



HAL
open science

METHODES D'ANALYSE DES DEFORMEES MODALES PAR TRAITEMENT DU SIGNAL POUR LE DIAGNOSTIC IN SITU DE STRUCTURES

Joseph Morlier

► **To cite this version:**

Joseph Morlier. METHODES D'ANALYSE DES DEFORMEES MODALES PAR TRAITEMENT DU SIGNAL POUR LE DIAGNOSTIC IN SITU DE STRUCTURES. Matériaux. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2005. Français. NNT: . tel-00078449

HAL Id: tel-00078449

<https://theses.hal.science/tel-00078449>

Submitted on 6 Jun 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 3072

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par **Joseph MORLIER**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : **SCIENCE DU BOIS**

**METHODES D'ANALYSE DES DEFORMEES MODALES PAR TRAITEMENT DU
SIGNAL POUR LE DIAGNOSTIC *IN SITU* DE STRUCTURES**

Soutenue le : 01 décembre 2005

Après avis de :

MM. F. CASCIATI (PROFESSEUR, Université PAVIA)
C. CREMONA(DOCTEUR HDR, LCPC)
M.P. LUONG (DR, POLYTECHNIQUE)

Rapporteurs

Devant la commission d'examen formée de :

MM. JM. QUENISSET (PROFESSEUR, U. BORDEAUX 1)
F. BOS (MCF, HDR, U. BORDEAUX 1)
P. CASTERA (CR1 INRA, HDR)
C. CREMONA (DOCTEUR HDR, LCPC)
M. DESCHAMPS (DR, U. BORDEAUX 1)
M.P. LUONG (DR, POLYTECHNIQUE)

**Président
Rapporteur
Examineurs**

Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu Frédéric Bos qui a co-dirigé cette thèse. Tout au long de ces trois années, il a su orienter mes recherches aux bons moments en me faisant découvrir la surveillance de l'intégrité des structures au travers de son regard de mécanicien tout en tirant partie de ma formation en traitement du signal.

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux dirigé par Monsieur Patrick Castera, qui me fait l'honneur d'être mon directeur de thèse.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse Fabio Casciati, Christian Cremona et Minh-Phong Luong pour la rapidité avec laquelle ils ont lu mon manuscrit et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Merci également aux autres membres du jury qui ont accepté de juger ce travail : Jean-Marc Quenisset et Marc Deschamps.

Mes remerciements vont également à la société Xylomeca (Stéphanie et Jean-françois), partenaire de cette étude et à l'ensemble du personnel du LRBB et de l'INRA Pierroton.

Je remercie tout particulièrement et aléatoirement :

Mon père pour ses multiples conseils ... of course!!

Séverine et coca ...et non pas séverine et le coca!!

Ma maman pour ses bons petits plats qui donnent de l'énergie.

Ma soeur et sa petite famille de Bayonne.

*Mon frère et Pierre S. pour les discussions scientifiques et informatiques très riches
(entre autres choses ...).*

Alain, Matthieu, Damien, Juliette ; "les anciens" pour leur accueil.

Vincent, sans qui le bureau du fond ne serait pas si animé ...

*Ah, j'oubliais ; bonne chance à tous ceux que j'ai pu embêter au bureau avec par ordre
d'apparition :*

*Maodo (BA, b,a), Michel (kiki), Marie (24), Rédjaysse (Régis), Guillaume (lemouro),
Philippe (ouéssnere)et Nadia (Nadiatoune).*

*Et enfin un grand MERCI à ceux qui ont la même passion que moi (Volley) : Franky,
Ju, Guidz, Joss, Montass, Bertrand, Morten, Vido, Yannick, Flo, Romain, Laprez et j'en
oublie (Akoy) ...*

Il n'y a que les esprits légers pour ne pas juger sur les apparences. Le vrai mystère du monde est le visible, et non l'invisible. (Oscar Wilde)

II.2.2	Modéliser le défaut	47
II.2.3	Equations de la dynamique des poutres	48
II.2.4	Modéliser les déformées endommagées	49
II.3	Outils de traitement du signal pour l'analyse des déformées	54
II.3.1	Introduction	54
II.3.2	Les ondelettes en identification de défaut	54
II.3.3	Limites de la transformée de Fourier	56
II.3.4	Analyse temps-fréquence	56
II.3.5	Transformée en ondelettes	57
II.3.6	Analyse de régularité	60
II.3.7	Détection de singularités	61
II.3.8	La dimension fractale	63
II.4	Caractérisation des défauts	67
II.4.1	Identification par l'analyse en ondelettes	67
II.4.1.1	Généraliser en utilisant les réseaux de neurones	73
II.4.1.2	Premiers résultats de simulation	75
II.4.1.3	Les limitations	76
II.4.2	Caractériser les conditions limites	77
II.4.2.1	Principes d'identification des conditions limites	77
II.4.2.2	Solution générale pour identifier les conditions limites	79
II.5	Conclusions	85
III Proposition d'une méthode et validation		87
III.1	Présentation	87
III.2	Proposition d'une démarche de diagnostic	88
III.2.1	Description et limitations des approches de diagnostic par analyse modale	88
III.2.2	Proposition d'une approche originale de diagnostic par analyse modale	92
III.2.3	Illustration pas à pas	94
III.2.3.1	Préambule	94
III.2.3.2	Principe général	96
III.2.4	Justification du choix de nos indicateurs	100

III.2.5 Estimation de la qualité des assemblages par optimisation	103
III.2.6 Comparaison des algorithmes de localisation	107
III.2.6.1 Présentation des algorithmes	108
III.2.6.2 Résultats du benchmark	110
III.2.7 Premières conclusions	112
III.3 Validation	113
III.3.1 Confrontation de notre méthode avec des exemples de la littérature	113
III.3.2 Validation : résultats expérimentaux	118
III.3.2.1 Poutre encastree en MDF	118
III.3.2.2 Portique en bois	121
III.3.3 Conclusions, limitations et perspectives	127
Conclusion générale	133
Bibliographie	135

Introduction générale

Surveiller une structure peut se comparer à effectuer le diagnostic d'un patient (humain). A partir de symptômes et de son expérience, le médecin va mesurer des indicateurs de la santé du patient (rythme cardiaque, tension, température, tests bactériologiques...) pour établir un diagnostic et par la suite prescrire un traitement. Dans notre cas, la structure remplace l'être humain et l'expert en diagnostic est le médecin. Celui-ci va donc chercher (via son expérience) à mesurer un ensemble de réponses pertinentes de la structure sous étude. L'analyse de ces réponses permettra de faciliter le diagnostic de l'expert.

Ainsi on peut définir deux approches différentes pour mesurer ces réponses. Les méthodes locales qui comme leur nom le suggèrent sont des mesures locales comme l'émission acoustique, les ultrasons ou la mesure de champs thermiques/magnétiques (ou bien tout simplement une inspection visuelle...). Toutes ces méthodes ont en commun le fait que le défaut (et donc sa localisation) est connu : c'est une information *a priori*. De plus il est nécessaire que la portion de la structure à inspecter soit accessible. Ainsi en tenant compte de ces limitations, plusieurs méthodes dites globales ont vu le jour, leurs développements sur des structures complexes sont basés sur les changements des caractéristiques vibratoires de la structure. L'excitation pouvant être "naturelle" (vent, trafic pédestre ou voitures), contrôlée (choc ou pot vibrant) ou même estimée (analyse dite "output only"). Ces méthodes offrent surtout l'avantage d'être non destructives, "abordables" et aussi relativement rapides dans le traitement des informations et l'extraction des indications pertinentes de la présence du défaut.

Dans cette thèse nous essayerons de définir la surveillance de la santé (ou intégrité) des structures (SSS ou Structural Health Monitoring, SHM) et d'avancer pas à pas dans la description puis la validation de notre méthode de diagnostic sur des structures de laboratoire.

La détection de défauts s'appuie sur des domaines de recherche très variés : on peut citer les méthodes vibratoires, les ultrasons et l'émission acoustique, l'analyse énergétique statistique (Statistical Energy Analysis, SEA) pour des applications (aérospatial, génie civil, machines, moteurs, matériaux composites ...) elles aussi très variées. Une rapide lecture du contenu des conférences telles que DAMAS 6 ¹ ou Surveillance 5 ² laisse apparaître des outils innovants eux aussi pluridisciplinaires : Modélisation éléments finis ou spectrale, traitement du signal avancé, réseaux de neurones, statistiques. De plus des journaux spécialisés du type Structural Control and Health Monitoring abordent en particulier les thèmes suivants : capteurs et technologies innovantes, identification des endommagements et caractérisation de l'intégrité structurale.

Cette thèse aborde un sujet multidisciplinaire comme l'analyse de la bibliographie effectuée peut en témoigner (Figure .1). En effet, non seulement l'aspect théorique est abordé (vibration, modélisation mécanique, mathématiques, traitement du signal ...) mais aussi l'aspect pratique et appliqué (instrumentation, algorithmie et programmation ...) est largement présent.

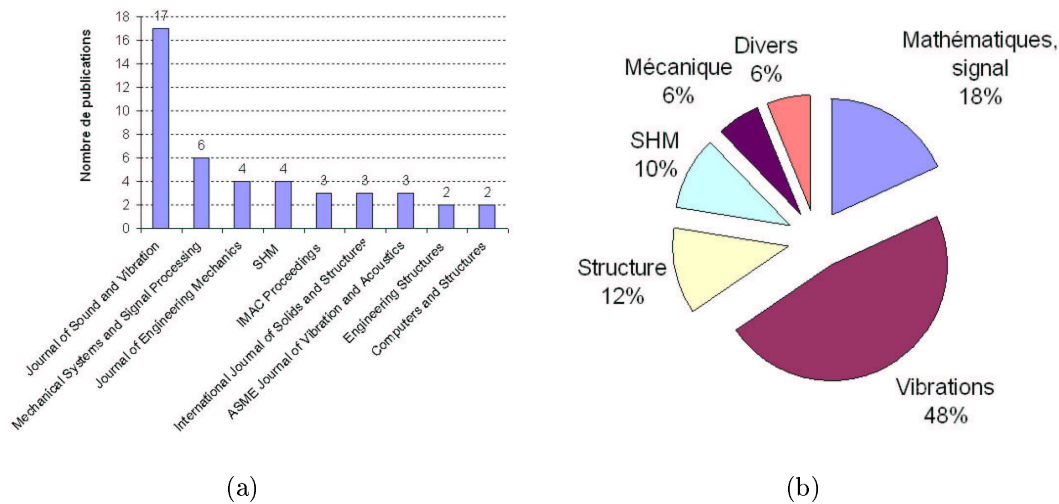


FIG. .1 : Les principaux journaux cités (a) et la répartition par champs disciplinaires (b)

Ces graphiques permettent d'établir le lien entre mécanique (dynamique des structures) et traitement du signal dans le sous domaine de SSS qu'est la détection de défaut.

¹DAMAS 2005, 6th International Conference on Damage Assessment of Structures, 4th-6th July 2005, Gdansk (Poland)

²SURVEILLANCE 5, 5th International Conference on Acoustical and Vibratory Methods and Diagnostics Techniques, 11th-13th october 2004, Senlis (France)

De plus, la majorité des articles sont issus de "Journal of Sound and Vibration" qui se décrit lui même comme une passerelle entre le domaine théorique et les applications. L'objectif de cette thèse est de développer une méthode innovante complète, c'est à dire capable de détecter, localiser et identifier deux types de défaut sur une structure de type poutre : l'endommagement des poutres mais aussi des assemblages. Nous avons essayé d'apporter notre contribution non seulement au développement d'outils numériques de traitement du signal (ondelettes, réseaux de neurones...) utilisant les déformées modales mais aussi une comparaison des outils expérimentaux existants. Ainsi on a effectué un benchmark de nos algorithmes de localisation afin de savoir quel type de défaut on est capable d'identifier avec un matériel innovant tel que le vibromètre laser Doppler. La modélisation ne nous servira, exclusivement, que pour mieux comprendre notre problème et non pas comme solution à notre problème. En effet, nos seules informations sont les données issues de l'analyse modale : aucune information *a priori* ou modélisation éléments finis (MEF ou Finite element model, FEM) de la structure n'est nécessaire. Le but final serait d'effectuer un contrôle ou un suivi *in situ* de structures en service. Il est ici d'autant plus nécessaire d'avoir un système expert, ne nécessitant que peu d'informations *a priori*, car nous pourrions avoir à faire à des structures anciennes du patrimoine culturel dont la connaissance de l'état non endommagé (baseline) est inconnue. Ainsi ces exigences ont amené les laboratoires (dont le LRBB) à s'équiper en moyens techniques et humains afin de développer un bus de terrain (CAN) adapté aux structures du génie civil et aux mesures en extérieur (accélération, déplacement, température, humidité, force et direction du vent ...). Ce projet pourrait permettre de développer une approche de surveillance globale (i.e. au cours du temps) que notre méthode pourrait compléter localement. On peut ainsi citer comme travaux récents ceux de Sazonov et al [Sa04] qui associent bus de transmission sans fils et analyse des déformées modales pour surveiller un pont de manière autonome.

Ce manuscrit est divisé en trois parties ; on suivra un ordre logique des principes d'acquisition des déformées en passant par les étapes de modélisation mécanique et de traitement du signal pour finir par notre méthode de diagnostic de structure validée sur des exemples numériques et expérimentaux. Les parties permettant d'illustrer des principes théoriques comme les applications mathématiques ou les résultats issus de nos calculs comme les exemples d'analyse seront mis en valeur par un texte bleu.

Le chapitre premier présentera les différentes méthodes vibratoires d'identification de défauts, elle fera aussi le point sur les principes de l'analyse modale expérimentale (AME ou Experimental Modal Analysis, EMA). Une comparaison des différents outils expérimentaux sera effectuée en terme d'adaptabilité à notre problème mais aussi au niveau de la résolution spatiale et de la robustesse au bruit. En effet, nous voulons acquérir de façon optimale les déformées modales car elles sont, pour nous, nos principales informations.

Le second chapitre introduira les différents aspects théoriques qui sont employés tout au long de cette thèse. Ainsi on définira la modélisation d'une poutre endommagée mais aussi les méthodes de détection de singularités en traitement du signal. De plus, on essaiera de comprendre le comportement dynamique d'une poutre endommagée ainsi que le rôle des liaisons (assemblages) entre éléments de la structure.

Nous expliciterons dans le troisième chapitre notre méthode en détails. Notre algorithme de détection sera testé sur des signaux simulés et issus de la littérature. Une comparaison (numérique) de différentes méthodes de détection (sur les déformées modales) basées sur les ondelettes, la dimension fractale ou le changement de courbure sera effectuée. On introduira aussi notre méthode d'identification de l'importance du défaut par réseaux de neurones. Elle utilise un apprentissage supervisé à partir d'une base de données issues de simulations éléments finis. Enfin nous validerons notre méthode de diagnostic sur une structure en bois de type portique en analysant les déformées expérimentales d'une colonne doublement endommagée dont l'acquisition est faite par un vibromètre laser à balayage. Quelques informations pertinentes sur la spécificité du matériau bois (hétérogénéité, anisotropie) seront mises en valeur avant de proposer des solutions aux limitations de notre méthode en terme d'automatisation de la procédure dans le but de diminuer le rôle de l'expert humain dans la prise de décision.

Cette thèse a donné lieu à 1 conférence internationale avec actes [1], 2 articles internationaux avec comité de lecture [2,3].

[1] J. Morlier, F. Bos, P. Castera, Structural health monitoring of timber structure using advanced vibration analysis, Proceedings of 5th International Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, october 2004, Senlis, France.

[2] J. Morlier , F. Bos , P. Castera, Benchmark of damage localisation algorithms using mode shape data, Key Engineering Materials, 293-294, pp 305-312, 2005.

[3] J. Morlier, F. Bos, P. Castera, Diagnosis of a portal frame using advanced signal processing on laser vibrometer data (accepté à : Journal of Sound and Vibration).

De plus on a développé une boîte à outils (toolbox) Matlab où sont regroupés tous nos outils de simulation, de test et d'analyse (MEF, détection de singularités, réseaux de neurones).

Chapitre I

Outils de diagnostic : analyse modale expérimentale

I.1 Généralités

Un des objectifs de cette thèse est de développer une approche expérimentale dans le cadre du diagnostic des structures *in situ*. On va donc dans ce chapitre présenter une des meilleurs solutions pratiques pour les structures de génie-civil, l'analyse modale expérimentale. Un des problèmes majeurs du domaine expérimental est de maîtriser le protocole pour ne pas mesurer n'importe quoi, c'est à dire pour obtenir les mesures les plus fiables possibles. Voilà pourquoi on essaiera de présenter les différents outils métrologiques permettant d'obtenir les déformées modales (ou formes des modes, mode shapes en anglais). On étudiera non seulement le rapport qualité/prix des outils expérimentaux mais aussi la fiabilité des résultats en terme de résolution spatiale et de robustesse au bruit de mesure intrinsèque de l'appareil.

Aktan et al [Aa00] définissent la surveillance de la santé des structures par la mesure en fonctionnement de l'environnement (charges) et des réponses pertinentes de la structure pour suivre et évaluer les "symptômes" d'incidents, d'anomalies qui peuvent affecter le bon fonctionnement, l'utilité ou la sûreté de fonctionnement de la structure. D'un autre côté, l'identification de défauts a pour but de les détecter, de les localiser et de les quantifier. C'est donc une subdivision de la Surveillance de la Santé des Structures (SSS ou SHM). Quand on compare les types de structures, par exemple celles du domaine

de l'aérospatial, de l'ingénierie mécanique ou industrielle, les structures du génie civil sont souvent de grande taille, de topologie complexe comportant un grand nombre d'éléments et d'assemblages. Certains de ces composants sont mêmes inaccessibles. Voilà pourquoi la mesure par vibration est utilisée, c'est une des seules mesures globales qui existe, et de plus, met en évidence le fait qu'un changement local de rigidité peut affecter le comportement dynamique global de la structure. On utilise quatre niveaux d'identification de défauts [Ryt93] :

- Niveau 1, la détection : la structure est elle endommagée ou non ?
- Niveau 2, la localisation : Où est le défaut sur la structure ?
- Niveau 3, la quantification : Quelle est l'importance du défaut ?
- Niveau 4, la prédiction : Combien de temps la structure peut elle être utilisée ?

Les travaux issus de la bibliographie peuvent être classés pour la plupart comme relevant des niveaux 1, 2 ou 3 car ils sont issus de travaux sur les tests ou modélisations en dynamique des structures. Le dernier niveau traite de fiabilité des ouvrages ou d'analyse de fatigue.

Staszewski met en évidence que l'automatisation d'une méthode vibratoire d'identification de défauts peut se comparer à une étude de reconnaissance de formes [Sta02]. La figure I.1 montre que les paramètres que l'on extrait des mesures (ou symptômes) par traitement du signal sont directement reliés à l'identification par une phase de reconnaissance de formes. Les symptômes sont des quantités mesurables directement ou indirectement qui sont sensibles au défaut et qui sont normalement contaminés par du bruit de mesures.

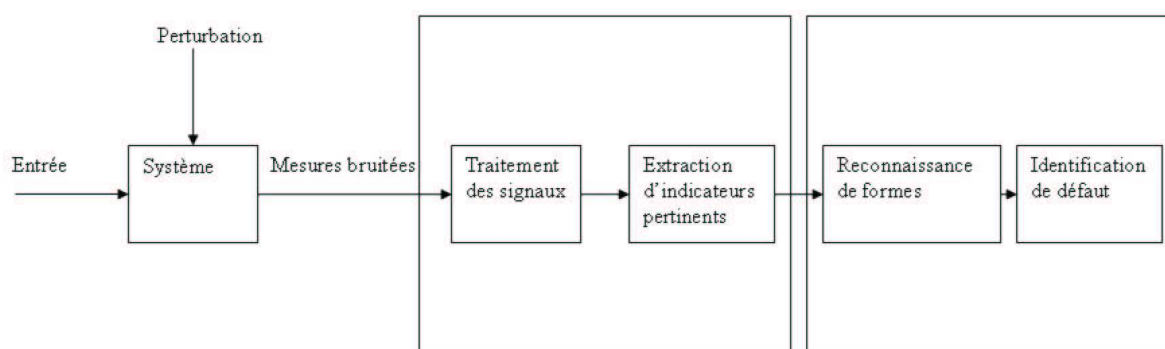


FIG. I.1 : Principes d'identification de défauts selon Staszewski

Doebeling et al résument les recherches sur les méthodes vibratoires en SSS, incluant un état de l'art et une bibliographie complète sur l'identification de défauts par : variations en fréquence, changements sur les déformées modales (et dérivées), méthodes de matrice de flexibilité et autres réponses en fréquence, identification temporelle et réseaux de neurones [Da96]. Bien que très complet, ce rapport date de 1996 et donc nécessite une mise à jour pour cette thèse. Nous essayerons donc dans le prochain paragraphe, de décrire les articles qui nous paraissent intéressants toute thématique confondue de SSS en zoomant particulièrement sur les méthodes utilisant le traitement du signal avancé sur les déformées modales.

Le but de la recherche en surveillance de santé des structures dans les laboratoires spécialisés (LANL ¹, DRG ², LCPC ³) est de développer des solutions robustes et rentables en intégrant des technologies de diverses disciplines (capteurs, traitement du signal, reconnaissance de formes, réseaux de neurones, modélisation). Au niveau français, la division Fonctionnement et Durabilité des Ouvrages d'Art (FDOA) du LCPC effectue des recherches, études et expertises dans le domaine du fonctionnement des structures de génie civil, notamment le comportement des ouvrages en service et l'ingénierie des ouvrages à construire. Son domaine de compétence concerne les ponts, mais elle intervient aussi sur d'autres ouvrages de génie civil ou édifices majeurs. Ses activités s'appuient sur la complémentarité de ses compétences en expérimentation d'éléments de structures en laboratoire, en instrumentation d'ouvrages in-situ et en modélisation numérique.

Au niveau des groupements de recherche, des projets européens importants comme l'action COST F3 sur la dynamique des structures ou le projet Euréka SINOPSYS sur l'analyse et la surveillance vibratoires in situ participent activement à l'élaboration de méthodes avancées de détection et de localisation d'endommagements. Un autre projet, CONSTRUCTIF, présente des méthodes de couplage de modèles physiques simplifiés et des méthodes d'inférence statistique pour s'affranchir des phénomènes environnementaux dans la surveillance vibratoire des structures mécaniques et du génie civil en particulier. Le but est de développer des logiciels libres d'analyse et de modélisation dont COSMAD, OpenFEM, MODULEF, SDT sous Matlab (ou Scilab) principalement.

¹Los Alamos National Laboratory

²Dynamics Research Group

³Laboratoire Central des Ponts et chaussées

On peut aussi citer SISTHEM dont les objectifs sont la conception, l'analyse et la mise en oeuvre d'algorithmes statistiques basés sur l'utilisation de modèles, pour l'identification, la surveillance et le diagnostic de systèmes industriels complexes.

Liste des urls des laboratoires :

- <http://www.lanl.gov/projects/damage-id/>
- <http://www.shef.ac.uk/mecheng/dynam/index.html>
- <http://www.structures.ucsd.edu/Laboratories/NDE.shtml>
- <http://www.irisa.fr/sisthem/index-fr.htm>
- <http://www.lcpc.fr/>

Liste des urls des projets :

- <http://www.ulg.ac.be/lta-vis/costf3/costf3.html>
- <http://www.irisa.fr/sisthem/sinopsys/>
- <http://www.irisa.fr/sisthem/constructif/>
- <http://www.irisa.fr/sisthem/constructif/modal.htm>
- <http://www-rocq.inria.fr/OpenFEM/>
- <http://www-rocq.inria.fr/modulef/> <http://www.sdtools.com/sdt/>
- <http://www.intelligent-systems.info/research.htm>

I.2 Méthodes d'identification et analyse modale

Ce domaine de recherche possède une bibliographie très riche. On peut discerner deux pôles importants : les méthodes robustes d'analyse modale qui permettent d'identifier les paramètres modaux (fréquence, amortissement et déformée à chaque résonance) et les travaux qui se basent sur ces indicateurs modaux pour identifier les défauts (structuraux ou d'assemblages). La figure I.2 résume les différentes méthodes basées sur la dynamique des structures dans le domaine de l'identification de défauts. La lecture de ce graphique peut se voir comme une introduction aux problèmes d'identification de défauts par méthode vibratoire.

Certains travaux essaient de lier les deux pôles. En effet, on peut citer les travaux initiaux de Adams et al [Aa78] ou de Ridcharson [RF85] sur la corrélation des défauts sur les structures, avec l'apparition de changements dans les paramètres modaux.

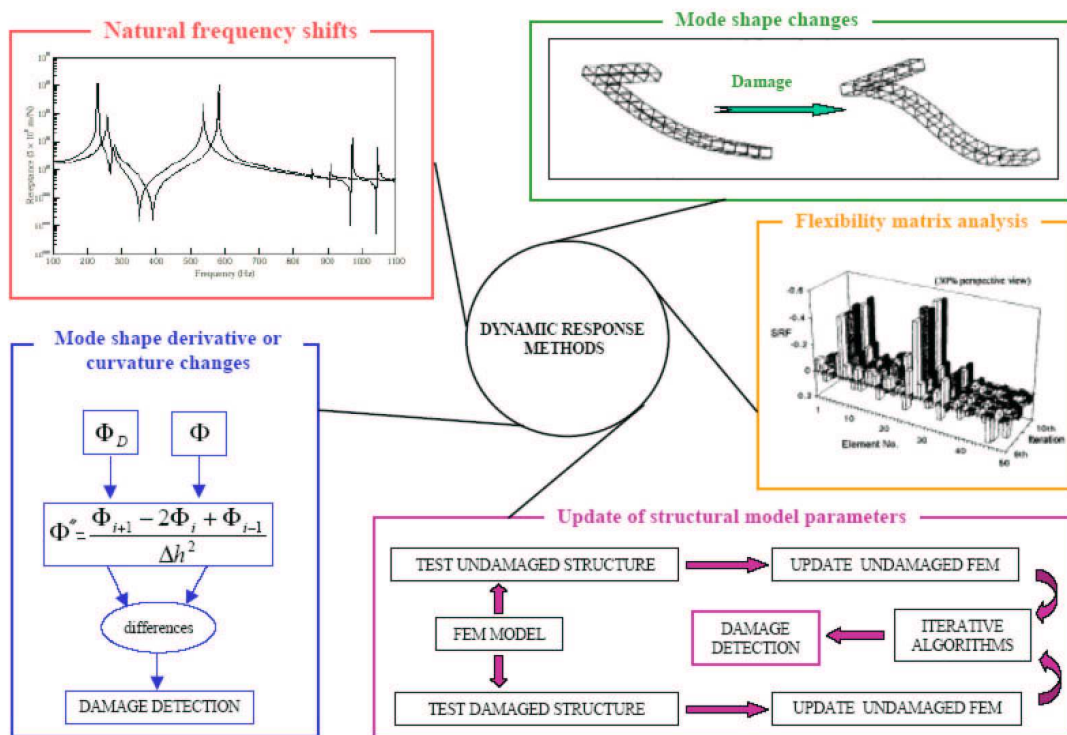


FIG. I.2 : Les différentes méthodes de détection de défauts

Ce dernier auteur est d'ailleurs à l'origine de l'analyse modale expérimentale avec Formenti. En effet, ils développèrent les outils de curve fitting (complex exponential, algorithme de Prony) pour estimer la déformée modale, algorithmes ensuite implémentés dans des logiciels d'analyse modale comme DIAMOND [Da97]. Au niveau professionnel, des sociétés comme Prodera ou LMS offrent des solutions complètes de mise à jour d'un modèle éléments finis. Au niveau algorithmes et logiciels innovants en analyse modale, les travaux de Mevel et Basseville [LM03a, LM03b, MB04, MB93] sur les méthodes de sous-espaces pour l'analyse et la surveillance modale font références. Leurs méthodes sont d'ailleurs implémentées dans SDT (Structural Dynamics Toolbox), une boîte à outils Matlab permettant d'établir la corrélation entre modèle 3D (éléments finis) et analyse modale expérimentale. On peut citer aussi Peeters et al pour leurs travaux sur l'identification de systèmes stochastiques pour l'analyse modale (espace d'état) [Pa99, PR99] ou Antony et al pour le développement d'outils d'analyse "output only" innovant [Aa04]. De plus il existe une littérature complète sur l'utilisation d'algorithmes de traitement du signal performants en génie civil/mécanique/vibrations.

On peut mettre en avant, Owen et al pour leurs recherches sur l'application des modèles AR pour l'analyse des structures [Oa], Ruzzene et al pour l'utilisation des ondelettes en identification des paramètres modaux (fréquences et amortissements) d'un pont à partir de données réelles [Ra97], Garibaldi et al pour l'identification de structure par "up dating" [Ga03] et enfin, Newland pour ses travaux sur les ondelettes et l'acoustique [New94a, New94b]. Des conférences internationales comme IMAC (International Modal Analysis Conference ⁴) ou les séminaires de Louvain (International Seminar on Modal Analysis, ISMA ⁵) sont des hauts lieux d'échanges scientifiques sur la thématique de l'analyse modale.

Dans cette thèse, nos travaux se sont focalisés sur la localisation de défauts (traitement du signal) sur des déformées de structures (type assemblage de poutres) par variations des déformées. Mais, nous avons aussi apporté des solutions pour quantifier le défaut et estimer la qualité des assemblages dans l'optique d'un diagnostic simple et pertinent. De plus nous avons essayé d'avoir une méthode non renseignée (par des modèles éléments finis par exemple) bien que nos applications expérimentales soit supervisées. De plus, nous avons essayé de comprendre le phénomène "dynamique" de l'endommagement d'une poutre en estimant par exemple quel est le plus petit défaut que l'on peut estimer par nos méthodes en fonction de sa localisation, des conditions limites et du bruit de mesure. Notre méthode pourrait se décrire comme multi échelle car on étudie localement (déformées) la structure complète. Elle pourrait s'inscrire dans un principe plus général : on pourrait détecter (et localiser grossièrement) le défaut sur une structure complexe par analyse modale "globale" [Za03], puis utiliser localement notre méthode pour identifier un défaut structural (ou d'assemblage).

⁴<http://www.sem.org/CONF-IMAC-TOP.asp>

⁵<http://www.isma-isaac.be/>

I.3 Analyse modale

L'identification (ou l'extraction) des paramètres modaux à partir des capteurs (forces en entrées, accélérations en sorties) est un processus complexe. Deux approches sont généralement utilisées : l'approche temporelle et l'approche fréquentielle. Cette dernière est la plus utilisée (estimation de la Fonction de réponse en Fréquence, FRF) mais elle possède quelques désavantages : d'une part, les amplitudes des modules de la FRF sont faussées car on utilise seulement la partie utile du signal (l'intégrale étant réalisée sur une infinité de points). L'utilisation de fenêtre de type Hamming, par exemple, force le signal à être périodique en atténuant les extrémités vers zéro, mais cela a un effet sur l'estimation de l'amortissement. D'autre part le signal d'entrée doit être riche en fréquences pour ne pas créer de passages par zéro sur le spectre. Une excitation de type impulsion ou signal aléatoire (au spectre proche d'une constante) est alors recommandée. Les cartes d'acquisition actuelles (dites dynamiques) résolvent le problème d'échantillonnage et de repliement du spectre en utilisant un filtre anti-repliement. L'approche temporelle est basée, elle, sur la création d'une matrice de convolution (qui résout les problèmes de l'approche fréquentielle) mais est sujette à un mauvais conditionnement car la réponse impulsionnelle est souvent instable. Des méthodes telles que la décomposition en valeurs singulières ou les matrices d'observation/Kalman, permettent un meilleur conditionnement de cette matrice. Cependant ces méthodes sont plus sensibles aux bruits de mesure et sont bien entendu plus coûteuses en temps de calcul (pas d'algorithme rapide).

I.3.1 Définition

L'analyse modale permet d'établir un modèle de comportement vibratoire d'une structure en basses fréquences (de quelques Hz jusqu'à quelques centaines de Hz). En identifiant par la mesure les trois paramètres modaux (les fréquences, vecteurs propres et amortissements modaux) d'un système, on peut construire un modèle analytique qui pourra être employé en simulation pour connaître le comportement dynamique de ce système dans d'autres cas pratiques. En hautes et moyennes fréquences, la densité de modes est souvent trop importante pour que cette méthode soit applicable. Ces considérations dépendent de la complexité du problème étudié : pour une poutre ou une plaque, le domaine d'utilisation de l'analyse modale est beaucoup plus large que pour une voiture ou un avion, par exemple.

L'analyse modale est basée sur quelques hypothèses :

1. Le système est linéaire dans la gamme des amplitudes étudiées.
2. Le système, s'il est continu, peut se représenter par un système discret où les paramètres sont exprimés pour chaque noeud du maillage (nombre de degrés de liberté (ddl) total = nombre de noeuds \times nombre de ddl par noeud).
3. L'amortissement (qui correspond à la modélisation d'une énergie dissipée proportionnelle à la vitesse) est supposé proportionnel à la rigidité et à la masse. Avec cette hypothèse simplificatrice, on définit l'amortissement visqueux "global".
4. Pour des modes clairement identifiés, la méthode de comparaison à une somme de systèmes à 1 ddl est facile à appliquer.

Nous nous intéresserons ici aussi bien à l'aspect théorique qu'à l'aspect pratique. Plus de détails peuvent être trouvés dans les références Rao [Rao95], Venizelos [Ven02] et Bhatti [Bha02] pour l'aspect modélisation (et donc analyse aux valeurs propres) et dans les articles d'Avitabile [Avi01] ou le cours de Jaouen [Jao02] d'autre part pour l'aspect analyse fréquentielle. Les figures suivantes résument bien le problème de l'analyse modale expérimentale. L'accélération enregistrée par le capteur en un point de la structure est une superposition de sinusoides amorties résonnant à f_i dont on peut associer un pic isolé en fréquence (Figure I.3). De plus, les mathématiques permettent d'exprimer les paramètres modaux à partir des données de l'analyse modale expérimentale mais aussi à

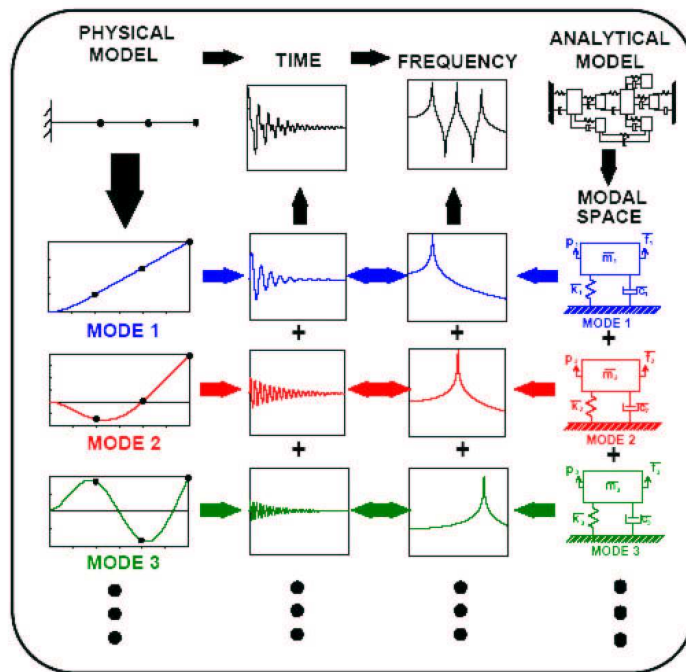


FIG. I.3 : principe de superposition d'après Avitabile

partir de modèles éléments finis de structure. Quand on optimise le modèle en fonction de l'expérimentation, on parle de model update (Figure I.4).

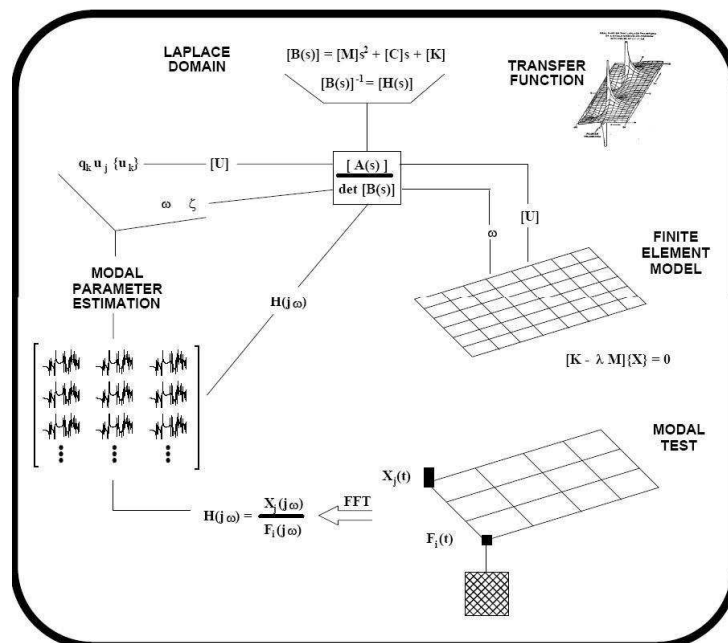


FIG. I.4 : Relation entre modèle mécanique, mathématique et résultats expérimentaux d'après Avitabile

I.3.2 Extraction des paramètres modaux

L'analyse modale expérimentale est la technique la plus fiable pour extraire les trois paramètres modaux de l'estimation de la Fonction de Réponse en Fréquences (ou FRF) $H(\omega)$. A partir de la représentation de Bode (tracé du module et de l'argument en fonction de la fréquence), on décide du nombre de modes à attribuer à la structure, et ce dans une bande de fréquences. La plupart du temps, le nombre de modes correspond au nombre de pics distincts (résonance d'amplitudes) du tracé du module de $H(\omega)$.

Il correspond aussi au nombre de passages à $\pm 90^\circ$ de la phase de $H(\omega)$ ou aux maxima de la partie imaginaire de $H(\omega)$.

Afin d'illustrer ce paragraphe, on va reprendre un exemple simple issu de [Ven02].

La poutre de la figure I.5 est encastrée à une extrémité, libre à l'autre et excitée au point 1 par un pot vibrant de pulsation ω réglable.

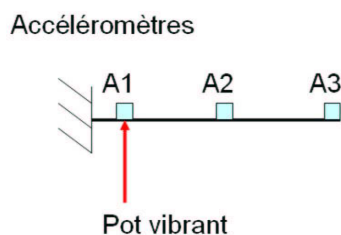


FIG. I.5 : Protocole d'identification modale

Les mesures des déplacements aux points 1, 2 et 3 sont transmises à un analyseur qui affiche le graphique de la figure I.6.

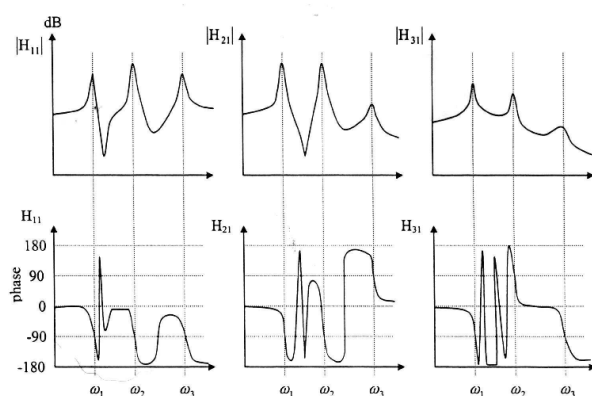


FIG. I.6 : Module et phase des 3 FRF

On repère sur la partie du haut, les variations du module de la FRF $|H|$, en échelle

logarithmique (en dB). Les variations de l'argument (phase) de H sont en bas, pour une certaine gamme de pulsations de l'excitation d'amplitude F.

On pose : $[X] = [H(\omega)][F]$, où $[H(\omega)]$ est la matrice de réceptance. On a relevé pour le premier accéléromètre :

$|H_{11}(\omega_1)| = 0.423$, à la pulsation du premier mode $\omega_1 = 10$ rad/s et les deux pulsations à -3 dB autour du fondamental : $|H_{11}(\omega_{a1})| = |H_{11}(\omega_{b1})| = \frac{|H_{11}(\omega_1)|}{\sqrt{(2)}}$, $\omega_{a1} = 9.85$ rad/s et $\omega_{b1} = 10.05$ rad/s.

De même pour le deuxième et troisième modes :

$|H_{11}(\omega_2)| = 0.655$ à $\omega_2 = 20$ rad/s et les deux pulsations à -3 dB autour de ce mode :

$|H_{11}(\omega_{a2})| = |H_{11}(\omega_{b2})| = \frac{|H_{11}(\omega_2)|}{\sqrt{(2)}}$, $\omega_{a2} = 19.8$ rad/s et $\omega_{b2} = 20.2$ rad/s.

$|H_{11}(\omega_3)| = 0.174$ à $\omega_3 = 32$ rad/s et les deux pulsations à -3 dB autour de ce mode :

$|H_{11}(\omega_{a3})| = |H_{11}(\omega_{b3})| = \frac{|H_{11}(\omega_3)|}{\sqrt{(2)}}$, $\omega_{a3} = 30.8$ rad/s et $\omega_{b3} = 34$ rad/s.

Pour le deuxième accéléromètre, on relève :

$|H_{21}(\omega_1)| = 0.917$, $|H_{21}(\omega_2)| = 0.687$, $|H_{21}(\omega_3)| = 0.124$

Pour le troisième accéléromètre, on relève :

$|H_{31}(\omega_1)| = 2.317$, $|H_{31}(\omega_2)| = 2.126$, $|H_{31}(\omega_3)| = 0.707$

La structure admet 3 degrés de liberté (ddl) entre 0 et 40 rad/s, identifiés par les 3 pics des modules des FRF, de pulsation $\omega_1 = 10$ rad/s, $\omega_2 = 20$ rad/s, $\omega_3 = 32$ rad/s. On vérifie qu'à ces pulsations correspond une phase de FRF de 90° ou de -90° (modulo 180°).

