

Propositions de TFE – Année 2024-2025

Description générale des thématiques pour le Laboratoire de Mécanique Numérique Non Linéaire (R. Boman, E. Fernandez, M. Lacroix 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.

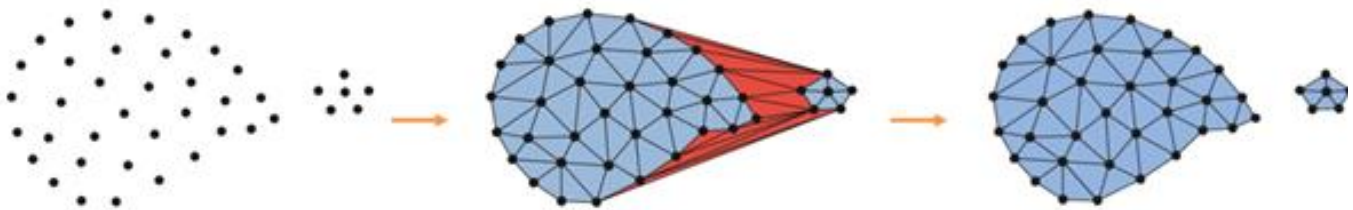
J.P. Ponthot

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 6 équipes dans le monde développent cette méthode (voir par exemple <http://www.cimne.com/pfem/>).

Méthode PFEM 3D

Un code PFEM (Particle Finite Element Method) 3D est actuellement développé au laboratoire. Les possibilités d'applications sont aujourd'hui limitées. A terme, le labo aimerait s'appuyer sur cette méthode pour :

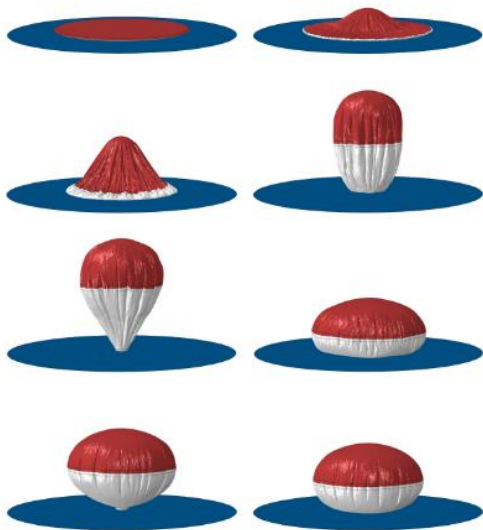
- simuler des interactions « fluide/structure » complexes en 3D,
- modéliser l'impression 3D (additive manufacturing).

Etapes possibles :

- Extension à des modèles visco-élastiques avec surface libre
- Implémentation de schémas d'intégration temporelle plus performants.
- Fluides diphasiques
- Amélioration du remaillage (élimination des « slivers », cf. thèse Simone Meduri)
- Génération automatique du maillage
- HPC / Parallélisation SMP/MPI (indispensable pour les calculs de grande ampleur)
- Fluides non-newtoniens

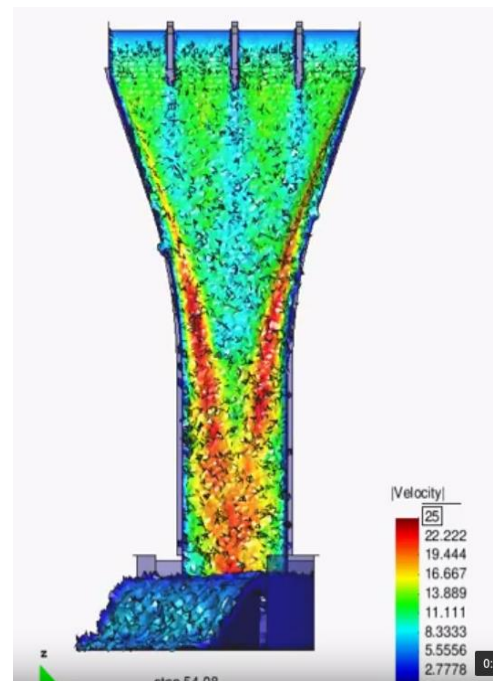
Applications :

- Ecoulement à frontières libres
- Additive manufacturing (ajout suppression de matière - simulation de la *melt pool*)
- Interactions pneu/route et aquaplanage
- Ecoulements de fluides biologiques (biomécanique)
- Impacts à l'oiseau
- Dynamique des structures au sein d'un écoulement/ballottage dans les réservoirs
- Déploiements d'airbags ou de parachutes



