

ESSAIS DE CARACTERISATION DYNAMIQUE DES MATERIAUX AUX VITESSES MOYENNES DE DEFORMATION

E. Deletombe, J. Fabis, G. Portemont, B. Langrand, J. Berthe. *Onera -The French Aerospace Lab, F-59045, Lille, France. Téléphone : 03 20 49 69 36, Télécopie : 03 20 49 69 55, Adresse(s) électronique(s) : eric.deletombe@onera.fr, gerald.portemont@onera.fr*

Mots clés : caractérisation, matériau, dynamique, vérin, hydraulique

1. INTRODUCTION

Les dernières décennies ont vu se généraliser le calcul de structures par éléments finis en dynamique rapide dans l'aéronautique. Les problématiques adressées sont nombreuses. Ce peut être l'impact d'oiseau (Langrand *et al.*, 2002), mais aussi de glace (Ortiz *et al.*, 2015) ou de débris divers (pneumatique, pales, etc). Ce peut être aussi le crash et l'amerrissage (Delsart *et al.*, 2002 ; Portemont *et al.*, 2004), ou encore les chocs hydrodynamiques dans les réservoirs (Deletombe *et al.*, 2002, 2013 ; Potapov *et al.*, 2008 ; Combescure *et al.*, 2009 ; Fourest *et al.*, 2014) ou les explosions (Langrand *et al.*, 2002). Pour traiter ce genre d'évènements en simulation numérique, il est nécessaire de disposer de modèles de plus en plus complexes, pour les matériaux métalliques et plus récemment pour les composites, afin de pouvoir représenter leurs comportements non linéaires, leur endommagement et leur rupture sous sollicitations dynamiques. Ces modèles requièrent naturellement de disposer d'essais de caractérisation permettant d'identifier leurs paramètres. Or dans une structure subissant ces types d'agression, la gamme de vitesses de sollicitation vécue par le matériau est continue et particulièrement large, des faibles vitesses de déformation jusqu'aux très hautes vitesses en fonction de la distance à la zone impactée, ou de l'apparition de phénomènes de localisation comme par exemple dans les zones d'assemblages (Langrand *et al.*, 2002, 2010 ; Postec *et al.*, 2008 ; Hennuyer *et al.*, 2014). Plusieurs difficultés se posent alors à l'expérimentateur sollicité par le numéricien pour alimenter ses modèles. D'abord, il n'existe pas de moyens de caractérisation standards et universels qui permettent à lui seul de couvrir l'ensemble de cette gamme de vitesses de sollicitation : le laborantin devra alors disposer et savoir utiliser plusieurs types d'installations, des machines hydrauliques aux lanceurs grandes vitesses, en passant par les systèmes de barres de Hopkinson (Fabis *et al.*, 2002). Ensuite, s'il s'avère relativement aisé de réaliser un essai dynamique une fois que l'on dispose de ces moyens, il est en fait beaucoup plus ardu de les réussir c'est-à-dire d'en tirer les informations permettant effectivement et objectivement de caractériser les paramètres intrinsèques de comportement des matériaux testés. Enfin la nature de ces essais, par nature destructifs, associée à la complexité des modèles, entraîne en général des plans d'expérience importants, un travail d'exploitation à forte valeur ajoutée, donc des coûts qui finalement peuvent ne plus être anodins dans le cycle de développement d'un produit (« trop d'essais tue l'essai »).

Le présent article ne s'intéresse qu'au moyen le plus conventionnel de caractérisation mécanique des matériaux, à savoir le quasi-standard actuel qu'est la machine d'essai hydraulique, appliqué à l'identification des comportements non linéaires des matériaux aux vitesses moyennes de déformation. On pourrait penser que ce type d'essai est aujourd'hui parfaitement maîtrisé, ce qui est vrai dans le domaine des sollicitations quasi-statiques où les protocoles d'essais sont même normalisés. Ce n'est cependant toujours pas le cas dans le domaine des sollicitations moyennes vitesses [1.10^{-3} s^{-1} , 5.10^{+2} s^{-1}], alors que ces essais s'avèrent indispensables à effectuer, et ce pour

plusieurs raisons que nous évoquerons ultérieurement. L'exposé rappelle dans un premier temps et dans les grandes lignes quelles sont les capacités et les limitations actuelles de ces vérins hydrauliques rapides. Il adresse ensuite, au-delà des limitations des moyens, plusieurs sources de difficultés qui peuvent – si l'on n'y prend garde – rendre caduque tout espoir d'atteindre une caractérisation dynamique intrinsèque du comportement des matériaux testés. Sont en particulier évoqués plusieurs points qui nous semblent essentiels, à savoir : la définition des géométries des éprouvettes de caractérisation, le contrôle et la maîtrise de l'introduction des efforts dynamiques lors de l'essai, l'instrumentation, l'acquisition et la mesure des observables numériques nécessaires à la caractérisation mécanique, et enfin le traitement et l'exploitation adéquats de ces essais dynamiques moyennes vitesses. En conclusion, après que les principaux acquis du laboratoire CRD de l'ONERA/DADS sur ces questions depuis 30 ans aient été rappelés, sont évoquées quelques perspectives et voies d'amélioration aujourd'hui explorées pour adresser les nouveaux défis et les enjeux de ce domaine pour le secteur aéronautique.

2. CAPACITES ET LIMITATIONS DES VERINS HYDRAULIQUES

On s'intéresse aux vérins hydrauliques du type de ceux présentés sur la figure (1). L'objectif principal est de réaliser un chargement uniaxial des éprouvettes (effort et déplacement), monotone, du repos jusqu'à la rupture, en traction ou en compression, à vitesse de déplacement imposée.

