

## **Détermination expérimentale de l'effort d'interaction aux grandes vitesses : application aux matériaux abrasables**

Ben Zineb Mohammed-Elhedi

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz, Laboratoire de Fiabilité Mécanique, France,

Philippon Sylvain

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz, Laboratoire de Fiabilité Mécanique, France,

Chevrier Pierre

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz, Laboratoire de Fiabilité Mécanique, France,

Lipinski Paul

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz, Laboratoire de Fiabilité Mécanique, France,

### **Résumé**

Afin d'augmenter les performances des compresseurs des moteurs d'avion, la partie interne de leurs carters est revêtu d'un matériau abrasable. Cette technique, utilisée depuis les années 60, permet de limiter l'usure des aubes et de contrôler leurs jeux fonctionnels et le carter. Pour comprendre au mieux ces phénomènes locaux existants à ce niveau des turbomachines, une étude expérimentale des interactions entre les aubes et le carter a été proposée. Les vitesses d'interaction sont de l'ordre de 450 m/s. Pour ce faire, un dispositif expérimental de mesure d'efforts, s'adaptant à un lanceur à gaz, a été conçu et mis en œuvre. Il intègre deux outils coupants en alliage de titane TA6V dont la géométrie spécifique est représentative de l'extrémité des aubes. Le matériau abrasable M601 est déposé sur un support en alliage d'aluminium monté sur un projectile et propulsé à très grande vitesse afin de simuler l'interaction aux grandes vitesses. La mesure des efforts d'interaction fait appel à l'extensométrie. Une chaîne d'acquisition à haute performance (bande passante: 400kHz, fréquence d'acquisition max : 25 MHz) permet d'enregistrer les signaux des jauges pendant la phase d'interaction dont la durée n'excède pas quelques centaines de microsecondes. Le comportement dynamique du dispositif de mesure d'efforts est expérimental et permet de construire une matrice composée de 48 fonctions de réponse en fréquence (FRF). A partir de cette matrice, les composantes des efforts d'interaction sont calculées en utilisant l'enregistrement des huit jauges de déformation. Le but de ce travail est d'exposer les résultats préliminaires d'une méthode originale permettant la détermination de ces efforts d'interaction.

### **Abstract**

In order to increase the compressor performances of engines aircraft, the compressor casing is covered with abrasable material. This technical solution is used since the sixties. It allows limiting blades wear and commanding the functional gap between the blades tip and the casing. To understand these local phenomena in turbo engine, an experimental study of interactions between the blades and the casing has been proposed. The interaction velocity of this study is close to 450 m/s. An experimental device of forces measurement adaptable on a nitrogen gas gun has been designed. Two titanium tools with specific geometry which is typical of blade tip are fixed on it. An aluminum specimen is coated with abrasable material M601 and fixed on a projectile. This assembly is propeled at very high velocity to simulate the interaction. The forces measurement is based on extensometry principe. An acquisition chain (bandwidth : 400 kHz, maximum of the acquisition frequency 25 MHz) allows the gauges signals recording during the process that don't exceed some hundreds microsecondes. The dynamic behaviour of the load sensor is measured experimentally and taken into account to evaluate the interaction forces. The aim of this communication is to present this original method.

## 1 INTRODUCTION GENERALE

### Interaction aux grandes vitesses

Depuis une trentaine d'années, des solutions technologiques sont développées pour obtenir des surfaces finies par usinage ou par abrasion à grande vitesse. Si les matériaux métalliques ont été les plus visés par ces avancées, les matériaux composites ou les polymères seront largement concernés dans les années futures. Ces matériaux, dont les performances mécaniques ne cessent d'augmenter, envahissent de plus en plus des produits de haute technicité. L'objectif de ce travail est la présentation d'un dispositif expérimental adapté à un lanceur à gaz et qui permet d'étudier de manière générale l'interaction entre deux matériaux à très grande vitesse. On entend par interaction les applications telles que la perforation, le frottement sec et l'usinage. Pour ces cas, la vitesse varie entre 150 m/s et 600 m/s, voire plus. L'application proposée est liée à la propulsion dans le domaine aéronautique et porte sur un matériau composite utilisé comme revêtement de carter de compresseurs.

