

Caractérisation du comportement à l'interface entre un matériau agrégataire et un acier sous forte pression et à grande vitesse

B. DURAND^{a,b}, F. DELVARE^a, P. BAILLY^a, D. PICART^b

a. ENSI Bourges, Institut PRISME, F-18020 Bourges, France

b. CEA, DAM, Le Ripault, F-37260 Monts, France

Résumé :

Un essai est développé pour étudier l'interface entre un matériau énergétique et de l'acier. Le domaine d'intérêt est celui des fortes pressions (10-100 MPa) et des grandes vitesses relatives (10-100 m/s). Le dispositif consiste à faire glisser un cylindre constitué du matériau dans un tube en acier. Une précontrainte est réalisée. Elle permet de créer la contrainte normale au contact et de maintenir l'intégrité du corps d'épreuve lors de l'essai. Le déplacement relatif rapide est obtenu par des barres de Hopkinson. Les mesures permettent d'accéder au comportement de l'interface.

Abstract :

A test is developed to study the interface behaviour between an energetic material and steel. This work focuses on high pressure (10-100 MPa) and high sliding velocities (10-100 m/s). The experimental set-up consists in a cylindrical specimen made of the energetic material which slips in a confinement vessel made of steel. An axial stress is applied to the specimen. It results a normal pressure at the interface. Thanks to confinement, the energetic material can be tested under high stresses without yielding it. The Split Hopkinson Pressure Bar device is used to obtain high sliding velocities. Measurements make it possible to determine the frictional interface behaviour.

Mots clefs : essai de frottement, confinement

1 Introduction

Le lieu et l'instant de l'amorçage de la réaction chimique au sein d'un explosif dépendent fortement des conditions de contact avec la paroi. Pour cette raison, la connaissance des paramètres régissant le comportement d'interface est primordiale [1-4]. L'objectif est alors de développer une procédure expérimentale permettant d'étudier le frottement entre un matériau énergétique et l'acier. Le domaine d'intérêt est celui des fortes pressions de contact (10-100 MPa) et des hautes vitesses de glissement (10-100 m/s). Le matériau étudié est inerte et de type agrégataire. Il s'agit d'une poudre fine liée et compactée. Son comportement est élasto-plastique [5]. La mise au point de l'essai est effectuée sur le matériau inerte dont les caractéristiques mécaniques sont voisines de celles des explosifs. Les moyens expérimentaux disponibles pour une telle étude ne sont pas si nombreux car l'interface doit à la fois subir des vitesses et des pressions élevées. Quelques bancs d'essais répondent partiellement à cette spécificité : tribomètre avec frottement généré par explosion [6], ensemble cible-projectile avec impact oblique [7], barres de Hopkinson en torsion [7-10] et éventuellement échantillon sur disque tournant [3]. L'autre particularité est qu'on cherche à atteindre les gammes de sollicitations habituellement réservées aux métaux [7-8] et aux céramiques [9-10] alors que le matériau se plastifie facilement. Cela met en avant la nécessité de concevoir un dispositif original créant un confinement suffisant pour atteindre des hautes pressions sans dégrader le matériau.

2 Configuration expérimentale

Les caractéristiques mécaniques du matériau ont été déterminées [5]. Le module d'Young est de 2 GPa, le coefficient de Poisson est de 0,4 et le seuil d'écoulement plastique est défini par :

$$Q + 0,3P = 12 \text{ MPa} \quad P = \frac{1}{3}\sigma_{ii} \quad Q = \sqrt{\frac{1}{3}s_{ij}s_{ij}} \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - P\delta_{ij} \quad (1)$$

P étant la pression hydrostatique et Q la scission octaédrique.

Une manière de confiner un matériau est de l'emprisonner dans une bague rigide [5], [11-12]. L'idée retenue est alors de faire glisser un échantillon du matériau dans un tube en acier, celui-ci faisant alors à la fois office de surface de glissement et de bague de confinement (figure 1).

La pression normale à l'interface tube-échantillon est générée par effet Poisson grâce à une précontrainte axiale imposée à l'aide d'un système vis-écrou. Le fait que le coefficient de Poisson de ce matériau soit relativement élevé est favorable. Le déplacement relatif de l'échantillon dans le tube, donc la contrainte tangentielle liée au frottement, est obtenu à l'aide d'une machine classique d'essais statiques, ou à l'aide des barres de Hopkinson pour les essais dynamiques. Les informations à l'interface échantillon-tube sont déterminées de manière indirecte à partir d'une jauge collée sur la face externe du tube et à partir des informations recueillies au niveau de la machine de traction ou du système de barres.

