

Propositions de TFE – Année 2025-2026

Description générale des thématiques pour le Laboratoire de Mécanique Numérique Non Linéaire (R. Boman, E. Fernandez, M. Lacroix, D. Bogucki, S. Février et J.P. Ponthot)

- Dans les pages qui suivent, nous décrivons, sans rentrer dans les détails, quelques thématiques générales qui pourraient être développées dans le cadre d'un TFE. Certaines autres propositions de TFE se basent sur ces commentaires généraux.
- La description des tâches à accomplir est volontairement imprécise. Elle sera affinée en fonction des préférences des étudiants et après concertation avec ceux-ci.
- D'un point de vue pratique, ces TFE se dérouleront en immersion dans le laboratoire LTAS/MN2L. L'étudiant sera donc assimilé à un chercheur du Laboratoire et s'intégrera au sein de l'équipe. Il ne s'agit donc pas de stage en industrie.
- Les étudiants intéressés peuvent prendre rendez-vous avec moi afin d'obtenir de plus amples informations.

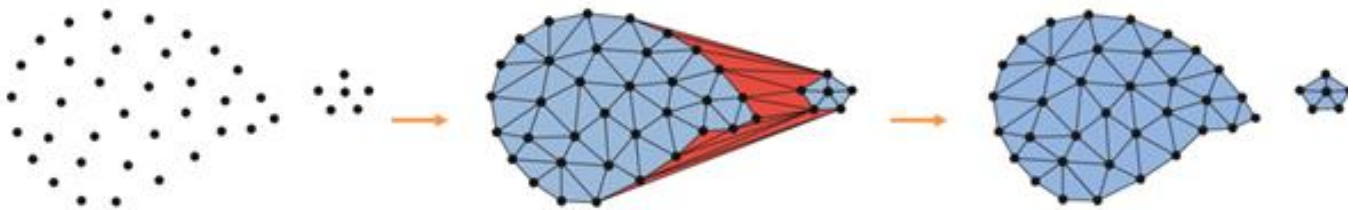
J.P. Ponthot

JP.Ponthot@uliege.be

04 366 93 10

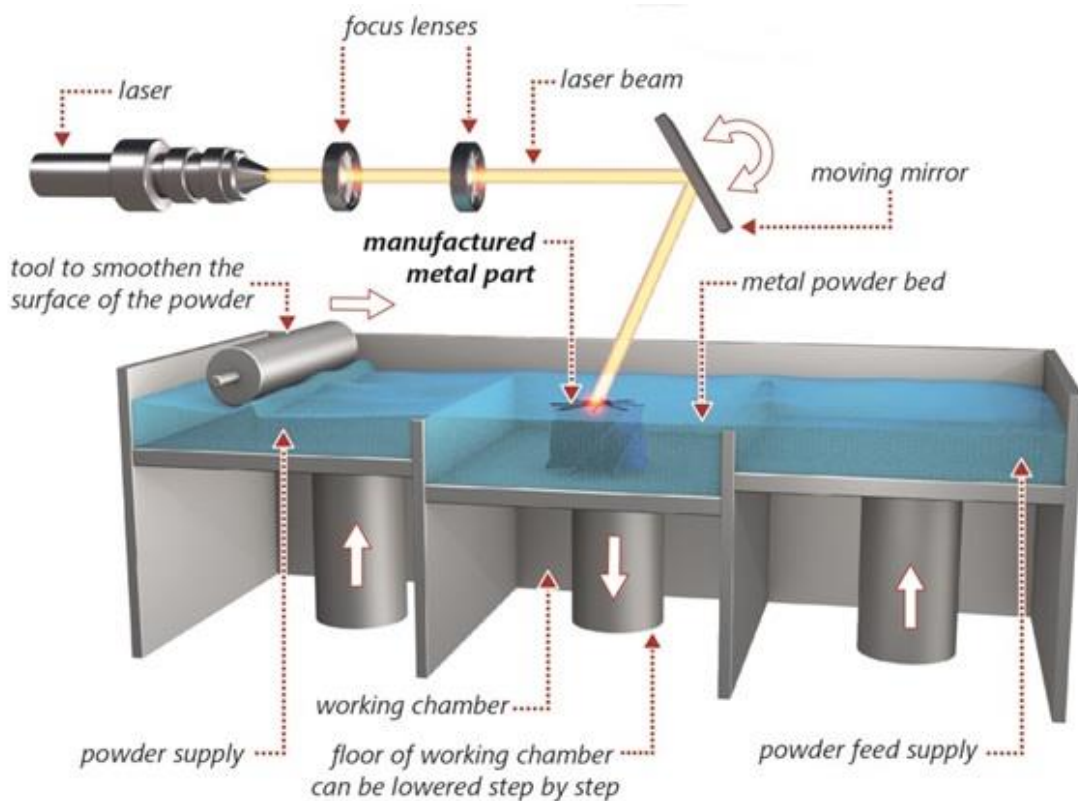
TFEs basés sur la méthode PFEM

- La méthode des PFEM (Particle Finite Element Method) est une méthode hybride, entre les éléments finis classiques et les méthodes particulaires, telles la méthode SPH (Smooth Particle Hydrodynamic) ou bien encore la méthode DEM (Discrete Element Method – voir plus loin).