### Rôle des matériaux abrasables

L'augmentation du rendement des turbines à gaz industrielles (fig. 1) peut être obtenue en améliorant les performances des différents composants de la chaîne thermodynamique, plus particulièrement celles du compresseur. La compression de l'air ingéré par le moteur est obtenue par un ensemble d'aubes liées au rotor du compresseur [1, 2]. Le jeu existant, entre l'extrémité d'une aube et le carter (stator), influe directement sur le pompage du compresseur et par conséquent sur la consommation en carburant du moteur. Il est donc capital, d'une part de maîtriser le jeu lors du fonctionnement, et d'autre part de minimiser la valeur de ce dernier. La solution technologique retenue consiste à revêtir l'intérieur du carter d'un matériau dit abrasable et d'utiliser l'extrémité de l'aube, le cas échéant, comme outil.



**Figure1** : Propulseurs civils, source SNECMA groupe SAFRAN.

De plus, la surface finie obtenue après interaction doit être la plus « lisse » possible afin de minimiser les pertes aérodynamiques [3]. Ce matériau, pulvérisé sur le substrat par une torche plasma (brevet Sulzer Metco), est composé d'une matrice métallique, d'un lubrifiant solide et de polyester (ex : METCO 601 : 40 % polyester + 60 % alliage Al-Si). Le revêtement ne doit pas seulement être

facilement abrasable, mais aussi résistant à l'érosion due à la vitesse de l'écoulement du fluide gazeux et aux particules solides contenues dans le gaz. Cette solution est aussi mise en œuvre dans d'autres applications où l'on souhaite réaliser une étanchéité dynamique entre deux pièces ayant un mouvement relatif, telles que le turbocompresseur d'un moteur à combustion interne équipant certains véhicules tout-terrain [4] ou les paliers de turbines industrielles [5].

Malheureusement, les démarrages et les arrêts successifs, les vibrations, les effets thermiques et centrifuges sur les aubes créent des interactions indésirables. La géométrie du carter est alors modifiée, augmentant le jeu et endommageant les aubes. On constate que des particules du revêtement abrasable sont transférées sur les aubes augmentant leur masse, ou qu'une usure importante de l'extrémité de l'aube apparaît. Il est donc important de caractériser les phénomènes d'interaction et de mesurer les efforts mis en jeu afin d'éviter, de manière générale, l'usure ou la rupture prématurée des éléments de turbomachine.

Les nombreuses inspections du revêtement abrasable, après fonctionnement du moteur, ont permis d'identifier les principaux mécanismes d'usure ou d'interaction [3]. Ils peuvent être répartis en deux catégories. La première catégorie est composée de mécanismes d'usure indésirables tels que l'érosion, la corrosion ou l'oxydation qui augmentent le jeu entre l'extrémité de l'aube et le carter et ne produisent pas une surface « lisse ». D'autres mécanismes d'interaction indésirables, mais avec contact, appartiennent à cette première catégorie. Il s'agit de déformations plastiques faisant apparaître des stries sur le revêtement, ou de transfert adhésif du matériau abrasable vers l'aube et inversement. Les particules transférées produisent une couche d'un nouvel alliage dont le point de fusion est plus bas que les composants originaux. Des zones moins poreuses et plus dures vont alors apparaître après solidification pouvant endommager l'extrémité de l'aube [6]. La deuxième catégorie est composée du seul mécanisme d'interaction désiré : l'usinage. Ce moyen permet de contrôler le jeu, de ne pas endommager l'aube, d'éviter les transferts adhésifs, et enfin laisse une surface « lisse » favorable aux propriétés aérodynamiques [3].

