Ecole Doctorale « *Sciences et Ingénierie des Systèmes, de L'Environnement et des Organisations* »
DDRV - 27 rue Marcoz - B.P. 1104
73011 Chambéry Cedex

DEMANDE D'ALLOCATION DE RECHERCHE DE l'ED SISEO
Année universitaire 2021-2022
SUJET DE THESE

1. LABORATOIRE	**2. DIRECTION DE THÈSE**
Nom ou sigle : LOCIE *Statut : UMR*	*Directeur de thèse (HDR) : Olivier PLE* *Codirecteur éventuel (HDR en cours) : Jean-Patrick PLASSIARD, Simon ROUCHIER (encadrement)*
Laboratoire partenaire ou collaborations éventuels :	***Domaine de compétences de l'ED SISEO :***
Collaborations potentielles : *- Keops Ingénierie (bureau d'études structure, le Bourget du Lac) pour proposer des bâtiments à diagnostiquer.*	- Environnement ■ - Organisations ☐ - Systèmes ☐

3. SUJET DE THÈSE

Titre : Analyse modale et modélisation enrichie du comportement structurel des bâtiments

4. RESUME

(Français et Anglais)

Réhabiliter les ouvrages existants est un enjeu majeur pour la limitation des émissions de carbone. Au-delà du diagnostic énergétique couramment pratiqué et des rénovations sous-jacentes, la pérennité structurelle de l'ouvrage est également à considérer. Elle se limite généralement à un diagnostic visuel et à des hypothèses de report de charges issues des pathologies observées in-situ. Mais ce constat lié au comportement statique peut s'avérer insuffisant en cas de sollicitation dynamique, notamment dans les zones de sismicité significative. Le diagnostic aboutit alors à la déconstruction du bâtiment, ayant pour conséquence une empreinte carbone très marquante, une analyse de cycle de vie non optimisée et un temps et un cout de déconstruction-reconstruction important. Également envisagée lors de certains projets, la surélévation et l'extension des bâtiments existants est peu pratiquée, en raison du manque de maitrise du comportement dynamique de l'ouvrage modifié. Ainsi, la réalisation d'un diagnostic structurel adéquat doit favoriser l'extension verticale, diminuer l'empreinte carbone, lutter contre l'étalement urbain et l'imperméabilisation progressive des sols ; en un mot, participer au développement durable.

L'objectif de ce travail est de caractériser le comportement dynamique des ouvrages et leur état d'endommagement via des mesures vibratoires in-situ. Les techniques de mesures par bruit ambiant sont déjà utilisées du point de vue académique à l'échelle de l'ouvrage, afin de déterminer un comportement global du bâtiment, niveau par niveau. Les fréquences propres de vibration ainsi que les déformées modales globales peuvent alors être déduites. En travaillant à l'échelle des éléments de structure (poutre, poteau, mur, dalle…), on souhaite désormais obtenir une représentation fine du comportement dynamique des bâtiments.

Cette méthode de mesure locale nécessite la détermination d'un zonage par sous structuration et une méthode d'agrégation de données. Le premier point évoqué est basé sur la détermination du voisinage proche, dont l'état d'endommagement éventuel a une influence sur l'élément structurel considéré. Une étude théorique aura ainsi pour but d'identifier le voisinage à considérer suivant la configuration structurelle étudiée. Une identification des caractéristiques intrinsèques des éléments de structure pourra alors être entreprise au moyen d'une caractérisation de

proche en proche via une méthode d'optimisation appropriée. Le choix de la méthode d'optimisation sera justifié par la donnée disponible et les paramètres à identifier à partir des méthodes des moindres carrés non linéaires classiques jusqu'aux aux algorithmes méta-heuristiques en cas de dimensionnalité élevée de l'espace de recherche.

