

Lettre d'information du GIME n° 16 – Octobre 2023

Editorial

Presque un an depuis la dernière parution d'Empreinte : nous sommes heureux de vous retrouver pour cette nouvelle édition. Pour ceux qui n'ont pu y assister (et même pour les autres, cela vous rappellera de bons moments), vous trouverez un article sur le colloque Indentation 2023 de Tours, un mot du lauréat du prix de thèse et nos grands classiques avec les derniers articles de la communauté. Un court compte rendu de l'assemblée générale qui s'est tenue en juillet est également proposé.

Deux évènements à venir en octobre 2023 (Turin) et Mai 2024 (Prague) sont également à retrouver en page 6.

En fin de gazette un hommage est rendu à Alain lost, qui nous a quitté en septembre.

Julie Marteau, Francine Roudet, Alex Montagne

Table des matières

La vie au GIME	2
Retour sur le colloque Indentation 2023 à Tours.....	2
Prix de thèse « Empreinte »	4
Retour sur la journée scientifique de la SF2M 2023	4
L'Assemblée Générale du GIME	6
L'actu des labos	7
Publications récentes du groupe	7
Offre de thèse.....	8
Evènements.....	9
Hommage à Alain lost	9
Contacts.....	11

La vie au GIME

Retour sur le colloque Indentation 2023 à Tours

(par F. Lacroix, O. Smerdova et E. Le Bourhis)

Le colloque Indentation 2023 du Groupe GIME (Groupe Indentation Multi-Echelle) de la SF2M s'adressait aux universitaires et aux industriels intéressés par les problématiques de la caractérisation mécanique par indentation instrumentée à différentes échelles. Les objectifs de cette série de colloques sont d'échanger sur les récentes avancées de cette technique en termes de développements expérimentaux, de caractérisation de propriétés et de comportement, de gammes de matériaux étudiées, d'analyse des résultats ou de simulation numérique.

La huitième édition a eu lieu à Tours du 05 au 07 Juillet 2023, organisée par le laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé (LaMé) de l'Université de Tours et l'Institut Pprime de l'Université de Poitiers et l'ISAE-ENSMA. Comme pour les précédentes éditions, l'évènement s'est décomposé en deux parties :

- Deux demi-journées de formation avec quatre sessions. Dans ce cadre, nous avons choisi de mettre l'accent sur l'expérimentation et l'analyse des données. Une session sur machines d'indentation a été donnée par les différents fournisseurs (Anton Paar, Fischer, Alemnis/Eden, Bruker) et suivie par une session d'analyse dispensée par L. Charleux. En amont, une session consacrée aux fondamentaux et aux comportements des polymères ont été dispensées par respectivement S. Benayoun et C. Gauthier. Une quarantaine de personnes ont suivi cette formation.



- Quatre demi-journées de conférences. 92 personnes y ont participé dont 20 doctorants et 15 industriels. 26 présentations orales ont été données et 10 posters ont été présentés. 7

exposants ont pu également intervenir et présenter leurs offres d'équipements liés à l'indentation instrumentée. Etienne Barthel a par ailleurs fait le point, lors d'une *keynote*, sur la Microplasticité des amorphes silicatés - quelques développements expérimentaux récents.





Les participants ont retrouvé l'ambiance positive du colloque et profité des moments festifs notamment au château de Villandry.



A la rédaction de ce retour, nous avons une pensée émue pour Alain Iost, participant fidèle de notre groupe, qui nous a quitté.

L'équipe organisatrice : Florian LACROIX, Olga SMERDOVA, Eric LE BOURHIS, Guénaél LE QUILLIEC, Julie PEPIN, Christophe TROMAS, Florian FEYNE, Gaëlle BERTON, Arnaud DUCHOSAL, Stéphane MEO, Benoit ROSA, Naima BENYAGOUR, Sabrina LEFEBVRE, Charlène COURATIN, Lydia BAZIR, Amélie PLUMEREAU, Luc LECROISEY, Abdellah BOUAMOUD, Katia BUREAU, Sylvie METAYER

Les actes du Colloque Indentation 2023 à Tours seront publiés dans « Indentation advances in experiments and modelling ». Matériaux & Techniques, à paraître en 2024.

