



**HAL**  
open science

## Simulation FVPM de rayage mono-grain

Charly Euzenat, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier

► **To cite this version:**

Charly Euzenat, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier. Simulation FVPM de rayage mono-grain. Machines et Usinage à Grande Vitesse, Jun 2018, Bordeaux, France. hal-02292985

**HAL Id: hal-02292985**

**<https://hal.science/hal-02292985>**

Submitted on 20 Sep 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Simulation FVPM de rayage mono-grain

Charly Euzenat<sup>(a)</sup>, Sylvain Lavernhe<sup>(a)</sup>, Christophe Tournier<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France.

Mail : [charly.euzenat@ens-paris-saclay.fr](mailto:charly.euzenat@ens-paris-saclay.fr) , [sylvain.lavernhe@ens-paris-saclay.fr](mailto:sylvain.lavernhe@ens-paris-saclay.fr) ,  
[christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr](mailto:christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr)

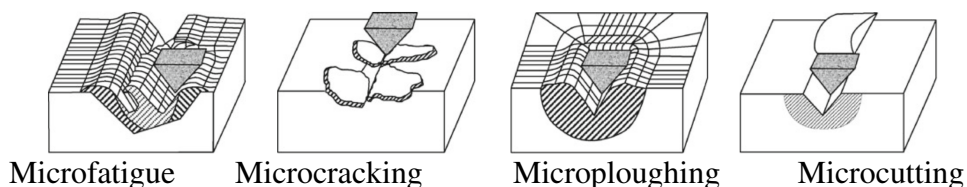
**Résumé** : La réalisation des pièces mécaniques à forte valeur ajoutée implique des temps d'usinage conséquents et nécessite parfois une finition des surfaces fonctionnelles par abrasion pour atteindre les spécifications requises. La maîtrise du procédé de fabrication pendant la phase de pré industrialisation des pièces peut encore être améliorée par l'apport d'outils de simulation adaptés. L'article présenté étudie la pertinence de la méthode *Finite Volume Particle Method* (FVPM) quant à simuler le processus d'abrasion. Cette technique particulière sans maillage utilisée pour simuler le comportement mécanique de la matière est une variante de la méthode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). Une étude a été menée pour la comparaison des résultats de simulation avec des données expérimentales. Un essai de dureté Brinell et un essai de rayage ont été simulés. Les résultats de simulations sont encourageants. La prise en compte de la matière repoussée par la sphère d'indentation est cohérente avec les mesures. La démarche d'implémentation des essais numériques et les résultats observés correspondent avec l'analyse de la littérature à ce sujet. Ces corrélations satisfaisantes entre les essais numériques et réels laissent espérer des résultats pour de futurs scénarios intégrant une complexité mécanique et cinématique plus importante et plus pertinente.

**Mots clés** : abrasion, simulation, méthode sans maillage, rectification.

## 1 Introduction

Les performances des pièces mécaniques à haute valeur ajoutée sont étroitement liées à la qualité des surfaces fonctionnelles. Que ces surfaces soient conçues pour assurer des fonctions de friction, optiques ou aérodynamiques, leurs géométries doivent être contrôlées de la conception à la réalisation de la pièce. Les opérations de rectification sont couramment utilisées pour améliorer l'état de surface après usinage et pour en maîtriser l'aspect. Ce processus de finition est caractérisé par des interactions complexes entre la surface usinée et l'outil de meulage afin d'enlever de la matière.

Dans ce contexte, les fabricants répondent à leurs exigences en s'appuyant sur des règles empiriques associées à un savoir-faire éprouvé. Plusieurs techniques ont été mises au point pour modéliser le mécanisme d'enlèvement de matière des procédés abrasifs.