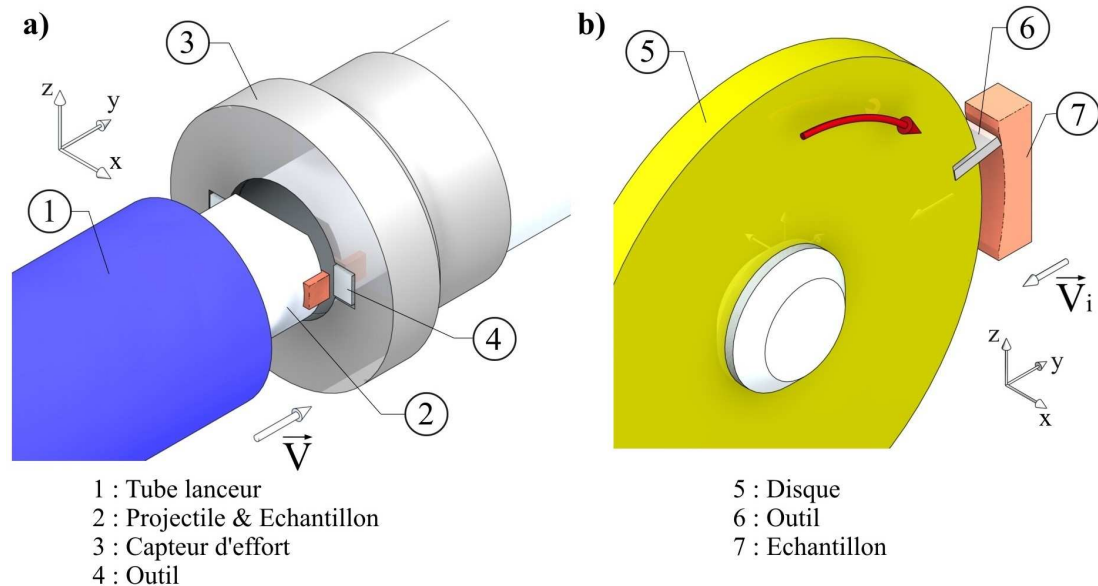
## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL MIS EN ŒUVRE

### Techniques expérimentales existantes

L'énergie cinétique nécessaire à la génération d'une vitesse de coupe importante, variant entre 3 et 110 m/s, peut être obtenue par exemple à l'aide d'un chariot pesant [7] ou à l'aide d'un canon à air comprimé [8]. Dans le second cas où les vitesses d'interaction sont les plus importantes, un projectile supportant un échantillon est guidé dans un tube lanceur et vient impacter deux outils fixés sur un capteur d'effort. Seul l'effort axial (direction-Y) est mesuré pour une profondeur de passe variant de 0.05 à 1 mm [8], figure 2a. La profondeur de passe est alors quasiment constante. L'abrasabilité des matériaux est principalement étudiée à l'aide du banc développé par Sulzer Metco où un outil est monté sur un disque en rotation ; la vitesse d'interaction varie dans la gamme 200 à 400 m/s. L'échantillon de matériau abrasable est, quant à lui, monté sur un dynamomètre pouvant se déplacer radialement, dont la vitesse d'incursion  $V_i$  varie de 10 à 550  $\mu\text{m/s}$ , figure 2b. Nous remarquerons que cette technique ne permet pas de conserver une profondeur de passe constante pendant l'interaction.

Ces deux exemples de techniques expérimentales, de par la configuration de coupe orthogonale et de par les vitesses d'étude, sont assez éloignés des conditions réelles d'interaction. Le dispositif expérimental proposé s'adapte également à un lanceur à gaz haute performance pouvant propulser un