Prix de thèse « Empreinte »

Le prix de thèse Empreinte a été décerné à Morgan Rusinowicz pour sa thèse intitulée “Détermination des propriétés mécaniques et électriques de couches minces diélectriques par une approche couplant des expériences de nanoindentation-électrique et des simulations numériques utilisant la méthode des éléments finis”, co-encadrée par Muriel Braccini et Fabien Volpi, au laboratoire SIMaP.

Sa thèse avait pour objectif d’identifier les comportements mécaniques et électriques de trois systèmes modèles au cœur des dispositifs fonctionnels modernes, comparables sur la forme, mais très différents en termes de propriétés et d’applications. Dans les trois cas, il s’agit d’empilements complexes de couches minces diélectriques sur des substrats conducteurs. Les réponses mécaniques et électriques locales de ces systèmes ont été suivies par une technique sophistiquée de nanoindentation instrumentée couplée à des mesures électriques fines, dites de « nanoindentation-électrique » (cf. Fig. 1b). L’instrument utilisé a été développé « maison » au laboratoire SIMaP de Grenoble et permet suite à cette thèse d’effectuer des mesures électriques uniques et extrêmement sensibles sur des couches minces diélectriques sous sollicitation mécanique à des échelles sub-micrométriques. Les résultats expérimentaux d’indentation ont été traités à l’aide de simulations numériques avancées (FEM multiphysiques, X-FEM, zones cohésives, plasticité à gradient, ...) afin de comprendre les phénomènes fondamentaux expliquant les observations et également d’adopter une approche quantitative pour extraire les propriétés des matériaux. Voici plusieurs questions génériques d’intérêt à la fois académique et applicatif, dépassant complètement les systèmes étudiés, auxquelles cette thèse a permis de répondre : Comment déterminer les propriétés de fissuration d’une couche fragile déposée sur un substrat ductile ? Quel est l’impact d’une couche dure sur les propriétés plastiques d’un substrat mou ? Par quel mécanisme est régie la conduction électrique de l’oxyde cuivreux Cu_2O ? Quel est l’effet d’une déformation plastique sur la conduction d’un matériau diélectrique ?

Pour retrouver les travaux de thèse du lauréat, regardez sa vidéo sur le site du GIME : https://sf2m.fr/events/prix_these_empreinte_2023/

Retour sur la journée scientifique de la SF2M 2023

(par G. Kermouche)

Le Groupe d’Indentation Multi-Echelle de la SF2M a organisé le 30 mars 2023 au FIAP Jean Monet à Paris une journée scientifique dédiée aux essais micromécaniques in situ en conditions extrêmes. Son objectif était de faire le point sur les derniers développements micromécaniques dans ce domaine, que ce soit du point de vue académique ou guidé par l’application. Cette journée a réuni environ 80 participants en présentiel et quelques-uns à distance en raison de difficultés de transport.



Après une introduction rapide de la journée, la parole a été donnée à Thomas Pardoën (UC-Louvain). Celui-ci avait la lourde tâche de lancer la journée avec un exposé intitulé « quel essai micromécanique pour quelle échelle ». Le second exposé de la journée, intitulé « Micro-géodynamique : au croisement des échelles de temps et d'espace », a été donné par Patrick Cordier (UMET, Univ Lille). L'audience fut « servie » en matière de conditions extrêmes – haute température, haute pression, vitesse de déformation infiniment petite ... Le troisième exposé de la journée a été consacré à l'utilisation des « essais micromécaniques MET & MEB in situ pour étudier les effets d'irradiation dans les métaux ». A cette occasion, Marc Legros (CEMES) nous a présenté comment les essais de micro-compression et les essais de micro-flexion pouvaient être mis à profit dans ce contexte. La journée s'est poursuivie par la présentation de Fabien Volpi (SiMaP, Univ Grenoble-Alpes) intitulée « Enrichir la nanoindentation en la couplant in-situ à des mesures électriques et des observations MEB ». La matinée s'est terminée par la présentation de Damien Texier (ICA, IMT Mines Albi), intitulée « Essais micromécaniques à haute température : Cas des superalliages à base de nickel revêtus ».

