Science Arts & Métiers (SAM)
is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/18643

To cite this version :

M BORNERT, Olivier CASTELNAU, P. PONTE CASTANEDA, Pierre SUQUET, Renald BRENNER - Numéro thématique des Comptes Rendus Mécanique en lhonneur dAndré Zaoui - Comptes Rendus Mécanique - Vol. 340, n°4-5, p.177-180 - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Avancées Récentes en Micromécanique des Matériaux

Numéro thématique des Comptes Rendus Mécanique en l'honneur d'André Zaoui

Préface

La Mécanique des Matériaux a connu, en France et dans le monde, un développement spectaculaire au cours des dernières décennies, rendu à la fois nécessaire par les besoins d'innovation et de sûreté de secteurs industriels comme l'énergie et les transports, et possible par les avancées contemporaines en Physique et en Mécanique des Milieux Continus. Tout matériau est, par nature, hétérogène à une et souvent plusieurs échelles. La prise en compte, à une échelle pertinente, de cette hétérogénéité gouvernant les interactions entre mécanismes élémentaires est bien souvent la clef de la compréhension et de la prédiction du comportement mécanique des matériaux à leur échelle macroscopique d'usage. La *Micromécanique des Matériaux*, à laquelle ce numéro thématique des Comptes Rendus Mécanique est consacré, a précisément pour objet d'aborder ces problèmes de transition d'échelles.

Ce numéro thématique est tout naturellement l'occasion d'honorer l'un des acteurs emblématiques du domaine, André Zaoui, qui a contribué de façon essentielle à l'établissement de la *démarche micro–macro* sur des bases théoriques rigoureuses validées par une approche expérimentale ambitieuse. Par ses travaux personnels, par la création, en avance sur son temps, d'une équipe de recherche dédiée aux expériences micromécaniques, par ses enseignements et ses actions de structuration de la recherche, André Zaoui a initié, puis constamment encouragé, ce domaine en France, l'ancrant solidement dans un dialogue fructueux entre expériences à petite échelle et modélisation.

André Zaoui est né en 1941 à Vialar (Algérie, alors territoire français). Il se révèle être un élève exceptionnellement doué dans toutes les disciplines, scientifiques ou littéraires. En témoigne le premier prix au Concours Général de grec qu'il remporte en 1957. Ses talents et sa culture littéraires se retrouvent dans ses écrits scientifiques, articles ou rapports, où la place de chaque mot compte. André Zaoui intègre l'Ecole des Mines en 1960. Il pense un moment s'engager dans des recherches en Physique théorique jusqu'à sa rencontre avec Jean Mandel. Il découvre alors la Mécanique enseignée par cet homme exceptionnel qui le convainc de préparer une thèse au Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS) de l'Ecole Polytechnique. Il y côtoie d'autres jeunes mécaniciens, qui seront quelques années plus tard les chefs de file du LMS, parmi lesquels (la liste n'est pas exhaustive) H.D. Bui, L. Brun et J. Salençon qui le conseillera souvent aux moments clefs de sa carrière. Son mémoire intitulé « Étude de l'influence propre de la désorientation des grains sur le comportement viscoplastique de métaux polycristallins (système C.F.C.) » est présenté devant la Faculté des Sciences de Paris en 1970. André Zaoui aime dire que sa thèse s'est bâtie à partir d'une observation expérimentale faite par hasard (mais chacun sait que le hasard se mérite). Une panne électrique lors d'une expérience de fluage sous vibration, interrompant la vibration, lui permet d'observer ce qu'il appellera avec L. Brun *l'hésitation au fluage* (arrêt temporaire du fluage lorsque la vibration est interrompue, puis reprise de celui-ci sous charge statique). La recherche de la compréhension de ce phénomène l'amène à s'intéresser aux interactions entre grains dans un polycristal. Il approfondit alors les travaux de E. Kröner sur le sujet, ignorant que R. Hill et J. Hutchinson travaillent également sur le sujet, et constate que l'accommodation de la déformation plastique des grains dans la vision de E. Kröner est trop raide. Il propose de l'assouplir par l'introduction d'un coefficient *d'accommodation plastique intergranulaire* qu'il intègre dans le schéma sécant isotrope qu'il élabore et qui sera systématisé par la suite dans ses travaux avec M. Berveiller. Dans le même temps Hill et Hutchinson mettent sur pied une version incrémentale du schéma auto-cohérent. Ces deux schémas, sécant et incrémental, constituent encore aujourd'hui, dans des versions certes plus formalisées et profondément remaniées à la lueur de principes variationnels généraux, le bagage de base du micromécanicien des matériaux.