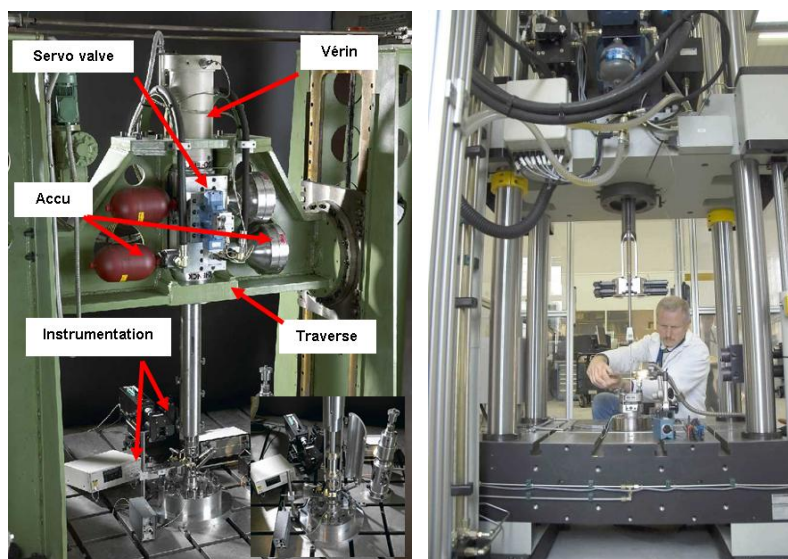


Figure 1. Vérins rapides Schenck (gauche) et INSTRON (droite)

2.1 Principe de fonctionnement

Les vérins sont généralement constitués d'un bâti accueillant le vérin, le montage d'essai et l'éprouvette de caractérisation. Ce bâti, de taille donnée, limite les capacités de caractérisation en termes de course verticale du vérin, de taille du montage mécanique d'introduction de l'effort et donc des échantillons. Une centrale hydraulique grande puissance est utilisée pour animer dynamiquement le vérin, soit directement, soit indirectement (le vérin est solidaire d'une traverse horizontale massive). Notons dès à présent que les caractéristiques de raideur et de masse (d'inertie) de ces éléments mobiles auront une grande influence sur la suite des événements. Les vitesses atteintes pouvant dépasser plusieurs dizaines de mètres par seconde, de nécessaires précautions de sécurité doivent être mises en œuvre : ces essais sont potentiellement très dangereux. A titre d'exemple, les capacités « catalogue » des vérins utilisés à l'ONERA sont les suivantes :

- Schenk : course de vérin de 250 mm, vitesse maximale de déplacement de 10 m/s, et effort maximal développé de 50 kN,
- Instron (sur étagère) : course de vérin de 300 mm, vitesse maximale de déplacement de 20 m/s, effort maximal développé de 80 kN.

Ces vérins sont pilotés par une consigne donnée en vitesse de déplacement, en boucle ouverte ou fermée selon la machine d'essai (en boucle ouverte, une phase préliminaire est nécessaire pour étalonner la consigne de vitesse visée $V_{consigne}$). La puissance disponible étant limitée, ces consignes peuvent ne pas être parfaitement respectées dans de nombreuses configurations, en particulier aux limites des capacités du moyen en effort et en vitesse ($P \neq FV$, P étant la puissance développée, F l'effort appliqué, et V la vitesse de déplacement imposée). Bien que massifs et raides, les éléments de traverse et le vérin peuvent se déformer pour les niveaux d'effort élevés, et la vitesse de déplacement imposée à l'éprouvette différer de celle affichée par la consigne. Pour ces deux raisons, il est souvent nécessaire de mesurer la vitesse de déplacement imposée à l'éprouvette à l'aide d'une technique expérimentale adéquate. De l'information de vitesse de déplacement imposée à l'éprouvette, il est finalement possible de calculer une valeur théorique de vitesse de déformation (ingénieur) à l'aide de l'équation (1) :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_{\text{éproutette}}}{l_{\text{éproutette}}} \quad (1)$$

avec : $V_{\text{éproutette}}$ la vitesse de déplacement imposée à l'éprouvette, et $l_{\text{éproutette}}$ la longueur déformable de l'échantillon (entre les mors, si la fixation est parfaite). En première approximation, si l'on suppose que la vitesse de déplacement imposée reste constante (faible résistance de l'éprouvette) et la déformation de l'éprouvette faible (petit allongement de l'éprouvette) durant l'essai dynamique, il est possible de définir rapidement un plan d'expérience permettant de caractériser les effets de vitesse de déformation sur les comportements des matériaux en jouant sur la vitesse de consigne et la longueur des éprouvettes. Pour cela, il est également nécessaire de faire l'hypothèse que les champs de déformation et de vitesse de déformation sont homogènes dans la partie déformable de l'éprouvette.

2.1.1 Essai de traction.

Pour pouvoir réaliser des essais de traction dynamique, un système mécanique (coulisseau) est intercalé entre l'actionneur (le vérin) et l'éprouvette (à laquelle il est rigidement fixé) pour permettre la mise en vitesse du vérin avant chargement de l'éprouvette. Le chargement est finalement transmis à l'éprouvette par le coulisseau lorsqu'il est accroché par le vérin une fois la vitesse de consigne atteinte. Il est donc nécessaire de concevoir et mettre en place un montage mécanique spécifique, avec ses caractéristiques de masse, de raideur, de jeux et de réponse dynamique (vibrations) propre. L'optimisation d'un tel montage est alors requise pour éviter de trop dégrader les capacités de caractérisation dynamique du moyen expérimental, voir Haugou *et al.* (2004). Les pièces des montages d'essais dynamiques utilisés à l'ONERA sont généralement conçues et validées par calcul numérique, et usinées en matériau titane, afin de minimiser leur masse, et de maximiser leur raideur et leurs fréquences propres de vibration (en vue de minimiser la pollution vibratoire induite sur les mesures).

2.1.2 Essai de compression.

Pour pouvoir réaliser des essais dynamiques en compression, il faut disposer d'une course suffisante pour arrêter les éléments massifs et mobiles du moyen d'essai, lancés à pleine vitesse, une fois l'éprouvette rompue. L'éprouvette testée est en effet fixée sur un montage idéalement infiniment rigide (la taque d'essai) que l'on ne veut pas percuter. La distance nécessaire peut atteindre voire dépasser les 10 mm. Dans l'hypothèse d'un faible allongement à rupture, la longueur de l'éprouvette devra correspondre à la course en question. En cas de grande déformation elle devra lui être supérieure. La capacité de caractérisation en compression s'en trouve alors directement affectée : la limite à rupture des éprouvettes devant rester inférieure à leur effort de flambement, l'épaisseur des éprouvettes devra augmenter en même temps que leur longueur. Les capacités en charge du vérin vont finalement limiter les épaisseurs d'éprouvettes, donc leur longueur, donc la distance d'arrêt et la vitesse de l'essai. De nouveau, pour pouvoir maximiser cette vitesse d'essai en compression, des

montages et des éprouvettes d'essais de grande qualité de fabrication sont nécessaires, et les vérins rarement utilisés à leurs limites théoriques (catalogue) de charges et de vitesses.