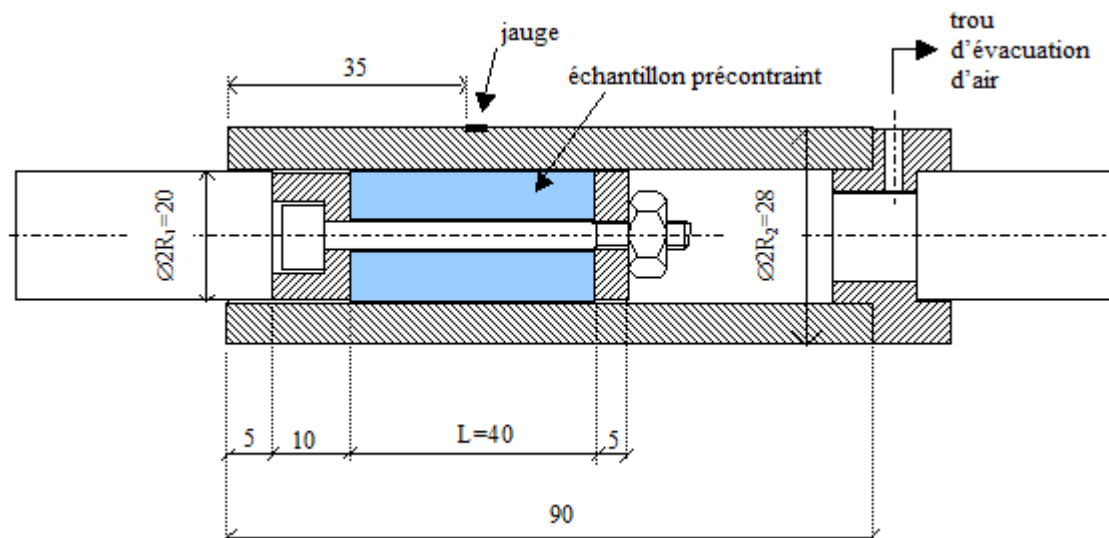


FIG. 1 - Vue en coupe du montage utilisé (dimensions en millimètres).

Pour déterminer la pression p à l'interface tube-échantillon à partir de la déformation ϵ_m mesurée sur la face externe du tube, on utilise la formule de Lamé :

$$p = \frac{E\epsilon_m(R_2^2 - R_1^2)}{2R_1^2} \quad (2)$$

où E est le module d'Young du tube.

Cette formule est basée sur des hypothèses qui ne sont pas parfaitement vérifiées dans notre cas, mais elle permet néanmoins d'obtenir une bonne approximation de la valeur de la pression. Un calcul numérique par la méthode des éléments finis de la déformation du tube conduit à une estimation de p à partir de ϵ_m relativement proche.

Bien que la finalité des travaux soit l'étude du frottement à des vitesses élevées, de nombreux essais statiques ont été réalisés. En effet, ils permettent de rendre compte de l'influence de la vitesse de glissement. Un déplacement relatif est imposé jusqu'à ce que l'ensemble atteigne un état stationnaire (la force de frottement F devient constante alors que le déplacement augmente). Cela correspond à l'établissement du glissement sur l'ensemble de l'interface.

Le dispositif des barres de Hopkinson est constitué de deux barres et d'un impacteur (figure 2). L'impact du projectile sur la barre entrante génère une onde de déformation appelée déformation incidente et notée ϵ_i . Celle-ci se réfléchit au niveau de l'interface avec le corps d'épreuve. Une onde est renvoyée dans la barre entrante (ce qui constitue la déformation réfléchie ϵ_r) et une autre est transmise dans la barre sortante (ce qui constitue la déformation transmise ϵ_t).

ϵ_i et ϵ_r sont toutes les deux mesurées grâce à la jauge fixée sur la barre entrante, celle-ci étant située suffisamment en amont pour que les deux ondes ne se superposent pas. ϵ_t est mesurée par une jauge fixée sur la barre sortante.

