des systèmes dynamiques. Le premier document traitant avec des méthodes d'identification du système et des tests dynamiques, tandis que le second traitant de la théorie, de type des structures testées, l'histoire et prospective de l'identification du système. Le but de ces documents était d'examiner l'histoire, des méthodes d'identification du système, des types de tests et des théories résumées pour la prospection complète de l'identification du système. Ce document a discuté sur les résultats du projet de recherche conjoint de l'industrie, en Iran, qui a conclu sur plusieurs parties en cas d'identification du système. Les méthodes envisagées, par des processus aléatoires stationnaire et non stationnaire, ce sont les méthodes paramétriques et non paramétriques qui ont couvert presque toutes les méthodes existantes. Dans la partie finale du document, les auteurs ont présenté l'histoire. On a remarqué que plus de 120 articles différents et références ont été présentés et étudiés pour mettre en œuvre ces méthodes.

La revue de littérature proposée par Ivanović et al (Ivanović SS., et al., 2000) a étudié le contrôle de la santé des structures basé sur des vibrations ambiantes. Dans ce papier, une étude a été faite sur un bâtiment en béton armé en Californie, renforcé après avoir été endommagé le 17 janvier 1994 par un tremblement de terre Northridge et ses répliques. Un test a été fait sur le bâtiment par l'application de la méthode de vibration ambiante. Les résultats des deux tests par vibrations ambiantes, suivis du tremblement de terre ont été rapportés auparavant par Ivanović et al (Ivanović SS., et al., 2000).

Rytter (1993) (Rytter A., 1993), Doebling (1995) (Doebling SW., 1995), Andersen (1997) (Andersen P., 1997), Caicedo (2003) (Caicedo JM., 2003), et Casciati (2004) (Casciati S., 2004) sont à l'origine de plusieurs thèses de doctorat qui ont été publiées dans le domaine du contrôle de la santé des systèmes structurels et l'identification des dommages. Chacune contient une revue de littérature et un développement de la théorie. Aussi, un examen sur les techniques de contrôle de la santé des structures est fourni par Ghanem et Shinozuka (1995) (Shinozuka M., et Ghanem R., 1995).

Le document présenté par Jerome Peter Lynch en 2007 résume les efforts de recherche qui ont abouti à la conception de nombreux prototypes de détection explicitement destinées aux structures civiles. Le but de cette étude est d'intégrer les communications sans fil et les outils informatiques mobiles avec des capteurs pour fournir une plateforme de capteurs du signal.

## **2.2 Les investigations pour la détermination des caractéristiques dynamiques :**

Dans cette partie de l'examen, seule la littérature liée à l'utilisation des tests de vibrations ambiantes pour l'identification des dommages ont été incluses.

Dans la troisième décennie du dernier siècle (1930), l'enquête sur le littoral américaine a commencé à mesurer les périodes fondamentales des bâtiments par des tests de vibrations ambiantes. Trente ans plus tard, Ward et Crawford (1966) (Ward HS., et Crawford R., 1966) revitalise l'intérêt de cette méthode en démontrant qu'elle peut être utilisée pour établir les fréquences les plus basses et les modes de vibrations des structures.

En 1973, l'étude menée par Udwadia et Trifunac (Udwadia FE., et Trifunac MD., 1973), qui ont discuté sur le changement dans la réponse aux vibrations ambiantes avant et après un tremblement de terre. Ils ont fait une présentation des résultats de quatre tests de bâtiment sous l'effet des vibrations ambiantes : le premier sur 22 bâtiment à ossature d'acier, le deuxième sur 39 bâtiment à ossature d'acier, le troisième 9 bâtiment à ossature d'acier et un quatrième pour un bâtiment à neuf étages en béton armé. Ils ont analysé les effets de l'interaction entre les sols souples et une structure rigide immédiatement et longtemps après un tremblement de terre.



Mattheis et al, (Mattheis A., et al., 2000) ont présenté des exemples montrant la possibilité d'obtenir des informations réelles, sur la distribution des paramètres de rigidité et de contraintes d'un système de tuyauterie par des méthodes sans démontage. Une stratégie pour la mise à jour du modèle par le biais de l'analyse des vibrations ambiantes a été développée pour déterminer les contraintes réelles d'un système de tuyauterie. La méthode était basée sur le fait que les changements dans la rigidité du système sont reflétés dans les changements de fréquences naturelles expérimentalement détecté et les formes de mode liés en particulier à l'égard de la modification des contraintes des supports.

En 2001, Huang (Huang CS., 2001) a présenté une procédure d'identification des caractéristiques dynamiques d'un pont routier à trois travées à partir de ses réponses aux vibrations ambiantes en utilisant la fonction auto-multivariée régressif. Pour déterminer les matrices de coefficients du modèle, il a proposé une modification de l'approche des moindres carrés. La modification a été basée sur l'équivalence entre la matrice de fonctions de corrélation pour les réponses d'un système linéaire soumis à un bruit blanc d'entrée et les réponses déterministes sans vibration du système. La validité de la procédure est confirmée par l'excellent accord entre les résultats obtenus identifiés dans son étude et ceux obtenus à partir d'un essai de choc.

Shama et al (Shama AA., et al., 2001) présenté en 2001 une étude expérimentale des vibrations ambiantes de terrain avec une étude de modélisation d'accompagnement. Le calcul effectué sur le pont de l'île du Grand Nord (Etats-Unis). Ils ont développé un modèle tridimensionnel par éléments finis du pont en utilisant le logiciel SAP 2000.

Le travail effectué par Huang et Lin en 2001 (Huang CS., et Lin HL., 2001) a présenté une procédure unifiée pour déterminer les caractéristiques dynamiques d'une structure à partir de ses vibrations ambiantes et suite au séisme. La procédure proposée a appliqué une approche de sous-espace avec un concept variable pour évaluer les matrices de coefficients d'un modèle espace-état. La faisabilité de la procédure a été démontrée grâce à la transformation en une mesure des vibrations ambiantes in-situ d'une structure en acier de cinq étages, une mesure de la réponse impulsionnelle d'un pont à trois travées continues et les réponses du tremblement de terre.

En 2002, Fujino (Fujino Y., 2002) a examiné les vibrations des ponts à longue portée en raison du mouvement dépendant de charges, généralement en raison de vents. L'auteur discuté de l'intérêt récent de plus en plus du contrôle de santé des ponts à longue portée. Il décrit également l'utilité de la surveillance des vibrations ambiantes d'un pont suspendu de longue portée (Hakucho Bridge, Japon).

Lee et al (Lee JW., et al., 2002) a présenté, en 2002, une méthode d'estimation des dommages d'un pont en utilisant les données de vibration ambiante causée par les charges de trafic. La procédure consistait à l'identification des propriétés modales opérationnelles et l'évaluation des dégâts et la gravité par endroits. Ce groupe de chercheurs a identifié les paramètres modaux à partir des signaux enregistrés en utilisant la méthode aléatoire décrémente. L'évaluation des dégâts a été réalisée sur la base des paramètres modaux estimée en utilisant la technique de réseaux neuronaux.

Ventura et al (Ventura CE., et al., 2003) ont menée en 2003 un travail expérimental en utilisant des tests de vibration ambiante sur un immeuble de base isolé à Takamatsu (Japon) afin de déterminer les formes de mode de vibration associés à des fréquences naturelles et des ratios d'amortissement pour des niveaux très bas de l'excitation. Le modèle en éléments finis calibré par des données de vibration ambiante a été utilisé pour simuler la réponse enregistrée de l'immeuble sous excitation d'un petit tremblement de terre. Il fournit un point de départ pour la modélisation de la réponse non-linéaire du bâtiment lorsqu'il est soumis à de fortes secousses.

En 2002, Caicedo et al (Caicedo JM., et al., 2002) ont examiné l'efficacité de la technique d'excitation naturelle combiné avec l'algorithme d'extractions de problèmes propres *Eigensystem* afin d'identifier les paramètres modaux dans les structures souples comme les gratte-ciel et les ponts de longue portée.

L'étude menée par Volant et al, en 2002 (Volant Ph., et al., 2002), sur une installation nucléaire existante en France avait deux objectifs principaux : le premier pour vérifier la nature des sols et l'existence d'un effet de site possible autour de l'installation et le deuxième est de caractériser le comportement dynamique du bâtiment en utilisant les dossiers des vibrations ambiantes. La méthode des ratios spectrale a été utilisée avec un enregistrement sismique régional et les résultats de l'application de cette méthode ont montré que l'installation était libre d'effet de site. Les mesures de vibrations ambiantes sur le bâtiment ont aidé à déterminer le premier et les seconds modes propres de vibration de la structure.

L'étude menée par Kenai et Bahar (Kenai S., Bahar R., 2003) en 2003 est un rapport sur l'évaluation et la réparation de la nouvelle aérogare d'Alger (Algérie) pour le bâtiment de l'aéroport. L'approche d'évaluation comprenait une inspection visuelle du béton, la méthode vibrationnelle pour tester les piles et aussi les essais non destructifs du béton avec le marteau Schmidt, les mesures à ultrason, les tests des noyaux, les tests de carbonatation et les vibrations ambiantes de la structure. Les travaux de réparation effectués ont montré que le

choix de la qualité des matériaux et le contrôle du site sont importantes. Majumder et Manohar (Majumder L., et Manohar CS., 2003) ont étudié en 2003 le problème de la détection des changements locaux ou redistribution de rigidité dans les structures de pont à l'aide des données de vibration ambiante (vibrations des véhicule en mouvement a été prise comme source d'excitation). Utilisant le modèle éléments finis pour la structure du pont dans son état intact et l'utilisation aussi d'une approche dans le domaine temporel pour déterminer les modifications apportées au modèle de pont initial due à des endommagements.

L'efficacité des procédures développées a été démontrée en considérant la détection des dommages localisés distribués dans un modèle d'oscillateur à faisceau mobile à l'aide des données de vibration générée artificiellement.

En (2004), Wu et Li (Wu JR., et Li QS., 2004) a présenté la mise à jour du modèle éléments finis pour la procédure de mise à jour du modèle de la tour de télévision (Nanjing, Chine) basée sur des mesures de vibrations ambiantes. Une étude comparative a été menée avec l'examen des six cas du modèle éléments finis mise à jour. Plusieurs approches pour l'estimation du modèle actualisé les paramètres basés sur la méthode pseudo-inverse, pondérés par la méthode des moindres carrés et la technique d'estimation Bayésienne a été utilisée. On a constaté que le modèle actualisé est basé sur la méthode des moindres carrés pondérés avec des paramètres structurels qui ont été mise à jour.

Ren et al. (Ren WX., et al., 2004) présenté en 2004 a approfondi la procédure d'évaluation sismique d'un pont à trois travées à poutres continues. Les résultats de l'analyse sismique ont montré que certains éléments en acier devront être renforcés et des boulons d'ancrage sont faibles. El-Borgi et al. (El-Borgi S., et al., 2005), ont résumé en 2005 l'application d'une méthodologie rationnelle, basée sur la mesure des vibrations ambiantes, des deux anciens ponts renforcés en Tunisie. Le Domaine de décomposition améliorée en fréquences est une technique appliquée pour extraire les caractéristiques dynamiques du pont. Le modèle en éléments finis a été calibré afin d'obtenir une corrélation raisonnable entre les propriétés modales expérimentales et numériques. Le principal objectif du document était de démontrer l'utilisation de la technique de décomposition de domaine de fréquence améliorée combinée avec le modèle de mise à jour pour fournir des données qui ont été utilisé pour évaluer l'état structural du pont étudié.

En (2006), Magalhães et al (Magalhães F., et al., 2006) décrit dans leur document d'application de trois sorties seulement l'identification modale des techniques pour les données recueillies au cours d'un essai de vibration ambiante effectué à la toiture suspendue du Stade de Braga, dans le nord du Portugal. Les comparaisons entre les fréquences naturelles identifiées et les formes des modes et celles prédites par un modèle éléments finis qui tient compte du comportement géométriquement non-linéaire et le processus de construction, a permis d'évaluer la précision des résultats fournis par les outils numériques et expérimentaux utilisés. D'autre part, l'estimation des coefficients d'amortissement modaux ont été comparés avec ceux obtenus précédemment développés en vibration libre. Il est démontré que les techniques disponibles peuvent fournir des estimations très précises des fréquences et modes propres, les estimations obtenues ont été très cohérentes et bien corrélées avec les résultats fournis par le modèle numérique développé.

Turek et al (Turek M., et al., 2006) ont présenté en 2006 une étude représentant les résultats d'une série d'essais de vibration ambiante menée sur trois bâtiments en briques de faible hauteur non renforcé situés dans le quartier de Chinatown à Vancouver, Colombie-Britannique, Canada. Des mesures qui ont été prises sur les parties sélectionnées de chaque structure afin de déterminer leurs propriétés dynamiques. D'autres essais ont également été menés dans le voisinage des bâtiments afin de déterminer la période de vibration et évaluer les effets potentiels des interactions sol-structure. Cela pourrait avoir un effet majeur sur la performance sismique des bâtiments au cours d'un grave tremblement de terre.

Sauvik Banerjee et Fabrizio Ricci en 2007 ont présenté un document qui s'intéresse à la détection et la caractérisation des défauts avancés cachés dans les structures avant qu'ils atteignent une taille critique. Une nouvelle méthode est développée en utilisant une combinaison de vibrations et la propagation des ondes pour déterminer l'emplacement et le degré de dégâts dans les différents éléments structuraux. La structure doit être instrumenté avec un éventail de capteurs et actionneurs pour exciter et d'enregistrer la réponse dynamique. Un indice de dommages, calculé à partir de la réponse dynamique de la structure mesurée dans un état de référence et l'état actuel. Elle est présentée comme un déterminant de dommages structuraux. Ces méthodes peuvent être utilisées pour la détermination des dommages et dégradation dans les avions.

### 2.3 Les différentes techniques de contrôle de santé des structures :

Les fondements des méthodes de vibrations à base d'inspection existent depuis des milliers d'années. Depuis l'époque où la poterie a été inventée, les fissures et les cavités en terre sont détectés en écoutant le bruit lorsque la pièce a été frappée avec la terre (Rytter A., 1993). De même, les vides peuvent être révélés par décollement le long de la surface du matériau.

Caicedo et al, (Caicedo JM., et al., 2000) ont présenté en 2000 une nouvelle technique pour identifier l'emplacement des dommages dans les structures de génie civil. Leur méthode a été basée sur les changements dans les fonctions de transfert composant la structure, ou les fonctions de transfert entre les étages d'une structure. Une structure de quatre étages, soumise au contrôle par l'Université de Washington et le laboratoire de génie parasismique a été fourni pour la vérification expérimentale de cette approche. Les réponses en accélération de chacun des étages ont été utilisées afin de calculer les fonctions de transfert de composants. Dans la même année, Dyke et al (Dyke SJ., et al., 2000) ont abordé le problème de référence sur le suivi de l'état des structures dans son document. L'étude de ce problème a permis à faire une comparaison facile entre les différentes méthodes utilisées dans la surveillance de la santé des structures. La méthode de solution utilisée dans cet article basé sur la fonction de corrélation croisée en conjonction avec la méthode de l'algorithme *Eigensystem*. En utilisant une optimisation sans contraintes non linéaire pour obtenir les rigidités optimales. Une autre application possible des techniques de contrôle de la santé des structures pour détecter et localiser des dommages structurels pourrait être réalisée en utilisant la méthode des ondelettes comme il a été montré par Hou et al en 2000 (Hou ZK et al, 2000). Héra et al, en 2001 (Hera A et al, 2001), et Masuda et al (Masuda A., et al., 2002). La transformée en ondelettes a été utilisée pour identifier des discontinuités dans les enregistrements d'accélération, ce qui indique qu'un membre de la structure a été fracturé. La méthodologie a été appliquée avec succès à plusieurs problèmes de référence tel qu'il a été exposé dans Hou et Héra, 2002 (Hou ZK., et Hera A., 2002), et Héra et Hou, 2003 (Hera A., et Hou ZK., 2003). Les résultats illustrent une grande promesse de l'analyse en ondelettes pour la surveillance de la santé structurelle en raison de ses mérites, la sensibilité d'un endommagement local, la simplicité et l'efficacité des algorithmes de calcul. Il n'est pas évident que cette méthode peut être mise en œuvre en cas de dommage progressif.

Zaghw et Saleh (Zaghw A., et Saleh A., 2002) ont évalué en 2002 la performance sismique d'un minaret islamique en Égypte. Leur article explique l'évaluation des performances sismiques en utilisant la méthode de spectre de capacité. Cette méthode convertit l'inélasticité statique de charge en déplacement courbe de la structure avec une comparaison entre les accélérations spectrales et les déplacements spectraux, connues comme la courbe du spectre de capacité. La performance sismique a été évaluée à partir de l'intersection de ces courbes.

L'église d'Agios Ioannis Prodromos dans le village de Askas a été considéré comme un important patrimoine culturel à Chypre. Pour cette raison, il a été sélectionné par Chrysostomou et al (Chrysostomou CZ., et al., 2002) d'être le cas d'études à Chypre pour la conservation des sites historiques en Méditerranée par des techniques de protection. L'excitation par le marteau à impulsion a été utilisé pour extraire les propriétés dynamiques et de calibrer le modèle analytique élaboré, en utilisant le logiciel SAP2000. Le modèle a été utilisé pour tester analytiquement les différents dispositifs passifs et semi-actifs afin de proposer celui qui offre la meilleure protection du tremblement de terre du monument.

Syrmakezis et Sophocleous (Syrmakezis K., et Sophocleous A., 2002) ont présenté une méthodologie pour la réduction de la vulnérabilité sismique des structures historiques en maçonnerie, en utilisant des dispositifs de contrôle des vibrations. Dans ce document, les techniques de contrôle passif ont été utilisées. La structure choisie a été analysée en utilisant la méthode des éléments finis à deux reprises : une fois pour la structure existante et une fois avec la mise en œuvre des dispositifs de contrôle vibratoire suggéré. La performance du bâtiment a été considérablement améliorée lorsque les dispositifs de contrôle des vibrations ont été utilisés.

En 2004, Saleh et Zaghw (Saleh A., et Zaghw A., 2004) ont évalué la performance sismique des deux minarets en Egypte: Qusun (1337 AD) et Al-Sultaniyya (1360 AD) via la méthode de spectre de capacité. Leur article explique l'évaluation des performances sismiques en utilisant la capacité. Les minarets sont modélisés en utilisant la technique des éléments finis et analysées afin d'évaluer leurs caractéristiques dynamiques et leur performance sismique. En conséquence, les deux minarets sont considérés comme vulnérables au séisme.

En 2007 une étude a été faite, par Christian Boller et Mathias Buderath, pour améliorer le processus d'entretien des avions. Ils ont utilisé la technique de contrôle de santé des structures des avions actuelles. En 2007, Michael I. Friswell a présenté dans un rapport un

aperçu de l'utilisation de méthodes inverses pour la détection et la localisation des dommages, en utilisant les données de vibration mesurée. Les problèmes inverses nécessitent l'utilisation d'un modèle et l'identification des paramètres incertains dans ce modèle. Ce document examine un certain nombre de problèmes qui existent avec cette approche de la surveillance de la santé, y compris les erreurs de modélisation, la localisation des dommages et de régularisation.

Dans la même année, en 2007, Splios et John ont présenté un document sur les techniques et les principes de nouvelles méthodes temporelles avec ses caractéristiques et leur fonctionnement. Leur praticité et efficacité sont démontrées par de brèves présentations de trois cas d'études relatives à la détection des dommages. L'étude a été faite sur le squelette d'un avion. En 2010, V. Meruance et W. Heylen ont présenté une étude de deux cas expérimentaux par la méthode de l'algorithme génétique parallèle. La première étude est un test sur une structure d'avion soumise à trois niveaux croissants des dommages et la seconde étude sur un ensemble des poutres fissurés en béton armé, qui sont soumises à une augmentation non symétrique du chargement. En conclusion, l'étude a montré que les dégâts expérimentaux sont détectés avec succès et la détection des faux dégâts est évitée, malgré la présence de bruit expérimental ou des erreurs de modélisation. Dans les deux cas d'application, les dégâts détectés ont une bonne correspondance avec les dégâts expérimentaux. Bien que, dans le cas de la structure de l'avion l'installation expérimentale n'était pas optimale, les dégâts détectés étaient toujours compatibles avec les dégâts expérimentaux.

## CHAPITRE III

### Les techniques de l'identification du système

#### 3.1 Introduction:

Le degré de dommage dans une structure se fait par les différentes techniques de contrôle de la santé des structures. La première étape dans une méthode d'identification du système est d'extraire les caractéristiques dynamiques de la structure étudiée (fréquences naturelles, les modes propres et le facteur d'amortissement). Dans un deuxième temps, les paramètres identifiés modaux sont utilisés pour calculer la rigidité des éléments de structure.