Le facteur d'amortissement est obtenu par la méthode de la demi puissance (-3 dB) autour de $\omega = \omega_r$ (r_{ieme} mode).

Soit,

$$\delta_1 = \frac{\omega_{b1} - \omega_{a1}}{2\omega_1} = \frac{10.05 - 9.85}{20} = 0.01$$

$$\delta_2 = \frac{\omega_{b2} - \omega_{a2}}{2\omega_2} = \frac{20.2 - 19.8}{40} = 0.01$$

$$\delta_3 = \frac{\omega_{b3} - \omega_3}{2\omega_3} = \frac{34 - 30.8}{64} = 0.019$$

Remarque : On peut trouver les mêmes résultats à partir de $|H_{21}|$ ou $|H_{31}|$, ce qui permet d'obtenir une valeur plus précise en moyennant les 3 résultats.

Si l'amortissement est proportionnel (à la rigidité et à la masse), les composantes P_{jr} du vecteur de forme ψ_r (avec j numéro de capteur et r mode de vibration) sont réelles et les signes de leurs composantes sont donnés par le signe de la phase correspondante. Si l'amortissement est non proportionnel, P_{jr} est complexe et nous ne déterminerons ainsi que son module.

En effet, en connaissant le nombre de pôles qui caractérisent la structure, on peut trouver les paramètres modaux en identifiant le modèle à fraction partielle (MFP) :

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^N \frac{R_k}{\omega - p_k} + \frac{R_k^*}{\omega - p_k^*}$$

Ainsi, on décompose la fonction de transfert (identifiée en minimisant l'erreur entre la FRF et le quotient de de polynôme en ω) en éléments simples. Cette décomposition laisse apparaître dans les pôles p et p^* du modèle à fraction partielle, les 2 premiers paramètres modaux : $p = -\delta_k - j\omega_k$. En effet, sa partie réelle représente l'amortissement et sa partie imaginaire nous renseigne sur la pulsation naturelle amortie du système. Le résidu R_k est un nombre qui rend compte de la force du mode. C'est un concept mathématique qui est un indicateur de la déformée modale.

$$H(\omega \rightarrow \omega_k) \approx \frac{R_k}{\delta_k}$$

On montre que le résidu pour un mode particulier k est proportionnel au produit du déplacement modal à 1 ddl i par le déplacement modal à l'excitation j :

$$R_{ij}^k = \frac{P_{ik}P_{jk}}{2j\omega_k}$$

On peut remarquer que la partie imaginaire de $H(\omega)$ contient deux informations essentielles, l'amplitude et la direction.

Ainsi, on obtient le vecteur de forme ψ_1 du premier mode à partir des relations suivantes :

$$|P_{j1}P_{k1}| = 2\delta_1\omega_1^2|H_{jk}(\omega_1)|$$

$$P_{11}^2 = 2\delta_1\omega_1^2|H_{11}(\omega_1)| = 0.846, \text{ phase négative, } P_{11} = -0.920$$

$$|P_{21}P_{11}| = 2\delta_1\omega_1^2|H_{21}(\omega_1)| = 1.834, \text{ phase négative, } P_{21} = -1.993$$

$$|P_{31}P_{11}| = 2\delta_1\omega_1^2|H_{31}(\omega_1)| = 4.633, \text{ phase négative, } P_{21} = -5.036$$

Soit

$$\psi_1 = \begin{pmatrix} -0.920 \\ -1.993 \\ -5.036 \end{pmatrix}$$

De même pour le deuxième mode :

$$\psi_2 = \begin{pmatrix} -2.289 \\ -2.401 \\ 7.43 \end{pmatrix}$$

Et pour le troisième mode :

$$\psi_3 = \begin{pmatrix} -4.221 \\ 3 \\ -17.151 \end{pmatrix}$$

Enfin, les déformées modales de la poutre sont données sur la figure I.7

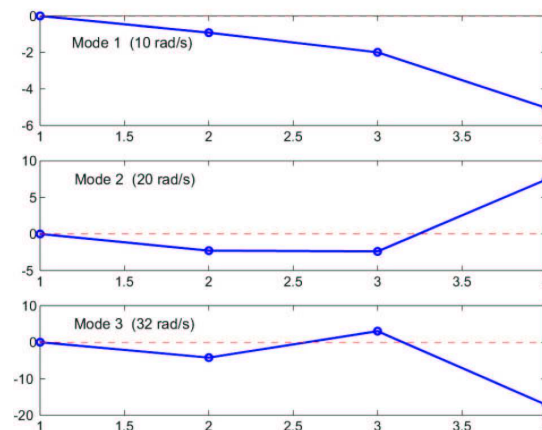


FIG. I.7 : Déformées modales des 3 premiers modes : en abscisse, l'amplitude de la déformée non normalisée, en ordonnée, la position des accéléromètres

Cet exemple très simple va nous permettre d'introduire un paradigme important en détection de défaut. Plus la résolution spatiale (nombre de points de mesure par mètre) est faible moins on est précis sur la localisation (cqfd). Sur le graphique de la figure I.7, on a réuni deux points par une droite alors que l'on sait analytiquement (du point de vue mécanique) que ces points appartiennent à une combinaison de fonctions de trigonométrie complexes et réelles. De plus, un algorithme très simple de localisation comme l'estimation de la courbure (dérivée seconde de la déformée) donnerait des résultats erronés (troncatures numériques) en raison du faible nombre de points de mesure.

I.4 Analyse modale pratique

Un des problèmes majeurs de l'analyse modale expérimentale est le choix d'un point de référence (ou de plusieurs ...) car celui ci ne doit pas être près d'une ligne nodale pour tous les modes sous études. Deux principales formes d'excitation existent : l'excitation par marteau ou l'excitation par pot vibrant. On va essayer de lister les avantages et les inconvénients des 2 solutions :

Pour le marteau d'impact ;

+ Mesure et déplacement rapide.

- Bruit de mesure (essai très court), résolution fréquentielle limitée, problèmes sur les structures non linéaires.

Pour le pot vibrant (+ amplificateur et générateur de signaux) ;

+ Choix des signaux d'excitation, bon rapport signal sur bruit, moyennes des FRFs sur un temps long à une bonne résolution et possibilité d'utiliser plusieurs pots pour stimuler tous les ddls de la structure.

- Fixer le shacker à un point de référence unique (!), ajout de masse locale (pot) ou de rigidité locale (stinger ; capteur de force dans la direction de l'excitation).

Lorsque l'on choisit le pot comme excitation, on doit choisir le type de signal. Un particulièrement adapté est le sinus balayé (chirp), signal sinusoidal dont la fréquence balaye le domaine d'intérêt durant un temps donné. Il évite ainsi les problèmes d'élargissement du pic de résonance (leakage) et offre un très bon Rapport Signal à Bruit (RSB).

I.4.1 Comparaison des solutions métrologiques

Nous allons maintenant effectuer une comparaison pratique des différentes solutions qui s'offrent à nous. On aurait pu citer, HOLO 3, qui dispose d'un banc d'analyse modale par TV holographie qui permet une détermination rapide et précise des modes propres d'une pièce. Mais leur approche n'est pas habituelle car leur méthode caractérise le comportement dynamique d'une structure par des cartes d'intensité de structure qui sont des champs de vecteurs qui traduisent à la fois les parcours de l'énergie vibratoire et sa propagation. On décrira trois capteurs : le premier, classique, est le capteur à contact piezoélectrique de type accéléromètre puis on détaillera deux types de capteurs sans contact que sont les vibromètres lasers et les caméras à haute vitesse. Une application à chaque méthode est proposée tout en sachant bien sur que notre principale problème est d'obtenir des déformées à haute résolution. On verra par la suite comment estimer de manière optimale cette résolution.

I.4.2 Capteurs de type accéléromètre

Nous avons d'abord testé la solution disponible au laboratoire à savoir l'utilisation d'accéléromètres. Pour acquérir les signaux on dispose d'une carte d'acquisition de signaux dynamique NI4778 possédant 8 entrées analogiques pour accéléromètre ICP. Le traitement des données enregistrées (réponse et excitation temporelle) se fait sous MATLAB avec le Logiciel DIAMOND (Los Alamos National Laboratory, USA). DIAMOND signifie Damage Identification And MOdal aNalysis of Data, il utilise plusieurs algorithmes de calcul de déformée à partir des données issues des capteurs (FRFs). On peut citer dans le domaine fréquentiel les algorithmes : Operating Deflection Shape (ODS), et modèle à fraction rationnelle (Rational Polynomial Frequency, RPF), et dans le domaine temporel, Complex Exponential (CE), et Eigensystem Realization Algorithm (ERA). Un modèle discret de la structure sous étude est d'abord créé (réponses/ excitation / références), puis à chaque point de mesure est associé une Fonction de Réponse en Fréquence (FRF) moyennée pour diminuer le bruit de mesure et donc maximiser le rapport signal à bruit (RSB ou Signal to Noise Ratio, SNR).

On va maintenant analyser les résultats d'un test expérimental effectué sur une poutre en bois de 2 m avec un défaut localisé au milieu. Le but de cette expérience est de montrer les limites de ce type d'analyse en terme de résolution spatiale. La figure suivante montre le protocole de mesure.

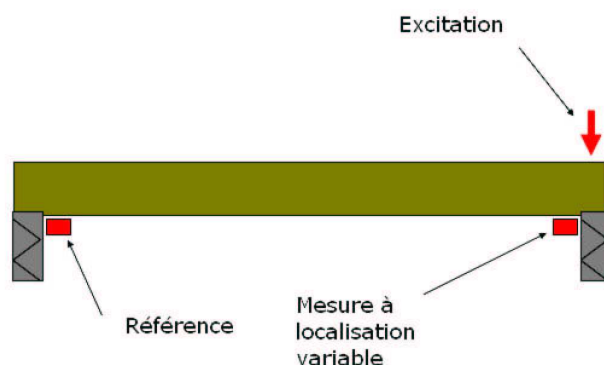


FIG. I.8 : Poutre sur appuis souples sous étude avec balayage d'un accéléromètre

On distingue sur la figure I.8 une poutre sur appui souple, un point d'excitation pour le marteau fixe, un accéléromètre de référence, puis un accéléromètre à localisation variable permettant de mesurer à chaque position discrète de la poutre (un point tout les 10 cm = 20 points de mesures). De plus on moyennera chaque position sur 15 essais, les données finales sont la FRF de la figure ci dessous et la fonction de cohérence. Sur la FRF (Figure I.9), on distingue distinctement les 3 premiers modes alors que la cohérence est proche de 1 sur une bande passante de 1000 Hz puis diminue rapidement.

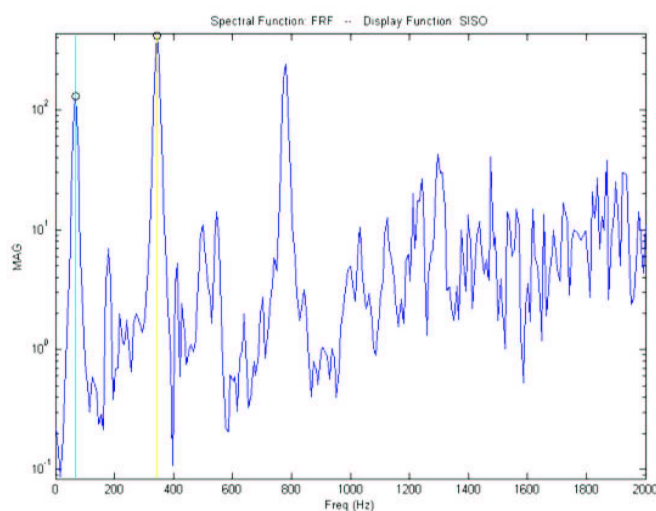


FIG. I.9 : Exemple de FRF et choix des modes pour le modèle à fraction rationnelle

L'obtention d'une déformée d'une poutre supportée-supportée durera quelques heures et passera par une étape de traitement très longue (sous DIAMOND) afin d'obtenir une déformée plus fiable que par la méthode du peak picking (modèle à fraction rationnelle).

Par exemple, la figure I.10 montre le premier mode de la poutre sous étude avec le modèle à fraction rationnelle.

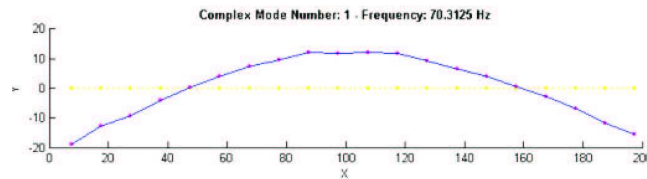


FIG. I.10 : Mode 1 estimé par le logiciel DIAMOND

Ainsi on pourrait résumer les limites de cette analyse expérimentale :

- Les nombreuses mesures nécessaires (15 par points).
- La limitation en résolution spatiale (10 cm) qui dans cet exemple ne permet pas d'effectuer un diagnostic.
- Le fait d'utiliser plusieurs accéléromètres en tant que référence n'améliore pas l'estimation.
- La configuration d'essai doit rester identique entre deux mesures : influence du poids des accéléromètres qui augmente localement la masse de la poutre.
- La sensibilité aux bruits de mesures.
- Les différentes méthodes d'obtention de la déformée disponible (laquelle choisir?).

I.4.3 Vibromètre laser

Le vibromètre laser à effet doppler (LDV) permet de déterminer le mouvement (résolution maximale : 2nm) et la vitesse/l'accélération de surfaces vibrantes. C'est un instrument optique capable d'effectuer une mesure sur différentes surfaces, qu'il s'agisse d'objets peu réfléchissants ou d'objets éloignés. Grâce à l'extrême sensibilité du capteur il est possible de réaliser des mesures à des distances allant du décimètre jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Son principe est basé sur l'effet Doppler-Fizeau.

L'effet Doppler est le décalage entre la fréquence de l'onde émise et de l'onde reçue lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre (Figure I.11). Il apparaît aussi lorsque l'onde se réfléchit sur un objet en mouvement par rapport à l'émetteur ou au récepteur.

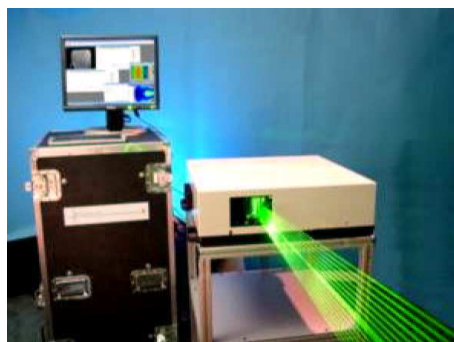


FIG. I.11 : Principe de l'effet Doppler

On distinguera les vibromètres laser à effet Doppler qui sont des capteurs sans contact classiques et les solutions à balayage comme LDV PSV 400 de Polytec (Figure I.12(a)). Il est à noter que ce modèle existe pour des mesures en 3D avec 3 têtes laser. De plus il existe des solutions à 16 acquisitions simultanées comme le Metrolaser VibroMet (Figure I.12 (b)) qui permettent d'obtenir aisément des déformées hautes résolutions très fiables.



(a)



(b)

FIG. I.12 : PSV 400 de Polytec et VibroMet de Metrolaser

De nombreux auteurs présentent le vibromètre laser comme la meilleure solution pour acquérir les déformées opérationnelles. Martarelli [Mar01] effectue dans sa thèse une étude très poussée de l'utilisation d'un LDV dans l'analyse vibratoire de structures. Pour notre application du dernier chapitre, nous avons choisi d'utiliser le Polytec PSV 400 dont les spécificités sont données ci-dessous.

PSV-400 Vibromètre laser à balayage

Distance de mesure > 0.4 m (Possibilité de travailler à des distances plus courtes avec le "close-up unit")

Laser 633 nm, visible Classe II He-Ne laser, < 1 mW, "eye-safe"

Taille échantillon de quelques mm^2 à plusieurs m^2

Maillage Densité et systèmes de coordonnées multiples (polaires, cartésiennes, hexagonales) avec une densité jusqu'à 512×512 points

Résolution angulaire $< 0.002^\circ$, stabilité angulaire $< 0.01^\circ$ /hr

Vitesse de balayage > 100 points/s

Pai et al [Pa04] utilisent un vibromètre laser de Polytec pour identifier des défauts sur une poutre encastrée. Le protocole expérimental est décrit dans la figure I.13.

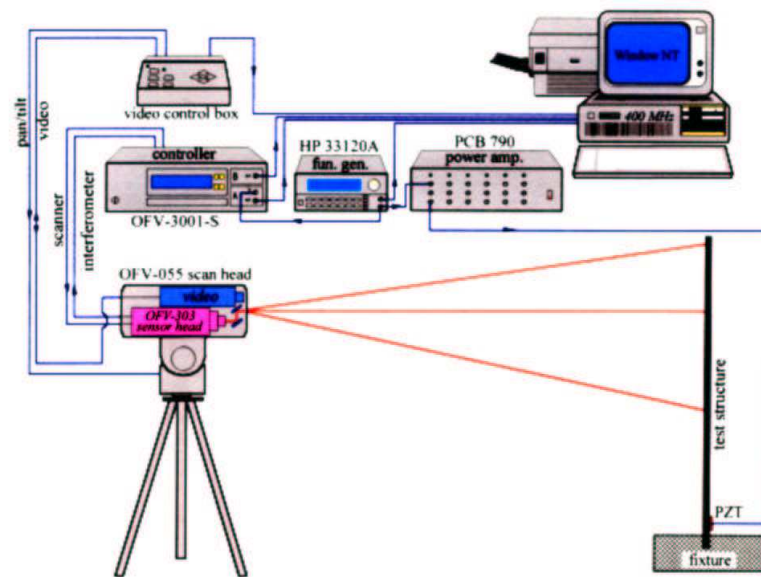


FIG. I.13 : Principe de fonctionnement d'un vibromètre laser

Les données issues de l'analyse modale avec un LDV sont souvent très fiables du fait d'un niveau de bruit très faible (Ecart-type proche de 10^{-3}) en plus d'un nombre d'acquisitions (donc de moyennes) élevé.

I.4.4 Caméra à haute vitesse

Une camera video digitale enregistre le mouvement d'un objet sous la forme d'une séquence d'images. Il existe aujourd'hui des caméras à haute vitesse (jusqu'à 40 000 images par seconde). Ainsi les oscillations mécaniques telles que les vibrations des structures peuvent être enregistrées sans perdre d'information (aliasing). N'ayant pas pu tester ces méthodes (bien qu'en contact avec Mr Patsias de l'Université de Sheffield), nous expliquerons ici 2 articles issues de notre bibliographie [Pa05, PS02].

I.4.4.1 Exemple d'une poutre supportée-supportée Poudel et al [Pa05]

Les techniques avancées de traitement d'image peuvent permettre de reconstruire les déformées haute résolution [Pa05]. Ce travail expérimental est plus une validation d'une méthode qu'un outil de diagnostic complet.

La figure I.14 montre comment extraire l'information déformée d'une série temporelle d'image.

- (1) On doit tout d'abord acquérir l'image d'un objet de dimension connue en même temps que l'objet en mouvement. Puis extraire les contours pertinents (localisation, pente et courbure) et déterminer le facteur d'échelle (en longueur par pixel).
- (2) Ensuite on doit acquérir l'objet sans défaut et extraire les informations de contour pertinentes.
- (3) Faire de même avec l'objet en mouvement endommagé.
- (4) Estimer le mouvement relatif de l'objet en soustrayant les informations de l'état non endommagé (2) aux informations de l'étape (3). Répéter pour chaque image.
- (5) Multiplier par le facteur d'échelle le résultat de (4).

Une application de laboratoire à la détection de défauts est proposée toujours par Poudel et al. Une simple poutre supportée-supportée en acier est utilisée pour les deux états : sain et endommagé (par une coupe de section de 2.5 cm à 34.3 cm). La poutre a une dimension de 15.24 cm de large, 0.635 cm d'épaisseur, et 110.5 cm de long.

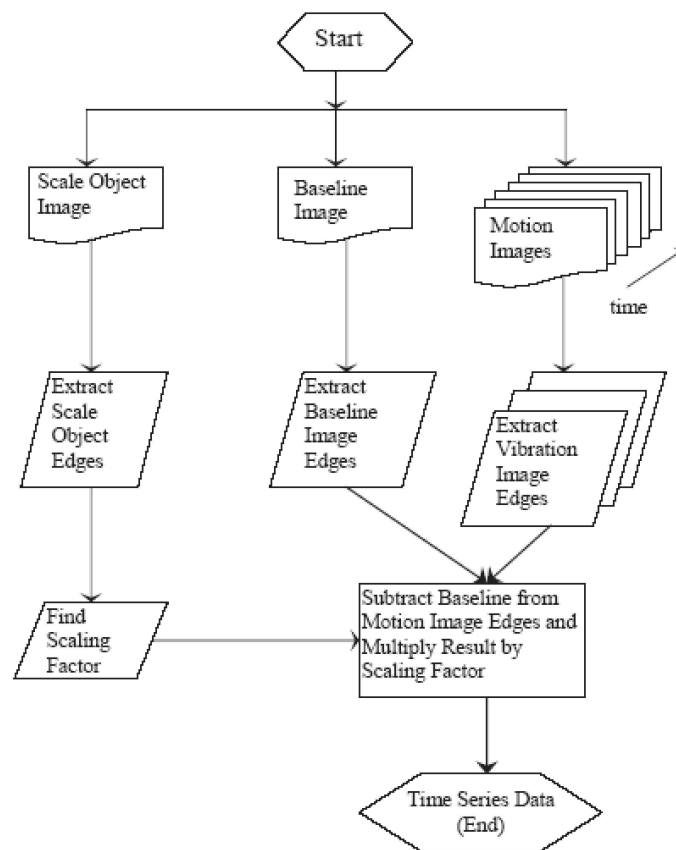


FIG. I.14 : Schéma de la reconstruction du mouvement à partir des images issues de la caméra

La vibration libre (Figure I.15) de la poutre est enregistrée par une caméra Nac Memrecam fx K3, excitée en imposant un déplacement initial (à 45 cm de l'extrémité gauche). Le capteur CMOS a une résolution de 1280x1024 et un convertisseur analogique/numérique de 10 bits.

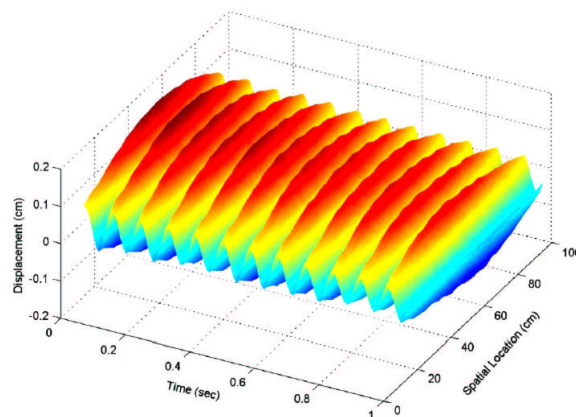


FIG. I.15 : Série temporelle typique du mouvement d'une poutre supportée-supportée

Plus en détail, les vibrations sont enregistrées à la vitesse de 1000 frames/s pendant 1 seconde. Les données temporelles ont une résolution de 1131 points et l'analyse modale est effectuée par le logiciel MEScope Ves.

Les résultats sont donnés ci dessous :

On voit que les déformées sont très reproductibles (Figure I.16). 8 essais sont effectués sur la poutre intact et 4 sur la poutre endommagée.

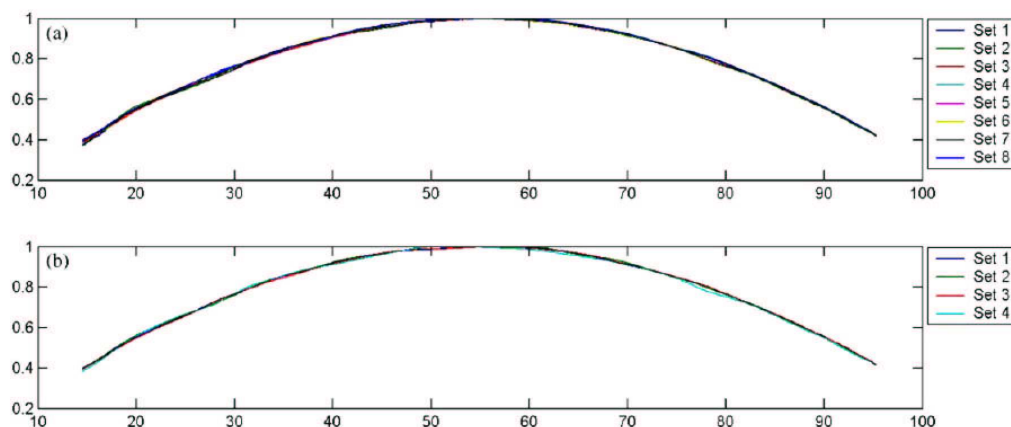


FIG. I.16 : Déformée de la poutre intact (a) et déformée de la poutre endommagée à $D1=34.3$ cm (b)

Une méthode simple de diagnostic est de mesurer l'erreur relative entre déformée saine et déformée endommagée (Figure I.17). Celle-ci réussit à localiser la zone endommagée mais on voit la limitation qui est de connaître l'état non endommagé.

Cette analyse, si elle est suffisante pour localiser les défauts, ne propose pas de solution pour les quantifier et ou les distinguer du bruit.

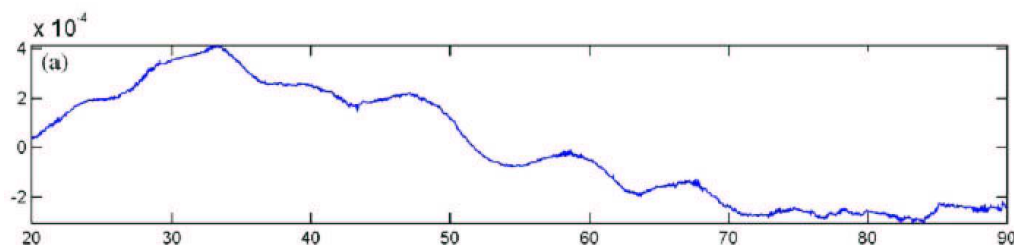


FIG. I.17 : Erreur relative entre déformée intacte-endommagée à $D1=34.3$ cm

I.4.4.2 Exemple d'une poutre encastrée-libre Patsias et al [PS02]

Patsias et al [PS02] ont aussi proposé une application à la détection de défauts sur poutre. Ils utilisent la méthode des correspondances à partir des images contour pour reconstruire le mouvement (Figure I.18).

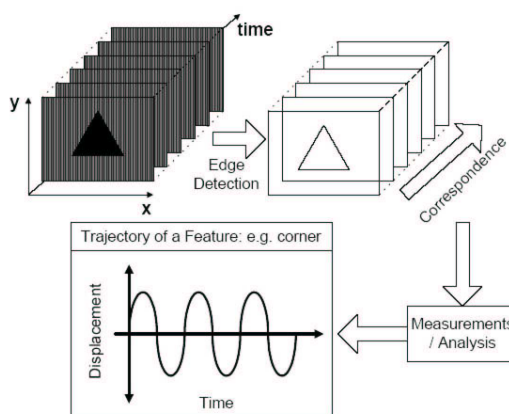


FIG. I.18 : méthode générale d'obtention de la déformée à partir d'une séquence d'images

Ils proposent l'analyse modale d'une poutre encastrée (Figure II.13). L'excitation est un pot vibrant et le capteur est soit une caméra SONY (CCD TR760E, 25 images par seconde -frames per second, fps-), soit une caméra KODAK (Motion Corder Analyser 10000 fps). Ainsi d'après le théorème de Nyquist, la caméra SONY pourra enregistrer sans repliement du spectre (ou aliasing) une déformée en dessous de 12.5 Hz, et, la caméra Kodak, des déformées en dessous de 5000 Hz. La figure I.19 montre le protocole expérimental.

La fiabilité de cette méthode est démontrée avec une très bonne corrélation entre fréquence théorique et fréquence estimée par la méthode optique (Figure I.20 (a)). De plus, la déformée expérimentale (mode 1) est très proche de l'analytique (Figure I.20 (b)). Patsias et al corrigent la déformée expérimentale avec une correction de l'effet de la rigidité du stinger.

Ils proposent même l'étude des vibrations d'une structure aux rigidités de liaisons variables (la figure I.21 (a) montrent 3 ressorts par extrémités).

L'exemple de la figure I.21(b) montre une image de la structure en mouvement. Les 4 zones sous étude sont les zones où il y a les ressorts. En enregistrant le mouvement de cette structure, on peut étudier le comportement fréquentiel de celle-ci.

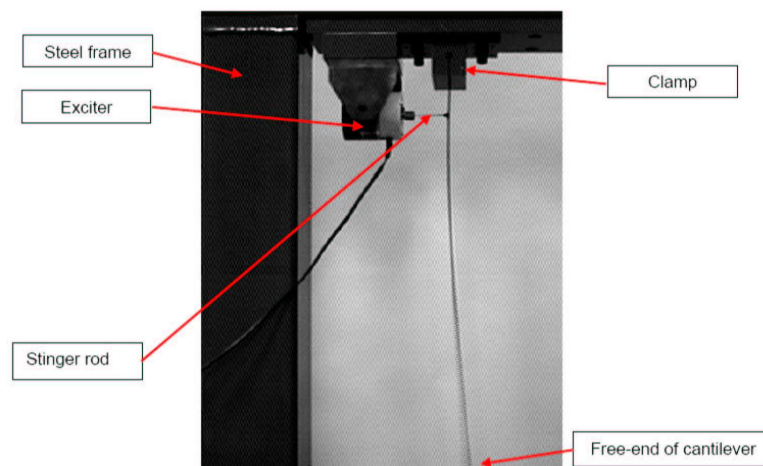


FIG. I.19 : Expérience de la poutre encastrée

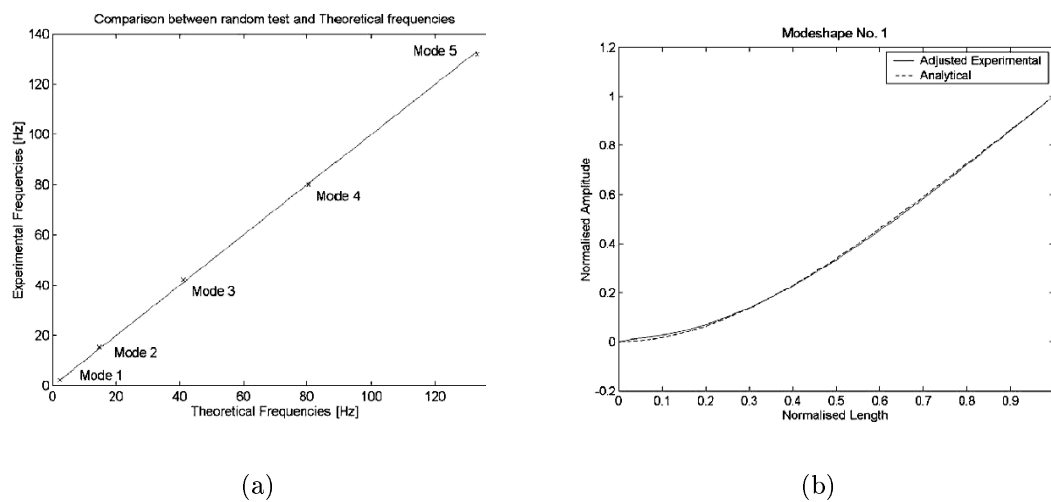


FIG. I.20 : Corrélation entre données modales analytiques et expérimentales

Les méthodes sans contact donnent de très bon résultats proche de la méthode classique (accéléromètres) et du calcul analytique. Le tableau I.1 regroupe les différents résultats. On peut noter que les fréquences estimées par les différents capteurs sont très proches du résultat théorique.

Méthodes	Fréquence Horizontale (Hz)	Verticale (Hz)	Angulaire (Hz)
Theorique	3.55	5.04	7.05
Accéléromètres	3.55	5.03	7.46
Camera Sony	3.65	5.09	7.78
Camera Kodak	3.6	5.05	7.6

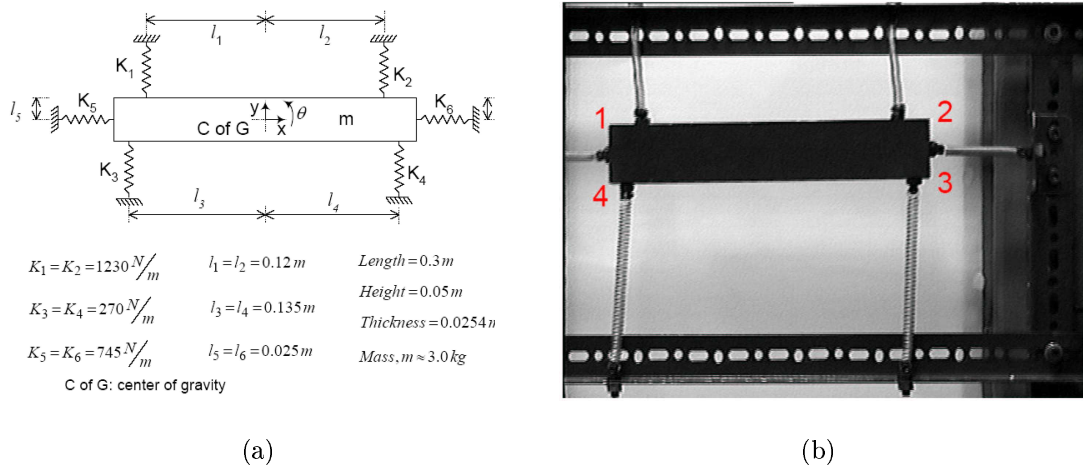


FIG. I.21 : Diagramme de la structure et les 4 zones d'étude en mouvement

Tableau I.1, Estimation des fréquences de la structure par différentes méthodes

Une des applications de la méthode de Patsias est d'étudier le déplacement de la zone 2. Le déplacement estimé à partir des images (Figure I.22(a)) permet d'identifier sur le spectre de puissance (Figure I.22(b)) les fréquences de résonance théorique de la structure. Cette méthode pourrait permettre, par exemple, d'étudier le comportement des conditions limites en fonction des raideurs paramétrées.

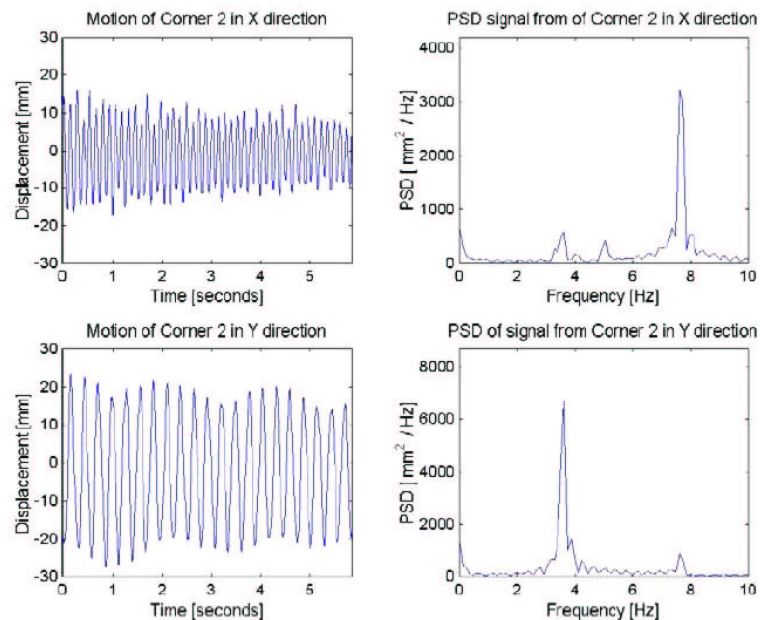


FIG. I.22 : Déplacement horizontal de la zone 2 (a), et son spectre de puissance (b). Déplacement vertical de la zone 2 (c), et son spectre de puissance (d)

I.4.5 Résultats de la comparaison

En conclusion ces méthodes optiques par caméra à haute vitesse présentent une alternative intéressante aux méthodes classiques pour les structures de laboratoire et/ou *in situ*. Cependant elles sont très récentes et n'ont donc pas la souplesse et la fiabilité des méthodes lasers éprouvées depuis 20 ans et nécessitent, de plus, un énorme travail de traitement d'image pour une estimation du mouvement d'élément de structure fiable et robuste.

On s'aperçoit lors de l'étude des solutions que notre choix dans cette thèse s'est surtout porté sur la fiabilité des mesures à haute résolution. Cependant il se pose la question importante de l'échelle de la structure. En effet le poids d'un accéléromètre n'aura pas le même effet sur un pont que sur une éprouvette de laboratoire. Ainsi la solution à moindre coût qui consiste en une carte NI (avec driver NI DAQ), le logiciel Diamond et des accéléromètres ICP (directement adaptables sur la carte) ne peut se comparer à des solutions professionnelles beaucoup plus robustes et automatisées. Pour les caméras, il n'existe pas d'offre complète chez les industriels. Toute la partie logiciel de traitement de vidéo est effectuée par des chercheurs spécialisés en traitement d'image. Enfin, le meilleur compromis pour notre étude s'avère être les vibromètres laser de Polytec. Cette société a pour l'instant le monopole en matière de vibromètre du fait de son expérience et de son secteur Recherche et Développement innovant. Le tableau I.2 permet de conclure quant au bilan de ces différentes solutions. En tenant compte de l'aspect fiabilité/précision et de son adaptabilité à toutes les échelles de structures, la solution du vibromètre laser à balayage nous paraît bien adapté à notre problème, malgré le prix.

Capteurs	Fiabilité	Précision	logiciel	adaptabilité	Prix	Total
LDV	++	++	+++	+	--	+6
Camera	+	++	+	+	-	+4
Accéléromètres	-	+	+	-	+	+1

Tableau I.2, Classement des outils métrologiques : le LDV offre, malgré son prix, le meilleur compromis fiabilité/précision.

Pour les méthodes classiques (accéléromètres), la précision est dépendante de plusieurs facteurs : le poids des capteurs qui modifie la rigidité locale de la structure, la longueur de fil (qui atténue le signal et influe sur la précision lors de la conversion analogique/numérique) et bien sur le contact assuré par la cire. Enfin le diamètre du capteur (0.7cm) limite la résolution spatiale et participe à diminuer la précision (biais dans la localisation). Voilà pourquoi il est courant d'utiliser des bus numériques (CAN) pour transporter l'information lorsque l'ordinateur est trop loin des capteurs. De plus, les méthodes innovantes (sans contact) possèdent des caractéristiques intéressantes en terme de précision et de résolution spatiale. Le prochain paragraphe résumera les travaux de Sazonov afin de permettre une utilisation fiable d'un LDV. Cette méthode, basée sur les différences centrales et la dérivation numérique, permet d'estimer l'échantillonnage optimal en fonction des conditions limites et du bruit de mesure de l'appareil.

I.5 Principes d'acquisition optimales des déformées

Cette partie est basée sur les travaux de Sazonov [SK04]. Il estime des paramètres optimaux d'échantillonnage grâce à des calculs analytiques et des simulations de dynamique de poutres effectués sous Maple. Voilà pourquoi je ne vais pas détailler l'obtention des formules d'échantillonnage optimal. Beaucoup de scientifiques qui étudient l'effet de la résolution spatiale sur la détection de défauts pensaient que plus on avait de points, mieux on identifierait le défaut. Or les mesures sont soumises à un bruit et l'expérience démontre qu'il faut prendre en compte cette limitation lors de la conversion analogique/numérique du signal. Ainsi Sazonov démontre, en utilisant un LDV, que le calcul de la courbure de la déformée (curvature) ou l'estimation de l'énergie de déformation (strain energy) sont très sensibles à l'échantillonnage. En effet, il est bien connu que le calcul des dérivées numériques utilisant les différences finies est sensible au bruit dans les données pour les hautes densités de résolution. Dans le même temps, un échantillonnage trop faible peut conduire à une déformée modale imparfaite (erreur de troncature).

Pour démontrer ce point, prenons l'exemple de Sazonov : le 4ème mode d'une poutre libre-libre en aluminium est acquise par un LDV Ometron VPI-4000. Le calcul des courbures de déformées est ainsi effectué pour plusieurs résolutions spatiales.

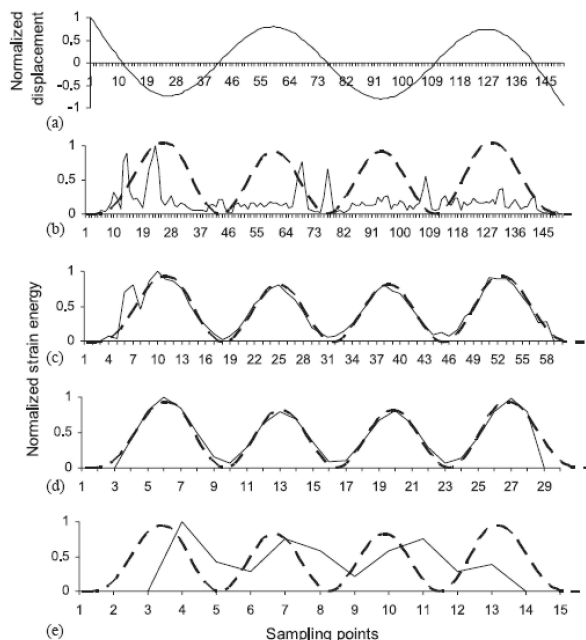


FIG. I.23 : Effet de l'échantillonnage sur la précision de la méthode "Strain Energy". On distingue le 4ème mode non endommagé (a), l'effet du suréchantillonnage sur la courbure calculée avec 150 pts (b), le rendu correct pour les échantillonnages à 60 pts (c) et 30 pts (d), et l'effet du sous échantillonnage sur la courbe à 15 pts (e)

Sur la Figure I.23, les deux courbures calculées avec peu de point (15) et avec trop de points (150) ne permettent pas de conclure. Par contre celui avec une résolution moyenne, serait utilisable pour un algorithme de détection de défaut car il possède peu de faux pics. Cela veut dire que l'on doit être proche de l'échantillonnage optimal.