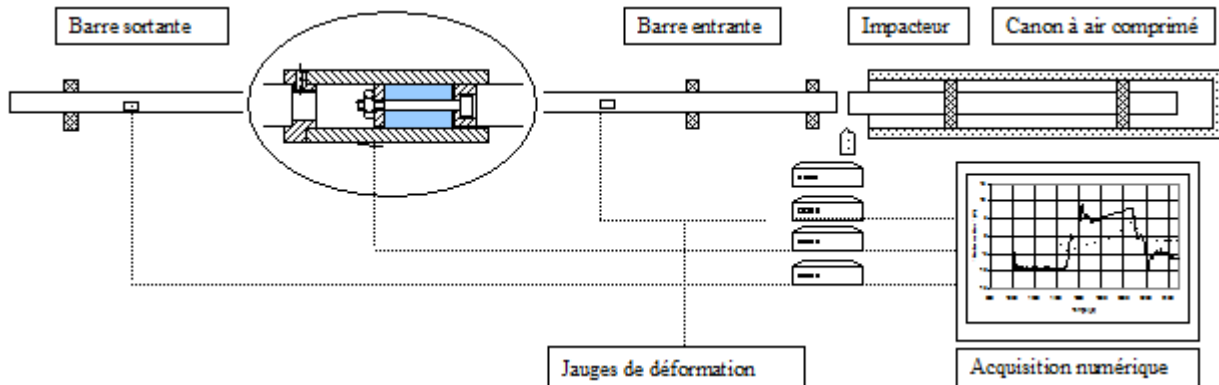


FIG. 2 – Principe de l’essai de frottement monté sur les barres de Hopkinson.

Comme la propagation des ondes de compression dans les barres n’est pas instantanée et que les signaux ne sont pas mesurés au niveau du corps d’épreuve, ceux-ci doivent être synchronisés. S’il est possible de synchroniser les ondes incidentes et réfléchies, cela est plus difficile pour l’onde transmise et la mesure faite sur le dispositif. Une estimation du temps de transfert dans le dispositif est possible (l’impédance des barres est à peu près égale à celle du tube).

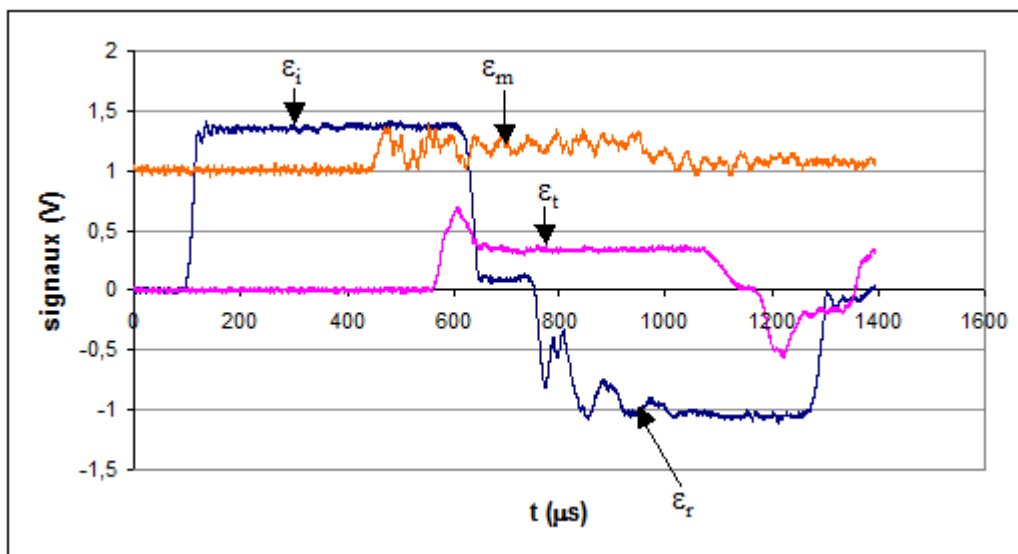


FIG. 3 - Exemples de signaux bruts (en fonction du temps).

On est en mesure de calculer les forces et les vitesses à l’interface barre entrante – corps d’épreuve (F_e et V_e) et à l’interface corps d’épreuve – barre sortante (F_s et V_s). On utilise les formules suivantes :

$$\begin{cases} F_e = -S_b E_b (\epsilon_i + \epsilon_r) \\ F_s = -S_b E_b \epsilon_t \\ V_e = C_b (\epsilon_r - \epsilon_i) \\ V_s = -C_b \epsilon_t \end{cases} \quad (3)$$

avec S_b et E_b la section et le module d’Young des barres et C_b la célérité des ondes dans les barres.

ϵ_i , ϵ_r et ϵ_t sont les déformations à l’interface entre les barres et le corps d’épreuve obtenues par le calage temporel.