Parallèlement, un modèle aux éléments finis des ouvrages sera mis au point. Il aura pour but premier d'intégrer les défauts repérés in situ et de les représenter par des connexions semi-rigides. Les facteurs de fixation régissant ces connexions sont alors déterminés par calibrage de modèle (résolution de problème inverse par algorithmes d'optimisation). A nouveau, ce calibrage pourra être mené par un algorithme d'optimisation ou une méthode d'analyse statistique de données adaptée à la paramétrisation du problème. Ce calibrage vise à reproduire un comportement vibratoire numérique conforme aux mesures réalisées in situ. En amont de ce travail, une tâche essentielle visant l'amélioration des modèles représentatifs des éléments de structure sera réalisée. Elle visera notamment à attribuer une longueur effective des éléments qui soit représentative des éléments de structure réels. Le développement de connexions semi-rigides avec un facteur de fixation vectoriel sera également nécessaire afin de prendre en compte leur effet en flexion selon les deux directions principales d'inertie.

Au final, les études réalisées auront pour but d'établir des indicateurs de performance structurelle liée à la conservation potentielle du bâti lorsque la réhabilitation d'un bâtiment est projetée. Par extrapolation, cette technique pourra être également utilisée pour étudier la faisabilité d'une extension verticale ou horizontale d'un ouvrage existant.

Retrofitting of existing structures is a major challenge for limiting carbon emissions. In addition to the usual energy diagnostic and the underlying refurbishment, the structural durability of the structure must also be considered. Here, a visual diagnosis and hypotheses of load transfer resulting from pathologies observed in situ are generally considered. However, this observation of static behaviour may prove insufficient in the event of dynamic loading, particularly in areas of significant seismicity. The diagnosis then leads to the deconstruction of the building, resulting in a very significant carbon footprint, a non-optimised life cycle analysis and a significant deconstruction-reconstruction time and cost. Also envisaged in some projects, the raising and extension of existing buildings is rarely practised, due to the lack of knowledge of the dynamic behaviour of the modified structure. Thus, the realization of an adequate structural diagnosis should encourage vertical extension, reduce the carbon footprint, fight against urban expansion and progressive soil sealing; in a word, participate in sustainable development.

The objective of this work is to characterise the dynamic behaviour of structures and their state of damage via in-situ vibration measurements. The techniques of measurement by ambient noise are already used from the academic point of view at the scale of the structure, in order to determine the global behaviour of the building, level by level. The natural frequencies of vibration and the global modal deformations can then be deduced. By working at the scale of structural elements (beam, column, wall, slab, etc.), we now wish to obtain a detailed representation of the dynamic behaviour of buildings.

This local measurement method requires the determination of sub-structures areas and a data aggregation method. The first point mentioned is based on the determination of the close vicinity, whose possible state of damage has an influence on the structural element considered. A theoretical study will thus aim to identify the representative vicinity according to the structural configuration studied. An identification of the intrinsic characteristics of the structural elements will then be undertaken by means of a characterisation of close proximity via an appropriate optimisation method. The choice of the optimisation method will be justified by the available data and the parameters to be identified: from classical non-linear least squares methods to meta-heuristic algorithms in case of high dimensionality of the search space.

In parallel, a finite element model of the structures will be developed. Its main purpose will be to integrate the defects

identified in situ and to represent them by semi-rigid connections. The fixity factors governing these connections are then determined by model calibration (inverse problem solved by optimisation algorithms). Again, this calibration can be carried out by an optimisation algorithm or a statistical data analysis method adapted to the problem parameterisation. This calibration aims to reproduce a numerical vibration behaviour in accordance with the measurements carried out in situ. Prior to this work, an essential task aimed at improving the models representing the structural elements will be carried out. In particular, it will aim to assign an effective length to the elements that is representative of the real structural elements. The development of semi-rigid connections with a vectorial fixity factor will also be necessary to reproduce their effect in bending along the two main directions of inertia.

Ultimately, the studies carried out will aim to establish structural performance indicators related to the potential conservation of the building when the rehabilitation of a building is planned. By extrapolation, this technique could also be used to study the feasibility of a vertical or horizontal extension of an existing structure.