3. EPROUVETTES DE CARACTERISATION ET INTRODUCTION DES EFFORTS

Sachant qu'il n'existe pas de normes pour la caractérisation dynamique des matériaux, chaque laboratoire est libre de développer les protocoles qui lui semblent les plus performants pour ce faire, en simplifiant les montages mécaniques, et en adaptant les géométries des éprouvettes à la gamme de caractérisation visée. Or on cherche à tester (sous chargement de traction, de compression ou de cisaillement) une grande variété de matériaux de facture aéronautique de caractéristiques mécaniques très différentes : en termes de raideur, de contraintes ou de déformations. A titre d'exemple les matériaux étudiés à l'ONERA peuvent être des métalliques (TiAl6V, AU2024), des composites (T700GC/M21), voire des polymères (résine M21). Nous verrons qu'il a été nécessaire de proposer et de valider différents types d'éprouvettes pour caractériser proprement ces matériaux. Une contrepartie immédiate de cette absence de normes est qu'il existe des risques d'incohérence entre résultats de caractérisation d'un matériau donné, issus de différents laboratoires n'utilisant pas les mêmes moyens et protocoles.

3.1 Du bon usage des vérins hydrauliques

Un des premiers objectifs poursuivi par l'ONERA a été de diminuer/ augmenter les capacités de ses essais sur vérins hydrauliques jusqu'à recouvrir les plages des machines statiques (essais normalisés, sortes d'étalon) et des barres d'Hopkinson, afin d'atteindre une caractérisation par décade, en traction et en compression, en garantissant aux frontières du domaine la cohérence des résultats par rapport à ceux obtenus avec ces autres méthodes expérimentales. Dans une première étape, les essais proposés restaient classiques, au sens qu'ils étaient supposés « statiquement » déterminés : les matériaux étaient testés en contrainte uniaxiale, en déformations planes et homogènes dans la section utile des éprouvettes, éprouvettes supposées à l'équilibre mécanique à chaque instant au cours des essais. Dans l'exemple ci-dessous, on voit qu'un tel objectif n'est jamais simple à atteindre, divers phénomènes pouvant survenir, comme des modes de pompage du vérin apparaissant à certaines vitesses de sollicitation, en fonction du matériau testé. On remarque également que la caractérisation en décade permet de mettre en évidence certains effets de seuil qui pourraient rester ignorés si seules les vitesses aux bornes du domaine étaient étudiées, par des essais quasi-statiques normalisés et des essais aux Barres de Hopkinson par exemple.

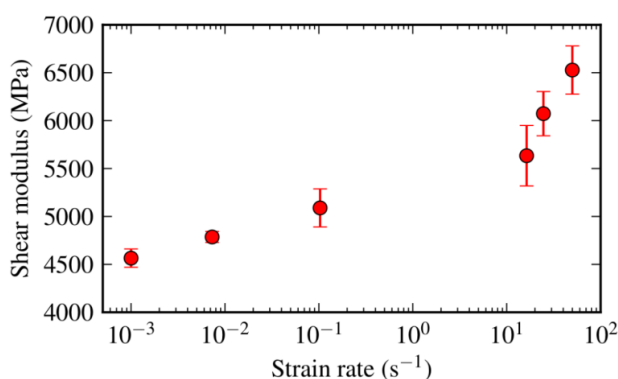


Figure 3. Variation de la dépendance à la vitesse de déformation du module de cisaillement d'un T700GC/M21 à température ambiante

3.2 Géométries des éprouvettes d'essais

Les travaux menés dans le laboratoire ont finalement abouti à l'expérimentation de nombreuses géométries d'éprouvettes (voir figure 4), symétriques, aux longueurs utiles et aux sections travaillantes réduites variables en fonction des matériaux étudiés. Des protocoles de mesure particulier ont dû également être mis en œuvre, validés et systématisés, en particulier pour accéder à une mesure dynamique précise de la déformation dans la partie utile des éprouvettes testées :

utilisation de jauges extensométriques à petites grilles et grandes déformations, recours à l'extensométrie optique, et plus récemment à la corrélation d'images numériques (voir §4).

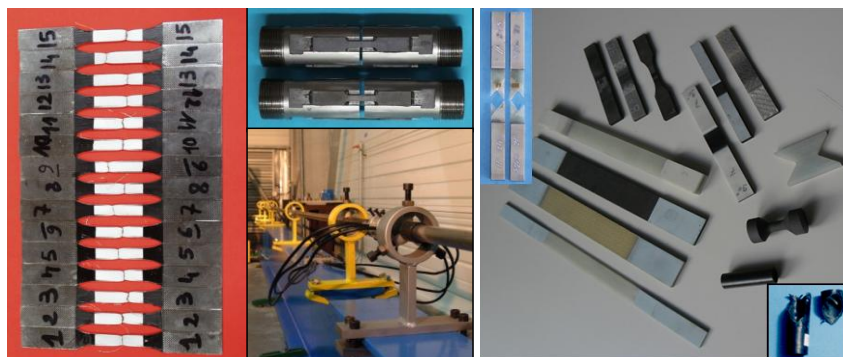


Figure 4. Géométries d'éprouvettes métalliques et composites

L'objectif étant d'identifier les comportements dynamiques non-linéaires jusqu'à rupture des matériaux (essais destructifs par définition), il est d'usage de tester un nombre important d'éprouvettes afin de pouvoir évaluer la dispersion expérimentale des résultats. Si en statique les cinq éprouvettes exigées théoriquement par la norme se sont souvent avérées superflues tant la dispersion était faible (même pour les composites), cela n'est plus le cas en dynamique en particulier pour ce qui concerne l'établissement des caractéristiques à rupture des matériaux. Les matériaux composites à matrice organique se sont à ce titre avérés particulièrement complexes à caractériser, ne serait-ce qu'à cause de l'existence d'effets d'échelle, et du caractère anisotrope et dissymétrique de leurs propriétés mécaniques. Certaines éprouvettes (mais pas toutes !) ont dû être profilées et/ou équipées de talons pour éviter toute rupture dans la zone d'introduction/ de reprise des efforts, voir Deletombe et al. (2000), Gning et al. (2010), et rompre dans la partie utile de l'éprouvette. Des formes sophistiquées et donc coûteuses, 2D1/2 voire 3D (« diabolos »), nécessitant un usinage précis, ont enfin été fabriquées et testées afin de vérifier que le recours à des géométries « classiques » (moins coûteuses) n'introduisaient pas de biais rédhibitoires dans les résultats de caractérisation.

3.3 Introduction des efforts

La plus grande dispersion des propriétés dynamiques des matériaux, en particulier à rupture, a naturellement amené des questionnements sur la qualité de fabrication, d'usinage, donc sur la reproductibilité de ces éprouvettes de petites dimensions. Les procédures qualité mises en place dans les ateliers de fabrication permettent de maîtriser au mieux ces incertitudes. Restent des questions sur la maîtrise des conditions aux limites et de l'introduction de l'effort. Le chargement appliqué à l'éprouvette doit être connu précisément, et répétable, il est donc nécessaire de minimiser les jeux dans les montages mécaniques, d'aligner parfaitement l'axe de chargement sur celui de l'éprouvette (grâce à l'utilisation de gabarits), d'éviter tout glissement des éprouvettes entre les mors, sans cependant endommager celles-ci pas un serrage ou un accrochage excessivement contraint, etc.