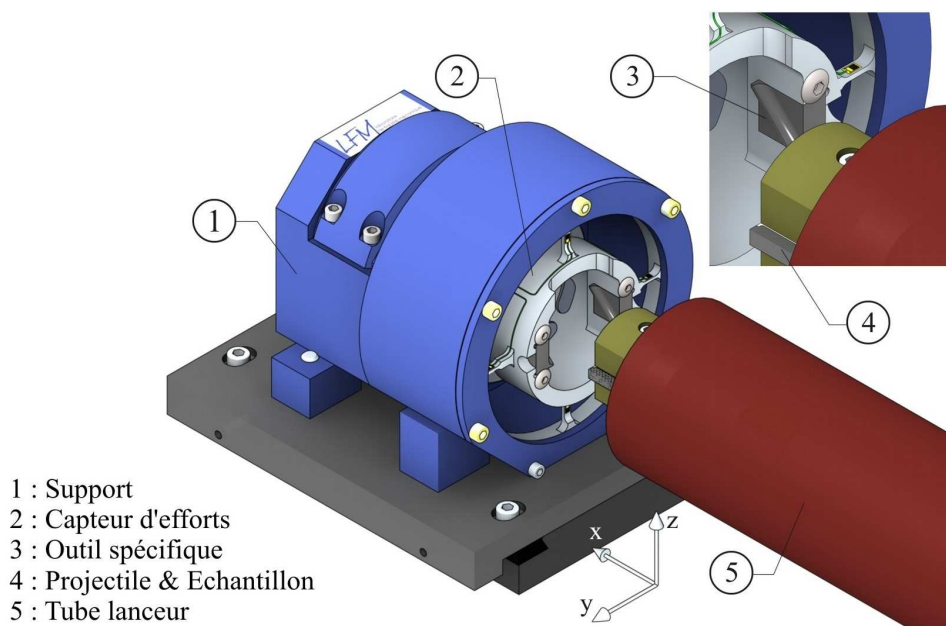
projectile d'environ 300 grammes à plus de 600 m/s [9]. Afin d'éviter tout mouvement de rotation du projectile, une barre de guidage a été installée dans le tube lanceur.



**Figure 2 :** Dispositifs expérimentaux permettant de mesurer les efforts en coupe orthogonale (a) ou l'abrasabilité (b) entre un outil et matériau abrasable.

Ce dispositif est composé d'un capteur d'efforts monté dans un support lié rigidement au bâti du canon à gaz. Ce capteur d'efforts permettant de mesurer les trois composantes de l'effort d'interaction (axiale, radiale et tangentielle), pour une configuration de coupe oblique, et peut être décrit de manière suivante. Il s'agit d'une pièce principalement tubulaire pouvant accueillir deux outils spécifiques, figure 3. Sa géométrie a fait l'objet d'études afin d'optimiser les différentes sections et accidents de forme, satisfaisant ainsi un critère de sensibilité à une large gamme d'efforts appliqués [10-12]. L'instrumentation fait appel à l'extensométrie et huit jauges de déformation sont collées sur le corps en alliage d'aluminium (7075 T6). L'acquisition des variations de tension données par le pont de Wheatstone est réalisée par une carte SPECTRUM dont la fréquence d'échantillonnage est réglée à 2 MHz et pilotée par le logiciel S-BENCH. La vitesse d'interaction est calculée à partir de deux ensembles diode laser et photodiode réalisant deux barrières optiques, coupées lors du passage du projectile. Les outils en alliage de titane (TA6V) ont des géométries représentatives des extrémités d'aube (angles, épaisseur, rayon de raccordement) et peuvent intégrer les paramètres souhaités.

Les vitesses d'interaction varient de 300 à 550 m/s et les profondeurs de passe de 0.05 à 0.1 mm.



**Figure 3 :** Dispositif expérimental développé pour l'étude expérimentale des interactions à très grande vitesse entre une éprouvette de matériau abrasable M601 et un outil TA6V en configuration oblique

## Résultats obtenus

Les essais, les plus souvent réalisés, visent à évaluer l'abrasabilité et la résistance à l'érosion du revêtement abrasable [13, 14]. Des essais réalisés à l'aide d'un disque en rotation muni d'outils (TiAlV) usinant un échantillon d'abrasable (BN-SiAl), figure 2b, ont montré que plus l'incursion est grande, moindre est le transfert d'abrasable, ou encore lorsque la vitesse linéaire de l'outil (aube) augmente, le transfert d'abrasable diminue [15]. Les résultats des essais en configuration orthogonale, conduits sur le canon à air comprimé, ont montré une augmentation de l'effort de coupe lorsque la vitesse augmente pour une profondeur de coupe imposée, et une croissance de l'effort de coupe pour une même vitesse lorsque la profondeur de coupe augmentait. L'influence du rayon de l'arête sur l'effort mesuré a également été étudié. Nous observons une augmentation sensible de l'effort lorsque le rayon augmente [16].