5. PROJET DE RECHERCHE DETAILLE

(2 pages environ)

En premier lieu, un état de l'art portant sur les points clés du sujet de thèse sera réalisé. Les travaux cités dans la thèse de Bastian SENTOSA (LOCIE, 2018) serviront de point de départ en vue d'affiner la recherche. Ces points clés concernent à la fois l'expérimentation et la modélisation. Afin de limiter et d'optimiser l'acquisition de données réalisée durant les phases expérimentales, une première phase dédiée à l'outil numérique sera réalisée.

Modéliser un bâtiment en éléments finis volumiques est généralement proscrit, en raison du coût calcul et du temps de simulation non compatible avec les contraintes de la profession. La modélisation des bâtiments requiert donc l'utilisation d'éléments finis simplifiés comme les éléments filaires ou multifibres (poteaux et poutres) et les éléments coques (voiles et planchers). Ces éléments intègrent les caractéristiques mécaniques telles que la section et l'inertie, mais possèdent une épaisseur fictive. En conséquence, la longueur libre – distance entre les deux extrémités – d'un élément poutre n'est pas représentative des éléments de structure réel. Cet excès de longueur peut avoir un effet non négligeable sur le comportement dynamique et les fréquences propres, aspects si importants lors d'une étude de bâtiment. Une période sera donc consacrée à proposer un élément fini modifié, prenant en considération ce biais. La modification envisagée consiste à conférer des caractéristiques mécaniques modifiée pour la partie libre fictive. Pour ce faire, des structures représentatives simples seront modélisées à la fois par approche volumique et par approche filaire. Le modèle impliquant les éléments volumiques sert ici de référence. Son comportement devra être reproduit au mieux par le modèle filaire, via la modification des caractéristiques de ce dernier. On s'attachera à reproduire le comportement statique mais également dynamique, où des effets de raideurs mais également de masses pourraient entrer en considération. Une étude paramétrique portant sur les caractéristiques de la structure permettra de généraliser la modification des propriétés à affecter dans les modèles utilisant ces éléments. Une technique similaire pourra alors être utilisée pour les éléments structurels tels que les voiles et les planchers.

Le second aspect requis pour une approche in-situ correcte est lié à la détermination d'un voisinage proche. Cette problématique a été mise en évidence lors de la thèse de Bastian SENTOSA notamment. Elle est liée à l'interaction des éléments structurels, rendant difficile la détermination de leur comportement dynamique intrinsèque. A l'aide du modèle numérique d'éléments développé précédemment, des structures typiques de bâtiment seront modélisées. On considèrera, par exemple, une structure de poutre continue sur poteaux ou de plancher continu sur murs. Le comportement vibratoire de ces structures sera étudié. Les simulations réalisées sont similaires aux mesures réalisées in situ par marteau d'impact : une impulsion sera communiquée initialement au modèle, au niveau de l'élément structurel étudié. L'acquisition des déplacements de l'élément considéré permettra d'en déduire les fréquences propres et les déformées modales correspondantes. Cette configuration servira alors de référence pour la structure étudiée. L'inclusion d'un défaut « mobile » au sein de la structure permettra de déterminer la position à partir de laquelle ce défaut engendre un changement significatif des fréquences propres et des déformées modales. Au final, cette approche doit permettre de déterminer le voisinage utile à la caractérisation d'un élément de structure endommagé, afin que son endommagement intrinsèque soit intégrable dans un modèle numérique. Ces défauts sont pris en compte par des facteurs de fixation, représentés par un élément fini à inertie modifié. Ces facteurs de fixation sont généralement scalaires puisque la plupart du temps utilisés pour des études bidimensionnelles. Leur utilisation dans une maquette tridimensionnelle avec des éléments du type béton armé implique de prendre en compte le défaut autant dans la direction d'inertie principale mineure, que majeure. Un élément fini prenant en compte un facteur de fixation vectoriel sera développé.

