

Comportement au crash et à l'impact : de l'échelle de la structure à celle des matériaux constitutifs et de leurs assemblages.

Prof. Eric Markiewicz⁽¹⁾ et Dr. (HDR) Bertrand Langrand⁽²⁾

(1) LAMIH UMR CNRS 8201, Université de Valenciennes, F-59313 Valenciennes Cedex 9, France.

(2) Onéra – The French Aerospace Lab, DADS/CRD, F-59045 Lille, France.

L'analyse du comportement au crash et à l'impact des structures répond à différents objectifs : certaines structures (ou parties de structures) sont en effet dimensionnées pour se déformer avec de fortes amplitudes et dissiper un maximum d'énergie (c'est le cas par exemple des planchers des hélicoptères ou des longerons dans le bloc avant d'une automobile en crash frontal,...) ou au contraire pour résister aux chargements (les bords d'attaque des ailes d'un avion face à un impact oiseau ou le pied milieu d'une automobile en crash latéral,...). La finalité des recherches menées dans ce cadre intéresse l'intégrité de la structure (l'avion doit pouvoir maintenir une capacité de vol, les portières de l'automobile doivent demeurer fonctionnelles, ...) afin de garantir la sécurité des occupants (et la possibilité d'évacuation) lors d'un accident mettant en jeu des chargements extrêmes (i.e., crash, impact, explosion).

Différents outils sont disponibles pendant la phase de conception d'une structure. Ils doivent permettre l'analyse des champs de déplacement, de vitesse et d'accélération, ainsi que les champs de contrainte et de déformation des composants structuraux pour mesurer, selon les critères adéquats, des niveaux de survivabilité et optimiser si besoin la conception des structures.

Parmi ces outils nous distinguons l'outil numérique et l'outil expérimental. Dans les faits ils sont complémentaires, le recours à l'expérimentation seule n'existant plus depuis longtemps pour des raisons évidentes de délais de mise en œuvre et de coûts.

L'outil numérique vise à reproduire le plus fidèlement possible le scénario de crash étudié, c'est-à-dire : la structure et son environnement. Cette approche repose dans la majorité des cas sur l'utilisation d'un code de calcul aux éléments finis permettant de résoudre les équations de propagation des ondes. Le problème doit être décrit le plus fidèlement possible en tenant compte de toutes les sources de non-linéarités possibles (géométriques et matérielles en particulier). Les non-linéarités géométriques concernent principalement les grandes transformations subies par les pièces, la prise en compte des contacts, des frottements, et enfin les zones d'assemblages. Ces dernières sont introduites dans le calcul de structure au travers de modèles simplifiés, encore appelés connecteurs, permettant de décrire le comportement et la rupture des liaisons par des modèles et critères macroscopiques plus ou moins avancés. Les non-linéarités matérielles proviennent pour l'essentiel de la viscoplasticité, de l'endommagement et de la rupture des matériaux. Enfin, par l'environnement, on entend la modélisation précise de la sollicitation dynamique appliquée à la structure. Le chargement peut provenir d'un crash, d'un impact avec un obstacle rigide ou déformable, d'une explosion.

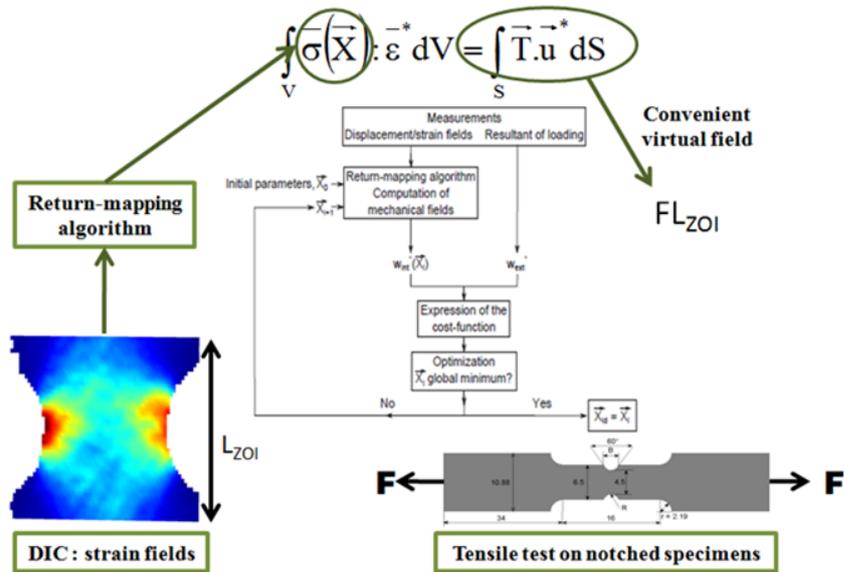
L'outil expérimental tient une place importante dans le processus de conception par les solutions qu'il apporte tant au niveau de la conception que de la progression des modèles numériques. Les essais sont réalisés à différentes échelles de la pyramide de conception : c'est-à-dire depuis le coupon de laboratoire permettant de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux jusqu'à l'essai sur la structure à échelle 1 dédié à la validation de la conception. Cette phase expérimentale repose à l'échelle du coupon sur des machines de caractérisation quasi-statique, des vérins hydrauliques rapides et des systèmes aux barres de Hopkinson pour couvrir la totalité du spectre de vitesses de déformation rencontré dans la structure. D'autres installations plus adaptées à l'échelle de la structure (e.g., catapulte, tour de crash, lanceur) sont utilisées pour tester des sous-ensembles en cours de projet ou des véhicules complets en phase de validation, en particulier dans le secteur automobile.