## 3. TRAITEMENT DES DONNEES ENREGISTREES

### Développement d'un outil de calcul d'efforts

Le comportement dynamique du capteur d'efforts a été étudié et a montré toute la pertinence de développer un outil permettant de corriger les signaux enregistrés pendant l'interaction. En effet, le comportement vibratoire du capteur parasite sensiblement les enregistrements. Le développement de cet outil s'appuie sur une calibration dynamique qui consiste à mesurer la réponse en fréquence du capteur en fonction d'une excitation connue dans les trois directions (axiale, radiale et tangentielle) et pour les deux outils indépendamment.

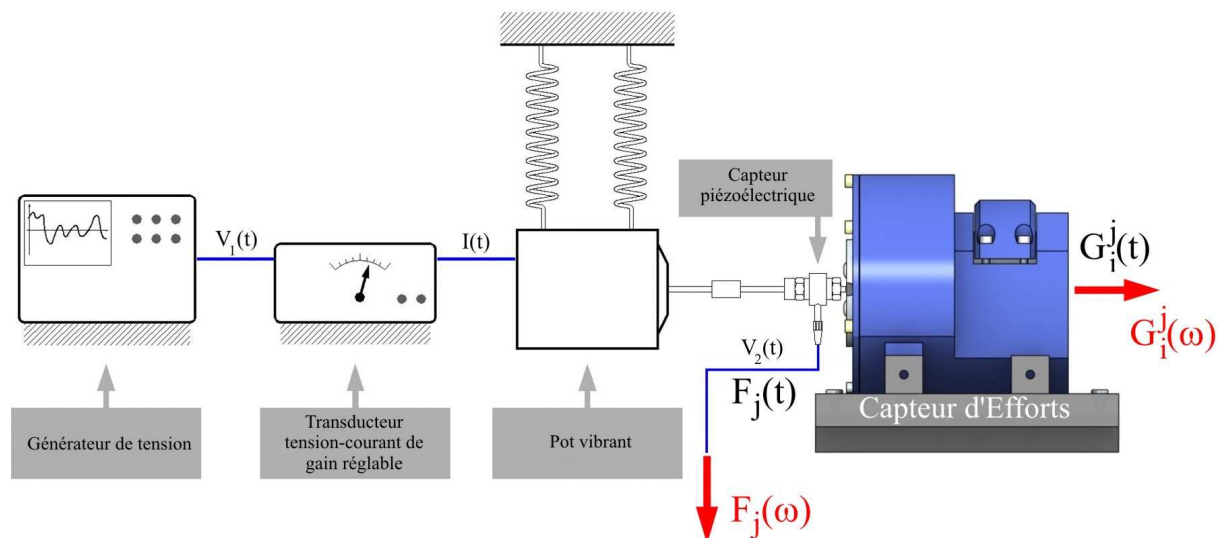
On construit ainsi la matrice de réponse en fréquence du capteur à l'aide de la relation matricielle suivante (figure 4) :

$$\{G\} = [H] \cdot \{F\} \quad (1)$$

Où  $\{G\}$  est un vecteur colonne composé des huit signaux délivrés par les jauges de déformation ( $G_1$  à  $G_8$ ), via la chaîne d'acquisition, lors d'une excitation connue  $\{F\}$  appliquée au capteur d'efforts. Le signal d'excitation est produit par l'ensemble composé d'un générateur de tension lié à un transducteur tension-courant de gain réglable pilotant un pot vibrant. Il s'agit d'un bruit blanc couvrant la plage 0-12.8 kHz. Les six composantes de ce vecteur ( $F_1$  à  $F_6$ ) sont portées par les directions axiale, radiale et tangentielle et pour les deux outils. Pendant la phase d'étalonnage dynamique, les vecteurs  $\{G\}$  et  $\{F\}$  sont connus, seule la matrice  $[H]$  reste à déterminer. Toutes ses composantes sont déduites dans le domaine fréquentiel de Fourier et calculées à l'aide de la relation suivante :

$$H_{ij}(\omega) = \frac{G_i^j(\omega)}{F_j(\omega)} \quad ; \quad 1 \leq i \leq 8 \text{ et } 1 \leq j \leq 6 \quad (2)$$