**Figure 1 : Mécanismes d'enlèvement de matière par abrasion (Klocke, 2011)**

Klocke et al. ont identifié quatre types d'interaction différents responsables de l'enlèvement de matière (Figure 1) (Klocke, 2011). Ces interactions peuvent induire soit de la fatigue, des déformations plastiques ou de la coupe. Jourani et al. (Jourani, 2005) combine des observations expérimentales dans un modèle numérique pour induire la distribution des efforts au cours du procédé d'abrasion. Des résultats pertinents ont été obtenus avec le modèle d'indenteur conique utilisé. Cependant la simulation de la topographie de surface n'a pas été étudiée. D'un point de vue macroscopique, le modèle de Preston (Preston, 1927) permet de déterminer le taux d'enlèvement de matière à partir d'une règle empirique (Equ.1).

$$\frac{dz}{dt} = K_p \cdot P \cdot V \quad (1)$$

Cette équation reflète le fait que le taux d'enlèvement de matière est proportionnel à l'effort normal  $P$  et la vitesse relative  $V$  entre l'abrasif et la matière. Il est nécessaire d'identifier le coefficient  $K_p$  en fonction du couple outil-matière en question. Connaissant les paramètres du procédé il est possible d'intégrer l'équation (Equ.1). Ainsi, un tel modèle permet d'obtenir une simulation globale de l'enlèvement de matière en fonction du temps, mais pas d'étudier les marques laissées pendant l'abrasion ni les efforts mis en jeu.

Cependant, il est difficile d'obtenir un aperçu expérimental de ce qui se passe à une échelle locale pendant la fabrication. Ce sont principalement des verrous technologiques qui empêchent

d'accéder aux efforts et déformations à l'interface de la pièce. La taille et le nombre des grains abrasifs compliquent d'autant plus les études expérimentales. L'augmentation des capacités de calcul offre la possibilité de surmonter cet obstacle et d'aborder numériquement ces quantités d'intérêt. Le concept de la mécanique des milieux continus, qui définit un cadre d'équations pour modéliser le comportement de la matière, a fait ses preuves dans de nombreuses applications industrielles.

L'étude de ces modèles et leurs résolutions numériques ont fait l'objet de nombreux travaux. L'étude de la contrainte résiduelle générée par rayage a été simulée par Kermouche et al. (Kermouche, 2010). Ainsi, le développement et l'amélioration d'outils de simulation pertinents pour visualiser la topographie, la déformation et les contraintes résultantes pourraient permettre d'améliorer la fabrication assistée par ordinateur à toutes les étapes du processus. Alors que la topographie résultante d'une opération d'usinage est accessible numériquement (Lavernhe, 2014), (Abecassis, 2015), une prédiction réaliste de la géométrie à l'issue d'un procédé d'abrasion n'est pas encore réalisable. Dans ce contexte, la méthode FVPM a été évaluée quant à simuler la géométrie résultant de l'indentation et du rayage.

L'article est structuré comme suit : la section 2 donne un aperçu du schéma numérique utilisé pour simuler le comportement mécanique des matériaux. Deux cas de test ont été mis en œuvre numériquement. Dans la section 3, la simulation d'une mesure de dureté Brinell a été effectuée alors qu'un rayage avec un seul grain a été simulé dans la section 4. Des comparaisons expérimentales et bibliographiques ont montré la pertinence de la méthode mise en œuvre.