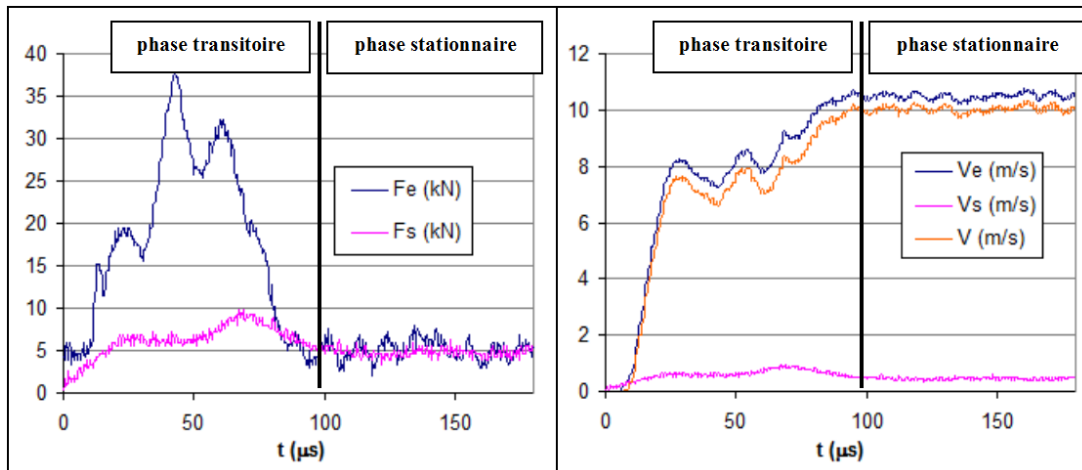


FIG. 4 - Evolution typique des forces et des vitesses en fonction du temps.

$$V = V_e - V_s \text{ est la vitesse de glissement.}$$

La figure 4 montre que l'équilibre des forces n'est pas atteint immédiatement. Cela est lié à la mise en mouvement du dispositif. Une imprécision sur le calage des ondes a un effet sur l'estimation des forces dans cette phase.

Il existe cependant une phase d'équilibre relativement longue caractérisée par $F_e \approx F_s$ et par une vitesse de glissement constante. C'est uniquement les mesures dans cette phase qui seront prises en compte. Lors de l'équilibre, l'état est stationnaire (forces constantes), ce qui correspond à l'établissement du glissement sur l'ensemble de l'interface.

3 Résultats

La pression de contact p est évaluée à partir de la formule de Lamé (2) et la contrainte de frottement est assimilée à sa valeur moyenne :

$$\tau = \frac{F}{2\pi R_1 L} \text{ pour les essais quasi-statiques et } \tau = \frac{F_s}{2\pi R_1 L} \text{ pour les essais dynamiques} \quad (4)$$

La figure 5 montre l'évolution de la contrainte de frottement en fonction du déplacement machine lors d'un essai quasi-statique. L'évolution se décompose en deux phases : une première phase d'adhérence au cours de laquelle la contrainte augmente avec le déplacement, et ce jusqu'à atteindre un pic ; puis une seconde, correspondant au glissement, au cours de laquelle la contrainte est constante. La courbe passe par un pic car le coefficient d'adhérence est légèrement plus élevé que le coefficient de frottement.

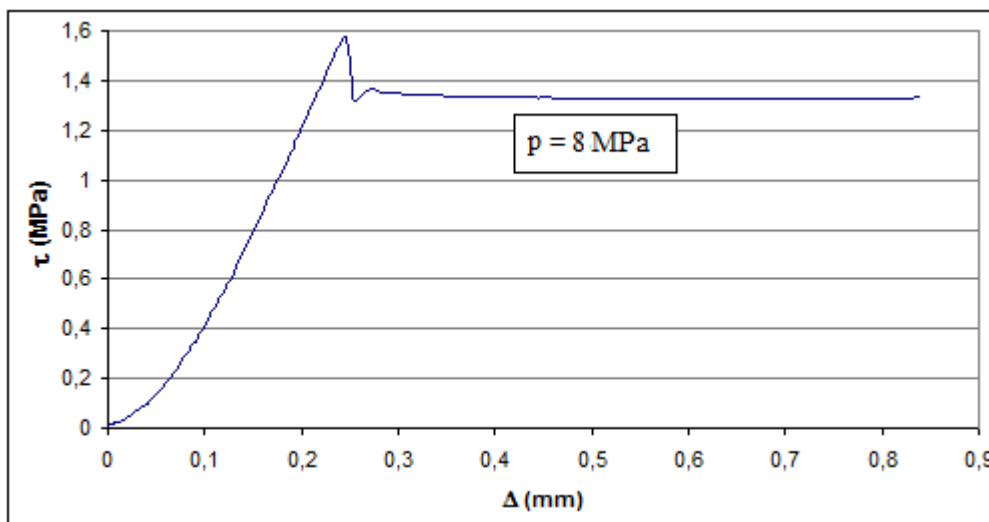


FIG. 5 - Exemple d'évolution de τ en fonction du déplacement machine (1 mm/min) pour un essai quasi-statique.