Déploiement d'airbags

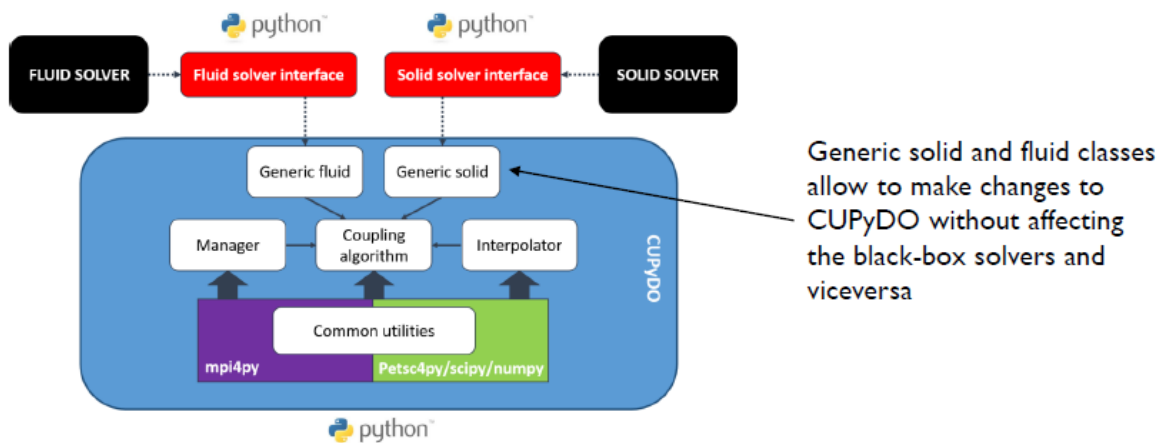
-



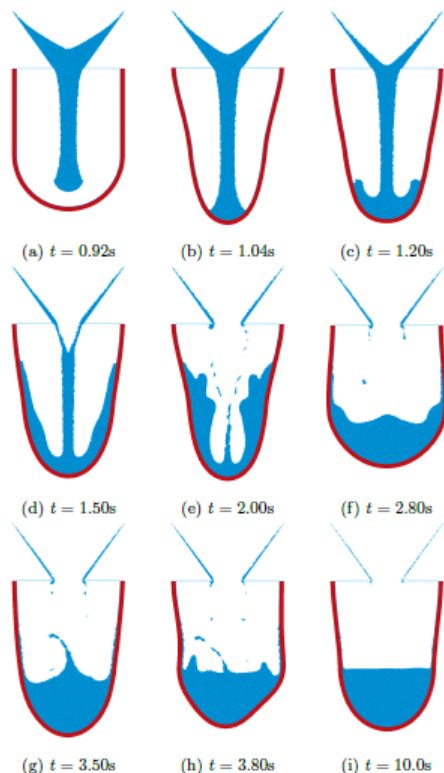
Barrage 3D

Interactions fluide-structure

- Il est possible de faire interagir le code PFEM décrit ci-dessus, capable de simuler des fluides, avec un code éléments finis comme notre logiciel METAFOR (<http://metafor.ltas.ulg.ac.be/>) capable de simuler, par la méthode des éléments finis, des solides en grandes déformations.
- Le couplage peut se faire au travers du logiciel CUPyDO, développé en collaboration avec d'autres services du Département.

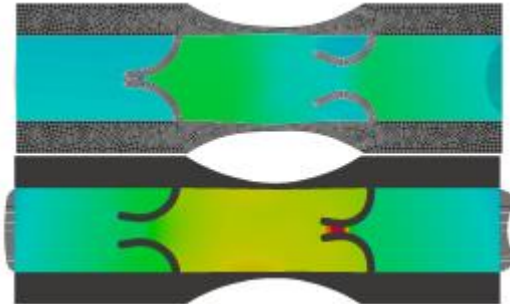
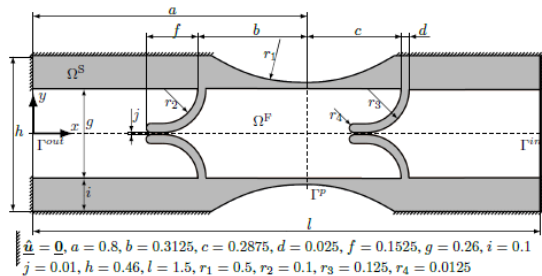


(<https://github.com/ulqltas/CUPyDO>). Le code CUPyDO est écrit en python et dialogue avec des codes de calcul hétérogènes au moyen de python/MPI.