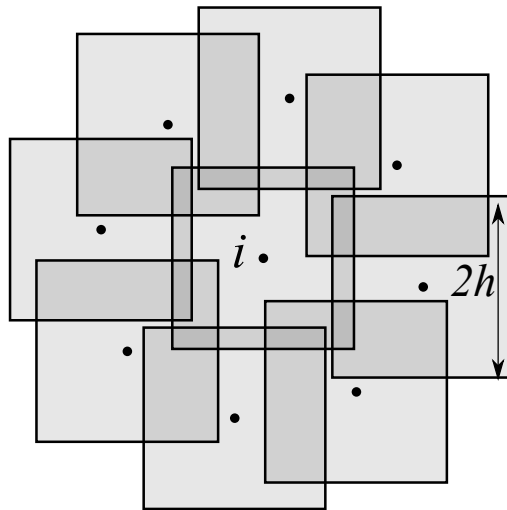
## 2 Théorie

Les simulations mécaniques s'appuient sur la discrétisation du volume et du temps pour résoudre les équations aux dérivées partielles issues de l'équilibre mécanique local. Parmi toutes les techniques numériques disponibles, il est possible de les diviser en deux grandes catégories. Les techniques basées sur un maillage offrent des informations de connectivité entre les points d'interpolation tandis que les méthodes sans maillage reposent sur un ensemble de points non corrélés. La simulation du processus d'abrasion comprend de grandes déformations, de sorte qu'il est souvent nécessaire d'appliquer un algorithme de remaillage pour traiter la distorsion des éléments. En ce qui concerne les méthodes sans maillage, la distribution des points d'interpolation utilisée pour interpoler les champs vectoriels à l'intérieur de l'échantillon permet de prendre en compte n'importe quel taux de déformation, qu'il soit important ou non. C'est pourquoi les méthodes basées sur des particules représentent un choix approprié pour les simulations d'usinage et d'abrasion en particulier. La méthode FVPM est une méthode sans maillage qui comprend plusieurs des caractéristiques à la fois de la méthode SPH et des méthodes conventionnelles de volumes finis basées sur un maillage (FVM) (LeVeque, 2002). En ce qui concerne le schéma d'interpolation FVPM, la fonction de Shepard est utilisée comme fonction d'interpolation définie par les équations (Equ.2) et (Equ.3) :

$$W_i = \begin{cases} 1 & \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_\infty \leq h_i \\ 0 & \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_\infty > h_i \end{cases} \quad (2)$$

$$\psi_i = \frac{W_i(\mathbf{x})}{\sum_k W_k(\mathbf{x})} \quad (3)$$

$$\mathbf{U} = \sum_i \psi_i \mathbf{u}_i \quad (4)$$



**Figure 2 : Discrétisation spatiale à support rectangulaire**

Le schéma d'interpolation repose sur des points qui délimitent des zones rectangulaires et qui se chevauchent comme illustré dans la (Figure 2) pour retrouver la valeur en n'importe quel point du champ  $U$ . Comme le montre l'équation (Equ.4), la valeur  $U$  en un point donné  $\mathbf{x}$  est le résultat d'une somme sur tous les voisins les plus proches. Une pondération en fonction de la distance est utilisée pour prendre en compte l'influence relative entre les points d'interpolation. Par rapport à une technique basée sur un maillage, un coût numérique supplémentaire est nécessaire pour retrouver les points les plus proches puisque le nuage de particules ne contient pas d'information de connectivité. Néanmoins, les algorithmes de hachage spatial permettent de réduire la complexité inhérente.

Le calcul des dérivées des grandeurs mécaniques d'intérêts est réalisé avec la même discrétisation spatiale que celle utilisée pour l'interpolation.

$$\rho \frac{d\mathbf{C}}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_c \quad (5)$$

L'équation (Equ.5) constitue l'équilibre interne qui structure le solide en question et représente une application locale du principe fondamental de la dynamique. Le champ de vitesse du solide est noté  $\mathbf{C}$ ,  $\boldsymbol{\sigma}$  est le tenseur des contraintes. Le solide est éventuellement soumis à la gravité  $\mathbf{g}$  et à des efforts extérieurs  $\mathbf{f}_c$ . La résolution de cette équation nécessite notamment le calcul de la divergence des contraintes  $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$ . La méthode FVPM repose sur le calcul de la divergence des contraintes grâce au flux qui traverse la surface commune entre deux zones d'interpolation adjacentes (Equ. 6).

$$\int_{\Omega_i} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \oint_{S_i} \boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{S} = \oint_{S_i} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot dS = \sum_j (\Gamma_{ij} - \Gamma_{ji}) \cdot \sigma_{ij} \quad (6)$$

$$\Gamma_{ij} = - \sum_{l=1}^m \left( \frac{\Delta S_l}{\delta_l^+ \delta_l^-} \right) \quad (7)$$