En 1972, André Zaoui est nommé Professeur à l'Université Paris Nord et devient rapidement directeur du Laboratoire des Propriétés Mécaniques et Thermodynamiques des Matériaux (LPMTM). Sous son impulsion, ce laboratoire initialement orienté vers la Physique s'ouvre à la Mécanique. Le laboratoire sait élaborer des monocristaux, des bicristaux, des tricristaux, des polycristaux. . . . André Zaoui y crée donc un groupe de recherche sur la plasticité cristalline qui en approfondit différents aspects expérimentaux et théoriques, parmi lesquels l'écrouissage du monocristal (son travail avec P. Franciosi sur la prépondérance de l'écrouissage latent sur l'auto-écrouissage dans le cuivre est un classique), l'effet des joints de grains et

des points triples (avec C. Rey), la formation des bandes de cisaillement dans les monocristaux, les instabilités en grandes déformations.... Le LPMTM compte des expérimentateurs de talent, comme T. Bretheau, qu'André Zaoui encourage dans la voie des essais in situ. Les premiers essais de traction sous MEB sont ainsi réalisés au LPMTM dans les années 80. Les préoccupations d'André Zaoui s'élargissent à la « Science des Matériaux », qui va bien au-delà de la Mécanique et se nourrit de Métallurgie, de Physique et de Chimie. Il joue un rôle clef dans le développement de la Mécanique des Matériaux en région parisienne et en France. Il fonde et anime, avec A. Pineau et D. François, le DEA « Mécanique et Matériaux », qui a formé toute une génération de micromécaniciens aujourd'hui impliqués dans de multiples secteurs d'activité et auquel sont intimement liés les deux volumes de cours « Comportement Mécanique des Matériaux » qui font référence, ainsi que le pôle Firtech du même nom. Pendant cette période, il se voit chargé de plusieurs missions par le CNRS.

En 1988, André Zaoui a l'opportunité de rejoindre l'École Polytechnique pour y fonder au LMS un groupe à la fois expérimental et théorique sur la Mécanique à petite échelle. Quelques années après sa création, ce groupe est l'un des premiers au monde à maîtriser les essais in situ uniaxiaux et multi axiaux sous MEB et à développer des méthodes de mesure de champs par corrélation d'image à petite échelle. André Zaoui poursuit en parallèle des travaux personnels importants. Il cherche à quantifier l'effet de la morphologie microstructurale et introduit la notion de motifs morphologiques (avec C. Stolz et M. Bornert), approfondit les modèles N-phases pour mieux prendre en compte dans le schéma auto-cohérent les voisinages immédiats des phases (avec E. Hervé), s'intéresse aux interfaces et à leur influence sur les propriétés macroscopiques des biphasés, et revient à l'un de ses thèmes de jeunesse, la linéarisation du comportement élasto-viscoplastique (avec Y. Rougier et R. Masson) ce qui le conduit à la proposition du schéma affine. Si, à ce stade de sa carrière, ses travaux personnels sont dans le domaine de la modélisation, il milite sans relâche, avec son groupe de recherche, pour le développement de méthodes expérimentales fines qui prolongent les moyens *d'observation* en *méthodes de mesure* (les cartes de déformation obtenues par suivi de microgrilles en sont l'une des premières illustrations). Ces *mesures de champ*, aujourd'hui en pleine expansion, permettent une exploitation des résultats d'expériences bien plus approfondie que le seul examen des courbes de traction et un dialogue avec la modélisation encore plus riche. André Zaoui est également convaincu de la complémentarité entre la simulation numérique à l'échelle des microstructures (par exemple sous la forme du « mésoscope numérique ») et l'expérimentation locale, qui ouvre la voie à une identification plus précise et plus physique des lois de comportement des phases. Il explore également les pistes ouvertes par les simulations moléculaires, notamment pour étudier les effets d'échelles induits par la présence d'interfaces de différentes natures. Dans la période 1990–2005, recherche et formation sont intimement liées dans son activité à l'École Polytechnique et au delà. Entre autres activités pédagogiques avancées, il est l'un des instigateurs des écoles d'été d'homogénéisation organisées sous l'égide du CNRS à La Londe en 1998 et en 2003 et à Briançon en 2010. Au début des années 2000, il propose la création de la Fédération Francilienne de Mécanique dont il sera le premier directeur.