Pour ce qui concerne l'accrochage des éprouvettes par le coulisseau (en traction), diverses solutions ont été développées en fonction des matériaux, qui reposent tantôt sur l'utilisation de mors auto-serrants ou l'usage de clés dynamométriques pour la maîtrise du serrage, tantôt sur l'alésage des géométries, le boulonnage, le collage voire même le brasage des éprouvettes sur leurs supports mécaniques. En compression, un appui simple peut être envisagé, qui nécessite cependant de s'assurer de la parfaite planéité et du bon alignement des éprouvettes et des impacteurs. Il est également pertinent de minimiser les frottements entre les éprouvettes et le moyen d'essai (supports Téflon, lubrifiant). L'objectif est finalement de disposer d'une éprouvette parfaitement encastrée/clampée, ou appuyée, ce qui implique la définition et le respect de procédures qualité, la fabrication de gabarits, et surtout un temps de préparation non négligeable.

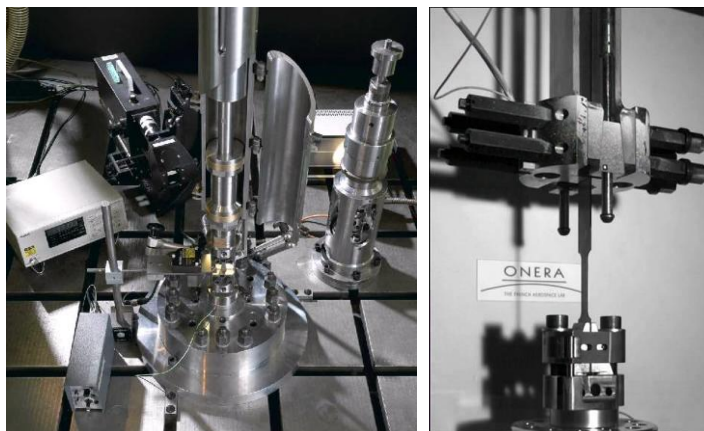


Figure 5. Montages mécaniques pour l'accrochage et le chargement des éprouvettes de caractérisation dynamique pour vérin Schenck (gauche) et Instron (droite)

3.4 Cas particulier des matériaux composites (CMO)

Il est important de mentionner, dans le cadre d'un tel exposé, que la transposition aux composites des protocoles de caractérisation dynamique développés dans le laboratoire dans les années 90 pour les matériaux métalliques n'a pas pu être effectuée directement, en particulier à cause des effets d'échelle et de stratification qui ne pouvaient être ignorés, voir Dormégnie et al. (2003). De tels effets d'échelle sont réputés avérés dès lors que moins de quatre plis de nappes unidirectionnelles ou de tissus sont utilisés pour fabriquer l'éprouvette de caractérisation. Or le recours à un VER (volume élémentaire représentatif) de quatre plis au moins dans l'épaisseur pose des limitations en termes de capacités des moyens de caractérisation des raideurs et des efforts à rupture, en particulier pour un matériau carbone, dans la direction des fibres. A ce titre, la caractérisation dynamique de matériaux composites de nouvelles générations, comme les tissés 3D interlocks, relève aujourd'hui du défi. Par ailleurs, le recours à une longueur utile trop réduite entraîne pour ces matériaux orthotropes des problèmes d'homogénéité des déformations dans la section utile des éprouvettes, voir Berthe *et al.* (2014), et des analyses particulières doivent être réalisées pour s'assurer du respect d'hypothèses mécaniques élémentaires (e.g. Saint Venant). Rappelons enfin que des effets de géométrie des éprouvettes sur les résultats de caractérisation sont exacerbés lorsque l'on s'intéresse aux comportements non linéaires des matériaux (phénomènes de localisation), et que des nombreuses études restent encore à mener avant que de pouvoir affirmer obtenir une caractérisation dynamique du comportement intrinsèque d'un matériau dans l'absolu.

Enfin, il faut retenir que les moyens et les protocoles doivent être adaptés aux matériaux testés (gamme d'effort et de déformation différente, types de non-linéarités, etc) : ceci entraîne de nombreuses complications lorsqu'on décide de s'intéresser aux matériaux composites dont la variabilité est particulièrement importante, ne serait-ce que relativement à la nature des fibres (carbone, verre, aramide, ...). Les plans d'expérience deviennent alors rapidement, pour toutes les raisons évoquées précédemment, particulièrement onéreux.

4. INSTRUMENTATION, MESURE ET ACQUISITION

Comme on cherche à déterminer la relation existant entre la contrainte et la déformation d'un matériau lors d'un essai mécanique dynamique, plusieurs questions doivent assez systématiquement être posées, qui concernent la validité des mesures (nature, calibration, règles d'exploitation), leur objectivité (influence de l'instrument et du protocole sur la mesure) et leur précision (calculs d'incertitudes). Il faut parfois s'interroger sur l'existence d'éventuelles dérives des instruments au cours des essais (température, humidité, luminosité, etc), et sur le besoin d'éventuelles

compensations dynamiques (matérielles ou logicielles). Les capacités de caractérisation dynamique dépendent également des caractéristiques de la chaîne d'acquisition (fréquence/cadence d'acquisition, gamme et résolution, rapport signal/bruit, etc). Cette chaîne consiste en l'occurrence à l'ONERA en une centrale d'acquisition (Dewetron) multivoies à 10 Mech/s maximum (16 voies/système), pour une résolution de 12 bits, avec ampli-conditionneurs (bande passante 230 kHz). Diverses techniques peuvent enfin être utilisées pour déclencher les enregistrements de façon synchrone et appropriée, ce qui n'est pas toujours évident.