L'intégrale de la divergence des contraintes dans le volume  $\Omega_i$  est calculée grâce au théorème de flux-divergence et résolue de manière numérique (Equ. 7) en s'appuyant sur les volumes voisins comme le montre la (Figure 3). La superposition des supports rectangulaires est nécessaire au calcul des interactions entre les particules. Le choix de cette géométrie a été effectué pour pouvoir calculer de manière exacte les surfaces de contact entre les supports rectangulaires. Plus de détails sur l'implémentation de cette méthode peuvent être obtenus dans (Jahanbakhsh, 2014)

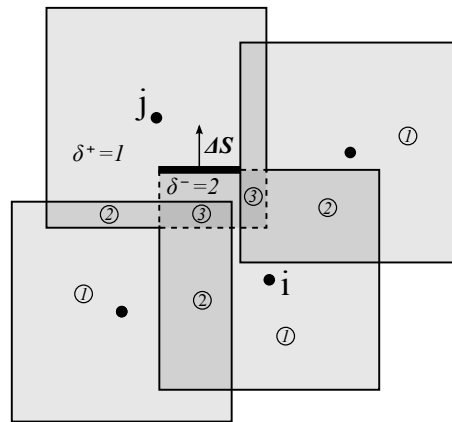


Figure 3 : Interactions entre particules (Jahanbakhsh, 2014)

Avec FVPM, comme avec SPH, les nœuds de calcul se déplacent habituellement avec la vitesse de la matière, ce qui est compatible avec la forme lagrangienne de l'équation du mouvement. Ceci permet de traiter les problèmes d'interface mobile sans problème de distorsion ou d'inversion par rapport à l'utilisation d'un maillage. Enfin, contrairement aux méthodes basées sur un maillage, dont la résolution repose sur la génération d'une matrice de rigidité à inverser, l'utilisation des particules comme points d'interpolation implique de calculer les forces internes exercées sur chacune d'elles à chaque pas de temps. Ces forces internes permettent de déterminer les accélérations qui sont intégrées pour obtenir la position des particules. La propagation des ondes acoustiques dans l'échantillon fait partie des résultats de la simulation. Ainsi, l'utilisation de cette méthode de simulation basée sur la dynamique soulève des instabilités numériques en fonction du pas de temps choisi.

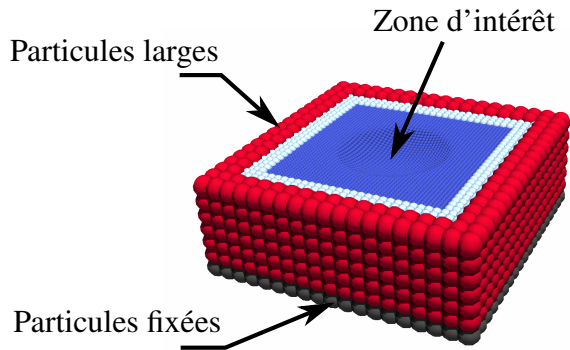
L'étude présentée a été réalisée en utilisant *SPHEROS*. Ce code de calcul a été développé par le Laboratoire des Machines Hydrauliques (LMH) basé à Lausanne pour simuler les écoulements dans des turbines hydrauliques. Il a été utilisé avec succès pour simuler l'érosion résultant de l'impact de sédiments sur des aubes de turbines (Jahanbakhsh, 2014), (Leguizamón, 2016). L'article présenté vise à évaluer ce code de calcul dans le cadre de la simulation de l'empreinte laissée par un grain abrasif sur un échantillon. La principale différence entre l'érosion et l'abrasion réside dans la quantité de déformation plastique que l'échantillon atteint. La pertinence des simulations doit donc être évaluée dans ces nouvelles conditions d'utilisation.