Le calcul de la courbure de la déformée est généralement effectué par la formule de la dérivée seconde estimée en utilisant les différences finies dites centrales.

$$\phi''(x) = \frac{\phi(x+h) - 2\phi(x) + \phi(x-h)}{h^2} \quad (\text{I.1})$$

où ϕ est la déformée échantillonnée avec un intervalle h .

Ainsi la résolution spatiale N (inverse de h) optimale pour retrouver une image fiable de la déformée doit être suffisamment grande pour éviter les erreurs de troncature tout en étant capable de ne pas être sensible aux bruits de mesure. Sazonov part de la formule de la courbure pour estimer l'échantillonnage optimal par :

$$h_0 = \sqrt[4]{\epsilon F_4} \quad (\text{I.2})$$

où F_4 est l'erreur de troncature estimée analytiquement pour chaque condition limite et ϵ est l'écart type du bruit de mesure.

Conditions limites	F_4 (Mode 1)	F_4 (Mode 2)
EE ou LL	0.09588	0.01261
EL	3.864	0.09885

Tableau I.3, Le coefficient de troncature F_4 estimé analytiquement pour deux conditions limites typiques (E= Encastrée, L=Libre)

Une observation intéressante de l'équation précédente est le fait que doubler la résolution spatiale requiert de diminuer le bruit d'un facteur 16.

Sazonov démontre aussi que l'intervalle d'échantillonnage minimum pour lequel le bruit ne domine pas les résultats de calcul de la déformée est :

$$h_m = \sqrt{\frac{\alpha}{2} - 0.5\sqrt{\alpha^2 - 4\epsilon F_4}} \quad (\text{I.3})$$

avec α une constante obtenue de la même manière que F_4 . C'est la solution d'une formule qui maximise l'erreur sur la déformée.

Conditions limites	α (Mode 1)	α (Mode 2)
EE ou LL	0.4233	0.1446
EL	3.6794	0.7275

Tableau I.4, Le coefficient α estimé analytiquement pour deux conditions limites typiques (E= Encastrée, L=Libre)

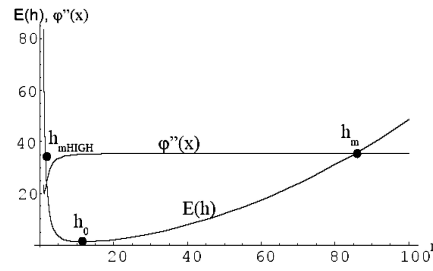


FIG. I.24 : Erreur de calcul $E(h)$ en ligne solide et courbure bruitée $\phi''(x)$ en ligne pointillée pour le premier mode d'une poutre sur appui libre libre, avec $x=0.5L$ et $\epsilon = 0.001$

On voit sur la figure I.24 que l'intervalle de confiance de notre échantillonnage est caractérisé par :

$$h_o \leq h \leq h_m \quad (\text{I.4})$$

avec $h_o = \frac{1}{N_{min}} = 11$ pour le nombre de points optimal pour effectuer un calcul fiable de la courbure.

Et, $h_m = \frac{1}{N_{max}} = 88$ pour le nombre de points maximal pour effectuer un calcul fiable haute résolution de la courbure.

Ainsi, en imposant notre distance d'échantillonnage $h_e = h_m$, on peut arriver à identifier un défaut de taille minimum W_d :

$$W_d = 2h_m \quad (\text{I.5})$$

Par exemple échantillonner avec une résolution spatiale N_{max} , nous permet d'identifier un défaut d'une taille égale à $2h_m$ car seulement 3 points permettent d'identifier le défaut comme un changement local de courbure (Figure I.25).

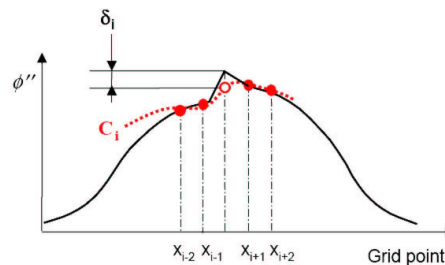


FIG. I.25 : Illustration de la détection de défaut de taille minimal ; 3 points seulement (donc $2h$) permettent de caractériser le défaut comme un changement local de courbure.

De plus on peut tracer le défaut de taille minimale W_d pour 2 conditions limites en fonction du bruit de mesure (écart-type NSD) et de la résolution spatiale SR. Les figures I.26 et I.27 permettent de mettre en avant le fait que plus le bruit augmente (de NSD=0.00001 à NSD=0.1, soit d'un ratio signal à bruit faible 20dB à un SNR=100dB très intéressant) plus la résolution optimale diminue et donc plus la largeur du défaut identifiable augmente. Typiquement les valeurs de bruit expérimental d'un LDV correspondent à NSD=0.001.

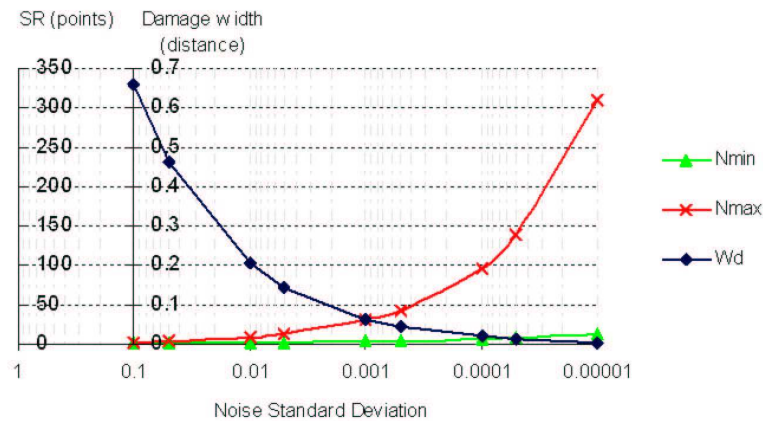


FIG. I.26 : Taille minimale de défaut W_d en fonction de la résolution spatiale SR pour le premier mode d'une poutre Encastree-Libre (EL)

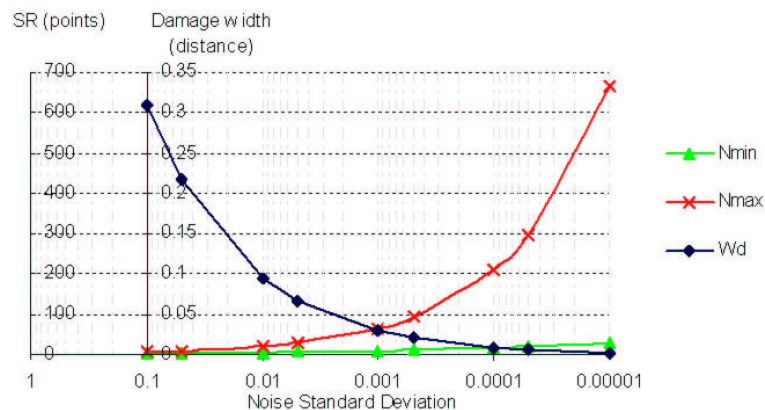


FIG. I.27 : Taille minimale de défaut W_d en fonction de la résolution spatiale SR pour le premier mode d'une poutre Encastree-Encastree (EE)

Ces résultats analytiques confirment que le choix de l'échantillonnage est un critère délicat car il dépend de plusieurs facteurs : les conditions limites et le bruit de mesure.

Si l'on doit identifier un très petit défaut, par exemple 0.02 % de la longueur d'une poutre, on va commencer par lire les graphiques des figures I.26 et I.27. Pour le premier cas, la poutre a un comportement EE (Figure I.27)). Ainsi si nous recherchons une déformée fiable, le bruit ne devra pas dépasser $NSD=0.0005$ (66dB) et la résolution spatiale être proche de $SR=93$ pts/m. De même, pour une poutre EL (Figure I.26), la résolution sera plus grande $SR=97$ pts/m et le bruit pourra être plus présent $NSD=0.001$.

I.6 Conclusions

On a choisi dans ce chapitre d'expliquer l'analyse modale de manière pratique en mettant en avant l'aspect technologique et le critère de fiabilité des mesures. Notre choix s'est donc porté vers le LDV à balayage qui, pour des expériences de laboratoire, s'avère d'une grande qualité de mesure des déformées. La théorie de l'échantillonnage optimal de Sazonov permet d'estimer la résolution spatiale en fonction des conditions limites de la poutre sous étude et du bruit de mesure de l'appareil.

on a tenté, dans ce chapitre, de répondre à deux questions cruciales :

Comment échantillonner la déformée spatiale pour obtenir un résultat fiable ?

Quelle est l'influence du bruit de mesure quand on augmente par exemple la résolution spatiale ?

La théorie de Sazonov permet donc de donner un encadrement de l'échantillonnage optimal. En fait plus le nombre de points de la déformée augmente plus notre méthode de localisation sera précise, et donc on pourra identifier un très petit défaut sous réserve que le bruit n'influence pas les résultats de nos mesures.

Le prochain chapitre introduira les outils de localisation de défauts principalement en utilisant les déformées. Car on sait que les déformées contiennent l'information spatiale du comportement dynamique de la structure. C'est ainsi le seul indicateur du comportement local de la poutre et celui qui va nous permettre de comprendre les effets d'un endommagement sur la courbure des déformées. De plus, au niveau des extrémités, un changement local des rigidités de liaisons induira une variation de courbure de la déformée et donc un changement des conditions limites pour une poutre simple et/ou des assemblages pour une structure.

Chapitre II

Outils théoriques d'analyse des déformées modales

II.1 Présentation

Notre choix de travailler à partir de mesures de déformées modales par analyse modale expérimentale peut se justifier d'une manière théorique et pratique. Théoriquement, les outils de simulation (modélisation) numériques peuvent permettre de modéliser tout système mécanique, dans notre cas, une poutre en tant qu'élément de structure. Cela permet de plus, d'étudier tous les scénarii de défaut local (endommagement) dans les structures que ce soit au niveau des assemblages ou des défauts liés à la rigidité du matériau. D'un point de vue pratique, les outils récents en traitement numérique du signal offrent la possibilité de mesurer la régularité d'un signal afin d'identifier les singularités qui sont les images des défauts sur l'apparence de la déformée. On va donc s'attacher dans ce deuxième chapitre à décrire d'une part les diverses méthodes (basées sur les informations modales) d'identification de défauts mais aussi d'entrer dans le détails des méthodes de localisation utilisant les déformées modales. Ainsi on essayera de comprendre comment modéliser une poutre endommagée en éléments finis. L'analyse dynamique de ce système mécanique permettra d'obtenir des déformées modales simulées. De plus, on introduira des outils d'analyse multi-échelles comme les ondelettes qui permettent d'extraire des déformées des informations pertinentes quand à l'identification du défaut. En effet, un changement local de rigidité d'une poutre s'identifie par une augmentation locale de la

courbure des déformées, ainsi, en utilisant la théorie de détection de singularité basée sur les ondelettes, on peut extraire les défauts sur les déformées comme on identifierait des singularités sur des signaux quelconque à 1 dimension. Enfin, ces outils de modélisation et d'analyse nous aide aussi à comprendre comment estimer les conditions limites seulement à partir des paramètres modaux.

II.1.1 Principes d'identification de défauts structuraux

Parce que les fréquences modales sont des propriétés globales de la structure, il est évident qu'un changement en fréquence n'est intéressant que si l'on connaît l'état non endommagé. De plus, il ne peut être utilisé que pour signifier qu'il existe un défaut (Niveau 1, détection). Plusieurs études (couplées avec des méthodes numériques) ont validé cette approche. Le problème direct qui généralement se positionne au niveau 1, consiste à calculer les variations en fréquence pour un type connu de défaut. Typiquement, le défaut est modélisé mathématiquement puis les fréquences mesurées sont comparées aux mesures prédites pour déterminer le défaut. Le problème inverse qui est typiquement de niveau 2 ou 3, consiste à calculer les paramètres de défaut (importance et localisation) à partir des variations en fréquence. Agosto utilise les mesures des fréquences de résonance comme entrées d'un algorithme de détection basé sur l'interprétation géométrique du problème aux valeurs propres [Ago97]. Enfin, les algorithmes génétiques, analyse de sensibilité et autres réseaux de neurones sont utilisés pour identifier les défauts sur les structures. Par exemple Rao et al modélisent le défaut par une diminution locale d'inertie, et introduit des données expérimentales simulées (MEF) dans le problème aux valeurs propres. Il utilise les algorithmes génétiques pour minimiser une fonction objectif (forces résiduelles) et prédire de manière optimale l'identification du défaut [Ra04]. Suh et al utilisent une approche hybride (neuro-génétique) pour localiser et quantifier le défaut sur un portique éléments finis [Sa00]. Les approches par réseaux de neurones à apprentissage supervisé (Perceptron multi couches) ont été validées expérimentalement [SS03]. La modélisation éléments finis de structures ressemblant à leur structure test (poutre en acier) leur a permis de construire des scénarii de poutres endommagées (diminution locale d'inertie) en rassemblant une combinaison d'indicateurs globaux de défaut (fréquence de résonances) et d'indicateurs locaux (courbure des déformées). On peut aussi citer les méthodes mêlant

analyse en composante des données temporelles pour réduire les données en quelques indications significatives et pertinentes [Za04]. Un modèle simplifié de réseaux de neurones est utilisé pour détecter les défauts sur une structure treillis simulée et expérimentalement sur l'exemple de benchmark du Los Alamos National Laboratory (structure à 3 étages). Des méthodes encore plus innovantes sont employées pour essayer de surveiller en "temps réel" les structures : on peut citer les supports à vecteur machine [Ba04], les cartes de Kohonen [ZI00] qui ont pour avantage pour le premier d'être des bons classifieurs de défauts même avec des données très bruitées et pour le second de ne pas nécessiter de base d'apprentissage (apprentissage non supervisé).

Les seules méthodes de localisation qui utilisent directement les paramètres de l'analyse modale sont celles qui analysent les déformées. Les premiers travaux [Yue85] proposent d'utiliser les fréquences et déformées modales pour localiser les défauts sur une poutre encastree (étude numérique). On sait que les déformées changent de pente quand elles sont autour de la zone de l'élément endommagé. De plus cette pente varie avec la localisation et la sévérité du défaut. On définit la courbure de la déformée par la dérivée seconde de la déformée. Cette courbe est directement reliée à la rigidité de flexion EI . En définissant un défaut par une réduction locale de rigidité, on induit une variation locale de l'amplitude de la courbure. Pandey et al [Pa91] proposent une analyse aux éléments finis d'une poutre supportée-supportée et indiquent que le choix du mode sous étude est critique. Ils ont suggéré la première méthode réellement pratique pour détecter les défauts (traie de scie correspondant à 20% de la largeur) qui utilise la matrice de flexibilité (expérimentale) pour détecter le défaut. Ils ont vérifié la répétabilité de leur méthode sur 2 poutres en I identiques. Leur résolution est faible (25 points de mesures sur 2044 mm de longueur), ils n'utilisent qu'un accéléromètre de référence (qui n'est pas sur un noeud d'une des 3 premières déformées) et déplacent l'excitation (marteau d'impact). Enfin ils moyennent leurs mesures (FRFs) sur 5 impacts et utilisent le logiciel STAR pour calculer les déformées. Leur méthode ne nécessite pas de modèle, et demande seulement les 2 ou 3 premiers modes. De plus, elle est plus sensible pour des mesures transverses (par rapport à la coupe du défaut) que verticales [Pa91]. Ratcliffe [Rat97] propose lui aussi une méthode ne nécessitant pas d'état de référence. Son idée est de calculer le Laplacien de déformées (discrétisées) d'une poutre endommagée. Il estime ensuite un polynôme cubique

lissant localement la déformée puis calcule un indice qui est la différence entre Laplacien et le polynôme. Ces méthodes restent similaires aux travaux de Shi et al [Sa98], et Sazonov [SK04] qui utilisent l'énergie de déformation (strain energy mode shape), méthode qui met en évidence la présence de défauts en pondérant les zones non endommagées (ou la pente ne change pas). Comme on l'a démontré au chapitre précédent, toutes ces méthodes montrent leur limitation lors de la présence de bruit. Les travaux de Sazonov [SK04], explicités précédemment, proposent une solution pour estimer l'échantillonnage optimal de déformées en fonction du bruit de mesure, des conditions limites et du mode choisi, mais aussi une application militaire avec le diagnostic *in situ* d'un lanceur de missile. Enfin, Dado propose une approche complémentaire : il étudie le comportement de son indicateur "crack depth ratio" pour 4 conditions limites classiques. En fonction du ratio (fréquence 1 / fréquence 2), il localise le défaut pour chaque condition limite et de plus propose des règles pour identifier le défaut ; par exemple pour une poutre encastree, le défaut se situe près de l'encastrement quand le ratio est proche de 1, et l'importance du défaut se repère moins facilement près de la partie libre [Moh97].

II.2 Le problème mécanique théorique

II.2.1 Modéliser ?

La mise en équations d'un système de solides rigides, reliés par des éléments flexibles (de raideurs connues) et des amortisseurs (de constantes données) fournit une modélisation exacte du système. La modélisation en système continu (masse et rigidité réparties sur tout l'élément) fournit des résultats analytiques en s'appuyant sur la mécanique des milieux continus. Ses formulations sont générales mais ses résultats analytiques se limitent à des cas élémentaires. Les vibrations d'une structure plus complexe, admettant un nombre élevé de degrés de liberté (ddl), nécessitent une méthode générale, modulable et programmable. La méthode des éléments finis (MEF) décompose une structure en petits éléments simples, discrétisés, de type poutre, plaque,... Le comportement vibratoire de l'élément est ramené à celui des noeuds. Ensuite on connecte les différents éléments (maillage) en respectant les conditions de continuité.

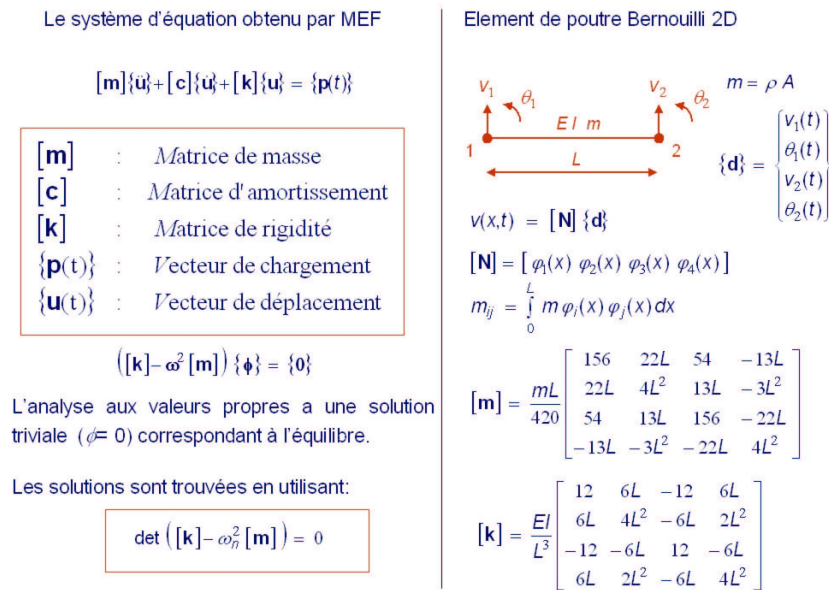


FIG. II.1 : Principes de la modélisation éléments finis appliquée aux vibrations d'une poutre de type Bernoulli

On peut alors extraire les matrices de masse et de raideur de la structure complète (Figure II.1) et déduire les pulsations propres du système non amorti et ses modes normaux. Cet outil de simulation de systèmes mécaniques permet de mieux comprendre le comportement d'une poutre endommagée.

II.2.2 Modéliser le défaut

On définit un défaut (damage, defect) dans une structure par un changement de propriétés (et/ou géométriques) du matériau mais il peut aussi apparaître sous la forme de changements dans les conditions limites et/ou les connections entre les éléments. On peut simplifier le problème et dire que des variations du module d'Young, E , simulent une hétérogénéité ou un vieillissement du matériau alors qu'une variation de l'inertie, I , représente une dégradation ou un changement de section. De plus sur les matériaux comme le bois, une variation de la densité ρ peut représenter une dégradation comme des galeries dues aux insectes...

Le processus de suivi des structures implique donc l'observation d'un système, sur une certaine durée, en utilisant périodiquement la réponse dynamique de ce système. Les effets d'un défaut sur une structure peuvent être divisés en 2 classes : linéaire ou non linéaire.

Un endommagement de type linéaire peut se définir par une structure initialement linéaire élastique qui reste linéaire élastique après endommagement. Les changements dans les propriétés modales sont le résultat de changement dans la géométrie et ou les propriétés du matériau, mais la réponse de la structure peut toujours être modélisée par une équation linéaire de mouvement. Le comportement non linéaire peut se définir par exemple par la formation d'une fissure (crack) de fatigue qui peut se fermer ou s'ouvrir dans l'environnement normal de fonctionnement de la structure. Les assemblages ou le type de matériaux utilisés (typiquement non linéaires) peuvent expliquer ce type de comportement. On expliquera ici le comportement linéaire. Une des hypothèses importantes que l'on fait dans cette thèse est de supposer que l'endommagement est ouvert pendant la vibration transverse de la poutre. Cela nous permet d'ignorer l'effet d'ouverture et de fermeture lors des vibrations. On peut modéliser l'endommagement de plusieurs manières. Dans la plupart des études on le simule soit par une diminution locale du module d'Young (et donc de la rigidité de flexion, EI), soit par un changement abrupte de la section (diminution locale de l'inertie et donc aussi de EI), soit enfin par l'utilisation d'un coefficient de compliance locale (rigidité de rotation) [CD80].

II.2.3 Equations de la dynamique des poutres

L'équation de mouvement, déplacement $v(x, t)$, d'une poutre dit d'Euler-Bernouilli est décrit en détails dans [Rao95]. Pour une poutre uniforme, les paramètres E , I et m sont constants, la vibration libre de la poutre est gouvernée par :

$$m \frac{\partial^2}{\partial t^2} v(x, t) + EI \frac{\partial^4}{\partial x^4} v(x, t) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Avec E , module d'Young en MPa, I , inertie de la section en m^4 et m , masse en kg.

En posant $c = \sqrt{\frac{EI}{m}}$, on obtient :

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} v(x, t) + c^2 \frac{\partial^4}{\partial x^4} v(x, t) = 0 \quad (\text{II.2})$$

Une solution de cette équation aux dérivées partielles est calculée en séparant les variables : $v(x, t) = Y(x)F(t)$

d'ou

$$Y(x) \frac{\partial^2}{\partial t^2} F(t) + c^2 F(t) \frac{\partial^4}{\partial x^4} Y(x) = 0$$

Soit

$$c^2 \frac{1}{Y(x)} \frac{\partial^4}{\partial x^4} Y(x) = \frac{-1}{F(t)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} F(t) = 0$$

Les termes dépendant du temps et de l'espace sont séparés, l'équation peut être satisfaite si les deux cotés de l'équation sont égaux :

$$\frac{-1}{F(t)} \frac{\partial^2}{\partial t^2} F(t) = \omega^2 \Rightarrow \frac{\partial^2}{\partial t^2} F(t) + \omega^2 F(t) = 0$$

et pour les informations spatiales,

$$c^2 \frac{1}{Y(x)} \frac{\partial^4}{\partial x^4} Y(x\omega^2) \Rightarrow \frac{\partial^4}{\partial x^4} Y(x) - \lambda^4 Y(x) = 0 \quad (\text{II.3})$$

En posant

$$\lambda^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{m\omega^2}{EI} \quad (\text{II.4})$$

on obtient :

$$\omega = \lambda^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (\text{II.5})$$

L'équation II.3 a pour solution (système à 1 ddl) : $Y(x) = Ce^{\phi x}$ qui impose pour II.3 :

$$\phi^4 = \lambda^4$$

L'équation précédente a 4 racines : $\phi_1 = \lambda, \phi_2 = -\lambda, \phi_3 = j\lambda, \phi_4 = -j\lambda$

La solution s'écrit donc :

$$C_1 e^{\phi_1 x} + C_2 e^{\phi_2 x} + C_3 e^{\phi_3 x} + C_4 e^{\phi_4 x}$$

ou sous la forme mieux connue des mécaniciens (Euler) :

$$Y(x) = A_1 \cosh(\lambda x) + A_2 \sinh(\lambda x) + A_3 \cos(\lambda x) + A_4 \sin(\lambda x) \quad (\text{II.6})$$

II.2.4 Modéliser les déformées endommagées

On se propose dans ce chapitre de montrer comment on modélise les déformées endommagées à partir de l'équation du mouvement d'une poutre homogène.

L'équation II.6 peut représenter les déformées modales (λ est en fait λ_i pour la i^{eme} résonance) d'une poutre non endommagée de longueur L. Dado [Moh97] propose de diviser

la déformée en 2 segments : une avant l'endommagement, l'autre après l'endommagement, la continuité étant assurée au niveau du défaut L_D par 4 relations de compatibilité.

$$Y_1(x) = A_{11}\cosh(\lambda_i x) + A_{12}\sinh(\lambda_i x) + A_{13}\cos(\lambda_i x) + A_{14}\sin(\lambda_i x) \quad (\text{II.7})$$

pour

$$0 \leq x \leq L_D$$

$$Y_2(x) = A_{21}\cosh(\lambda_i x) + A_{22}\sinh(\lambda_i x) + A_{23}\cos(\lambda_i x) + A_{24}\sin(\lambda_i x) \quad (\text{II.8})$$

pour

$$L_D \leq x \leq L$$

1. La continuité de la déformée au niveau de l'endommagement est donnée par :

$$Y_1(L_D) = Y_2(L_D)$$

2. Au niveau de l'endommagement, la pente de la déformée est discontinue ; on peut relier la valeur de la pente des deux cotés de l'endommagement à la rigidité de rotation du défaut [CD80, Moh97] par :

$$Y_1'(L_D) - Y_2'(L_D) = \frac{EI}{K_T} Y_1''(L_D) \quad (\text{II.9})$$

3. Les moments à gauche et à droite du défaut sont égaux.

$$EIY_1''(L_D) - EIY_2''(L_D) = 0$$

4. Les contraintes de cisaillement à gauche et à droite du défaut sont égaux.

$$EIY_1'''(L_D) - EIY_2'''(L_D) = 0$$

En reprenant l'équation II.5 on peut exprimer la fréquence de résonance du i^{eme} mode pour une poutre non endommagée par la relation suivante :

$$\omega_{io} = c_i \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (\text{II.10})$$

où c_i est une constante qui dépend du mode sous étude et des conditions limites de la poutre (Tableau II.1).

Conditions limites	Mode 1	Mode 2
SS	π^2	$4\pi^2$
EL	3.516	22.034
ES	15.394	49.95
EE	22.373	61.622

Tableau II.1, Le coefficient c_i de l'équation II.10 : S pour Supportée, E pour Encastrée, L pour libre.

En posant r_i le ratio entre la fréquence d'une poutre saine et la fréquence de celle endommagée, on obtient l'expression de la pulsation ω_i pour la poutre endommagée :

$$\omega_i = r_i c_i \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (\text{II.11})$$

Ce qui introduit dans l'expression de λ_i , donne :

$$\lambda_i = \frac{\sqrt{r_i c_i}}{L} \quad (\text{II.12})$$

Dado [Moh97] réussit donc à identifier les défauts sur des poutres simulées en utilisant cette dernière équation pour deux modes successifs de flexion.

De plus, Pai et al [Pa04] ont réussi à extraire l'effet des conditions limites en séparant les paramètres de l'équation II.7. Ainsi on peut écrire :

$$Y(x) = \hat{A}_1 e^{\lambda x} + \hat{A}_2 e^{-\lambda x} + A_3 \cos(\lambda x) + A_4 \sin(\lambda x), \hat{A}_1 = \frac{A_1 + A_2}{2}, \hat{A}_2 = \frac{A_1 - A_2}{2} \quad (\text{II.13})$$

Les deux premiers termes représentant les solutions centrales et les termes exponentielles les solutions aux limites.

Nous nous sommes orientés vers une modélisation de défaut par changement abrupte de l'inertie (et donc de la rigidité EI).

Pour des raisons de simplicité et de simulation expérimentale de défaut, [Pa05] modélisent le défaut (Figure II.2) par :

$$EI(x) = E\hat{I}_0(1 - C e^{-(\frac{x-L_D}{\sigma})^2}) \quad (\text{II.14})$$

où L_D , C , et σ sont respectivement la localisation de l'endommagement, son importance et sa largeur caractéristique (avec x mesuré depuis l'extrémité gauche de la poutre).

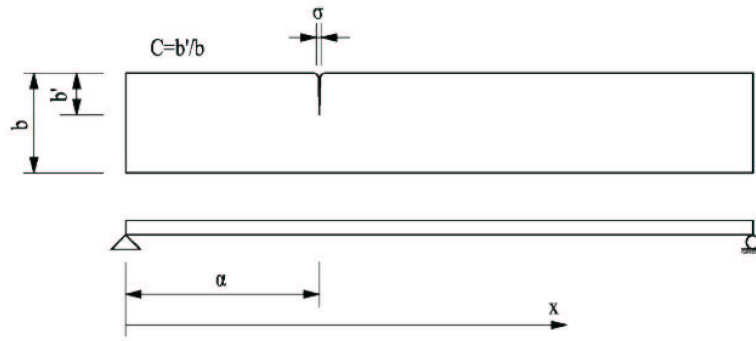


FIG. II.2 : Modélisation du défaut selon Poudel et al, 2005

On peut reprendre les relations de compatibilité, et, notamment la relation II.9 sous la forme :

$$Y_1'(L_D) - Y_2'(L_D) = \frac{\sigma C}{1-C} LY_2''(L_D) \quad (\text{II.15})$$

On peut extraire les coefficients A_i des équations II.8, II.9 en utilisant les équations de compatibilité aux limites dans le système de 3 conditions à remplir. Il en résulte, pour une poutre supportée-supportée, un système de 8 équations linéaires permettant d'identifier les 8 coefficients A_{ij} . En conséquence l'équation du mouvement de la poutre est une solution non triviale à ce système :

$$\sin \lambda L \sinh \lambda L + \frac{\sigma CL\lambda}{2(1-C)} (\sin \alpha \lambda \sin (\alpha - L)\lambda \sinh L\lambda - \sin L\lambda \sinh \alpha \lambda \sinh (\alpha - L)\lambda) = 0 \quad (\text{II.16})$$

Nous proposons dans notre méthode l'approche de Hong et al [Ha02], qui décompose une déformée expérimentale par une fonction de lissage (déformée saine) et une fonction de singularités représentant les défauts (Figure II.3). Ainsi, en transformant les déformées expérimentales en représentation temps-échelles, les singularités décriront des lignes de maxima sur le scalogramme.

Nous pouvons donc décrire l'équation II.7 sous la forme :

$$Y_E(x) = Y_L(x) + Y_{singular} = Y_L(x) + C|x - L_D|^\alpha \quad (\text{II.17})$$

où L_D , α , et C sont respectivement la localisation de l'endommagement, son importance et sa largeur caractéristique.

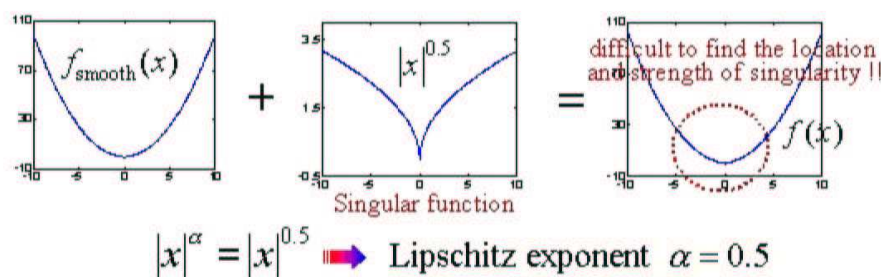


FIG. II.3 : Décomposition en fonction de singularité d'après Hong et al [Ha02]

Le défaut est simulé sur une poutre par un endommagement de largeur W_D et de profondeur c/h , h étant la hauteur de la poutre, c/h est la diminution de hauteur que l'on peut traduire par un facteur local de diminution d'inertie dI défini comme suit : $dI = \frac{\tilde{I}}{I}$ avec $I = \frac{bh^3}{12}$ et $\tilde{I} = \frac{bc^3}{12}$.

Le but de la théorie de la détection de singularités est d'estimer l'importance du défaut par l'exposant de Lipschitz α seulement à partir des données expérimentales (sans connaître la fonction lissée). Profitant de notre connaissance mécanique, à savoir les équations analytiques des déformées, on peut estimer cette fonction lissée et proposer un algorithme original et efficace de détection de singularités (cf. chapitre III).

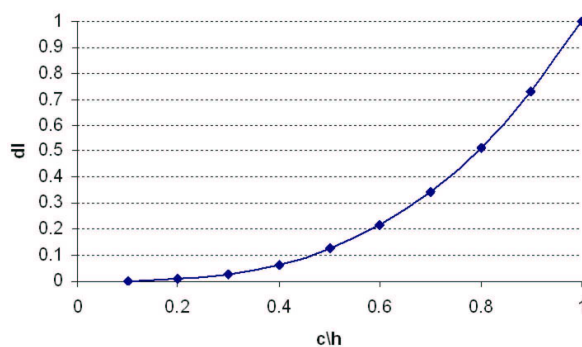


FIG. II.4 : Le facteur de diminution d'inertie dI en fonction de la profondeur de l'endommagement (c/h)

L'algorithme de lissage (NLINFIT) sous Matlab permet d'estimer les paramètres de la déformée analytique avec une bonne robustesse pour les conditions limites classiques. La toolbox utilise une formulation des moindres carrés non linéaires pour lisser un modèle non linéaire (NL) aux données (Méthode de Gauss-Newton).

II.3 Outils de traitement du signal pour l'analyse des déformées

II.3.1 Introduction

Les méthodes de traitement du signal ont été grandement améliorées par les nouveaux outils issus de la géométrie fractale et de l'analyse ondelettes. Le principal avantage de ces approches est qu'elles permettent une prise en compte fine de la régularité locale des signaux. En effet, l'analyse de Fourier, utilisée jusqu'alors, ne permettait pas aisément de relier la régularité locale d'une fonction avec le comportement de ses coefficients. Ces quelques pages sont principalement basées sur le livre de Mallat [Mal00] et sur le cours de Valérie Perrier (<http://www-lmc.imag.fr/lmc-cf/Valerie.Perrier/PUBLI/Cours1-VP.pdf>). La section "application à la détection de singularités" montre comment utiliser une approche temps-échelle pour identifier les singularités sur les signaux 1D à partir de la transformée en ondelettes (TO ou Wavelet Transform WT en anglais).

Le succès de ce type de méthode s'explique par le fait que la décomposition en ondelettes de la plupart des signaux ne fait apparaître des coefficients significatifs qu'à un petit nombre de positions dans le plan temps-échelle, c'est-à-dire que l'énergie est localisée préférentiellement à certaines fréquences et certaines positions.

II.3.2 Les ondelettes en identification de défaut

La transformée en ondelettes a une place importante dans la littérature du fait de ces propriétés d'analyse multi-échelles qui permettent de localiser le défaut sans utiliser de différentiation numérique (source d'erreur sur des signaux bruités).

Amaravadi et al [Va01] utilisent une approche double : ils calculent d'abord la courbure de la déformée puis lui appliquent la transformée en ondelettes continue afin de construire une carte temps-échelle (scalogramme) de la déformée où les défauts se localisent par des coefficients importants (zones de maxima). La différence principale entre la transformée en ondelettes continue (TOC ou CWT en anglais) et la transformée en ondelettes discrète (DWT) qui représente en fait le signal par une approximation grossière et des détails de plus en plus fins (représentant l'erreur dans l'approximation). Les ondelettes continues

sont à distinguer des ondelettes discrètes. Il est faux de croire qu'étant donné une ondelette continue, on peut construire l'ondelette discrète correspondante. On peut donc considérer qu'il s'agit de deux théories mathématiques différentes. Alors que les ondelettes continues sont fortement influencées par l'analyse mathématique classique (Morlet), les ondelettes discrètes relèvent davantage de la théorie des schémas de subdivision (Daubechies).

Nous avons choisi l'approche continue car elle est la base de l'analyse de singularités, approche développée par Mallat [MH92, Mal00], permettant de localiser et quantifier des singularités sur des signaux en utilisant l'analyse CWT. C'est justement cette approche qu'utilise Hong et al [Ha02]; ils caractérisent le défaut (modélisation et approche expérimentale) d'une poutre en acier endommagée sur appui souple en utilisant l'exposant de Lipschitz. Cet exposant décrit la singularité, il représente la pente de la ligne de maxima sur le scalogramme de la déformée expérimentale. Les déformées sont estimées par la méthode du "peak picking" et en utilisant l'analyse modale classique (accéléromètre...) avec une taille de défaut proche de la résolution pour une profondeur de 50%. De même, pour réduire le bruit de mesure, les acquisitions sont moyennées 5 fois. Une étude numérique complète montre d'une part que la corrélation de la sévérité de l'endommagement et de l'exposant de Lipschitz est sensible à l'échantillonnage et au bruit de mesure. D'autre part, il montre empiriquement que l'étude du premier mode est suffisante. Récemment, Douka et al [Da04] ont proposé une méthode de localisation et de quantification du défaut sur une poutre en plexiglass encastree-libre, en définissant un facteur d'intensité qui relie la taille du défaut aux coefficients d'ondelette. Au niveau expérimental, ils utilisent 2 accéléromètres (dont un de référence), un pot vibrant et une résolution spatiale faible. Ils proposent une méthode d'interpolation par splines cubiques afin d'augmenter artificiellement la résolution pour obtenir une très bonne précision dans l'analyse en ondelettes. De plus ils utilisent une méthode de seuillage pour éliminer le bruit (source de localisation de faux défauts). Il semble évident que dans tous ces travaux la clé de la précision d'identification du défaut réside dans la qualité de la déformée expérimentale i.e. dans la limitation du bruit de mesure aussi bien que dans l'obtention d'une déformée haute résolution. Voilà pourquoi de nouvelles études sur l'acquisition de déformées ont été proposées. Elles utilisent des vibromètres laser, ou des cameras à haute vitesse. Ainsi, bien que leur prix soit plus important, de plus en plus de chercheurs (dont nous) ont fait appel

à ces outils optiques (donc sans contacts). Pour finir cette bibliographie on peut citer les travaux d'Hadjileontiadis et al [Ha05b], sur l'extraction de défauts sur les déformées modales par mesure de la dimension fractale locale du signal représentant la première déformée, ou par outils statistique tel que le kurtosis (mesure de la concentration d'une distribution) toujours sur la même déformée d'une poutre encastrée en plexiglass [Ha05a].

II.3.3 Limites de la transformée de Fourier

La transformée de Fourier analyse le "contenu fréquentiel" d'un signal. Ses nombreuses propriétés la rendent adaptée à l'étude des opérateurs linéaires stationnaires, notamment la dérivation.

La transformée de Fourier d'un signal $f(t)$ est :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = \mathcal{F}(f)$$

La transformée de Fourier est une représentation globale du signal. Donc elle ne permet pas d'analyser le comportement fréquentiel local, ni la régularité locale. La condition de convergence sur la transformée de Fourier n'indique que le pire ordre de singularité. En pratique, si l'on inverse par exemple l'ordre des données temporelles (le premier devient le dernier etc.), on obtiendra exactement le même spectre. En conséquence, il est devenu indispensable pour certaines applications de représenter simultanément le signal en temps et en fréquence.

II.3.4 Analyse temps-fréquence

L'analyse spectrale classique est basée sur la transformation de Fourier, c'est-à-dire sur une décomposition en ondes monochromatiques éternelles. Cette approche trouve une limitation naturelle dès lors que les signaux analysés sont non stationnaires (fréquences évolutives, transitoires, ruptures, modulations, ...), ce qui est bien souvent le cas dans les applications. Dans de telles situations, une description plus pertinente consiste à représenter un signal à l'aide de deux variables conjointes : le temps et la fréquence.

Sur la Figure II.5, par exemple, la ligne de maxima (inclinée) représente la variation de fréquence au cours du temps.

