



Duality, inverse problems and nonlinear problems in solid mechanics

Preface

The importance of *inverse problems* and *nonlinear problems* in modern solid mechanics justifies that Comptes Rendus Mécanique devote a full special issue to them. There are numerous ties between inverse and nonlinear problems. Inverse problems (such as determining the position of a void within some solid medium from surface measurements, for instance) are intrinsically nonlinear even if the constitutive law of the medium envisaged is linear elastic. When this constitutive law is nonlinear (like in the case of a plastic solid for instance), this further increases the nonlinearity of the inverse problem.

The subtle concept of *duality* underpins many inverse or nonlinear problems, although its importance is seldom fully recognized. For instance, duality ties the direct and inverse problems in a natural way, as will clearly appear in several contributions presented in this volume.

This special issue is dedicated to a most remarkable figure of modern French solid mechanics, Hui Duong Bui. Bui is not only a specialist of both inverse and nonlinear problems; he was also the first to realize the theoretical importance of duality in direct and inverse problems, and to put it into practice. A brief biographical sketch of this most distinguished scientist and a summary of his contributions are presented below.

Bui was born in Hanoi (Vietnam) in 1937. The Second World War deprived him, just like the majority of Vietnamese children of his age, of a normal education. Although he attended a private school for five years, he essentially remained a self-educated person until the age of 18, when he passed the French *Baccalauréat*. This success allowed him to get a scholarship to pursue his academic studies in France. In spite of the handicap of his early education, he graduated from *École Polytechnique* (the most prestigious Engineering School in France) in 1959, from *École des Mines* in 1961 and from *Université Pierre-et-Marie-Curie (Paris VI)* in 1964. His first job was with *Électricité de France (EDF)*, where he worked as a research engineer and contributed to the French nuclear energy program. He defended his Ph.D. thesis in 1969.

At this time, plasticity and fracture mechanics, which are the essential topics required for the assessment of nuclear vessels and structures, were not very developed in France. They were introduced there, precisely when Bui began his thesis work, by engineers of the French nuclear vessel builder *FRAMATOME*. It was resolved that Bui would simultaneously work at EDF and *Laboratoire de mécanique des solides* at the *École Polytechnique*. The supervision of Professor J. Mandel there was to ensure a strong theoretical background to Bui's work. His thesis dealt with the theory of plasticity of metals, envisaged from both the microscopic and macroscopic points of view, on the homogenization of polycrystals, and finally on some mathematical aspects of the equations of plasticity.

It is a characteristic feature of Bui's broadness of outlook that although he is essentially a theoretician, his first paper of 1965 was of experimental nature. Its aim was to check Mandel's formula for the plastic dissipation rate, viewed as a loss of symmetry in a conservation law. After so many years, the same notion of loss of symmetry in a conservation law is still the cornerstone of his most recent works with A. Constantinescu and H. Maigre on inverse problems, which deal with the closed form solution of an earthquake inverse problem and make a fundamental use of a loss of symmetry of the *reciprocity gap functional*. This illustrates the permanence of some topics in Bui's scientific works, in spite of their great variety.

Another recurring theme in Bui's works is duality:

- in elasticity, where he extended the Tonti diagram for elastostatics to elastodynamics, and showed how dual variables are linked by some operators and their adjoints;
- in fracture mechanics, where he introduced the notion of *Crack Discontinuity Intensity Factors* (CDIF) (dual to the usual stress intensity factors), and applied it to the representation of the solution of 3D planar crack problems;
- in inverse problems, where direct and adjoint variables and operators play a fundamental role, together with duality and, again, losses of symmetry.

The interest of Bui in inverse problems for more than 20 years arises from the fact that the maintenance operations of nuclear vessels required, and still requires, much research and development in nondestructive testing methods. In addition, he was asked by EDF in 1986 to solve, with some colleagues of the *Compagnie Française de Géophysique*, an enigma pertaining to the internal structure of the Kheops Pyramid in Egypt. From microgravity measurements, he obtained a numerical solution for the density distribution which indicated a *spiral structure*. His work is still used today by H. Houdin and J.P. Houdin to support their new model of the Kheops Pyramid, which assumes existence of some helicoidal internal tunnel.

Bui's scientific works are characterized by their extreme variety, their depth of analysis and their happy combination of theory and practical applications. Most of them find their origin in some difficult, real-world industrial problem.

Bui is the author or co-author of about 100 papers dealing with plasticity theory, fracture mechanics, boundary integral equations, friction and wear mechanics, and inverse problems. He has also authored three books:

1. **Mechanics of Brittle Fracture**, Masson, Paris, 1978 (in French);
2. **Inverse Problems in the Mechanics of Materials: An Introduction**, CRC Press, Boca Raton, 1994; French edition, Eyrolles, Paris, 1993; Japanese edition, Shokabo, 1994; Chinese edition, Harbin, 1995; and Russian edition, Karaganda, 1996;
3. **Fracture Mechanics: Inverse Problems and Solutions**, Springer, 2006.