Sa grande culture (scientifique évidemment, mais pas seulement) a valu à André Zaoui le respect de ses collègues mécaniciens mais aussi physiciens et métallurgistes, académiques ou industriels. Elu membre correspondant de l'Académie des Sciences en 1990, il est membre fondateur de l'Académie des Technologies depuis 2000 et membre étranger de l'Académie Marocaine Hassan II depuis 2006. Il est fréquemment sollicité pour des missions d'évaluation ou de prospective en raison de sa hauteur de vue. Il a notamment été responsable d'un groupe de travail de l'Académie des Sciences sur « les Matériaux du Nucléaire ».

Ce numéro thématique regroupe des contributions d'élèves, collaborateurs ou interlocuteurs d'André Zaoui, admirateurs dans tous les cas, en France ou à l'étranger. Des thèmes chers à André y sont abordés, dans le désordre, taille du volume élémentaire représentatif, description mathématique des morphologies microstructurales, bornes sur les propriétés effectives de composites linéaires, méta-matériaux, matériaux à mémoire de forme (alliages ou polymères), élastomères poreux, nanocomposites, rupture des composites tissés, panneaux sandwich, viscoélasticité et effets de mémoire, et différents aspects de la plasticité, plasticité des matériaux amorphes, anisotropie induite en grandes déformations, rôle des interfaces, effets de taille de grains dans les polycristaux et prise en compte de la montée des dislocations incluant des effets chimiques. L'étendue de cette liste donne un aperçu des multiples implications du domaine et de la diversité des domaines d'intérêt d'André Zaoui. Un colloque en son honneur avait rassemblé un certain nombre des contributeurs à Briançon à la fin de l'été 2010, dans cette région des Alpes du Sud qu'André affectionne particulièrement. D'autres auteurs, qui n'avaient pas pu être présents à Briançon en 2010 s'y sont joints pour faire le point sur les « Avancées Récentes en Micromécanique des Matériaux », par amitié, par reconnaissance et par admiration envers André Zaoui.

Recent Advances in Micromechanics of Materials

A special issue of Comptes Rendus Mecanique in honor of André Zaoui

Preface

In the last few decades, Mechanics of Materials has witnessed – in France as in the rest of the world – spectacular advances, which have been made necessary by the innovation and security requirements in various industries, such as the energy and transport sectors, as well as possible by concurrent advances in Physics and Continuum Mechanics. By their very nature, materials are heterogeneous at one, or more, length scale(s). Taking into account these heterogeneities governing the interactions among the elementary mechanisms at the appropriate scale is often the key to the understanding and successful prediction of the mechanical behavior of materials in applications at the macroscopic scale. The study of these problems involving changes of scales is precisely the objective of *Micromechanics of Materials*, to which this Special Issue is devoted.

This Special Issue is also a natural venue for honoring one of the most emblematic actors in the field, André Zaoui, who has contributed in crucial ways to the establishment of a rigorous basis for the *micro–macro approach*, and to its validation by means of an ambitious experimental program. Through his research and teaching contributions, as well as by the creation, ahead of its time, of a research group dedicated to micromechanical experiments, André Zaoui initiated – and then indefatigably encouraged – the field of *Micromechanics of Materials* in France, thereby solidly anchoring it in a fruitful dialog between small-scale experiments and modeling.