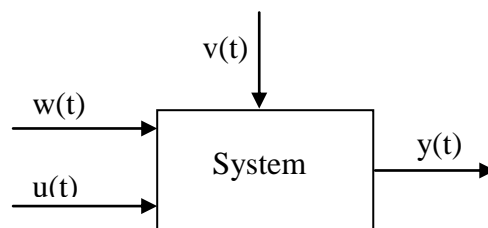
#### 3.2 Généralités sur l'identification du système :

##### 3.2.1 Définition :

En quelques mots, l'identification du système peut être définie comme le champ qui traite du problème de la construction de modèles mathématiques des systèmes dynamiques basés sur des données observées à partir des systèmes. Pour mieux comprendre cette idée, certaines définitions importantes, sont introduites ici:

- Le Système: Un système peut être défini comme un objet dans lequel les variables de divers types interagissent et produisent des signaux observables (appelés sorties).
- La Dynamique des systèmes: un système dynamique peut théoriquement être décrit comme une variable d'entrée  $u(t)$  et une perturbation  $v(t)$  de la conduite du système (voir figure 3.1) (Christian B., et Matthias B., 2007). L'utilisateur peut contrôler l'entrée  $u(t)$ , mais jamais  $v(t)$ . Les bruits peuvent être directement mesurés ( $v(t)$ ) ou seulement observés à travers leur influence sur la sortie ( $W(t)$ ). Les signaux observés sont visés en  $y(t)$ . Pour un système dynamique, les mesures de contrôle à l'instant  $t$  vont influencer la sortie au moment de l'instant  $s > T$ . Cela peut être clairement illustré dans la figure ci-dessous.





**Figure 3.1.** Système dynamique d'entrée avec  $u(t)$ , la sortie  $y(t)$  et les perturbations  $v(t)$  et  $w(t)$  (Hamdaoui K., 2006).

- La Modélisation: Lorsqu'on est en interaction avec un système (Brincker R., et Andersen P.,1999), nous avons besoin d'un certain concept de la façon dont ses variables sont reliées les unes aux autres. Avec une définition large, la relation supposée entre les signaux observés est appelé un modèle du système.

### 3.2.2 Les types de modèles:

Les systèmes dynamiques peuvent être modélisés à partir des données observées en utilisant des méthodes différentes (Christian B., et Matthias B., 2007), les trois méthodes suivantes sont les plus importantes:

- Le modèle intuitif ou verbal: Il n'a pas de formalisation mathématique, par exemple, il est utilisé lorsque vous conduisez une voiture, en tournant le volant vous provoquez la voiture à son tour; en poussant l'accélérateur vous augmentez la vitesse, etc.
- Les modèles graphiques: Des tableaux numériques et/ou les parcelles sont utilisées pour décrire les propriétés du système. Par exemple, un système d'asservissement est considéré comme un modèle en forme de graphique.
- Le modèle mathématique: Bien que les graphiques puissent également être considérés comme des modèles mathématiques. Ce type de modèles est limité à des équations différentielles. Ces modèles seront discutés en détail dans ce qui suit.

### 3.2.3 La modélisation mathématique :

Les modèles mathématiques utilisés pour décrire les systèmes dynamiques sont utiles dans de nombreux domaines et applications. Ils sont habituellement classés en deux grandes approches (Richardson MH., 1980):

- Modélisation physique.
- Identification du système.

La première façon de la modélisation (modélisation physique) est considérée comme une approche analytique, elle est représentée par l'équation différentielle en temps continu. La connaissance des lois physiques fondamentales de la nature et les autres relations bien établies, telles que les lois de Newton sur le mouvement, sont basées pour la construction de tels modèles dynamiques. Inversement, lorsque la connaissance physique sur un système dynamique est limitée, l'identification du système (la seconde façon de modélisation) basée sur l'étalonnage d'un modèle utilisant des données expérimentales est le moyen pratique de décrire ce système dynamique. Ici, le modèle de la sortie ou d'entrée-sortie du comportement du système est représenté par des systèmes d'équations différentielles en temps discret qui consiste en une expression mathématique définissant explicitement la relation entre les signaux d'entrée et de sortie, dans la section suivante certains milieux dans les processus stochastiques, leurs caractéristiques statistiques et le calcul mathématique sont fournis.

### **3.3 Les approches de l'identification du système :**

Les techniques de l'identification des systèmes sont fondées sur la nature du type d'excitation de la structure et elles sont classées en deux grandes approches:

- L'entrée et sortie (Input Output)
- Sortie uniquement (Output Only)

#### **3.3.1 Modèle d'identification avec entrée et sortie (Input Output) :**

Cette approche nécessite l'utilisation d'une chaîne d'instrumentation pour l'excitation structurelle (Michael I., et Friswel., 2007)... : Mesure des vibrations, acquisition de données et traitement du signal.

Pour les structures de petite et moyenne taille, l'excitation peut être induite par un marteau d'impulsion (figure 3.2). L'avantage de ce dispositif est qu'il fournit une entrée à large bande, capable de stimuler les différents modes de vibration. Les principaux inconvénients sont relativement à faible fréquence estimée de la résolution spectrale qui peut faire obstacle à l'estimation précise des facteurs d'amortissement modal, et l'énergie nécessaire pour exciter

certaines modes pertinents de la vibration. Sinon, la table vibrante (figure 3.3) peut appliquer une grande variété de signaux d'entrée (aléatoire, multi sinusoïdal, etc. ...). Ces instruments ont la capacité d'exciter les structures dans une gamme de fréquence inférieure, et peut atteindre une résolution fréquentielle supérieure. La possibilité d'application des forces sinusoïdales permet l'excitation de la structure à la résonance et, par conséquent, pour une identification directe de la forme du mode de vibration.



**Figure 3.2** Marteau à Impulsion (Michael I., et Friswel., 2007).

Pour l'excitation des grands ouvrages de génie civil, le vibreur de masse excentrique (figure 3.2c) a souvent été utilisé dans l'essai dynamique des barrages. Il permet à l'application des forces sinusoïdales à fréquence et d'amplitude variable. Les principaux problèmes dans cette technique sont la faible amplitude de la force induite à basse fréquence et une certaine difficulté à mesurer la force appliquée et de s'assurer qu'il n'y ait aucun mouvement relatif du vibreur à l'égard de la structure. À l'heure actuelle, l'utilisation du vibreur hydraulique (figure 3.3) est une meilleure solution en termes de fournir une large bande d'excitation dans la gamme de fréquences la plus intéressante pour les grosses structures civiles.



**Figure 3.3.** Vibreur hydraulique pour exciter les ponts verticalement et les barrages latéralement (Michael I., et Friswel., 2007).

### 3.3.2 Modèle d'Identification avec sortie uniquement (Output Only):

Ce modèle est utilisé pour des structures comme les ponts à haubans et ponts suspendus. Le matériel d'excitation extrêmement coûteux nécessite des équipements lourds qui sont rarement disponibles dans les laboratoires les plus dynamiques. Depuis les récents progrès technologiques enregistrés dans les capteurs et convertisseurs analogiques et numériques, la mesure précise des niveaux très bas de la réponse dynamique induite par des excitations ambiantes est devenue possible. Le manque de données d'entrée est justifié par l'hypothèse que l'entrée ne contient pas d'informations ou, en d'autres termes, l'entrée est un bruit blanc. Le test d'identification modale par la méthode de sortie uniquement a une grande importance dans le génie civil, ce qui permet l'identification précise des paramètres modaux de grandes structures au cours de sa durée de vie.

Cette thèse se concentre sur la surveillance du bâtiment métallique de l'université de Pavia en Italie. Elle repose sur le test de vibrations ambiantes, par conséquent, les entrées sont non mesurables en forces ambiantes et de sortie uniquement. Les méthodes d'identification du système sont utilisées pour estimer le modèle à partir des données de sortie mesurées en accélération.

De ce point, l'identification du système se référera à la sortie seulement. En sortie seule l'analyse modale dans le cadre mathématique implique l'utilisation des statistiques et l'introduction des notions telles que la prévision optimale, la théorie des systèmes linéaires et les processus stochastiques. Les deux hypothèses générales formulées en sortie seule de l'analyse modale font que le système physique sous-jacent se comporte de façon linéaire et invariante. Les méthodes d'identification de sortie uniquement sont classées en deux groupes principaux:

- Les méthodes non paramétriques, essentiellement développées dans le domaine des fréquences,
- Les méthodes paramétriques, qui sont développées dans le domaine temporel.

### 3.3.2.1 Méthodes non paramétriques:

Les méthodes non paramétriques sont des alternatives aux méthodes classiques. Elles ne font pas l'hypothèse habituelle que les données suivent une loi normale ou une autre loi de probabilités. Le logiciel *Statgraphics Centurion* contient de telles techniques dans beaucoup de ses procédures statistiques. Pratiquement, les techniques non paramétriques sont présentes dans les options des procédures qui utilisent les techniques paramétriques, plutôt que dans des menus séparés. Ces méthodes sont utilisées en statistiques pour modéliser et analyser les données ordinaires ou nominales avec des échantillons de petite taille (Richardson MH., 1980).

### 3.3.2.2 Méthodes paramétriques:

Les méthodes paramétriques (Caicedo JM., 2003) impliquent l'estimation du système en termes de représentation analytique précisant les coefficients des polynômes et les éléments des matrices, qui sont connus comme les paramètres du modèle (Caicedo JM, 2003). Ces paramètres sont estimés lors de l'identification du système à partir des données d'observation enregistrées de séries chronologiques. L'équivalent en temps discret le modèle paramétrique est un système d'équations différentielles (Gentile C. , 2005).

## 3.4 Rappel théorique sur les méthodologies de l'identification du système :

### 3.4.1 Processus stochastiques :

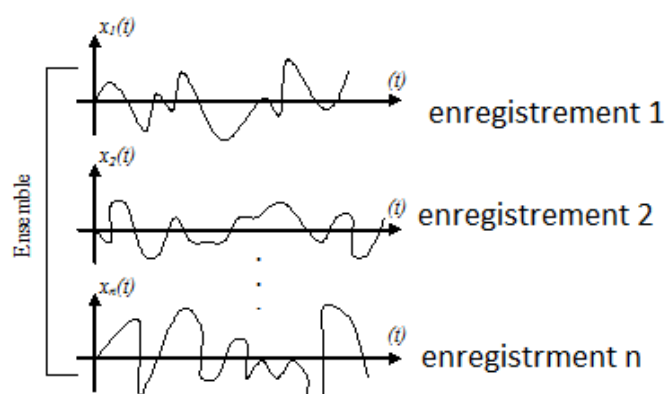
Dans l'ensemble, les données peuvent être classées comme déterministe ou aléatoire. Un processus dynamique est appelé déterministe lorsque sa valeur en un point quelconque dans le temps n'est pas aléatoire. Un exemple de données déterministes est le déplacement d'une structure soumise à une entrée de connue et des conditions initiales. Ce déplacement peut être calculé comme la solution de l'équation différentielle bien connue:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad 3.1$$

Où K, C, M sont respectivement les matrices de rigidité, d'amortissement et de masse, F(t) est le vecteur force, et x(t) désigne le déplacement. La dérivée par rapport au temps est indiquée par l'opérateur (  $\dot{\phantom{x}}$  ). Il est possible d'obtenir des déplacements, des vitesses et des

accélérations de la structure à chaque instant 't' pour un ensemble de données aux conditions initiales.

Sinon, les processus qui ont une valeur aléatoire à chaque instant 't' sont appelés aléatoire, ou stochastique. Dans ce cas, les forces appliquées à une structure à cause des vibrations ambiantes, comme l'action du vent sur une structure élevée ou des charges de trafic sur un pont sont modélisés comme aléatoires. Une réalisation possible d'un processus aléatoire est appelé un exemple de fonction. L'ensemble des exemples de fonctions obtenus à partir d'un processus aléatoire est appelé un ensemble, comme montre la figure suivante.



**Figure 3.4.** Exemple d'ensemble de fonction aléatoire (Hamdaoui K. , 2006).

Dans les sections suivantes, on montre la classification des processus stochastiques et leurs propriétés.

### 3.4.1.1 Classification des processus stochastiques

Les processus stochastiques peuvent être classés en deux catégories:

- stationnaire ou
- non-stationnaire

Les processus aléatoires stationnaires ont des propriétés statistiques constants au fil du temps. Le processus aléatoire,  $X(t)$ , a deux importantes propriétés statistiques qui sont : la moyenne  $\mu_x(t)$ , et la fonction d'auto-corrélation,  $R_{xx}(t, t + \tau)$ , qui sont définies comme suit:

$$\mu_X(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t) \quad 3.2$$

$$R_{XX}(t, t + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t)x_k(t + \tau) \quad 3.3$$

Le processus stochastique est appelé faiblement stationnaire lorsque la moyenne  $\mu_x(t)$  de ce processus stochastique est constante et inférieure à l'infini, et sa fonction d'auto-corrélation  $R_{xx}(t, t+\tau)$  ne dépend que de l'intervalle du temps  $\tau$ . Le processus faiblement stationnaires joue un rôle important dans le domaine de la dynamique des structures, les vibrations aléatoires, et le traitement du signal. La bande limitée du bruit blanc, impulsion rectangulaire, et le bruit binaire sont des exemples de processus faiblement stationnaires.

Certains phénomènes naturels peuvent être modélisés comme immobiles sur une période de temps spécifique. Par exemple, les charges de trafic dans un pont à haubans en heure de pointe, où le nombre de voitures et de vitesse sont à peu près constante ou les charges de vent appliquées à un grand bâtiment pendant une tempête. Un exemple d'un processus non-aléatoire stationnaire est les forces appliquées à des structures par des séismes.

### 3.4.1.2 Propriétés statistiques du processus stochastique:

Bien que toutes les propriétés statistiques soient utiles dans les applications d'ingénierie, seules deux propriétés principales méthodologies utilisées dans le contrôle de la santé des structures sont discutées dans cette section, et qui sont:

- La fonction de densité spectrale
- La fonction de corrélation.

### 3.4.1.3 La fonction de densité spectrale:

C'est un outil puissant pour l'analyse des processus stationnaires aléatoires. Pour les processus stationnaires, la fonction de densité spectrale montre la variation de la valeur quadratique moyenne  $\psi_x^2$  par rapport à la fréquence  $f$ . Pour un processus faiblement stationnaire aléatoire, la fonction de densité spectrale  $S_{XY}(f)$ , entre les processus stochastiques  $X(t)$  et  $Y(t)$  peut être calculée de deux manières:

- avec la fonction de corrélation ou,
- l'utilisation de la transformée de Fourier.

En utilisant les mêmes procédures, il est possible de déterminer l'auto-densité spectrale des fonctions  $S_{XX}(f)$  et  $S_{YY}(f)$ .

La fonction de densité spectrale avec la fonction de corrélation:

Pour deux processus aléatoires faiblement stationnaire  $X(t)$  et  $Y(t)$ , la recto-verso spectrale croisée  $S_{XY}(f)$  peut être définie comme la transformée de Fourier de la fonction de corrélation croisée  $R_{xy}(\tau)$  :

$$S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad 3.4$$

Dans le cas de données discrètes, l'équation 3.4 est exprimée comme suit :

$$S_{XY}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n R_{XY}(k) e^{\frac{-j2\pi n k}{N}} \quad 3.5$$

Où  $N$  est le nombre de points de la fonction de corrélation croisée  $R_{xy}(k)$ .

De même, l'auto-spectrale fonction de densité  $S_{XX}(f)$  peut être définie comme:

$$S_{XX}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad 3.6$$

Ou sous forme discrète:

$$S_{XX}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n R_{XX}(k) e^{\frac{-j2\pi n k}{N}} \quad 3.7$$

Pour obtenir des fonctions de densité spectrale de la fonction de corrélation, il est nécessaire que la fonction de corrélation existe. Il est également nécessaire pour satisfaire:

$$\int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) d\tau < \infty \quad 3.8$$



Ce qui est vrai pour les enregistrements finis.

La fonction de densité spectrale avec la transformée de Fourier :

Les fonctions de densité spectrale peuvent également être obtenues à partir de la transformée de Fourier finie. Supposer que  $x_i(t)$  et  $y_i(t)$  sont l'ième échantillon d'enregistrement des processus stochastiques  $X(t)$  et  $Y(t)$ . Pour l'intervalle  $0 < t < t_1$  des exemples d'enregistrements définie:

$$S_{XY}(f, t_1, i) = \frac{1}{T} \hat{X}_i^*(f, t_1) \hat{Y}_i(f, t_1) \quad 3.9$$

Où le (\*) désigne l'opérateur complexe conjugué et, la transformée de Fourier sont des  $x_i(t)$  et  $y_i(t)$ , respectivement, pour l'intervalle de  $0 < t < t_1$ , donnée par:

$$\hat{X}_i(f, t_1) = \int_0^{t_1} x_i(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad 3.10$$

$$\hat{Y}_i(f, t_1) = \int_0^{t_1} y_i(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad 3.11$$

La fonction transversale de densité spectrale  $S_{XY}(f)$  est obtenue sous forme d'attente de  $S_{XY}(f, t_1, i)$  lorsque  $t_1$  tend vers l'infini. Dans la forme mathématique  $S_{XY}(f)$  est la suivante:

$$S_{XY}(f) = \lim_{t_1 \rightarrow \infty} E[S_{XY}(f, t_1, i)] \quad 3.12$$

Où  $E[\ ]$  désigne l'espérance sur l'indice d'ensemble  $i$ . En utilisant une procédure similaire, il est possible d'obtenir la fonction d'auto-densité spectrale  $S_{XX}(f)$  et  $S_{YY}(f)$ .

Lorsque les enregistrements des données sont utilisés pour estimer les fonctions de densité spectrale en utilisant cette méthode, il est possible de déterminer une meilleure estimation de la fonction de densité spectrale.

### 3.4.1.4 Fonction de corrélation:

La fonction de corrélation est un autre concept essentiel pour les processus aléatoires. La fonction de corrélation croisée entre les processus stochastiques  $X(t)$  et  $Y(t)$  est définie comme:

$$R_{XY}(t, t + \tau) = E[X(t)Y(t + \tau)] \quad 3.13$$

Deux processus stochastiques sont dé-corrélés lorsque la fonction de corrélation  $R_{xy}(t, t + \tau)$  est constant pour tous les  $(t + \tau)$  et égal au produit du moyen  $\mu_X \cdot \mu_Y$ . De même, la fonction d'auto-corrélation du processus stochastique  $X(t)$  est définie comme:

$$R_{XX}(t, t + \tau) = E[X(t)X(t + \tau)] \quad 3.14$$

Pour le cas des processus faiblement stationnaires, les fonctions d'auto-corrélation et de corrélation croisée ne dépendent que de  $\tau$ , ou:

$$R_{XX}(t, t + \tau) = R_{XX}(\tau) \quad 3.15$$

$$R_{XY}(t, t + \tau) = R_{XY}(\tau) \quad 3.16$$

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour estimer les fonctions de corrélation. L'un d'eux est par l'équation 3.3, où la fonction de corrélation est calculée à partir des enregistrements de données. Une autre méthode pour calculer la fonction de corrélation est par l'intermédiaire de la fonction de densité spectrale. Basée sur l'équation 3.4, la fonction de corrélation peut être calculée comme étant la transformée de Fourier inverse de la fonction de densité spectrale:

$$R_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{XY}(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad 3.17$$

Où  $S_{XY}(f)$  est la fonction de densité deux latéraux spectrale croisée entre les processus stochastiques  $X(t)$  et  $Y(t)$ . Dans le cas de l'équation de données discrètes 3,17 peut être écrit en utilisant la transformée de Fourier rapide discrète:

$$R_{XY}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{XY}(k) e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad 3.18$$

L'utilisation des fonctions de densité spectrale croisée pour calculer fonctions d'inter-corrélation présente les avantages du filtrage et de calcul de la moyenne présentée dans le calcul de la fonction de densité spectrale croisée.

### 3.4.2 Traitement du signal en dynamique des structures par la transformé de Fourier :

#### 3.4.2.1 Principe de la transformée de Fourier :

Un des objectifs de la transformée de Fourier est de permettre l'analyse du spectre d'un échantillon de signal. Cette analyse permet de déterminer quelles sont les composantes fréquentielles présentes dans ce signal. L'idée consiste à représenter une portion de signal  $x_c(t)$ ;  $t \in [0; T[$  quelconque à l'aide d'une somme de  $K$  sinus, d'amplitudes, pulsations et phases à déterminer :

$$x_c(t) = \sum_{k=0}^K \alpha_k \sin(\omega_k t + \phi_k), \forall t \in [0, T[ \quad 3.19$$

Pour un signal continu,  $K \rightarrow \infty$ . Les valeurs de la transformée de Fourier du signal sont en lien avec les amplitudes, pulsations et phases recherchées. Quand on considère un signal échantillonné, avec un nombre fini de points,  $K$  est fini.

Exemple de calcul de la transformée de Fourier d'une fenêtre du temps rectangulaire de largeur  $T$  centrée en 0  $t \in [-T, T]$  a été présenté en dessous.

Supposons que  $x(t) = a$  dans sur l'intervalle du temps  $[-T, T]$  sa transformé de Fourier s'écrit comme suit :

$$X_c(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \exp^{-i\omega t} dt$$

3.20

Après qu'en remplace l'expression  $x(t)$  avec sa valeur l'équation 3.20 devient :

$$xc(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^{+T} a \cdot \exp^{-i\omega t} dt \quad 3.21$$

$$xc(\omega) = \frac{1a}{-i\omega 2\pi} [\exp^{-i\omega T} - \exp^{+i\omega T}] \quad 3.22$$

Le calcul de l'intégral de l'équation 3.21 nous donnant la nouvelle expression  $x(\omega)$  qui vaut :

$$xc(\omega) = \frac{a}{i\omega 2\pi} 2i \sin \omega t. \quad 3.23$$

Enfin l'équation 3.23 nous permettrons de tracer la transformé de Fourier de  $x(t)$ .