La figure 6 montre l'évolution des contraintes de pression et de frottement en fonction du temps lors d'un essai dynamique. Un état stationnaire se met en place au bout d'une centaine de microsecondes. On remarque que le signal transmis par la jauge collée sur le tube, à partir duquel est calculé p , est fortement bruité.

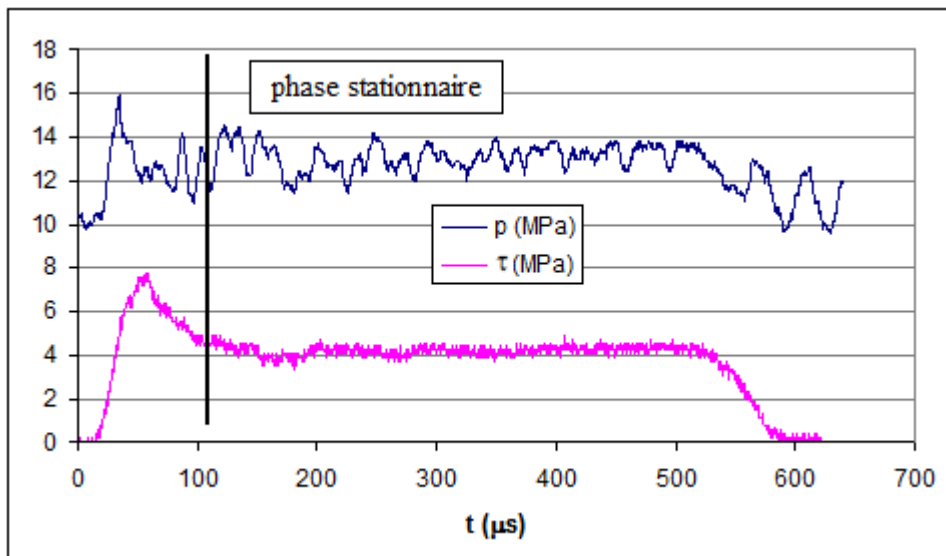


FIG. 6 - Exemple d'évolution des contraintes en fonction du temps pour un essai dynamique. La vitesse de glissement est de l'ordre de 10 m/s.

Plusieurs essais sont réalisés sur la machine de traction et avec le dispositif des barres de Hopkinson, avec différentes précontraintes. Les résultats obtenus au niveau du palier atteint lors de l'état stationnaire sont rassemblés dans la figure 7.

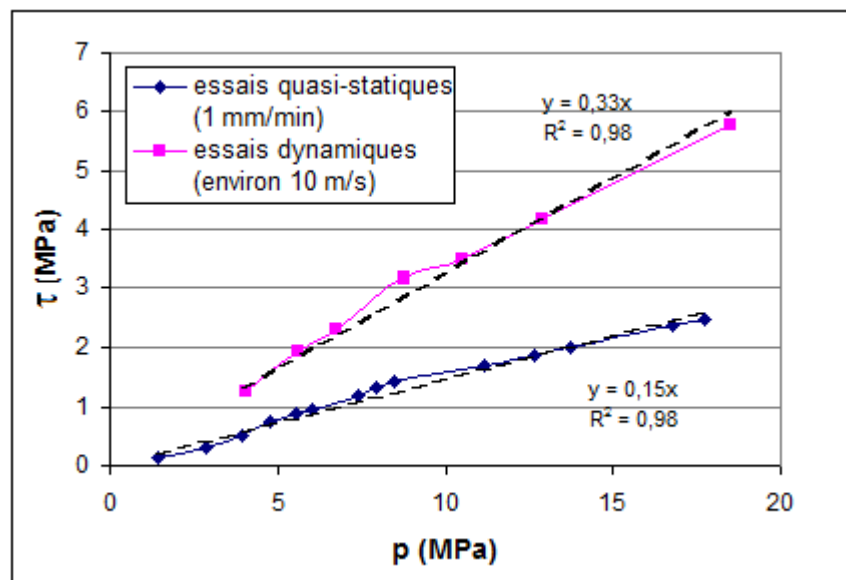


FIG. 7 - Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression.