He has served or still serves in the editorial board of *Computational Mechanics* (1988–1992), *International Journal of Solids and Structures* (1990–2005), *Journal of Mechanics of Materials and Structures* (since 2005), *International Journal of Engineering Analysis* (1990–2000), *Mechanics of Materials* (1995–2005), *International Journal of Inverse Problems in Engineering* (1993–1996), *Inverse Problems* (since 1994), *Inverse and Ill-Posed Problems* (since 1995). He is a member of the French Academy of Sciences (since 1995), the French Academy of Technologies (since 2000), and the European Academy of Sciences (since 2001). He is also a Fellow of the Institute of Physics (London).

Bui has supervised the thesis work of many Ph.D. students who cannot possibly be all cited here. All of them share the same admiration not only for the deep scientist he is, but also for the indefatigable, friendly and efficient guidance he has provided to them.

Bui's retirement seemed an excellent opportunity to honour this most distinguished scientist and person. A symposium in his honour was organised last year by one of us (X.M.) on the Greek island of Symi. The main themes of the conference were nonlinear problems, inverse problems and duality. Although the symposium was a success from all points of view, not all persons who had wished to come to honour Bui could do so. The present volume therefore includes both the papers of those who were present in Symi, but also of those who could not be present but wished to contribute. All papers have been reviewed by competent experts.

We hope that this issue brings new contributions to this central area of mechanics, and will help elucidating further some of the issues and methodologies to be used, based on fundamental concepts.

Préface

L'importance des problèmes inverses et des problèmes non-linéaires dans la mécanique des solides moderne justifiait que les Comptes Rendus Mécanique y consacraient un numéro spécial. Les liens entre les problèmes inverses et les problèmes non-linéaires sont nombreux. Les problèmes inverses (déterminer la position d'une cavité dans un milieu solide à partir de mesures de surface, par exemple) sont intrinsèquement non-linéaires même si la loi de comportement du milieu est linéaire élastique. Si cette loi est elle-même non-linéaire (cas des solides plastiques par exemple), cela augmente encore la non-linéarité du problème inverse.

La notion subtile de dualité est sous-jacente à bien des problèmes inverses ou non-linéaires, bien que son importance soit rarement pleinement reconnue. Par exemple, la dualité relie les problèmes direct et inverse de manière naturelle, comme cela apparaîtra clairement dans plusieurs des contributions présentées dans ce volume.

Ce numéro spécial est dédié à une très remarquable figure de la mécanique des solides française moderne, Hui Duong Bui. Non seulement Bui est un spécialiste à la fois des problèmes inverses et des problèmes non-linéaires, mais il fut le premier à comprendre l'importance théorique de la dualité dans les problèmes direct et inverse, et à la mettre en pratique. Une brève biographie de ce scientifique si distingué et un résumé de ses contributions sont présentés ci-dessous.

Bui naquit à Hanoi (Vietnam) en 1937. La Seconde Guerre Mondiale le priva, comme la majorité des enfants vietnamiens de son âge, d'une instruction normale. Malgré la fréquentation d'une école privée pendant cinq ans, il demeura essentiellement un autodidacte jusqu'à l'âge de 18 ans, quand il obtint le baccalauréat français. A la suite de ce succès, on lui attribua une bourse qui lui permit de poursuivre ses études universitaires en France. En dépit du handicap de son instruction initiale, il obtint des diplômes de l'École Polytechnique en 1959, de l'École des Mines de Paris en 1961 et de l'Université Pierre-et-Marie-Curie (Paris VI) en 1964. Son premier emploi l'amena chez EdF, où il travailla comme ingénieur de recherches et contribua au développement du programme nucléaire français. Il soutint sa thèse de doctorat d'État en 1969.

A cette époque, la plasticité et la mécanique de la rupture, qui sont les ingrédients essentiels requis pour les analyses de sûreté des composants nucléaires, n'étaient pas très développées en France. Elles y furent introduites, précisément au moment où Bui commençait son travail de thèse, par des ingénieurs de FRAMATOME. Il fut arrêté que Bui travaillerait simultanément chez EdF et au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'École Polytechnique. La supervision du Professeur J. Mandel dans ce laboratoire devait assurer un support théorique solide au travail de Bui. Sa thèse portait sur la théorie de la plasticité des métaux, envisagée à la fois sous les angles microscopique et macroscopique, sur l'homogénéisation des polycristaux, et finalement sur certains aspects mathématiques des équations de la plasticité.

Un trait caractéristique de la largeur de vues de Bui est que bien qu'il s'agisse essentiellement d'un théoricien, son premier article de 1965 fut de nature expérimentale. Son but était de vérifier la formule de Mandel pour le taux de dissipation plastique, envisagé comme une perte de symétrie dans une loi de conservation. Après tant d'années, la même notion de perte de symétrie dans une loi de conservation est encore la pierre angulaire de la plupart de ses travaux récents en collaboration avec A. Constantinescu et H. Maigre sur les problèmes inverses, qui portent sur la solution analytique explicite du problème inverse d'un tremblement de terre et font un usage fondamental de la perte de symétrie de la fonctionnelle d'écart à la réciprocité. Ceci illustre la permanence de certaines préoccupations dans les travaux scientifiques de Bui, en dépit de leur grande variété.