### 3 Simulation d'indentation

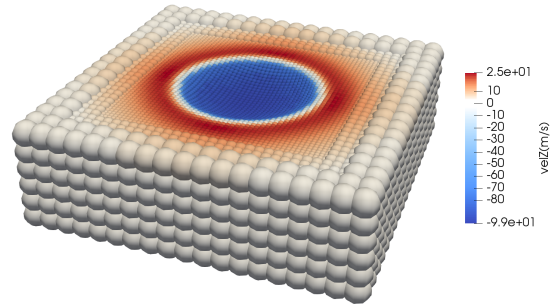
L'un des essais de caractérisation des matériaux les plus courants est la mesure de la dureté. Ce test implique des phénomènes complexes, mais présente des résultats expérimentaux simples et il a l'avantage d'être un essai mécanique facile à mettre en œuvre. Un pénétrateur entre en contact avec l'échantillon et s'enfonce jusqu'à ce que la charge normale spécifiée pour l'essai soit atteinte. La dureté est déterminée en fonction des dimensions de l'empreinte et de la force correspondante. Parmi toutes les techniques de mesure de la dureté disponibles dans la littérature, l'échelle de dureté Brinell a été choisie en raison de la forme sphérique du pénétrateur. Le modèle numérique associé à une telle forme est simple en utilisant *SPHEROS*, car les primitives géométriques utilisées sont des particules sphériques. Par conséquent, il n'y a pas de contrainte de modélisation supplémentaire liée au pénétrateur. De plus, les résultats expérimentaux macroscopiques sont facilement comparables aux résultats de la simulation. La capacité d'un outil de simulation tel que *SPHEROS* de produire des résultats pertinents dans ces conditions reste un prérequis pour des scénarios plus complexes.

La simulation comporte un ensemble de particules à plusieurs échelles. La longueur d'espace est affinée dans les zones d'intérêt afin d'équilibrer la pertinence des résultats par rapport au temps de calcul. Les particules les plus grosses visent à étendre la taille de la zone de simulation. Les conditions aux limites consistent en un ensemble de particules qui ont été fixées en

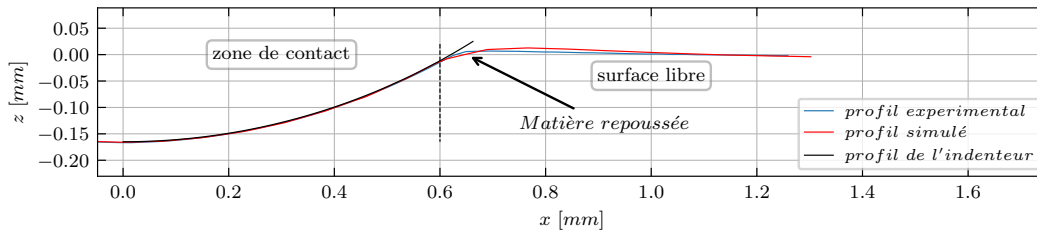
bas de l'échantillon. Ces conditions limites fixent la position de l'échantillon et recréent artificiellement l'interaction de la table d'indentation avec l'échantillon. Les particules sont colorées en fonction de leur espacement relatif dans la (Figure 4). Les dimensions du spécimen virtuel représenté par l'ensemble des particules ont été déterminées de manière heuristique.



**Figure 4 : Discretisation spatiale**



**Figure 5 : Vitesse verticale**



**Figure 6 : Profils d'indentation**

$$\sigma = \left[ A + B\varepsilon_p^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - (T^*)^m \right] \quad (8)$$

| material | A[MPa] | B[MPa] | n    |
|----------|--------|--------|------|
| AU4G     | 218    | 570    | 0.32 |

**Table 1 : Paramètres matériau de Johnson-Cook**

Le test Brinell a été réalisé sur l'aluminium AU4G. Les paramètres Johnson-Cook (Equ.8) du matériau en question ont été identifiés à partir d'essais de traction dont les valeurs sont énumérées dans le tableau (Tableau 1). Le diamètre du pénétrateur est de 2.5 mm sous une charge de 1840 N. L'essai de dureté a été réalisé grâce à une machine d'indentation *Struers Duramin-500*. À l'issue de l'indentation, la surface expérimentale a été mesurée à l'aide d'un

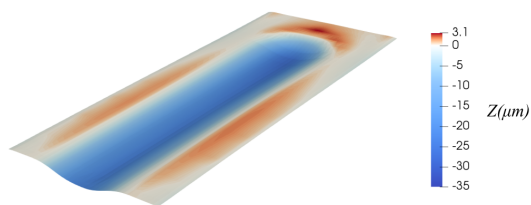


capteur optique confocal *Stil CHR 150L*. Une coupe de la surface a permis d'obtenir le profil de l'indentation. Les particules les plus fines sont 32 fois plus petites que le pénétrateur.