- Une caractéristique fondamentale des méthodes particulaires est que l'information est stockée aux nœuds (appelés « particules »). Les particules peuvent interagir entre elles selon des lois qui dépendent de la physique et de la méthode choisie. Le but est de suivre le mouvement des particules, généralement de grande amplitude, en respectant les lois de la physique.
- Dans la méthode PFEM (voir image ci-dessous), le milieu continu est discrétisé par un nuage de points, les particules. Un maillage éléments finis est généré sur base de ce nuage de points. Sur ce maillage, on peut effectuer un pas de temps classique en éléments finis, pour estimer le mouvement des particules, puis « oublier » le maillage, et recommencer les mêmes opérations au pas de temps suivant.



- L'avantage des remaillages fréquents est d'éviter les distorsions du maillage qui conduiraient à une perte de précision du calcul. Un autre avantage est que si l'on élimine les éléments trop distordus (en rouge sur la figure), on peut séparer un « paquet de matière » du reste du corps et simuler ainsi des phénomènes physiques comme les éclaboussures, ou les vagues déferlantes, ce qui ouvre un champ très large d'investigations.
- La méthode PFEM est assez récente et à ce jour, seules une dizaine d'équipes dans le monde développent cette méthode (voir par exemple <http://www.cimne.com/pfem/>).

Problèmes liés à l'additive manufacturing.

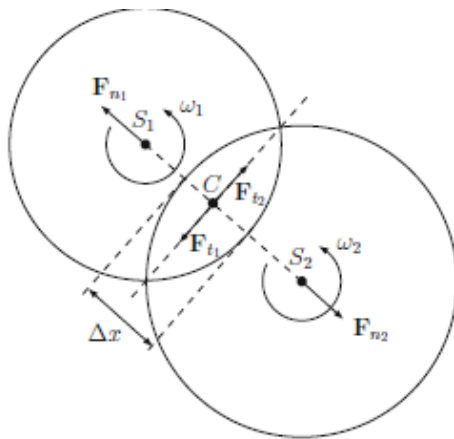


Schématisation de l'impression 3D par la technique du LPBF (Laser Powder-Bed Fusion),