### 3.5 Etape pour l'identification du système de sortie uniquement:

Cette partie porte sur l'identification du système des propriétés dynamiques du modèle. Il est utile de rappeler que le problème est d'estimer un modèle d'un système fondé sur des données observées. Les points suivants montrent la méthode du travail :

1. L'acquisition de données du processus à identifier (Figure 4.4).
2. L'examen des données et le traitement du signal afin de supprimer les tendances et les valeurs aberrantes, et de sélectionner les parties utiles des données d'origine. On peut appliquer un filtrage afin d'améliorer les gammes de fréquences importantes.
3. Sélection et définition d'une structure modèle dans lequel un modèle se trouve.
4. Calcul du meilleur modèle de la structure en fonction des données et du critère donné de l'ajustement.
5. Examen des propriétés modales obtenues.
6. Si le modèle du SAP2000 est assez bon, on arrête, sinon, on doit retourner à l'étape 3 pour essayer un autre jusqu'à on obtenir de bons résultats.

Pour résoudre la complexité du problème d'excitation non mesurée, différentes méthodes de sortie uniquement et les techniques d'identification modale ont été améliorées. Aujourd'hui, ces techniques sont disponibles dans plusieurs logiciels tels que l'extracteur ARTEMIS, le code informatique MATLAB, ... etc.

Dans cette étude, l'algorithme principal, connu sous le nom technique N4SID qui est disponible dans l'environnement MATLAB (version 7.14), a été appliqué pour extraire les signaux modaux de la structure, Dans l'étape suivante, on fait une présentation de la procédure pour extraire les propriétés dynamiques du modèle en utilisant le logiciel MATLAB.

Il est important de noter que cette procédure n'est pas standard. Elle est limitée au cas précis de l'identification du système de sortie uniquement en utilisant le code N4SID.

### **3.6 Le logiciel MATLAB comme outil d'analyse de sortie :**

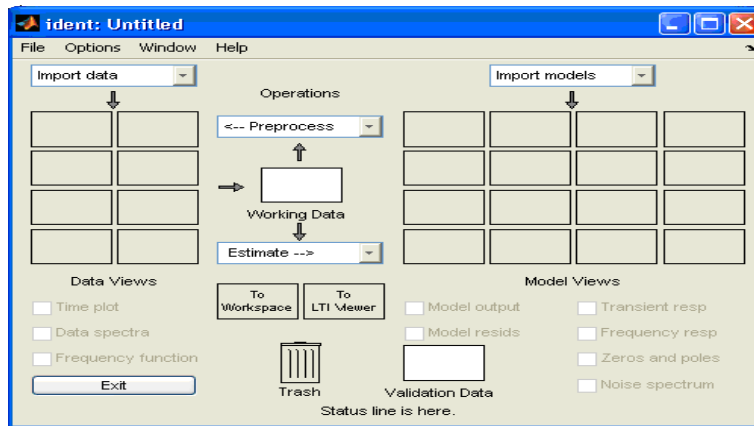
MATLAB est reconnu mondialement comme le premier éditeur de logiciels de calcul technique destinés aux ingénieurs et scientifiques. L'utilisation du logiciel MATLAB contient deux phases principales : la première est la phase de l'importation des données et la deuxième est la phase d'estimation.

#### **3.6.1 Import de données:**

Premièrement, le fichier doit être enregistré en fichier de type .txt et après l'élimination des valeurs de perturbation, c.à.d. les valeurs nuls. On doit importer le fichier dans l'espace de travail du logiciel MATLAB. Pour le faire, on utilise la commande « Import Data ».

#### **3.6.2 La Phase d'estimation:**

Le System Identification fournit une interface utilisateur graphique. Il couvre la plupart des fonctions de la boîte à outils, et permet d'accéder facilement à toutes les variables qui sont créés au cours d'une session. Il est bien lancé en tapant "Ident" dans la fenêtre de commande MATLAB (Figure 3.5).

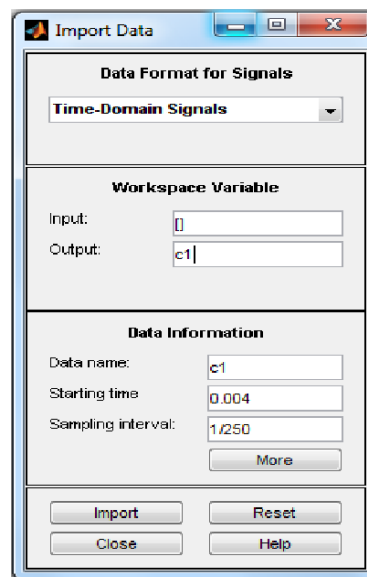


**Figure 3.5.** La fenêtre d'informations "Ident" principale.

L'information principale et la fenêtre de communication «Ident» est dominé par deux tables, une pour les ensembles des données disponibles et une autre pour les modèles créés. Les ensembles des données sont entrées dans le tableau des données par les importations en provenance de l'espace de travail MATLAB. Les modèles sont entrés dans le conseil d'administration sommaire en les évaluant à partir des données « In Put ».

### 3.6.3 Importation des données :

La figure 3.6 montre la boîte de dialogue pour l'importation des données lorsqu'on clique sur la commande « Import Data ».



**Figure 3.6.** La fenêtre dialogue pour importer les données.

Après l'ouverture de la fenêtre « import Data », on doit choisir la commande « Time Domain Signals ». Pour le Input, lorsque le signal d'entrée est inconnu, on doit l'injecter en tant que vecteur ([ ]). L'output doit porter le même nom que fichier d'accélération enregistré par le compilateur.

Enfin, en cliquant sur l'item "Import", les données sont automatiquement insérées dans le tableau de données dans l'interface graphique.

A ce stade, il est généralement recommandé de traiter les données importées à des fins d'estimation et de validation en sélectionnant l'élément et on clique dans la commande "Remove means ".

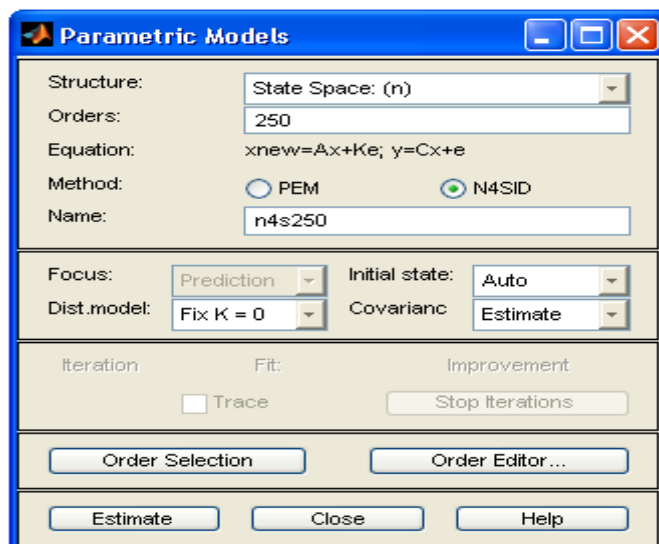
Le traitement des données consiste à enlever les valeurs moyennes ou des tendances linéaires des signaux (les moyens et les tendances linéaires sont ensuite calculés et retiré de chaque signal individuel).

Il est également suggéré, à ce stade de filtrer les données importées à travers un filtre linéaire. Le pré-filtrage est un bon moyen d'éliminer la dérive et le bruit de haute fréquence dans les données qui ne devrait pas affecter l'estimation du modèle, et aussi une bonne alternative de traitement « Detrending » (en coupant les basses fréquences de la bande passante). Cela se fait en sélectionnant le graphe des données importées puis déplacé le nouveau graphe dans la fenêtre principale.

Maintenant, et après avoir inséré l'ensemble des données dans le tableau, les données peuvent être examiné en cliquant sur la commande "Data View" pour la vérification. Une parcelle de signaux de sortie sera montré pour les ensembles de données insérées. Le but d'examiner les données de ces moyens est de savoir si il ya des portions de ces dernier qui ne sont pas pertinentes pour l'identification, si le contenu de l'information des données est adapté dans les régions de fréquence intéressante, et si les données doivent être prétraités en quelque sorte, avant de les utiliser pour l'estimation.

### 3.6.4 Estimation du modèle :

L'opération de l'estimation du modèle pour les systèmes linéaires est accessible en sélectionnant le menu "Estimates" dans la fenêtre "ident", puis en choisissant "Parametric Models". Ce dernier ouvre une boîte de dialogue «Parametric Models», comme il a été figuré ci-dessous.



**Figure 3.7.** . La boîte de dialogue pour évaluer des modèles paramétriques.

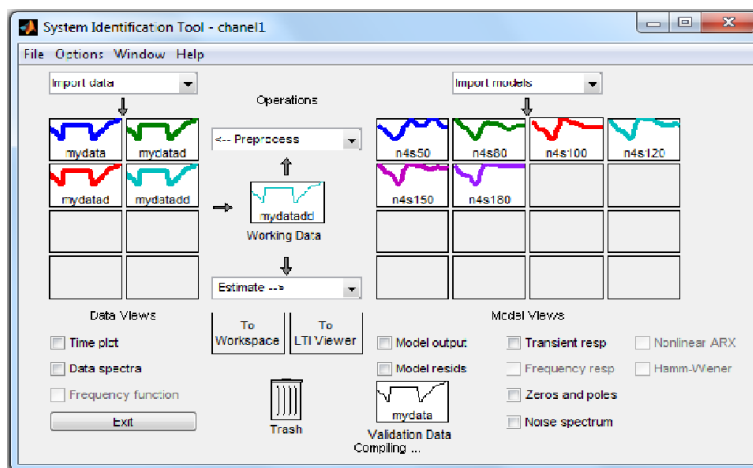
Dans ce travail, et comme il a été introduit au début de ce chapitre, la technique d'identification a été établie à l'aide du code N4SID. Pour qu'on puisse juger une valeur de fréquence, on doit changer l'ordre jusqu'à obtenir la même lecture des plusieurs graphes.

Pour obtenir une bonne estimation du modèle, l'utilisateur n'a qu'à cliquer sur le bouton «Estimer» dans la boîte de dialogue «Parametric Models ».

### 3.6.5 L'estimation des propriétés dynamiques :

Lorsque l'estimation du modèle paramétrique est fait, le «ident» apparaît une autre fois (Figure 3.8) avec un petit graphique inséré dans le tableau des données représentant les données saisies et un autre au sein du conseil modèle représentant le modèle estimé.





**Figure 3.8.** . La fenêtre "Ident" après évaluation du modèle.

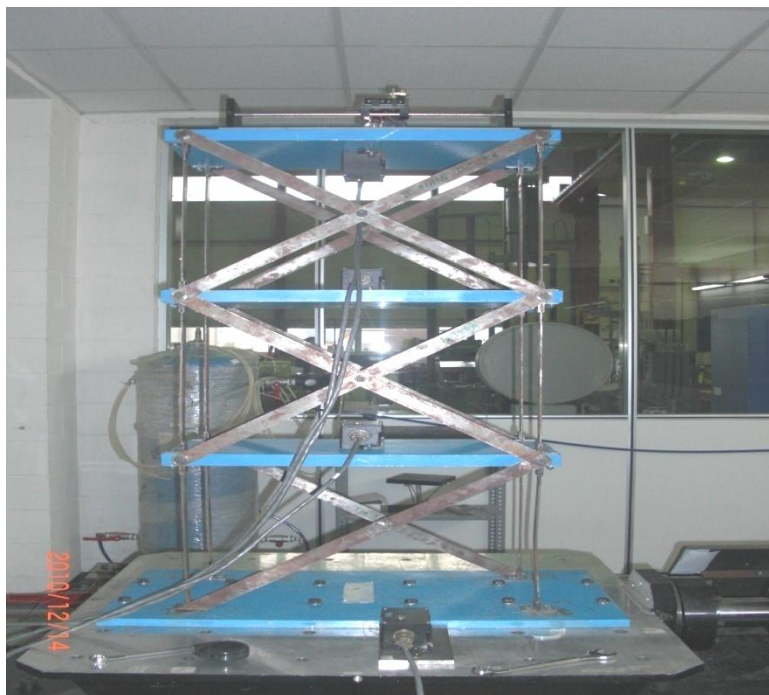
L'estimation du modèle n'est qu'une première étape. Pour obtenir les résultats de notre modèle, on doit cocher sur la commande « Noise Spectrum » après la sélection des graphes pour avoir la lecture des fréquences propres.

## CHAPITRE IV

### PRESENTATION DU MODE EXPEREMENTAL

#### 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, un cas d'étude expérimental sur une table vibrante d'un modèle réduit en acier sera présenté. Le contrôle de la santé des structures et l'identification du système d'une construction se fait de la même manière que celui appliqué sur notre essai de vibration par la table vibrante présenté dans ce chapitre. La section suivante montre une description générale du modèle, ainsi que la procédure du test dynamique. Le test a été accompli au sein du laboratoire de Mécanique Structurale de l'université de Pavie, Italie, dans la période de Décembre 2010. La figure 4.1 montre une vue globale de l'essai expérimental (Modèle réduit sur table vibrante et position des capteurs accélérométriques).



**Figure4-1** : Le modèle réduit sur la table vibrante.

## 4.2 Description générale de la structure :

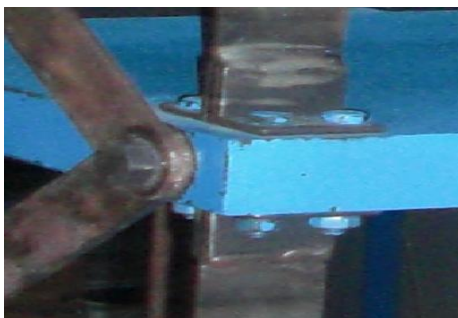
Le test sur la table vibrante est réalisé pour un modèle réduit composé de trois niveaux. La hauteur de chaque niveau est de 38cm. Les niveaux sont séparés par des plaques en acier d'une épaisseur de 3cm. le poids totale de la structure est d'environ de 150 kg.

Sur chaque plaque, un accéléromètre est fixé dans des positions définies, de plus un quatrième est positionné sur la table vibrante pour le suivi du signale d'entrée. La structure est composée de deux éléments : les poteaux et les plaques. La fixation entre les deux est faite par des boulons. Les plaques métalliques jouent le rôle des plancher avec des dimensions de 30x60 comme section et de 3cm d'épaisseur et un poids d'environ 50kg (figure 4.4). Les poteaux ont des sections rectangulaires de dimension 20x3 mm<sup>2</sup>. Ils ont une section mince pour qu'on puisse détecter pendant le test les différents modes de vibration.

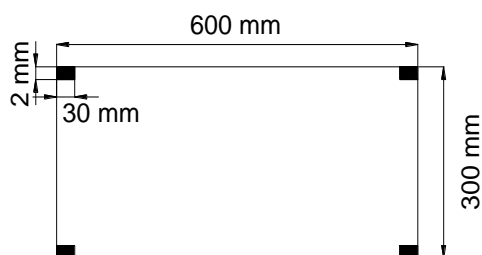


**Figure 4.2** Le modèle éléments finis 3-D de la structure étudiée.

La structure est composée de 16 nœuds. L'assemblage se fait par des boulons à l'aide des cornières en acier entre les niveaux. La figure 4.3 montre le mode de fixation des éléments sur les nœuds de la structure.



**Figure 4.3** Mode de fixation des éléments dans les nœuds



**Figure 4.4** Dimensions des plaques métalliques

### 4.3 Caractéristiques des matériaux :

Notre modèle est une structure composée de deux éléments en acier :

- Poteaux
- Dalles

Le tableau ci-dessus contient les propriétés mécaniques initiales de l'acier :

**Tableau 4-1** : Propriétés mécaniques initiales du matériau.

<b>Module d'élasticité (MPa)</b>	$2.1 * 10^5$
<b>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	7800
<b>Coefficient de Poisson</b>	0.2

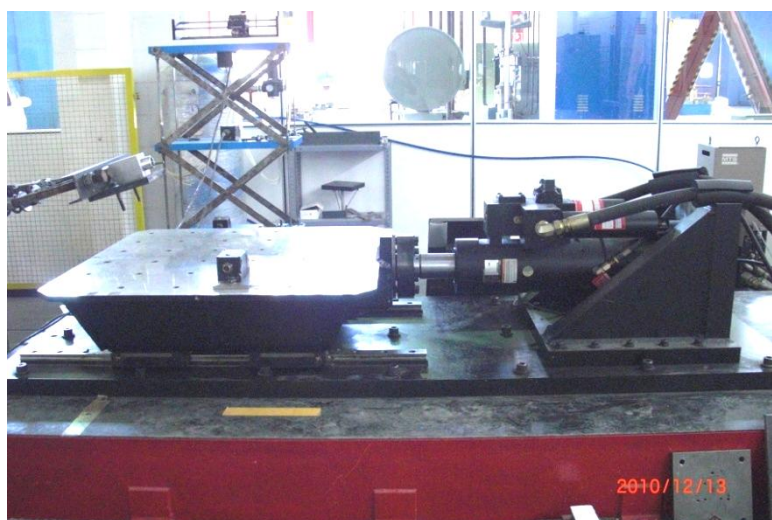
### 4.4 Description de l'équipement de mesure :

Le matériel utilisé pour la réalisation du test se compose de :

- Une structure en acier
- La table vibrante (Figure 4.5)
- D'un régulateur numérique de signal (Figure 4.6)
- Une boîte de jonction de quatre canaux (Figure 4.7),
- Quatre accéléromètres unidimensionnels du modèle de "FBA ES-U2" (Figure 4. 8)
- Quatre câbles.
- Un micro-ordinateur comme unité centrale de traitement.

#### 4.4.1 Table vibrante :

La table vibrante utilisée pour la réalisation du test est une MTS2.8, est de dimension de (1x1) m<sup>2</sup>, relié directement avec un régulateur du signal.



**Figure 4.5:** Table vibrante MTS 2.8 de (1x1) m<sup>2</sup>.

#### 4.4.2 Régulateur numérique du signal :

Le régulateur numérique du signal (Figure 4. 6) est un appareil de contrôle du signadynamique. Il offre une résolution supérieure pour répondre aux besoins des chercheurs dans des applications à haute fréquence dynamique, où la fidélité du signal et l'intégrité des données sont vitales. Le régulateur numérique est relié directement avec la table vibrante.



Figure 4.6: Régulateur du signal.

#### 4.4.3 La boîte de jonction de quatre canaux:

La figure 4.7 montre la boîte de jonction qui est un appareil reliant les quatre accéléromètres avec l'unité centrale en utilisant des câbles.

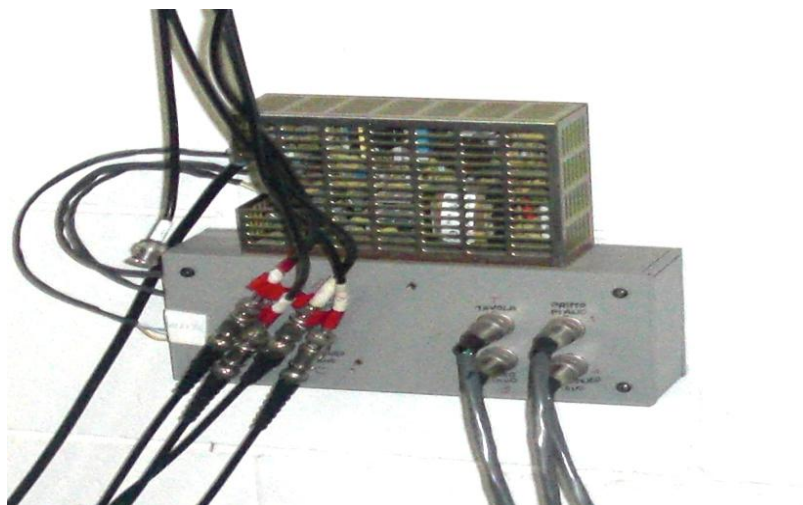


Figure 4.7: Boîte de jonction.

#### 4.4.4 L'accéléromètre uni-axial:

Pour ce test, le capteur utilisé est un accéléromètre uni-axiale de type Episensor U2 conçu spécialement pour les applications d'ingénierie structurelle. Cependant, il peut être utilisé dans une variété d'applications de mesure des accélérations de  $\pm 4$  g et le bas pour le niveau de bruit ambiant. Avec une échelle d'enregistrement qui varie de  $\pm 0,25$  à  $\pm 4$  g

(sélectionnable par l'utilisateur). Le capteur ES-U2 offre aussi une échelle d'enregistrement sur des mouvements dynamiques qui peuvent être utilisés sur les structures les plus variées et les plus complexes.

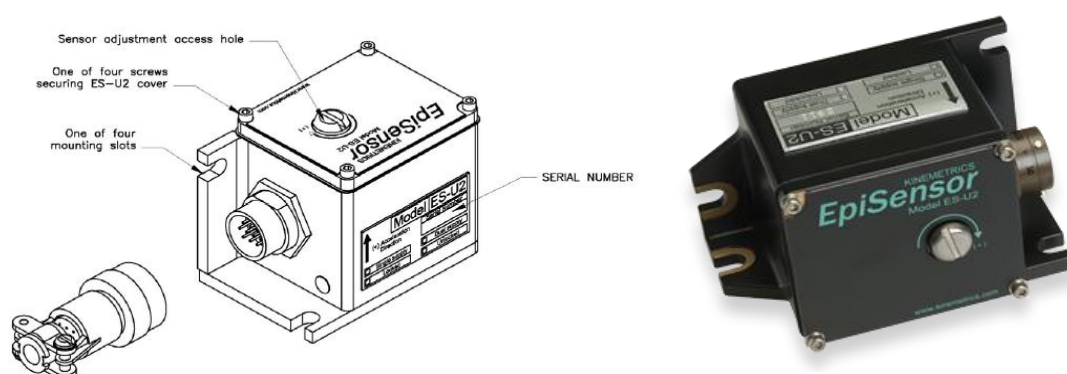
Puisque le capteur ES-U2 est extrêmement sensible au faible bruit, il peut détecter les mouvements de la matière de vibration ambiante dans la plupart des sites urbains et structures de génie civil de 1 Hz à 200 Hz. La sortie de l'ES-U2 peut être amplifiée et conditionnée. Le signal ne nécessite aucun système électronique externe autre que le système d'acquisition de données.