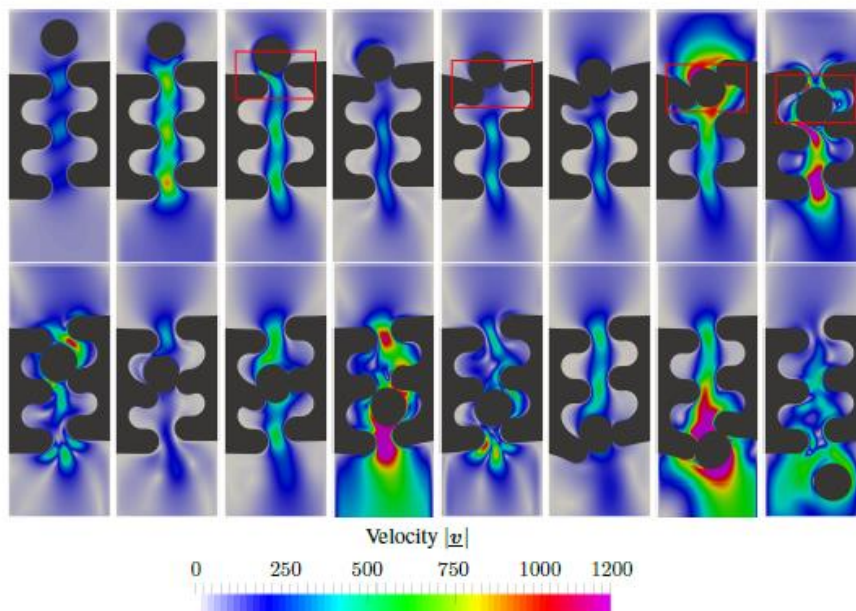
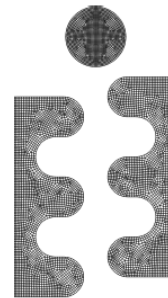
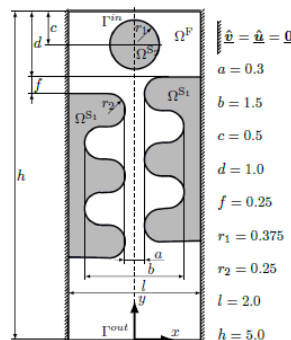


- La figure ci-contre illustre ce qu'il est possible de faire aujourd'hui en couplant le solveur fluide PFEM avec le solveur solide METAFOR, grâce à CUPyDO.
- Le liquide, en bleu sur la figure, s'écoule et entre en contact avec un récipient très flexible, en rouge sur la figure. Notez l'évolution du fluide et les éclaboussures.
- Le but est d'étendre les possibilités d'interactions fluide-structure à des situations plus complexes, 2D ou 3D.

Exemples d'interactions fluide-structure à traiter dans le cadre d'un TFE. Par rapport à la situation précédente, nous souhaitons ici traiter des cas où, en plus de l'écoulement et des grandes déformations du solide, il existe des contacts évolutifs entre des solides. Deux exemples de tels cas, tirés de la littérature, illustrent ce que nous voudrions réaliser. Bien entendu, il est possible d'envisager des extensions 3D.