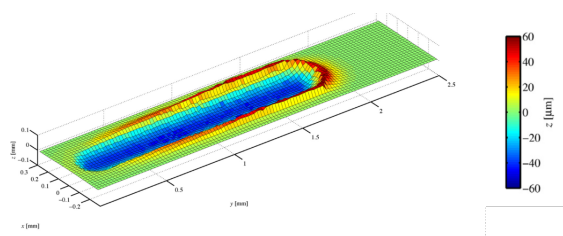
Dans la simulation, la vitesse du pénétrateur est de  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . La vitesse élevée choisie ici, n'est pas le reflet de la réalité, mais permet de réduire le temps de simulation en limitant la propagation des ondes acoustiques dans la matière (Ducobu, 2015). Ainsi, l'hypothèse selon laquelle le comportement du matériau ne dépend pas de la vitesse de déformation ni de la température a été faite. Cela correspond à simplifier la relation de comportement de Johnson-Cook pour ne tenir compte que des coefficients  $A$ ,  $B$  et  $n$ . Cette configuration donne lieu à un temps de calcul total de plusieurs heures. La vitesse verticale pendant l'indentation est affichée dans la (Figure 5) pour mettre en évidence la formation des bourrelets au bord de l'indentation. Ce comportement résulte de la conservation du volume au cours de l'indentation qui repousse la matière de part et d'autre. Les paramètres macroscopiques de la marque laissée par l'indenteur sont en accord avec la simulation. La forme globale de la marque d'indentation est respectée dans la simulation (Figure 6). Bien que le profil simulé corresponde aux données expérimentales au bas de l'empreinte, les bosses des deux côtés de l'empreinte sont sensibles aux conditions limites et à la taille des particules.

#### 4 Simulation de rayage

Le rayage d'un échantillon consiste à déplacer un pénétrateur sous une charge normale ce qui crée une empreinte longitudinale dans la matière. La cinématique de l'indenteur est plus complexe que dans le cas précédent, car elle commence par une descente normale à la surface puis se poursuit par un glissement tangentiel. La rainure laissée est à la fois le résultat du fait que le pénétrateur repousse et enlève la matière. Dans cette simulation, la géométrie de l'outil est encore sphérique, de manière à ne pas ajouter de difficultés supplémentaires quant à la modélisation de l'indenteur. L'interaction entre l'échantillon et la particule sphérique modélisant le pénétrateur consiste en une force de pénalité calculée par rapport à la profondeur d'interpénétration. Cette force est dirigée depuis le centre du pénétrateur vers l'échantillon. Les résultats numériques obtenus ont été comparés aux résultats de simulation présentés par Leroch et al. (Leroch, 2016) comme le montre la (Figure 8). La surface a été extraite du nuage de points à l'aide d'une fonction implicite (Blinn, 1982). Un champ scalaire est défini comme la somme de fonctions radiales centrées sur chaque particule. La surface est extraite de ce champ en tant que surface iso-potentiel. Les paramètres d'extraction sont la valeur de l'iso-potentiel et la longueur caractéristique. Ils sont définis à partir de la distribution spatiale initiale. La profondeur de pénétration atteinte par Leroch et al. n'a pas été mise en œuvre sans rencontrer des instabilités numériques. En conséquence, la profondeur de passe a été réduite comme le montre la (Figure 7). Le modèle FVPM mis en œuvre ne permet pas encore d'atteindre un rapport profondeur/rayon plus élevé. Néanmoins, les bosses des deux côtés de la rainure sont observées dans la simulation.