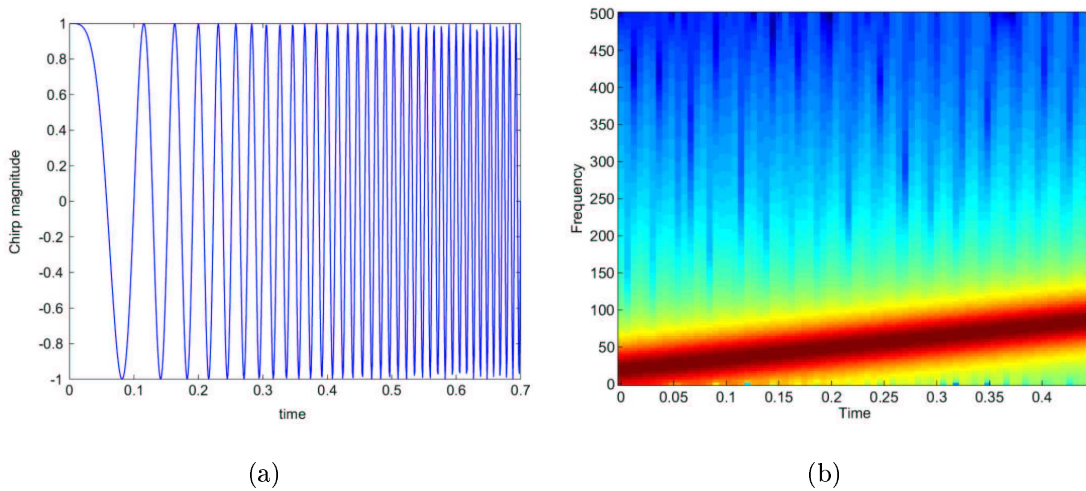


FIG. II.5 : Chirp : signal modulé en fréquences (croissantes) (a) et Représentation temps-fréquence du Chirp (b)

II.3.5 Transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes remplace la sinusoïde de la transformée de Fourier par une famille de translations et dilatations d'une même fonction : l'ondelette. Les paramètres de translation u et de dilatation s sont les deux arguments de la transformée en ondelettes. C'est une représentation temps-échelle que l'on peut assimiler à une représentation temps-fréquence.

La transformée en ondelettes est définie par :

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt$$

où l'atome de base ψ est une fonction de moyenne nulle, centrée au voisinage de 0 et d'énergie finie. La famille de vecteurs est obtenue par translation et dilatation de l'atome de base : $\psi_{(u,s)} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right)$

La fonction précédente est centrée au voisinage de u , comme l'atome de Fourier fenêtré. Si le centre de fréquence de ψ (ondelette élémentaire) est η , le centre de fréquence de la fonction dilatée est en $\frac{\eta}{s}$. L'écart type en temps est proportionnel à s . L'écart type en fréquence est inversement proportionnel à s . La figure II.6 montre une illustration du principe des boîtes d'Heisenberg.

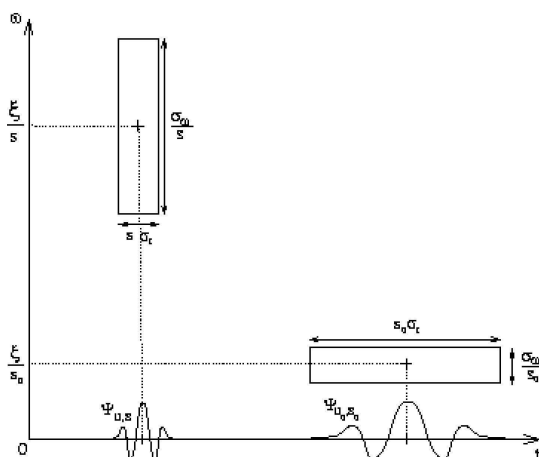


FIG. II.6 : Principe des boîtes de Heisenberg

Aux échelles plus fines, on peut "entasser" plus de boîtes de Heisenberg côte à côte car la résolution temporelle est meilleure. La transformée en ondelettes a donc une résolution temps-fréquence qui dépend de l'échelle s . Le scalogramme d'un signal est défini par

$$P_W f(u, \xi) = |Wf(u, s)|^2 = |Wf(u, \frac{\eta}{\xi})|^2$$

En ce qui concerne la transformée en ondelette continue, une ondelette est une fonction d'énergie finie et de moyenne nulle. Outre sa boîte de Heisenberg, la propriété la plus d'importante d'une ondelette est le nombre de ses moments nuls :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0$$

pour $0 \leq k \leq n$. La nullité des moments d'une ondelette permet d'analyser la régularité locale d'un signal.

Un théorème caractérise les ondelettes à n moments nuls et à décroissance rapide comme les dérivées $n^{ièmes}$ d'une fonction à décroissance rapide [Mal00].

Certaines applications ont de meilleurs résultats avec une ondelette mère qu'avec une autre. Par exemple pour la détection de discontinuités, l'ondelette appelée " chapeau mexicain " a de meilleurs résultats. Voilà pourquoi dans la plupart de nos applications la transformée en ondelettes est calculée avec le chapeau mexicain (mexican hat) qui est en fait une double dérivation d'une gaussienne. Normalisée, son expression est :

$$\psi(t) = \frac{2}{\pi^{1/4} \sqrt{3}\sigma} \left(\frac{t^2}{\sigma^2} - 1 \right) e^{-\frac{t^2}{2}}$$

L'ondelette de Morlet (gaussienne modulée) peut aussi être utilisée. Les deux conviennent parfaitement pour des signaux très amortis. Ce sont des ondelettes complexes (l'information de phase est conservée). On définit l'ondelette de Morlet par : $\psi(t) = e^{j\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}$ de transformée de Fourier $\Psi(\omega) = \sqrt{2} e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2}}$.

L'ondelette fille est : $\psi_{(u,s)} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{j\omega_0 \left(\frac{t-u}{s}\right)} e^{0.5 \left(\frac{t-u}{s}\right)^2}$

La figure II.7 montre que cette ondelette n'a pas de moyenne nulle. Sur la transformée de Fourier de l'ondelette, il y a une composante continue $DC = 10^{-6}$ à $\omega_0 = 5.486$ rad/s ou $f_o \simeq 0.8$ Hz. On utilise couramment une valeur entre 5 et 6.

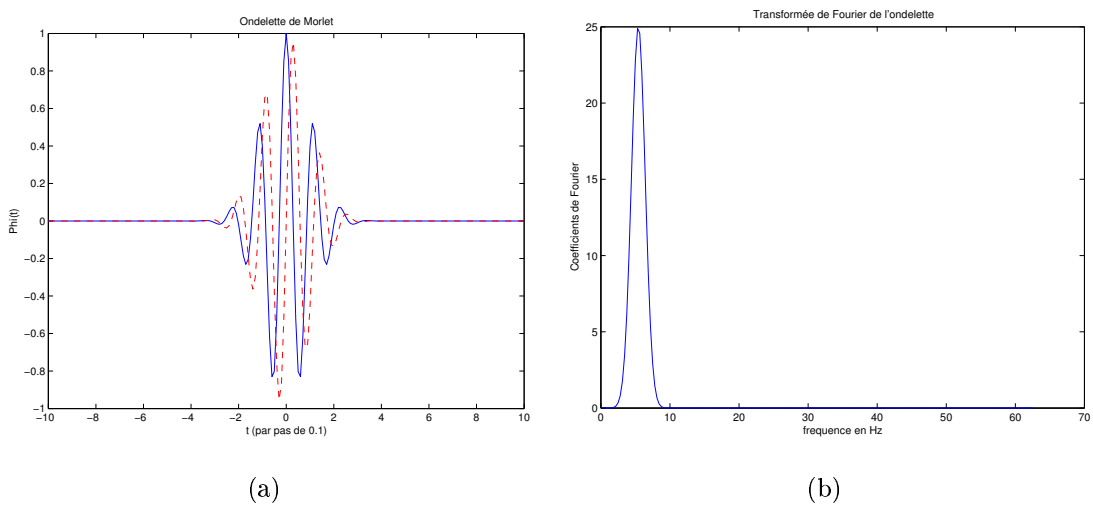


FIG. II.7 : Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Morlet

Cette ondelette est donc admissible (intégrable) pour de très petites valeurs de DC. De plus cette ondelette mère possède des particularités très intéressantes pour l'analyse temps-fréquence puisqu'elle est très bien localisée en temps (entre -4 et 4s) et en fréquence (un pic autour de 0.8Hz). Ainsi pour des signaux physiques présentant des variations très rapides, des sauts, des marches, bref des discontinuités ; l'analyse en ondelettes est adaptée car l'ondelette va détecter ces singularités et analyser celles-ci. On peut donc représenter complètement et efficacement un signal quelconque en peu de coefficients. La relation entre le paramètre d'échelle et la fréquence est donnée par :

$$f_x = \frac{f_0 f_e}{s f_w}$$

Avec s l'échelle, f_x la fréquence d'analyse, f_e la fréquence d'échantillonnage du signal et f_w la fréquence d'échantillonnage de l'ondelette.

II.3.6 Analyse de régularité

L'analyse de Fourier permet de caractériser la régularité globale d'une fonction. La transformée en ondelettes permet d'analyser la régularité ponctuelle d'une fonction. Un signal est régulier si on peut l'approximer localement par un polynôme. On donne ici la définition de la régularité Lipschitzienne : Une fonction f est ponctuellement Lipschitz α en v s'il existe $K > 0$ et un polynôme p_v de degré $m = \alpha$ tel que :

$$\forall t \in \mathfrak{R}, |f(t) - p_v(t)| \leq K|t - v|^\alpha$$

Si f est une fonction un peu plus que n fois différentiable en un point v , on peut l'approximer par un polynôme de degré n . La transformée en ondelettes de ce polynôme est nulle ; autour de v , elle est donc de l'ordre de l'erreur entre le polynôme et la fonction. Si cette erreur peut être estimée uniformément sur un intervalle, on obtient un outil d'étude de la régularité sur l'intervalle. L'exposant de Lipschitz α peut se trouver dans la littérature sous le nom d'exposant d'Hölder H . La figure II.8 montre la transformée en ondelettes

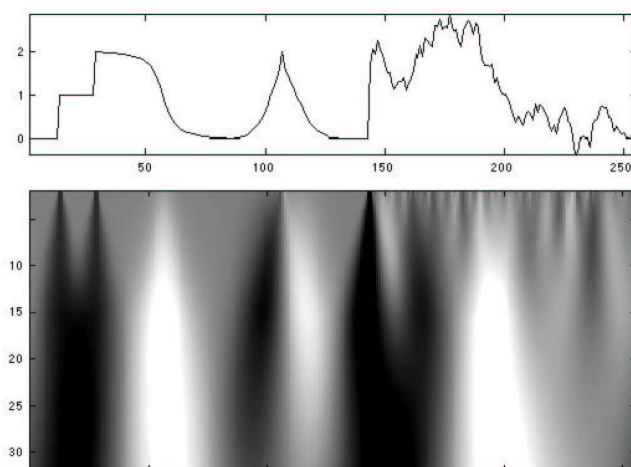


FIG. II.8 : En haut le signal sous étude et en bas le module de sa transformée en ondelettes : l'axe vertical représente l'échelle s et l'axe horizontal est le temps. L'ondelette mère est le chapeau mexicain. Les échelles les plus fines sont en haut. Les coefficients nuls correspondent à du gris moyen. Les parties régulières sont donc en gris moyen. On peut remarquer la trace conique des singularités isolées.

d'un signal qui est régulier par morceaux sur la gauche, et presque partout singulier sur la droite [Mal00].

II.3.7 Détection de singularités

Les maxima du module de la transformée en ondelettes sont liés aux singularités du signal. Le théorème de Hwang et Mallat [MH92] montre qu'il ne peut y avoir de singularité sans maximum local de la transformée en ondelettes dans les échelles fines. La figure II.9 montre les lignes de maxima (en gris clair) : lorsque l'échelle décroît, la transformée en ondelettes tend rapidement vers 0 dans les régions où le signal est régulier. Les singularités isolées sur la gauche, génèrent des cônes de grands coefficients qui convergent vers la singularité.

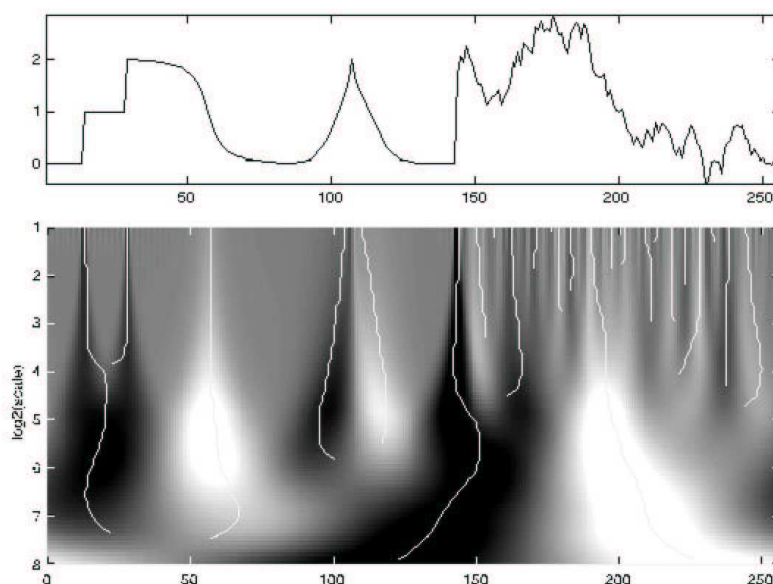


FIG. II.9 : Mise en évidence des lignes de maxima (en gris clair) sur le plan temps-échelle (calculée avec une ondelette en chapeau mexicain). En haut le signal sous étude et en bas le module de sa transformée en ondelettes : l'axe vertical représente l'échelle s et l'axe horizontal est le temps

Comme $\log_2(s)$ est ≥ 0 du fait de la discrétisation, on se limite à $\log_2(s) \geq 1$ sur les ondelettes pour rester dans le cadre de l'approximation continue. Dans le cas où l'ondelette est la dérivée n^{ieme} d'une gaussienne, les courbes de maxima sont connexes et continuent jusqu'aux échelles les plus fines. Le taux de décroissance des maxima le long des courbes indique l'ordre des singularités isolées :

$$\log_2 |Wf(u, s)| \leq \log_2 A + \left(\alpha + \frac{1}{2}\right) \log_2 s$$

Graphiquement, on trace les modules maximaux en fonction de l'échelle dans un diagramme log-log, et la pente donne l'ordre de singularité estimé. Pour $t=14$, la pente vaut $1/2$, et donc la fonction y est Lipschitz 0, c'est-à-dire une discontinuité. En $t=108$, on a à peu près une pente de 1, et donc la fonction y est Lipschitz $1/2$.

Les courbes de la figure II.10 sont représentées pour deux singularités : en trait plein, pour la singularité en $t=14$, et en pointillés pour la singularité en $t=108$. L'exposant de Lipschitz α est la pente des lignes de maxima ($-1/2$).

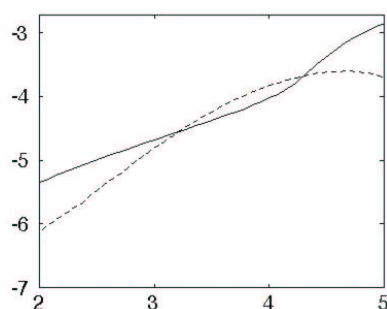


FIG. II.10 : Extraction des lignes de maxima. Les échelles verticales et horizontales représentent respectivement le Log des coefficients d'ondelettes et l'échelle d'observation (les échelles fines sont à gauche.). En trait plein, la ligne de maxima de la singularité en $t=14$, et en pointillés pour la singularité en $t=108$

On appelle Ligne de maxima Toute courbe connexe du plan espace-échelle $(u,3)$ dont tous les points sont des modules maximaux. Les singularités sont détectées en cherchant les abscisses où convergent les modules maximaux d'ondelettes aux fines échelles. Afin de mieux comprendre les propriétés de ces maxima, on écrit la transformée en ondelettes comme un opérateur différentiel multiéchelle. Ainsi si l'ondelette mère est une gaussienne, la transformée en ondelettes peut s'écrire comme la solution d'une équation de la chaleur avec s proportionnel au temps de diffusion. L'application du principe du maximum à l'équation de la chaleur prouve que les maxima ne peuvent disparaître quand s diminue.

L'algorithme utilisé est WTMM (Wavelet Transform Maxima Modulus) qui estime une carte des maxima locaux (si un pixel est maximum, à l'échelle suivante, on cherche lequel de ses 3 voisins est maximum), on repère ainsi les lignes de maxima (ou spectre des singularités) à partir du nombre d'échelles sous étude et d'un seuil.

II.3.8 La dimension fractale

La dimension fractale est un concept mathématique développé dans les années 1970. De façon empirique, on peut assimiler la dimension fractale d'une figure à une mesure de la façon dont elle occupe l'espace. La dimension d'une droite est 1, la dimension d'un carré est 2 et la dimension d'une courbe irrégulière est intermédiaire, par exemple 1,4. Plus la courbe est irrégulière et accidentée, plus elle "couvre" de la surface sur le graphique, plus sa dimension fractale est élevée. Ces objets fractals prennent de l'intérêt lorsque les motifs observés se répètent à toutes les échelles : on dit qu'elles ont la propriété d'auto-similarité, ou invariance d'échelle. Par exemple une ligne de côte est un bon exemple d'un objet fractal présent dans la nature ; chaque baie a ses baies ou caps plus petits et ainsi de suite ad infinitum.

Une définition simple de la dimension fractale (DF ou Fractal Dimension FD) est :

$$\frac{\log(p)}{\log(q)}$$

avec q facteur d'agrandissement, p nombre de fractales obtenues.

Sur la figure II.11, on illustre le cas du flocon (Courbe étudiée par Von Koch en 1904), le segment initial est remplacé par 4 autres de longueur 1/3. La dimension fractale est $\log 4 / \log 3 = 1,26$. Presque tous les objets fractals ont des dimensions non entières.

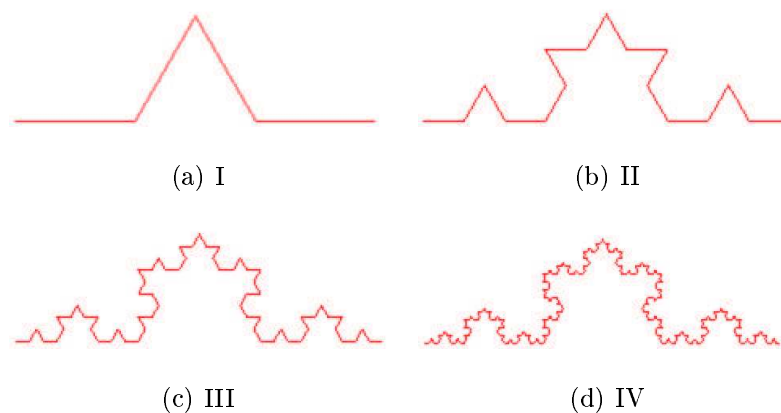


FIG. II.11 : la courbe de Von Koch, de dimension fractale $\log 4 / \log 3$

Longueur segment	Longueur courbe
1/3	4/3
1/9	16/9
...	...
$\frac{1}{3}^n$	$\frac{4}{3}^n$

Tableau II.2, Longueur des segments et de la courbe de Von Koch

La méthode du compas permet d'estimer la dimension fractale. Elle trace les données du tableau II.2 qui sont la longueur des segments $p = \frac{1}{3}^n$ en fonction de la longueur estimée $l = \frac{4}{3}^n$. On obtient la courbe Log-Log de la figure ci dessous. En estimant la droite de regression linéaire de ces points, on obtient une relation entre l et p .

En effet cette droite est :

$$\log(l) = D\log(1/p) + b$$

or

$$e^{\log(l)} = l = e^{D\log(1/p)+b}$$

$$l = e^{\log(1/p)^D} e^b$$

$$l = p^{-D} e^b \sim p^{-D}$$

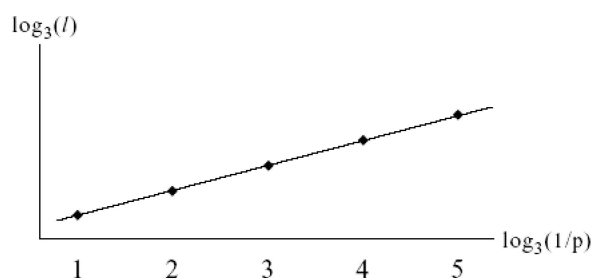


FIG. II.12 : Tracé Log-Log de l en fonction de $1/p$; la pente représente la dimension fractale D

Cette courbe K de Von Koch peut être vue comme tout objet auto-similaire comme une union de copies d'échelles différentes. Dans ce cas précis une union de 4 copies de K , chacune mise à l'échelle $1/3$. On peut généraliser et établir la relation $n = p^{-s}$ où p est le

facteur de réduction, et n le nombre de copies. On a donc :

$$D_S = \frac{\log(n)}{\log(1/p)}$$

Dans le cas de la courbe de Von Koch, on retrouve bien $D_S = \log_3(4) = 1.2619$.

Avec la première méthode on a :

$$\log(l) = D \log(1/p)$$

et par la méthode d'auto similarité on obtient :

$$\log(n) = D_S \log(1/p)$$

La connection entre la longueur et le nombre de pieces est :

$$l = np$$

ou

$$\log(l) = \log(n) + \log(p)$$

D'où

$$D = D_S - 1$$

On retrouve bien les résultats du tracé Log-Log. On peut donc conclure que ces deux dimensions représentent bien la même chose. De plus on peut calculer la dimension auto-similaire d'objets très irréguliers en moyennant les mesures de segments.

Katz [Kat88] propose de mesurer la complexité d'un signal de longueur N en se basant sur la dimension fractale. Il mesure D_K comme une suite de $N' = N - 1$ segments avec :

$$D_K = \frac{\log(N')}{\log(N') + \log(d/L)}$$

On définit de plus l'arc maximal de la courbe d comme :

$$d = \max(\text{dist}(i, j)) = \max(\text{dist}(1, i))$$

Et L la longueur totale de la courbe comme :

$$L = \sum_{i=1}^{N'} \text{dist}(i, i+1)$$

Sevcik [Sev98] décrit un algorithme rapide de calcul de D_K pour les signaux 1D. Son approximation de la formule de Katz évite que le ratio d/L constant entraîne une dimension fractale D_K égale à 1. Il se base sur la Dimension d'Hausdorff D_H .

$$D_H = \lim_{\epsilon \rightarrow +\infty} - \frac{\text{Ln}(N(\epsilon))}{\text{Ln}(\epsilon)}$$

avec $N(\epsilon)$; le nombre minimal de cercle de rayon ϵ nécessaire pour complètement couvrir la courbe (par paquets linéaires).

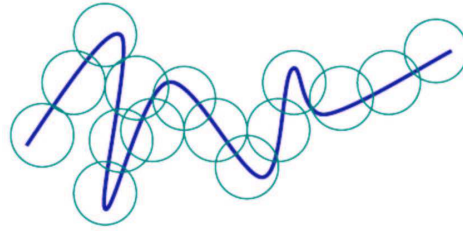


FIG. II.13 : Illustration de l'approche de Sevcik

Dans la plupart des situations il est difficile de calculer D_H . Voilà pourquoi Sevcik propose un approximation :

$$D_H = \lim_{\epsilon \rightarrow +\infty} 1 - \frac{\text{Ln}(L)}{\text{Ln}(\epsilon)}$$

$$D_H \equiv 1 + \frac{\text{Ln}(L)}{\text{Ln}(2N')}$$

où L est divisé en $N(\epsilon) = L/2\epsilon$ segments de longueur 2ϵ .

En détail, une étape de normalisation selon les axes x et y précède un calcul de longueur de l'élément LE_i entre 2 points du signal i et $i+1$:

$$LE_i = \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (1/(N-1))^2}$$

La longueur totale du signal est ensuite calculée :

$$L_j = \sum_{i=j-\text{arrondi}(N/2)}^{j+\text{arrondi}(N/2)} LE_i$$

Ainsi la dimension fractale sur l'intervalle j est définie par :

$$D_j \equiv 1 + \frac{\text{Log}(L_j)}{\text{Log}(2(N-1))}$$

D'une manière similaire à une transformée de Fourier à court terme, on va balayer une fenêtre de taille variable (4 à 8 échantillons) afin d'estimer la dimension fractale locale.

Hadjileontiadis et al [Ha05b] utilisent par exemple cet outil sur une déformée d'une poutre encastree (Figure II.14) pour localiser un défaut unique.

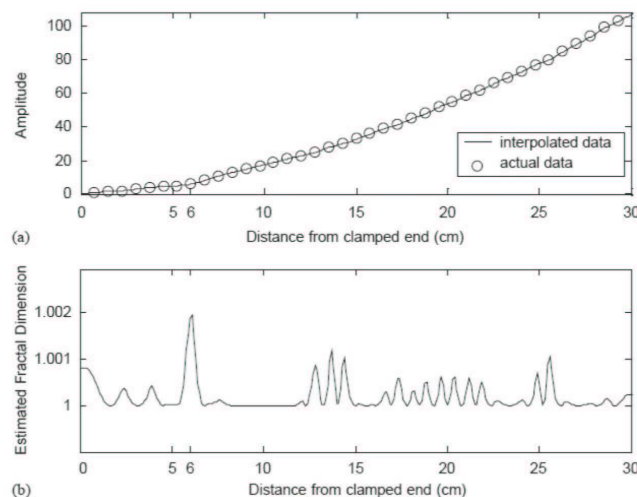


FIG. II.14 : Premier mode de vibration experimental d'une poutre cantilever endommagée (a). Dimension fractale locale pour une fenetre glissante de taille 4 (b) . Le défaut se repere par un maximum local, ici autour de 6 cm. Les autres pics apparaissant sur la figure representent l'effet du bruit de mesure [Ha05b].

II.4 Caractérisation des défauts

Nous étudierons théoriquement les possibilités de quantification qu'offre la transformée en ondelettes continue pour les défauts de rigidité et les capacités des méthodes d'optimisation pour estimer les rigidités de liaisons sur une poutre non parfaite (ie. avec des conditions limites élastiques).

II.4.1 Identification par l'analyse en ondelettes

Le but de ce paragraphe est d'appliquer sur des exemples concrets les formules établies par Mallat pour l'identification des singularités. On préparera aussi le lecteur à la mise en application sur les déformées en mettant en avant les choix pratiques que l'on a fait. On essayera de montrer pourquoi notre analyse se limite aux très petites échelles, quelle est l'influence du type mais aussi de l'importance de la singularité (qui sont très liés dans notre étude) et d'introduire 2 articles [NL01,NL02] qui font le bilan sur cette analyse et

permettent d'introduire la notion de dimension fractale comme mesure de la complexité d'un signal.

Tout d'abord une petite précision sur les effets de bord que l'on obtient lors du calcul d'une CWT. Ils sont dûs au fait que notre calcul est effectué sur un signal de longueur finie. Simonovski et al [SB03] proposent la technique classique de miroir (recopier les débuts et fin de signaux) afin de diminuer cet effet. Nous proposons comme solution le fenêtrage (Hanning ou préférentiellement Tuckey) qui a pour avantage d'annuler ces effets, en ayant que peu d'incidence sur le scalogramme. Un des problèmes qui peut apparaître est de diminuer l'importance du défaut localement, soit par l'atténuation importante aux extrémités du spectre, soit par les passages à zéro du spectre de la fenêtre.

Dans cette section, on se propose d'étudier plus en détail le lien entre l'amplitude des maxima d'ondelettes et la régularité d'un signal. Nous ferons donc varier certains paramètres de la fonction de référence f_1 .

Nous allons nous intéresser à la fonction suivante (Figure II.15(a)) :

$$f_1(t) = |t - 0.3|^{0.1} + |t - 0.8|^{0.7} \quad (\text{II.18})$$

En calculant la transformée en ondelettes continue, avec comme paramètres : échelle max 32, ondelette mère (chapeau mexicain) avec 2 moments nuls (condition d'admissibilité), on obtient le scalogramme suivant (Figure II.15(b)) :

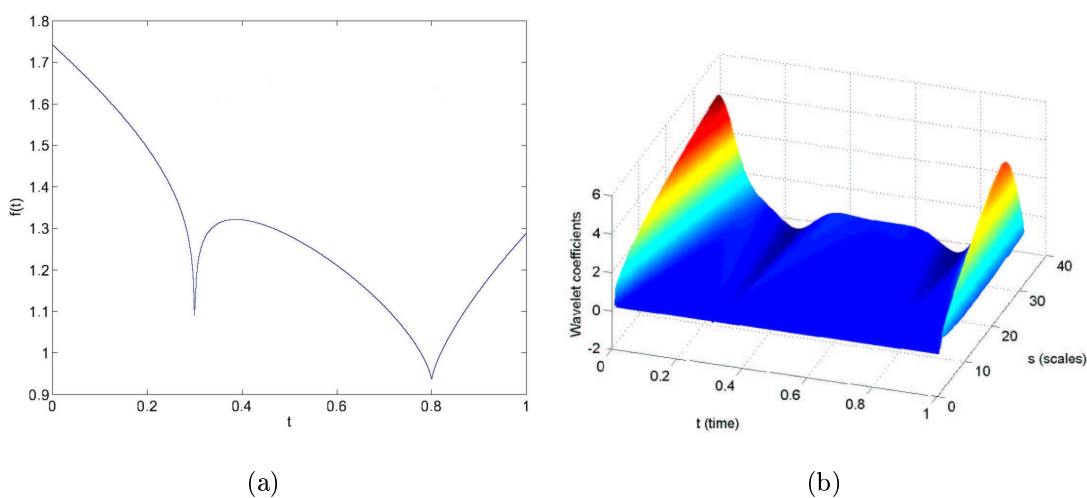


FIG. II.15 : Signal théorique f_1 (a) et son scalogramme (b)

On peut ensuite créer une matrice (ou image) des maxima locaux de la carte temps-échelle en utilisant l'algorithme WTMM de Mallat (Figure ??).

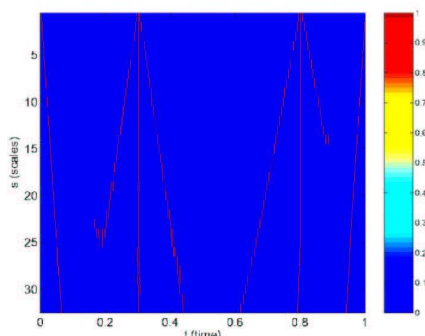


FIG. II.16 : ligne de maxima du scalogramme

Enfin on peut tracer les maxima de coefficient d'ondelettes (en \log_2) de la ligne autour du défaut en fonction de l'échelle ($\log_2(s)$) pour estimer l'exposant de Lipschitz par la pente de cette droite (Figure II.17).

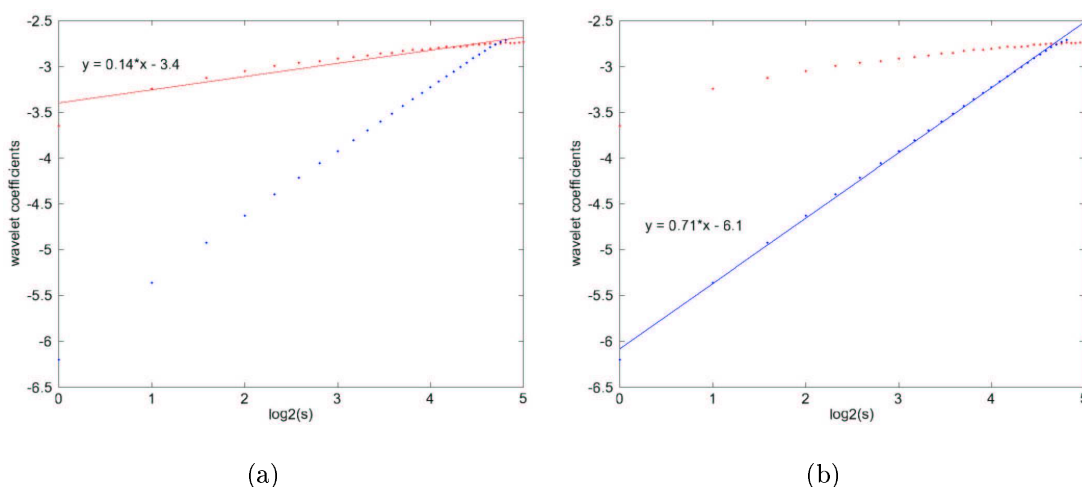


FIG. II.17 : Estimation pratique de l'exposant de Lipschitz des deux singularités 0.1 (a) et 0.7 (b)

Ici, on estime les droites par : $y = 0.14x - 3.4$ et $y = 0.71x - 6.1$. C'est à dire que l'exposant est plus fiable pour les valeurs importantes de Lipschitz (petite singularité) avec pour la première 0.14 pour 0.1 et pour la seconde 0.71 pour 0.7.

Maintenant, on peut se demander quelle est l'influence du paramètre C ($C|x - L_D|^\alpha$ dans la description théorique d'une singularité) dans l'estimation de la singularité.

Étudions donc le signal suivant (Figure II.18) :

$$f_2(t) = 0.5|t - 0.3|^{0.1} + |t - 0.8|^{0.7} \quad (\text{II.19})$$

L'amplitude de la singularité est ici divisée par 2 pour la première singularité (et pas le type!).

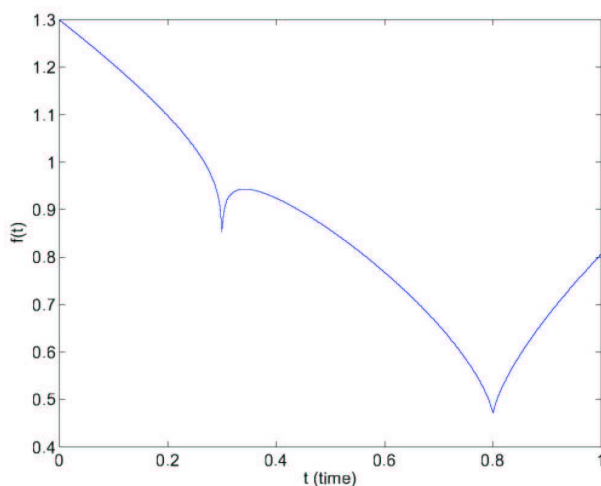


FIG. II.18 : signal théorique $f_2(t)$

En analysant la courbe log-log on estime les exposants de Lipschitz (Figure II.19).

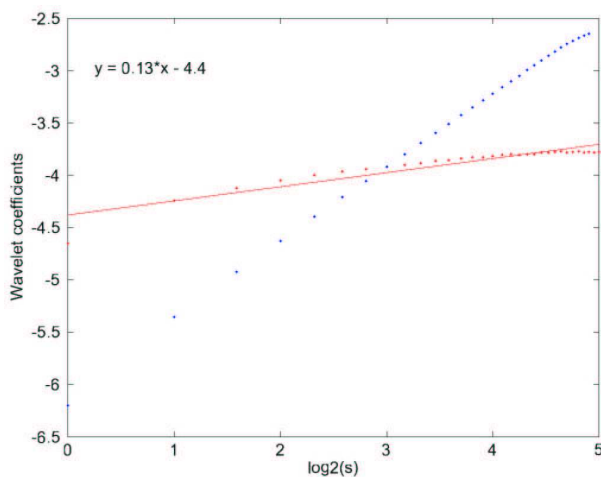


FIG. II.19 : Estimation de la première singularité

On voit clairement que rien n'a changé pour le premier défaut, en revanche le second a le même exposant (0.13 pour 0.14) mais l'ordonnée à l'origine a changé (-4.4 pour -3.4). Ainsi l'amplitude de la singularité gouverne l'ordonnée à l'origine dans l'estimation pratique de Lipschitz.

Étudions maintenant, l'influence de deux singularités très proches. Le signal sous étude est (Figure II.20) :

$$f_3(t) = 0.5|t - 0.7|^{0.7} + 0.5|t - 0.8|^{0.7} \quad (\text{II.20})$$

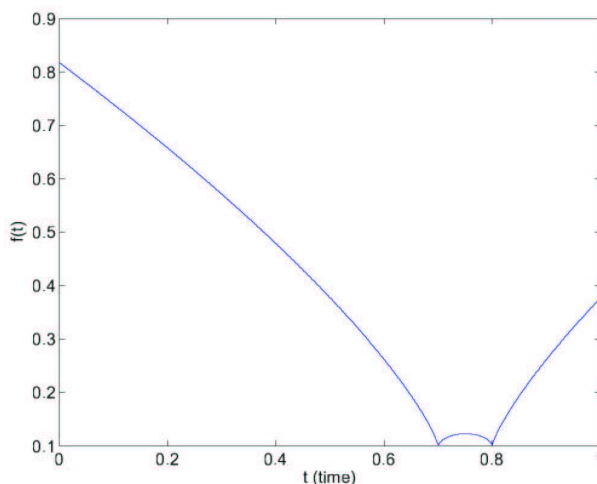


FIG. II.20 : signal théorique $f_3(t)$ avec deux singularités très proches

Sa représentation temps-échelle (Figure II.21(a)) sur une échelle max de 128 ne permet pas d'estimer la singularité, les défauts étant petits il faut zoomer autour des très petites échelles (grandes fréquences).

En étudiant la courbe log-log de l'estimation de Lipschitz (Figure II.21(b)), on voit clairement deux comportements : un aux petites échelles où les deux défauts ont une pente classique et un aux plus grandes échelles où les deux singularités locales se rejoignent dans le cône d'influence de la singularité. Ainsi l'exposant devient négatif et ne reflète plus du tout la singularité. Par contre cet exemple démontre empiriquement que notre choix d'étude aux très petites échelles rend l'estimation de Lipschitz (et donc aussi de l'ordonnée à l'origine) plus consistante.

Enfin, pour conclure, on va essayer de montrer l'influence de la courbure générale du signal sur l'étude des singularités. Prenons un nouveau signal théorique (Figure II.22(a)) qui simule une déformée simple (premier mode) d'une poutre par l'ajout d'un terme sinus :

$$f_4(t) = 3\sin(3t) + 0.5|t - 0.7|^{0.1} + 0.5|t - 0.8|^{0.7} \quad (\text{II.21})$$

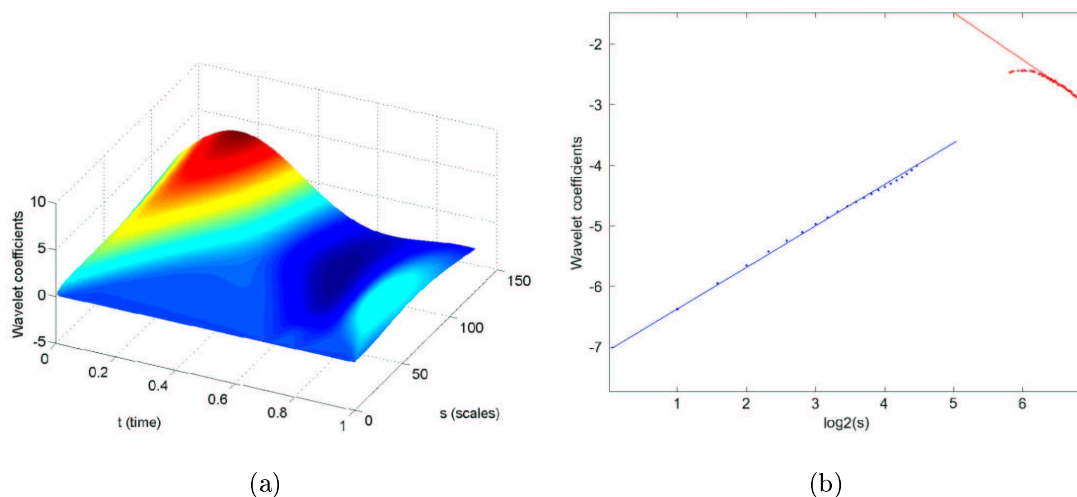


FIG. II.21 : Scalogramme des deux singularités (a) et comportement biaisé de l'estimation aux grandes échelles (b)

Son scalogramme met en évidence (hors effets de bord) les deux singularités (Figure II.22(b)).

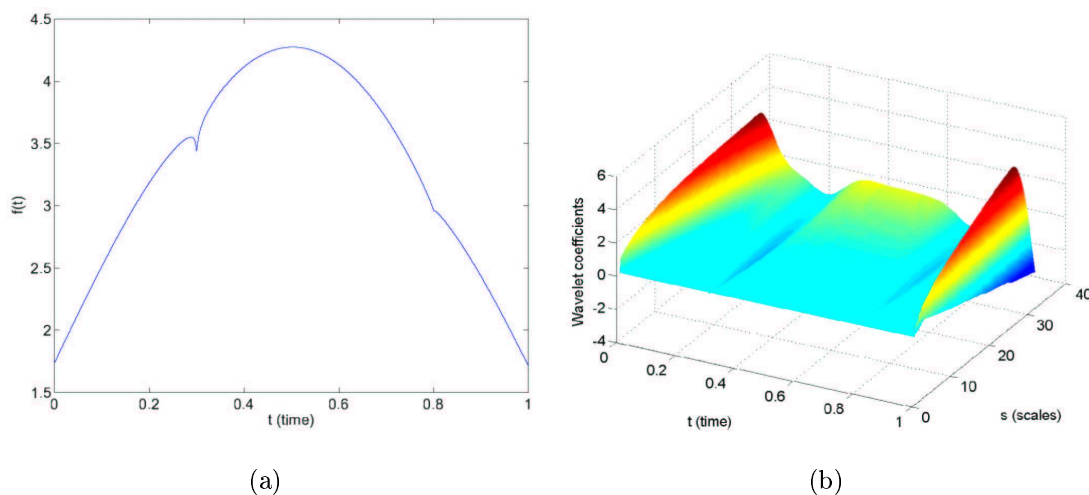


FIG. II.22 : signal théorique $f_4(t)$ avec une tendance sinus (a) et son scalogramme (b)

On va maintenant étudier la courbe log-log d'estimation des indicateurs de singularités : Lipschitz α et l'ordonnée à l'origine A .

La figure II.23 montre que l'estimation des paramètres n'est valable qu'aux petites échelles ($s < 10$) et de plus que l'estimation des deux indicateurs change légèrement selon la courbure.