La bande passante nettement améliorée de DC à 200 Hz permet aux ingénieurs et aux scientifiques d'étudier les motions à des fréquences plus élevées tout en maintenant la réponse très important. DC qui permet le calibrage de champ simple et réduit la confusion de traitement.

Le circuit de sortie est également considérablement amélioré. Quatre types de sorties peuvent être choisies par l'utilisateur:  $\pm 2,5V$  asymétrique,  $\pm 10V$  asymétriques,  $\pm 5V$  ou  $\pm$  écart différentiel de 20V.

Le  $\pm 2,5V$  avec sorties unipolaires est approprié pour une utilisation avec des instruments traditionnels Kinometrics d'enregistrement de tremblement de terre.

Le  $\pm 10V$  avec sortie unipolaire et  $\pm 20V$  avec sortie différentielle sont bien adaptés pour une utilisation avec Kinometrics «Makalu » enregistreur numérique 24-bit et Quanterra de 24-bit enregistreurs numériques.



**Figure 4.8.** Accéléromètre uni-axial ES-U2.



**Table 4.2.** Les caractéristiques de l'accéléromètre uni-axial "ES-U2".

Principales caractéristiques	Faible bruit Bande passante étendue - DC à 200 Hz Sélectionnables par l'utilisateur plage pleine échelle Bobine d'étalonnage (standard) Sortie différentiel (sélectionnable par l'utilisateur)
Specifications	
Plage dynamique	140 dB +
Bande passante	DC à 200 Hz
Bobine d'étalonnage	Standard
Échelle gamme complète	Sélectionnable par l'utilisateur: $\pm 0,25.g$ , $\pm 0,5.g$ , $\pm 1.g$ , $\pm 2.g$ ou $\pm 4.g$ .
Sorties	Au choix de l'utilisateur: $\pm 2,5V$ ; $\pm 10V$ asymétriques ; $\pm 5V$ différentielle ; $\pm 20V$ différentielles.
Réglage initial	Trou d'accès convivial pour ajustement simple
Linéarité	$< 1000 \text{ pg} / \text{g}^2$
Hystérésis	$< 0,1\%$ en pleine échelle
Axe de sensibilité de la Croix	$< 1\%$ (y compris un mauvais alignement)
Point de dérive thermique du zéro	$/ 500\mu\text{g} \text{ } ^\circ\text{C} < (1\text{g du capteur})$
Consommation d'énergie	Repos $< 9 \text{ mA}$ courant de $\pm 12 \text{ V}$
Montage	horizontal ou vertical
Température de fonctionnement	$-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ à $70 \text{ } ^\circ\text{C}$ ( $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ à $160 \text{ } ^\circ\text{F}$ )
Logement	EMI / RFI Enveloppe étanche 55 x 65 x 97mm
Poids	0,35 kg

#### 4.4.5 Un micro-ordinateur comme unité centrale de traitement :

Dans le test de vibration sur la table vibrante, les données détectées par les accéléromètre sont enregistrés automatiquement sur des fichiers à l'aide d'une unité centrale pour le traitement et pour l'identification du système. La figure 4.9 montre l'unité centrale de traitement avec un écran pour l'affichage.





**Figure 4.9 :** L'acquisition des données.

#### **4.5 Procédure du test :**

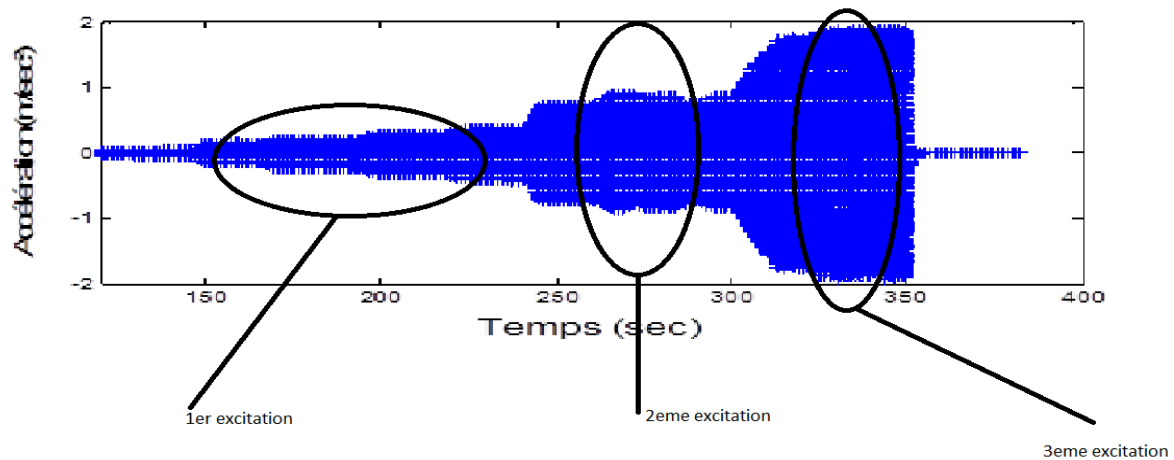
Le test expérimental a été accompli le 16 Décembre 2010 dans le laboratoire du département de Mécanique structurelle de l'université de Pavie en Italie et avec l'assistance du Professeur Fabio CASCIATI. Le test a été fait sur une structure en acier composé de trois niveaux.

On commence par la fixation d'une plaque métallique de dimension (80x40) cm<sup>2</sup> sur la table vibrante à l'aide des boulons. Par la suite, on a assemblé les éléments composant la structure. La structure a été posée sur la table vibrante avec emplacement des accéléromètres dans des points bien définis. La connexion de ces derniers avec l'unité centrale par la boîte de jonction est faite. Enfin, on a donné trois variations d'excitations dynamiques à la structure par le régulateur numérique pendant 17 minutes. L'enregistrement des données des accélérations dans la structure se fait automatique sur le PC.

##### **4.5.1 L'acquisition des données :**

Le modèle a été équipé de quatre accéléromètres. Les données ont été échantillonnées à deux cents cinquante 250 enregistrements par seconde d'où un intervalle de 0.004 secondes pour recueillir un maximum de données pour une identification précise des signaux modales. Les lectures de vibration ont été enregistrées sur une durée de 17 minutes. Une partie utile de dix minutes en session de mesure a ensuite été choisie après élimination des valeurs nulles qui existent sur le fichier enregistré. Dans la figure 4.10, une base de données d'échantillons de

l'une des sessions de mesure est présentée pour l'accéléromètre de la table vibrante. Elle contient sept phases de chargement.



**Figure 4.10** Signal enregistré de la table vibrante.

#### 4.5.2 Résultats de l'essai expérimental :

Les résultats enregistrés par l'unité centrale de traitement des fichiers ont été importés dans le logiciel MATLAB pour estimer la fonction de densité spectrale (PSD) des parcelles de chaque partie enregistré.

Les résultats obtenus sont identifiés par deux méthodes de calcul. La première est faite par le code de calcul N4SID composé de deux types de calcul :

- Calcul avec sortie uniquement (Output only).
- Calcul avec entrée et sortie (Input Output).

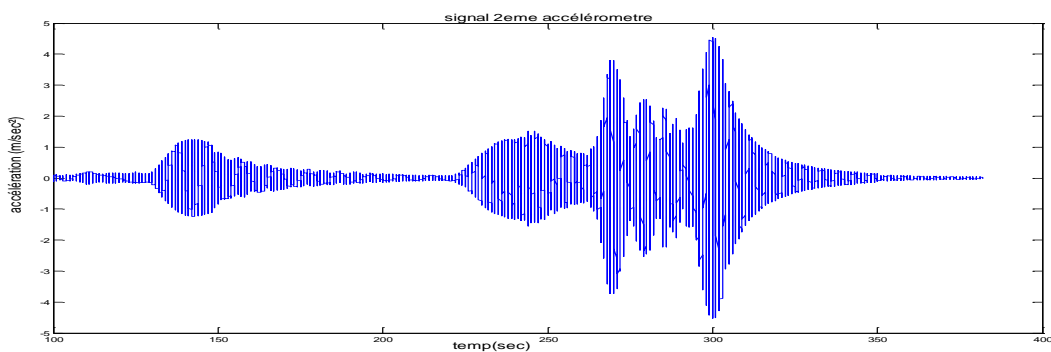
La deuxième est réalisée par la fonction de densité spectrale.

#### 4.5.3 Identification du système par l'algorithme N4Sid "MATLAB" :

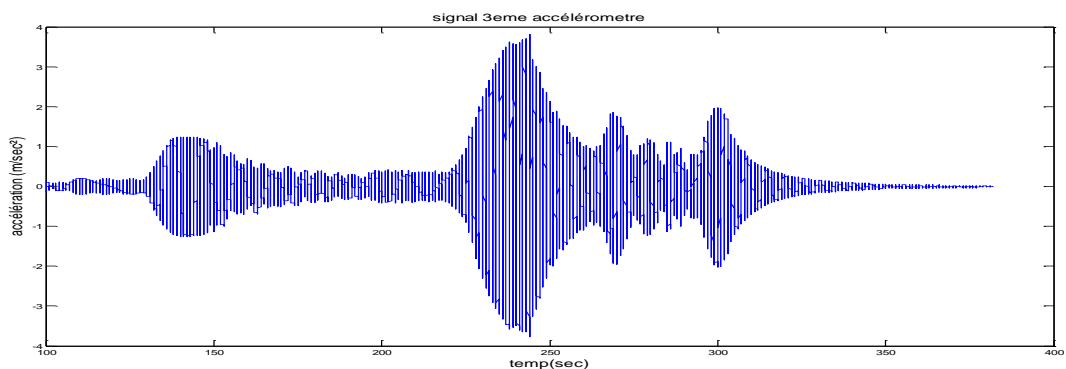
Maintenant, la technique d'identification N4SID disponible dans l'environnement MATLAB est utilisée pour construire un modèle mathématique du système étudié, puis d'estimer les fréquences naturelles et ses périodes correspondantes pour les trois premiers modes. Les étapes qui ont été décrites en détail dans le chapitre trois sont suivies et les données sélectionnées sont, en partie utile, enregistrées sur une durée de dix minutes. Après

l'importation, élimination de la tendance et l'insertion de l'ensemble des données dans le tableau du MATLAB, on doit vérifier le signal de la table vibrante pour savoir s'il ya des parties de données qui ne sont pas appropriées pour l'identification, et de vérifier si les données n'ont pas été pré- traités en quelque sorte, avant de les utiliser pour l'estimation.

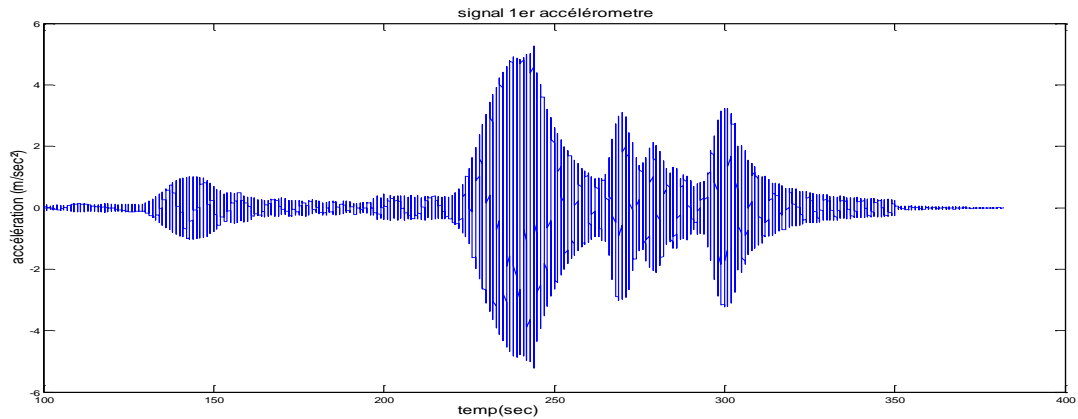
Les signaux captés par l'enregistreur numérique sur chaque accéléromètre pendant le test de vibration sur la table vibrante sont présenté sur la figure suivante (figure 4.11) :



**Figure 4.11** : Le signal de vibration sur le premier accéléromètre.

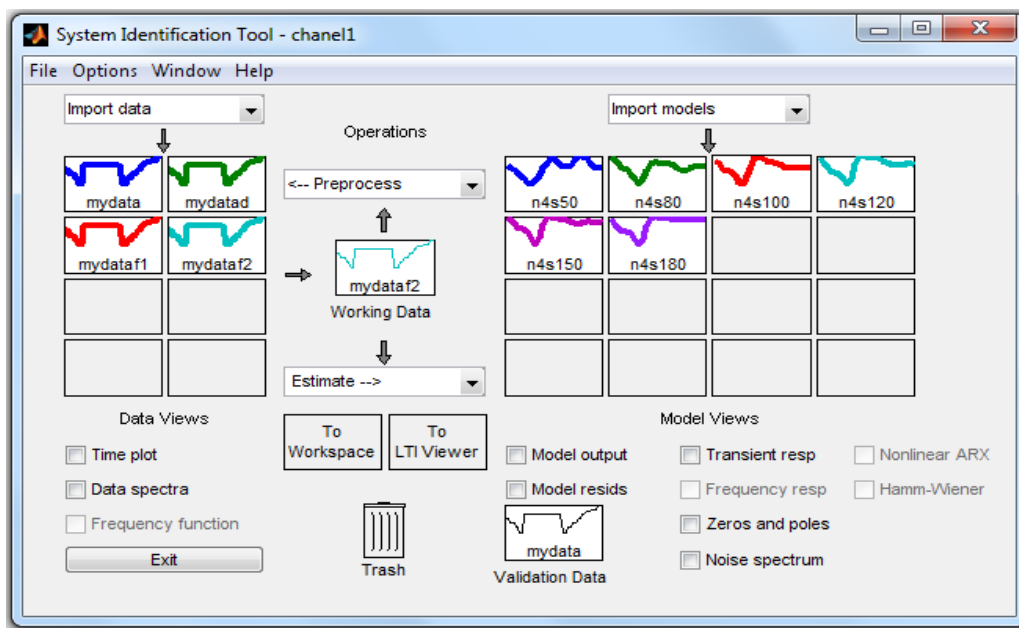


**Figure 4.12** : le signal de vibration sur le deuxième accéléromètre.



**Figure 4.13** : Le signal de vibration sur le troisième accéléromètre.

La figure suivante (figure 4.14) montre la fenêtre "Ident" après transformation. Les données saisies sont visées dans le tableau de données par Mydata. Il est désigné comme mydataf, après filtrage.



**Figure 4.14** : La fenêtre d'informations "Ident" principale après transformation.

Dans les figures suivantes, les abscisses des pics dans la densité spectrale et de la transformée de Fourier rapide, sont considérés comme les fréquences naturelle détectées du modèle, où les trois premiers sont une évidence pour les trois accéléromètres. Les capteurs utilisés uni-axiale sont placés dans la direction x, alors que la détection des fréquences

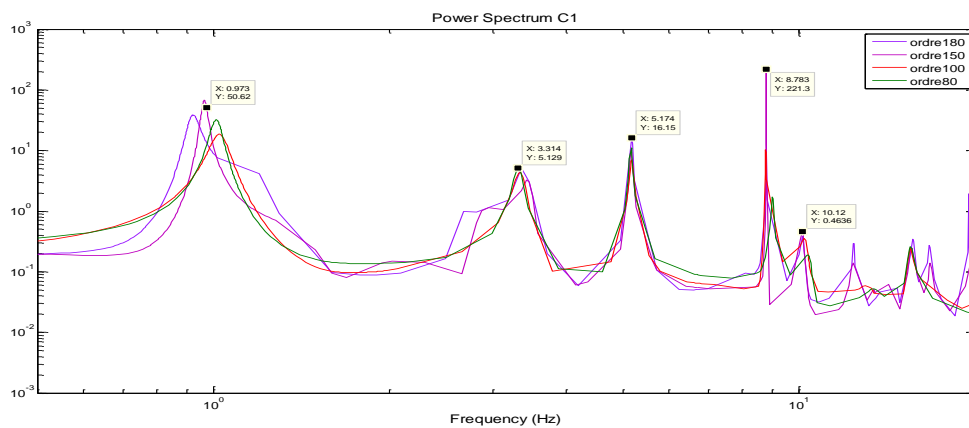
naturelles se fait dans cette direction. C'est pour cela que les trois premiers pics, qui apparaissent dans les parcelles suivantes, représentent les trois premières fréquences naturelles du modèle.

Comme il a été illustré dans le chapitre précédent, il n'y a pas de critère standard de sélection pour les modèles. C'est pourquoi les ordres du modèle (50, 80, 100, 120 et 150) ont été utilisés pour chaque type de données ; et bien sûr, les modèles correspondants à cet ordre de plusieurs choix sont comparés en affichant dans une fenêtre de dialogue pour sélectionner les ordres appropriés.

Les Figures suivantes montrent l'analyse du spectre de puissance sur les trois chaînes qui repose sur une comparaison entre les cinq modes d'ordre N4SID.

#### 4.5.4 Résultats identifiés par la méthode de sortie uniquement (Output only) :

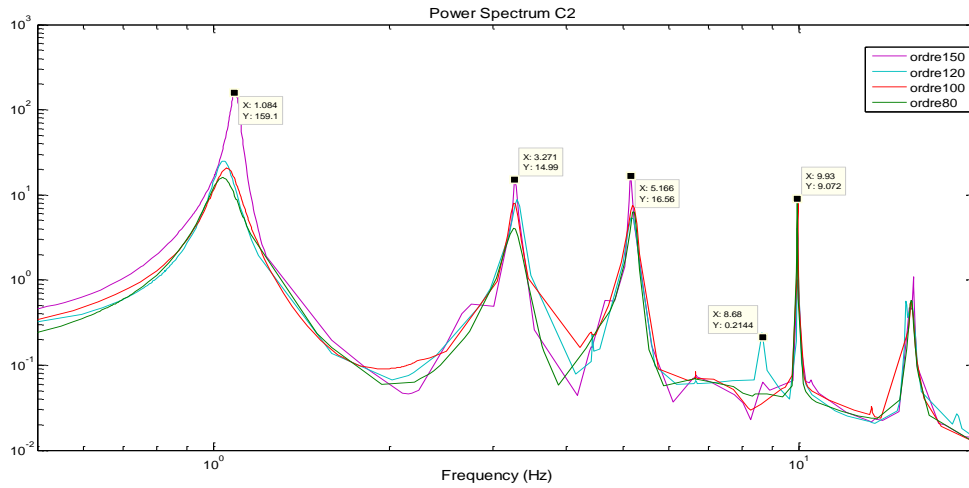
Les résultats obtenus précédemment sont déterminés par la méthode (Output only), c.à.d. dans le programme MATLAB, on n'a pas besoin de donner sur le signal d'entrée. Le programme MATLAB utilise seulement les signaux de sortie pour identifier les différentes fréquences du modèle.



Figures 4.15 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre I.

Tableau 4.3 : Résultats des fréquences et des périodes propres du premier accéléromètre.

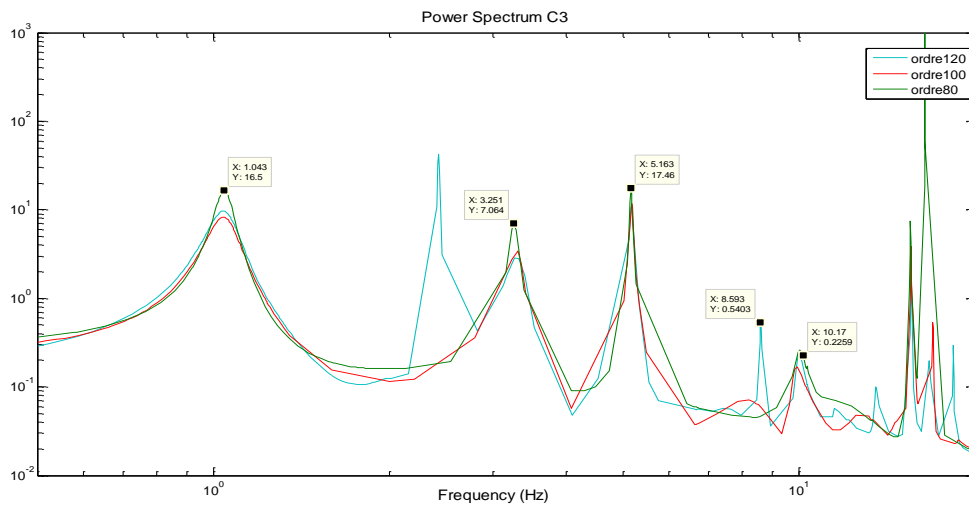
Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc1	Fréquence (Hz)	0.97	3.31	5.17	8.78	10.12
	Période (Sec)	1.03	0.30	0.20	0.12	0.10



Figures 4.16 Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre II.