L'additive manufacturing, ou impression 3D, est un domaine actuellement en plein essor. Il permet de réaliser des pièces d'une grande complexité géométrique. La figure ci-dessus illustre le procédé de LPBF (Laser Powder-Bed Fusion), anciennement appelé SLM (Selective Laser Melting). Un rayon laser se déplace et fait fondre localement, là où il interagit avec la poudre, une couche de poudre métallique sur une épaisseur typique de 30 microns. En se solidifiant, la poudre fondue forme alors un solide métallique. Aux endroits non touchés par le rayon laser, la poudre reste intacte. Lorsqu'une couche est terminée, le plateau central (*working chamber*) descend d'une trentaine de microns. Un rouleau (*tool to smoothen the surface of the powder*) recharge alors une couche de poudre et le processus peut recommencer avec cette nouvelle couche de poudre. L'opération qui consiste à recharger une couche de poudre s'appelle le *recoating*. Cette couche doit être la plus plate possible, ce qui n'est pas évident vu que le diamètre des grains de poudre peut être bien supérieur à 10 microns, et que ce diamètre présente une certaine variabilité d'un grain à l'autre.

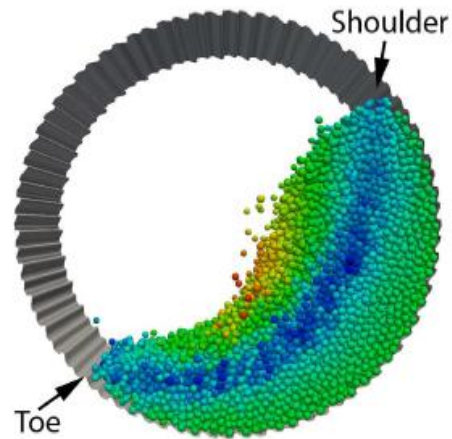
- Simulation des opérations de recoating à l'aide de la méthode des DEM.

La méthode DEM (Discrete Element Method) devrait permettre de simuler l'opération de recoating. Cette méthode considère des particules sphériques (circulaires en 2D) et des interactions de contact entre ces différentes sphères, comme illustré à la figure ci-dessous à gauche. Le Laboratoire possède déjà une certaine expérience des simulations DEM comme l'illustre la figure ci-dessous à droite. Cette figure montre « l'écoulement » de boulets métalliques dans un broyeur en rotation pour l'industrie minière.



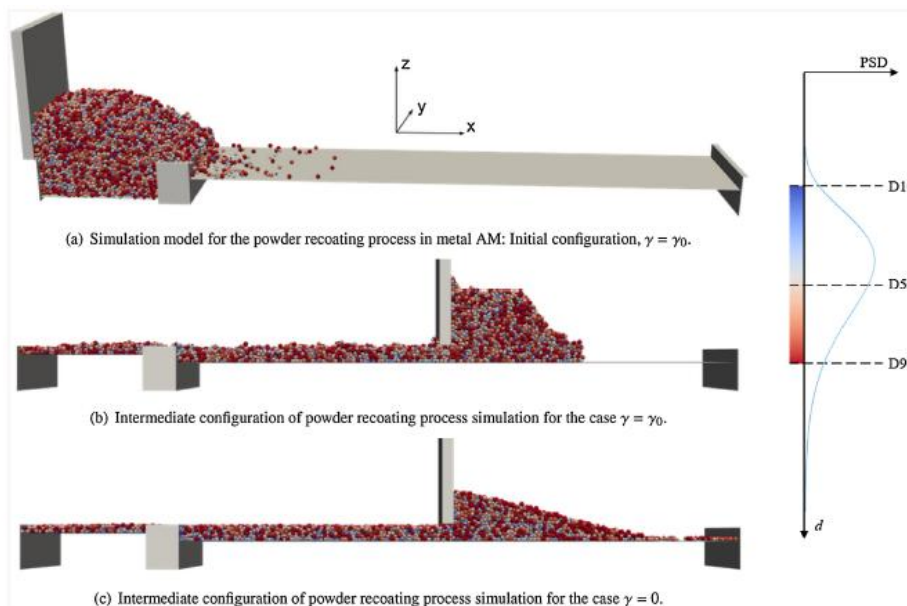
I

Interactions des particules à l'aide d'un algorithme de contact



« Ecoulement » de boulets métalliques dans un broyeur industriel en rotation.

L'idée du TFE est de simuler les opérations de recoating, avec des sphères de diamètres différents comme illustré ci-dessous, à l'aide du logiciel libre YADE.