S'agissant de protéger et de vérifier le risque lésionnel encourus par les occupants (ou les usagers vulnérables de la route dans le secteur routier), les mêmes approches expérimentales et numériques complémentaires sont mises en œuvres aux différentes échelles afin de développer des systèmes de retenue/protection et faire évoluer les critères de blessure, bien que dans ce dernier cas la nature des matériaux à caractériser soit bien différente.

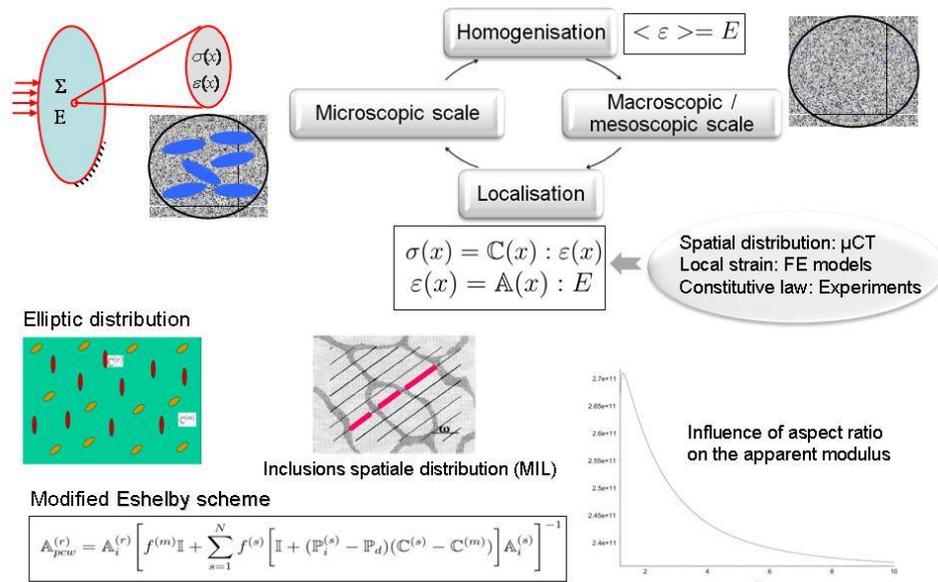
La présentation fera une synthèse des travaux menés dans ce contexte par le LAMIH de l'Université de Valenciennes et le Département DADS de l'Onéra depuis une quinzaine d'années. L'accent sera particulièrement porté sur la caractérisation du comportement dynamique de différentes classes de matériaux (incluant le biologique osseux) et sur la tenue mécanique des assemblages soudés et rivetés, à différentes échelles et pour différents trajets de sollicitations. Le lien avec l'outil de simulation numérique sera un fil rouge de la présentation, soit parce que les modèles de comportement et autres critères doivent servir à alimenter des modèles de structures, soit parce que le dialogue calcul-essai avec des modèles numériques détaillés représentatifs de l'expérience permet d'appréhender des mécanismes locaux de déformation et d'avoir accès à des mesures inaccessibles par voie expérimentale.