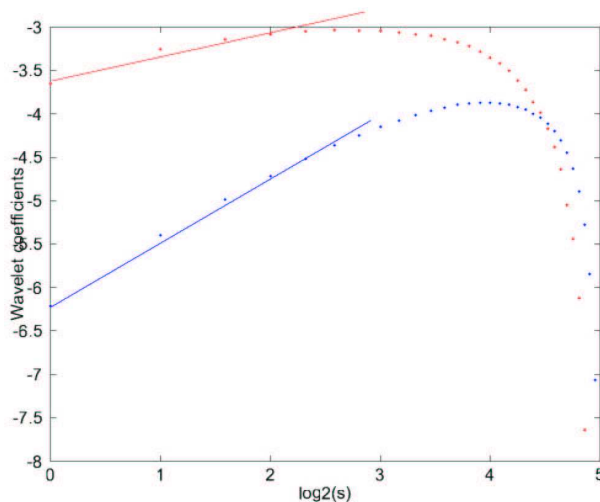


FIG. II.23 : l'estimation des indicateurs d'importance de singularité n'est valable que sur des petites échelles

Ainsi pour la première singularité l'équation lissée pour une échelle max de 8 est : $y = 0.19x - 3.5$ et pour la seconde : $y = 0.68x - 6.1$. L'intérêt de connaître la fonction tendance est de pouvoir bien estimer les singularités comme dans notre premier exemple.

Cette partie pratique nous a montré que la valeur de l'exposant de Lipschitz α ou le facteur d'intensité A (ordonnée à l'origine) dépendent de la position de la singularité dans le signal et donc, dans notre application, la position du défaut dans la poutre. Le chapitre suivant sera un début de réponse aux questions : *Comment prédire l'importance du défaut sur des exemples expérimentaux et, comment généraliser la valeur de nos indicateurs, tenant compte de toutes les limitations explicitées dans l'analyse mathématique ?*

II.4.1.1 Généraliser en utilisant les réseaux de neurones

Le terme généraliser convient bien à notre problème. Une des solutions les plus intéressantes est d'utiliser les réseaux de neurones. Ils mettent en avant la notion d'apprentissage, comme en lecture pour les enfants. C'est une procédure cognitive qui doit faire en sorte que l'individu réalise, de manière autonome, une tâche donnée. On parle alors de capacité de généralisation (à partir d'exemples) des réseaux de neurones.

Le réseau de neurones (RN) est un réseau d'automates finis partiellement ou totalement connectés entre eux, en interaction totale ou globale. Il existe deux classes de RN, l'apprentissage supervisé et non supervisé. La première méthode utilise directement les connaissances d'un expert et essaie de reproduire ses connaissances, la seconde essaie de dériver des généralisations à partir de données, et de segmenter l'espace des données. On peut définir de deux manières le réseau de neurones. Une définition très générale : processeur qui applique une opération simple à ses entrées et que l'on peut relier à d'autres pour former un réseau qui peut réaliser une relation entrée-sortie quelconque. Et une définition usuelle : processeur très simple qui calcule une somme pondérée et qui applique à cette somme une fonction de transfert non linéaire (échelon, sigmoïde, gaussienne, ...).

La puissance de calcul actuelle des ordinateurs permet maintenant une résolution empirique de problèmes réels. Un des principaux résultats mathématiques est que les RN sont des approximateurs universels parcimonieux. Ils sont donc capables de faire l'apprentissage de n'importe quelle relation entrée-sortie (linéaire ou non linéaire) [Da02].

Comme nous sommes face à un problème typique de reconnaissance de forme (pattern recognition), nous avons choisi d'utiliser un réseau non bouclé. En général on utilise un réseau avec neurones sommateurs à sigmoïde (Multi-Layer Perceptron, MLP) comme sur la figure II.24. En effet, on veut reconnaître (prédire) la sévérité du défaut à partir de l'apprentissage des caractéristiques issues d'une analyse du premier mode, d'un large spectre de poutres endommagées, afin de pouvoir approximer n'importe quel type de défaut.

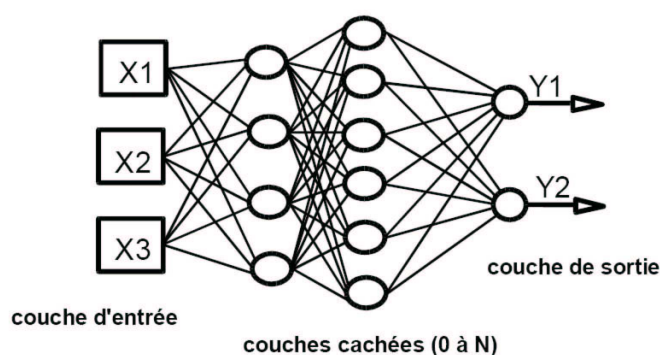


FIG. II.24 : Perceptron multi-couches capable d'établir n'importe quelle relation entrée-sortie (linéaire ou non)

II.4.1.2 Premiers résultats de simulation

Une première expérience sur une poutre test de section carrée (encastée-encastée) modélisée par éléments finis (80 éléments) permet de montrer que la valeur réelle du défaut est pondérée en fonction de sa localisation. On voit sur la figure II.25 que l'exposant de Lipschitz α (estimé pour quatre variations d'inertie) évolue d'une manière similaire en fonction de la localisation du défaut (petite variation selon son importance). Sa valeur est dépendante de sa localisation et de son importance. Par exemple un défaut identifié, pour une variation d'inertie de 0.3 (en bleu clair), a une valeur d'exposant de 1.572 à une location 0.4 et une valeur d'exposant de 1.564 à une location 0.5.

On aimerait, au final, retrouver automatiquement la quantification réelle du défaut quelque soit sa position.

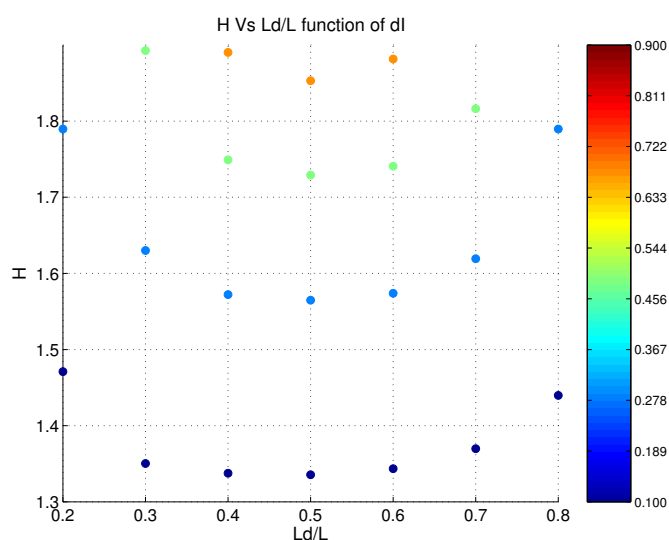


FIG. II.25 : Comportement de l'exposant de Lipschitz : en abscisses la localisation du défaut, en ordonnée la valeur de l'exposant de Lipschitz H , la barre de couleur représente l'importance du défaut (variation d'inertie dI). On remarque que le comportement de l'indicateur est symétrique par rapport au milieu de la poutre encastée-encastée de 80 éléments

Comment mettre en oeuvre cette quantification automatique ? [Da02]

Les réseaux de neurones (RN) peuvent approcher toute fonction de régression si l'on trouve un RN qui rend minimum la fonction de coût des moindres carrées (somme des carrés des différences entre les valeurs calculées par le RN et les valeurs mesurées).

La mise en oeuvre nécessite donc :

- de déterminer les entrées pertinentes, c'est à dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser,
- de collecter les données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du RN,
- de trouver le nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une approximation suffisante,
- d'estimer les valeurs des paramètres correspondant à un minimum de la fonction de coût, c'est à dire d'effectuer l'apprentissage,
- d'évaluer les performances du RN à l'issue de l'apprentissage.

En fonction des résultats obtenus, il peut être nécessaire d'effectuer plusieurs itérations de tout ou partie de cette procédure.

Nous verrons donc dans le prochain chapitre avec quels descripteurs et paramètres du MLP on a mis en oeuvre notre outil de quantification.

II.4.1.3 Les limitations

Nugraha et al [NL01,NL02] mesurent une image de la dimension fractale (complexité) du signal en estimant l'exposant de Lipschitz. Ils montrent sur un exemple simple que cette procédure n'est fiable que pour des valeurs de singularité supérieures à 0.4 (pour une ondelette à un moment d'évanescence). On voit ici que les ondelettes et la dimension fractale sont liées par leur aspect multi-échelle. Nous allons tenter dans le prochain paragraphe de montrer que la dimension fractale peut aussi permettre de détecter les singularités d'un signal. De plus, un hyperarticle en ligne nous a permis de montrer pour plusieurs applications, que détecter des singularités revient à étudier l'homogénéité du signal [Mor05].

De plus l'identification de l'importance du défaut par réseau de neurones ne peut se faire qu'avec un seul indicateur de sévérité (Lipschitz) pour des raisons aussi simples que la symétrie sur des poutres supportée-supportée. Ainsi il est nécessaire d'ajouter plusieurs indicateurs complémentaires que l'on présentera dans le prochain chapitre.

II.4.2 Caractériser les conditions limites

Maintenant que l'on a modélisé le défaut structural, on va présenter les méthodes de caractérisation de conditions limites à partir des données modales. La caractérisation de la qualité de l'assemblages peut se faire sur toutes les poutres de la structure en considérant chaque poutre comme étant une poutre flexible indépendante vibrant aux fréquences de résonance de la structure. Ainsi on peut décomposer chaque élément de la structure en poutre flexible et donc étudier élément par élément les conditions limites.

II.4.2.1 Principes d'identification des conditions limites

Un article pourrait permettre de faire le lien entre l'identification des défauts et l'identification des conditions limites : Pail et al [Pa04, Pa04]. Les auteurs présentent d'abord le vibromètre laser comme la meilleure solution pour acquérir les déformées opérationnelles. Ils traitent le problème de l'identification de défaut comme l'analyse d'une poutre imparfaite (ie avec défaut(s) ou des conditions limites imparfaites). Ils utilisent une technique de lissage de courbe à fenêtre glissante (entre déformée analytique et expérimentale ou simulée) pour identifier les solutions limites et les solutions centrales. Les solutions limites permettent de localiser les défauts et les solutions centrales identifient les conditions limites. Leur méthode est validée sur une poutre encastree en aluminium avec 4 défauts. Les premiers travaux d'identification des conditions limites à partir des mesures de l'analyse modale sont issues de recherche sur la mise à jour d'un modèle éléments finis [MF93], ou sur l'identification des paramètres de limites dans l'équation caractéristique d'une poutre homogène en vibration [PH95]. Ils mettent aussi en avant le fait que les conditions limites (ou assemblages dans les structures complexes) peuvent être viscoélastiques (avec amortissement). Mac Guire [McG95] a introduit le caractère imparfait d'une liaison comme un état semi-rigide à partir d'une étude éléments finis où la variation des paramètres de rigidité de liaison entraîne une variation des fréquences de résonances. De même, Olgac et al [OJ98] développent un modèle de poutre imparfaitement encastree-encastree (dite flexible avec raideurs paramétrables) et proposent une méthode pour identifier les différents paramètres d'une poutre flexible à partir des 4 premières fréquences de résonance. Plus récemment Li et al [Li02] démontrent la possibilité d'identifier les rigidités de liaison (linéaires ou de rotation) à partir de la mise à jour d'un modèle éléments finis où les

matrices de masse et de rigidité sont déterminées par identification inverse (à partir des fréquences de résonance de la structure). Yun et al [Ya01] proposent une méthode d'estimation du degré d'endommagement d'un assemblage poutre-colonne à partir des mesures modales et en utilisant les capacités de généralisation d'un réseau de neurones. Ils modélisent le comportement de l'assemblage comme une connection semi-rigide et définit le facteur de qualité de l'assemblage (entre 0 et 1) en utilisant des rigidités de rotation aux extrémités des poutres composant la structure. A partir des données issues de l'analyse modale (fréquences et déformées) de la structure simulée, le réseau de neurones réussit à identifier la sévérité du défaut d'assemblage sur un portique éléments finis simple, puis expérimentalement sur un portique à 2 étages. Ahmadian et al [Aa01] définissent une matrice de rigidité aux limites qui permet de mettre à jour un modèle éléments finis avec les données du test modal même sur des données très bruitées. D'autres se basent sur les fonctions de réponse en fréquences (FRFs) pour identifier les paramètres de liaisons [Ya03]. Enfin Todd et al [Ta04] définissent un comportement non linéaire de l'encastrement en fonction des rigidités. Il surveillent ainsi la dégradation d'une poutre à assemblage boulonné à partir des données modales (Figure II.26).

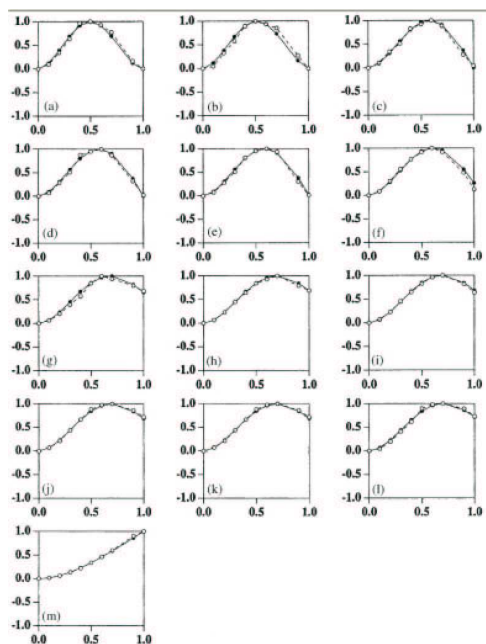


FIG. II.26 : Premier mode de vibration d'une poutre avec l'encastrement droit variable (de l'infini à 0) selon [Ta04]

II.4.2.2 Solution générale pour identifier les conditions limites

Une des principales hypothèses de l'analyse de structure classique est que les liaisons ou assemblages (joint) sont parfaitement rigides ou parfaitement souples. Cependant dans les structures réelles, ces connections ne se comportent pas de manière parfaite mais plutôt un spectre large de connections allant de supportée (charnière), semi-rigide (ou flexible) et rigide comme le montre la Figure II.27.

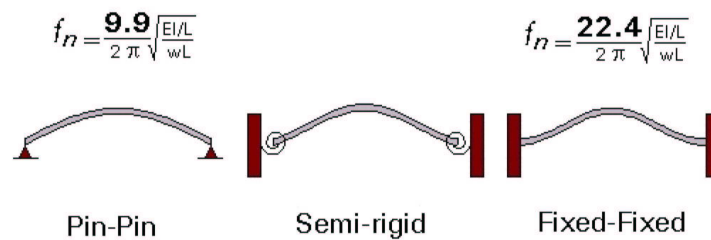


FIG. II.27 : Caractérisation analytique du premier mode de vibration en fonction des conditions limites

On peut ainsi modéliser une liaison semi-rigide par une raideur (ressort) de rotation, caractérisée par une droite moment versus angle de rotation, où la valeur k de la raideur est égale à la pente de cette courbe (Figure II.28).

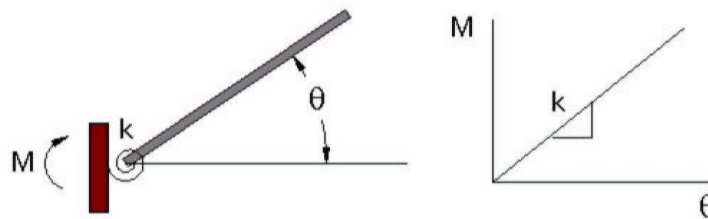


FIG. II.28 : La relation moment-angle θ pour un ressort de rotation

L'amplitude de cette valeur k ne détermine pas le comportement de la liaison. C'est plutôt le ratio de la rigidité du ressort à celle de la rigidité de flexion de la poutre $\frac{k}{EI/L}$. On appelle communément ce ratio la rigidité de liaison (joint stiffness en anglais).

La figure II.29 permet de visualiser ce phénomène; par exemple si la poutre est un spaghetti la liaison se comportera comme encastree alors que si la poutre est une poutre structurale en bois la connexion sera juste charniere (la raideur k est constante dans les 2 cas).

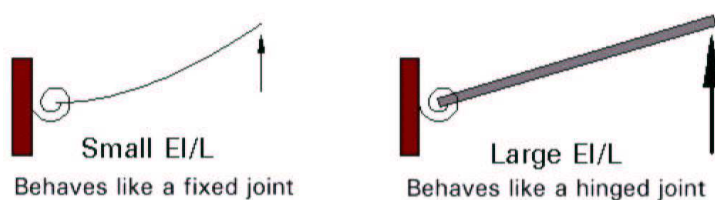


FIG. II.29 : Même ressort de liaison, 2 comportements ...

Ainsi Mac Guire [McG95] répond à la question "quelle valeur spécifique de ce ratio va donner un comportement charnière, semi-rigide ou rigide?". Sur un exemple éléments finis d'une poutre avec des raideurs de rotation paramétrables, il effectue plusieurs analyses aux valeurs propres pour montrer le comportement de la fréquence de résonance de la poutre en fonction de la valeur de k .

On voit sur la figure II.30 que quand k est petit, on se rapproche d'une poutre supportée-supportée et quand k est très grand, la poutre se comporte comme doublement encastree. En outre, on voit une zone très discernable où la liaison est entre ces deux conditions limites classiques : c'est la zone semi-rigide. Il vérifie cette hypothèse sur 2 autres poutres dont la masse a changé (ou la rigidité de flexion) afin d'avoir une relation adimensionnelle (figure II.30).

Il est facile de voir avec cette illustration que les 3 poutres ont exactement le même comportement. Ainsi la poutre est : doublement supportée si la rigidité de liaison (α) est inférieure à 1 (f inférieur à 0.1), doublement encastree si α est supérieur à 100 (f supérieur à 0.9). On proposera une analyse de cette liaison comme application au chapitre 3.

Maintenant que la modélisation nous a aidé à comprendre ce phénomène on va essayer de l'expliquer par la théorie d'Olgac sur les poutres flexibles [OJ98].

Cette étude va commencer par l'analyse dynamique d'une poutre doublement encastree, qui utilise les conditions limites classiques.

On peut tout d'abord réécrire la formulation des déformées II.6 sous la forme :

$$\begin{aligned}
 Y_i(x) = & D_1(\cos(\lambda_i x) + \cosh(\lambda_i x)) + D_2(\cos(\lambda_i x) - \cosh(\lambda_i x)) \\
 & + D_3(\sin(\lambda_i x) + \sinh(\lambda_i x)) + D_4(\sin(\lambda_i x) - \sinh(\lambda_i x)) \quad (\text{II.22})
 \end{aligned}$$

Les combinaisons de D_i peuvent représenter toutes les conditions limites classiques.

Pour une poutre doublement encastree (les raideurs linéaires et de rotation sont infi-

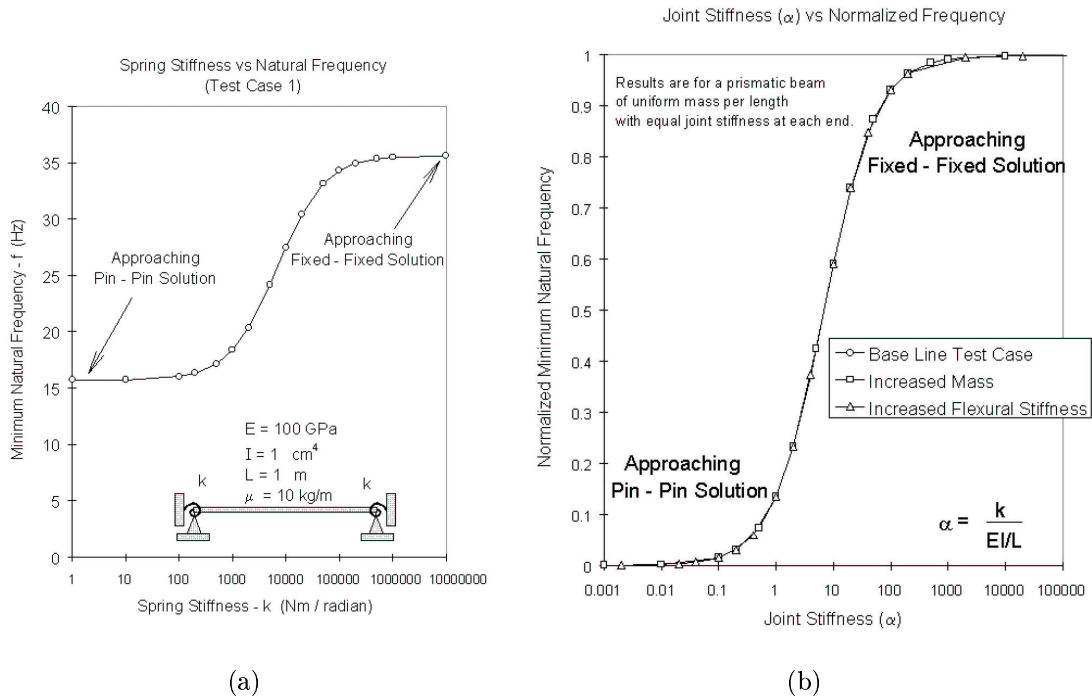


FIG. II.30 : Fréquence de résonance f en fonction de la valeur du ressort de rotation k (a) et comportement de la rigidité de liaison en fonction de la fréquence normalisée (b)

nies), les conditions limites s'écrivent :

$$\begin{cases} x = 0 & x = L \\ Y(x) = 0 & Y(x) = 0 \\ Y'(x) = 0 & Y'(x) = 0 \end{cases}$$

En utilisant ces conditions limites pour l'équation II.22, on obtient :

$$Y_i(x) = H_i(\cos(\lambda_i x) - \cosh(\lambda_i x) + R_i(\sin(\lambda_i x) - \sinh(\lambda_i x)))$$

avec H_i déterminé par la normalisation de l'amplitude de chaque mode et R_i donné par :

$$R_i = -\frac{(\cos(\lambda_i x) - \cosh(\lambda_i x))}{(\sin(\lambda_i x) - \sinh(\lambda_i x))}$$

où $\lambda_i \approx \frac{(2i+1)\pi}{2L}$, avec $i=1,2,\dots,n$

On peut noter que deux des constantes d'intégration de l'équation II.22 sont nulles (D_1 et D_3).

Pour prendre en compte les imperfections d'encastrement dans la modélisation, on peut étudier la poutre flexible avec des conditions limites élastiques (figure II.31).

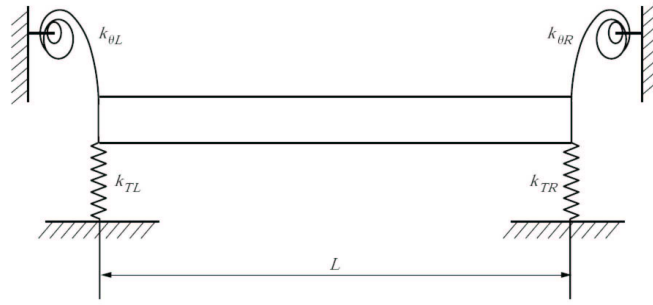


FIG. II.31 : poutre avec des conditions limites élastiques

Comme décrit dans la figure, k_{TR} et $k_{\theta R}$, k_{TL} et $k_{\theta L}$ sont les raideurs linéaires (transverses) et de rotation respectivement à gauche et à droite de la poutre. Quand ces ressorts sont constants et paramétrés comme une combinaison de zéro et d'infini, il en résulte les conditions initiales idéales (ou classiques).

Pour des raisons de simplification symbolique, on définit les rigidités adimensionnelles :

$$\beta_1 = \frac{k_{\theta L}L}{EI}, \beta_2 = \frac{k_{TL}L^3}{EI}, \beta_3 = \frac{k_{\theta R}L}{EI}, \beta_4 = \frac{k_{TR}L^3}{EI} \quad (\text{II.23})$$

Les équations de la dynamique exprimant les conditions limites générales s'écrivent donc :

$$\left\{ \begin{array}{ll} x = 0 & x = L \\ Y''(x) - \frac{\beta_1}{L}Y'(x) = 0 & Y''(x) + \frac{\beta_3}{L}Y'(x) = 0 \\ Y'''(x) + \frac{\beta_2}{L^3}Y(x) = 0 & Y'''(x) - \frac{\beta_4}{L^3}Y(x) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

En insérant l'équation II.22 dans ces conditions limites, on obtient un système de 4 équations homogènes pour la matrice $D [D_1, D_2, D_3, D_4]$ donné par $A.D = 0$ avec A :

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & \frac{\beta_1}{\lambda L} & 0 \\ \frac{\beta_2}{(\lambda L)^3} & 0 & 0 & -1 \\ -C + Ch - \frac{\beta_3}{\lambda L}(S - Sh) & -C - Ch - \frac{\beta_3}{\lambda L}(C + Ch) & -S + Sh - \frac{\beta_3}{\lambda L}(C + Ch) & -S - Sh - \frac{\beta_3}{\lambda L}(C - Ch) \\ S + Sh - \frac{\beta_4}{(\lambda L)^3}(C + Ch) & S - Sh - \frac{\beta_4}{(\lambda L)^3}(C - Ch) & -C + Ch - \frac{\beta_4}{(\lambda L)^3}(S + Sh) & -C - Ch - \frac{\beta_4}{(\lambda L)^3}(S + Sh) \end{bmatrix}$$

où λL est la fréquence adimensionnelle et $C = \cos(\lambda L)$, $Ch = \cosh(\lambda L)$, $S = \sin(\lambda L)$, $Sh = \sinh(\lambda L)$.

On obtient l'équation caractéristique en posant $\det(A) = 0$; celle-ci étant très compliquée, on la réécrit comme ceci :

$$\begin{aligned} & \tilde{a}\beta_1\beta_2\beta_3\beta_4 + \tilde{b}\beta_1\beta_3(\beta_2 + \beta_4) + \tilde{c}\beta_2\beta_4(\beta_1 + \beta_3) + \tilde{d}(\beta_1\beta_2 + \beta_3\beta_4) \\ & + \tilde{e}(\beta_1\beta_4 + \beta_2\beta_3) + \tilde{f}(\beta_1\beta_3) + \tilde{g}(\beta_2\beta_4) + \tilde{h}(\beta_1 + \beta_3) + \tilde{k}(\beta_2 + \beta_4) + \tilde{l} = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

où \tilde{a}, \dots sont des fonctions trigonométriques de la fréquence adimensionnelle données ci dessous :

$$\begin{aligned} \tilde{a} &= 1 - CCh & \tilde{b} &= (\lambda L)^3(SCh + CSh) \\ \tilde{c} &= \lambda L(SCh - CSh) & \tilde{d} &= (\lambda L)^4(1 + CCh) \\ \tilde{e} &= 2(\lambda L)^4CCh & \tilde{f} &= -2(\lambda L)^6SSh \\ \tilde{g} &= 2(\lambda L)^2SSh & \tilde{h} &= -(\lambda L)^7(SCh + CSh) \\ \tilde{k} &= (\lambda L)^5(CSh - SCh) & \tilde{l} &= (\lambda L)^8(1 - CCh) \end{aligned}$$

L'équation II.25 représente une forme générale de l'équation caractéristique pour une poutre d'Euler-Bernoulli. Comme nous l'avons déjà dit, une combinaison des β_i de valeur zéro ou infini correspond à des conditions limites classiques. Par exemple, reprenons la poutre doublement encastree : les β_i sont ici infini et l'équation II.25 est réduite à :

$$\tilde{a} = 1 - CCh = 0 \quad (\text{II.26})$$

Cette équation est celle classiquement utilisée pour l'équation caractéristique d'une poutre encastree-encastree.

Olgac et al [OJ98] proposent une solution pour identifier les conditions limites à savoir estimer les coefficients β_i à partir des fréquences modales. Cette analyse inverse impose en fait les 4 premières fréquences dans l'équation caractéristique générale, ce qui induit un système d'équations non linéaires de variable β_i . On peut poser le problème par :

$$f(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = 0 \quad (\text{II.27})$$

On ne peut prouver l'existence de solutions positives pour résoudre ce système. Une application de cette formule au problème de Mcguire [McG95] sera proposée dans le chapitre 3.

II.5 Conclusions

On a ici montré l'intérêt de la modélisation par éléments finis pour mieux comprendre le comportement d'une poutre endommagée et pour obtenir des signaux (déformées) de synthèse. On a dans un premier temps présenté une équivalence mathématique de la localisation de défaut sur une déformée comme l'identification de singularités sur des signaux 1D. Des principes mathématiques innovants (transformée en ondelettes et analyse de singularité, dimension fractale et complexité locale) sont ainsi expliqués en détail toujours dans un but d'application à notre problème. On a aussi montré l'intérêt d'un lissage non linéaire pour estimer l'état non endommagé. Notre méthode utilise cet outil comme une valeur ajoutée, pour distinguer le défaut du bruit ainsi que pour extraire des informations pertinentes sur les conditions limites. Ce lissage sous entend bien sur que le matériau d'origine est homogène et sans défaut. Dans l'étude d'un suivi d'une structure, on pourrait utiliser la déformée de l'état à l'instant t comme référence pour l'état à $t+1$.

D'autres outils performants de traitement du signal existent : On peut citer l'EMD (Empirical Mode Decomposition, ou Décomposition Modale Empirique) qui décompose tout signal en une somme d'un nombre fini de composantes, de type AM-FM, appelées modes. L'EMD est entièrement pilotée par les données et, contrairement à la transformée de Fourier ou aux ondelettes, cette décomposition ne repose sur aucune famille de fonctions (ondelette mère,...) définie a priori. L'EMD peut être vue comme l'équivalent de l'analyse en composantes principales mais dédiée aux signaux non linéaires.

Notre troisième partie présentera donc notre procédure de diagnostic sur une structure expérimentale de type portique. Les illustrations sont issues de notre logiciel de modélisation et d'analyse développé sous Matlab. De plus, on comparera lors d'un benchmark numérique les meilleures méthodes de localisation basées sur l'analyse en ondelettes, la dimension fractale ou la courbure de la déformée. Car si la qualité de la déformée dépend du bruit de mesure et de l'échantillonnage des données, la détection de défaut dépend entièrement de la localisation et de l'importance du défaut, et ce pour toutes les configurations limites possibles. En effet, il est plus facile de détecter un défaut important près de l'encastrement qu'un petit défaut près de l'extrémité libre d'une poutre. Notre méthode d'identification de défaut tient donc compte de ce problème en essayant de généraliser pour tous les cas possibles.

Chapitre III

Proposition d'une méthode et validation

III.1 Présentation

Ce chapitre a pour but de présenter notre méthode de diagnostic d'un élément de structure (poutre) en détails. Il respecte notre chronologie de travail dans le sens où nous avons d'abord utilisé des outils de simulation pour tester la démarche avant d'appliquer celle-ci à des résultats issus de la bibliographie. Enfin, nous proposons des éléments de validation expérimentale, d'abord, en utilisant l'analyse modale classique et des capteurs à contacts (accéléromètres) puis un matériel, plus innovant, comme le vibromètre laser à balayage.

Dans un premier temps, nous mettons en évidence l'originalité de la démarche par rapport aux méthodes classiques tout en pointant certaines de leurs limitations. On détaille en particulier deux aspects du diagnostic : la localisation et la quantification d'une zone endommagée et la caractérisation des conditions limites.

Avant l'étape de validation, nous proposons d'effectuer une comparaison numérique (benchmark) afin de démontrer la robustesse de notre méthode. On teste donc notre algorithme en terme de localisation du plus petit défaut, en fonction de son emplacement et des conditions limites, ainsi que sa capacité à extraire les singularités en présence de bruit face à deux améliorations de méthodes existantes (courbure [Pa91, Sa98, Sa02b, Sa02a, SK04] et dimension fractale [Ha05b]).

La validation est conduite en deux temps, d'abord sur des déformées issues de résultats de la littérature [Ha02, Da04] puis sur des expérimentations de complexité croissante réalisée en laboratoire. Pour chaque exemple, on illustre les résultats importants mais aussi les limitations pratiques et théoriques. Finalement, on propose des solutions complémentaires à notre approche en vue d'un diagnostic plus pratique et plus automatique.

III.2 Proposition d'une démarche de diagnostic

III.2.1 Description et limitations des approches de diagnostic par analyse modale

Ce premier schéma présente la méthode classique de détection de défaut par analyse en ondelettes. Notre méthode va tenter de trouver des solutions aux limitations des approches classiques (Figure III.1).

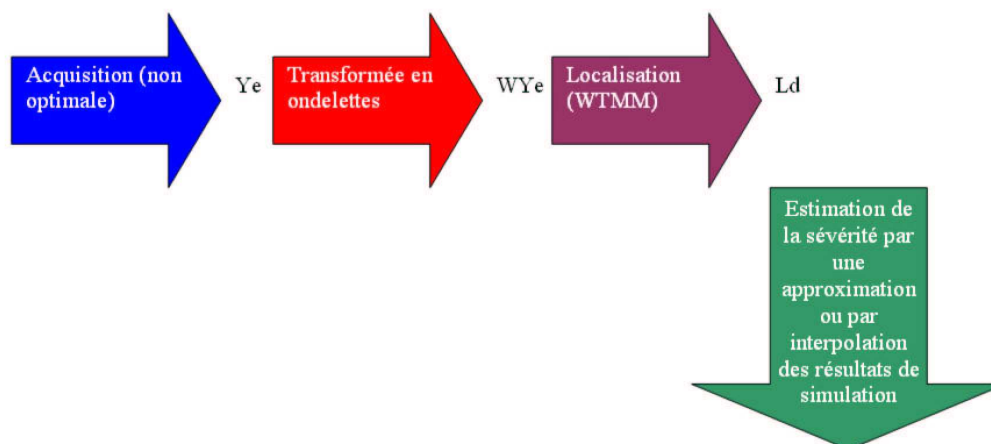


FIG. III.1 : Démarche classique de détection de défaut

On peut définir grossièrement trois types de limitation :

1. l'acquisition n'est pas optimale ; on ne tient donc pas en compte des spécificités de la poutre ou du matériel d'acquisition.
2. le choix de l'algorithme de localisation qui offre souvent plusieurs lignes de maxima (éliminer le bruit de mesure).
3. l'étape d'identification est adaptée au cas particulier de la poutre sous étude.

Nous allons maintenant montrer les conclusions importantes et les limitations de deux papiers de référence [Ha02, Da04].

Dans la plupart des travaux le défaut est modélisé par une variation de hauteur (c/h) selon la figure III.2.

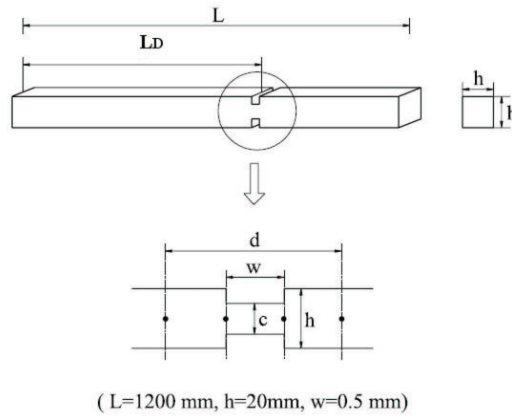


FIG. III.2 : Création du défaut à $L_D=0.8m$ sur une poutre libre-libre de 1.2m de long

Autour de la discontinuité v , seul le déplacement $w(x)$ et ses dérivées sont continus. On peut écrire :

$$w(v+) = w(v-), \quad \frac{dw(v+)}{dx} = \frac{dw(v-)}{dx}$$

$$EI(v+) \frac{d^2w(v+)}{dx} = EI(v-) \frac{d^2w(v-)}{dx}$$

Mais la rigidité en $x = v$ n'est pas continue :

$$EI(v+) \neq EI(v-)$$

Ces relations imposent que la valeur de l'exposant de Lipschitz α soit compris entre 1 et 2 ($1 < \alpha < 2$). En effet, seuls $w(x)$ et sa dérivée sont continus : si on appelle n l'ordre de dérivation continu, α doit vérifier :

$$n < \alpha < n + 1$$

Pour caractériser exactement α , on doit alors travailler avec une ondelette ayant au moins $2(n + 1)$ passages par zéro.

La figure III.3 montre les résultats de l'estimation de l'exposant de Lipschitz pour $L_D=0.8m$. L'importance du défaut est bien corrélée avec la valeur de l'exposant sur une gamme de défaut important (c/h varie de 0.1 à 0.7).

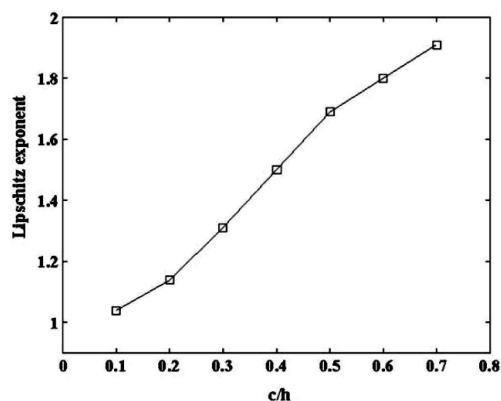


FIG. III.3 : Hong et al [Ha02] montrent sur un exemple numérique (poutre en aluminium de 1.2m de long avec un défaut autour de $L_D=0.8m$) la corrélation entre l'exposant de Lipschitz et l'importance du défaut. Pour cette position de défaut : quand l'importance du défaut augmente (c/h diminue), la valeur de l'exposant de Lipschitz diminue

La figure III.4(a) illustre le fait que des distances réduites d'échantillonnage (w/d) de données plus grandes impliquent des valeurs d'exposants plus grandes et diminuent donc l'importance apparente de la singularité. De plus, Hong et al montrent sur des résultats de simulation (Figure III.4 (b)) que l'étude du mode fondamental est plus intéressant à utiliser pour les algorithmes de détection de défaut en raison de la plage de variation importante de l'exposant de Lipschitz pour ce type de défaut (et pour ce type de matériaux/géométrie).

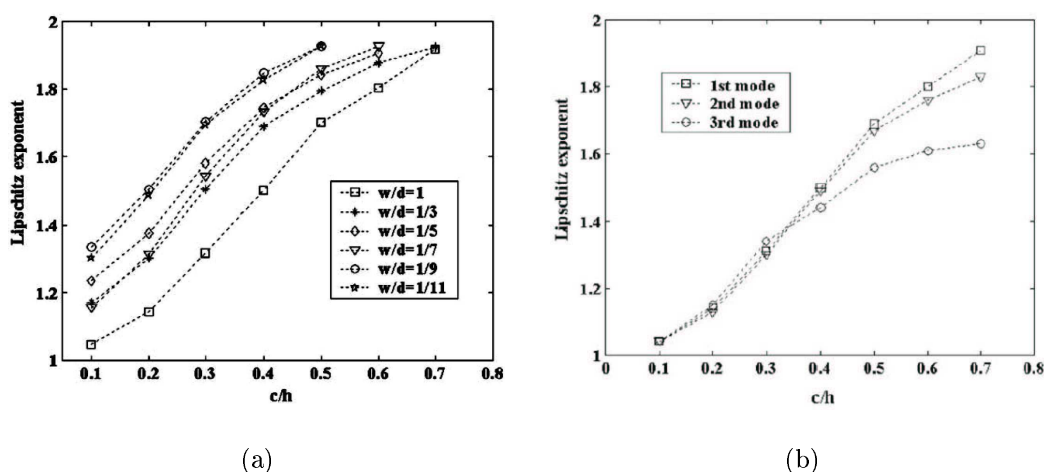


FIG. III.4 : Influence de la distance d'échantillonnage : plus elle est grande plus elle diminue l'importance du défaut (a). Estimation de l'exposant de Lipschitz autour de la localisation $L_D=0.8m$ du défaut pour les 3 premiers modes (b)

Enfin le bruit sur les données expérimentales augmente l'importance de la singularité. Pour des localisations différentes de défaut, il y a des changements dans la valeur de l'exposant. Cela vient du fait que la courbure de la déformée modale affecte le comportement des singularités locales pour une analyse effectuée sur un espace fini (u,s). Enfin, on démontre par simulation éléments finis que $\alpha_{exp} < \alpha_{mef}$. En effet la présence de bruit de mesure a tendance à diminuer la valeur de α_{exp} en rendant la déformée plus singulière.

Douka et al [Da04] vont plus loin et proposent de quantifier expérimentalement le défaut en utilisant un outil de prédiction basé sur une loi polynômiale entre profondeur du défaut (crack depth) et facteur d'intensité (A, ordonnée à l'origine des lignes de maxima). Les résultats de la figure III.5 sont issus de simulation éléments finis sur une poutre encastree-libre en plexiglas de 0.3m de long avec un défaut autour de $L_D=0.06m$.

