

Simulation et instrumentation des procédés d'élaboration et de fabrication

Exposé de synthèse

Jean-Michel BERGHEAU
ECL-ENISE

- **Problèmes industriels**

- dont les objectifs sont :
 - Réduire les coûts financiers et environnementaux
 - Gagner en qualité et sécurité des pièces produites
- Qui se traduisent par la nécessité
 - De maîtriser les paramètres opératoires
 - De contrôler les procédés en temps réel
 - De maîtriser les conséquences induites et leurs impacts sur la durée de vie des composants
 - Introduire de nouveaux procédés

- **Pour les chercheurs**

- Sciences de l'ingénieur
- Equipes pluri-disciplinaires
- Comprendre les phénomènes physiques interagissant et développer les moyens expérimentaux adaptés
- Mettre en place des moyens de prédiction et de simulation numérique efficaces, validés par l'expérience et éprouvés.

- **Cours**

- Approches thermodynamiques des transformations de phase
 1. Diffusives (C.-A. Gandin)
 2. Avec effets des contraintes (B. Appolaire)
- Essais et instrumentation pour la simulation des procédés (F. Hild)
- Méthodes numériques pour la simulation des procédés (A.-M. Habraken)
- Transition énergétique et tensions internationales : Les défis des supply chains des métaux critiques (V. Donnen)

- **Conférences**

- **Procédés d'élaboration**

- Pilotage numérique des Hauts-Fourneaux et avenir de la filière - O. Nechiporuk
 - La fusion à arc sous vide appliquée aux alliages de Zirconium dédiés aux applications nucléaires - I. Crassous
 - Les procédés d'atomisation au service de la poudre- L. Dembinski
 - Recyclage d'alliages de titane de qualité aéronautique par le procédé PAMCHR (Plasma Arc Melting and Cold Hearth Refining) - S. Hans
 - La réduction directe : principe de fonctionnement du procédé Midrex et perspectives pour la décarbonation de la sidérurgie - T. Quatravaux
 - Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages - M. Laurent-Brocq

- **Procédés de mise en forme**

- Simulation numérique du refroidissement d'aube de turbine monocristalline base Nickel après une opération de coulée par fusion dirigée - C. Labergere
 - La mise en forme virtuelle des tôles métalliques : état de l'art et perspectives -S. Thuillier
 - Fabrication additive métallique : modélisation et simulation numérique - M. Bellet
 - Simulation des procédés d'usinage - besoins industriels & verrous -J. Rech

- **Conférences**

- Procédés de traitement thermique

- Simulation du chauffage dans un four - L. Sardo
 - Pilotage dynamique des lignes de recuit – vers l'industrie 4.0 - F. Bonnet

- Procédés de surface

- Optimisation des procédés de finition de surface : Synergie entre simulation multi échelle, multiphysique et Machine Learning -B. Fedi
 - Fonctionnalisation des surfaces et hyperdéformation : applications récentes aux secteurs du stockage de l'hydrogène et du biomédical - T. Grosdidier
 - Simulation des déformations de pièces mécaniques induites par des traitements de surface thermochimiques et mécaniques - L. Barrallier – R. Kubler

- **Conférences**

- Du matériau à la durée de vie

- Simulation de la recristallisation dynamique continue (CDRX) en champ complet dans DIGIMU® : théorie et exemples concrets - P. de Micheli
 - Comportement en fatigue des pièces issues de fabrication additive métallique : impacts des défauts et de la microstructure - E. Pessard
 - Modélisation multi-échelles de solides à matrice polymère obtenus par deux procédés de fabrication - I. Doghri

- Procédés d'élaboration de composites

- Modélisation multi-échelle pour les procédés d'élaboration de composites structuraux par voie liquide - S. Drapier
 - Mise en forme des renforts fibreux - état de l'art et enjeux - E. Vidal-Salle
 - Dimensionnement et certification de pièces en composites tissés 3D : apports de la chaîne numérique de simulation des procédés - J. Schneider
 - Caractérisation multi-physique de composites en cours de transformation - S. Lecorre

- **Posters**

- 24 posters (dans le recueil) dont 9 candidats au prix de thèse Ada Lovelace
 - 11 sur des problématiques de Fabrication Additive (LPBF, DED, MEAM, ADAM)
 - 2 sur la mise en forme
 - 1 sur le tréfilage
- 8 sur le comportement des matériaux en lien avec la microstructure
- 12 sur des aspects strictement expérimentaux
- 12 sur des aspects numériques et expérimentaux ou numériques purs