Après la pause déjeuner, nous avons pu assister à un exposé de Jean-Luc Loubet (LTDS, Centrale Lyon) sur les essais de nanoindentation à haute température. La seconde présentation de l'après-midi, Szilvia Kalacska (LGF, Mines Saint-Etienne), intitulée « suivi par émission acoustique des événements plastiques lors de la compression de micro-piliers », a souligné l'apport du couplage des mesures micromécaniques à l'émission acoustique. La journée s'est ensuite poursuivie par la présentation de Xavier Maeder (EMPA Thun) sur « Le rôle de l'orientation cristalline, de la vitesse de déformation et de la température sur le maillage mécanique du magnésium ».

La journée s'est terminée par une table ronde laissant la parole à Daniel Maisonnette (CETIM), Jean-Christophe Brachet (CEA), Thierry Couvant (EDF) et Lionel Marcin (SAFRANTECH) sur la thématique « quelles opportunités pour les applications industrielles d'aujourd'hui et de demain ».

Pour un compte-rendu détaillé de la journée, RDV sur le site web du GIME (<https://sf2m.fr/events/micromecanique-experimentale/>)

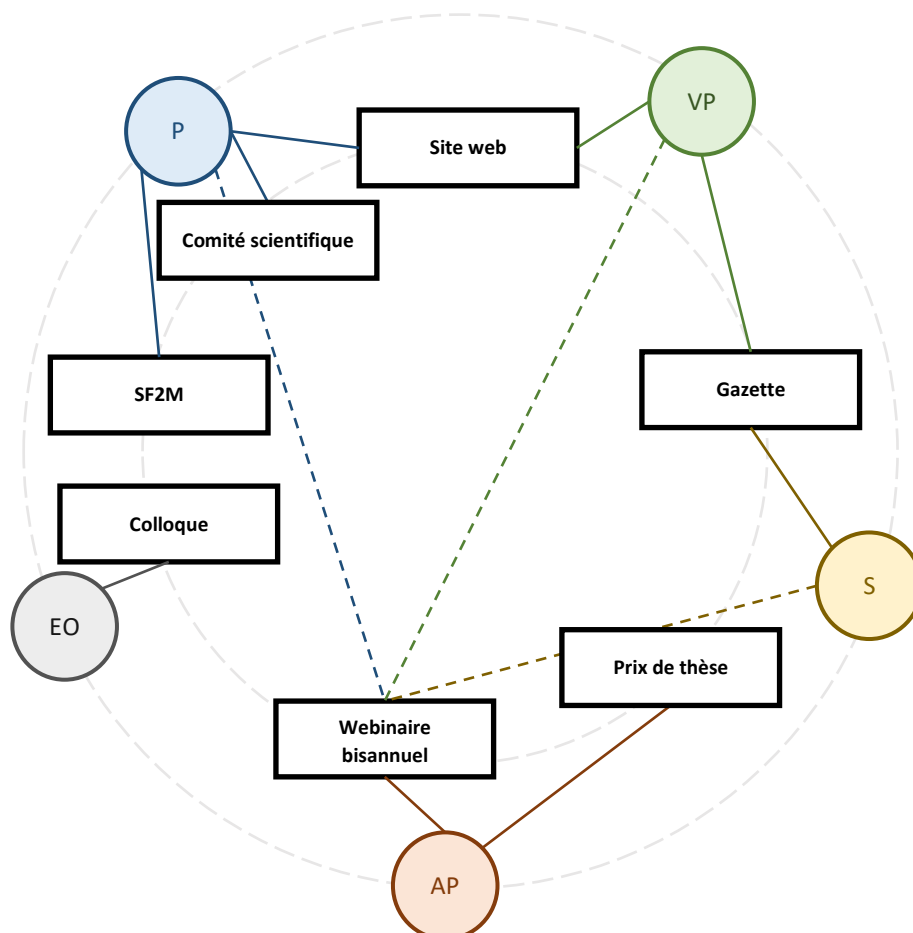
L'Assemblée Générale du GIME

L'assemblée générale (AG) du GIME s'est tenue le 5 juillet à l'issue de la journée de conférence. Un retour a été fait sur les différents événements qui ont eu lieu depuis la dernière édition du colloque (webinaire, journée scientifique SF2M).

Une discussion s'est engagée sur la pérennité du prix de thèse offert tous les deux ans. Actuellement la SF2M peut ne plus financer ce prix. Comment assurer la continuité de ce prix ? Plusieurs options ont été émises : inclure une contribution dans l'inscription au colloque, jumeler l'inscription au colloque avec une inscription à la SF2M et ainsi augmenter l'abondement de la SF2M... Aucun choix n'a encore été fait mais les discussions restent ouvertes.

Le Bureau du GIME évolue. Une nouvelle structuration a été proposée lors de l'AG. Désormais le Bureau sera constitué de 5 personnes pour un mandat de 4 ans, correspondant à 2 colloques, plus un membre de l'équipe organisatrice du colloque suivant :

- Président (P) : Guillaume Kermouche
- Vice-Président (VP) : Alex Montagne
- Secrétaires (S) : Julie Marteau et Francine Roudet
- Ancien Président (AP) : Gérard Mauvoisin
- un membre de l'Equipe Organisatrice du prochain colloque (EO) : Fabrice Richard pour les deux ans à venir