La phase expérimentale comprendra l'étude de plusieurs bâtiments. Dans le cadre de la thèse, l'étude sera restreinte aux structures constituées d'assemblage d'éléments poteaux – poutres. L'étude in situ d'un bâtiment se déroulera en deux phases : une première consistera à la détection visuelle des défauts et leur localisation, à la manière du diagnostic actuel. La seconde phase aura pour but l'étude affinée du comportement vibratoire des zones situées autour des défauts

identifiés, mais également des autres zones afin de déduire un comportement global du bâtiment. La réalisation d'une campagne d'acquisition adaptée impliquera une bonne connaissance des techniques de mesure et de leur exploitation. Une étude bibliographique conséquente portant sur les techniques dédiées au diagnostic de l'existant sera nécessaire pour appréhender convenablement cette phase. L'accent sera mis sur le zonage à considérer pour chaque défaut identifié et les méthodes de reconstitution des déformées modales globales à partir des mesures réalisées zone par zone. Le développement des maquettes numériques correspondantes sera également réalisé. Elle incorporera des éléments finis représentatifs pour les parties courantes – non endommagées – et des éléments à facteur de fixation vectoriel au droit des endommagements. A ce stade, les éléments courants sont complètement identifiés via les plans et le diagnostic visuel, mais les facteurs de fixation sont à déterminer. Leur quantification sera réalisée grâce à une technique d'optimisation, dont le but sera de déterminer le jeu de paramètres par lesquels le modèle reproduit au mieux les fréquences propres et les déformées modales observées expérimentalement. L'identifiabilité de ces paramètres, c'est-à-dire la possibilité ou non de les estimer précisément à partir d'une certaine donnée disponible, n'est pas garantie a priori. Elle déterminera le choix de l'algorithme de calibrage (moindres carrés non linéaires ou algorithmes d'évolution en cas de dimensionnalité élevée de l'espace de recherche) et l'éventuelle nécessité de régularisation ou reparamétrisation du problème.

Ces résultats pourront être comparés à une maquette réalisée à l'aide d'éléments classiques et sans prise en compte des défauts, afin d'évaluer l'apport de cette nouvelle approche.

Des études précédentes ont cherché à établir le lien existant entre diminution de la période fondamentale d'un bâtiment et son état d'endommagement. On considère généralement qu'un bâtiment dont la période fondamentale a chuté de 10% est trop endommagé pour être conservé tel quel. Les résultats obtenus sur les bâtiments instrumentés lors de la présente thèse serviront à affiner cet indicateur ou à en proposer de nouveaux. Un indicateur de réparabilité pourrait, par exemple caractériser si la réparation des défauts permet de conférer une seconde vie à l'ouvrage ou non. En d'autres termes, cela permettrait aux professionnels d'établir si la conservation du bâti est envisageable ou non.

6. CANDIDAT RECHERCHE : *le (la) candidat(e) a suivi une formation de master ou d'école d'ingénieurs en bâtiment ou en génie civil. Des compétences ainsi qu'une expérience en lien avec le dimensionnement des structures en béton armé sera requise. La connaissance des logiciels éléments finis (robot structural analysis, abaqus,…) sera fortement utile. Les développements numériques demanderont également l'utilisation de langage informatiques (matlab, par exemple). Un bagage mathématique solide sera également requis pour la partie expérimentale et son exploitation. Une expérience du chantier de bâtiment sera également très utile.*

7. FINANCEMENT DE LA THESE : *Le contrat doctoral fixe une rémunération principale, indexée sur l'évolution des rémunérations de la fonction publique : depuis le 1er février 2017, elle s'élève à **1768,55 euros** bruts mensuels pour une activité de recherche seule. Des heures d'enseignements peuvent être effectuées dans la limite de 64 heures équivalent TD par année universitaire **après autorisation du président de l'université** et rémunérées au taux fixé pour les travaux dirigés en vigueur. D'autres activités complémentaires au contrat doctoral sont prévues par l'article 5 du décret n° 2009-464 du 23 avril 2009 modifié. La durée totale des activités complémentaires aux activités de recherche confiées au doctorant dans le cadre du contrat doctoral ne peut excéder un sixième du temps de travail annuel.*

8. CONTACT :

Nom prénom : PLASSIARD Jean-Patrick

Tél : 06 32 10 79 55

Email : jean-patrick.plassiard@univ-smb.fr