Tableau 4.4 : Résultats des fréquences et des périodes propres du deuxième accéléromètre.

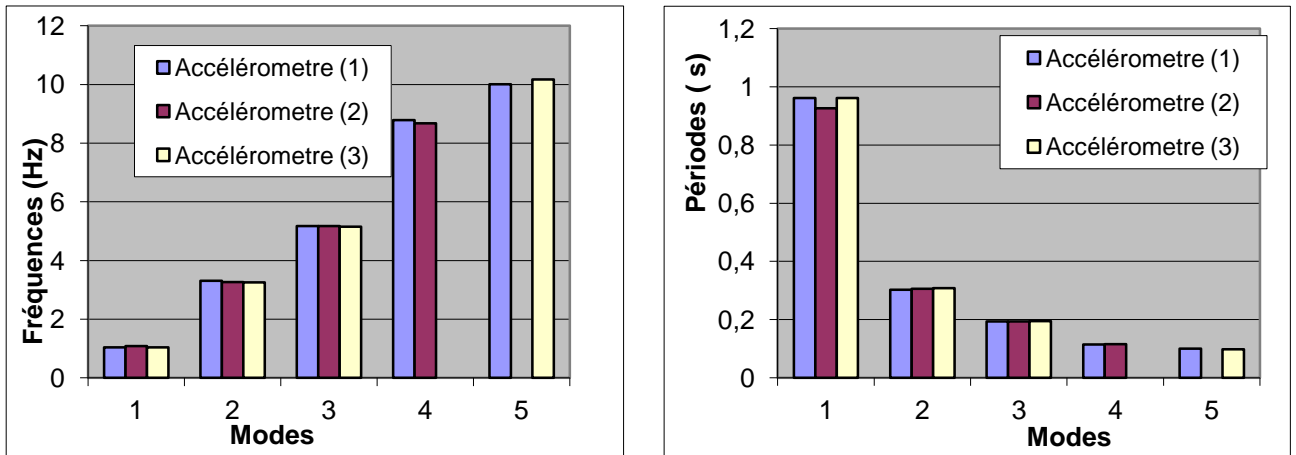
Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc2	Fréquence (Hz)	1.08	3.27	5.16	8.68	9.93
	Période (Sec)	0.93	0.31	0.20	0.12	0.10



Figures 4.17 : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre III.

Tableau 4.5 : Résultats des fréquences et des périodes propres du troisième accéléromètre.

Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc3	Fréquence (Hz)	1.04	3.25	5.17	8.59	10.17
	Période (Sec)	0.97	0.31	0.20	0.11	0.10

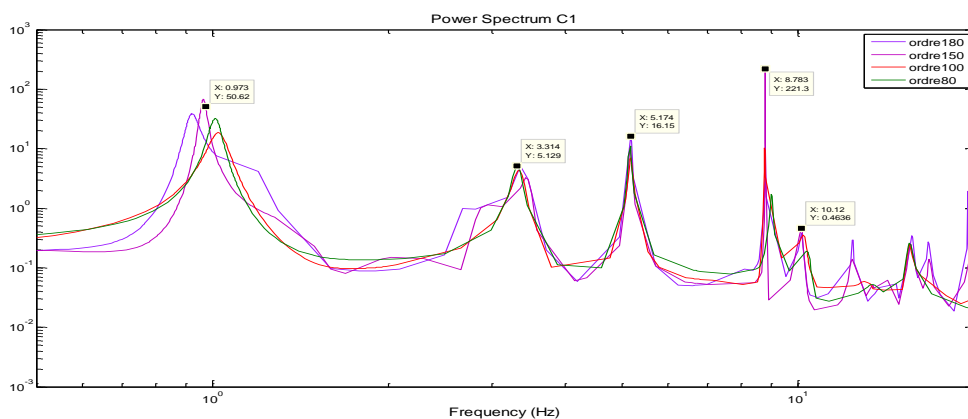


**Figure 4.18** Histogrammes de comparaison entre les trois accéléromètres des fréquences et des périodes par la méthode « Output only ».

En menant la comparaison des résultats de la méthode (Output Only) entre les trois accéléromètres, l'histogramme de la figure (4.18) montre que la différence des fréquences propre est négligeable.

#### 4.5.5 Résultats identifiés par la méthode avec entrée et sortie (Input Output) :

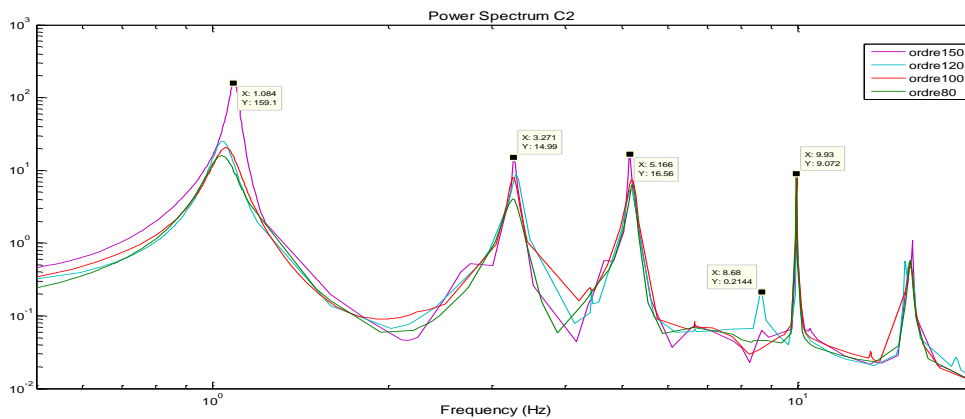
Dans cette méthode, les fréquences propre du modèle sont identifiées par le programme MATLAB , mais avec l'existence des données sur le signal d'entrée.



**Figures 4.19** : Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre I.

**Tableau 4.6 :** Résultats des fréquences et des périodes propres du premier accéléromètre.

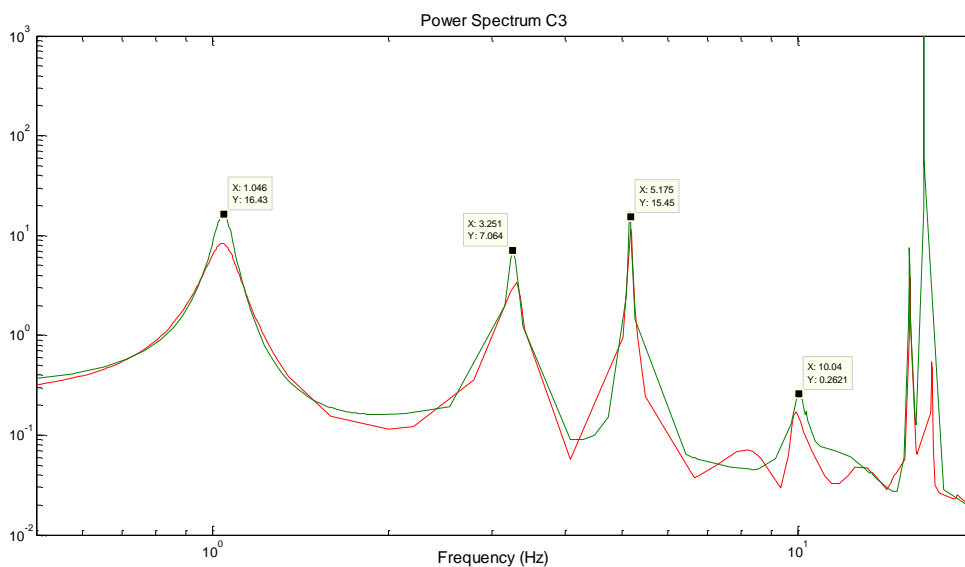
Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc1	Fréquence (Hz)	0.97	3.31	5.17	8.78	10.12
	Période (Sec)	1.03	0.30	0.20	0.12	0.10



**Figures 4.20 :** Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre II.

**Tableau 4.7:** Résultats des fréquences et des périodes propres du deuxième accéléromètre.

Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc2	Fréquence (Hz)	1.08	3.27	5.16	8.68	9.93
	Période (Sec)	0.93	0.31	0.20	0.11	0.10

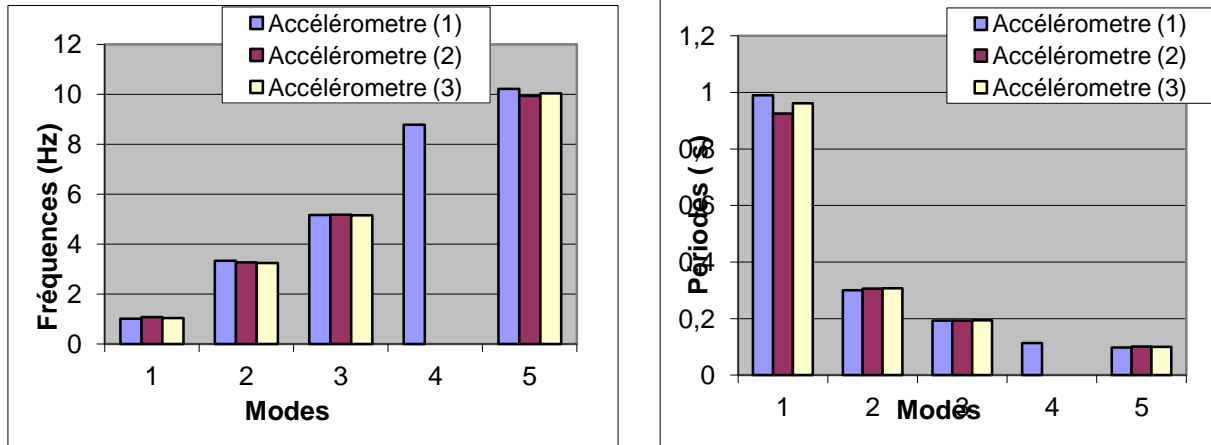


**Figures 4.21 :** Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre III.



**Tableau 4.8** : Résultats des fréquences et des périodes propres du troisième accéléromètre.

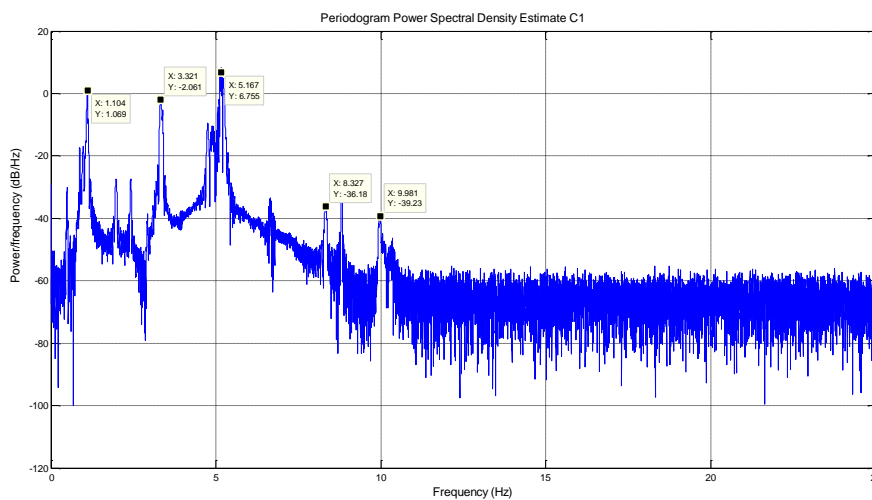
Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc3	Fréquence (Hz)	1.04	3.25	5.17	ND	10.04
	Période (Sec)	0.97	0.31	0.20	ND	0.10



**Figure 4.22** Histogrammes de comparaison entre les trois accéléromètres des fréquences et des périodes par la méthode «Input Output».

### 4.5.6 Résultats identifiés par la méthode de la fonction de densité spectrale :

Le logiciel MATLAB offre un programme intégré pour l'identification d'un modèle. Les résultats suivants montrent le calcul expérimental des fréquences propres d'un modèle par la fonction de densité spectrale.

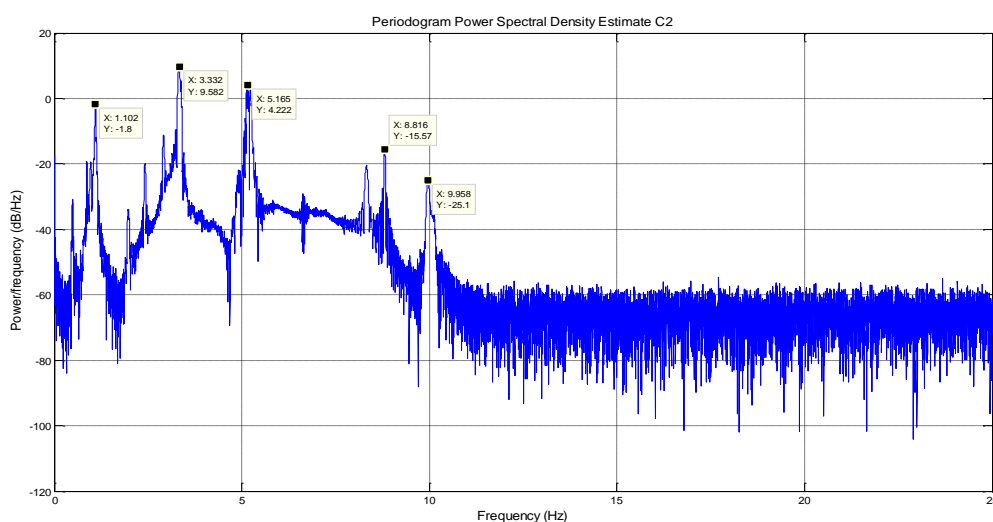


**Figures 4.23** Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre I.

Après une analyse du graphe tiré par la méthode de la fonction de densité spectrale, le tableau suivant montre les résultats des fréquences et des périodes propres captés par le premier accéléromètre.

**Tableau 4.9** : Résultats des fréquences et des périodes propres du premier accéléromètre

Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc1	Fréquence (Hz)	1.10	3.32	5.16	8.82	9.98
	Période (Sec)	0.91	0.30	0.20	0.12	0.10

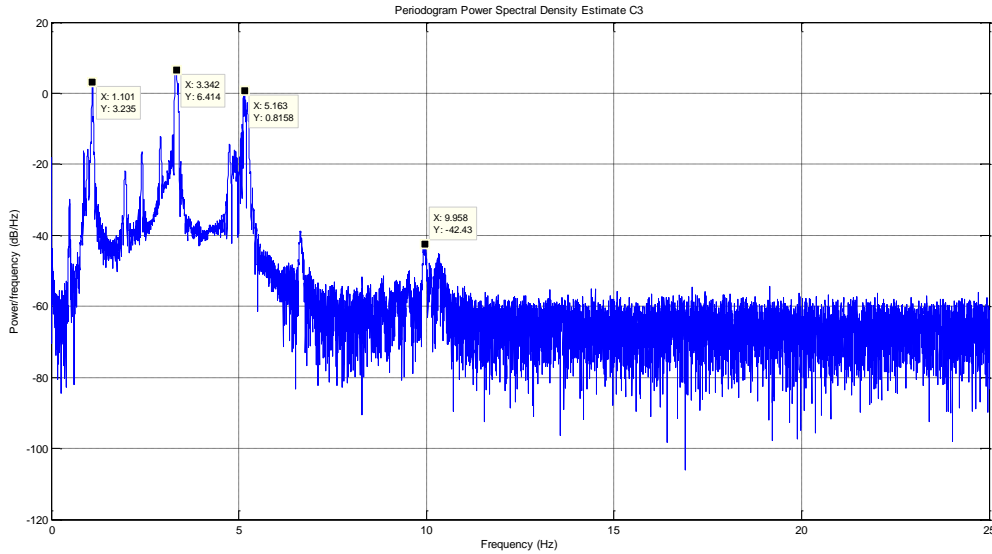


**Figures 4.24** Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre II.

Après l'analyse du graphe en dessus tiré par la méthode de la fonction de densité spectrale, le tableau suivant montre les résultats des fréquences et des périodes propres captés par le deuxième accéléromètre.

**Tableau 4.10** : Résultats des fréquences et des périodes propres du deuxième accéléromètre.

Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc2	Fréquence (Hz)	1.10	3.33	5.16	8.81	9.96
	Période (Sec)	0.91	0.30	0.20	0.12	0.10

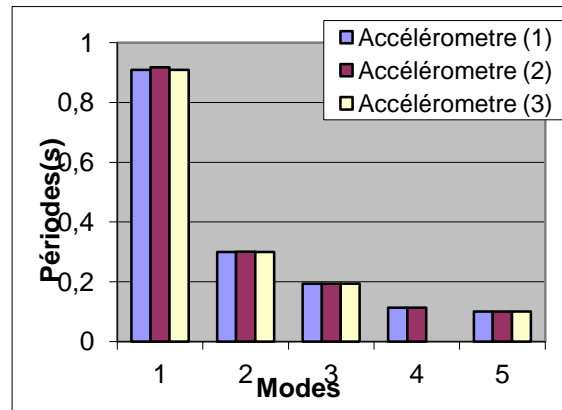
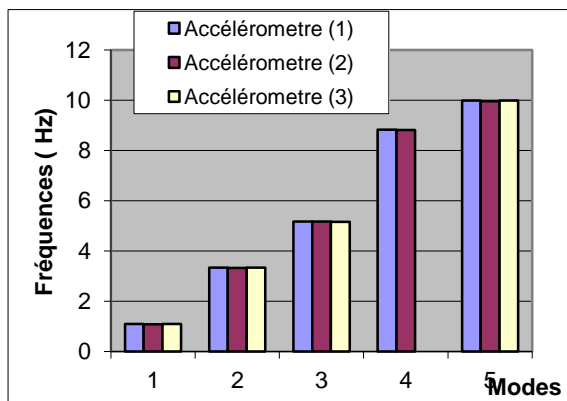


**Figures 4.25 :** Résultat fréquentiel correspondant à l'accéléromètre III.

L'analyse de la figure 4.25 montre dans le tableau suivant les résultats des fréquences et des périodes propres captées par le troisième accéléromètre.

**Tableau 4.11:** Résultats des fréquences et des périodes propres du troisième accéléromètre

Accéléromètre		Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
Acc3	Fréquence (Hz)	1.10	3.34	5.16	ND	9.95
	Période (Sec)	0.91	0.30	0.20	ND	0.10

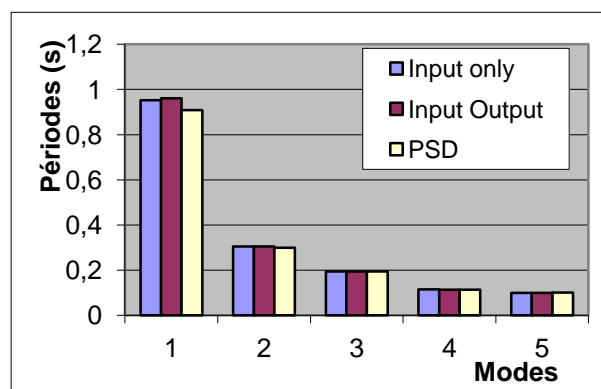
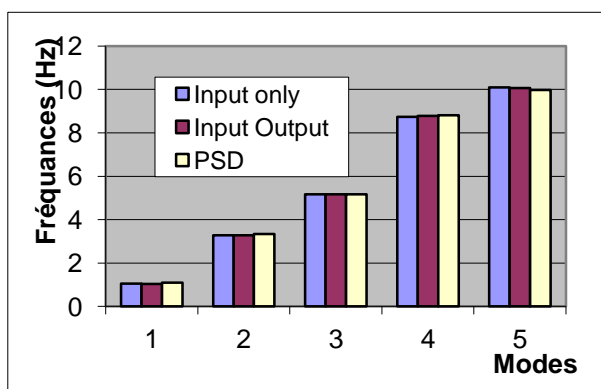


**Figure 4.26** Histogrammes de comparaison entre les trois accéléromètres des fréquences et des périodes par la méthode «PSD».

Le tableau suivant représente les résultats récapitulatifs calculés par les trois méthodes d'identification des fréquences naturelles du modèle réduit.

**Tableau 4.12:** Résultats récapitulatifs des fréquences et des périodes propres (unités : Hz, Secondes):

Méthodes	Modes	Accéléromètre 1		Accéléromètre 2		Accéléromètre 3		moyenne	
		Fréquence F	Période T	Fréquence F	Période T	Fréquences F	Période T	Fréquences F	Période T
<b>Output only</b>	1.00	0.97	1.03	1.08	0.93	1.04	0.96	1.05	0.95
	2.00	3.31	0.30	3.27	0.31	3.25	0.31	3.28	0.31
	3.00	5.17	0.19	5.16	0.19	5.17	0.19	5.16	0.19
	4.00	8.78	0.11	8.68	0.12	8.59	0.11	8.73	0.11
	5.00	10.12	0.10	9.93	0.10	10.17	0.10	10.09	0.10
<b>Input Output</b>	1.00	0.97	1.03	1.08	0.93	1.04	0.96	1.04	0.96
	2.00	3.31	0.30	3.27	0.31	3.25	0.31	3.28	0.30
	3.00	5.17	0.19	5.16	0.19	5.17	0.19	5.17	0.19
	4.00	8.78	0.11	8.68	0.12	ND	ND	8.73	0.11
	5.00	10.12	0.10	9.93	0.10	10.04	0.10	10.06	0.10
<b>PSD</b>	1.00	1.10	0.91	1.10	0.92	1.10	0.91	1.10	0.91
	2.00	3.32	0.30	3.33	0.30	3.34	0.30	3.34	0.30
	3.00	5.16	0.19	5.16	0.19	5.16	0.19	5.17	0.19
	4.00	8.82	0.11	8.81	0.11	ND	0.11	8.81	0.11
	5.00	9.98	0.10	9.96	0.10	9.95	0.10	9.97	0.10



**Figure 4.27** Histogrammes de comparaison des fréquences et des périodes entre les trois méthodes de calcul.

#### 4.6 Modèle éléments finis :

L'élaboration de notre modèle par éléments finis se fait par le logiciel SAP 2000 (version 12) en trois dimensions en utilisant des éléments solides pour la modélisation de la structure choisie.

