



Thèse AID classique 2021

## **Développement d'une méthode d'identification de chargements sévères en dynamique transitoire à partir de mesures de déformations de la structure.**

### **Positionnement du travail de recherche**

La thèse proposée a pour but la formulation théorique et les développements numériques d'une méthode visant à identifier, à partir de mesures réelles effectuées sur une structure, le chargement dynamique transitoire, de type sévère, subi par la structure. La méthode développée vise à terme à construire un outil au service des ingénieurs afin d'estimer précisément les chargements subis par la structure (coque raidie ou fuselage par exemple).

La problématique concerne en priorité les structures soumises à une explosion sous-marine (UNDEX), pour lesquelles l'onde de choc vue par la structure est difficilement accessible par des moyens de mesure directs, et dont la simulation numérique reste très délicate compte tenu de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu, en particulier la physique de l'explosion, le couplage fluide/structure, la cavitation, ... Le champ d'application peut être étendu à un panel plus large de problèmes de tenue des structures à des agressions dynamiques de type mécanique (solide ou fluide), qu'il s'agisse d'explosions dans le domaine aérien, d'impact hydrodynamique (slamming), d'effets aérodynamiques, de chocs mous (chocs à l'oiseau), etc.

L'objectif du travail de thèse est de :

- formuler une approche de type méthode inverse,
- d'effectuer les développements numériques sous-jacents,
- de confronter la méthode à des essais caractérisés par un caractère dynamique sévère.

Certains essais sont déjà disponibles, à la suite du travail expérimental mené dans le cadre du projet SUCCESS (DGA RAPID, [1]), et pourront par exemple servir de base de travail et de validation pour les développements de la méthode.

### **Présentation détaillée**

#### **Contexte**

Le dimensionnement des structures nécessite leur optimisation en termes de tenue aux chargements dynamiques, par exemple de type UNDEX, compte tenu de leur sévérité.

Aujourd'hui ce dimensionnement utilise presque essentiellement des expressions empiriques de l'onde de pression, comme par exemple [2, 3]. Sur le plan expérimental, la validation de ces expressions est difficile compte tenu de la difficulté d'effectuer des mesures précises à l'interface fluide/structure, et des limitations des essais en bassin de détonique (phénomènes

# Institut Clément Ader

Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées / UMR CNRS 5312

de réflexion d'onde, de surface libre, etc). Sur le plan des simulations, comme montré dans les travaux de Sone Oo [4] dans le cadre du projet SUCCESS, ces chargements sont difficiles à obtenir à partir d'un modèle numérique de type éléments finis compte tenu des effets de couplage fluide/structure (FSI) et de la cavitation. Le code couplé LS Dyna/USA, référence dans le domaine, ne prétend pas capturer tous les aspects nécessaires à la représentation fine du chargement généré [5]. Les modèles analytiques [6, 7], quant à eux, peuvent peut-être fournir rapidement des ordres de grandeurs valides, mais ne peuvent prétendre à une précision importante dans la représentation des chargements concernés. Dans ce contexte, le présent travail vise à développer une méthode d'identification d'un modèle fin de chargement de la structure – de type champ de pression spatio-temporel - à partir de mesures réelles, permettant ensuite de confronter ce chargement réel aux modèles empiriques utilisés en entrée des modèles, ou à ceux générés lors de calculs couplés fluide/structure.

## Enjeux

L'objectif premier est donc la validation des modèles de chargement utilisés dans le domaine. Mais d'autres enjeux scientifiques découlent directement de ce travail. L'un d'entre eux est de permettre la validation de résultats de simulation numérique de type FSI concernant leur description des chargements issus du couplage fluide-structure (par exemple) ou d'autres phénomènes complexes. D'autres applications possibles (non envisagées dans ce travail) concernent l'optimisation « en temps réel » du pilotage de systèmes au travers d'une réactivité aux déformations de la structure, ou le monitoring en temps réel.