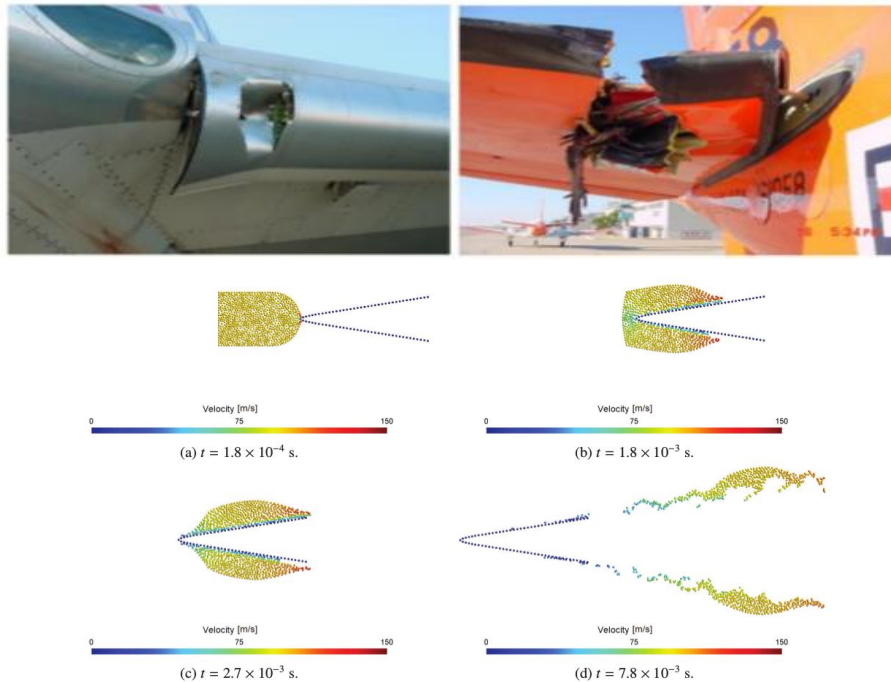


Écoulement dans une valve qui peut se refermer si la pression chute.



*Interactions avec des solides fortement déformables.
 Passage d'une bille au travers d'un « peigne »*

Une autre application possible des interactions fluide-structure est l'étude **d'impacts à l'oiseau sur des structures déformables**

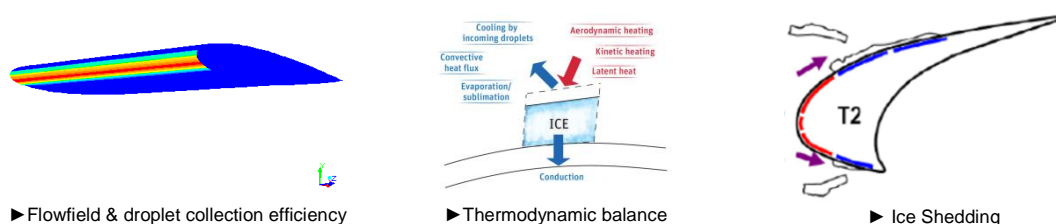


*Simulation d'un « impact à l'oiseau » sur une structure rigide.
L'oiseau est simulé par la méthode PFEM*

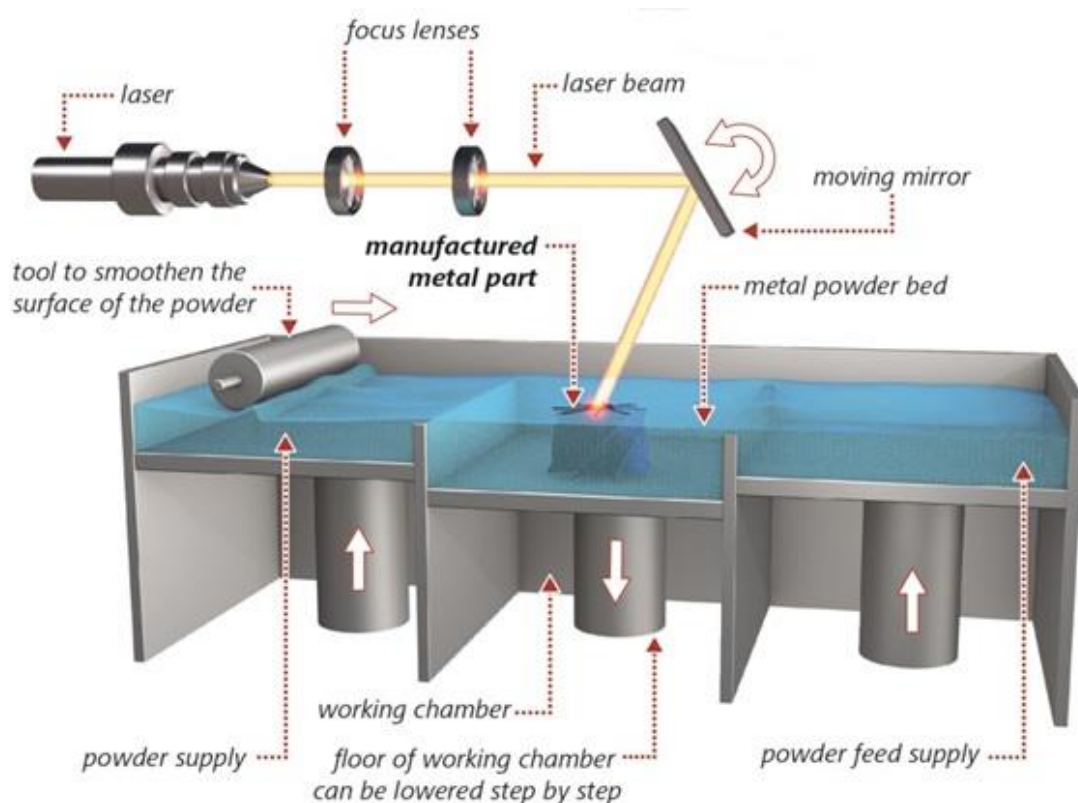
Toujours dans le domaine aéronautique, la méthode des PFEM pourrait être utilisée pour modéliser **l'accrétion de glace** sur des structures aéronautiques.