#### 4.6.1 Méthode des Eléments Finis :

De nombreux problèmes complexes sont rencontrés dans le domaine de l'ingénierie. Habituellement, la résolution mathématique de ces problèmes est fastidieuse ou impossible par des méthodes analytiques. Les méthodes numériques sont alors les plus appropriées. C'est là que la puissance des éléments finis (MEF abrégée) s'affirme pour obtenir la solution numérique d'un large éventail de problèmes d'ingénierie. Son concept de base est de diviser un système ou une structure en petits éléments de dimensions finies, nommés «éléments finis». La structure initiale est alors considérée comme un assemblage de ces éléments reliés à un nombre fini de joints appelé «nœuds» ou «points nodaux». Les propriétés de l'ensemble du corps sont obtenues en combinant les propriétés des éléments.

L'équation d'équilibre de l'ensemble du corps est obtenue en combinant l'équation d'équilibre de chaque élément et d'assurer la continuité à tous les nœuds. Les conditions aux limites sont alors imposées et l'équation d'équilibre est résolue pour obtenir les variables nécessaires tels que le déplacement, la distribution de température ...etc. Au lieu de résoudre le problème pour la structure entière en une seule opération, l'attention est essentiellement consacrée à la formulation des propriétés des éléments constitutifs.

#### 4.6.2 Principales hypothèses introduites sur le modèle :

Les principales hypothèses sont proposées:

- Le comportement du matériau de la structure est supposé être linéaire, élastique, homogène et isotrope.
- Les poteaux sont encastés sur la table vibrante.
- Les dalles sont supposées comme des éléments coques épaisses.

#### 4.6.3 Propriété du matériau :

Le tableau suivant montre les propriétés initiales des matériaux nécessaires à l'analyse (déjà introduit dans le chapitre IV, tableau 4.1).

La figure suivante montre le modèle en éléments finis de notre structure, composée de deux éléments en acier (dalle et poteaux). Ce modèle développé en élément finis a été mis à jour (calibré), dans l'objectif d'obtenir une corrélation raisonnable des propriétés modales, entre les deux études expérimentale et numérique.



**Figure 4.28** : Modèle éléments finis en 3D.

Les modes propres de vibrations de notre structure sont présentés dans la Figure 4.29.



Mode I ( $f=1.04$  Hz)

Mode II ( $f=3.28$  Hz)

Mode III ( $f=5.43$  Hz)



Mode IV ( $f=9.94$  Hz)



Mode V ( $f=13.05$  Hz)

**Figure 4.29** : Formes des cinq premiers modes propres de vibration.

Les résultats des fréquences et des périodes propres obtenus par le logiciel SAP2000 sont représentés dans la figure suivante.

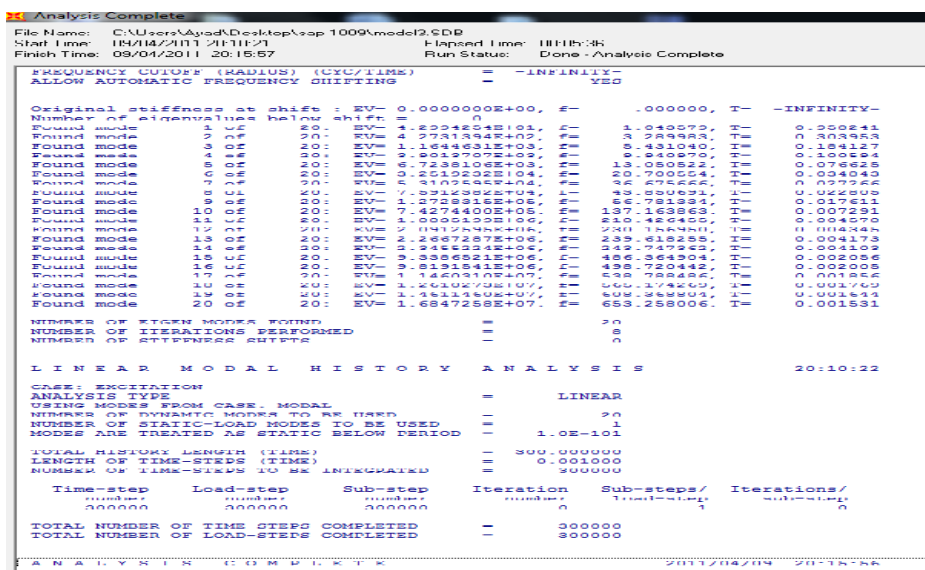


Figure 4.30 : Résultats des fréquences et des périodes propre obtenus par le logiciel SAP2000.

Tableau 4.13 : Résultats des fréquences et des périodes propre obtenus par le logiciel SAP2000.

Mode de vibration	Fréquence (Hz)	Période (sec)
1 <sup>er</sup> mode	1.04	0.95
2 <sup>ème</sup> mode	3.28	0.30
3 <sup>ème</sup> mode	5.43	0.18
4 <sup>ème</sup> mode	9.94	0.10
5 <sup>ème</sup> mode	13.05	0.07

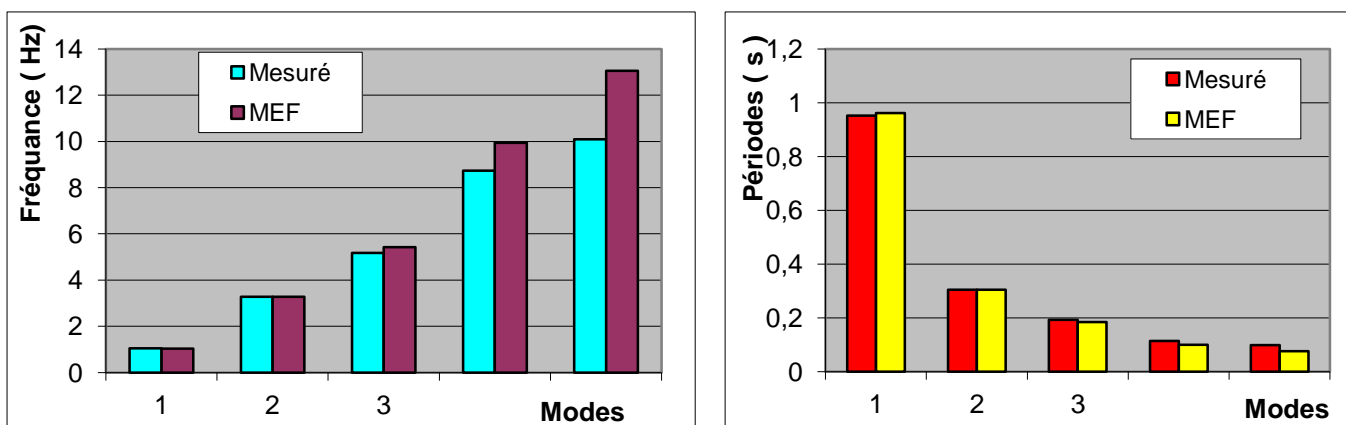
### 4.7 Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes « éléments finis, Code N4SID » :

L'analyse modale effectuée sur le modèle éléments finis en 3D est capable de déterminer les paramètres modaux tels que les fréquences et les modes propres. Ce modèle peut être validé par ceux mesurés et identifiés à partir du test sur la table vibrante. La comparaison des fréquences calculées numériquement et expérimentalement sur les trois premiers modes identifiés est indiquée dans le tableau 4.14.

**Tableau 4.14:** Comparaison des fréquences calculées numériquement et expérimentalement sur les trois premiers modes.

Mode	Fréquence (Hz)		Période (Sec)		
	Mesuré	Modèle E.F.	mesuré	Modèle E.F.	Erreur %
1 <sup>er</sup> mode	1.05	1.04	0.95	0.97	1.00
2 <sup>ème</sup> mode	3.28	3.28	0.30	0.30	0.00
3 <sup>ème</sup> mode	5.16	5.43	0.20	0.19	6.00

La figure 4.31 montre la comparaison des fréquences et des périodes propres entre les méthodes (N4SID Output Only) et la méthode des éléments finis.



**Figure 4.31** Histogrammes de comparaison des fréquences et des périodes pour les trois premiers modes.

## 4.8 Conclusion :

Il est clairement démontré un bon accord entre valeurs calculées et celles identifiées expérimentalement. Les fréquences propres du modèle de notre structure sont obtenues, à l'exception de la première, deuxième et troisième fréquence. L'erreur maximale trouvée pour ces fréquences est assez faible, étant donné que la contribution des modes correspondants est faible (< 6% pour le troisième mode de vibration). Le modèle tridimensionnel par éléments finis est validé par les résultats des essais sur la table vibrante développée par la méthode (Input Only). Ces résultats peuvent servir pour évaluer la portance, la rigidité ou appelée la santé du système et ainsi orienter en cas de projet de réhabilitation.



## CHAPITRE V

### **Application II : Teste sur une structure réelle ; le département de mécanique structurelle, université de Pavia, Italie**

#### **5.1 Introduction :**

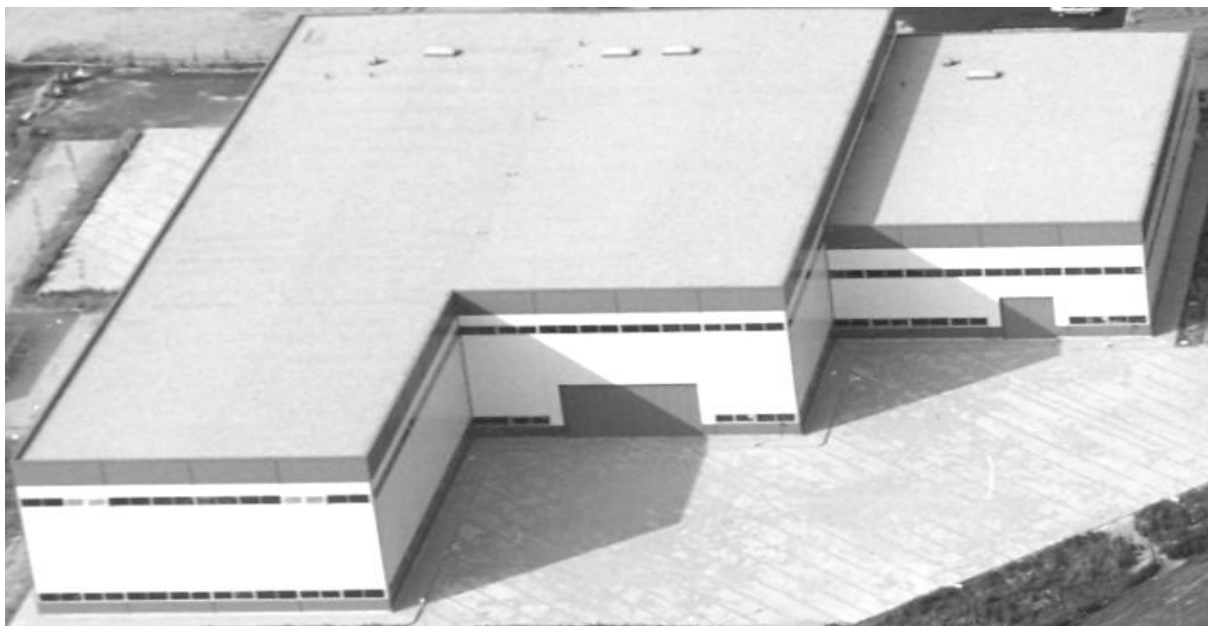
Ce chapitre est composé de deux parties ; la première représente une application de la technique du contrôle de la santé des structures sur une construction métallique réelle et existante (le département de mécanique structurelle de l'université de Pavie, Italie) sous l'effet des vibrations ambiantes. La deuxième partie présente une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus par l'utilisation du code N4sid intégré au logiciel Matlab (Matlab, 2004) et le modèle éléments finis construit par le logiciel SAP 2000 (Computer and Structures, 2000).

#### **5.2 Description de la structure étudiée :**

La structure étudiée est une construction en charpente métallique (figure 5.1), de forme irrégulière en plan et en élévation, de 81m de longueur, de 64.8m de largeur et de 13.7m d'hauteur totale. Elle est composée de deux blocs ; le premier abrite l'administration du département avec une hauteur d'environ 9m, le deuxième est la zone des laboratoires contenant un pont-roulant et les différents matériels technologiques. La structure est renforcée par des contreventements dans le sens longitudinal et sur toute la hauteur comme indiqué sur la figure (5.4). Les coordonnées des contreventements sont les suivantes :

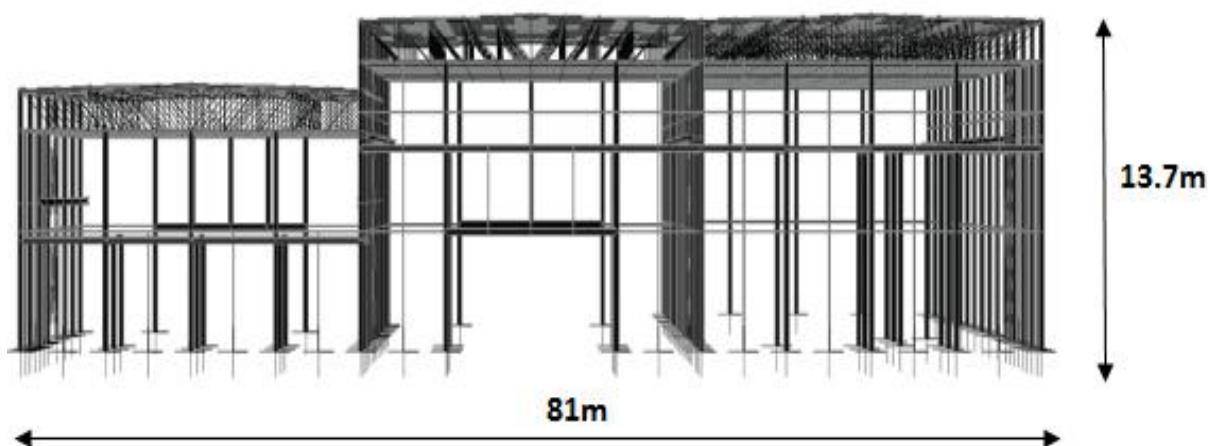
- 1<sup>er</sup> contreventement : (x = 0 ; y = 18.90) m ;
- 2<sup>ème</sup> contreventement : (x = 43.20 ; y = 18.90) m ;
- 3<sup>ème</sup> contreventement : (x = 64.80 ; y = 18.90) m.

Dans ce test, les caractéristiques dynamiques de la structure sont calculées sous l'excitation des vibrations ambiantes parvenues de la foule des étudiants et l'effet du vent. Ensuite, comme teste vérificatif, en mettant en marche le pont roulant pour avoir des vibrations sensiblement ressentis.

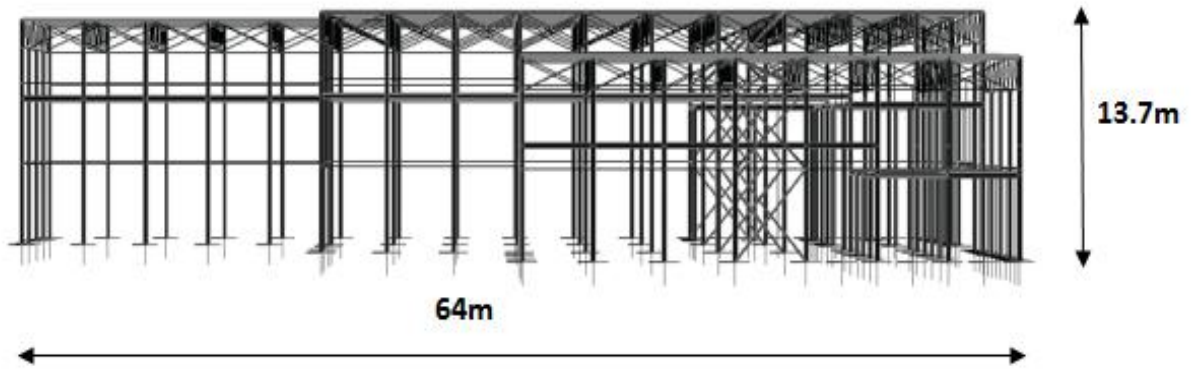


**Figure 5.1** : Vue globale sur la structure étudiée (Fuggini C., 2009).

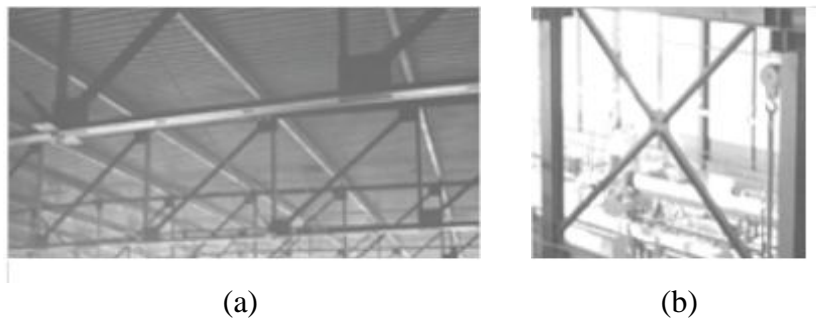
Des détails du bâtiment métallique étudié sont présentés dans les figure 5.2 à 5.4 (Fuggini C, 2009). La figure 5.2 montre les éléments porteurs de la structure dans le sens longitudinale. Les éléments porteurs de la structure dans le sens transversal ainsi que l'emplacement du contreventement sont montrés dans la figure 5.3. La figure 5.4 montre les détails des contreventements ainsi que les fixations des éléments au niveau de la toiture.



**Figure5 .2** : Détails de la structure dans le sens longitudinal.

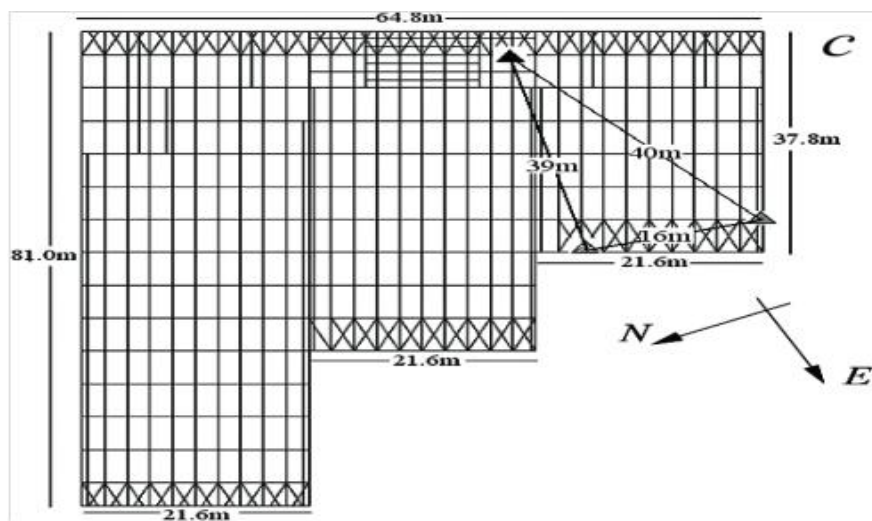


**Figure5 .3 :** Détails de la structure dans le sens transversal.



**Figure5 .4 :** Détails de la structure. (a) Contreventement au niveau de la toiture, (b) Contreventement vertical.

Le test de vibration a été effectués en installons trois accéléromètre sur le toit de la construction étudiée, à une hauteur d'environ 11m. La figure 5.5 montre les positions des accéléromètres sur la structure.



**Figure 5.5 :** L'emplacement des accéléromètres (Fuggini C., 2009).

### 5.2.1 Propriétés initiales des matériaux :

Dans le tableau ci dessous, les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la structure, avant calibrage, sont présentés.

**Tableau 5.1 :** Propriété mécanique des matériaux.

Matériaux	Poids volumique (KN/m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité E (KN/m <sup>2</sup> )	Coefficient de Poisson
Acier	79.972	2.1 E 8	0.3
Béton	23.5631	2.4 E 8	0.2

### 5.2.2 Description de l'équipement de mesure :

Le matériel utilisé pour la réalisation du test se compose de :

- Un system d'acquisition des données « Kinematics » à 16 canaux (Figure 5.6);
- Trois accéléromètres tridimensionnels « EpiSensor » de modèle « FBA ES-U2 » (Figure 5.7) ;
- Trois câbles de liaison ;
- Un micro-ordinateur comme unité centrale pour le traitement du signal.

#### 5.2.2.1 System d'acquisition des données avec afficheur du signal :

La figure 5.6 montre le system d'acquisition des données, l'appareil qui enregistre le signale (vibration), qui est relié aux accéléromètres et à l'unité centrale par des câbles. L'afficheur du signal montre, à temps réel, l'existence et la variation du signale a enregistré.