A titre d'exemples, les travaux suivants que nous avons menés seront abordés :

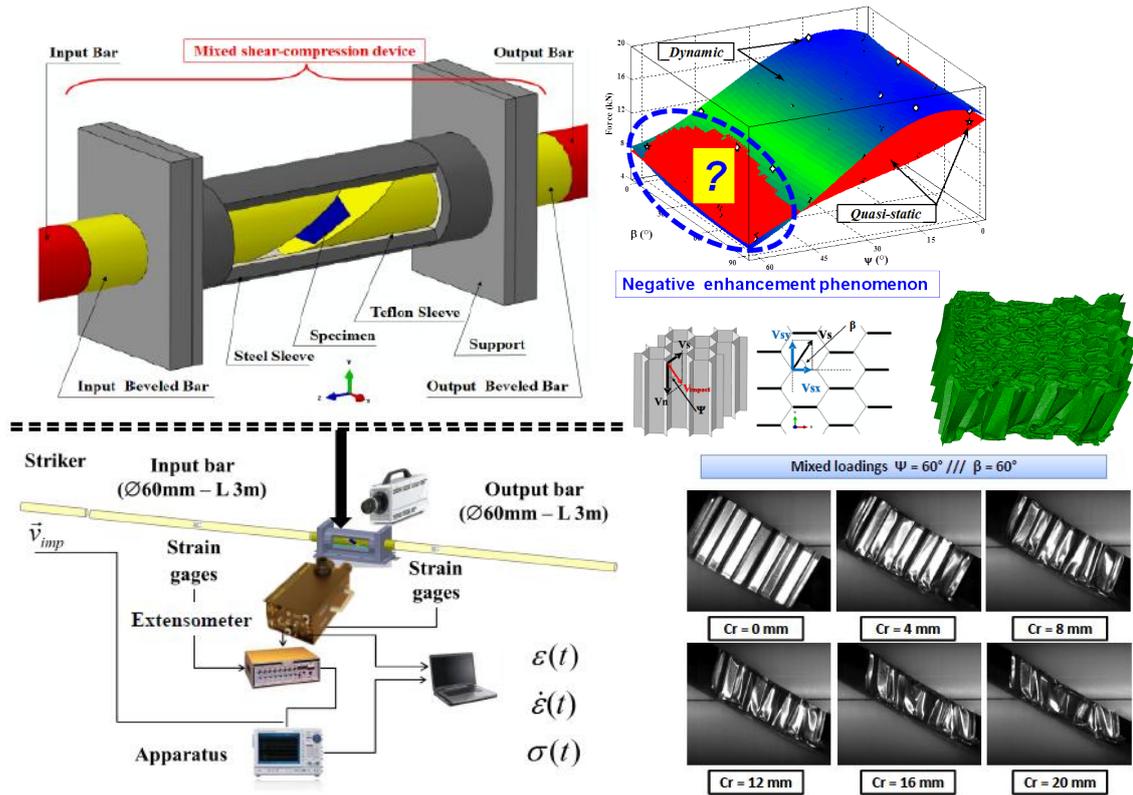
- Le développement de la Méthode des Champs Virtuels pour la dynamique rapide [1-2] qui, associée à des techniques de stéréo-corrélation d'images numériques, permet de caractériser à partir d'un unique essai dynamique statiquement indéterminé un modèle de comportement viscoplastique pour un alliage de Titane aéronautique. L'atout de cette méthode est de réduire significativement la quantité des essais réalisés aux étages les plus bas de la pyramide de conception.