4.1 Mesure de la contrainte

La contrainte est classiquement calculée comme le rapport instantané entre l'effort mesuré à la section travaillante de l'éprouvette. Pour accéder à la mesure de l'effort dynamique, on utilise généralement une unique cellule d'effort piézoélectrique, quand l'éprouvette est supposée à l'équilibre (l'utilisation de deux cellules permet de le vérifier). Cette cellule (en l'occurrence à l'ONERA, de type Kistler 9031A, uniaxiale, de fréquence propre 80 kHz, de gamme 60 KN, et de raideur de $6 \cdot 10^9$ N/m,) est pré-contrainte en compression si l'on désire l'utiliser lors d'un essai de traction dynamique : ceci signifie alors qu'on complique le montage d'essai mécanique, en rajoutant des éléments massifs et raides en particulier, donc en altérant la réponse dynamique d'ensemble du moyen (fréquences propres). A noter que la mesure d'effort est déportée (sur une partie du montage) par rapport à la section utile de l'éprouvette, et qu'il est important d'opérer un recalage en temps très précis des signaux d'effort et de déformation si l'on cherche à caractériser proprement les modules élastiques en dynamique. Ces cellules d'effort doivent par ailleurs être régulièrement étalonnées, et différents phénomènes contrôlés (e.g. dérive thermique).

D'autres techniques de mesure d'effort existent, comme par exemple le recours à une jauge de déformation élastique, déportée sur une partie étagée des éprouvettes travaillant dans le domaine de comportement élastique du matériau testé. Une telle technique permet parfois de s'affranchir de certaines difficultés (signal de cellule bruité dynamiquement), mais représente un coût de préparation et d'instrumentation supplémentaire.

4.2 Mesure de la déformation

On cherche également à mesurer la déformation (et la section) instantanée de l'éprouvette au cours de l'essai afin de caractériser les modules et les coefficients de Poisson des matériaux testés. Malheureusement, les hypothèses évoquées en §2.1 sont rarement respectées pour les matériaux aéronautiques étudiés, qui présentent des caractéristiques mécaniques élevées (raideur, ductilité) : en particulier l'hypothèse d'un champ de vitesse de déformation homogène et constant au cours de l'essai est souvent contredite. Pour utiliser la formule (1) avec confiance, il faut pouvoir mesurer précisément la vitesse de déplacement imposée à l'éprouvette, et sa longueur réelle (partie utile).

Une première technique de mesure repose sur le relevé de la consigne de déplacement imposée au vérin : cette mesure est cependant facilement biaisée, car elle ne permet pas de distinguer ce qui relève de la déformation propre de l'éprouvette, de ce qui relève des déformations des pièces du montage d'essai. Une seconde technique est donc généralement privilégiée, qui repose sur la mise en œuvre de jauges extensométriques (Vishay & T.M.L.). Bien que l'on utilise des jauges à petites grilles (d'autant plus coûteuses que la grille est petite, e.g. 0,6 mm) et grandes déformation (e.g. 20%) pour caractériser les comportements non-linéaires dynamiques des matériaux, les niveaux de déformation accessibles restent limités (les jauges peuvent rompre ou se décoller avant la rupture du matériau) et les valeurs obtenues restent moyennées sur la taille de la grille. Pour pallier à la limitation en terme de plage de déformation accessible, une troisième technique est disponible qui repose sur l'utilisation d'extensomètres optiques rapides, capables de mesurer à grande vitesse la distance instantanée entre deux mires déposées par exemple sur les talons d'une éprouvette ou les mors d'un montage d'essai (en l'occurrence à l'ONERA, de type Rudolph, de 0.01 μm de résolution sur une étendue de mesure de 10 mm, de fréquence de coupure de 500 kHz). La déformation calculée

est alors moyennée sur la distance en question (rapportée à la longueur utile de l'éprouvette), mais on accède à une mesure de déformation jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

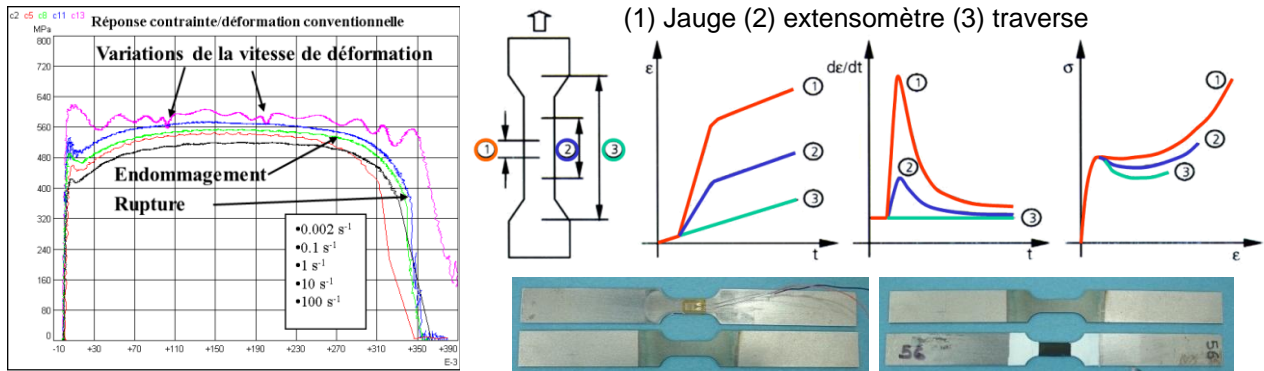


Figure 7. Comportement visco-plastique d'un acier (à gauche), et méthodes de mesures de déformation (à droite)

Si l'on désire mesurer une déformation dynamique plus locale, une dernière technique est disponible depuis quelques années, qui repose sur la corrélation d'images numériques enregistrées à grande cadence avec une forte résolution (en l'occurrence à l'ONERA, des caméras digitales rapides de marque Photron, 12500 im/s, jusqu'à 1024x1024 pixels). Cette technique – non intrusive - ouvre de vastes perspectives et fait encore l'objet de nombreuses recherches. Elle nécessite une assez grande maîtrise, et elle induit des temps de préparation (mouchetis, calibration), d'exploitation et de post-traitement (des champs de déplacement) particulièrement longs (même automatisés). Par contre elle permet d'exploiter des essais qui n'ont plus à satisfaire les hypothèses habituelles de staticité, et donc d'utiliser des éprouvettes de géométrie quelconque développant des champs de contraintes, de déformations et de vitesses de déformation fortement hétérogènes et multi-axiaux, jusqu'à rupture, en contrôlant qui plus est les conditions aux limites des essais.