N.B. Le logiciel envisagé n'étant pas développé au LTAS-MN2L, l'étudiant doit être suffisamment autonome en informatique que pour installer, compiler et exécuter le code YADE sur son PC.

Méthode PFEM 2D pour l'Additive Manufacturing

- Fusion des particules de poudre en LPBF et étude des interactions laser/matière

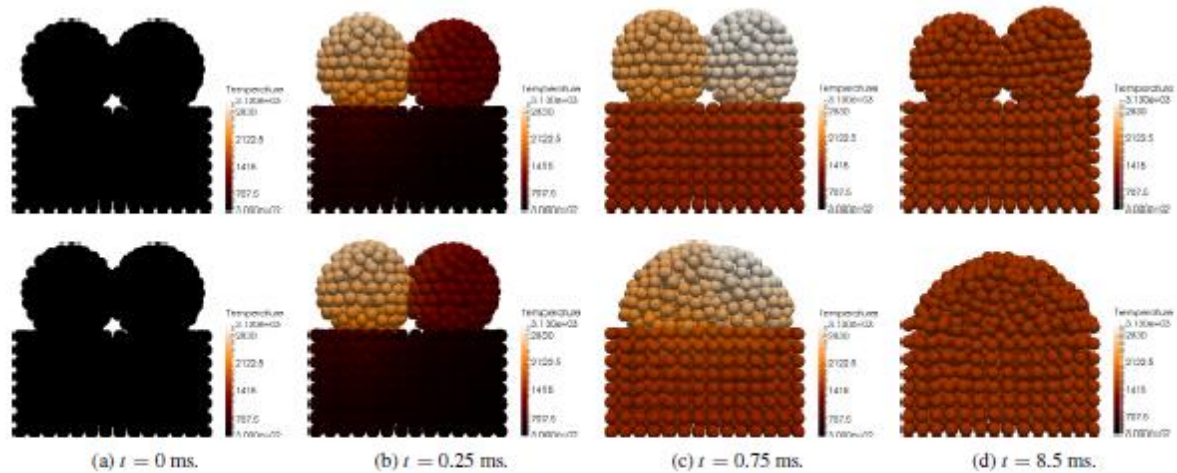
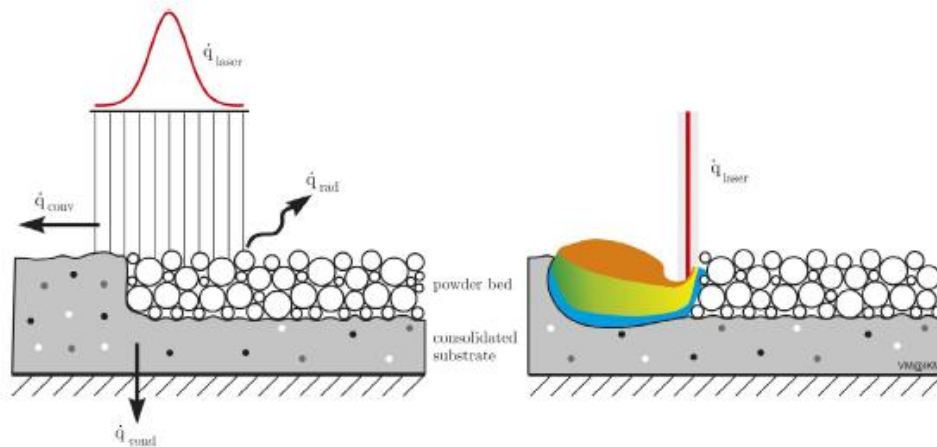


Fig. 11. Melting and solidification of two laser irradiated particles of $40\ \mu\text{m}$ diameter. The laser power is $P = 22\ \text{W}$. On the top, neglecting and on the bottom including surface tension effects.



Influence des modèles de sources de chaleur sur les simulations en Additive Manufacturing (Ray Tracing Method + étude de l'absorption et des réflexions entre les différents grains)