André Zaoui was born in 1941 in Vialar, Algeria (then French territory). He revealed himself to be an exceptionally gifted student in all disciplines, scientific and literary, achieving, for example, the first prize in the General Greek Competition in 1957. His many talents and literary culture can be witnessed in his scientific writings, articles and reports, where it is evident that the placement of each word has been carefully chosen. André Zaoui joins the Ecole de Mines in Paris in 1960. He thinks about pursuing a research career in theoretical physics, until his serendipitous encounter with Jean Mandel, who introduces him to Mechanics as envisioned by this exceptional man, and persuades him to write a dissertation in the Laboratory of Solid Mechanics (LMS) of the Ecole Polytechnique. There he mingles with other young mechanicians, who will become in due time the scientific leaders of the LMS, including H.D. Bui, L. Brun, and especially J. Salençon, who will provide valuable advise to André at key moments in his scientific career. André's thesis, entitled "Study of the specific influence of the misorientation of grains on the viscoplastic behavior of metal polycrystals (FCC systems)," was defended in the Faculty of Sciences of the University of Paris in 1970. André Zaoui likes to say that his thesis was based on an experimental observation made by chance (even if, as everyone knows, chance has to be earned!). A power failure during a creep experiment under vibration, having temporarily stopped the vibrations, allows him to observe what he would later call with L. Brun *creep hesitation* (a temporary arrest in creep while the vibrations are interrupted, and then restarted under static charge). The search for an explanation to this phenomenon led him to the study of grain interactions in polycrystals. He starts by reading the works of E. Kröner, ignoring that R. Hill and J.W. Hutchinson were also working on the subject, and reaches, independently, the conclusion that Kröner's version of plastic accommodation in the grains is too stiff. He makes the proposal to soften the interactions by means of an *intergranular plastic accommodation* coefficient that he incorporates into his secant, isotropic scheme, which will be systematically developed in his work with M. Berveiller. At the same time, Hill and Hutchinson formulate an incremental version of the self-consistent scheme. These two methods, secant and incremental, constitute still today – further formalized and extended by means of variational principles – the basic tools of micro-mechanicians of materials.

In 1972, André Zaoui is named Professor at the University of Paris North and quickly becomes Director of the Laboratory of Mechanical and Thermodynamical Properties of Materials (LPMTM). Under his leadership, the LPMTM, originally a Physics laboratory, opens up to Mechanics. The laboratory had the technology to grow single crystals, bicrystals, tricrystals and polycrystals.... André Zaoui consequently forms a research group there on crystal plasticity that would focus its efforts on a diverse set of experimental and theoretical issues. These include the investigation of single crystal hardening (his work with P. Franciosi on the dominance of latent hardening over self-hardening in copper is now classical), the effect of grain boundaries and triple points (with C. Rey), the formation of shear bands in single crystals, instabilities under finite deformations.... The LPMTM has talented experimentalists, including T. Bretheau, who is encouraged by André Zaoui to pursue *in situ* experiments. The first traction experiments under SEM are thus carried out in the LPMTM in the eighties. The interests of André Zaoui widen with time as he embraces "Materials Science," going beyond Mechanics into the realms of Metallurgy, Physics and Chemistry. He plays a key role in the development of Mechanics of Materials in Paris and beyond in France. Together with A. Pineau and D. Francois, he creates and carries forward the Master program (DEA) in *Mechanics and Materials*, which served to train a whole generation of micromechanics researchers who are today involved in multiple sectors of the activity, and to which are intimately connected the two volumes of the course on "Mechanical Behavior of Materials." In addition, he is involved in the creation of the Firtech Pole, entrusted with numerous responsibilities by the CNRS.