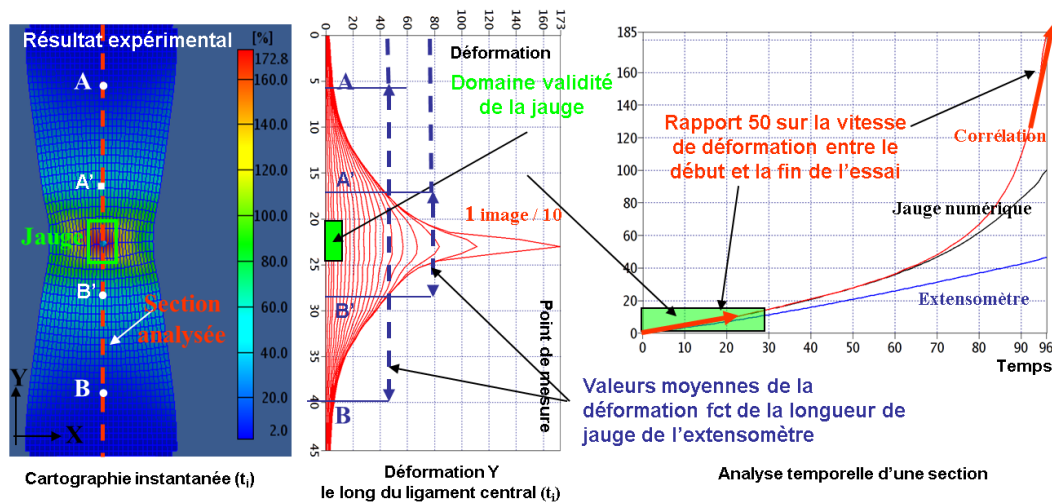


Figure 8. Champs de déformation et de vitesse de déformation accessibles à partir d'un essai non statiquement déterminé, par la méthode de corrélation d'images numériques

5. OUTILS DE TRAITEMENT ET METHODES D'EXPLOITATION

Avant que de pouvoir être utilisées à des fins de modélisation, un certain nombre de traitements numériques doivent être appliqués aux résultats de mesure, afin de déterminer la relation contrainte/déformation intrinsèque au matériau testé, exprimée en fonction des variables manipulées par le code de calcul ciblé. Pour ce faire, de nombreux outils sont déjà disponibles dans des

bibliothèques natives associées aux instruments de mesure et équipements d'acquisition. D'autres outils logiciels doivent être développés par l'utilisateur (outils métiers).

5.1 Logiciels d'analyse et de traitement

En premier lieu, des opérations de nettoyage, de seuillage, de lissage, de ré-échantillonnage et de synchronisation (e.g. si mesures déportées) sont généralement nécessaires. Lorsque des biais systématiques ou des dérives sont connus, des outils de recalage peuvent être mis-en œuvre pour corriger les données à exploiter. Différentes opérations de filtrage dynamique peuvent également être effectuées, mais cela ne doit être réalisé que lorsque les caractéristiques des filtres peuvent être parfaitement justifiées, par exemple suite à une analyse dynamique (Fourier) des montages d'essais (sinon, on préférera travailler avec des données brutes).

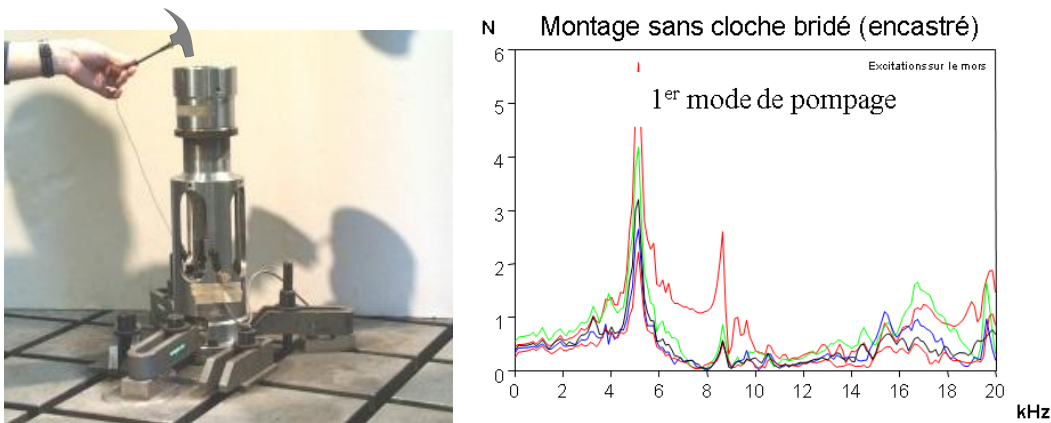


Figure 9. Analyse fréquentielle d'un montage d'essai dynamique

5.2 Outils d'exploitation

Une fois les signaux bruts correctement traités, les différentes mesures (effort, déplacement) sont traduites en termes de contrainte et de déformation. Elles peuvent être exprimées – selon le besoin - en valeur « ingénieur », ou en valeurs « vraies », et une relation contrainte/déformation établie après synchronisation temporelle des courbes (3).

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{S(t)} \neq \frac{F(t)}{S_0} \quad \varepsilon(t) = \int_{L_0}^L \frac{1}{l} dl = [Ln(l)]_{L_0}^L \neq \frac{\Delta L(t)}{L_0} \quad (3)$$

Lorsque la courbe contrainte/déformation est exprimée, divers outils doivent encore être développés et mis en œuvre pour accéder, en fonction de la nature du matériau, aux variables cachées pilotant son comportement et sa rupture (e.g. vitesse de déformation instantanée, déformation plastique, variable d'endommagement, taux de triaxialité, etc) et identifier les paramètres des modèles de calcul. Comme nous l'avons évoqué précédemment, il est important de s'assurer de la cohérence des résultats d'essais réalisés sur une large gamme de vitesses de sollicitation, à partir d'une variété de méthodes expérimentales, sous peine d'identifier des jeux de paramètres de comportement erronés.

5.2.1 Identification directe

Une grande variété de lois de comportement dynamiques linéaires ou non linéaires existent, dont les plus connues sont les modèles visco-élastiques, visco-plastiques écrouissables, endommageables, couplés endommagement-plasticité, etc. Dans le cas d'essais statiquement déterminés, sous les hypothèses de contrainte uniaxiale, de déformation plane et de vitesse de déformation constante, les variables d'état de beaucoup de modèles de comportement peuvent être directement post-traitées analytiquement à partir des mesures expérimentales. Des calculs intermédiaires permettent le cas échéant d'accéder aux variables internes (e.g. plasticité, endommagement) et d'identifier les

paramètres de comportement du matériau par minimisation de l'écart entre le modèle mathématique et la donnée expérimentale. La minimisation peut être effectuée manuellement ou par optimisation numérique (e.g. MATLAB), voir Langrand et al. (1999), ou Berthe et al. (2013). Se posent alors diverses questions relatives à l'unicité du jeu de paramètres matériau, à la robustesse du processus d'optimisation, et au coût numérique de l'exercice lorsque le nombre de paramètres du modèle de comportement est important. Le respect de quelques principes élémentaires permet aujourd'hui de réaliser de telles identifications avec une relative confiance, et sans trop de difficultés.