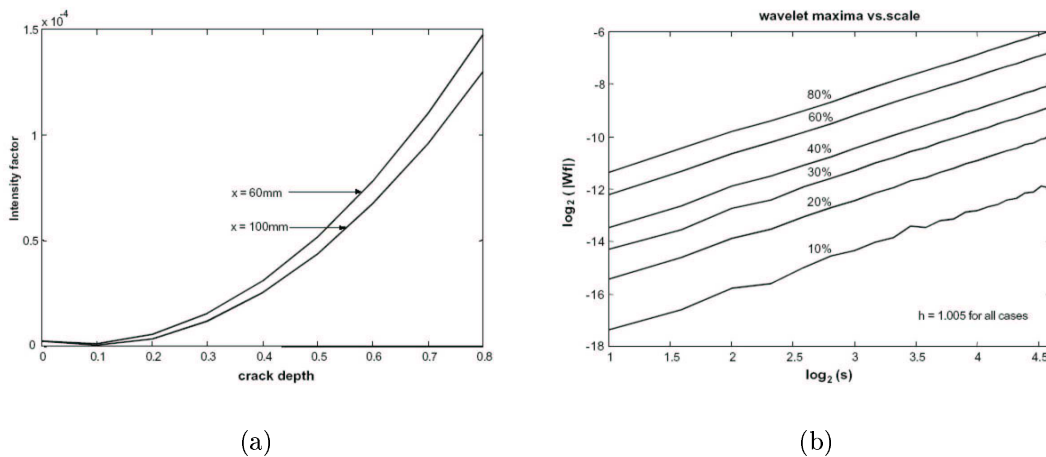


FIG. III.5 : Douka et al [Ha02] montrent sur un exemple numérique (poutre encastree-libre en plexiglas de 0.3m de long avec un défaut autour de $L_D=0.06m$) la corrélation entre le facteur d'intensité et l'importance du défaut (normalised crack depth) (a). Pour cette position de défaut (60mm), il trace aussi les coefficients d'ondelettes de la ligne de maxima en fonction de l'échelle s d'observation pour différentes importances du défaut : l'ordonnée à l'origine A varie mais pas l'estimation de l'exposant de Lipschitz h (b)

Comme la théorie de Mallat [MH92] l'a démontré, il existe une relation directe entre les coefficients d'ondelettes et les dérivées des signaux à analyser. Ainsi pour un défaut situé à $L_D=100\text{mm}$, la pente est 1.49 fois plus grande pour celle à $L_D=60\text{mm}$: les coefficients d'ondelettes sont donc 1.49 fois plus petits comme le montre la figure III.5 (a).

III.2.2 Proposition d'une approche originale de diagnostic par analyse modale

La figure III.6 présente notre méthode dans les 4 étapes clés du diagnostic (acquisition, traitement, localisation, identification) et ses avantages par rapport aux approches classiques.

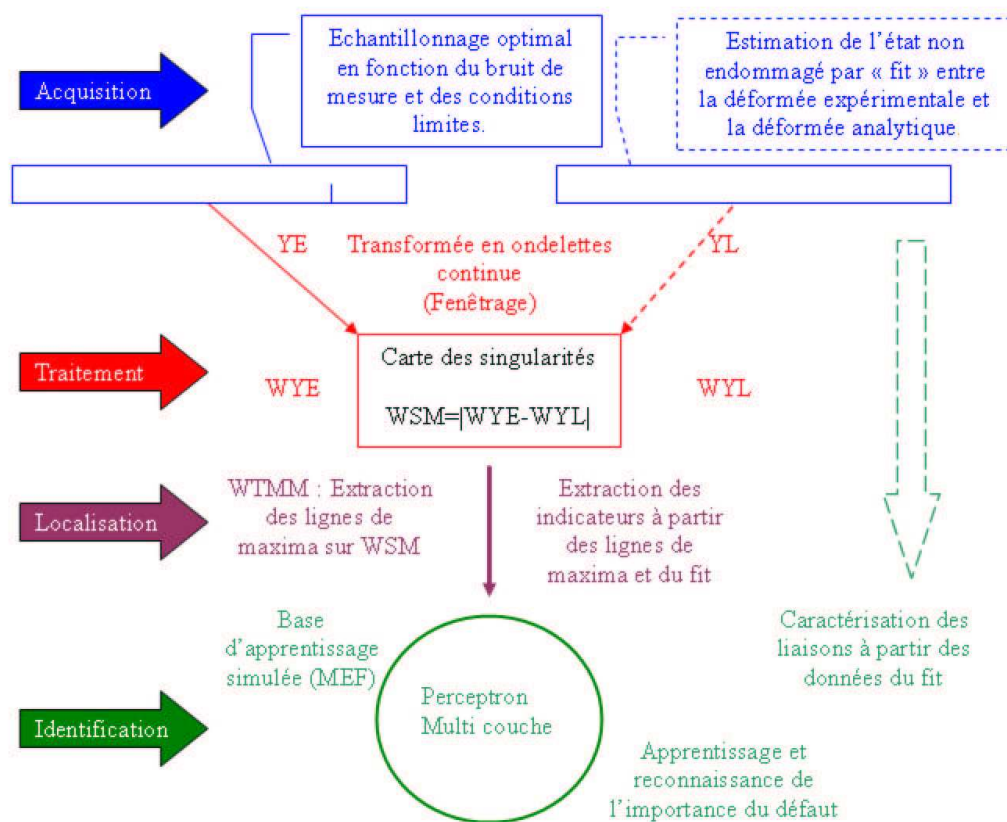


FIG. III.6 : Notre méthode étape par étape

Acquisition

La première partie consiste en l'acquisition par analyse modale d'une déformée haute résolution optimale Y_E .

Prétraitement

On calcule ensuite la déformée lissée (Y_L pseudo état de référence) en faisant un ajustement (fit) entre Y_E et la formule de la déformée analytique I.5. Le résultat de cette estimation permet de nous renseigner sur le meilleur ajustement de tous les paramètres de cette équation. Les cas classiques ou parfaits sont expliqués par Rao [Rao95] et nous

avons explicité dans le premier chapitre les travaux sur les connections semi-rigides de McGuire [McG95].

Traitement

La seconde partie consiste en un ensemble de traitements mathématiques permettant de construire la carte temps-échelle des singularités (Wavelet Singular Map, WSM).

Localisation

Notre algorithme d'estimation des lignes de maxima est décrit dans la figure III.7.

```

Compute Singularity Map  $Sm(u,s)$ 
PreProcessing: Thresholding (50%)

  Find the n local maxima at  $s=s_0$ :  $Lm(n)$ 

  For  $s=s_0-1:s_{MAX}$ 
    For  $j=1:n$ 
       $Maxima\_line=\max(Sm(Lm(j)-1,s),Sm(Lm(j),s),Sm(Lm(j)+1,s))$ 
    End
  End

With  $X=Maxima\_line(n,s)$ 

Check wether these lines lie inside the cone of influence (if necessary modify  $s_{MAX}$ )

Extract
 $\alpha$  defined as the slope of  $\log_2(W_T(X,s))$  function of  $\log_2(s)$ 
 $A$  , the intensity factor as the intercept of the same line.
 $\alpha_M$  , the modified Lipschitz exponent defined as the slope of  $\log_2(Sm(X,s))$  function of  $\log_2(s)$ 
 $A_M$  , the modified intensity factor as the intercept of the same line.

```

FIG. III.7 : Notre algorithme d'extraction des singularités

On extrait de cette carte les lignes de maxima en utilisant un algorithme proche de Maxima du Module de la Transformée en Ondelettes MMTO (ou Wavelet Transform Maxima Modulus, WTMM) de Mallat [MH92], WTMM. Nous nous servons de la carte des singularités (et non des seules données expérimentales) pour estimer facilement les lignes de maxima pertinentes et donc localiser les défauts. En effet, notre méthode a tendance à mettre en avant les singularités en diminuant l'effet de courbure que l'on a mis en évidence dans la théorie du second chapitre et en diminuant aussi l'effet du bruit de mesure. La comparaison de cet outil de localisation avec d'autres outils comme la courbure de la déformée [Pa91, Sa98] ou la dimension fractale locale [Ha05b] sera effectuée et mettra en avant la robustesse de notre méthode utilisant la transformée en ondelettes continue sur les déformés modales en terme de distinction entre bruit et défaut.

Identification

Une fois que les singularités du signal sont localisées, et que l'équation de la déformée analytique est ajustée, on peut extraire plusieurs indicateurs :

- un indicateur global du comportement aux limites, la pseudo fréquence $\lambda_1 L$,
- la localisation normalisée du défaut L_D/L et la valeur absolue de la pente $|Y'(L_D)|$,
- la pente des lignes de maxima pour W_{Y_E} ($\alpha + 1/2$), et pour WSM ($\alpha_M + 1/2$),
- l'ordonnée à l'origine des lignes de maxima (facteur d'intensité A et A_M) pour W_{Y_E} (A), et pour WSM (A_M).
- notre indicateur Ratio, rapport de l'exposant de Lipschitz sur le facteur d'intensité $\frac{\alpha_M}{A_M}$, pour les données fenêtrées (évite les effets de bords).

Ceux ci seront utilisés pour caractériser l'intensité du défaut à partir d'une base d'apprentissage de 240 poutres de tailles et défauts variables, représentant un spectre large de type de poutre endommagée.

III.2.3 Illustration pas à pas

III.2.3.1 Préambule

On va montrer, dans cette section, comment la modélisation éléments finis peut nous aider à mieux comprendre le comportement d'une poutre endommagée.

On a ainsi construit sous Matlab, une poutre Euler-Bernoulli (2 ddl par noeuds) entièrement paramétrable au niveau du nombre et des propriétés des éléments, et des conditions limites (raideurs). La figure III.8 présente les différentes notations que l'on a pu utiliser.

Au niveau de la détection de défaut, une des premières questions que l'on peut poser est : comment varie la fréquence en fonction de la localisation du défaut et de son importance? Le défaut est simulé par un changement abrupt d'inertie au niveau d'un élément.

Le défaut est simulé sur une poutre par un endommagement de largeur W_D et de profondeur c/h , h étant la hauteur de la poutre, c/h est la diminution de hauteur que l'on peut traduire par un facteur local de diminution d'inertie dI défini comme suit : $dI = \frac{\tilde{I}}{I}$ avec $I = \frac{bh^3}{12}$ et $\tilde{I} = \frac{bc^3}{12}$. Le défaut varie d'une importance sévère ($dI=0.1$) à peu importante ($dI=0.9$).

III.2.3.2 Principe général

Pour débiter cette partie on va redéfinir nos principales notations :

- L'acquisition et l'analyse modale permettent d'obtenir Y_E , la déformée Expérimentale (premier mode).
- L'ajustement avec la fonction analytique de la déformée donne Y_L (Lissage).
- Les transformées en ondelettes (Wavelets) de Y_E et Y_L sont respectivement W_{Y_E} et W_{Y_L} . On définit aussi $WSM = |W_{Y_E} - W_{Y_L}|$, la carte des singularités des données fenêtrées (pour éviter les effets de bords).
- La ligne de maxima extraites de W_{Y_E} permet de caractériser : α l'exposant de Lipschitz et A le facteur d'intensité.
- La ligne de maxima extraites de WSM permet de caractériser : α_M l'exposant Modifié de Lipschitz et A_M le facteur d'intensité Modifié.

Pour simuler une acquisition de déformée, nous utilisons la méthode des éléments finis. Prenons l'exemple d'une poutre Encastree-Encastree de longueur $L=2m$, discrétisée en éléments finis ($N=100$). L'analyse dynamique du système $det(K - \omega^2 M) = 0$ permet d'extraire les fréquences (valeurs propres) et modes (vecteurs propres) de la poutre.

Ainsi en changeant légèrement la hauteur de l'élément 75, on fait varier son inertie et localement la déformée change. Sur notre exemple (Figure III.10), elle change si peu qu'on ne peut distinguer la déformée expérimentale Y_E de la déformée lissée Y_L .

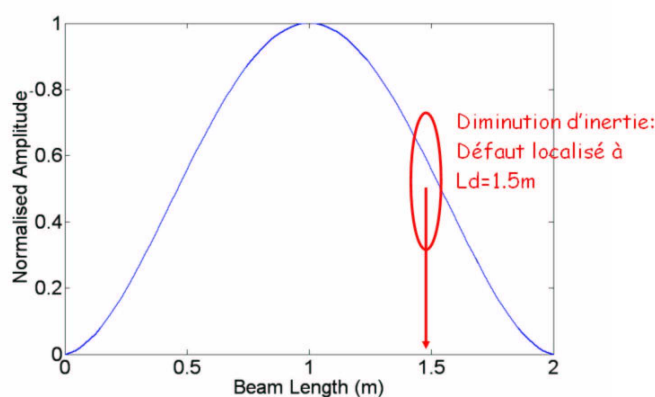


FIG. III.10 : Déformée expérimentale simulée avec un défaut localisé à $L_D = 1.5$ m

On peut ensuite débiter l'étape 2 du diagnostic qui est le traitement des données que l'on vient d'acquérir.

On estime ensuite la fonction lissée Y_L pour pouvoir calculer la carte des singularités $WSM = |W_{Y_E} - W_{Y_L}|$ (Figure III.11(a)) avec $W_{Y_E} = CWT(Y_E)$ (Figure III.11(b)) et $W_{Y_L} = CWT(Y_L)$ (Figure III.11(a)). On peut remarquer aux extrémités les effets de bord (le calcul des coefficients d'ondelettes sur un support théoriquement infini est borné sur la longueur du signal)

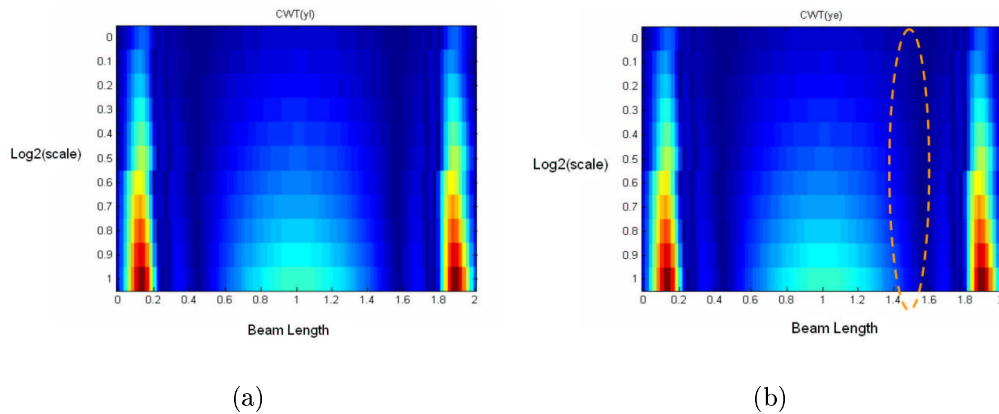


FIG. III.11 : Transformée en ondelettes continue des données lissées Y_L (a) et des données expérimentales Y_E (b). C'est une représentation "temps-fréquence" : en abscisse points de la déformée correspondant à la longueur de la poutre (m), en ordonnée Log_2 de l'échelle.

On peut désormais procéder à l'étape de localisation et utiliser notre algorithme pour extraire la ligne de maxima (Figure III.12(b)). Cette étape permet de valider la localisation du défaut plus facilement qu'en utilisant l'extraction des lignes de maxima directement sur les données expérimentales.

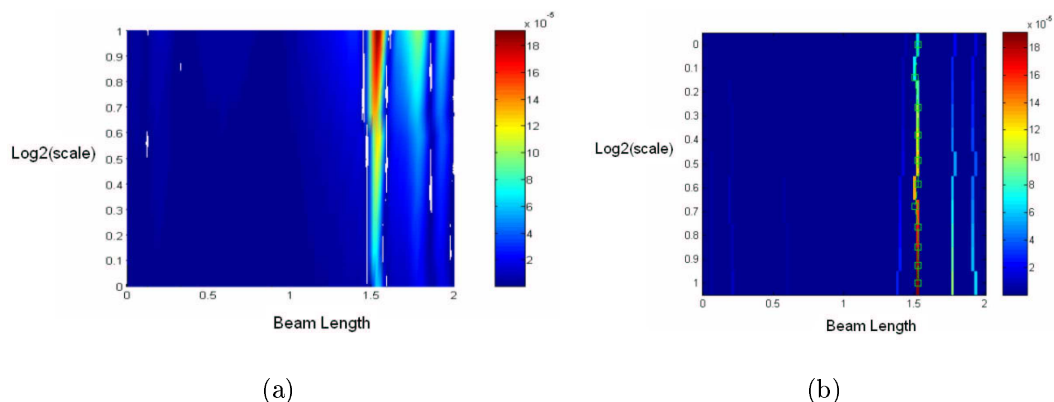


FIG. III.12 : Carte des singularités WSM (a) et ligne de maxima extraite (carré vert) (b). On peut remarquer que les fenêtres d'apodisation diminuent les effets de bord.

Il y a donc un double intérêt à effectuer le lissage, d'une part donner des indications sur les conditions limites et d'autre part estimer un pseudo état de référence. Cette deuxième étape permet de faciliter la localisation du défaut en mettant en avant les singularités sur la carte des singularités WSM. Une opération de seuillage sur WSM peut permettre de diminuer l'influence du bruit en éliminant les petites lignes de maxima (faux défauts).

Finalement, les indicateurs pouvant caractériser l'importance du défaut sont extraits selon la méthode de la figure III.13.

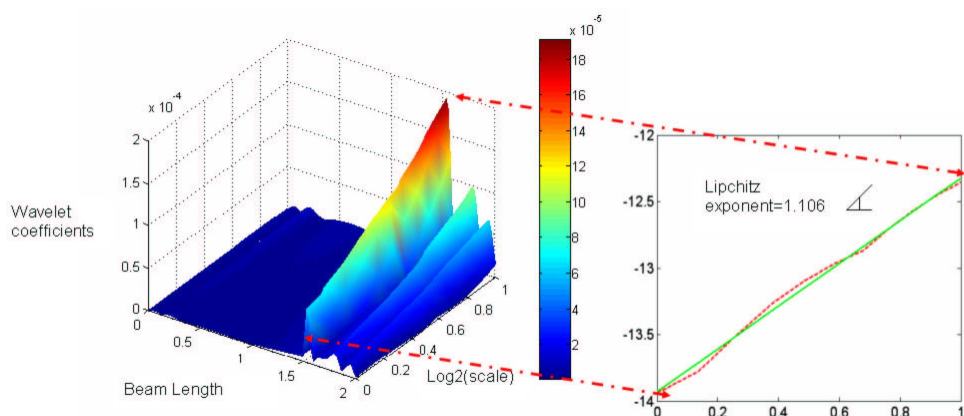


FIG. III.13 : Caractérisation du défaut localisé à $L_D = 1.5$ m. En traçant un graphique Log-Log des coefficients d'ondelettes de la ligne de maxima en fonction de l'échelle

On débute ainsi l'étape d'identification ou de quantification. On génère des scénarii de poutres endommagées et à partir d'indicateurs pertinents (Figure III.13), on peut prédire la sévérité du défaut en utilisant la capacité d'approximation parcimonieuse (ou généralisation) des réseaux de neurones.

On sait que la valeur de nos indicateurs dépend de la position du défaut dans la poutre. On va donc relier tous ces indicateurs pour prédire l'importance du défaut (en terme de réduction d'inertie dI) des exemples expérimentaux. Les 6 indicateurs rentrent dans le processus de reconnaissance de l'importance du défaut comme entrée du Perceptron multi couches (Figure III.14) qui va nous permettre d'introduire les réseaux de neurones de façon plus pratique que dans le chapitre précédent.

Notre outil de reconnaissance de défaut utilise donc un perceptron multi-couches à rétropropagation de gradient (Figure III.14). Il utilise 6 paramètres d'entrée (6 fonctions de transfert sigmoïde) et le défaut estimé comme une diminution d'inertie est la sortie du réseau de neurones. En pratique une taille correcte de 6 couches cachées est établie.

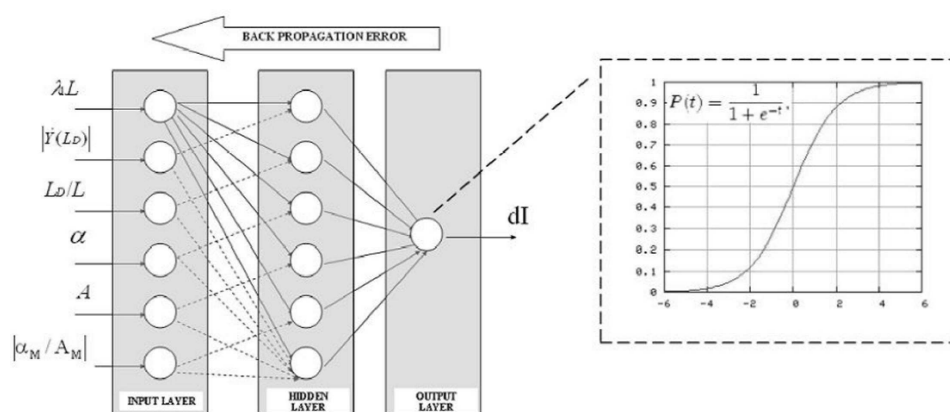


FIG. III.14 : Notre outil de reconnaissance de défaut et la fonction sigmoïde permettant de très bien généraliser

L'importance des défauts est estimée à partir des indicateurs et d'une base d'apprentissage. Pratiquement, on a essayé la méthode classique d'apprentissage qui utilise les 2/3 de la base de données (ratio 66%) pour l'apprentissage (Taille=290 poutres endommagées x 6 indicateurs). Le tiers restant est inclu dans la base cible avec l'importance à estimer. En second lieu, on a mis au point une technique permettant d'extraire aléatoirement des paquets de 4 données en essayant de trouver les configurations les plus pertinentes en fonction du défaut à identifier (4 de la base d'apprentissage et notre donnée à estimer). La base d'apprentissage, d'une taille de 90 exemples, est choisie aléatoirement parmi le spectre de 290 poutres endommagées (ratio de 94%). On cherche la base de données réduite optimale jusqu'à ce que les sorties du RN soient très bien corrélées avec les cibles (la droite décrite par les 5 valeurs doit avoir un $R^2 > 0.98$). Cette méthode donne des résultats plus précis (2 % d'erreur en général, contre le double pour la méthode normale). Cette robustesse peut s'expliquer du fait que les données extraites appartiennent probablement au même type de poutre/défaut. Son désavantage est le temps de convergence pour trouver la base réduite optimale. Une base de données de 290 exemples de poutres endommagées est calculée, utilisant notre outil de MEF sous Matlab. Le spectre des poutres endommagées (taille de défaut, localisation de défaut, conditions limites) est assez large pour permettre au perceptron d'apprendre avec seulement quelques centaines d'exemples dont un petit pourcentage de données erronées ou bruitées. Finalement un algorithme de régularisation Bayésienne permet d'obtenir de meilleures performances que les algorithmes classiques.

III.2.4 Justification du choix de nos indicateurs

La capacité d'approximation d'un réseau de neurones dépend de la pertinence des indicateurs (ou descripteurs). Si l'on veut que le réseau généralise pour toutes les conditions limites (même non parfaites), on se doit d'avoir plus d'indicateurs, et quand on augmente le nombre d'indicateurs, la base d'apprentissage doit comporter plus d'exemples et le nombre de couches cachées du MLP doit être choisi empiriquement pour obtenir une fiabilité satisfaisante des résultats.

Les travaux numériques de cette section ont pour but de montrer la pertinence du choix de nos indicateurs de défaut. Les résultats sont basés sur la poutre test de la section III.2.2. Nous avons effectué quelques simulations numériques (7 localisations, 5 importances pour une poutre EE et 4 localisations, 3 importances quand cela est possible pour une poutre EL) pour démontrer que, globalement, la valeur de l'indicateur Ratio ($Ratio = \frac{\alpha_M}{A_M}$) est moins dépendante de la localisation que les autres indicateurs.

On sait que l'exposant de Lipschitz α ou H et le facteur d'intensité A varient selon la taille du défaut mais aussi selon sa localisation. Les graphiques des figures III.15, III.15 montrent les variations de l'exposant de Lipschitz (ici noté H) et du facteur d'intensité A en fonction de la localisation et de l'importance du défaut.

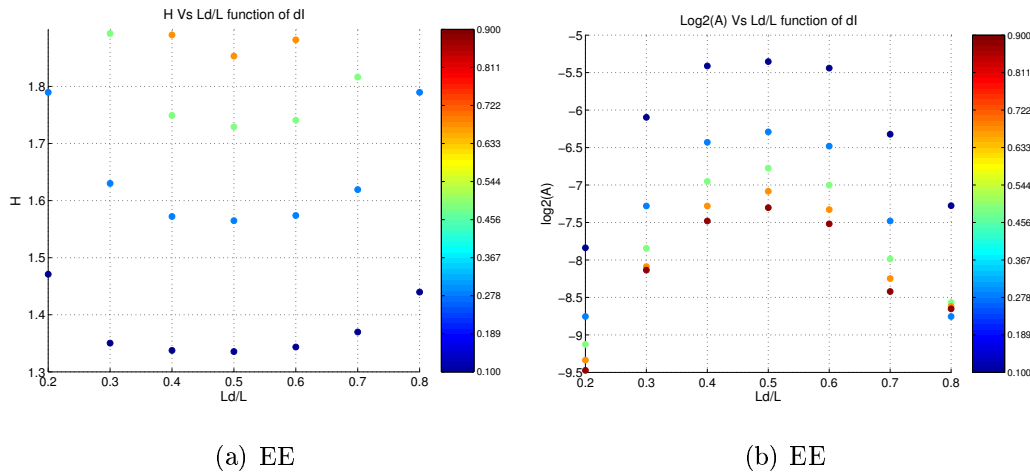


FIG. III.15 : Comportement de l'exposant de Lipschitz H (a) et du facteur d'intensité A (b) pour la condition limite CL=EE

On a ajouté dans notre outil de reconnaissance, un indicateur de rigidité qui est la pseudo fréquence $\lambda_1 L$ et des indicateurs de localisation que son L_D/L et $|Y'(L_D)|$.

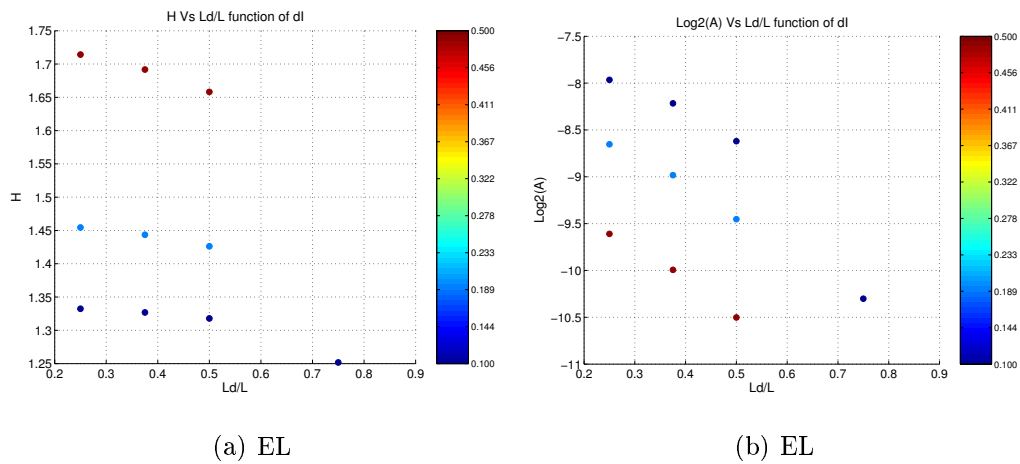


FIG. III.16 : Comportement de l'exposant de Lipschitz H (a) et du facteur d'intensité A (b) pour condition limite $CL=EL$

La figure III.17 montre que ces indicateurs permettent de décrire le comportement de la poutre endommagée en fonction de la localisation et de l'importance du défaut. Tous varient selon une relation non linéaire. Tous ces indicateurs ont une influence sur le

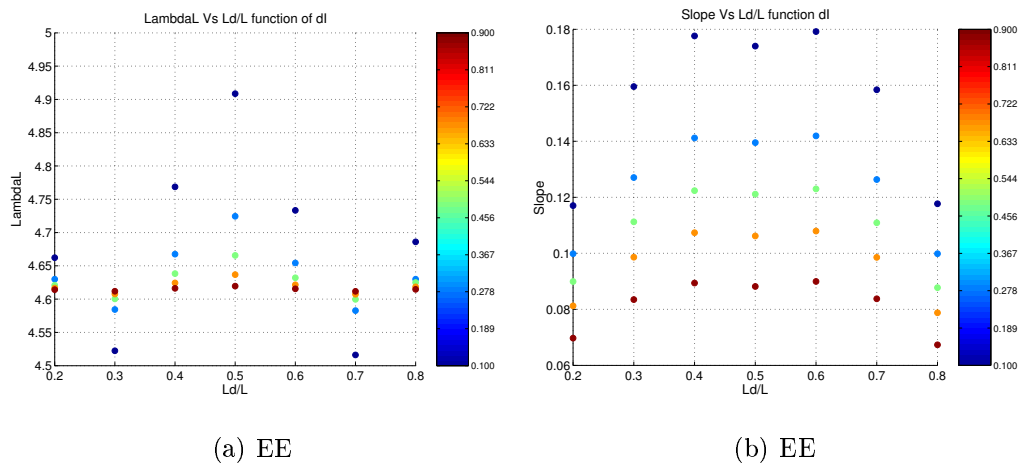


FIG. III.17 : Comportement de la pseudo fréquence λL (a) et de la pente $|Y'(L_D)|$ (b) pour $CL=EE$

phénomène que l'on cherche à modéliser : la sévérité (ou réduction d'inertie). La méthode statistique des plans d'expériences pourrait permettre de diminuer le nombre de poutres endommagées à modéliser dans la base d'apprentissage. Ainsi on réalise uniquement les expériences qui apportent une information significative pour l'apprentissage du modèle, au lieu d'essayer de décrire tout le domaine de variation des entrées (large spectre de 240 poutres endommagées).

Nous mettons en évidence (empiriquement) les capacités de notre indicateur *Ratio* à être moins sensible que les autres à la localisation du défaut. Le fait que notre indicateur soit un rapport ($Ratio = \frac{\alpha_M}{A_M}$) et que l'exposant de Lipschitz et l'ordonnée à l'origine soient estimés sur la carte fenêtrée des singularités (et non directement sur W_{YE}) permet d'expliquer cette robustesse.

Sur la figure III.18 est représenté, en ligne noire, le comportement globale de notre indicateur. On voit que pour chaque localisation, l'indicateur *Ratio* décroît quand *dI* augmente.

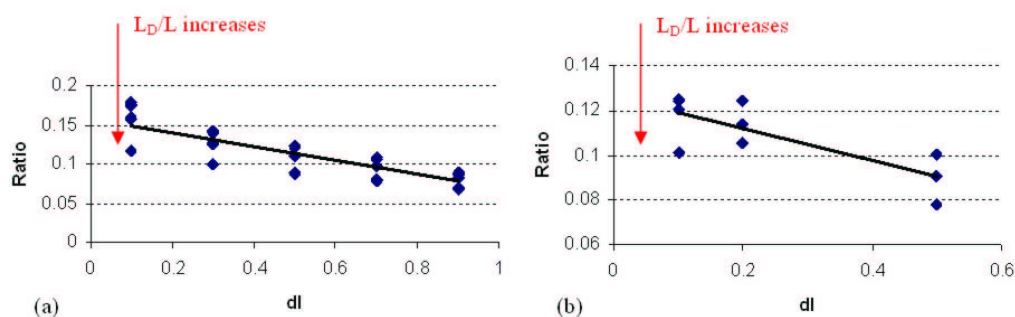


FIG. III.18 : La tendance de notre indicateur *Ratio* est moins dépendante de la localisation (ligne noire) : globalement, *Ratio* augmente avec la sévérité (*dI* diminue). Chaque point est associé avec un paramètre constant *dI* qui est fonction de L_D/L qui augmente du point le plus haut vers le point le plus bas pour deux conditions limites EE (a) et EL (b)

Finalement on montre la robustesse globale de notre outil d'identification par RN pour chaque essai de simulation proposé plus haut (Figure III.19).

Cela nous permet de plus de mettre en valeur l'impact de la courbure sur la caractérisation du défaut. D'où l'importance d'analyser une déformée avec une courbure et une amplitude suffisante. D'autre part, le coefficient de corrélation est plus bas pour les poutres encastrees du fait qu'il n'y a que peu d'exemples dans la base d'apprentissage globale (25/240).

Cette procédure n'est utilisable que si le défaut peut se ramener à une variation de rigidité *EI*. Il est donc nécessaire d'une part de s'affranchir de l'apprentissage et d'autre part d'essayer de classifier (selon l'importance) le défaut et non pas de l'identifier.

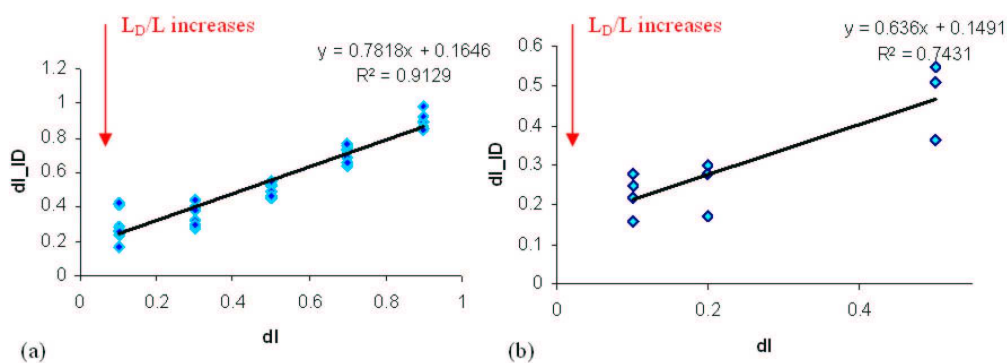


FIG. III.19 : La corrélation entre la sévérité du défaut identifié dI_{ID} et la diminution d'inertie simulée dI est très bonne pour les deux conditions limites EE (a) et EL (b). Chaque point est associé au paramètre constant dI qui diminue du haut vers le bas (fonction de la localisation L_D/L).

III.2.5 Estimation de la qualité des assemblages par optimisation

On a vu dans l'explication de notre méthode que le lissage de la déformée expérimentale avec la déformée analytique nous a permis d'extraire le coefficient $\lambda_1 L$ (la pseudo fréquence) qui reflète le comportement global des conditions limites. Il donne de plus une idée précise de la zone d'extrémité (parfaite ou plus ou moins rigide). Cela représente donc bien une image de la qualité des conditions limites (pour une poutre simple) ou des liaisons/assemblages pour les structures plus complexes. On va montrer dans cette section qu'il est possible dans des cas simples d'estimer directement la valeur des rigidités de liaisons et donc de passer d'un niveau d'estimation globale à de l'identification. On se base ici sur des travaux issus de l'article pour Surveillance 5 [Ma04]. Les calculs sont effectués avec un modèle éléments finis de poutre flexible 2D sous Matlab.

L'équation II.27 exprime le fait que l'on peut estimer les 4 rigidités de liaison d'une poutre flexible à partir des 4 premiers modes de vibration. Or on sait que plus le degré des modes augmente, plus les déformées sont sensibles au bruit, et donc reflètent moins la réalité. Ainsi on a choisi d'expliquer pas à pas le problème d'une poutre supportée-supportée à laquelle on ajoute des rigidités de rotation variables. Sur le schéma d'Olgac, $k_{\theta R}$ et $k_{\theta L}$ sont donc variables (de 0 à très grand).

Faisons l'application numérique de ce problème. L'équation II.27 devient $f(\beta) = 0$ en posant :

$$\beta_1 = \beta_3 = \beta = \frac{KL}{EI} \quad (\text{III.1})$$

$$\beta_2 = \beta_4 = 5e20(N/m) \gg \beta \quad (\text{III.2})$$

L'équation caractéristique du système devient donc une équation du second degré avec a, b, ..., l fonctions trigonométrique de λL et $\tilde{K} = \frac{EI}{L^3}$:

$$(a\tilde{K}^2 + b\tilde{K})\beta^2 + (2c\tilde{K}^2 + (d + e)\tilde{K} + 2h)\beta + (g\tilde{K}^2 + 2k\tilde{K} + l) = 0 \quad (\text{III.3})$$

La méthode de Newton-Raphson est l'algorithme le plus puissant pour trouver les racines de ce type d'équation (composée de fonctions trigonométriques et hyperboliques).

Pour notre exemple nous étudierons une poutre à 60 éléments finis ayant les caractéristiques suivantes :

$L=1200$ mm, $h=b=200$ mm, $E=10000$ MPa, $\rho = 500Kg/m^3$, $k_2=k_4=5e20$ N/m. La première fréquence de résonance est autour de 636.8 Hz.

En traçant la déformée normalisée du premier mode en fonction de la rigidité K , on peut s'apercevoir sur la figure III.20 que le comportement de la poutre varie bien de supportée supportée SS ($K=0$ N.m en bleu) à encastree encastree EE ou FF ($K=1e12$ N.m).

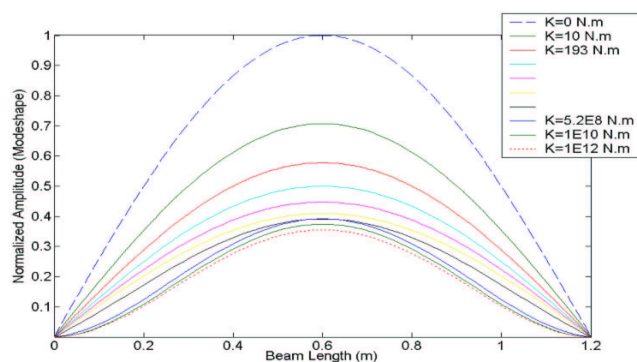


FIG. III.20 : Evolution de la déformée en fonction de la rigidité de liaison k

On voit sur la figure III.20 que la déformée du premier mode est symétrique. Le comportement de la poutre met en évidence les 3 conditions limites, Supportée-Supportée SS, Semi-Rigide SR et Encastree-Encastree EE.

Plus en détails, en lissant chaque déformée, on peut extraire la pseudo fréquence et la tracer en fonction de $\log(K)$ (Figure III.21). La condition limite SS débute à $K=0$ pour $\lambda L = \pi$ et s'arrête à la rigidité moyenne $1e6$ N.m. La zone de transition semi rigide s'étend jusqu'à $1e9$ N.m où débute la zone EE avec la valeur classique $\lambda L = 4.73$ (Figure III.21(a)).

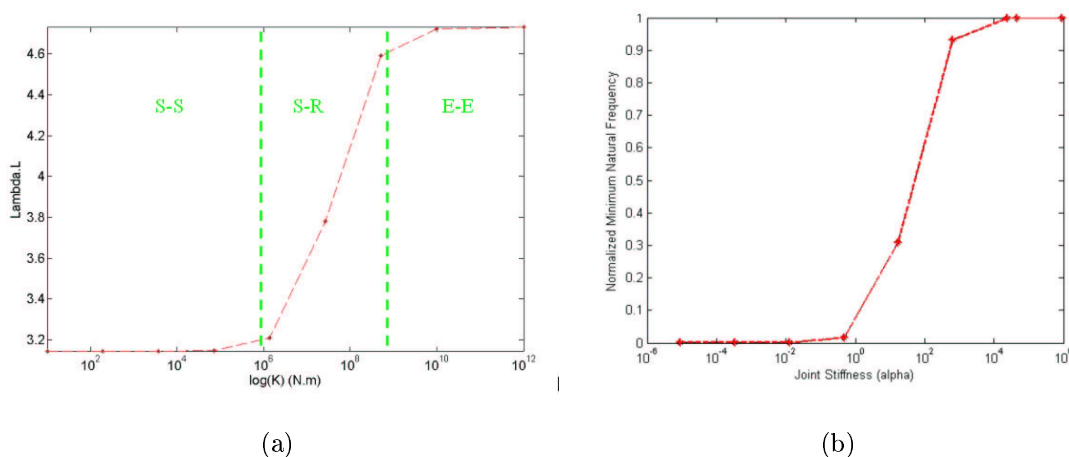


FIG. III.21 : Evolution de la pseudo fréquence en fonction de la rigidité de liaison K (a), et évolution de la fréquence normalisée en fonction de la rigidité d'assemblage normalisée (b)

On peut aussi représenter comme [McG95] la valeur de la rigidité de liaison en fonction de la fréquence normalisée (Figure III.21(b)). L'avantage est que la valeur est indépendante du terme $\frac{EI}{L}$. On pourrait ainsi proposer une modélisation de ce comportement en tenant compte de l'amplitude de la fréquence normalisée 1.59 (4.73-3.14) et des zones à 10 % et 90 % comme une fonction sigmoïde.

La procédure d'identification par l'algorithme de Newton-Raphson passe par une étape d'initialisation : on cherche la valeur β^* qui annule la fonction $f(\beta)$. On utilise une méthode itérative suivant la relation : $\beta_{n+1} = \beta_n - \frac{f(\beta_n)}{f'(\beta_n)}$.

Pour que la solution ne diverge pas, on doit avoir une idée assez précise de la valeur d'initialisation. On va obtenir cette valeur β_0 graphiquement (Figure III.22(a)). On obtient $k=7.2e8$ N.m.

En donnant une solution initiale $\beta_0 = 100$, l'algorithme converge en peu d'itération vers $\beta = 95.12$, on obtient donc une rigidité identifiée $k_i = 1.06e8 N.m$ pour une valeur désirée de $k_i = 7.2e8 N.m$. En réitérant cette méthode pour chaque donnée modale (λL),

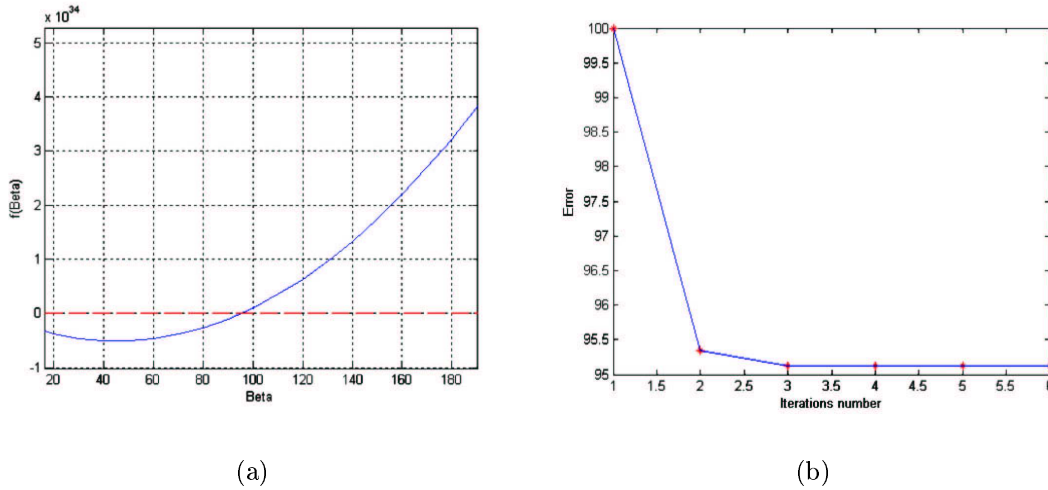


FIG. III.22 : Solution graphique (a), et convergence de la solution (b)

on obtient les valeurs de chaque rigidité identifiée. Les valeurs (λL) sont obtenues par le lissage non linéaire entre les déformées et le modèle analytique.