In 1988, André Zaoui is recruited by the CNRS and the Ecole Polytechnique, and is offered the opportunity to go back to the LMS with the mission to create an experimental/theoretical group on Mechanics at small scales. Several years after its creation, this group becomes one of the first in the world to master uniaxial and multi-axial *in situ* tests under SEM and

to develop the ability to measure fields by small-scale image correlation techniques. He pursues in parallel several important projects of personal interest. He seeks to quantify the effect of microstructural morphology introducing the notion of morphological patterns (with C. Stolz and M. Bornert). He works (with E. Hervé) on the development of N-phase models to better take into account the effect of "interphases" on the macroscopic properties of two-phase composites by means of the self-consistent scheme. And, going back to one of his earlier topics of interest – linearization schemes of elastoplastic behavior – he proposes (with Y. Rougier and R. Masson) the affine method. While at this stage in his career his personal work becomes more focused on modeling, he continues to push, together with his research group, for the development of finer experimental methods prolonging the means of observation in measurement techniques (deformation maps obtained by monitoring microgrids was one of the first examples). These field measurements, which are now in full expansion, allow the exploitation of experimental results in much more depth than the sole consideration of traction curves, as well as a much richer dialog with modeling. André Zaoui was equally convinced of the complementarity between numerical simulation at microstructural length scales (for example, under the form of the "numerical mesoscope") and local experimentation, opening up a new avenue for much finer identification and physical description of the laws of local behavior. He also explores the clues offered by molecular simulations, especially in the study of the effects of scales induced by the presence of interfaces of different characters. During the period of 1990 to 2005, research and education are intimately linked in his activity at the Ecole Polytechnique and beyond. Among several advanced pedagogical activities, he was one of the people behind the summer schools on homogenization that were organized with the support of the CNRS at La Londe in 1998 and 2003, and at Briançon in 2010. During the same period, he provides the needed leadership for the creation of the Mechanics Federation of the Ile de France.

His broad scientific culture has earned André Zaoui the respect of his academic and industrial colleagues in mechanics, as well as in physics and metallurgy. He was elected Corresponding Member of the French Academy of Sciences in 1990, is a Founding Member of the Academy of Technologies since 2000 and Foreign Member of the Academy Hassan II of Morocco since 2006. Because of his broad perspective of the subject, he is often asked to serve on evaluation panels and advisory committees. He was also responsible for a working group on "Nuclear Materials" for the Academy of Sciences.

This Special Issue brings together contributions from students, collaborators and associates of André Zaoui, all of them great admirers, in France and abroad. Topics that are dear to André are treated, including the size of the representative volume element, mathematical characterization of microstructural morphology, bounds for the properties of linear composites, metamaterials, shape-memory materials (alloys and polymers), porous elastomers, nanocomposites, failure of woven composites, sandwich panels, viscoelasticity and memory effects, and different aspect of plasticity, including amorphous plasticity and deformation-induced anisotropy, interfaces, grain-size effects in polycrystals, and a model of dislocation climb including chemical effects. The breadth of this list provides an overview of the many activities in the field, as well as of the diversity of André Zaoui's interests. Toward the end of the summer of 2010, a colloquium in his honor brought together a certain number of the contributors to this Special Issue to Briançon – in that region of the French Southern Alps that André is so particularly fond of. Other authors, who were not able to be with André in Briançon on this occasion, readily contributed to this Special Issue on *Recent Advances in Micromechanics of Materials*, in friendship, recognition and admiration for André Zaoui.

M. Bornert
Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, Université Paris-Est, 6-8, Avenue Blaise Pascal, Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée cedex, France
E-mail address: michel.bornert@enpc.fr

R. Brenner
Institut Jean Le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie, CNRS, Tour 65-55, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France
E-mail address: renald.brenner@upmc.fr

O. Castelnau
PIMM, CNRS, Arts & Métiers ParisTech, 151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France
E-mail address: olivier.castelnau@ensam.eu

P. Ponte Castañeda
Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104-6315, USA
Madrid Institute for Advanced Studies of Materials (IMDEA-Materials), 28040 Madrid, Spain
E-mail address: ponte@seas.upenn.edu

P. Suquet *
Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, UPR CNRS 7051, Ecole Centrale Marseille, Aix Marseille University, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille cedex 20, France
E-mail address: suquet@lma.cnrs-mrs.fr