Où  $G_i^j$  désigne la jauge « i » pour une excitation  $F_j$  connue dans la direction « j ».



**Figure 4 :** Synoptique présentant les données d'entrée et de sortie du capteur d'efforts

Ainsi la construction de la matrice  $[H]$  permettra par la suite de déterminer les efforts appliqués lors de l'interaction. Les composantes de ces efforts sont obtenues par la relation matricielle suivante :

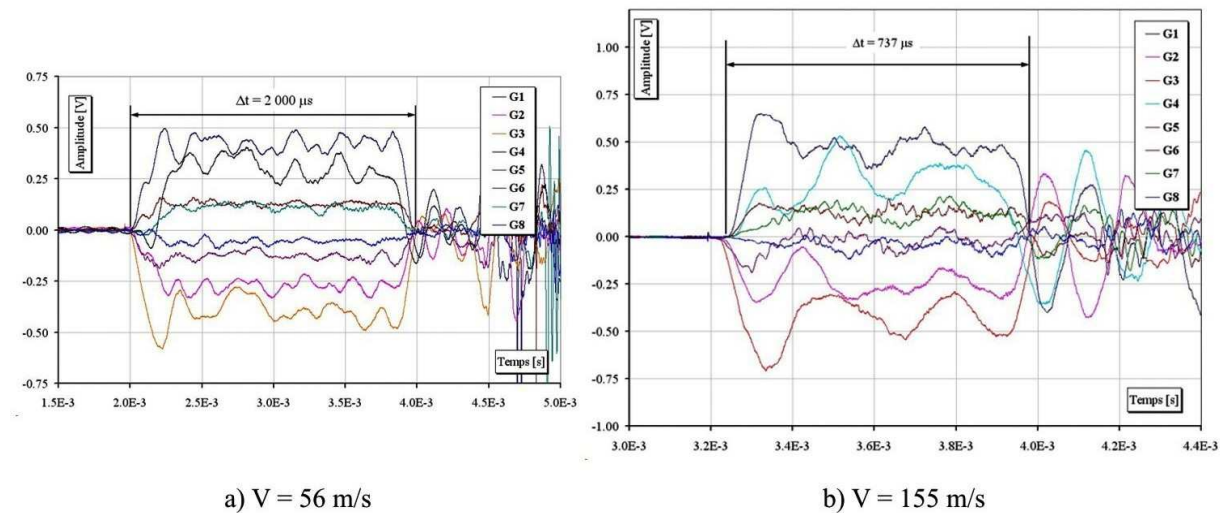
$$\{F\} = [H]^+ \cdot \{G\} \quad \text{avec} \quad [H]^+ = \left( [H]^T \cdot [H] \right)^{-1} \cdot [H]^T \quad (3)$$

Où  $[H]^+$  désigne la matrice pseudo-inverse de  $[H]$ .

Suite à un essai sur le banc balistique, le vecteur  $\{G\}$  est enregistrée et permet par application de la relation (3) de calculer le vecteur  $\{F\}$ . Une opération de Fourier inverse permet d'obtenir les six composantes temporelles des deux efforts d'interaction.