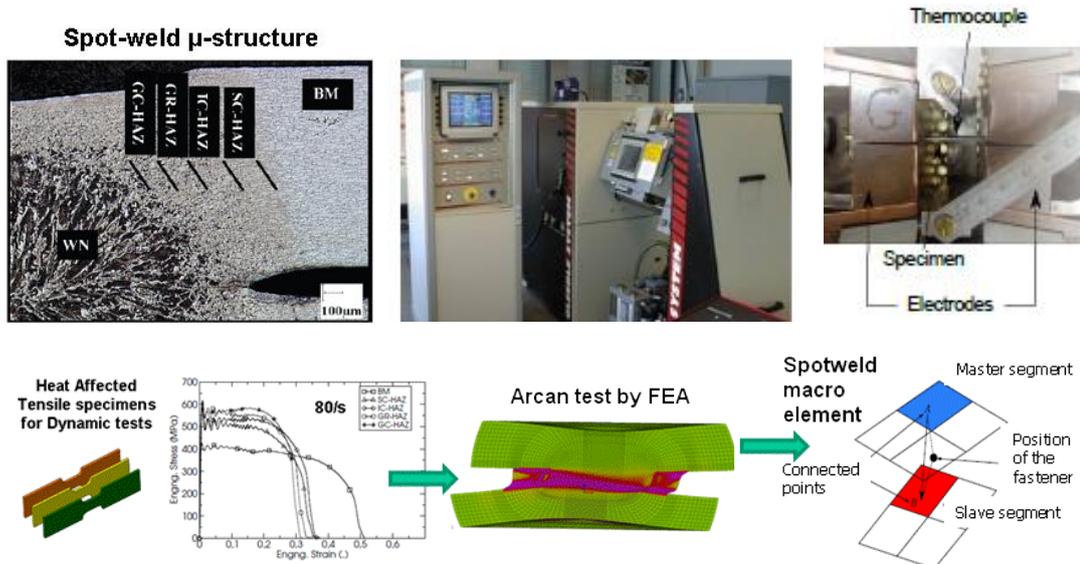
- Le recours à des essais in-situ sous micro-tomographie RX afin d'accéder à la microarchitecture 3D de l'os [3-7]. Dans le cas de l'os spongieux, les mesures de l'orientation des porosités et du degré d'anisotropie permettent de nourrir un modèle micromécanique de comportement de l'os spongieux servant à la modélisation macroscopique de segments anatomiques humains et la prédiction de lésions en biomécanique du choc.



- La mise en place d'essais multiaxiaux sur nids d'abeilles aux barres de Hopkinson couplés à un modèle EF 3D détaillé, afin d'identifier les paramètres d'un critère macroscopique de résistance pour le calcul de structures exprimé en fonction de la vitesse de sollicitation, de l'angle de chargement et de l'angle d'orientation des cellules dans le plan [8-9].

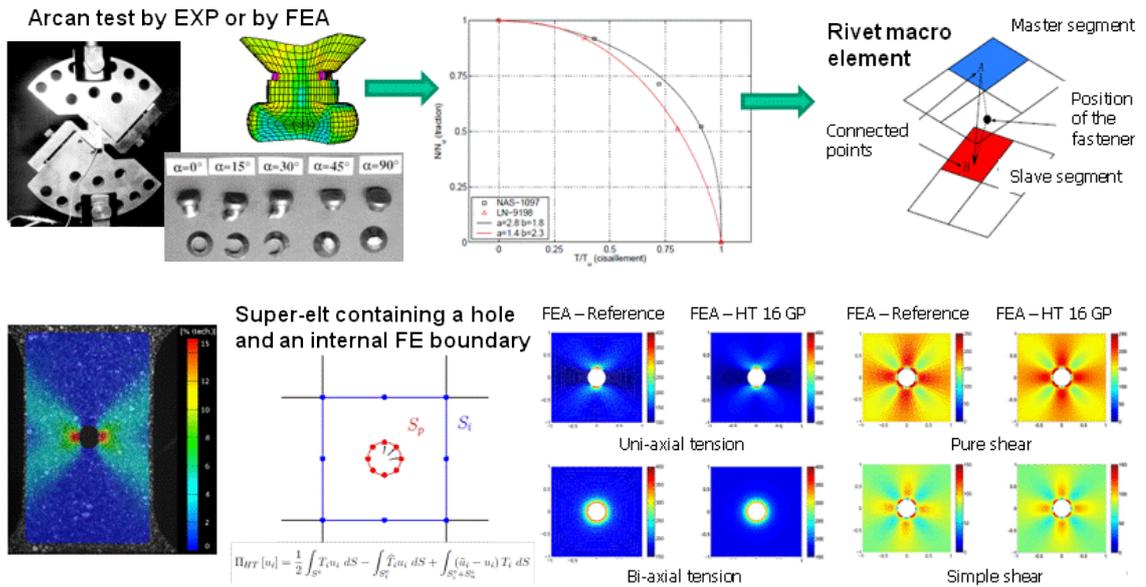


- Le déploiement d'une méthode couplée expérimentale et numérique pour reproduire la transformation métallurgique subie par le métal de base en différentes positions de la Zone Affectée Thermiquement dans le cas des assemblages soudés par point. L'objectif de cette méthode vise à caractériser les lois de comportement à utiliser dans un modèle élément fini 3D détaillé de l'assemblage, et dont les résultats sont exploités pour caractériser cette fois les paramètres d'un modèle élément fini 1D de connecteur utilisé en calcul des structures [10-13].