Un autre thème récurrent dans l'œuvre de Bui est la dualité :

- En élasticité, où il étendit le diagramme de Tonti de l'élastostatique à l'élastodynamique, et montra comment les variables duales sont liées par certains opérateurs et leurs adjoints;
- En mécanique de la rupture, où il introduisit la notion de facteurs d'intensité de la discontinuité (duale de celle de facteurs d'intensité au sens habituel), et l'appliqua à la représentation de la solution de problèmes 3D de fissures planes ;
- Pour les problèmes inverses, pour lesquels les variables et opérateurs directs et adjoints jouent un rôle fondamental, de même que la dualité et, de nouveau, les pertes de symétrie.

L'intérêt de Bui pour les problèmes inverses, qui remonte à plus de 20 ans, s'explique par le fait que les opérations de maintenance des composants nucléaires nécessitaient, et nécessitent encore, beaucoup de recherches et de développements sur les méthodes de contrôle non-destructif. De plus, EdF lui demanda en 1986 de résoudre, avec des collègues de la Compagnie Française de Géophysique, une énigme concernant la structure interne de la Pyramide de Chéops en Egypte. A partir de mesures de microgravimétrie, il obtint une solution numérique pour la distribution de densité qui indiquait une structure spirale. Son travail est encore utilisé de nos jours par H. Houdin et J.P. Houdin à l'appui de leur nouveau modèle de la Pyramide de Chéops, qui suppose l'existence d'un tunnel interne hélicoïdal.

Les travaux scientifiques de Bui se caractérisent par leur extrême variété, la profondeur de leurs analyses et leur heureuse combinaison de théorie et d'applications pratiques. La plupart trouvent leur origine dans un problème industriel difficile.

Bui est l'auteur ou le co-auteur d'environ 100 articles portant sur la plasticité, la mécanique de la rupture, les équations intégrales de frontière, la mécanique du frottement et de l'usure, et les problèmes inverses. Il est également l'auteur de trois ouvrages :

1. **Mécanique de la Rupture Fragile**, Masson, Paris, 1978;
2. **Problèmes Inverses en Mécanique des Matériaux : Une Introduction**, Eyrolles, Paris 1993; édition américaine, CRC Press, Boca Raton, 1994; édition japonaise, Shokabo, 1994; édition chinoise, Harbin, 1995; édition russe, Karaganda, 1996;
3. **Fracture Mechanics: Inverse Problems and Solutions**, Springer, 2006.

Il a participé ou participe encore au comité éditorial des revues suivantes: Computational Mechanics (1988–1992), International Journal of Solids and Structures (1990–2005), Journal of Mechanics of Materials and Structures (depuis 2005), International Journal of Engineering Analysis (1990–2000), Mechanics of Materials (1995–2005), International Journal of Inverse Problems in Engineering (1993–1996), Inverse Problems (depuis 1994), Inverse and Ill-Posed Problems (depuis 1995). Il est membre de l'Académie des Sciences (depuis 1995) et de l'Académie des Technologies (depuis 2000), et de l'European Academy of Sciences (depuis 2001). Il est également "Fellow" de l'Institute of Physics (Londres).

Bui a encadré le travail de thèse de nombreux doctorants qu'il est impossible de tous citer ici. Tous partagent la même admiration non seulement pour le profond scientifique qu'il est, mais aussi pour l'aide infatigable, amicale et efficace qu'il leur a apportée.

Le départ à la retraite de Bui semblait une bonne occasion d'honorer ce scientifique si distingué. Un symposium en son honneur fut organisé l'année dernière par l'un de nous (X.M.) sur l'île grecque de Symi. Les thèmes principaux de la conférence étaient les problèmes non-linéaires, les problèmes inverses et la dualité. Bien que le symposium ait été un succès à tous les points de vue, tous ceux qui désiraient venir pour honorer Bui ne purent pas le faire. Le présent numéro spécial regroupe donc les contributions non seulement de ceux qui étaient présents à Symi, mais aussi de ceux qui ne l'étaient pas mais désiraient contribuer au volume. Toutes les contributions ont fait l'objet d'un examen par des experts compétents.

Nous espérons que ce numéro spécial apportera de nouvelles contributions à ce domaine central de la mécanique, tant sur le plan des questions fondamentales que sur celui des techniques pratiques de résolution.

Jean-Baptiste Leblond
 Institut Jean-Le-Rond-d'Alembert
 Université Paris VI
 4, place Jussieu
 75252 Paris cedex 05, France
 E-mail address: leblond@lmm.jussieu.fr

Xanthippi Markenscoff
 Department of Mechanical and Aerospace Engineering
 University of California, San Diego
 La Jolla, CA 92093-0411, USA
 E-mail address: xmarkens@ucsd.edu

Available online 8 January 2008