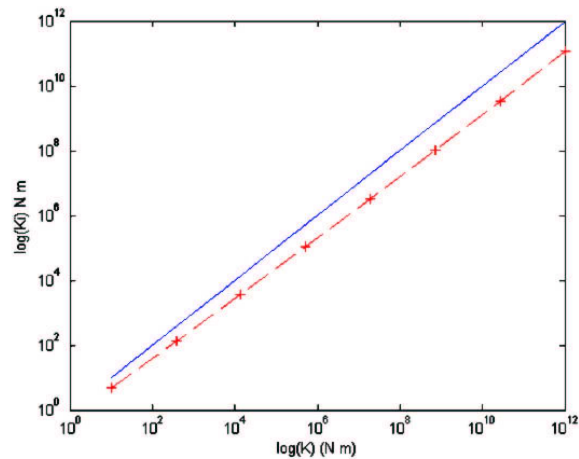


FIG. III.23 : l'identification biaisée de la rigidité de liaison K_i en fonction de la valeur réelle K . En pointillé les résultats de notre identification qui sous estime la droite $K_i = K$

Les valeurs identifiées (Figure III.23) ne sont pas très précises, elles donnent juste une tendance de la variation en rigidité (erreur entre 50 et 80%). En fait de petites erreurs sur l'estimation de la pseudo fréquence induisent une erreur importante sur K_i .

Ainsi on va essayer de résoudre le problème inverse, c'est-à-dire trouver le terme correcteur ϵ qui donne une estimation précise de la rigidité.

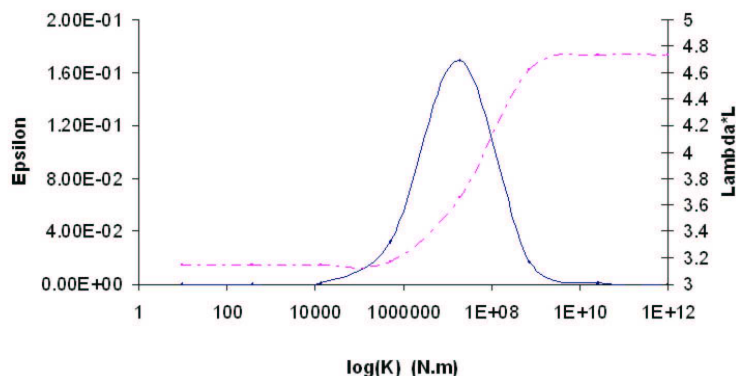


FIG. III.24 : le maximum de ϵ est centré sur la zone semi rigide, ou l'algorithme de lissage a sa plus grande erreur. En pointillé les valeurs de λL en fonction de $\log(K)$, en trait plein la valeur du terme correcteur ϵ

En posant $\lambda_{real} = \lambda_{Id} + \epsilon$, on obtient une identification fiable (erreur $< 1e-2$).

La figure III.24 montre que l'erreur ressemble à une gaussienne centrée sur le milieu de la non linéarité (zone semi-rigide). En modélisant cette erreur pour chaque condition limite, on pourrait réduire l'erreur d'estimation d'une manière significative. On voit ici qu'identifier toutes les rigidités de liaison s'avère être un problème très complexe : un système de degré 4 non linéaire à 4 équations. Nous nous sommes penché sur le problème asymétrique où β_1 est différent de β_2 . L'équation II.27 devient donc $f(\beta_1, \beta_2) = 0$. On se trouve devant un problème à 2 inconnues que l'on peut résoudre en trouvant les zéros de la surface $f(\beta_1, \beta_2)$. De plus l'ajout de bruit de mesure pourrait introduire un biais encore plus important sur l'identification. Voilà pourquoi des méthodes de type "model update" [Tar04] ou réseau de neurones [Ya01] sont intéressantes.

III.2.6 Comparaison des algorithmes de localisation

Les résultats de cette partie sont entièrement issus de notre article publié dans le journal "Key Engineering Materials" [Ma05]. On veut confronter nos outils à des améliorations d'outils existants et voir leur fiabilité et leur possibilité de quantifier le défaut. L'intérêt majeur est de pouvoir estimer leur capacité à discerner de petits défauts dans

du bruit (blanc gaussien). En effet, en SHM, il est critique de détecter le défaut le plus tôt possible, c'est à dire arriver à détecter un très petit défaut. De plus une étude de robustesse au bruit a été menée pour plusieurs localisations de défaut.

Modélisons une poutre de section carrée de type Euler avec ces propriétés : $L=1$ m, $b=h=0.1$ m, E 10 GPa, 100 éléments avec deux conditions limites possibles : EE ou EL. On crée un défaut à $L_D = 0.7m$. Dans nos simulations la localisation et l'importance du défaut sont variables alors que la taille du défaut est constante ($W_D = L/N = 0.01$).

Le rapport "signal sur bruit" RSB (ou Signal to Noise Ratio, SNR) est défini en décibels par :

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{E(x^2)}{E(\sigma^2)} \right) \quad (III.4)$$

où X est une observation d'une variable aléatoire centrée σ^2 .

III.2.6.1 Présentation des algorithmes

On a mené une campagne expérimentale (numérique) de plus de 70 tests de simulation pour d'abord étudier la capacité de détecter un défaut aussi petit (mdI, minimum de diminution d'inertie en % de variation par rapport à l'élément non endommagé) que possible pour plusieurs localisation. Puis, on mesurera aussi la capacité des 3 algorithmes à distinguer le défaut du bruit ajouté pour 3 localisations et deux conditions limites.

Le premier algorithme DC (Difference Curvature) utilise les principes de la dérivation numérique. Si la dérivée première d'un signal restitue la variation de y par rapport à x , la dérivée seconde mesure la courbure du signal, et représente donc la variation de la pente. On voit donc l'inconvénient d'une telle démarche : l'amplification des petites variations. L'influence du bruit de mesure sera donc beaucoup plus importante sur la courbure de la déformée. L'algorithme le plus simple pour estimer la courbure d'un signal est l'équation I.1 du chapitre premier. Voilà pourquoi on utilisera l'avantage de robustesse qu'offre la différence avec la fonction analytique ajustée.

La seconde méthode CWT est celle que l'on a développé, utilisant la transformée en ondelettes continue, que l'on a décrite en détail dans la section précédente.

Enfin, la dernière méthode utilisée FD repose sur les principes de mesure de complexité locale explicités dans le chapitre précédent. Notre approche est la même que [Ha05b] excepté que l'on calcule cette dimension locale pour plusieurs tailles de fenêtres (4 à 8, puissances de 2 : 2^2 et 2^3) ce qui nous donne une image très locale de la variation de complexité dans le signal. Elle sera noté FD ou quelquefois WFD pour Windowed Fractal Dimension.

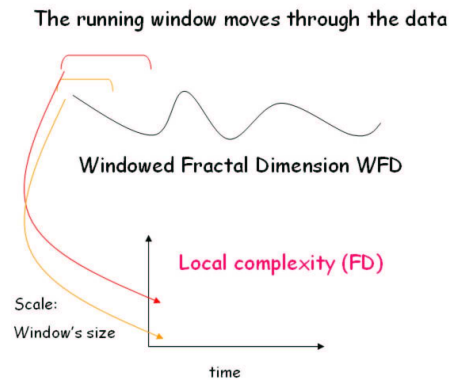


FIG. III.25 : Mise en oeuvre d'une approche temps-échelle pour la mesure de la complexité locale (ou dimension fractale). Pour chaque fenêtre de taille variable (en y : la taille de fenêtre), on calcule localement (en x, longueur de la poutre) une estimation de la dimension fractale locale FD (en z : la valeur de FD)

La déformée de la poutre EL étudiée (Figure III.26 (a)) est tracée à coté de la courbe représentant la différence des courbures $DC = |y_E''(x) - y_L''(x)|$ (Figure III.26 (b)).

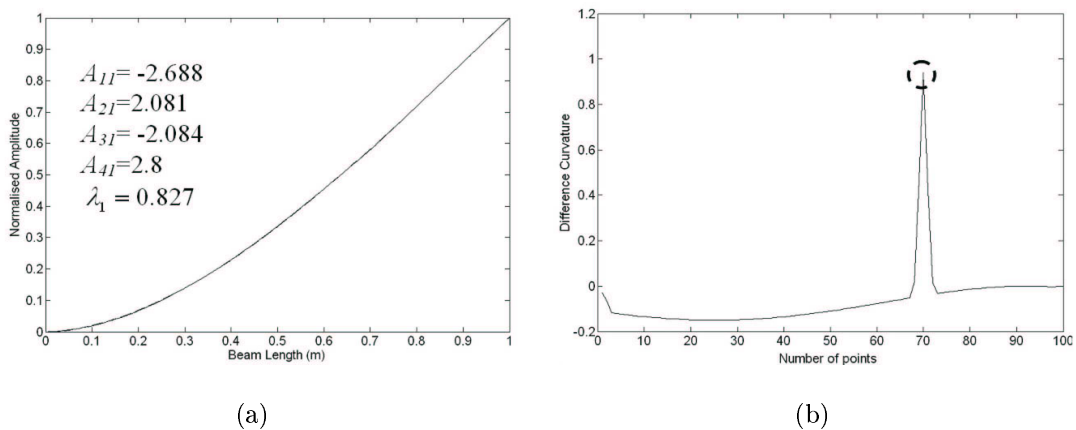


FIG. III.26 : Déformée numérique avec un défaut non visible autour de 0.7 m (a), et le maximum de la différence des courbures DC représentant le défaut (70 points) (b)

Les graphiques de la figure III.27 illustrent l'analyse de singularités sur la déformée $y_E(x)$ avec la carte des singularités CWT (Figure III.27(a)), et la dimension fractale locale fenêtrée FD (Figure III.27(b)).

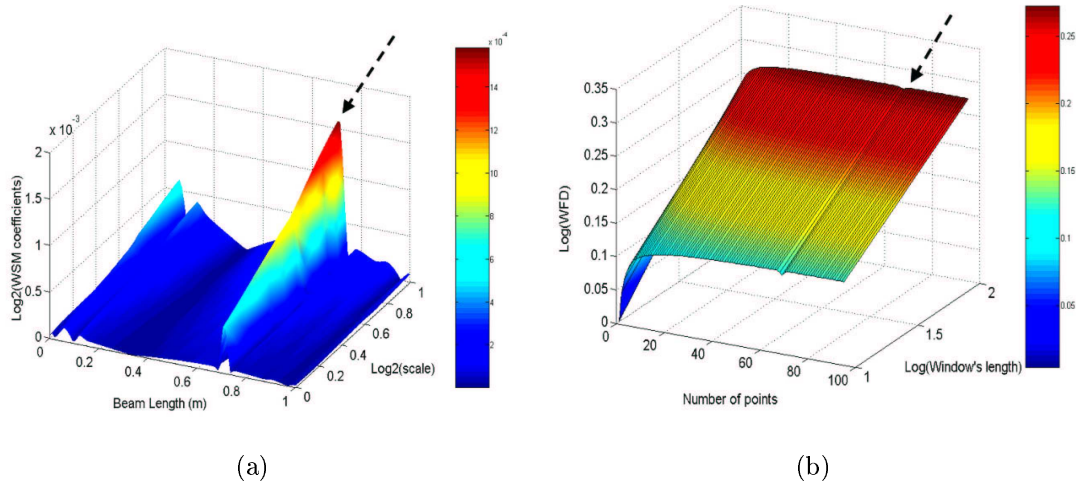


FIG. III.27 : Carte des singularités WSM et ligne de maxima à 0.7 m (a), et dimension fractale locale FD, le changement abrupte de complexité laisse apparaître le défaut autour de 70 points (0.7 m) (b)

III.2.6.2 Résultats du benchmark

En général, les 3 algorithmes reconnaissent même de très petits défauts ($dI > 0.5$ soit $c/h > 0.8$). De plus pour une même variation d'inertie, le comportement des indicateurs (capacité à localiser) change selon la localisation. Cela justifie le fait d'utiliser un outil tel

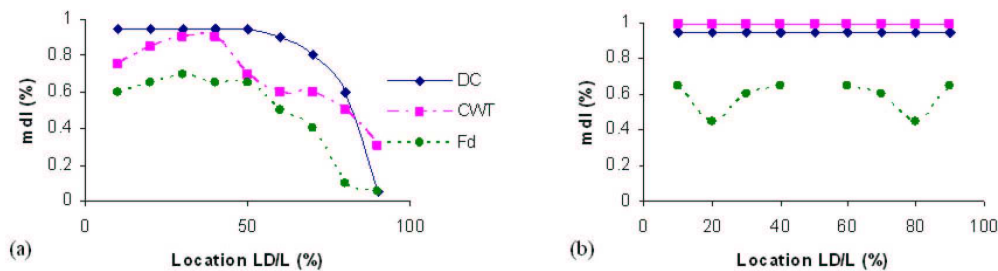


FIG. III.28 : Défaut minimum mdI en fonction de la localisation pour une poutre EL (a), et EE (b)

que les réseaux de neurones pour approximer la véritable sévérité pour n'importe quelle localisation de défaut (Figure III.28).

Tous les algorithmes ont un comportement qui dépend de la courbure de la déformée (et donc des conditions limites). Ainsi il est plus difficile de reconnaître un défaut proche de l'extrémité libre d'une poutre encastree (Figure III.28 (a)).

D'autre part pour la deuxième condition limite EE (Figure III.28 (b)), DC et CWT arrivent à détecter un très petit défaut quelque soit sa localisation (importance de la courbure) alors que FD qui n'utilise pas le lissage mène à une erreur pour un défaut situé au milieu de la poutre et obtient des résultats très faible autrement.

La méthode CWT obtient la meilleure robustesse au bruit pour une précision la plus fine globalement, quelque soit la condition limite et la position du défaut.

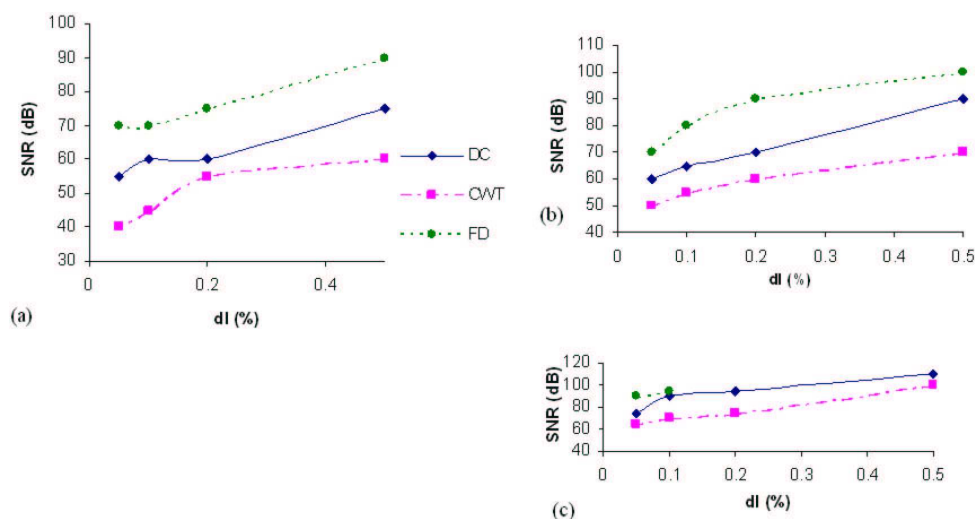


FIG. III.29 : Robustesse au bruit pour 3 localisations de défaut d'une importance 20% (a), 50% (b) et 80% (c) pour une poutre EL

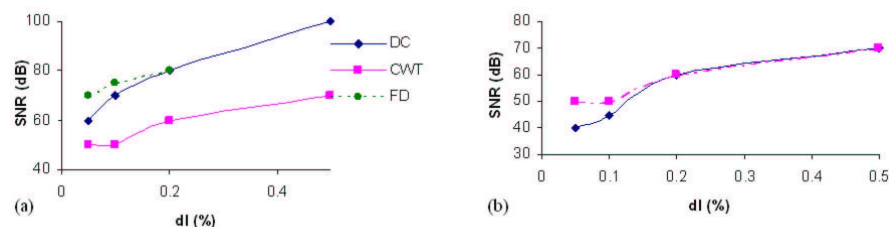


FIG. III.30 : Robustesse au bruit pour 3 localisations de défaut d'une importance 20 ou 80% (a), 50% (b) pour une poutre EE

Le maximum de SNR est inversement proportionnel à la sévérité du défaut quelque soient les conditions limites (Figure III.29 et III.30).

Ces expériences démontrent empiriquement que notre méthode obtient globalement les meilleurs résultats. L'avantage des deux méthodes les plus robustes (DC et CWT) est la construction d'un pseudo état de référence qui permet de mettre en évidence les singularités. De plus elles possèdent tous les capacités à détecter de multiples défauts, en faisant l'hypothèse bien sûr qu'ils ne soient pas trop proches (leur distance ne doit pas être inférieure au pas d'échantillonnage).

En pratique l'interaction humaine avec l'algorithme (les entrées utilisateurs comme les valeurs de seuil ou les extrema locaux) doit être minimale afin de distinguer facilement le bruit d'un défaut. Un système expert pourrait permettre de résoudre ce problème [SK04]. En conclusion, notre benchmark se résume par le tableau III.1 :

Paramètres	CL	mdI	SNR	Entrées	Quantification	Multiples défauts	Total
CWT	+	+	++	+	+++	+	+9
DC	+	+	+	++	+	+	+7
Fd	-	-	-	+++	+	+	+2

Tableau III.1, Conclusions du benchmark : l'algorithme que l'on a développé est le plus performant notamment dans sa robustesse au bruit.

III.2.7 Premières conclusions

Nous avons développé une méthode générale de diagnostic que l'on peut adapter à n'importe quel type de matériau. Ce chapitre nous a permis de valider nos résultats de simulations. On a aussi essayé de montrer les avantages et la fiabilité de notre méthode tout en pointant la nécessité d'avoir des déformées haute résolution. De plus, nous avons aussi introduit les réseaux de neurones comme solution à notre problème d'identification de l'importance du défaut. Pourtant cette identification, peu réaliste, ne nous satisfait pas d'autant plus qu'on utilise un apprentissage supervisé. Une approche mixte, mêlant les 3 algorithmes de detection testés, pourrait permettre de prédire l'importance du défaut à partir de tous les indicateurs que l'on peut extraire. Une étape de classification de l'endommagement pourrait être mise en place (léger, moyen, important, critique). D'autre part, on a vu que l'optimisation est un outil privilégié pour résoudre l'équation d'Olgac (dans des cas simples). On peut se demander s'il est nécessaire de pouvoir identifier les

rigidités de liaisons ou juste d'être capable d'estimer la qualité de l'assemblage. L'aspect visuel des déformées permet à l'expert humain de qualifier le type d'assemblage. A partir d'indicateurs tels que la pente de la déformée aux extrémités ou l'asymétrie de la courbe (et ce pour plusieurs modes), on pourrait généraliser en utilisant des réseaux de neurones pour prédire la qualité des assemblages. La dernière partie de cette thèse présentera notre travail expérimental sur une structure de type portique, tout en pointant ses défauts et ses limites. On essaiera aussi de traiter du problème de système expert et d'aide à la décision.

III.3 Validation

Nous proposons en premier lieu une étude de 2 cas de la littérature. Sur les 2 exemples choisis, un expert pourrait établir un diagnostic. Seulement, notre but est de faciliter le choix de l'expert et d'automatiser le diagnostic. On remarquera aussi le fait que ces 2 exemples n'ont pas utilisé les remarques que l'on a faites sur l'acquisition optimale de déformées. Finalement, on validera notre méthode sur 2 exemples expérimentaux à complexité croissante : tout d'abord une poutre encastree simplement endommagée [Ma04] puis un portique avec une colonne doublement endommagée.

III.3.1 Confrontation de notre méthode avec des exemples de la littérature

L'exemple de Hong et al [Ha02] est une poutre endommagée ($L/Ld = 1.2m/0.8m$) en aluminium ($70GPa, 2700kg/m^3$) supportée supportée. On voit sur la figure III.31 (a) que Hong et al ont utilisé une faible résolution spatiale (39 points sur 1.2 m) [Ha02].

L'expert peut analyser directement cette courbe en disant par exemple que la liaison de l'extrémité droite de la poutre est moins rigide que celle de gauche. D'autre part, deux changements de courbure peuvent être interprétés comme la présence de 2 zones endommagées (autour de 0.1 et 0.8m). Les auteurs localisent cependant un seul défaut autour de 0.81 m, avec pour caractéristique $c/h = 0.5$ sur $W_D = 3cm$ (soit $dI=0.125$).

On remarque sur la figure III.31 (b) que la ligne de maxima (en orange) se situe bien aux alentours de 800 mm et qu'il y a des effets de bord. Cela induit d'utiliser un algorithme

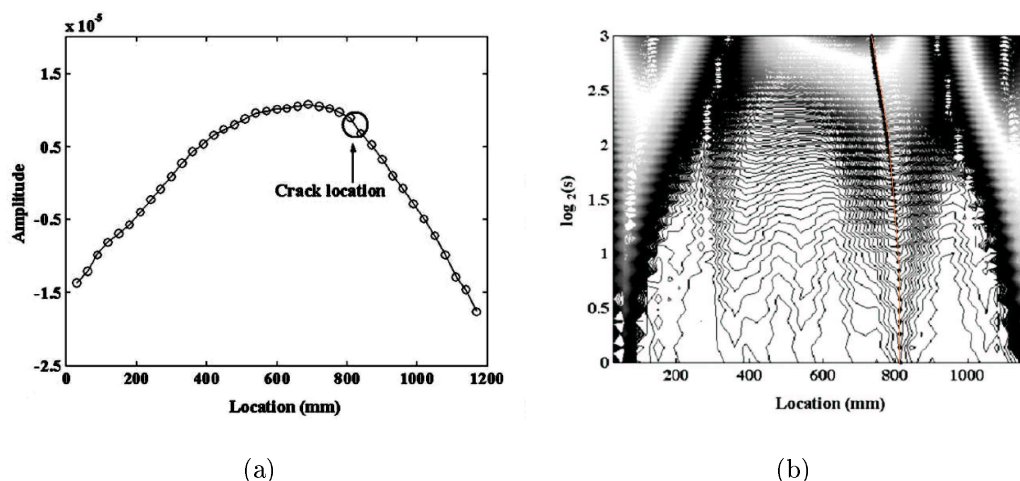


FIG. III.31 : La déformée modale expérimentale de Hong et al (a), et W_{YE} avec ligne de maxima en orange (b)

d'extraction des lignes de maxima fiable et surtout de trouver l'échelle optimale (ici 0-8) pour obtenir une valeur de α entre 0 et 1 ($0 < \alpha < 1$).

Regardons maintenant les résultats obtenus en utilisant notre méthode. La fonction lissée s'ajuste bien avec les données expérimentales (Figure III.32 (a)).

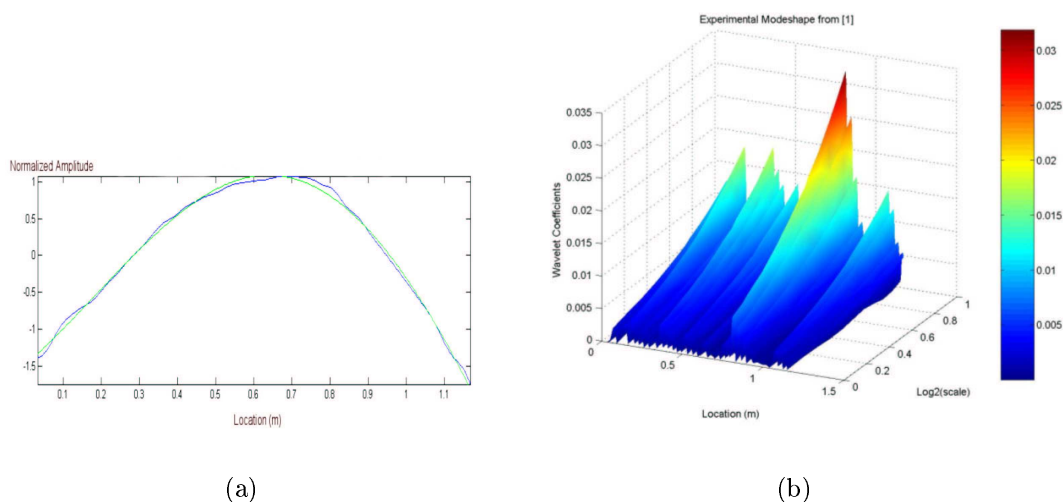


FIG. III.32 : La déformée (Hong et al), en bleu le signal expérimental interpolé, en vert la fonction lissée (a), W_{YE} avec une ligne de maxima à $L_D=0.8m$ (b).

De plus la ligne de maxima est bien mise en évidence autour du défaut sur la carte des singularités (Figure III.32 (b)). Une carte des maxima seuillés peut permettre d'atténuer les lignes de maxima parasites.

Le deuxième exemple est tiré de Douka et al [Da04] (Figure III.33). C'est une poutre endommagée, encadrée libre, en plexiglass où le défaut est localisé à L_d ($L/L_d = 0.3m/0.06m$). Sur la figure III.33 (b), la ligne de maxima se situe bien aux alentours de

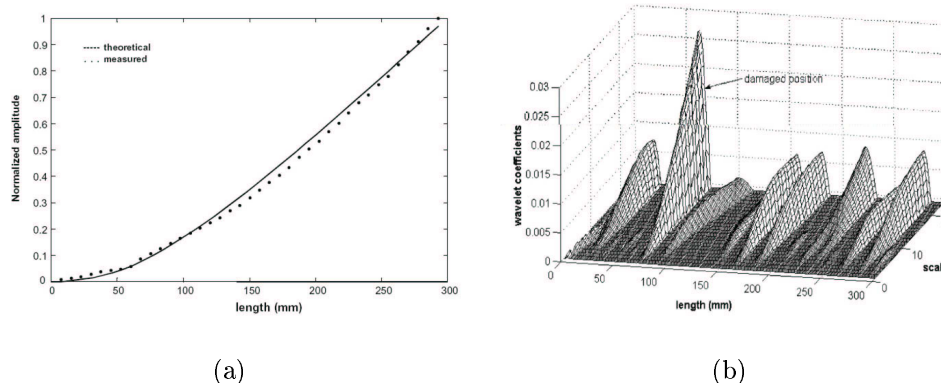


FIG. III.33 : La déformée modale expérimentale de Douka et al (a), et W_{YE} avec ligne de maxima identifiant le défaut autour de 60 mm (b)

0.06 m. Ils estiment l'exposant de Lipschitz et le facteur d'intensité sur l'échelle (0-16). On peut remarquer que si le défaut est bien identifié par la ligne de plus grande amplitude, d'autres lignes apparaissent (bruit).

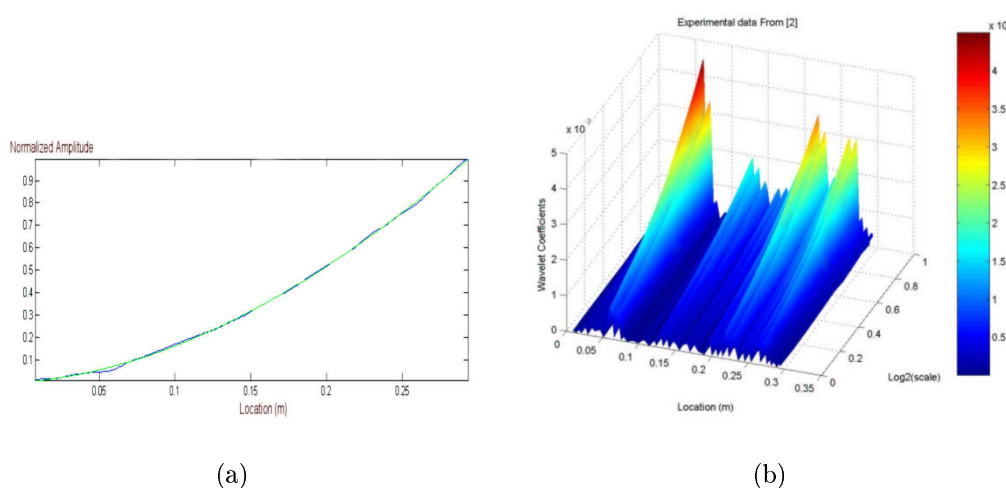


FIG. III.34 : Fonction analytique ajustée avec les données expérimentales interpolées de Douka et al (a), et carte des singularités associée (non seuillée) (b)

En calculant d'abord la fonction ajustée, on estime un pseudo état de référence (Figure III.34 (a)). La carte des singularités (Figure III.34 (b)) laisse bien apparaître une ligne de maxima prononcée autour de $L_D=0.06m$. L'effet de l'interpolation par splines peut

expliquer ce bruit de fond (petite variation autour de la fonction lissée). Nous avons utilisé cette résolution pour être proche de l'échantillonnage utilisé par Douka et al; en effet, ils utilisent 40 points de mesure sur 0.3 m mais ils augmentent artificiellement la résolution avec une interpolation par splines jusqu'à 390 points; la précision de l'analyse en ondelettes est ainsi augmentée.

La quantification des défauts donne des résultats satisfaisants (erreurs d'identification inférieures à 10%) pour les 2 exemples étudiés. Le réseau de neurones a donc bien réussi à généraliser dans les 2 cas (cf tableau III.2).

On résume, dans le tableau ci dessous, les 2 expériences en terme de résolution, protocole experimental, paramètre d'analyse et résultats obtenus en comparaison avec l'expert. En comparaison avec les résultats de la bibliographie [Ha02, Da04] notre méthode s'est avérée aussi fiable au niveau localisation mais beaucoup plus robuste au niveau quantification. En effet, Hong et al [Ha02] ne proposent qu'une corrélation entre l'exposant de Lipschitz et l'importance du défaut (pour une position de défaut donné et des résultats issus de simulation éléments finis). Douka et al vont plus loin et identifient le défaut à partir d'une loi polynômiale entre le facteur d'intensité A et la profondeur du défaut. Ils estiment un défaut de 50% alors que l'importance réelle est de 30 %. Ils expliquent ce biais par une estimation (expérimentale) erronée de l'exposant de Lipschitz et du facteur d'intensité qui a tendance à augmenter l'importance de la singularité.

En conclusion, limiter le bruit permet d'obtenir une carte des singularités satisfaisante, à condition que l'on soit en haute résolution spatiale. Ainsi la déformée de Hong et al avec une résolution de 32.5 points/m n'est pas satisfaisante pour notre méthode. Si la ligne de maxima existe sur ces résultats, on peut se demander avec quelle résolution les auteurs l'ont obtenue (sans doute avec une interpolation).

Paramètres	Problème de Hong et al	Problème de Douka et al
$N_{\text{experimentale}}$	39	39
N_{interp} Auteurs	?	390(splines)
N_{interp} Morlier	292 (splines)	293 (splines)
Résolution (points/m)	32.5	130
Haute résolution (points/m) Auteurs	?	1300
Haute résolution (points/m) Morlier	243	977
Moyennage FRFs	5	?
Référence	?	1
Échelles	0-8	0-16
Pseudo fréquence	$4.3416 \leq 4.73$ (\sim SS)	$2.3 \geq 1.87$ (\sim EL)
c/h	0.5	0.3
c/h identifié Auteurs	?	0.5
dI	0.125	0.345
dI identifié Morlier	0.122	0.37
Avis de l'expert	2 zones	1 zone

Tableau III.2, Comparaison des 2 déformées étudiées avec notre méthode.

Une première conclusion peut être mise en évidence : au niveau localisation notre méthode donne des résultats très proches de ceux de Hong et al et Douka et al. Cependant le seuillage et l'utilisation d'un pseudo état de référence permettent d'éliminer les lignes de maxima dues au bruit. De plus au niveau caractérisation, nos outils s'avèrent être plus fiables et surtout adaptables à tous les problèmes alors que la procédure d'identification de Douka et al n'est valable que pour la poutre sous étude.

III.3.2 Validation : résultats expérimentaux

Le but de cette section est d'analyser des structures à complexité croissante. Nous étudierons donc en premier lieu une poutre encastrée avec un défaut localisé, puis un portique doublement endommagé.

III.3.2.1 Poutre encastrée en MDF

Le premier exemple expérimental est une simple poutre en MDF (Medium Density Fiber, bois reconstitué à base de fibres) de 0.28 m de longueur avec un défaut situé autour de 0.22 m d'une largeur de 1 mm sur 8 mm de profondeur ($dI=0.68$). La section carrée est de $0.025 \times 0.025 m^2$. Le module d'Young est proche de 5000 MPa avec une densité de $550 kg/m^3$. Un marteau d'impact PCB et 2 accéléromètres ICP sont utilisés pour mener une analyse modale utilisant la méthode du peak picking. Les points de la déformée sont les pics de la partie imaginaire de la FRF moyennée et normalisée par rapport à la référence.

On obtient ainsi une déformée basse résolution de la figure III.35(a) où 2 zones semblent endommagées (la première autour de 0.15 m ne résulte pas d'un défaut voulu).

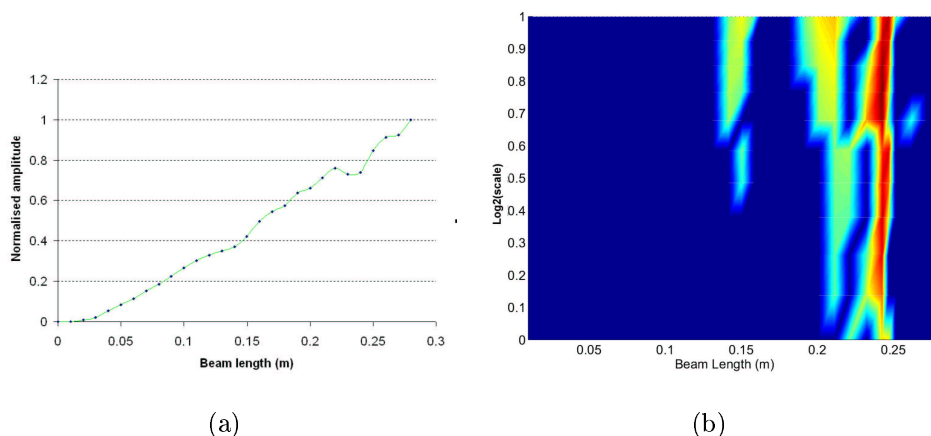


FIG. III.35 : Déformée expérimentale (29 points) d'une poutre MDF endommagée autour de $L_d=0.22$ m (a) et sa carte des singularités avec une zone de maxima autour de L_d (b)

Le résultat de notre traitement sur la déformée laisse entrevoir une zone de défaut (Figure III.35 (b)). Cette zone due à un défaut de 1 mm de profondeur peut largement s'identifier sur les points expérimentaux par un changement local de la courbure entre 0.22 et 0.24 m.

L'importance de cette zone peut s'expliquer par un phénomène d'ouverture et de fermeture du défaut qui serait amplifié près d'une extrémité libre, lui donnant ainsi, cet aspect flou sur 2cm (20 fois la largeur du défaut).

Pour des raisons de précision (et de comparaison) nous avons augmenté chaque résolution spatiale jusqu'à 292 (ou 293) points en utilisant une interpolation par splines cubiques [Da04]. On approche la courbe par morceaux (localement) et on prend des polynômes de degré faible (3) pour limiter les oscillations (Figure III.36).

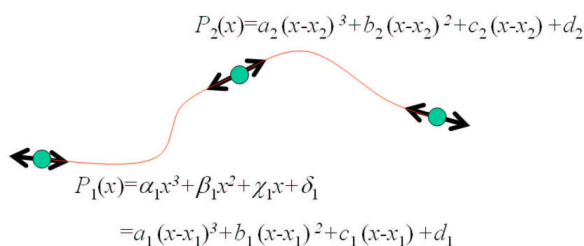


FIG. III.36 : Illustration de l'interpolation par splines cubiques

Un autre point important est que le fait d'utiliser un seuillage sur notre exemple (Figure III.37(b)) permet par exemple d'éliminer les faux défauts dus au bruit.

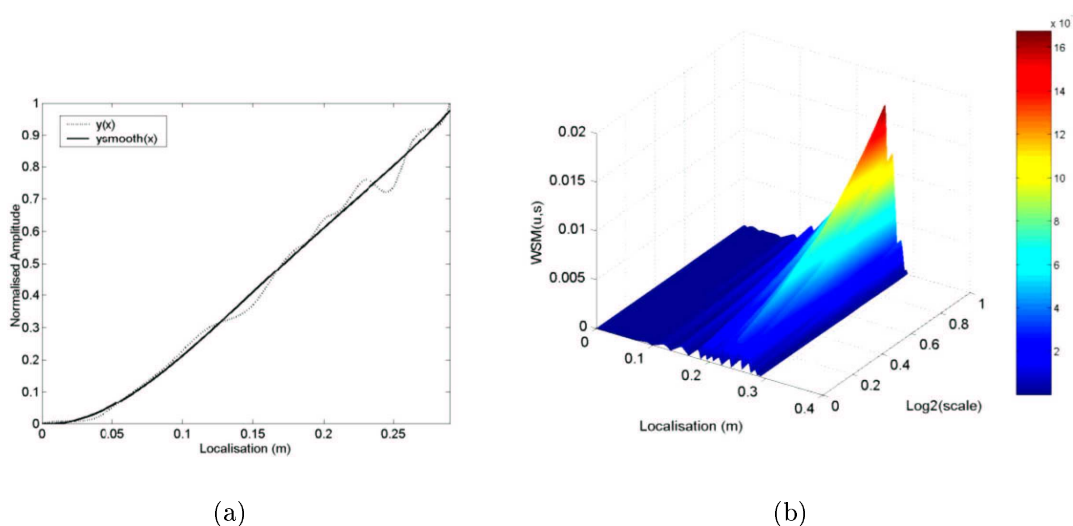


FIG. III.37 : Notre déformée expérimentale avec l'effet d'arrondi des splines (a), et notre carte des singularités laissant apparaître le défaut (b)

Le tableau III.3 illustre les résultats du diagnostic de la poutre encastree.

Paramètres	Morlier et al
$N_{\text{experimentale}}$	29
N_{interp}	292 (splines)
Résolution (points/m)	104
Haute résolution (points/m)	1042
Moyennage FRFs	15
Référence	1
Échelles	0-4
Pseudo fréquence	3.15 (SR)
dI_{Id} (dI réel)	0.67 (0.68)
Avis de l'expert	2 zones

Tableau III.3, Résultats de notre méthode sur l'exemple d'une poutre MDF encastree.

Pour pouvoir utiliser notre méthode, nous avons simulé les déformées haute résolution avec une interpolation par splines, qui, si elle permet d'obtenir tous les points que l'on veut, impose un effet de courbure qui ne reflète pas nos mesures. On voit donc qu'il est nécessaire d'utiliser des méthodes optiques beaucoup plus fiables. Le problème d'interpolation numérique par splines montre aussi l'importance de l'échantillonnage dans le diagnostic. D'où la théorie de l'échantillonnage optimal pour s'affranchir de ces effets. On peut noter de plus que pour le MDF, qui est un bois reconstitué, on obtient un résultat satisfaisant après 10 moyennages de FRFs (premier mode fiable). Ces résultats mettent en évidence qu'il est beaucoup plus difficile d'étudier des structures en bois du fait de la complexité de ce matériau et aussi du fait qu'il est moins homogène que des matériaux comme le plexiglass ou l'aluminium.

La difficulté de l'analyse modale classique (accéléromètres et marteau) est autant pratique que théorique. En effet, au niveau pratique, cela demande beaucoup de temps (en raison du nombre de moyennage). Cela nécessite aussi beaucoup de temps de calcul sous Diamond (ou Matlab) et une préparation des fichiers de configuration (emplacement des capteurs, choix de la méthode d'estimation...) très lourde. D'autre part, sur des petites structures comme celle que nous avons testées, le poids de l'accéléromètre entre en jeu et

limite notre précision. De plus, des choix doivent être faits sur l'embout utilisé pour le marteau, le placement des capteurs, le choix des paramètres de l'analyse spectrale pour la FRF (fenêtrage, taille des échantillons), qui influent sur la précision de nos mesures. Les solutions optiques telles que les vibromètres lasers sont beaucoup plus ergonomiques, robustes et éprouvées et ces spécificités deviennent critiques lorsqu'on étudie une structure plus complexe, ou un matériau comme le bois.

III.3.2.2 Portique en bois

Cette section est en fait en grande partie tiré d'un article que l'on a proposé à "Journal of Sound and Vibration". Il met en avant l'utilisation de notre méthode sur une structure de laboratoire de type portique. Ce n'est donc pas un diagnostic mais plutôt une validation de méthode. On propose, au final, des solutions pour adapter (ou compléter) notre méthode afin d'effectuer un diagnostic ou une surveillance de structure en bois.