Plusieurs projets sont (re)mis en œuvre pour cette mandature :

- L'écriture d'un livre sur l'indentation par la communauté française
- Le développement de « l'IndenToolBox », outil numérique participatif pour le dépouillement et l'analyse des données d'indentation

L'actu des labos

Publications récentes du groupe

Rousselot C, Bourgault D, Delobelle P. Thermo-magneto-mechanical properties of near stoichiometric Ni₂MnGa (Mn>Ga) thin films deposited by radio-frequency magnetron sputtering on Si substrate. *Thin Solid Films* 768 (2023) 139718. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139718>

Taleb M, Bulteel D, Betrancourt D, Roudet F, Rémond S, Montagne A, Chicot D. Multiscale mechanical characterization of the interface in 3D printed concrete. *Materials and Structures*. 56, 24 (2023). <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02114-y>

Dziri A, Montagne A, Roudet F, Ziouche K, Chicot D. Martens hardness of Constantan thin films on (100) Si wafer: Improvement in contact area function. *Thin Solids Films*. 768 (2023) 139712. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139712>

Taleb M, Bulteel D, Betrancourt D, Roudet F, Rémond S, Chicot D. Interfacial weakness criterion by indentation in 3D printed concrete. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 10, 2 (2023) 318-329. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0128>

Berrais A, Boudebane A, Labaiz M, Montagne A, Lemboub S, Touhami MZ, Ourdjini A. Analysis of wear of a nitrided AISI H13 hot work tool steel in an aluminium hot extrusion process. *Wear*. 514 (2023) 204587. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204587>

Vitry V, Yunacti M, Mégret A, Khalid HA, Staia MH, Montagne A. Selection of New Heat Treatment Conditions for Novel Electroless Nickel-Boron Deposits and Characterization of Heat-Treated Coatings. *Coatings*. 13 (2022). <https://doi.org/10.3390/coatings13010001>

Bouali A, Graira S, Nettour D, Cherait Y, Montagne A, Iost A, Chicot D. Instrumented indentation based methods to assess fracture toughness (KIC) of self-compacting concrete: Influence of water to binder (w/b) ratio and type of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 275 (2022) 108786. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108796>