## Travail envisagé

La majorité des méthodes d'identification se sont concentré sur l'identification des propriétés mécaniques des structures (module d'Young par exemple) en statique ou en dynamique [8, 9]. Certaines méthodes d'identification d'un chargement en dynamique ont déjà été publiées dans la littérature [10, 11]. Cependant il apparait que les spécificités liées à des chargements sévères nécessitent le développement d'une méthode adéquate, du fait du niveau de déformation envisagée pour la structure (grands déplacements et/ou grandes déformations), et du développement de scénarios de ruine tels que la plasticité (structures métalliques) ou l'endommagement (structures composites). Les non-linéarités disqualifient ainsi les approches existantes basées sur la superposition modale ou sur la décomposition fréquentielle de type Fourier.

L'information expérimentale disponible sera également un levier important : beaucoup de travaux utilisent aujourd'hui l'information mesurée par accéléromètres, ce qui reste intrusif et modifie la réponse de la structure compte tenu du spectre « hautes fréquences » du chargement. L'utilisation de la stéréo-corrélation d'images numériques [12, 13] est clairement une des composantes de ce travail. Cette technique produit en effet une mesure de type

champ sur une partie de la structure, et non plus seulement une information ponctuelle. Elle a révolutionné les techniques de mesure aussi bien en laboratoire académique que dans le monde industriel. Le couplage de cette technique avec l'analyse par éléments finis a été

# Institut Clément Ader

Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées / UMR CNRS 5312

développé dans la recherche académique [14] depuis plusieurs années en statique, y compris non linéaire. Les aspects dynamiques (vibratoire ou transitoire) sont également à étudiés et entrent pleinement dans le spectre de ce travail de thèse. Le couplage de cette technique avec la méthode inverse d'identification du chargement est au centre du développement de la formulation recherchée.

Pour parvenir à ces résultats, la présente proposition de thèse vise donc à réaliser les travaux suivants :

## *1°) Bibliographie*

Analyse bibliographique approfondie des travaux existants sur l'identification de chargements mécaniques complexes et synthèse sur l'applicabilité à des chargements dynamiques sévères de type répartis, et au type d'information expérimentale nécessaire.

## *2°) Développement de la formulation analytique et mise en œuvre numérique*

Ecriture d'une formulation de type approche inverse temporelle dédiée à l'identification d'un chargement dynamique. Formulation discrétisée (éléments finis) et développement d'un code de calcul si possible non-intrusif. La formulation est susceptible de nécessiter le développement d'éléments spéciaux compte tenu de sa spécificité (problème inverse) ou de l'utilisation de logiciels de mesure déjà existants. La validation des développements sur des cas tests simulés numériquement ou analytiquement sera nécessaire. Une comparaison avec les performances (précision, robustesse) des méthodes de type Finite Element Model Updating est également envisagée.

## *3°) Confrontation de la méthode à des mesures réelles*

Les méthodes développées seront enfin confrontées à des essais réels qui pourront être de type choc mou ou explosion. Les objectifs sont ici d'éprouver la robustesse de l'approche développée, mais également d'apporter une validation expérimentale à des modèles empiriques de chargement ou d'interaction fluide/structure, utilisés couramment pour le dimensionnement des structures.

Comme déjà mentionné, certains essais sont déjà disponibles, à la suite du travail expérimental mené dans le cadre du projet SUCCESS (DGA RAPID), et pourront servir de base de travail pour la validation de la méthode.

### **Important :**

- **Cette thèse est conditionnée à l'obtention du financement par l'AID (candidature en cours) ;**
- **Pour cette raison, le candidat doit être ressortissants de l'Union Européenne, du Royaume Uni ou de la Suisse.**

Personne à contacter : [olivier.dorival@icam.fr](mailto:olivier.dorival@icam.fr)



INSTITUT CLÉMENT ADER

## **Development of a method for the identification of severe transient dynamic loads from deformation measured on a structure.**

The proposed PhD thesis aims at the theoretical formulation and the numerical developments of a method for the identification of a severe transient dynamic loading from real measurements carried out on a structure. The method developed aims to build a tool for engineers to accurately estimate the loads experienced by the structure (stiffened hull or fuselage for example).