Dans l'optique de valider notre méthode, nous voulions nous appuyer sur un matériel innovant, un diagnostic totalement supervisé et un plan d'expériences complet. Malheureusement, nous n'avons pas pu, en une après-midi d'expérience, effectuer tout ce que nous avions planifié. En effet, nous ne disposions que d'une demi journée de présentation gratuite de la part de Polytec qui nous a d'ailleurs gracieusement offert les données de l'analyse modale. Voilà pourquoi nous n'avons effectué notre méthode d'identification que sur une partie de la structure, et aussi pourquoi nous n'avons pas pu étudier le comportement dynamique de l'assemblage en fonction du nombre de boulons dans la liaison poutre-colonne.

Quand nous parlons de diagnostic supervisé, nous voulons juste dire que nous connaissons l'emplacement et l'importance des défauts. Notre objectif était de ne pas avoir de modèle éléments finis 3D de la structure et de n'utiliser que les données de l'analyse modale.

Notre structure sous test est un portique en bois (Lamellé-collé), les poutres ont toutes la même dimension, $b=h=80$ mm et $L=920$ mm (Figure III.38 (a)).

Le matériel expérimental est constitué d'un vibromètre laser à balayage PSV 400 de chez Polytec et d'un pot vibrant (+ stinger) pour l'excitation. Pour obtenir les déformées modales opérationnelles (ODS), on effectue l'acquisition des accélérations en chaque point

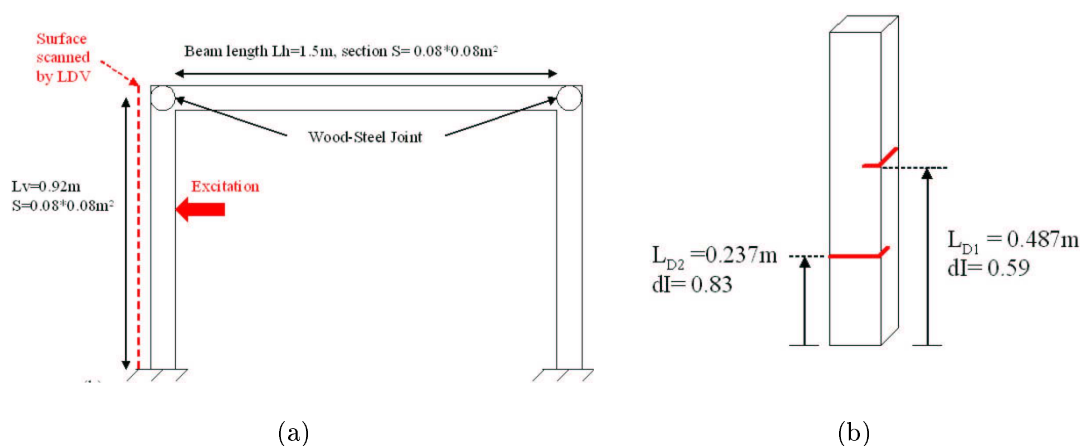


FIG. III.38 : Protocole expérimental (a) et zoom sur la colonne de gauche doublement endommagée (b)

où se déplace la tête optique du laser et on enregistre aussi avec un capteur de force les signaux issus du pot vibrant. Le maillage des points d'acquisition forme 4 lignes (non parallèles) de 65 points. Ainsi, on calcule les FRFs pour chaque point de mesure. La déformée est estimée autour d'une fréquence de résonance à partir des FRFs moyennées. Comme à la résonance l'ODS est dominé par un mode, il peut clairement approximer la déformée en tenant compte que la force d'excitation n'est pas appliquée sur un noeud.

Pour cette étude on se focalise sur l'élément doublement endommagé (traits de scie) du portique (Figure III.38 (b)).

- Le premier défaut est introduit à $L_{D1} = 487\text{ mm}$ à partir de la base de la colonne. Il consiste en une diminution d'inertie locale (perpendiculaire à l'excitation) d'une profondeur de 13 mm et d'une largeur de 1 mm ($h=67\text{ mm}$, soit $dI=0.58$).
- Le second défaut est perpendiculaire au premier est d'une profondeur de 16 mm pour une largeur de 1 mm ($b=64\text{ mm}$, soit $dI=0.83$) localisé à $L_{D2} = 237\text{ mm}$.
- D'autre part les liaisons sont assurées à la base par un assemblage boulonné et aux liaisons poutre-colonne par un tenon mortaise renforcé par un assemblage boulonné (rigidité variable qui croit avec le nombre de boulons...de 1 à 5).

Nous avons développé un outil de modélisation éléments finis de portique sous Matlab, afin de faciliter le choix du mode à étudier. Comme le montrent les simulations éléments finis le troisième mode est intéressant car il possède une courbure et une amplitude importante. De plus expérimentalement, c'est le premier mode de pure flexion que l'on peut étudier comme un élément EE non parfait.

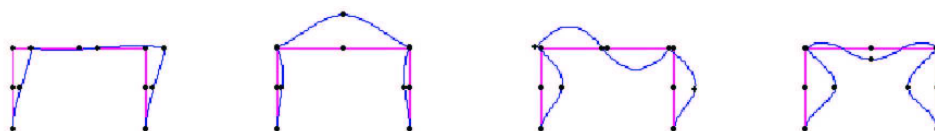


FIG. III.39 : 4 premières déformées théoriques de la structure sous étude

Le logiciel d'analyse modale de Polytec permet d'extraire facilement la déformée opérationnelle optimale autour de 264 Hz. On repère sur le spectre moyenné les résonances de la structure. A chaque pic est associé une animation de la déformée pour cette résonance. La durée moyenne d'acquisition avec une telle résolution est proche de 30 minutes (d'où un nombre important de moyennages).

Le maillage d'acquisition résulte donc en une surface de 4×65 points (Figure III.40) en utilisant la résolution optimale de la théorie de Sazonov (proche de 65 points/m pour une poutre Encastrée-Encastrée).

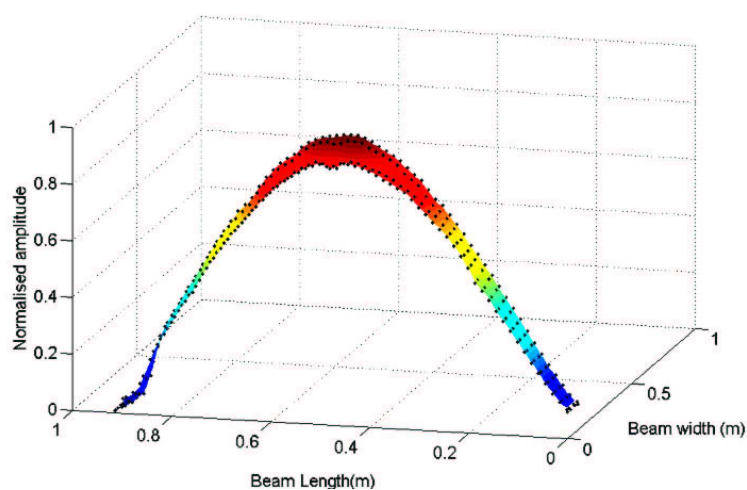


FIG. III.40 : La déformée opérationnelle autour de 264 Hz

Nous avons développé une interface au logiciel de Polytec afin de reconstruire les déformées 2D sous Matlab. Ce logiciel permet aussi d'estimer la déformée 1D médiane à partir d'une interpolation des valeurs des données 2D.

La figure III.41 propose quelques images issues de l'animation de la déformée. Le logiciel permet de rapidement visualiser le comportement dynamique de la poutre pour chaque résonance ainsi que d'extraire au format tableur les résultats de l'analyse modale.

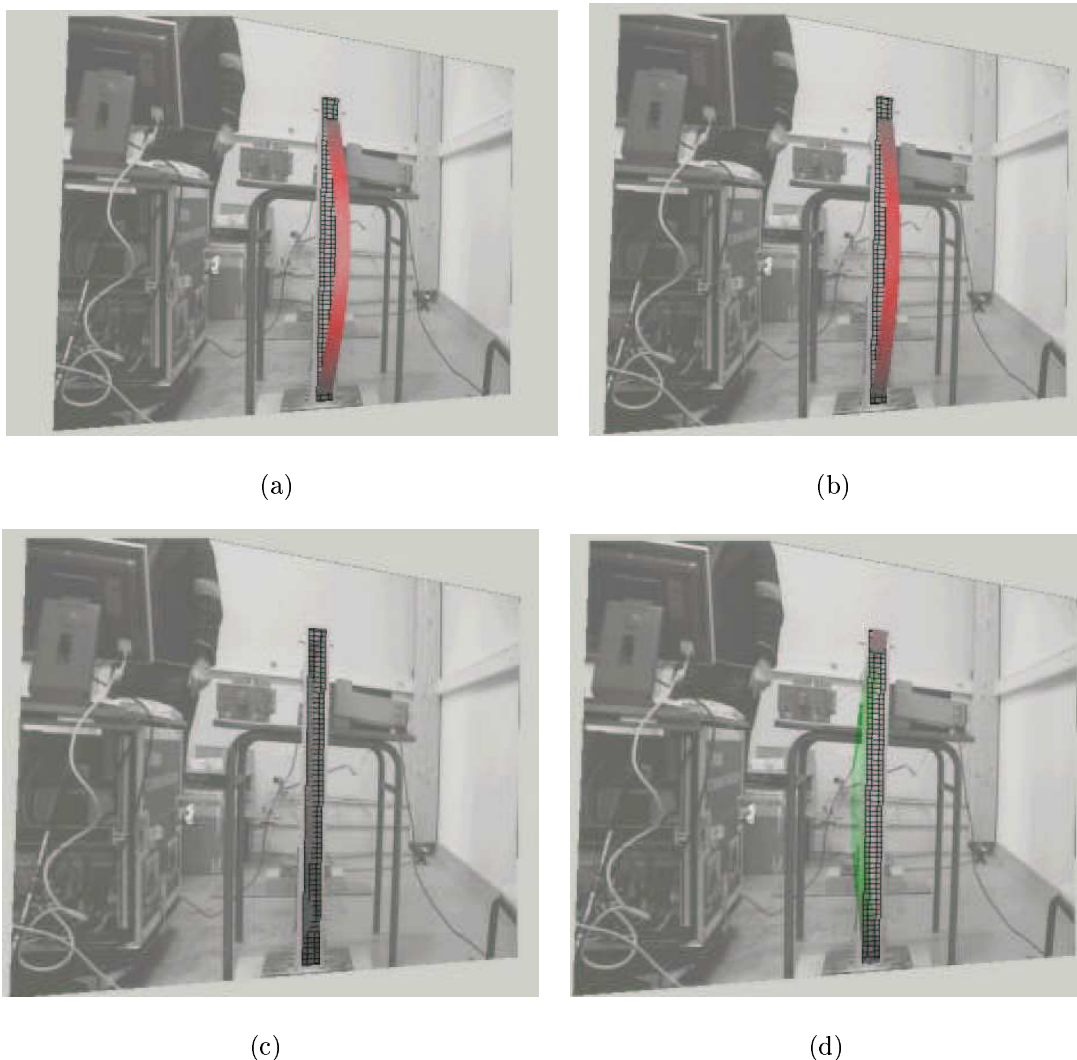


FIG. III.41 : Animation de la déformée autour de 264 Hz surimposé sur l'image de l'expérience photographiée depuis le LDV. L'orientation de l'animation est modifiée pour pouvoir voir la structure se déformer au cours du temps de (a) à (d)

On estime à partir de ces données de surface, la déformée (1D) la plus probable, en interpolant la ligne médiane de la surface d'acquisition. L'algorithme utilisé permet d'extraire une ligne de 260 points. De plus on suppose que la ligne médiane représente bien les caractéristiques dynamiques du matériau : le matériau est supposé homogène. Enfin notre hypothèse se justifie du fait que si l'on extrait d'autres lignes de cette surface, les déformées extraites sont très bien corrélées avec la déformée médiane.

La figure III.42 présente la déformée interpolée et moyennée sur la surface entière.

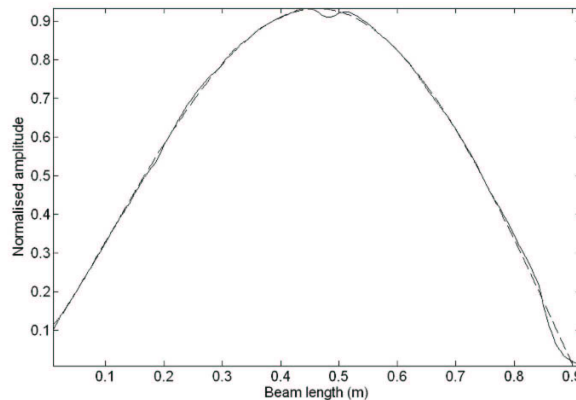


FIG. III.42 : En trait plein : la déformée 1D calculée qui nous permet d'identifier les défauts. En pointillé : la déformée ajustée avec la formule analytique.

Ces données sont lissées avec la formule analytique pour obtenir l'équation suivante :

$$Y_L = 0.255 \cosh(3.719x) - 0.255 \sinh(3.719x) - 0.175 \cos(3.719x) + 0.869 \sin(3.719x)$$

Le premier défaut L_{D1} est localisé avec précision du fait qu'il appartient à la partie courbe du signal. Le second défaut a moins d'effet sur la déformée (la diminution d'inertie plus petite) et de plus il appartient à la partie la moins courbe de la déformée.

La carte des singularités est calculée (Figure III.43) en utilisant le chapeau mexicain comme ondelette mère. Elle met en évidence 3 zones endommagées, plus un bruit de fond autour de L_{D2} , sans doute dû à l'hétérogénéité du matériau bois. En effet on peut être sûr de la fiabilité de nos mesures étant donné que l'écart type du bruit de mesure du LDV est proche de $1e-3$ et que le nombre de moyennages est important.

La zone autour de 0.2 m est très complexe, le défaut ne peut pas être précisément identifié mais il peut être clairement distingué du bruit (ou de l'hétérogénéité). En effet certains de ces indicateurs (Lipschitz) sont tronqués par le bruit et sont hors de l'espace des données de la base d'apprentissage. De plus il est évident qu'une structure en bois est beaucoup plus complexe à analyser qu'une structure en acier par exemple.

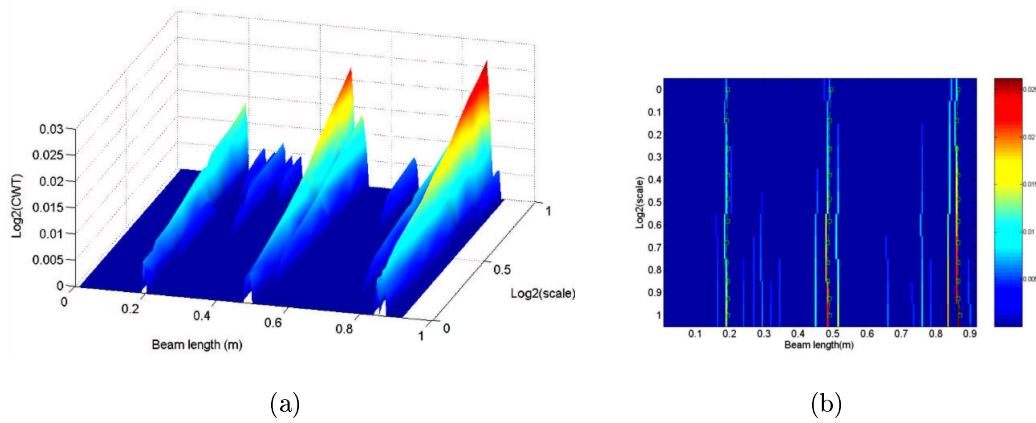


FIG. III.43 : La carte des singularités de la déformée expérimentale (a) et lignes de maxima extraites permettant de caractériser les défauts(b)

Dans ce cas, on peut localiser les deux défauts mais la caractérisation ne peut être réalisée que sur le défaut à $L_{D1} = 0.487m$. On pourrait compléter cette analyse pour essayer de quantifier tous les défauts en utilisant par exemple un couplage de notre méthode avec des outils expérimentaux du type ultrasons ou émission acoustique.

On peut remarquer que la troisième ligne de maxima se trouve aux alentours de l'assemblage poutre-colonne. La figure III.43 (b) laisse apparaître le comportement très rigide de la liaison qui crée une singularité sur la déformée. Elle est due expérimentalement à l'addition d'un assemblage boulonné à un tenon mortaise qui augmente largement la rigidité localement et empêche tout déplacement.

La ligne de maxima à L_{D1} est estimée en utilisant notre algorithme d'extraction d'indicateurs (Figure III.43 (b)). Les valeurs des indicateurs pertinents du défaut sont définis dans le tableau de la figure III.44.

Damaged mode shape parameters	Extracted indicators using WSM
$\lambda_1 L = 3.4215$	$\alpha = 1.36$
$ Y'(x = L_{D2}) = 0.29$	$\log_2(A) = -7.61$
$L_D / L = 0.5311$	$SR = 0.2$

FIG. III.44 : Indicateurs extraits de la ligne de maxima autour de 0.487 m

Ces informations sont ensuite entrées dans notre outil de quantification utilisant une base d'apprentissage MEF et un réseau de neurones. En sortie on identifie l'importance du défaut avec précision ($dI_{Id}(L_{D1}) = 0.61$ pour 0.59) avec une bonne confiance ($R^2 = 0.996$) sur la figure III.45 (b).

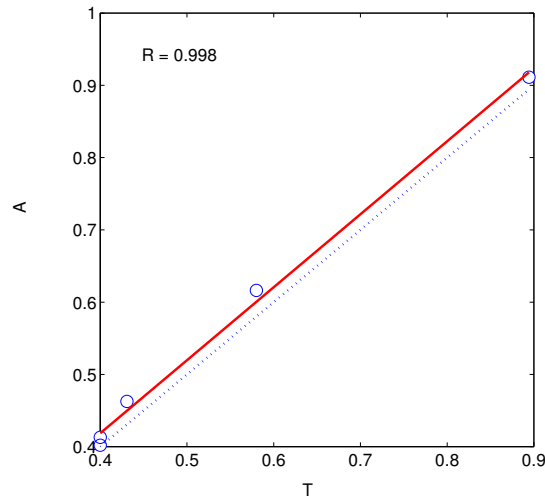


FIG. III.45 : Identification de l'importance du défaut à L_{D1} , $dI_{Id} = 0.61$. En abscisse T : les données cibles de la base d'exemples à reconnaître. En ordonnée A : les sorties du RN, les valeurs identifiées de dI.

Pour l'estimation des conditions limites, on estime $\pi < \lambda L = 3.4215 < 4.73$. Cela correspond à une connection semi-rigide, dans le sens ou même si la liaison poutre colonne est très rigide, la liaison à la base de la colonne autorise de la rotation. En fait cela représente surtout le caractère non parfait de la liaison.

III.3.3 Conclusions, limitations et perspectives

En n'utilisant aucune information *a priori* on a réussi sur une structure relativement complexe, à localiser plusieurs défauts. L'identification n'a été possible que pour le défaut situé sur une partie de la déformée très courbe. L'utilisation d'un LDV a été très satisfaisante notamment pour sa robustesse au bruit et sa capacité à échantillonner.

Cependant, une des limitations importantes est le choix critique du mode à étudier. En effet, comme la localisation dépend de la courbure, il faudrait automatiser cette procédure de choix du mode optimal. Or, plus la structure est complexe, plus il y a de modes intéressants...

De plus, nos outils nécessitent un utilisateur averti, cet expert qui sait distinguer un vrai défaut. Globalement la voie à suivre est donnée par Sazonov et al [Sa02a, Saz02]. En effet, dans sa thèse, ce dernier limite l'aspect humain par l'utilisation d'un système expert qui fait les choix à la place de l'utilisateur. En premier lieu, il met en place un système d'amélioration de la réponse (algorithme génétique et fonction de sensibilité) afin de réduire l'impact du bruit. Puis, il développe un système expert à logique floue, où son choix est de remplacer un simple seuillage (si supérieur au seuil alors défaut, bruit sinon) par la modélisation d'une approche humaine.

D'autre part, on a dans notre étude ramené le matériau bois à un matériau typiquement homogène (à une dimension). Or, l'effet de l'anisotropie du bois est évident sur les données de surface : on distingue des modes très complexes mélanges de torsion et flexion alors que l'on attendait un mode simple. De plus, du fait de son hétérogénéité, il est difficile sur du bois de localiser des petits défauts. Il est important de réfléchir à un couplage de méthodes permettant d'estimer cette hétérogénéité.

Au niveau de l'identification, on fait le choix de modéliser le défaut par une diminution d'inertie, donc de rigidité. On peut se demander si ce critère est limitatif. On s'aperçoit aussi que l'utilisation d'un apprentissage supervisé rend notre approche faible. En effet pour des indicateurs hors de la base d'apprentissage, l'étape de quantification n'est pas possible. Ainsi on devrait réfléchir à une approche non supervisée comme les cartes de Kohonen permettant de classer et non quantifier le défaut.

Finalement, si on doit faire le diagnostic d'une structure *in situ* on doit se donner les moyens d'une mesure fiable et précise comme le vibromètre laser. Parallèlement des systèmes à caméra haute résolution et haute vitesse sont envisageables. En effet elles peuvent aisément être déplacées et couplées à un logiciel de traitement d'image, elles permettent d'obtenir des déformées très fiables à haute résolution [PS02, Pa05]. Une des difficultés attendues est la détection optimale de contour et bien sur l'extraction des caractéristiques dynamiques à partir seulement des images. Les derniers développements en analyse harmonique (transformée ridgelet, curvelet, ...) ou d'extraction de mouvement (modèles déformables géodesiques) ouvrent de nouvelles voies pour l'analyse des vibrations par traitement d'images.

Ainsi, une approche complémentaire à la notre serait de mesurer le mouvement de la structure (motion tracking) par des approches de contours actifs [BI97], et à partir de celui-ci de reconstruire les déformées avec une approche "output only", i.e. sans connaître l'excitation.

Conclusion générale

Le domaine de la détection de défaut par méthode vibratoire s'appuie sur beaucoup de travaux très différents. Certains nécessitent des modèles, d'autres font le choix de travailler sans information a priori. Pourtant ces travaux ont en commun l'aspect pluridisciplinaire et la motivation des auteurs à comprendre le comportement d'une structure endommagée que ce soit au niveau d'un élément de type poutre ou au niveau des assemblages.

Au début de la thèse on cherchait surtout un moyen de localiser les défauts sur les structures *in situ*. Puis on s'est posé quelques contraintes : ne pas connaître l'état de référence de la structure et ne pas utiliser d'informations a priori, c'est à dire se baser uniquement sur nos mesures. Ma formation plutôt orientée électronique et traitement du signal m'a poussé à m'intéresser à des outils innovants comme l'analyse de régularité par ondelettes et les réseaux de neurones pour localiser et quantifier d'une manière fiable les défauts à partir des déformées modales. Au niveau mesure on s'est attaché à trouver l'instrumentation la plus fiable pour notre étude (vibromètre laser). Mon intérêt pour la mécanique et les vibrations m'a permis de m'intéresser au problème très complexe d'identification des conditions limites afin de compléter notre méthode pour effectuer le diagnostic des assemblages.

Au niveau logiciel, notre méthode de diagnostic a été (comme nos outils numériques de simulation) développé sous Matlab. Elle nécessite en entrée le signal "déformée" (n'importe quel mode/fréquence). On voit donc l'aspect préjudiciable de notre méthode : si l'on n'étudie pas la déformée pertinente (et/ou si elle n'est pas fiable), on ne peut effectuer la détection. Voilà pourquoi on a décidé d'utiliser les méthodes optiques d'analyse modale beaucoup plus fiables à haute résolution. On aimerait par la suite limiter l'aspect humain de l'expert afin d'automatiser le diagnostic [Sa02a,Saz02]. On pourrait par exemple éliminer directement les faux défauts dus au bruit ou estimer les conditions limites à partir de

plusieurs indicateurs pertinents tirés de l'observation de la déformée (pente, asymétrie).

Les limitations de notre approche sont sans doute dues au fait que nos problèmes d'identification sont théoriques et peu réalistes (le défaut est identifié par une réduction d'inertie par exemple). Outre le fait de remplacer les étapes d'identification (importance du défaut ou rigidité de liaison) par des étapes de classification, on aimerait pointer le fait que le choix du mode à analyser est plutôt crucial et qu'il peut devenir sur des structures complexes un problème critique. Voilà pourquoi dans le flot de données (x modes par y poutres) que l'analyse modale complète de la structure peut nous apporter, il faudrait, de manière automatique, trier les données importantes (pertinentes) pouvant permettre de classer l'importance du défaut ou d'estimer la qualité des assemblages.

Dans le cadre de la surveillance, notre approche peut être utilisée en complément d'une méthode plus globale (basée sur un modèle éléments finis par exemple). D'autre part, il est nécessaire d'avoir d'autres informations afin de mieux comprendre les effets sur les déformées. Pour le matériau bois, on peut penser à la mesure de température ou de l'humidité.

Finalement, on pourrait prendre exemple toujours sur Sazonov [Sa04] : il a développé une méthodologie complète pour d'une part estimer l'état non endommagé de la structure, d'autre part localiser les défauts, et enfin estimer le temps de vie restant.

Une illustration de cette surveillance à distance est donnée ci dessous. Il s'agit d'une collaboration entre chercheurs (Clarkson University) et industriels (Transtech Systems).

Les points importants de la méthode WISAN (Wireless Intelligent Sensor and Actuator Network) sont :

- Le système est autonome et à faible consommation.
- Les accéléromètres (à faible coût et à contact de type MEMS) sont adaptés à la structure sous étude.
- Les capteurs sont reliés sans fil (WIFI) et synchronisés à un réseau (bus de terrain).
- L'identification automatique des paramètres modaux est effectuée à partir d'une excitation naturelle (ou ambiante).
- La détection de défaut se fait aussi de manière automatique sans nécessiter d'état de référence.
- L'estimation du temps de vie restant peut être estimée par méthode fiabiliste.

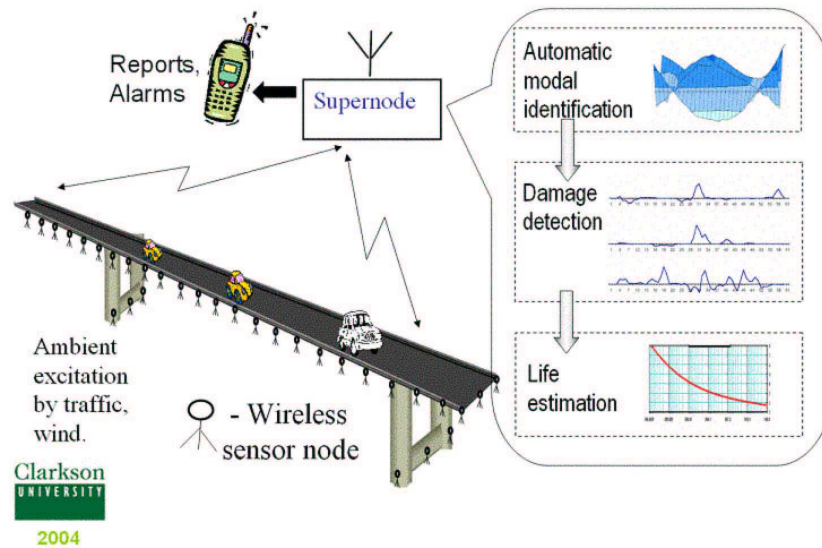


FIG. III.46 : Procédure de surveillance à distance élaborée par Sazonov

Comme le montrent les caractéristiques de cette méthode, la surveillance automatique (et autonome) de l'intégrité d'une structure a un coût : un coût, scientifique et technique, puisque l'on voit qu'il faut multiplier les outils et donc la complexité de la méthode (électronique, instrumentation, informatique, traitement du signal, intelligence artificielle, mécanique et génie civil), et un coût global, financier, pouvant paraître faible, relativement à la richesse architecturale des monuments et au coût d'une rénovation.

Bibliographie

- [Aa78] R.D. Adams et al. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20 :93–100, 1978.
- [Aa00] A.E. Aktan et al. Issues in infrastructure health monitoring for management. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000.
- [Aa01] H. Ahmadian et al. Boundary condition identification by solving characteristic equations. *Journal of Sound and Vibration*, 247(5) :755–763, 2001.
- [Aa04] J. Antoni et al. New separation techniques for output-only modal analysis. *Shock and Vibration*, 11 :227–242, 2004.
- [Ago97] F. Agosto. Damage detection based on the geometric interpretation of the eigenvalue problem. *PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute*, 1997.
- [Avi01] P. Avitabile. Experimental modal analysis - a simple non-mathematical presentation. *Sound and Vibration magazine*, 2001.
- [Ba04] A. Bulut et al. Real-time nondestructive structural health monitoring using support vector machines and wavelets. *Report 26 uiversity of California Santa Barbara*, 2004.
- [Bha02] A. Bhatti. Fundamentals of mechanical and structural vibrations. *Internet*, 2002.
- [BI97] A. Blake et M. Isard. Active contours. *Springer*, 1997.
- [CD80] T.G. Chondros et A.D. Dimarogonas. Identification of cracks in welded joints of complex structures. *Journal of Sound and Vibration*, 69(4) :531–538, 1980.
- [Da96] S. Doebling et al. Damage identification and health monitoring of structural

- and mechanical systems from changes in their vibration characteristics : A literature review. *LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory*, 1996.
- [Da97] S.W. Doebling et al. A computer toolbox for damage identification based on changes in vibration characteristics. *Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford*, 1997.
- [Da02] G. Dreyfus et al. Réseaux de neurones : méthodologie et applications. *Eyrolles*, 2002.
- [Da04] E. Douka et al. Crack identification in beams using wavelet analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 40(13-14) :3557–3569, 2004.
- [Ga03] L. Garibaldi et al. Identification and up-dating over the z24 benchmark. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(1) :153–161, 2003.
- [Ha02] J.C. Hong et al. Damage detection using the lipschitz exponent estimated by the wavelet transform : applications to vibration modes of a beam. *International Journal of Solids and Structures*, 39(7) :1803–1816, 2002.
- [Ha05a] L.J. Hadjileontiadis et al. Crack detection in beams using kurtosis. *Computers and Structures*, 83(12-13) :909–919, 2005.
- [Ha05b] L.J. Hadjileontiadis et al. Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(3) :659–674, 2005.
- [Jao02] L. Jaouen. Cours de vibrations. *Internet*, 2002.
- [Kat88] M. Katz. Fractals and the analysis of waveforms. *Comput. Biol Med.*, 18(3) :145–156, 1988.
- [Li02] W.L. Li. A new method for structural model updating and joint stiffness identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(1) :155–167, 2002.
- [LM03a] M. Basseville L. Mevel, M. Goursat. Stochastic subspace-based structural identification and damage detection - application to the steel-quake benchmark. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(1) :91–101, 2003.
- [LM03b] M. Basseville L. Mevel, M. Goursat. Stochastic subspace-based structural identification and damage detection and localization - application to the z24 bridge benchmark. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(1) :143–151, 2003.

- [Ma04] J. Morlier et al. Structural health monitoring of timber structure using advanced vibration analysis. *Proceedings of 5th International Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques*, 2004.
- [Ma05] J. Morlier et al. Benchmark of damage localisation algorithms using mode shape data. *Key Engineering Materials*, 293-294 :305–312, 2005.
- [Mal00] S. Mallat. *Une exploration des signaux en ondelettes*, 2000.
- [Mar01] M. Martarelli. Exploiting the laser scanning facility for vibration measurements. *PhD thesis, Imperial College London*, 2001.
- [MB93] B. Gach-Devauchelle M. Goursat D. Bonnecase P. Dorey M. Prevosto M. Olangnon M. Basseville, A. Benveniste. Damage monitoring in vibration mechanics, issues in diagnostics and predictive maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 7(5) :401–423, 1993.
- [MB04] M. Goursat M. Basseville, L. Mevel. Statistical model-based damage detection and localization, subspace-based residuals and damage-to-noise sensitivity ratios. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5) :769–794, 2004.
- [McG95] J. McGuire. Notes on semi-rigid connections. *FEMCI Book, NASA*, 1995.
- [MF93] J.E. Mottershead et M.I. Friswell. Model updating in structural dynamics : A survey. *Journal of Sound and Vibration*, 167(2) :347–375, 1993.
- [MH92] S. Mallat et W.L. Hwang. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Transactions on Information Theory*, 32 (2) :1819–1826, 1992.
- [Moh97] H. Dado Mohammad. A comprehensive crack identification algorithm for beams under different end conditions. *Applied Acoustics*, 51 :381–398, 1997.
- [Mor05] J. Morlier. Segmentation of the homogeneity of a signal using a piecewise linear recognition tool. *Computer science (Pattern recognition)*, *arXiv*, [citesebase.eprints.org/cgi-bin/citations?id=oai :arXiv.org :cs/0503086](http://citesebase.eprints.org/cgi-bin/citations?id=oai%3AarXiv.org%3Acs/0503086), 2005.
- [New94a] D.E. Newland. Wavelet analysis of vibration, part i : Theory. *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 116 :409–416, 1994.
- [New94b] D.E. Newland. Wavelet analysis of vibration, part ii : Wavelet maps. *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 116 :417–425, 1994.

- [NL01] H.B. Nugraha et A.Z.R. Langi. A wavelet based measurement of fractal dimensions of a 1-d signal. *International Conference on Information, Computer, and Signal Processing (ICICS 2001)*, Singapore, 2001.
- [NL02] H.B. Nugraha et A.Z.R. Langi. Segmented fractal dimension measurement of 1-d signal : A wavelet based method. *Asia Pacific Conference on Communications (APCC 2002)*, Bandung, 2002.
- [Oa] J.S. Owen et al. The application of auto-regressive time series modelling for the time-frequency analysis for civil engineering structures. *Engineering Structures*.
- [OJ98] N. Olgac et N. Jalili. Modal analysis of flexible beams with delayed resonator vibration absorber : Theory and experiments. *Journal of Sound and Vibration*, 218(2) :307–331, 1998.
- [Pa91] A.K. Pandey et al. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 145(2) :321–332, 1991.
- [Pa99] B. Peeters et al. Output-only modal analysis : development of a gui for matlab. *Proceedings of IMAC 17, the International Modal Analysis Conference, Kissimmee*, pages 1049–1055, 1999.
- [Pa04] P. Frank Pai et al. Identification and applications of boundary effects in beams. *International Journal of Solids and Structures*, 41(11-12) :3053–3080, 2004.
- [Pa05] U.P. Poudel et al. Structural damage detection using digital video imaging technique and wavelet transformation. *Journal of Sound and Vibration*, 2005.
- [PH95] U. Pabst et P. Hagedorn. Identification of boundary conditions as a part of model correction. *Journal of Sound and Vibration*, 182(4) :565–575, 1995.
- [PR99] B. Peeters et G. De Roeck. Reference based stochastic subspace identification in civil engineering. *Proceedings of the 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems, Swansea*, pages 639–648, 1999.
- [PS02] S. Patsias et W.J. Staszewski. Damage detection using optical measurements and wavelets. *Structural Health Monitoring*, 1(1) :7–22, 2002.
- [Ra97] M. Ruzzene et al. Natural frequencies and dampings identification using wavelet transform : application to real data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(2) :207–218, 1997.

- [Ra04] M. Ananda Rao et al. Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms. *Computers and Structures*, 82(11-12) :963–968, 2004.
- [Rao95] S.S. Rao. Mechanical vibrations. *Addison-Wesley*, 1995.
- [Rat97] C.P. Ratcliffe. Damage detection using a modified laplacian operator on mode shape datas. *Journal of Sound and Vibration*, 204(3) :505–517, 1997.
- [RF85] M.H. Richardson et D.L. Formenti. Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials. *Structural Measurement Systems Technical Note*, 85(3), 1985.
- [Ryt93] A. Rytter. Vibration based inspection of civil engineering structures. *Ph.D. Dissertation*, 1993.
- [Sa98] Z.Y. Shi et al. Structural damage localization from modal strain energy change. *Journal of Sound and Vibration*, 218(5) :825–844, 1998.
- [Sa00] W. Suh et al. Crack identification using hybrid neuro-genetic technique. *Journal of Sound and Vibration*, 238(4) :617–635, 2000.
- [Sa02a] E. Sazonov et al. Fuzzy logic expert system for automated damage detection from changes in strain energy mode shapes. *Non-Destructive Testing and Evaluation, Taylor and Francis Publishing*, 18(1) :1–17, 2002.
- [Sa02b] E. Sazonov et al. Non-baseline detection of small damages from changes in strain energy mode shapes. *Non-Destructive Testing and Evaluation, Taylor and Francis Publishing*, 18(3-4) :91–107, 2002.
- [Sa04] E. Sazonov et al. Wireless intelligent sensor network for autonomous structural health monitoring. *Smart Structures/NDE*, 2004.
- [Saz02] E. Sazonov. An automated damage detection system for armored vehicle launched bridge. *PhD dissertation, West Virginia University*, 2002.
- [SB03] I. Simonovski et M. Boltezar. The norms and variances of the gabor, morlet and general harmonic wavelet functions. *Journal of Sound and Vibration*, 264(3) :545–557, 2003.
- [Sev98] C. Sevcik. A procedure to estimate the fractal dimension of waveforms. *Complexity International*, 5, 1998.

- [SK04] E. Sazonov et P. Klinkhachorn. Optimal spatial sampling interval for damage detection by curvature or strain energy mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 2004.
- [SS03] M. Sahin et R.A. Shenoi. Quantification and localisation of damage in beam-like structures by using artificial neural networks with experimental validation. *Engineering Structures*, 25(14) :1785–1802, 2003.
- [Sta02] W.J. Staszewski. Intelligent signal processing for damage detection in composite materials. *Composite Science and Technology*, 62 :941–950, 2002.
- [Ta04] M.D. Todd et al. An assessment of modal property effectiveness in detecting bolted joint degradation : theory and experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5) :1113–1126, 2004.
- [Tar04] P. Tarazaga. Model updating using a quadrating form. *Master thesis, Virginia Polytechnic Institute*, scholar.lib.vt.edu/theses/available/ etd-07262004-193730/unrestricted/ETD.pdf, 2004.
- [Va01] K. Amaravadi Venkata et al. Structural health monitoring using wavelet transforms. *Smart Structures and Materials*, Proceedings of SPIE Vol.4327, 2001.
- [Ven02] G. Venizelos. Vibrations des structures. *Technosup*, 2002.
- [Ya01] Chung-Bang Yun et al. Joint damage assessment of framed structures using a neural networks technique, engineering structures. *Engineering Structures*, 23(5) :425–435, 2001.
- [Ya03] Tachung Yang et al. Joint stiffness identification using frf measurements. *Computers and Structures*, 81(28-29) :2549–2556, 2003.
- [Yue85] M.F. Yuen. A numerical study of the eigenparameters of a damaged cantilever. *Journal of Sound and Vibration*, 103(3) :301–310, 1985.
- [Za03] J. L. Zapico et al. Damage assessment using neural networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(1) :119–125, 2003.
- [Za04] C. Zang et al. Structural damage detection using independent component analysis. *Structural Health Monitorings*, 3 :69–83, 2004.
- [ZI00] C. Zang et M. Imregun. Frf based structural damage detection using koho-

nen self organizing maps. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 5(4) :167–172, 2000.

Méthodes d'analyse des déformées modales par traitement du signal pour le diagnostic *in situ* de structures

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans la thématique de l'évaluation non destructive en génie civil et plus particulièrement le diagnostic *in situ* de structure. Elle a pour but d'une part d'étudier l'aspect théorique de la détection et la caractérisation de défaut seulement à partir des données issues de l'analyse modale et d'autre part d'identifier le meilleur outil pratique pour acquérir ces données modales. On s'est donc attaché à développer des méthodes d'analyse des déformées modales par traitement du signal afin de caractériser les défauts structuraux mais aussi d'essayer de quantifier la qualité des assemblages. Nous avons, à ces fins, mis en oeuvre des outils numériques de simulation (Modélisation Éléments Finis, MEF) et des algorithmes d'analyse (ondelettes, dimension fractale, réseaux de neurones) sous Matlab permettant d'automatiser le diagnostic. La validation s'est effectuée sur des déformées simulées, mais aussi sur des déformées issues de la bibliographie et finalement sur des déformées expérimentales d'un portique de dimension laboratoire (en utilisant un vibromètre laser à balayage).

Mots-clés : Diagnostic des structures, détection de défaut, analyse éléments finis, vibration, ondelettes, traitement du signal, réseaux de neurones.

Mode shape analysis using signal processing for *in situ* structural diagnosis

Abstract

This thesis deals with nondestructive evaluation in civil engineering and more particularly with *in situ* structural diagnosis. Our objective is twofold : to study the theoretical aspect of damage detection and characterization using modal analysis data only and to identify the best experimental tool to acquire accurate modal data. To reach this goal we develop methods of mode shape analysis by signal processing in order to characterize the structural defects but also to establish a classification of the connections. We implemented numerical tools for simulation (Finite Element Model, FEM) and algorithms of analysis (wavelets, fractal dimension, neural networks) under Matlab in order to automate the diagnosis. The validation was carried out on simulated mode shapes but also on mode shapes resulting from the bibliography and finally on experimental mode shapes of a portal frame (acquired by a scanning laser vibrometer).

Key-words : Structural diagnosis, damage detection, finite element analysis, vibration, wavelets, signal processing, neural networks.