**Figure 7 : Simulation de rayage**



**Figure 8 : (Leroch, 2016)**

## 5 Conclusion

Un essai de dureté Brinell et un essai de rayage ont été simulés à l'aide d'une méthode particulière sans maillage. Dans ce contexte, le solveur FVPM mis en œuvre dans *SPHEROS* pour l'érosion a été testé. Les conditions de simulation choisies visent à reproduire les interactions outil/matière rencontrées lors du processus d'abrasion. Ces résultats préliminaires permettent d'évaluer la méthode FVPM pour simuler à l'avenir des scénarios plus complexes. Les résultats de simulations sont encourageants. La géométrie de la surface de l'empreinte est pertinente dans les deux cas d'essais. La prise en compte de la matière repoussée par la sphère d'indentation est cohérente avec les mesures. De plus la démarche d'implémentation des essais numériques et les résultats observés correspondent avec l'analyse de travaux similaires dans la littérature. Ces corrélations satisfaisantes entre les essais numériques et réels laissent espérer des résultats pour de futurs scénarios intégrant une complexité mécanique et cinématique plus importante et plus pertinente. Lors de la mise en œuvre de ces essais, des instabilités numériques apparaissent lorsque les zones les plus endommagées ont atteint une forte déformation plastique. La stabilité numérique doit être améliorée pour aller plus loin dans la simulation de déformations importantes, qui sont néanmoins rencontrées au cours des interactions outil/matière. Des méthodes géométriques de contrôle du volume de déformation pourraient être mises en place de manière à mieux maîtriser le déplacement des particules. La prochaine étape consistera à étudier la mise en œuvre de simulations présentant plusieurs grains abrasifs. D'autre part, la méthode de simulation présentée pourrait être adaptée à la prise en compte de l'usure des outils abrasifs en cours de procédé. Cela représente une des perspectives envisagées pour la suite des travaux sur le sujet. L'augmentation attendue du temps de calcul en fonction de la complexité du problème devra être traitée.

## Références

F. Abecassis, S. Lavernhe, C. Tournier, P.-A. Boucard (2015) Performance evaluation of CUDA programming for 5-axis machining multi-scale simulation, *Computers in Industry*, Vol71, pp1-9.

- J. F. Blinn (1982) A generalization of algebraic surface drawing, *ACM Trans. Graph.*, Vol1(3), pp235–256.
- F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre, E. Filippi (2015) On the introduction of adaptive mass scaling in a finite element model of ti6al4v orthogonal cutting, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol53, pp1–14.
- E. Jahanbakhsh, C. Vessaz, F. Avellan (2014) Finite Volume Particle Method for 3-D Elasto-Plastic Solid Simulation, in *Proceedings of the 9th international SPHERIC workshop*.
- A. Jourani, M. Dursapt, H. Hamdi, J. Rech, H. Zahouani (2005) Effect of the belt grinding on the surface texture : Modeling of the contact and abrasive wear, *Wear*, Vol259(7-12), pp1137–1143.
- G. Kermouche, J. Rech, H. Hamdi, J. Bergheau (2010) On the residual stress field induced by a scratching round abrasive grain, *Wear*, Vol269(1-2), pp86–92.
- F. Klocke, O. Dambon, B. Behrens (2011) Analysis of defect mechanisms in polishing of tool steels, *Production Engineering*, Vol5(5), pp475–483.
- S. Lavernhe, Y. Quinsat, C. Lartigue, C. Brown (2014) Realistic simulation of surface defects in five-axis milling using the measured geometry of the tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol74(1-4), pp393–401.
- S. Leguizamón, E. Jahanbakhsh, A. Maertens, C. Vessaz, S. Alimirzazadeh, F. Avellan (2016) Impact erosion prediction using the finite volume particle method with improved constitutive models, *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, Vol49, pp122010.
- S. Leroch, M. Varga, S. Eder, A. Vernes, M. R. Ripoll, G. Ganzenmüller (2016) Smooth particle hydrodynamics simulation of damage induced by a spherical indenter scratching a viscoplastic material, *International Journal of Solids and Structures*, Vol81, pp188–202.
- R. J. LeVeque (2002) *Finite volume methods for hyperbolic problems*, Cambridge University Press.
- F. W. Preston (1927) The theory and design of plate glass polishing machine, *J. soc. Glass technol*, Vol11, pp214–256.