### Premiers résultats

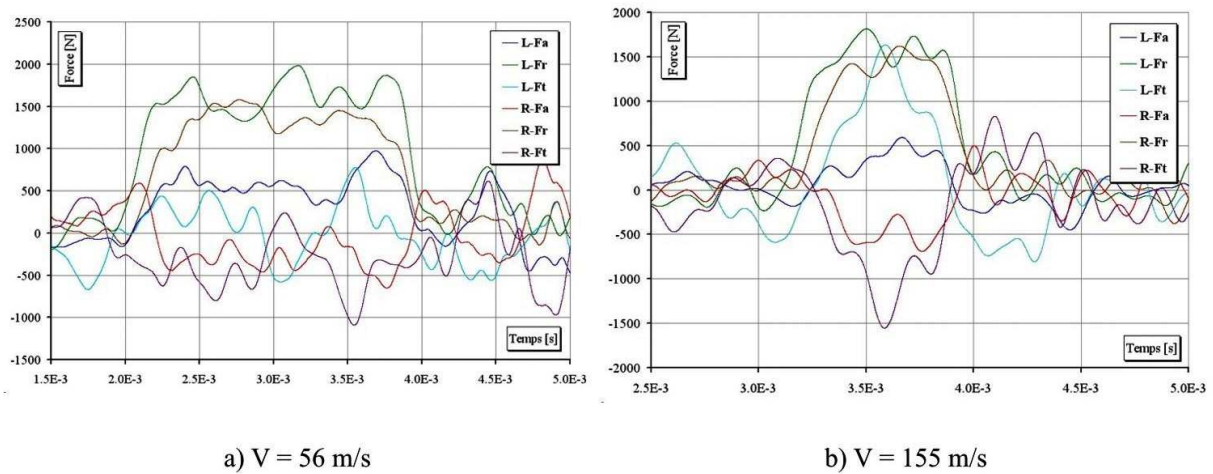
La figure 5 représente deux essais obtenus pour les mêmes conditions d'interaction (paramètres géométriques définissant la coupe oblique et profondeur de passe identiques), pour deux vitesses différentes. Pour des raisons de confidentialité, les valeurs spécifiques ne sont pas communiquées. On relève dans les deux cas la durée d'interaction et l'allure plus ou moins perturbée des signaux.



**Figure 5 :** Exemples d'enregistrements obtenus en coupe oblique pour un matériau abrasable

Le traitement des deux exemples proposés (fig. 5), à l'aide de la méthode présentée précédemment, offre les valeurs des composantes axiales, radiales et tangentielles ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) des efforts d'interaction pour les deux outils, voir figure 6. Les outils gauche et droit sont désignés par les lettres « L » et « R » respectivement. Nous observons également une variation de l'effort pendant toute la durée de l'interaction. L'outil de traitement des huit signaux de jauge enregistrés pendant l'interaction nécessite une amélioration sensible. Un filtrage des hautes fréquences lors de la calibration dynamique

sera pris en compte prochainement. Néanmoins les résultats obtenus sont très encourageants et mettent en évidence une tendance pour l'évolution des efforts en fonction de la profondeur de passe et de la vitesse d'interaction.



**Figure 6** : Evolution des composantes de l'effort d'interaction pour les deux outils après post-traitement

#### 4. CONCLUSION

Un dispositif expérimental, s'adaptant à un lanceur à gaz, a été conçu et mis en œuvre dans le cadre d'essais d'interaction à très grande vitesse entre un outil en alliage de titane et une éprouvette de matériau abrasable fixée sur un projectile. Ce dispositif intègre un capteur d'efforts supportant deux outils dont la géométrie est, pour cette étude, représentative de l'extrémité d'une aube de compresseur. La profondeur et la vitesse d'interaction peuvent varier respectivement de 0.05 à 0.3 mm et de 50 à 550 m/s.

Parallèlement, une méthode de traitement des signaux basée sur une calibration dynamique du capteur d'efforts a été mise en œuvre. Elle permet, à partir des acquisitions réalisées, de déterminer les composantes de l'effort d'interaction appliqué sur chaque outil dans des conditions de coupe orthogonale ou oblique. Les premiers résultats, pour une vitesse comprise entre 50 et 200 m/s, valident l'ensemble de la chaîne d'acquisition, mais montrent la nécessité d'améliorer l'outil de traitement des signaux.