Buildup of ice during a flight alters aircraft aerodynamics by increasing drag and reducing the airfoil's ability to provide lift. For safety considerations, protecting aircraft from ice accretion is a major consideration. In this framework, numerical simulations that predict ice formation on aircrafts are an efficient way to maintain safety while reducing test costs.

Ice accretion simulations involve multiple steps among with: flowfield resolution, droplet collection efficiency calculation and thermodynamic balance computation.



Problèmes liés à l'additive manufacturing.

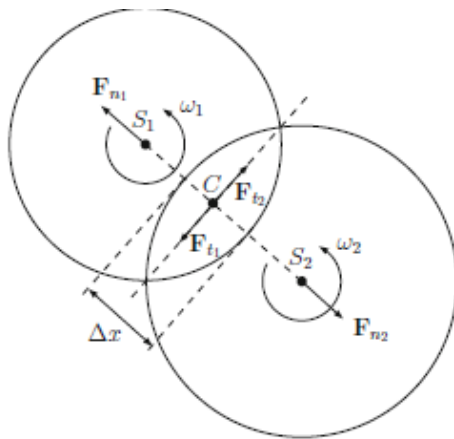


Schématisation de l'impression 3D par la technique du LPBF (Laser Powder-Bed Fusion),

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.

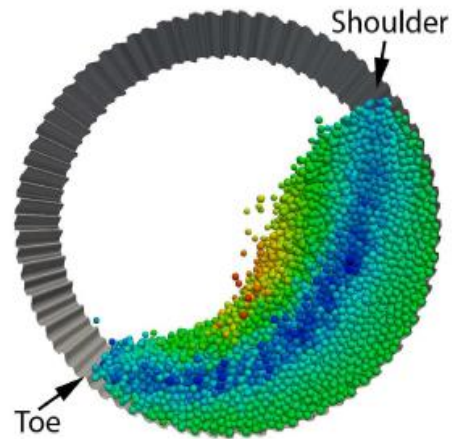
- Simulation des opérations de recoating à l'aide de la méthode des DEM.

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.



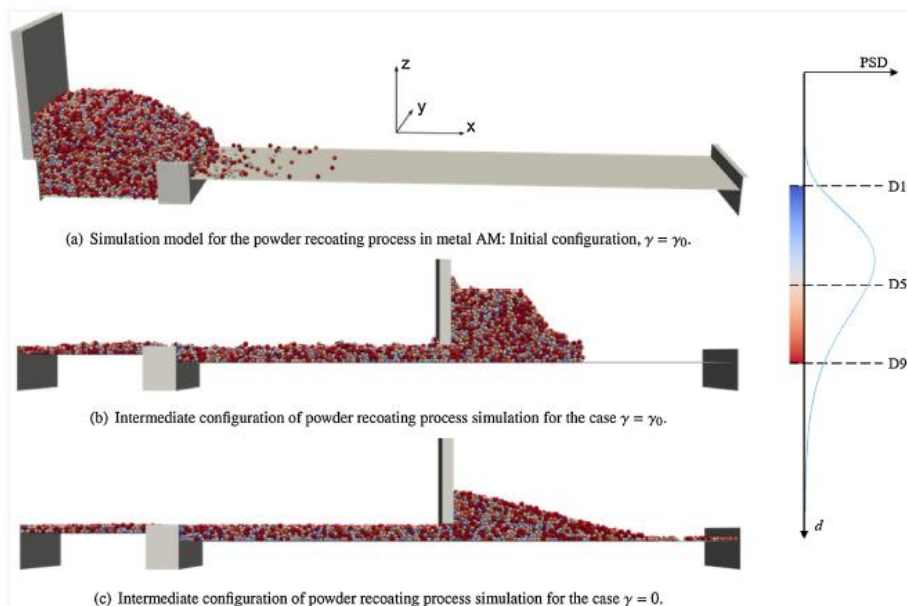
I

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

Sujet lié : Méthode PFEM pour la simulation de solides et les changements de phase

La méthode PFEM pourrait être utilisée pour simuler des solides. Dans le cas d'une simulation comportant des fluides et des solides, toute la physique peut alors être traitée dans le même code par le même solveur et une méthode unique.