**Figure 5.6 :** System d'acquisition des données avec afficheur du signal.

### 5.2.2.2 Accéléromètres tridimensionnels :

Pour réaliser ce type de test de vibration ambiante, des accéléromètres très performants et pouvant détecter des valeurs de signale d'accélération très faible doivent être utilisés. Des accéléromètres de type EpiSensor (Figure 5.7) capable de détecter les signaux de sortie dans les trois directions (x, y, z) ont été utilisés.



Figure 5.7 : Accéléromètres tridimensionnels.

## 5.3 Procédure du test de vibration ambiante :

La première étape est l'emplacement des accéléromètres dans des points stratégiques de la structure (Figure 5.5), à une hauteur d'environ 11m. La deuxième étape est consacrée à la connexion des différentes parties du système de contrôle : les accéléromètres reliés au system d'acquisition des données, qui seront ensuite liés à l'unité centrale de traitement.

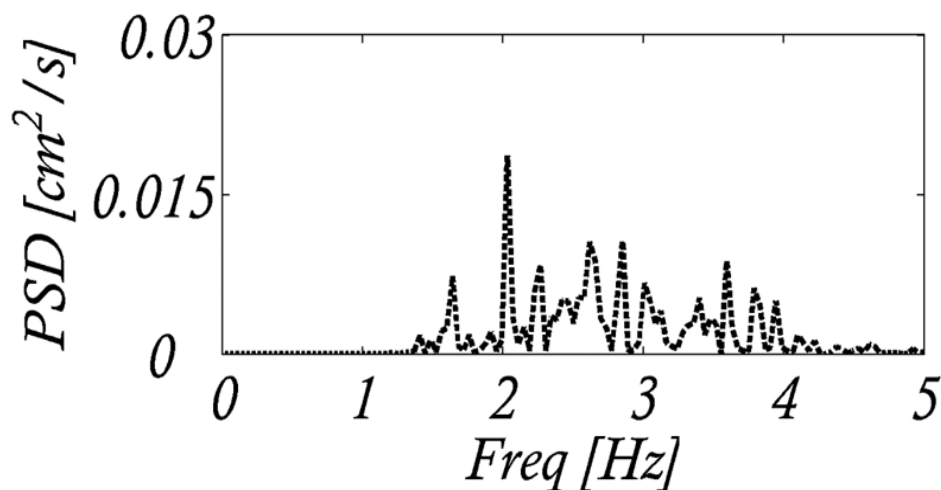
La structure a été soumise à deux tests de vibration, réalisés par l'équipe de recherche du département de mécanique structurale sous la direction du Prof. Fabio Casciati. Pour le premier test, l'excitation n'était que les vibrations ambiantes dues à la foule des étudiants et l'effet de trafic, à coté de la structure. Durant le deuxième test, le pont roulant au laboratoire du département était mis en marche pour amplifier les vibrations de la structure métallique.

### 5.3.1 Identification du modèle :

Comme cité dans le chapitre précédent, l'identification du système a été effectuée par le logiciel MATLAB : le code N4SID ou la fonction de densité spectrale. Les pics sur les

graphes représentent les fréquences propres détectées de la structure étudiée. Après le traitement des signales enregistrés par chaque capteur d'accélération, l'identification de la structure est représentée par les graphes 5.8, 5.9 et 5.10.

Les pics sur le graphe 5.8 montrent les fréquences propres de la structure enregistrée par le premier accéléromètre. Les mêmes résultats (premier accéléromètre) sont donnés en termes de périodes et les fréquences propres de chaque mode sont représentées sur le tableau 5.2.



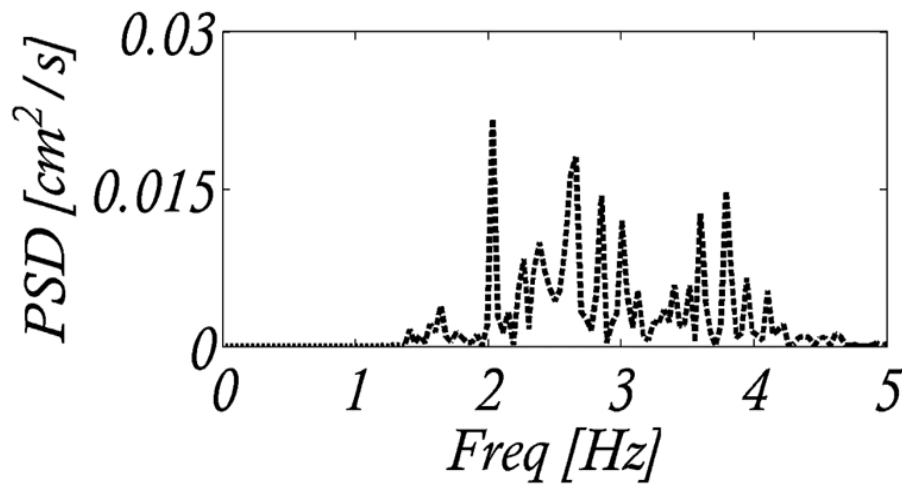
**Figure 5.8 :** Fréquences propres déterminées par la fonction PSD (accéléromètre 1).

**Tableau 5.2 :** Périodes et fréquences propres des dix premiers modes (signale enregistré par l'accéléromètre 1).

Mode	Piérides (Sec)	Fréquences (Hz)
1	0.60	1.65
2	0.48	2.07
3	0.44	2.27
4	0.38	2.60
5	0.35	2.85
6	0.33	3.01
7	0.32	3.11
8	0.29	3.41
9	0.28	3.49
10	0.27	3.59

Les pics sur le graphe 5.8 montrent les fréquences propres de la structure sur le capturée par le deuxième accéléromètre. Les résultats du signal, détecté par le deuxième

accéléromètre, en termes de périodes et les fréquences propres de chaque mode sont représentées sur le tableau 5.3.

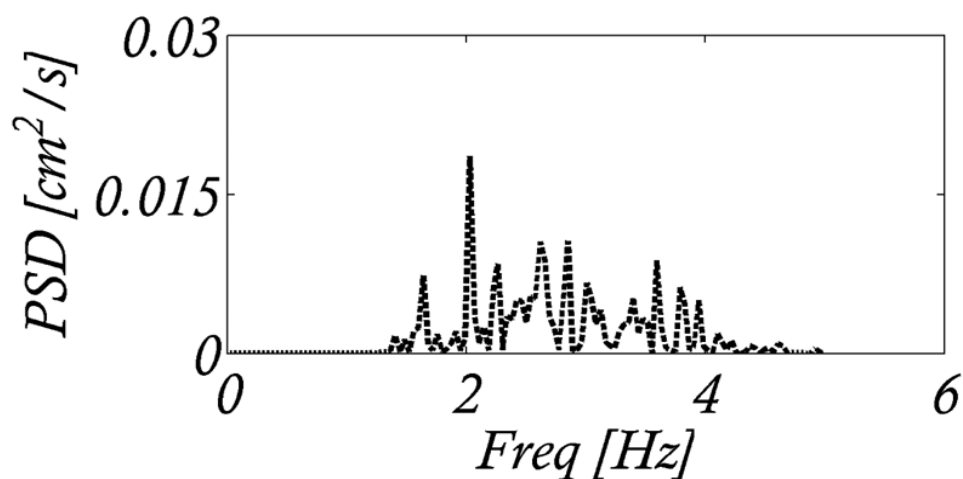


**Figure 5.9 :** Fréquences propres déterminées par la fonction PSD (accéléromètre 2).

**Tableau 5.3 :** Périodes et fréquences propres des dix premiers modes (signale enregistré par l'accéléromètre 2).

Mode	Piérides (Sec)	Fréquences (Hz)
1	0.62	1.61
2	0.50	2.00
3	0.46	2.17
4	0.40	2.50
5	0.36	2.75
6	0.33	3.01
7	0.32	3.10
8	0.30	3.38
9	0.29	3.45
10	0.28	3.55

Les pics sur le graphe 5.9 montrent les fréquences propres de la structure capturée par le troisième accéléromètre. Les résultats du signale, détecté par cet accéléromètre, en termes de périodes et les fréquences propres de chaque mode, sont représentées sur le tableau 5.4.



**Figure 5.10** : Fréquences propres déterminées par la fonction PSD (accéléromètre 3).

**Tableau 5.4** : Périodes et fréquences propres des dix premiers modes (signal enregistré par l'accéléromètre 3).

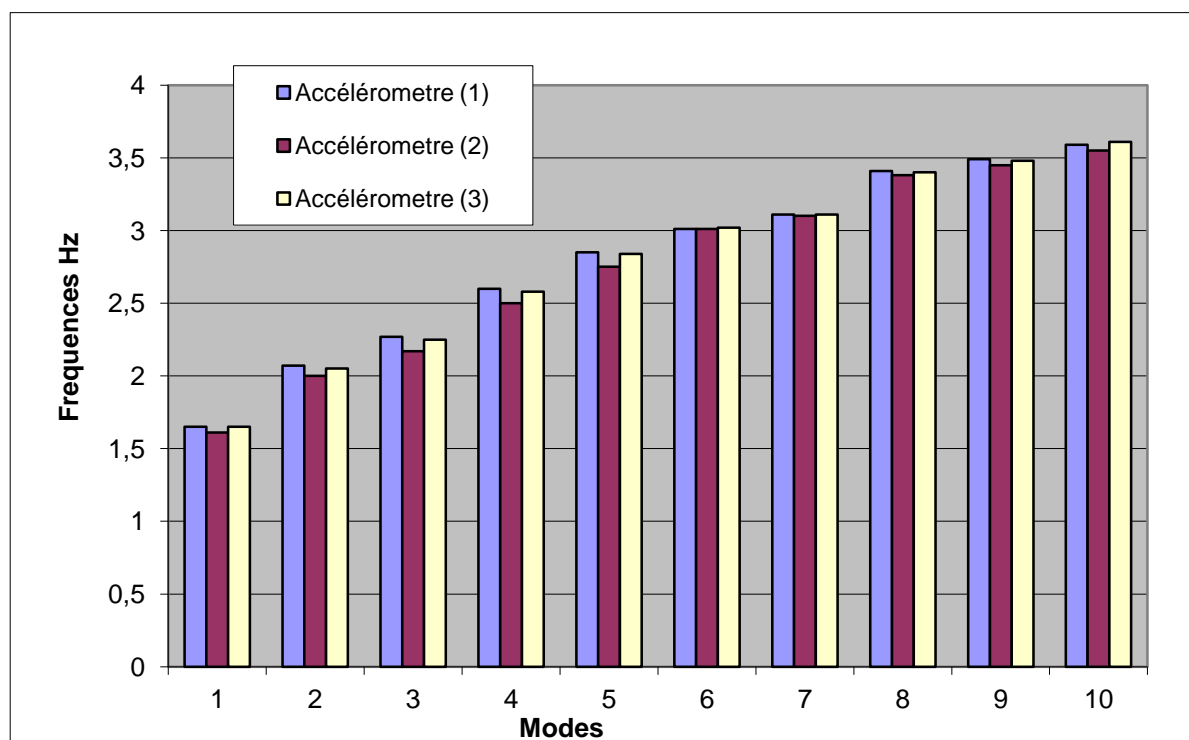
Mode	Piérises (Sec)	Fréquences (Hz)
1	0.61	1.65
2	0.49	2.05
3	0.44	2.25
4	0.39	2.58
5	0.35	2.84
6	0.33	3.02
7	0.32	3.11
8	0.29	3.40
9	0.28	3.48
10	0.27	3.61

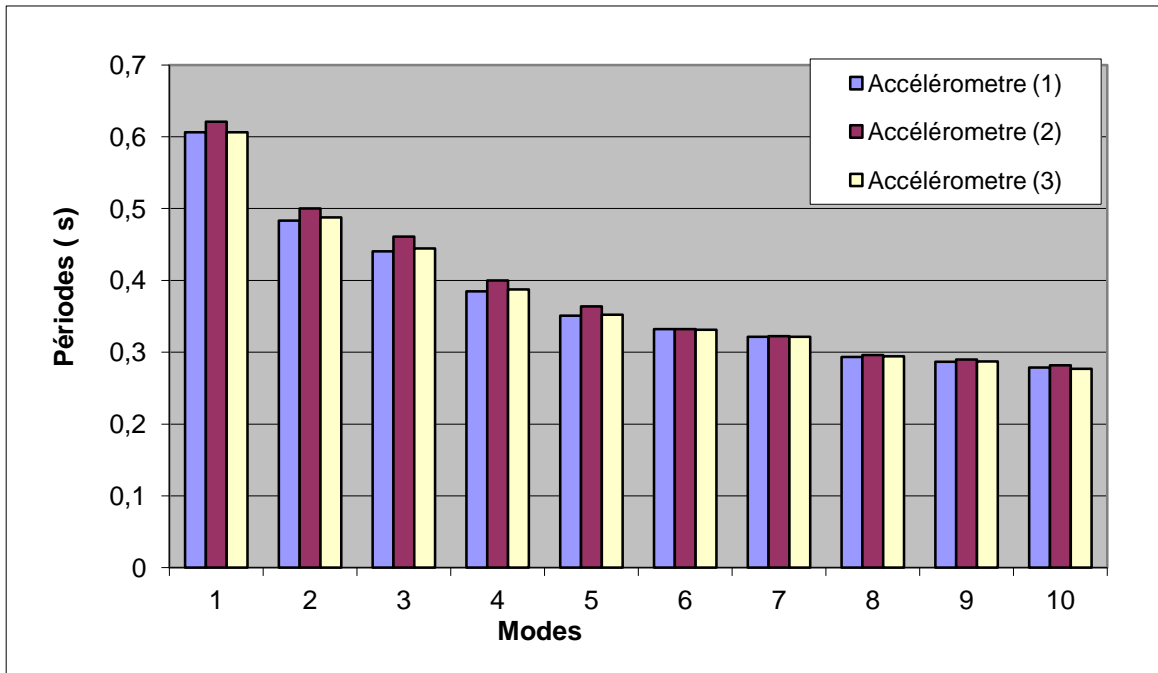
Le tableau 5.5 résume les résultats des trois accéléromètres tout en calculons la moyenne des fréquences.



**Tableau 5.5** : Tableau récapitulatif des résultats des fréquences propres.

Mode	Fréquences 1 (Hz) Accélérometre1	Fréquences 2 (Hz) Accélérometre2	Fréquences 3 (Hz) Accélérometre3	Moyenne
1	1.65	1.61	1.65	1.64
2	2.07	2.00	2.05	2.04
3	2.27	2.17	2.25	2.23
4	2.60	2.50	2.58	2.56
5	2.85	2.75	2.84	2.81
6	3.01	3.01	3.02	3.01
7	3.11	3.10	3.11	3.11
8	3.41	3.38	3.40	3.40
9	3.49	3.45	3.48	3.47
10	3.59	3.55	3.61	3.58

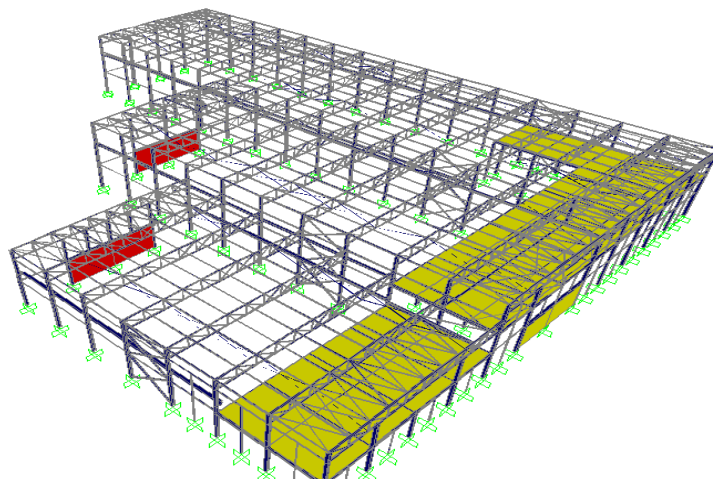
**Figure 5.11** : Comparaison entre les dix premières fréquences du signal enregistré les trois accéléromètres.



**Figure 5.12:** Comparaison entre les dix premières périodes du signal enregistré les trois accéléromètres.

#### 5.4 Construction du modèle éléments finis :

Un modèle 3D d'éléments finis a été construit en utilisant le logiciel SAP 2000. Deux type de matériaux on été utilisés : l'acier pour les éléments porteurs et le béton pour les plancher. La structure est considéré comme encasturé sur toutes la fondation avec des conditions au limite de six degré de liberté (trois translations et trois rotations) et la liaison entre les éléments ce fait par des nœuds. La figure 5.13 montre la modélisation de la structure étudiée.

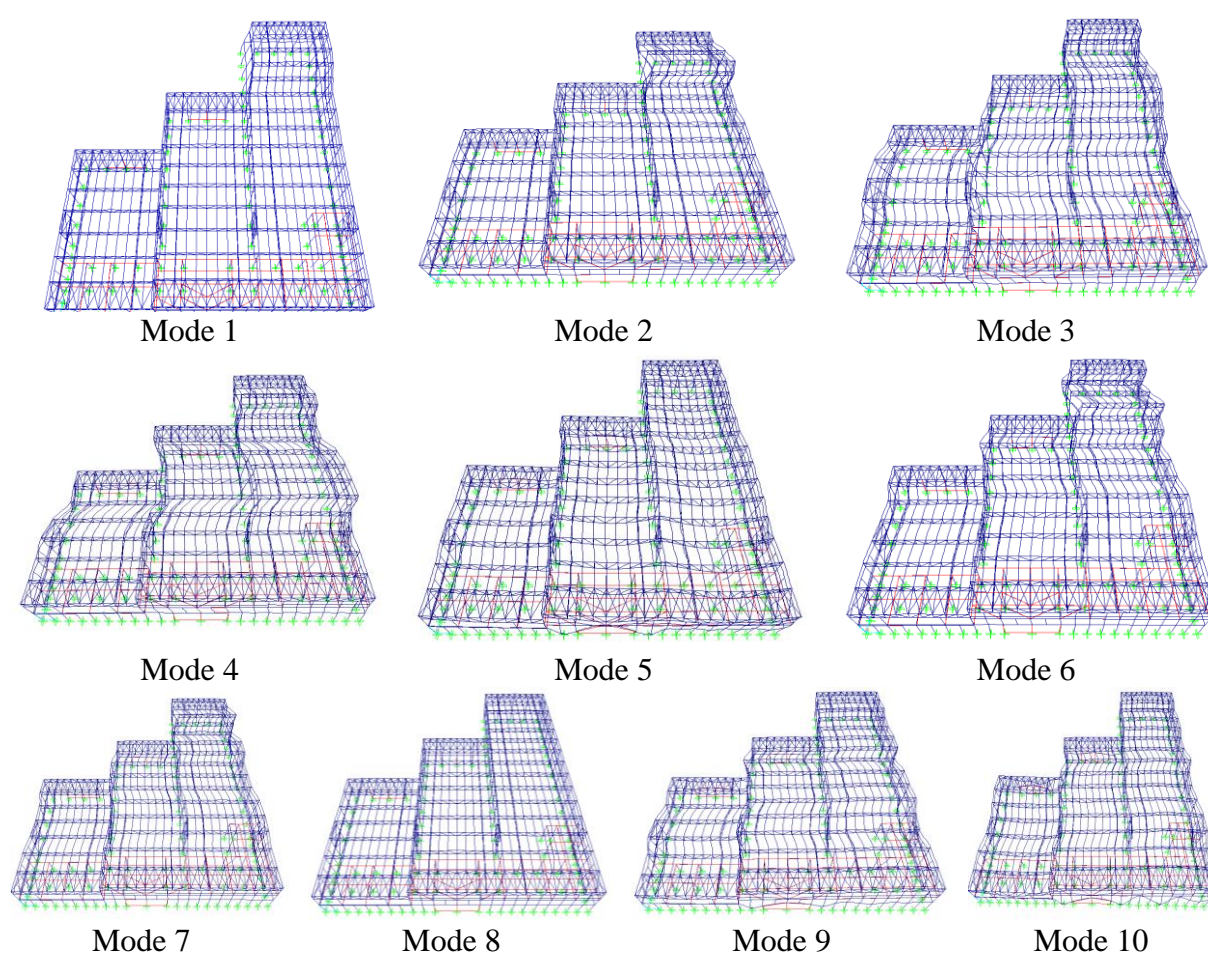


**Figure 5.13 :** Modèle élément finis en 3D de la structure.

### 5.4.1 Résultats de calcul du SAP 2000 :

Après calibrage et le traitement final du modèle éléments finis de la structure, un nouveau modèle éléments finis est obtenus, ayant les mêmes propriétés que modèle réel. L'objectif principale de cette opération est de réalisé une analyse dynamique de la structure par un séisme référentielle, l'idée est de voir si la structure est en bonne santé ou non. Une réhabilitation de la structure devra être faite si les résultats ne seront pas satisfaisants, si non réhabilitation de la structure devra être nécessaire.