Youssef A, Vandamme M, Château C, Garnier D, Jolivet I, Onaisi A, Richard D, Zandi S. Linking Elastic Properties of Various Carbonate Rocks to Their Microstructure by Coupling Nanoindentation and SEM-EDS. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 170 (2023) 105456. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105456>

Dreano A, Alnajjar M, Salvatore F, Rech J, Bosch C, Wolski K, Kermouche G, Christien F. Effect of ball-burnishing on hydrogen-assisted cracking of a martensitic stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47 (2022) 39654-39665. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.110>

Barthel É, Deschamps T, Kermouche G, Martinet C, Molnar G, Tanguy A. Le verre : fragile ou ductile ?. *Reflète de la physique*, 74 (2022) 46-51. <https://doi.org/10.1051/refdp/202274046>

Guruprasad T S, Keryvin V, Kermouche G, Marthouret Y, Sao-Joao S. Compressive behaviour of carbon fibres micropillars by in situ SEM nanocompression. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 173 (2023) 107699. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107699>

Malkorra I, Sao-Joao S, Costa U, Chalavoux D, Bucher S, Perardel N, Kermouche G. Multi-scale in-situ micro-mechanical characterization of Polymer Core Solder Ball (PCSB) coatings for BGA interconnections. *Microelectronics Reliability*. 148 (2023) 115135. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.115135>

Tiphéne G, Kermouche G, Baral P, Maurice C, Guillonneau G, Bergheau JM, Loubet JL. Quantification of softening kinetics in cold-rolled pure aluminum and copper using High-Temperature Scanning Indentation. *Materials & Design*. 233 (2023) 112171. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112171>

Marthouret Y, Zaouter T, Ledrappier F, Kermouche G. Wedge indentation of elastoplastic solids--from single indentation to interaction between indenters. *Journal of Theoretical, Computational and Applied Mechanics*. (2023)

Offre de thèse

Le CTICM, en collaboration avec le LGCGM de Rennes, recherche un candidat de thèse sur le "Ré-emploi de structures métalliques". Ce sujet de thèse a pour objectif de contribuer à la mise en place d'une filière de ré-emploi des structures métalliques issues de la déconstruction, afin de court-circuiter l'ensemble des opérations de recyclage dont la re-fusion du métal et la re-mise en forme des profils sidérurgiques, extrêmement coûteuses en temps et en énergie.

La géométrie des éléments de structures sera relevée directement sur le chantier, ainsi que les propriétés mécaniques qui seront déterminées grâce à la caractérisation mécanique réalisée par indentation in-situ sur le chantier même de la déconstruction.

La fiche d'identité de chaque élément rejoindra une base de données, accessible par les bureaux d'étude, afin de prendre en compte les caractéristiques géométriques et mécaniques réelles dans les modélisations par la méthode des éléments finis pour prévoir le comportement des structures utilisant ces poutres métalliques issues de la filière de réemploi.

- Localisation : CTICM - Espace Technologique - l'Orme des Merisiers Immeuble Apollo - 91193 SAINT-AUBIN

- Contact :