La pente de ces courbes donne un ordre de grandeur du coefficient de frottement. Il vaut 0,15 pour les essais quasi-statiques (réalisés à 1 mm/min) et 0,33 pour les essais dynamiques (avec une vitesse de glissement de l'ordre de 10 m/s). Ce dernier résultat est cohérent avec celui trouvé par Dickson et al. sur le PBX 9501 [3] : coefficient de frottement de l'ordre de 0,3-0,5 pour une vitesse de 14 m/s et une pression de 4-5 MPa. Hoffman et al. [2] ont effectué des essais similaires à ceux de Dickson et al. [3], mais sous des pressions très inférieures à celles qui nous intéressent, les résultats ne sont donc pas comparables.

4 Discussion et conclusion

La méthode de dépouillement peut être améliorée par une analyse plus fine du problème à l'aide de simulations par éléments finis. En effet, la pression de contact est calculée analytiquement par la formule de Lamé, qui dans notre cas ne donne qu'une approximation. De plus, les résultats sont analysés en supposant une uniformité des contraintes à l'interface. Par exemple, la valeur du coefficient de frottement obtenue n'est qu'une valeur « moyenne » calculée à l'échelle du dispositif, et non sa valeur locale.

Cependant, la faisabilité des essais de frottement avec confinement de l'échantillon est avérée et les résultats de la campagne expérimentale montrent clairement, du moins de manière qualitative, une sensibilité du frottement à la vitesse : le coefficient de frottement entre le matériau testé et l'acier augmente lorsque la vitesse de glissement passe du millimètre par minute à la dizaine de mètres par seconde.

L'analyse des essais montre qu'il est difficile d'obtenir des pressions normales supérieures à 20 MPa avec le système décrit ici. Un dispositif permettant d'atteindre des contraintes de confinement plus élevées est actuellement en cours de développement.

Références :

- [1] Picart D., Delmaire-Sizes F., Gruau C., Trumel H., Ignition of HMX-based PBX submitted to impact : strain localization and boundary conditions, 16th Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, 2009.
- [2] Hoffman, Chandler J.B., Aspect of the tribology of the plastic bonded explosive LX-04, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 29, 368-373, 2004.
- [3] Dickson P.M., Parker G.R., Smilowitz L.B., Zucker J.M., Asay B.W, Frictional Heating and Ignition of Energetic Materials, CP845, Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, 1057-1060, 2005.
- [4] Gruau C., Picart D., Belmas R., Bouton E., Delmaire-Sizes F., Sabatier J., Trumel H., Ignition of a confined high explosive under low velocity impact, International Journal of Impact Engineering, 36, 537-550, 2008.
- [5] Bailly P., Delvare F., Vial J., Hanus J.L., Biessy M., Picart D., Dynamic behavior of an aggregate material at simultaneous high pressure and strain rate : SHPB triaxial tests, International Journal of Impact Engineering, 38, 73-84, 2011.
- [6] Kim H.J., Emge A., Winter R.E., Keightley P.T., Kim W.K., Falk M.L., Rigney D.A., Nanostructures generated by explosively driven friction : Experiments and molecular dynamics simulations, Acta Materiala, 57, 5270-5282, 2009.
- [7] Rajagopalan S., Irfan M.A., Prakash V., Novel experimental techniques for investigating time resolved high speed friction, Wear, 225-229, 1222-1237, 1999.
- [8] Rajagopalan S., Prakash V., An experimental method to study high speed sliding characteristics during forward and reverse slip, Wear, 249, 687-701, 2001.
- [9] Huang H., Feng R., Dynamic tribological response of SiC fracture surfaces, Mechanics of Materials, 38, 186-202, 2006.
- [10] Huang H., Feng R., Dynamic Friction of SiC Surfaces : A Torsional Kolsky Bar Tribometer Study, Tribology Letters, 27, 329-338, 2007.
- [11] Forquin P., Arias A., Zaera R., An experimental method of measuring the confined compression strength of geomaterials, International Journal of Solids and Structures, 44, 4291-4317, 2007.
- [12] Forquin P., Safa K., Gary G., Influence of free water on the quasi-static and dynamic of strength of concrete in confined compression tests, Cement and Concrete Research, 40, 321-333, 2009.