Étapes possibles :

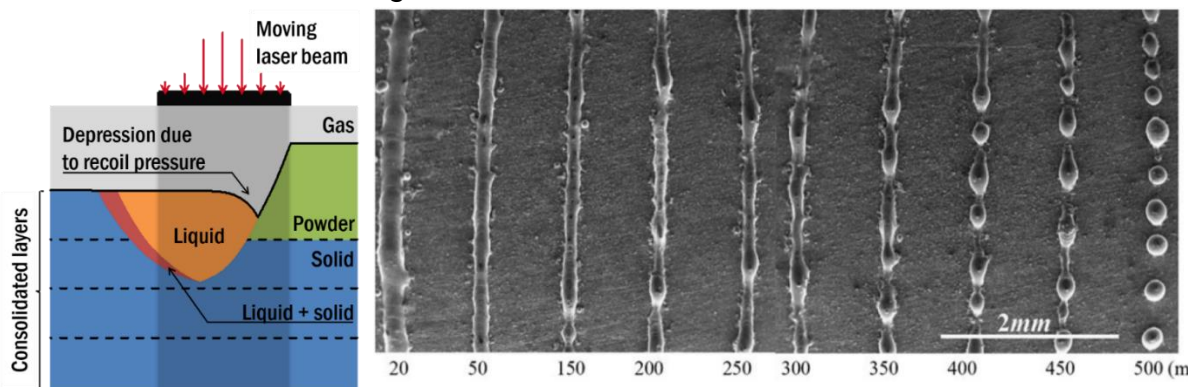
- Modifier les lois de comportement du code PFEM pour introduire des comportements visco-élastiques.
- Modifier les lois de comportement du code PFEM pour introduire des comportements solides.
- Gestion des interfaces et des conditions aux limites.
- Intégration temporelle
- Comparaison avec des résultats obtenus avec des solveurs "solides" traditionnels

Difficultés :

- Résolution des problèmes de stabilité connus
- HPC / Parallélisation

Applications possibles :

- Simulation de matériaux abrasables
- Simulation de solides très visqueux (très grandes déformations)
- Additive manufacturing :



Etude de :

- Instabilité du « track » si épaisseur de couche, vitesse et puissance du laser augmentent (balling effect, voir figure ci-dessus)
- Eclaboussures, formations de pores, fonte partielle des particules
- Tension de surface, effet Marangoni, mouillabilité...

Méthode PFEM 2D pour l'Additive Manufacturing

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

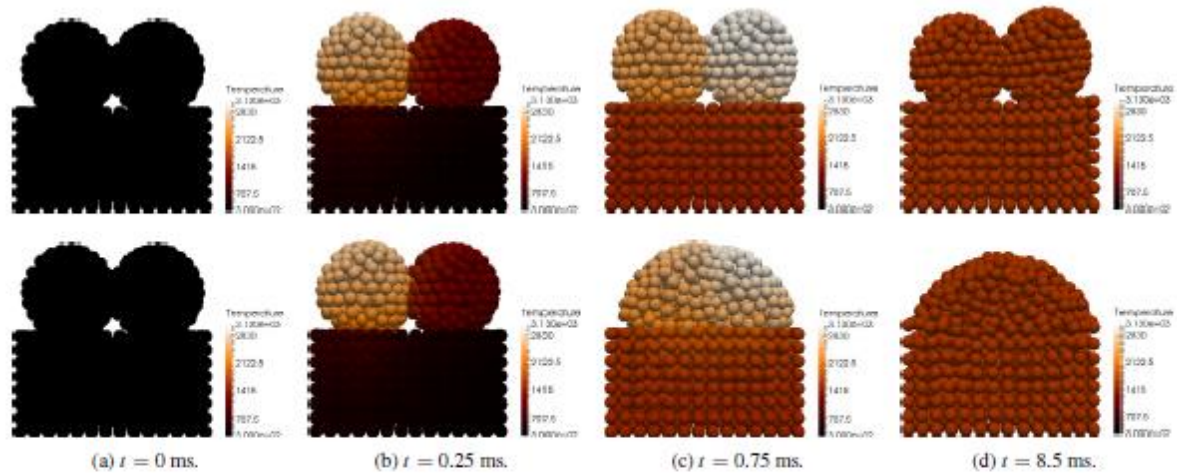
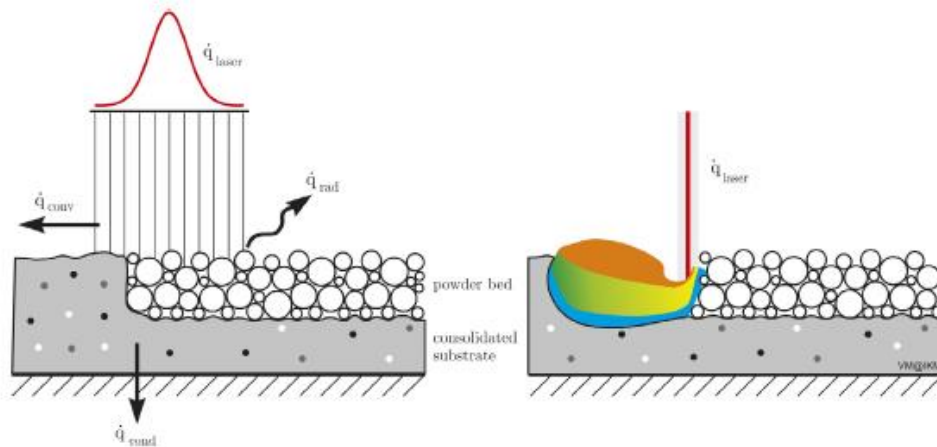