5.2.2 Identification inverse (indirecte)

Lorsque les variables internes du modèle de comportement sont inaccessibles à partir des mesures directes, par exemple dans le cas de jeux complexes de variables cachées (e.g. dans un modèle de Gürson couplé à la plasticité, voir ci-dessous) ou d'essais statiquement indéterminés (voir Notta et al., 2013), il est nécessaire d'avoir recours à une résolution numérique du problème expérimental et matériau, et à un processus d'optimisation permettant de nouveau d'identifier un jeu de paramètres par minimisation de l'écart de cette solution numérique à l'essai. Pour cela, il est important de disposer au préalable d'une modélisation numérique « adéquate » de l'essai (souvent une modélisation par éléments-finis), ce qui suppose d'en avoir une appréciation correcte et précise (non « idéalisée ») en termes de géométrie d'éprouvette, de loi de comportement, d'historique de chargement et de conditions aux limites (introduction des efforts), etc. De nouveau, se poseront des questions relatives à l'unicité du jeu de paramètres matériau, à la robustesse du processus d'optimisation, et au coût numérique de l'exercice lorsque le nombre de paramètres du modèle de comportement est élevé. Dans le cas de l'identification de lois de comportement non linéaires adoucissantes (avec localisation), nous rappellerons juste pour conclure ce paragraphe l'importance de prendre garde à des effets de dépendance des solutions éléments-finis à la discrétisation et à la finesse de maillage.

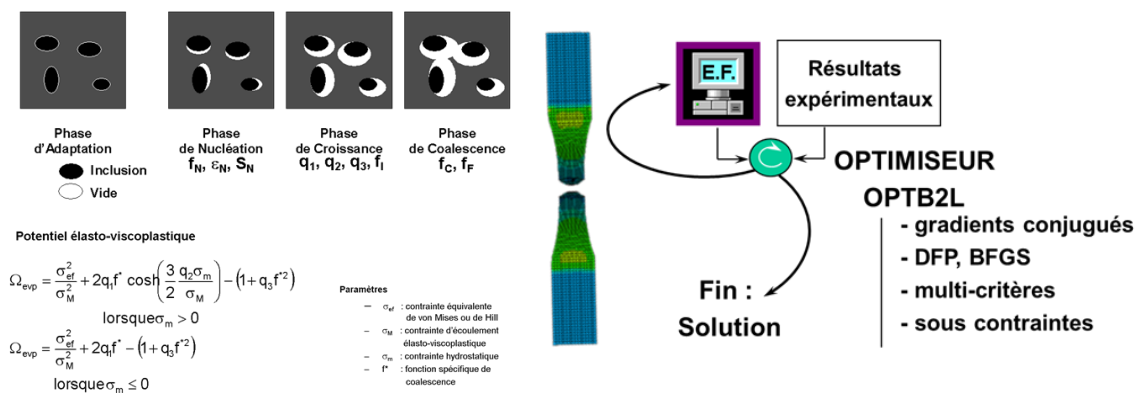


Figure 11. Identification inverse du modèle de Gürson couplé à la plasticité

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La réalisation d'essais de caractérisation du comportement dynamique des matériaux sur vérins hydrauliques peut sembler un exercice sans difficulté majeure, il est cependant jalonné de nombreux pièges. Le présent exposé a pour objectif premier de rappeler quelques notions élémentaires qu'il est nécessaire de maîtriser pour mener un tel exercice à bien. Aucune norme n'existe à ce jour qui permettrait finalement de procéder de façon routinière, alors que les besoins en terme de modélisation des comportements dynamiques non linéaires des matériaux ont énormément augmentés dans l'industrie aéronautique, pour ne citer qu'elle. Les coûts associés, qu'ils soient directs avec des plans d'expérience de plus en plus importants en quantité d'éprouvettes testées, ou indirects avec des temps de préparation et d'exploitation fine des campagnes représentant la plus grande part d'un travail expérimental proche de l'expertise, s'avèrent aujourd'hui potentiellement dissuasifs pour l'industriel. De nombreuses recherches menées à l'ONERA ont donc visé à développer des méthodes et des techniques permettant de faciliter et de systématiser la réalisation de

telles campagnes de caractérisation dynamique, et d'établir si ce n'est des normes, du moins de bonnes pratiques.

Pour progresser encore, la généralisation de l'utilisation des vérins dynamiques nous semble une voie prometteuse. En effet, l'instrumentation par la technique de mesure de champ de déformation par corrélation d'images numériques, associée à la réalisation d'essais non statiquement déterminés, augmente considérablement les capacités actuelles de caractérisation dynamique des matériaux sur vérins hydrauliques. De tels essais délivrent une quantité d'information gigantesque (qualitative et quantitative), en permettant – à nombre réduit d'expériences - de couvrir des gammes entières de vitesses de déformation (locale) beaucoup plus élevées que les essais traditionnels statiquement déterminés ne le permettent. Grâce à d'impressionnantes évolutions technologiques, ces essais ils peuvent aujourd'hui être appliqués à la caractérisation fine du comportement, de l'endommagement et de la rupture dynamique des matériaux. Parmi les perspectives de recherche les plus notables, nous citerons juste l'enrichissement du champ expérimental apporté par la tomographie X ou par la thermographie IR, dans un premier temps encore à faibles vitesses, en particulier pour l'étude du comportement dynamique des matériaux composites, voir Berthe *et al.* (2014).

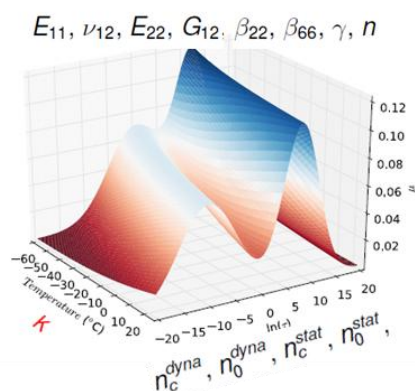


Figure 10. Modèle visco-élastique bi-spectral avec dépendance à la vitesse et à la température (12 paramètres)

Néanmoins, pour atteindre ces objectifs, et pour proposer une possible alternative de normalisation, il sera nécessaire de disposer d'outils d'exploitation plus puissants et robustes, et de proposer des stratégies d'identification, directes ou inverses, performantes et corrigées de leurs principaux défauts. Des précautions de réalisation et une grande maîtrise resteront cependant toujours nécessaires pour ces essais, afin d'en permettre la bonne compréhension, de s'assurer de leur adéquation au regard des modélisations visées, et de garantir la nature intrinsèque des résultats de caractérisation matériau finalement obtenus.