Les résultats de calcul éléments finis sont présentés si dessous :



**Figure 5.14 :** Les dix premiers modes propres de vibration.

**Tableau 5.6 :** Résultats des fréquences propres des dix premiers modes par le programme SAP 2000.

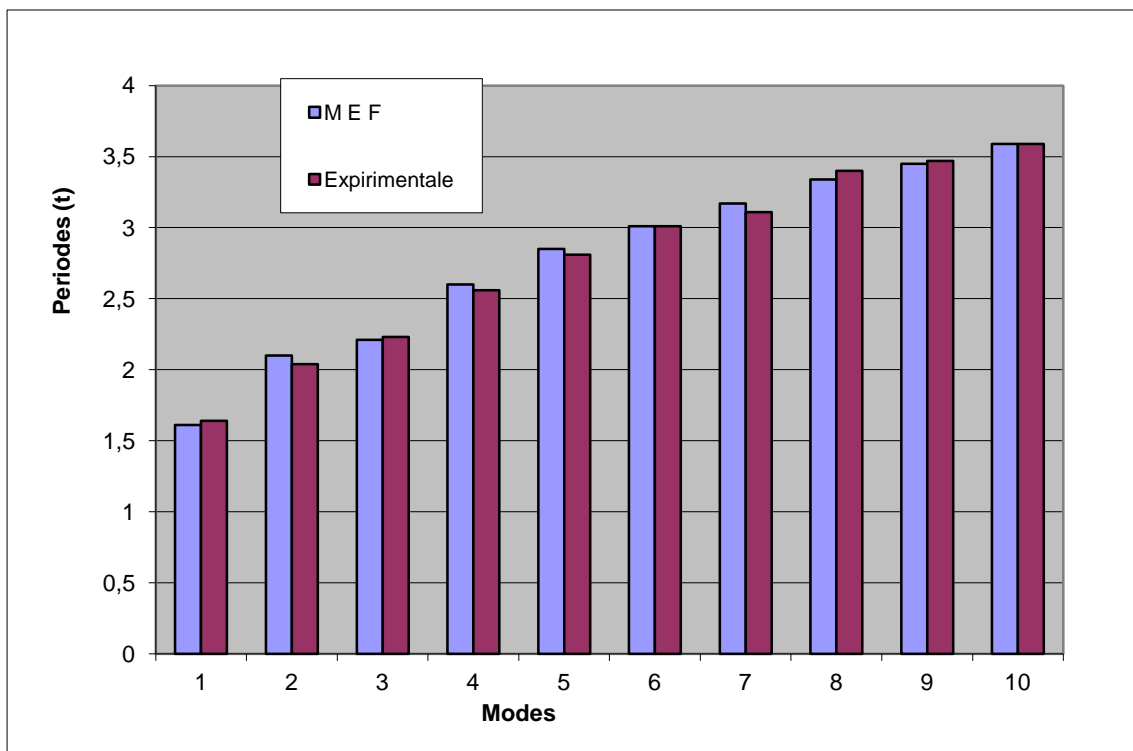
Mode	Piérides (Sec)	Fréquences (Hz)
1	0.62	1.61
2	0.47	2.10
3	0.45	2.21
4	0.38	2.60
5	0.35	2.85
6	0.33	3.01
7	0.31	3.17
8	0.29	3.34
9	0.28	3.45
10	0.27	3.59

### 5.5 Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes :

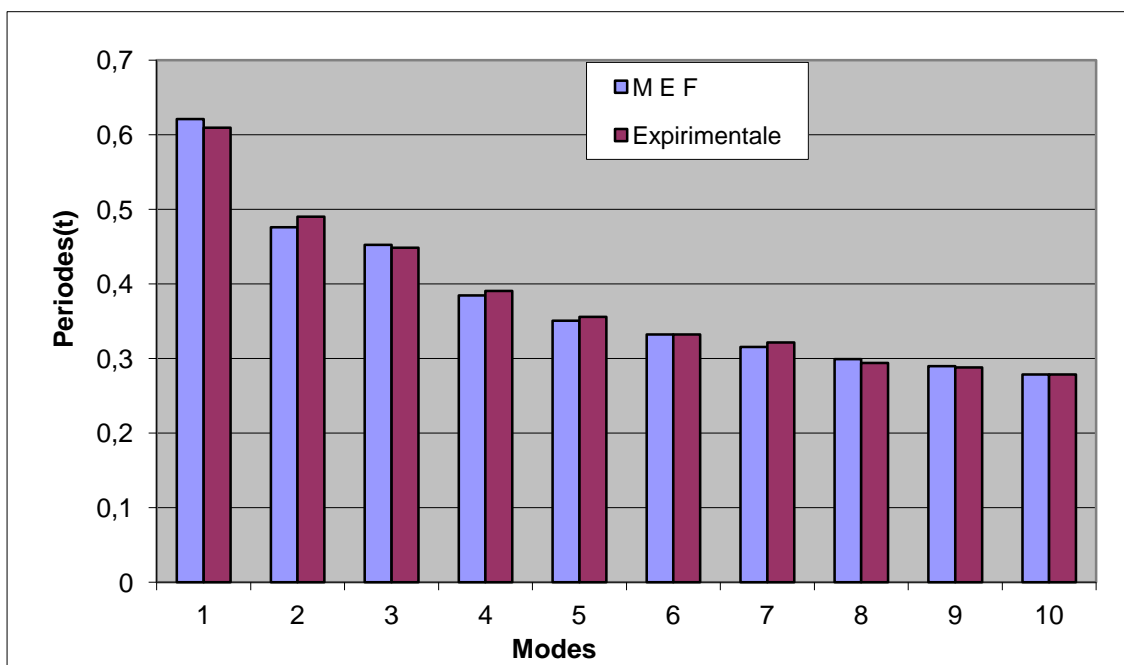
Une comparaison entre les résultats obtenus expérimentalement (Tableau 5.5), est ceux analytiquement (modèle éléments finis, Tableau 5.6) est réalisée. Les fréquences et périodes propres des deux résultats ainsi que le pourcentage de l'erreur trouvée entre les deux méthodes utilisées sont présentés afin de validé l'aptitude du modèle construit de représenté réellement la structure étudiée.

**Tableau 5.7 :** Tableau récapitulatif des fréquences propres expérimentaux et calcules.

Mode	Piérides (Sec)		Fréquences (Hz)		Erreur (%)
	Eléments finis	Expérimentale	Eléments finis	Expérimentale	
1	0.62	0.61	1.61	1.64	2.48
2	0.47	0.48	2.10	2.04	1.42
3	0.45	0.44	2.21	2.23	2.71
4	0.38	0.38	2.60	2.56	1.50
5	0.35	0.35	2.85	2.81	1.40
6	0.33	0.33	3.01	3.01	0.00
7	0.31	0.32	3.17	3.11	1.89
8	0.29	0.29	3.34	3.40	2.09
9	0.28	0.28	3.45	3.47	1.15
10	0.27	0.27	3.59	3.59	0.00



**Figure 5.15 :** Comparaison, en termes de fréquences, entre les résultats expérimentalement et analytiquement trouvés.



**Figure 5.16 :** Comparaison, en termes de périodes, entre les résultats expérimentalement et analytiquement trouvés.

## **5.6 Conclusion :**

Ce chapitre résume une application ayant comme but de construire un modèle tridimensionnel en élément finis capable de représenter la structure étudiée. La comparaison entre les résultats expérimentalement détecté et le model analytiquement réalisé (en terme des dix premier modes) montrent que l'écart (l'erreur) est très minime (0 à 2.71%) !

Enfin ; le modèle réalisé pour la structure du département de mécanique structurelle de l'université de Pavie, Italie, pourra servir comme une référence pour la surveillance de sa santé à long terme.

## **Conclusion :**

Le contrôle de la santé des structures est une technique qui permet à l'ingénieur d'identifier les caractéristiques d'une structure et identifier son niveau de dommages. Pour contrôler la santé des structures, on utilise des méthodes pour la détection des dommages qui sont devenues par la suite un critère dans l'évaluation de la sécurité de tout ouvrage, structure, machine ou véhicule.

Dans ce mémoire, l'application de la technique du contrôle de santé des structures, concernait deux cas réels de structures. Le premier cas est un test de vibration forcée et le deuxième cas est un test de vibration ambiante.

Concernant le premier cas, l'étude expérimentale d'un modèle réduit est réalisée sur une table vibrante. Cette étude a permis de vérifier et ainsi confirmer le système structurel et ses caractéristiques physiques et mécaniques. Pour le deuxième cas d'étude, un test de vibration ambiante sur une structure métallique réelle a été réalisé. Quoique ce bâtiment est plus volumineux et compliqué, mais son contrôle a permis de vérifier l'ensemble structurel.

Cette technique a révolutionné l'étape de diagnostic de la structure par le contrôle de leur santé. Cette démarche permettra à l'ingénieur d'évaluer le taux de sécurité ou du risque de l'ouvrage, donc son taux d'endommagement éventuellement. Le niveau de la science actuelle peut même identifier, localiser et quantifier ces dommages.

Ce modeste travail réalisé et présenté dans ce mémoire peut être introductif à d'autres travaux plus élaborés, surtout dans le domaine de la détection des endommagements dans une structure.

## References Bibliographies

1. Abed M, Bouarfa H, Boulaghmen F. Assistance a L'évaluation Post-Séismique des Constructions par Raisonnement Basé sur des Cas. Proceedings du Congrès International Réhabilitation des Constructions et Développement Durable; 2005 May 3-4 ; Algiers : Algeria ; 2:272-277. (In french).
2. Aghakouchak AA, Kiamehr H, Ghafouripour A. An Overview of System Identification Methods and Applications Part I: Methods of System Identification and Dynamic Tests. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Coasts, Ports & Marine Structure; 2000 Nov; Shahid Rajaei Port Complex, Bandar Abbas, Iran.
3. Aghakouchak AA, Kiamehr H, Ghafouripour A. An Overview of System Identification Methods and Applications Part II: Theory, Type of Tested Structures, History and Prospective of System Identification. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Coasts, Ports & Marine Structure; 2000 Nov; Shahid Rajaei Port Complex, Bandar Abbas, Iran.
4. Ambient Vibration Response (Output-only) based System Identification. [Accessed 2011]. Available from URL <http://www.cse.polyu.edu.hk/~dynamics/si.htm>
5. Andersen P. Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA Models. Ph. D. Dissertation. Department of Building Technology and Structural Engineering. Aalborg University. Denmark; 1997.
6. Beck J, Dionisio B. A Benchmark Problem for Structural Health Monitoring. Earthquake experimental Techniques 2001; 25(3): 49-53.
7. Boller C, Staszewski WJ, editors. Structural Health Monitoring 2004, Proceedings of the Second European Workshop. Pennsylvania. DEStech Publications; 2004.
8. Brincker R, Andersen P. ARMA Models in Modal Space. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC); 1999; Kissimmee, Florida: U.S.A.; 330-334.
9. Caicedo JM, Clayton E, Dyke SJ, Abe M. Structural Health Monitoring for Large Structures Using Ambient Vibrations. Proceedings of the ICANCEER Conference; 2002 August 15–20; Hong Kong.
10. Caicedo JM, Dyke SJ, Johnson EA. Health Monitoring Based on Component Transfer Functions. Proceedings of the 2000 International Conference on Advances in Structural Dynamics; 2000 Dec 13–15; Hong Kong.
11. Caicedo JM. Structural Health Monitoring of Flexible Civil Structures. Ph.D. Dissertation. Department of Civil Engineering. Washington University. St. Louis, Missouri. U.S.A.; 2003.
12. Caicedo JM. Two Structural Health Monitoring Strategies Based on Global Acceleration Response: Development, Implementation, and Verification. Master Thesis. Department of Civil Engineering. Washington University. St. Louis. Missouri. U.S.A.; 2001.



13. Casciati S. Damage Detection and Localization in the Space of Observed Variables. Ph.D. Dissertation. Department of Structural Mechanics. Pavia University. Italy; 2004.
14. Christian Boller and Matthias Buderath .Fatigue in aerostructures—where structural health monitoring can contribute to a complex subject ;2007
15. Chrysostomou CZ, Demetriou T, Pittas M, Stassis A. Conservation of Historical Mediterranean Sites by Innovative Seismic-Protection Techniques. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Word Conference on Structural Control; 2002 April 7-12; Come: Italy; 2:947-954.
16. Cunha A, Caetano E. From Input-Output to Output-Only Modal Identification of Civil Engineering Structures. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Operational Modal Analysis Conference; 2005 April 26-27; Copenhagen: Denmark; 11-28.
17. Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, Schevitz DW. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review. Los Alamos Report. LA-13070-MS; 1996.
18. Doebling SW. Measurement of Structural Flexibility Matrices for Experiments with Incomplete Reciprocity. Ph.D. Dissertation. Department of Aerospace Engineering Sciences. University of Colorado. Boulder. CO. U.S.A; 1995.
19. Dyke SJ, Caicedo JM, Johnson EA. Monitoring of a Benchmark Structure for Damage Identification. Proceeding of the Engineering Mech. Specialty Conf.; 2000 May 21–24; Austin, Texas, USA.
20. El-Borgi S, Choura S, Ventura C, Baccouch M, Cherif F. Modal Identification and Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge. Smart Structures and Systems 2005; 1(1): 83-101.
21. Fritzen CP. Recent Developments in Vibration-Based Structural Health Monitoring. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring. 2005 Sep 12-14; Stanford University, Stanford: C A; 42-60.
22. Fuggini Clemente .Using Satellites Systems for Structural Monitoring:Accuracy, Uncertainty and Reliability; 2009.
23. Fujino Y. Vibration, Control and Monitoring of Long-Span Bridges—Recent Research, Developments and Practice in Japan. Journal of Constructional Steel Research 2002; 58: 71–97.
24. Gentile C. Operational Modal Analysis and Assessment of Historical Structures. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Operational Modal Analysis Conference; 2005 April 26-27; Copenhagen: Denmark; 213-224.
25. Ghanem R, Shinozuka M. Structural System Identification. I: Theory. Journal of Engineering Mechanics 1995; 121(2): 255-264.
26. Hamdaoui K. Overview of Structural Health Monitoring and Seismic Evaluation Using Ambient Vibration Testing. Proceeding du Congres International Réhabilitation des Constructions et Développement Durable; 2005 May 3-4 ; Algiers : Algeria ; 1:219-226.

27. Hamdaoui. K Historical Monument Health Monitoring Based on Ambient Vibrations 2006.
28. Hera A, Hou ZK. Wavelet Approach for Damage Detection Using Experimental Data of ASCE Benchmark Study. Proceeding of the 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference; 2003 July 16-18; University of Washington, Seattle, U.S.A.
29. Hera A. Hou ZK, Noori M. Wavelet-Based Approach for ASCE Structural Health Monitoring Benchmark Studies. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring; 2001 Sep 12-14; Stanford University, Stanford, CA.
30. Hou ZK, Hera A. Progress of Phase II Study of the ASCE Health Monitoring Benchmark Data Using Wavelet Approach. Proceeding of the 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference; 2002 June 2-5; Columbia University, New York, U.S.A.
31. Hou ZK, Noori M, Amanda RSt. Wavelet-based approach for Structural Damage Detection. Journal of Engineering Mechanics 2000; 126(7): 677-683.
32. Housner GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF, Skelton RE, Soong TT, Spencer BF, Yao JTP. Structural Control: Past, Present, and Future. Special Issue of Journal of Engineering Mechanics. ASCE 1997 Sep; 123(9): 897-971.
33. Huang CS, Lin HL. Modal Identification of Structures from Ambient Vibration, Free Vibration, and Seismic Response Data via a Subspace Approach. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2001; 30: 1857–1878.
34. Huang CS. Structural Identification from Ambient Vibration Measurement Using the Multivariate AR Model. Journal of Sound and Vibration 2001; 241(3): 337-359.
35. Ivanović SS, Trifunac MD, Novikova EI, Gladkov AA, Todorovska MI. Ambient Vibration Tests of A Seven-Story Reinforced Concrete Building in Van Nuys, California, Damaged by the 1994 Northridge Earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2000; 19(6): 391-411.
36. Ivanović SS, Trifunac MD, Todorovska MI. Ambient Vibration Tests of Structures- A Review. Bull. Indian Soc. Earthquake tech. Special Issue on Experimental Methods 2000 Dec.
37. Kenai S, Bahar R. Evaluation and Repair of Algiers New Airport Building. Cement & Concrete Composites 2003; 25: 633–641.
38. Kullaa J. On line Structural Health Monitoring. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Word Conference on Structural Control; 2003; Como: Italy; 3:133-138.
39. Lee JW, Kim JD, Yun CB, Yi JH, Shim JM. Health-Monitoring Method for Bridges under Ordinary Traffic Loadings. Journal of Sound and vibration 2002; 257(2): 247-264.
40. Ljung L. System Identification: Theory for the User. New Jersey. Prentice Hall. Englewood Cliffs; 1987.

41. Magalhães F, Caetano E, Cunha Á. Operational Modal Analysis of the Braga Sports Stadium Suspended Roof. Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC); 2006; St. Louis, Missouri, U.S.A.
42. Magpantay HA. Modal Identification from Ambient Vibration Measurement: a Technology for Optimization of the Performance of Civil Engineering Structure. [Online] [Accessed 2011]. Available from URL <http://www.adnu.edu.ph/Research/gibon4v1n1.asp> --
43. Majumder L, Manohar CS. A Time-Domain Approach for Damage Detection in Beam Structures Using Vibration Data with a Moving Oscillator as an Excitation Source. Journal of Sound and Vibration 2003; 268: 699–716
44. Masuda A, Noori M, Sone , Hashimoto Y. Wavelet-Based Health Monitoring of Randomly Excited Structures. Proceeding of the 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference; 2002 June 2-5; Columbia University, New York, U.S.A.
45. Mattheis A, Trobitz M, Kussmaul K, Kerkhof K, Bonn R, Beyer K. Diagnostics of Piping by Ambient Vibration Analysis. Nuclear Engineering and Design 2000; 198: 131–140.
46. MICHAEL I. FRISWELL. Damage identification using inverse methods; 2007
47. Mottershead JE, Friswell MI. Model Updating in Structural Dynamics: A Survey. Journal of Sound and Vibration 1993; 167(2): 347–375.
48. Ren WX, Zatar W, Harik IE. Ambient Vibration-Based Seismic Evaluation of a Continuous Girder Bridge. Engineering Structures 2004; 26: 631-640
49. Richardson MH. Detection of Damage in Structures from Changes in their Dynamic (Modal) Properties: A survey. NUREG/CR-1431. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission; 1980.
50. Rytter A. Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures. Ph.D. Dissertation. Department of Building Technology and Structural Engineering. Aalborg University. Denmark; 1993.
51. Salawu OS. Detection of Structural Damage Thorough Change in Frequency: A Review. Engineering Structures 1997; 19(9): 718-723.
52. Saleh A, Zaghaw A. Seismic Performance Evaluation of two Historical Minarets Using the Capacity Spectrum Method. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Structural Control; 2004 July 12-15; Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
53. Seible F. Composite Structural Systems from Characterization to Field Implementation. [Online] [Accessed 2011]. Available from URL [http://hpwren.ucsd.edu/2003\\_HPWAREN\\_Users\\_Meeting/seible.pdf](http://hpwren.ucsd.edu/2003_HPWAREN_Users_Meeting/seible.pdf)
54. Shama AA, Mander JB, Chen SS, Aref AJ. Ambient Vibration and Seismic Evaluation of a Cantilever Truss Bridge. Engineering Structures 2001; 23: 1281–1292.

55. Shinozuka M, Ghanem R. Structural System Identification. II: Experimental Verification. Journal of Engineering Mechanics 1995; 121(2): 265-273.
56. Söderström T, Stoica P. System identification. New Jersey. Prentice Hall. Englewood Cliffs; 1989.
57. Syrmakizis K, Sophocleous A. Passive Control Techniques for the Seismic Protection of Historical and Monumental Masonry Structures. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Structural Control; 2002 April 7-12; Come: Italy; 2:955-960.
58. Turek M, Thibert K, Ventura C, Kuan S. Ambient Vibration Testing of Three Unreinforced Brick Masonry Buildings in Vancouver, Canada. Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC); 2006; St. Louis, Missouri, U.S.A.
59. Udwardia FE, Trifunac MD. Ambient vibration test of full scale structure. Proceeding 5<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Long; 1973; Rome, Italy.
60. V. Meruane and W. Heylen. Damage Detection with Parallel Genetic Algorithms and Operational Modes .
61. Ventura CE, Liam Finn WD, Lord JF, Fujita N. Dynamic Characteristics of A Base Isolated Building from Ambient Vibration Measurements and Low Level Earthquake Shaking. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2003; 23: 313-322.
62. Volant Ph, Orbovic N, Dunand F. Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facility Using Ambient Vibration Test to Characterize Dynamic Behavior of The Structure and Microtremor Measurements to Characterize the Soil: A Case Study. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2002; 22: 1159–1167.
63. Ward HS, Crawford R. Wind induced vibrations and building modes. Bulletin of the Seismological Society of America 1966; 56: 793-813.
64. Wenzel H, Pichler D. Ambient Vibration Monitoring. England. John Wiley and Sons; 2005.
65. Wenzel H. Structural Assessment of the Cultural Heritage. [Online] [Accessed 2011]. Available from URL <http://www.brimos.com/pdf/cultural.pdf>, 2006.
66. Wu JR, Li QS. Finite Element Model Updating for A High-Rise Structure Based on Ambient Vibration Measurements. Journal of Engineering Structures 2004; 26: 979-990.
67. Zaghw A, Saleh A. Seismic Performance Evaluation of Islamic Minarets Using the Capacity Spectrum Method. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Structural Control; 2002 April 7-12; Come: Italy; 2:961-970.
68. Zonta D. Structural Damage Detection and Localization by Using Vibrational Measurements. Ph.D. Dissertation. University of Bologna. Bologna. Italy; 2000.