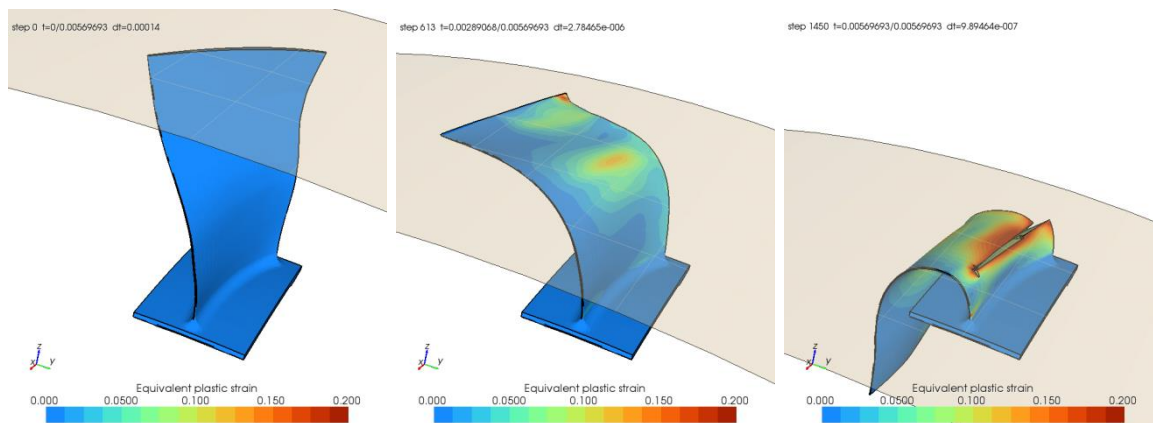
Fig. 11. Melting and solidification of two laser irradiated particles of $40 \mu\text{m}$ diameter. The laser power is $P = 22 \text{ W}$. On the top, neglecting and on the bottom including surface tension effects.



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)

Problèmes liés à la propagation des fissures

Possibilités actuelles de METAFOR : le logiciel permet actuellement d'étudier la propagation de fissures au travers d'un maillage éléments finis, comme illustré ci-dessous.

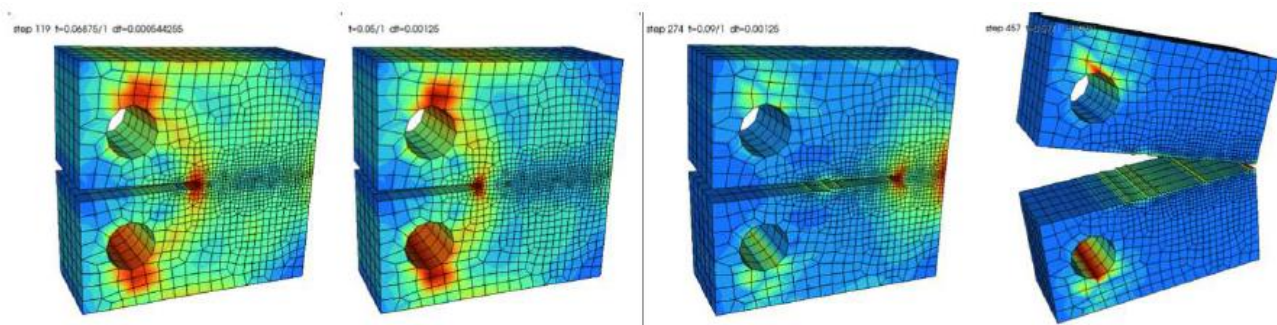


Le comportement du matériau peut être modélisé via un modèle de Johnson-Cook qui tient compte de la vitesse de déformation, de la température et de l'endommagement :