The problem primarily concerns the structures subjected to an underwater explosion (UNDEX), for which the shock wave seen by the structure is difficult to obtain by direct means of measurement, and for which the numerical simulation remains very tricky given the complexity of the physical phenomena involved, in particular the physics of the explosion. The field of application can be extended to a wider range of problems of resistance of structures to dynamic mechanical aggressions (solid or fluid), whether explosions in the air, hydrodynamic impact (slamming), aerodynamic effects, soft shocks (bird strikes), etc.

The objective of the PhD work is to:

- to formulate an inverse method approach,
- to carry out the underlying numerical developments,
- to confront the method to tests characterized by a severe dynamic content.

Some tests are already available, following the experimental work carried out within the framework of the SUCCESS project (DGA RAPID, [1]), and could for example be used as a basis for work and validation for the development of the method.

### **Detailed presentation**

#### **Context**

The dimensioning of structures requires their optimization in terms of resistance to dynamic loads, for example UNDEX type, considering their severity.

Today this dimensioning uses almost essentially empirical expressions of the pressure wave, as for example [2, 3]. On the experimental side, the validation of these expressions is difficult due to the difficulty of making precise measurements at the fluid/structure interface, and the limitations of detonation basin tests (wave reflection, free surface, etc.). In terms of simulations, as shown in the work of Sone Oo [4] in the framework of the SUCCESS project, these loads are difficult to obtain from a numerical model such as finite element ones due to the effects of fluid/structure coupling (FSI) and cavitation. The LS Dyna/USA coupled code, a reference in the field, does not pretend to capture all the aspects necessary for the fine

# Institut Clément Ader

Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées / UMR CNRS 5312

representation of the loading generated [5]. Analytical models [6, 7], on the other hand, can perhaps quickly provide valid orders of magnitude, but cannot claim to be very accurate in the representation of the relevant loads. In this context, the present work aims at developing a method to identify a fine load model acting on the structure – in the form of a spatio-temporal pressure field type - from real measurements, allowing then to compare this real loading with the empirical models used as input to the models, or with those generated during coupled fluid/structure calculations.

## Issues

The primary objective is therefore the validation of the loading models used in the field. But other scientific issues arise directly from this work. One of them is to allow the validation of numerical simulation results of FSI type concerning their description of the loads resulting from the fluid-structure coupling (for example) or other complex phenomena. Other possible applications (not envisaged in this work) concern the "real-time" optimization of the control of systems through a reactivity to the deformations of the structure, or the real-time monitoring.

## Work planned

The majority of identification methods have focused on the identification of mechanical properties of structures (Young's modulus for example) in statics or dynamics [8, 9]. Some methods for the identification of dynamic loading have already been published in the literature [10, 11]. However, it appears that the specificities related to severe loading require the development of an adequate method, due to the level of deformation involved for the structure (large displacements and/or large deformations), and the development of failure scenarios such as plasticity (metallic structures) or damage (composite structures). The non-linearities thus disqualify the existing approaches based on modal superposition or on Fourier-type frequency decomposition.

The available experimental information will also be a key point: many works today use information measured by accelerometers, which remains intrusive and modifies the response of the structure given the "high frequency" spectrum of the loading. The use of stereo-correlation of digital images [12, 13] is clearly a component of this work. Indeed, this technique produces a field type measurement on a part of the structure, and not only a point information. It has revolutionized measurement techniques in both academic laboratories and in the industrial world. The coupling of this technique with finite element analysis has been developed in academic research [14] for several years in statics, including non-linear. The dynamic aspects (vibratory or transient) are also to be studied and fully enter into the spectrum of this thesis work. The coupling of this technique with an inverse method of load identification is central to the development of the formulation sought.

# Institut Clément Ader

Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées / UMR CNRS 5312

To achieve these results, the present thesis proposal aims to carry out the following work:

## *1°) Bibliography*

In-depth bibliographic analysis of existing works on the identification of complex mechanical loads and synthesis on the applicability to severe dynamic loads of distributed type, and the type of experimental information required.