#### Remerciements

Ce travail est largement supporté par SNECMA du groupe SAFRAN et les auteurs souhaitent témoigner leur reconnaissance à ce partenaire industriel pour son engagement et sa confiance renouvelés depuis quelques années. La mise en œuvre des solutions techniques est à porter au crédit du service technique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz. Les auteurs souhaitent également remercier l'ensemble des personnels du service technique pour leur réactivité et leur implication permettant ainsi le développement continu de ce dispositif expérimental innovant.



## 5. REFERENCES

- 1 RODRIGUEZ A.F., *Abradable seal with improved properties*, Sealing Technology, Issue 8, pp 14-15, (2002).
- 2 DORFMAN M., ERNING U., MALLON J., *Gas turbines use abrasible coatings for clearance-control seals*, Sealing Technology, Issue 1, pp 14-15, (2002).
- 3 BOREL M.O., RICOLL A.R., SCHLÄPFER H.W., SCHMID R.K., *The wear mechanisms occurring in abrasible seals of gas turbines*, Surface and Coating Technology, 39/40, pp 117-126 (1989).
- 4 SATO T., MOROTOMI T., *Development of the new TD27ETi engine for recreational vehicles*, JSAE, Review 17, pp 417-422, (1996).
- 5 MUTASIM Z., HSU L. WONG E., *Evaluation of plasma sprayed abrasible coatings*, Surface and Coating Technology, 54/55, pp 39-44, (1992).
- 6 WANG H., *Criteria for analysis of abrasible coatings*, Surface and Coatings Technology, , vol. 79, Issues 1-3, pp 71-75 (1996).
- 7 GUEGAN P., GUETARI Y., POITOU A., *Analyse expérimentale de la coupe orthogonale sur dispositif équipé d'une barre d'Hopkinson et de caméras vidéos rapides*, 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, France, (2005).
- 8 SUTTER G., MOLINARI A., FAURE L., KLEPACZKO J.R., DUDZINSKI D., *An experimental study of high-speed orthogonal cutting*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, , vol. 120, pp 169-172 (1998).
- 9 CHEVRIER P., FUNFROCK ., *Automatisation et informatisation du fonctionnement d'un canon à gaz haute performance et étude de l'endommagement dynamique d'un alliage d'aluminium soumis à une onde induite par impact sur plaque, rapport de projet de fin d'études*, University de Metz, France, (1994).
- 10 BEDRANI C., LUU THANH V., *Etude de l'interaction aube de compresseur/carter*, rapport de projet de fin d'études, Ecole Nationale d'ingénieurs de Metz, France, (2005).
- 11 BEN ZINEB M., PHILIPPON S., VIEVILLE P., SUTTER G., LIPINSKI P., *Development of an original device to study high speed interactions*, J. Phys. IV, EDP Sciences, , vol. 134, pp 757-761 (2006).
- 12 BEN ZINEB M., PHILIPPON S., LIPINSKI P., CHEVRIER P., SUTTER G., SUFFIS A., *A numeric model for a load sensor to investigate high speed interactions*, Workshop "Constitutive relations and numerical simulation of industrial dynamic processes, Metz, France, 21-23 novembre.
- 13 MAOZHONG Y., BAIYUN H., JIAWEN H., *Erosion wear behaviour and model of abrasible seal coating*, Wear, , vol. 252, Issues 1-2, pp 9-15, (2002)
- 14 MAOZHONG Y., JIAWEN H., BAIYUN H., HUIJIU Z., *Friction and wear behaviour and adabrability of abrasible seal coating*, Wear, , vol. 231, Issue 1, pp 47-53 (1999).
- 15 BOUNAZEF M., GUESSASMA S., AIT SAADI B., *The wear, deterioration and transformation phenomena of abrasible coating BN-SiAl-bounding organic element, caused by the friction between the blades and the turbine casing*, Materials Letters, , vol. 58, Issues 27-28, pp 3375-3380 (2004).
- 16 SUTTER G., PHILIPPON S., GARCIN F., *Dynamic analysis of the interaction between an abrasible material and a titanium alloy*, Wear, , vol. 261, pp 686-692,(2006).