$$\sigma_{crit} = \left(A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right)$$

$$g = D_C \frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\epsilon_f - \epsilon_d} ; \quad \epsilon_f = \left(D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{eq}} \right) \right) \left(1 + \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right)^{D_4} \left(1 - D_5 \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)$$

Des modèles type « Continuum damage mechanics » ou de Lemaître – Chaboche peuvent également être utilisés.



Autres applications envisagées :

- Prédire l'apparition de fissures « en chevron » lors des opérations d'extrusion :

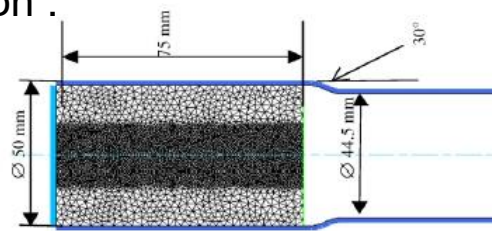
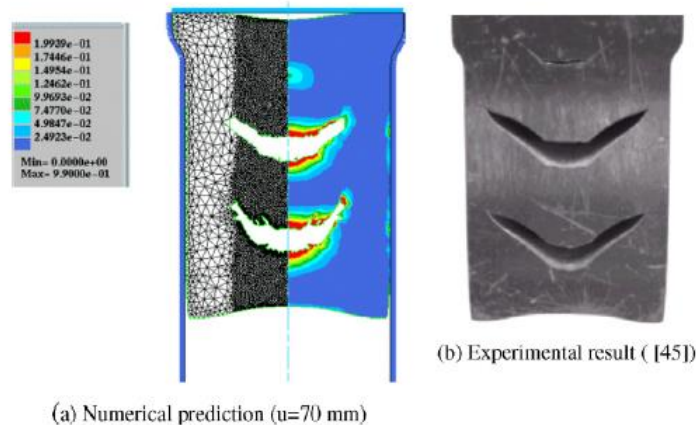
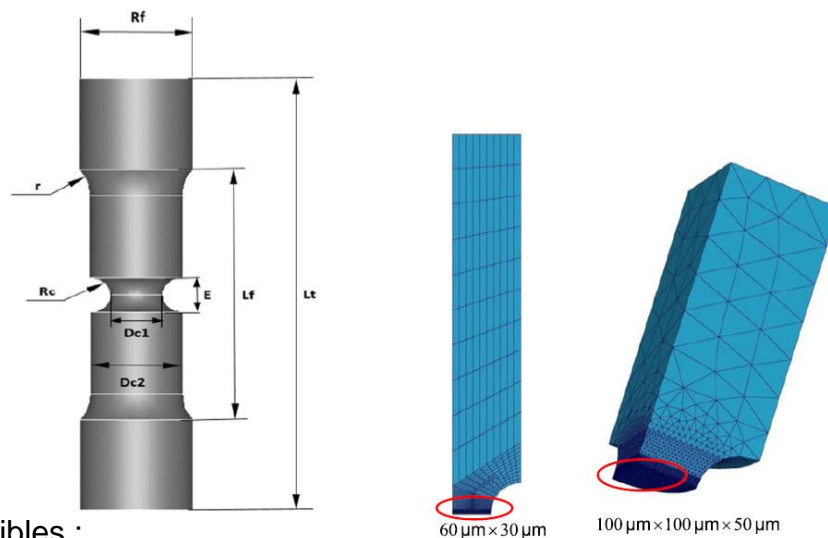


Fig. 5. FE modelling of the axisymmetric cold extrusion of the round bar.



- Prédire la rupture d'éprouvettes entaillées :

NT specimens



Extensions possibles :

- Non local
- Dynamique implicite
- Gurson–Tveergardt–Needleman
- Endommagement anisotrope (Cazacu, Besson, Mohr...)
- Thermo-mécanique et Visco-plastique
- Intelligence artificielle (au lieu d'homogénéisation)