André Beyer, 01.60.13.83.73, abeyer@cticm.com

Maël Couchaux, 02.23.23.82.24, mael.couchaux@insa-rennes.fr

Gérard Mauvoisin, 02.23.23.87.78, gerard.mauvoisin@univ-rennes.fr

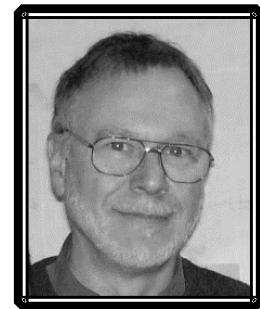
Evènements

- Le 1^{er} atelier en indentation instrumentée pour l'industrie se tiendra à Turin (Italie) le **20 octobre 2023**. « Les présentations d'une journée porteront sur divers aspects de l'IIT présentant un intérêt pour l'industrie. Des scientifiques et des experts renommés de différents pays ont été invités en tant qu'orateurs. »
Renseignements et inscription : <https://www.anton-paar.com/my-en/services-support/seminars/detail/event/workshop-on-instrumented-indentation-test-for-industry/>
- La 16^{ème} conférence *Local Mechanical Properties* se tiendra à Prague (République Tchèque) du **29 au 31 mai 2024**. « La conférence abordera les résultats récents de la recherche et du développement dans le domaine de l'ingénierie des matériaux, des méthodes expérimentales, de la modélisation, etc., dans le but de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux de l'échelle nanométrique à l'échelle micro/mésométrique. »
Renseignements et inscription : <http://lmp-conference.cz/>

Hommage à Alain Iost

A la mémoire d'Alain,

A l'homme, au chercheur, à l'ami...



Alain nous a quitté au mois de septembre, lors d'une rentrée scolaire, quelle sortie pour le prof qu'il était ! Mais quelle sortie inattendue, bien trop soudaine et surtout tellement prématurée, elle nous a tous très profondément attristé. Nous, ses amis proches qui écrivons ces lignes, sommes fracassés, l'un d'entre nous a dit : « j'ai perdu mon père une seconde fois ». Il a marqué de son « empreinte » tellement d'élèves, tellement de chercheurs. Il a su impressionner par son savoir et son humilité ceux qu'il a croisé un jour durant un congrès ou qu'il a formé durant sa longue carrière... Il avait ce don d'attirer auprès de lui de nouveaux collaborateurs. Certes, sa verve pouvait piquer mais c'était sans méchanceté, juste une marque d'exigence. A son premier contact, elle avait de quoi surprendre ceux qui ne le connaissaient pas. Mais, il a toujours été là pour les guider et les accompagner dans leurs carrières professionnelles. Son personnage haut en couleurs les a marqués. Sa pipe légendaire, rivée dans un coin de ses lèvres, lui collait au visage à la manière du capitaine Haddock. Elle lui donnait cette bonhomie naturelle qu'il a su conserver toutes ces années. En entrant dans son bureau, l'odeur si particulière de son tabac vous faisait comprendre que vous entriez dans son univers, un univers de travail, d'exigence scientifique, mais

de profonde humanité. On pouvait parler de la Normandie, de jardinage, de science, de tout, de la vie en fait...

Son histoire de scientifique a débuté à Caen en 1972 au sein du laboratoire de Chimie Minérale Industrielle par un DEA sur les relations entre les caractéristiques mécaniques et microstructurales de composites carbure cobalt et son premier article en 1973 au titre prémonitoire « Etude de la variation de la dureté sous charge réduite de composites carbure-métal ». Dans cet article, Alain introduit quatre concepts qui sont à la base de sa future vision de la micro-indentation qu'il déclinera le long de sa brillante carrière (Représentativité, Phénoménologie, Validation, Géométrie). Alain considère qu'il existe un volume d'indentation représentatif optimal, donc relié à la charge, telle qu'une loi phénoménologique doit pouvoir décrire les finesses de la microstructure du composite. A partir de cela, il bâtit un modèle à peu de paramètres mais dont il montre statistiquement la robustesse par une analyse expérimentale rigoureuse. Il refusait d'affirmer que son modèle puisse être juste s'il ne modélisait pas correctement des résultats issus de la bibliographie, c'était une marque de fabrique. Nous nous souvenons de son argument mythique « On ne pourra pas critiquer mon modèle car il est validé par des données externes issues de plusieurs sources ». Il a pratiqué ces multiples comparaisons en dureté, fatigue, relaxation, ténacité, morphologie... En un sens, Alain est un précurseur de ce que demain sera la validation expérimentale par l'utilisation des bases de données communes. Finalement, en fin d'article, Alain nous propose une loi géométrique simple de la surface apparente de l'empreinte du matériau composite.