REFERENCES

Berthe J., Brieu M., et Deletombe E., “Improved formulation of viscoelastic model for composite laminates under static and dynamic solicitations.”, *Journal of Composite Materials*, **47**, 14 (2013), pp.1717-1727.

Berthe J., Brieu M., Deletombe E., Portemont G., Lecomte-Grosbras P. , et Deudon A., “Consistent identification of CFRP viscoelastic models from creep to dynamic loadings.”, *Strain*, **49** (2013), pp. 257–266.

Berthe J., Brieu M., Deletombe E., et Portemont G., “Temperature effects on the time dependent viscoelastic behaviour of carbon/epoxy composite materials: application to T700GC/M21.”, *Materials & Design*, **62** (2014), Pages 241-246.

- Berthe J., Deletombe E., Brieu M., Portemont G., Paulmier P., Dynamic characterization of CFRP composite materials – Toward a pre-normative testing protocol – Application to T700GC/M21 material, *Procedia Engineering*, **80** (2014), pp. 165-182.
- Combesure A., Maurel B., Potapov S. et Fabis J., “Full SPH fluid-shell interaction for leakage simulation in explicit dynamics”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **80** (2009), pp. 210-234.
- Deletombe E., Delsart D., Kohlgrueber D. et Jonhson A., “Improvement of numerical methods for crash analysis in future composite aircraft design.”, *Aerospace Science and Technology*, **4**, 3 (2000), pp. 189-199.
- Deletombe E., Sobry J.F., Charles J.L., Malherbe B., Valèze D. et Moréno A., “Vulnérabilité des réservoirs d’avions aux impacts de munitions légères - Problématique du coup de bélier hydrodynamique.”, *Revue de la Défense*, **2** (2002), pp. 40-46.
- Deletombe E., Fabis J., Dupas J. et Mortier J.-M., “Experimental analysis of hydrodynamic ram pressure in liquids.”, *Journal of Fluids and Structures*, **37** (2013), pp. 1–21.
- Delsard D., Dormégnie D., Lassus V., et Coutellier D., “Résistance au crash des structures d’hélicoptères composites - Vers la réduction des coûts de conception.”», *Revue de la Défense*, **2** (2002), pp. 28-33.
- Delsart D., Ortiz R., Portemont G., Drazétic P. et Markiewicz E., “Amerrissage dur et impact sur eau des structures aéronautiques- Aperçu des enjeux et d’un état de l’art au DMSE/RCS.”, *Revue de la Défense*, **2** (2002), pp. 56-61.
- Dormégnie D., Coutellier D., Delsart D., Deletombe E., “Studies of Scale Effects for Crash on Laminated Structures”, *Applied Composite Materials*, **10** (2003), pp. 49–61.
- Fabis J., Haugou G., Markiewicz E., et Drazétic P., “Caractérisation dynamique du comportement des matériaux, des assemblages et des structures - Application au crash et à l’impact.”, *Revue de la Défense*, **2** (2002), pp. 47-51.
- Fourest T., Laurens J.-M., Deletombe E., Dupas J. et M. Arrigoni, “Analysis of bubbles dynamics created by hydrodynamic ram in confined geometries using the Rayleigh-Plesset equation.”, *International Journal of Impact Engineering*, **73** (2014), pp. 66-74, 2014.
- Gning P.B., Delsart, D., Mortier, J.M., et Coutellier, D., “Through-thickness strength measurements using Arcan’s method.”, *Composites Part B*, **41**, 4 (2010), pp. 308-316.
- Haugou G., Markiewicz E., Fabis J., et Gary G., “Contribution to the definition of a partial overlapping plastic strain rates domain for moderate loadings - Application to tensile testing on metallic materials.”, *International Journal of Crashworthiness*, **9**, 2 (2004), pp.187-194.
- Hennuyer C., Leconte N., Langrand B. et Markiewicz E., “Toward the modelling of riveted assemblies by super-elements in fast dynamics.”, *Mechanics & Industry*, **15** (2014), pp. 133-137.
- Joudon V., Portemont G., Lauro F., et Bennani B., “Experimental procedure to characterize the mode I dynamic fracture toughness of advanced epoxy resins.”, *Engineering Fracture Mechanics*, **126** (2014) pp. 166–177.
- Langrand B., Geoffroy P., Petitniot J.-L., Fabis J., Markiewicz E. et Drazétic P., “Identification of constitutive model parameters for crashworthiness modeling.”, *Aerospace Science and Technology*, **3**, 4 (1999), pp. 215-227.
- Langrand B., Bayart A.-S., Chauveau Y. et Deletombe E., “Assessment of multi-physics FE methods for bird impact modelling – Application to a metallic riveted airframe.”, *Int. J. of Crashworthiness*, **7**, 4 (2002), pp. 415-428.

- Langrand B., Patronelli L., Deletombe E., Markiewicz E. et Drazéć P., “An alternative numerical approach for full scale characterisation for riveted joint design.”, *Aerospace Science and Technology*, **6**, 5(2002), pp.343-354.
- Langrand B. et Martin S., “Méthodes et outils d’analyse du comportement et de la ruine des structures soumises aux explosions - Etude de cas.”, *Revue de la Défense*, **2** (2002), pp. 16-21.
- Langrand B., Markiewicz E., “Strain rate dependence in spot welds : non-linear behaviour and failure in pure and combined modes I/II.”, *Int. J. of Impact Engineering*, **37**, 7 (2010), pp. 792-805.
- Notta D., Langrand B., Markiewicz E., Lauro F., et Portemont G., “Identification of Johnson-Cook's viscoplastic model parameters using the Virtual Fields Method: application to Titanium alloy Ti6Al4V.”, *Strain*, **49**, 1 (2013), pp. 22-45.
- Ortiz R., Deletombe E., et Chuzel-Marmot Y., “Assessment of strain rate effects on the stress/strain response of ice material.”, *International Journal of Impact Engineering*, **76** (2015), pp. 126-138.
- Portemont G., Deletombe E., et Drazéć P., “Assessment of basic experimental impact simulations for coupled fluid/structure interactions modeling.”, *International Journal of Crashworthiness*, **9**, 4 (2004), pp. 333-339.
- Postec M., Deletombe E., Delsart D. et Coutellier D., “Study of the influence of the number of inter-ply interfaces on the bearing rupture of riveted composite assemblies.”, *Composite Structures*, **84**, 2 (2008), pp. 99-113.
- Potapov S., Maurel B., Combescure A. et Fabis J., “Modelling accidental fluid-structure interaction problems with the SPH method”, *Computers & Structures*, **87** (2008), pp.721-734.