## *2°) Development of the analytical formulation and numerical implementation*

Writing of a formulation of the inverse temporal approach dedicated to the identification of a dynamic loading. Discretized formulation (finite elements) and development of a calculation code if possible non-intrusive. The formulation is likely to require the development of special elements given its specificity (inverse problem) or the use of existing measurement software. The validation of the developments on numerically or analytically simulated test cases will be necessary. A comparison with the performances (accuracy, robustness) of Finite Element Model Updating methods is also considered.

## *3°) Confrontation of the method with real measurements*

The developed methods will finally be confronted to real tests which could be of soft shock or explosion type. The objectives here are to test the robustness of the developed approach, but also to bring an experimental validation to empirical models of loading or fluid/structure interaction, commonly used for the dimensioning of structures.

As already mentioned, some tests are already available, following the experimental work carried out in the framework of the SUCCESS project (DGA RAPID), and can be used as a basis for the validation of the method.

### **Important:**

- **This thesis is conditional on obtaining funding from the AID (application in progress);**
- **For this reason, the candidate must be a citizen of the European Union, the United Kingdom or Switzerland.**

**Contact :**     [olivier.dorival@icam.fr](mailto:olivier.dorival@icam.fr)

# Institut Clément Ader

Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées / UMR CNRS 5312

## Bibliography

- [1] Barlow G., Dorival O., Kemlin G. (2019) Endommagements de composites stratifiés et sandwichs sous impact de gélatine moyenne vitesse. 21e Journées Nationales sur les Composites - JNC21, Bordeaux, France.
- [2] Cole, R. H. (1948). Underwater explosions. Princeton University Press, Princeton
- [3] Geers, T. L., Hunter, K. S. (2002). An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4):1584–1601.
- [4] Sone Oo, Y. P. (2020). Development of analytical formulae to determine the dynamic response of composite plates subjected to underwater explosions. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France, 2020.
- [5] Felippa, C., DeRuntz, J. (1984). Finite element analysis of shock-induced hull cavitation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 44:297–337.
- [6] Porfiri, M., Gupta, N. (2009). A review of research on impulsive loading of marine composites. In I.M., D., Rajapakse, Y., and Gdoutos, E., editors, *Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures: An Anthology of ONR Sponsored Research*, chapter 8, pages 169–194. Springer Science + BusinessMedia B.V.
- [7] Hoo Fatt, M., Palla, L. (2009). Analytical modeling of composite sandwich panels under blast loads. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 11(4):357–380.
- [8] Bonnet, M., Constantinescu, A. Inverse problems in elasticity, *Inverse problems*, 21(2):R1-R50.
- [9] Nouisri, A., Allix, O., Dorival (2017) Towards a non-intrusive method for solving coupled direct retrograde problem in transient dynamics. *Mechanics & Industry* 18(2), EDP Sciences, p.209-2017.
- [10] Jiang, X.Q., Hu, H.Y. (2009) Reconstruction of distributed dynamic loads on a thin plate via mode-selection and consistent spatial expression. *J Sound Vib.* 323(3-5):626–644.
- [11] Wang, L., Liu, Y. (2020) A novel method of distributed dynamic load identification for aircraft structure considering multi-source uncertainties. *Struct Multidisc Optim* 61, 1929–1952 (2020)
- [12] Claire, D., Hild, F., Roux, S. (2003) De la corrélation d'images numériques à l'identification de champs de propriétés. *Bulletin de la Société Française de Physique*, 139, pp.29-31 (2003).
- [13] Périé, J.-N., Passieux, J.-C. (2020) Special Issue on Advances in Digital Image Correlation (DIC). *Applied Sciences*.; 10(4):1530
- [14] Neggers, J., Hoefnagels, J. P. M., Geers, M. G. D., Hild, F., Roux, S. Time-resolved integrated digital image correlation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Wiley, 2015, 103 (3), pp.157-182.