- Le développement d'essais dynamiques multiaxiaux sur rivets et le développement d'un super-élément fini de plaque perforée, afin de nourrir la modélisation macroscopique des assemblages rivetés en calcul des structures et de pouvoir discriminer, à termes, la rupture

du rivet de celle initiée en bord de perforation se propageant vers d'autres perforations [14-18].



Références bibliographiques

1. Notta Delphine. Méthode des champs virtuels pour la caractérisation des comportements à rupture et/ou en grandes déformations. Mémoire de Doctorat, Univ. Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 22 novembre 2011.
2. Notta D., Langrand B., Markiewicz E., Lauro F., Portemont G. (2013). Identification of Johnson-Cook's viscoplastic model parameters using the Virtual Fields Method: application to Titanium alloy Ti6Al4V. *Strain*, 49, pp. 22-45.
3. Halgrin Julien. Influence des paramètres architecturaux sur le comportement mécanique de l'os trabéculaire. Mémoire de Doctorat, Univ. Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 30 novembre 2009.
4. Halgrin, J., Chaari, F., Markiewicz, É., (2012). On the effect of marrow in the mechanical behaviour and crush response of trabecular bone. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 5(1), 231-237.
5. Mayeur Olivier. Personnalisation géométrique et mécanique multi-échelles du thorax humain. Mémoire de Doctorat, Univ. Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 13 décembre 2013.
6. Rahmoun J., Chaari F., Markiewicz E., Drazetic P. (2009). Micromechanical modeling of the anisotropy of elastic biological composites, *Multiscale Modeling and Simulation*, 8(1), pp. 326–336.
7. Jaziri A., Rahmoun J., Naceur H., Drazetic P., Markiewicz É. (2012). Multi-scale modelling of the trabecular bone elastoplastic behaviour under compression loading. *European Journal of Computational Mechanics*, 21(3-6), pp. 254-269.
8. Tounsi Rami. Comportement des structures en nids d'abeilles sous sollicitations dynamiques mixtes compression/cisaillement et effet de l'orientation des cellules. Mémoire de Doctorat, Univ. Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 11 mars 2014.

9. Tounsi R., Zouari B., Chaari F., Markiewicz E., Haugou G., Dammak F. (2013). Reduced numerical model to investigate the dynamic behaviour of honeycombs under mixed shear-compression loading. *Thin-Walled Structures*, 73, pp. 209-301.
10. Mahelle Pierre. Contribution à la caractérisation expérimentale et numérique du comportement d'assemblages soudés soumis à des sollicitations quasi-statiques et dynamiques. Mémoire de Doctorat, Univ. Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 7 décembre 2007.
11. Langrand B., Markiewicz É., (2010). Strain-rate dependence in spot welds: non-linear behaviour and failure in pure and combined modes I/II. *Int. J. Impact Engineering*, 37(7), 792-805.
12. Langrand B., Combescure A., (2004). Non-linear and failure behaviour of spotwelds – A “global” finite element and experiments in pure and mixed modes I/II. *Int J of Solids and Structures*, 41(24-25), 6631–6646.
13. Markiewicz, E., Ducrocq, P., Drazetic, P., Haugou, G., Fourmentraux, T., & Berard, J.Y. (2001). Material behaviour law identification for the various zones of the spolt-weld. *Int. Journal of Materials and Product Technology*, 16, 484-509.
14. Leconte Nicolas. Eléments finis hybride déplacement perfores pour le calcul des structures aéronautiques rivetées. Mémoire de Doctorat, Univ. Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 25 novembre 2008.
15. Hennuyer C., Leconte N., Langrand B., Markiewicz E. (2014). Interpolation functions of a hybrid-Trefftz perforated super-element featuring nodes on the hole boundary. *Finite Elements in Analysis and Design*, 91, 40-47.
16. Leconte N., Langrand B., Markiewicz E. (2010). On some features of a plate Hybrid-Trefftz displacement element containing a hole. *Finite Elements in Analysis and Design*, 46(10), 819-828.
17. Langrand, B., Deletombe, E., Markiewicz, E., & Drazetic, P. (2001). Riveted joint modelling for numerical analysis of airframe crashworthiness. *Finite Element in Analysis and Design*, 38, 21-44.
18. Langrand, B., Patronelli, L., Deletombe, E., Markiewicz, E., & Drazetic, P. (2002). An alternative numerical approach for full scale characterisation for riveted joint design. *Aerospace Science and Technology*, 6(5), 343-354.