Puis il effectue son service militaire comme enseignant en Tunisie, à Tunis plus précisément. Il y est resté plusieurs années durant lequel il a appris l'arabe qu'il parlait couramment. Lui, l'ingénieur chimiste, y a enseigné, entre autres, la résistance des matériaux, y a monté un laboratoire, déjà la passion de la recherche et de l'enseignement l'animait. En 1981, il intègre l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers à Lille puis, la même année, le laboratoire de Métallurgie Physique, devenu aujourd'hui l'UMET. Sa recherche portait sur la mécanique de la rupture en lien avec la microstructure des matériaux en intégrant naturellement l'essai d'indentation. A son arrivée, le laboratoire dit « des matériaux » aux Arts et Métiers de Lille se résumait à deux salles contiguës de travaux pratiques de métallurgie. Juste de quoi polir les échantillons et faire quelques observations micrographiques sans oublier quelques essais de dureté. Les matériels étaient « succincts » et juste destinés à l'enseignement. Il a équipé son laboratoire naissant d'un MEB, intégré des locaux plus grands, des matériels de haut niveau en tribologie, en indentation instrumentée etc. et, surtout, il y a formé de nombreux élèves de la première année d'école d'ingénieur jusque l'HDR.

Alain avait une méthode faite de bibliographie (intensément), d'accumulation de données (au moins aussi intensément) pour se construire un socle, une fondation, à partir de là, il réfléchissait, remettait en question, spéculait, vérifiait et ne laissait rien passer. Après 1994, il a focalisé sa recherche sur une propriété mécanique qui est devenue son fil conducteur, la dureté. Il a commencé comme chacun d'entre

nous, enfin pour les plus âgés, avec l'indentation classique appliquée à la caractérisation des matériaux massifs ou revêtus. Il appliquait des modèles, mais les résultats obtenus ne le satisfaisaient pas complètement car il pensait devoir obtenir une valeur unique mais il prenait à la dureté l'idée saugrenue de varier avec la charge. Cela a été un déclic et il a ensuite dépensé une bonne partie de son énergie à comprendre pourquoi, allant même jusqu'à remettre en question les résultats et même la pertinence de l'essai. Son article « Indentation Size Effect: reality or artefact? » témoigne de son approche sur l'indentation. C'est assez inhabituel, un point d'interrogation dans le titre d'une publication. C'est tout lui.

Finalement, que de trous d'indentation réalisés pendant toutes ces années, que de discussions autour de cette empreinte pour savoir si ce que nous observions était la réalité ou un artefact, si ce petit trou était bien capable de dire ce qu'il était censé vouloir dire.

Son regard sur cet essai a souvent été confronté à celui de ses collaborateurs avec des discussions franches et animées pour extirper le vrai du faux. Il savait si bien ne pas imposer son point de vue tout en ne lâchant rien pour, finalement, avoir raison, très souvent, mais sachant admettre la défaite si nécessaire. De toute façon, tout se déroulait toujours dans la bonne humeur, parfois accompagnée d'un verre et d'un bon gâteau.

Il nous a quitté prématurément, sans demander la permission, nous ne lui aurions pas donnée, nous qui sommes tellement tristes de son départ. Qu'il emporte avec lui tout notre respect et notre affection pour le grand homme qu'il était, autant par l'esprit que par la taille. Lui qui a voué une partie de sa carrière à comprendre la variation de la dureté avec la charge, la charge est maintenant bien lourde pour espérer lui succéder. Qu'il repose en paix.

La communauté GIME...

Contacts

Bureau du GIME

Président :	Guillaume Kermouche (kermouche@emse.fr)
Président adjoint :	Alex Montagne
Secrétaires :	Julie Marteau Francine Roudet
Président sortant :	Gérard Mauvoisin

Empreinte n°16 – Octobre 2023

Une info ? Une nouvelle à partager avec tout le groupe ? Une seule adresse : gime@listes.asso.univ-rennes1.fr.

Allez voir le site du GIME hébergé par la SF2M !
Pour le consulter c'est par [ici](#).