- **Approche paramétrique strictement expérimentale**
 - Plan d'expériences sur les paramètres du procédé
 - Réalisation des essais
 - Observation des résultats → Conclusions
- **Approches numériques**
 - Simulations fortement non-linéaires, multiphysiques et à différentes échelles (qui peuvent interagir)
 - Nécessitent des modèles et méthodes numériques avancées
 - Demandent une caractérisation et une validation expérimentales difficiles
 - Très grandes déformations, très grands taux de déformation
 - Hautes températures
 - Gradients de propriétés
 - Nécessité de mesures in-situ, en cours de process...

Transferts de chaleur

- Conduction – convection
- Rayonnement
- Chaleurs latentes de changement de phase
- Enthalpie de réaction

Mécanique

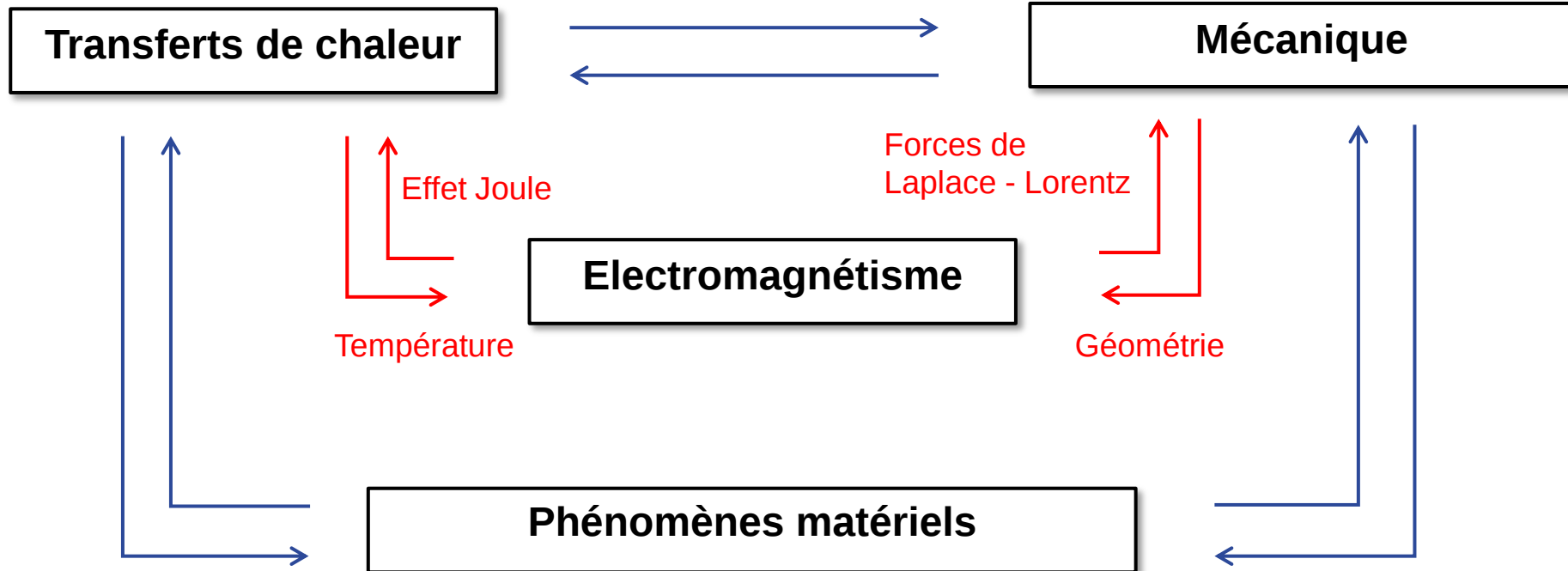
- Ecoulements fluides (Darcy, Stokes, Navier-Stokes)
- Matériaux sous plusieurs états
- Comportements complexes fonctions de phénomènes matériels
- Grandes déformations...

Phénomènes matériels

- Microstructure : taille, orientation des grains, transformations de phase, recristallisation, restauration... (matériaux métalliques)
- Composites : distribution de fibres, déformation des renforts ...
- Homogénéisation pour passage à l'échelle macroscopique
- Endommagement...

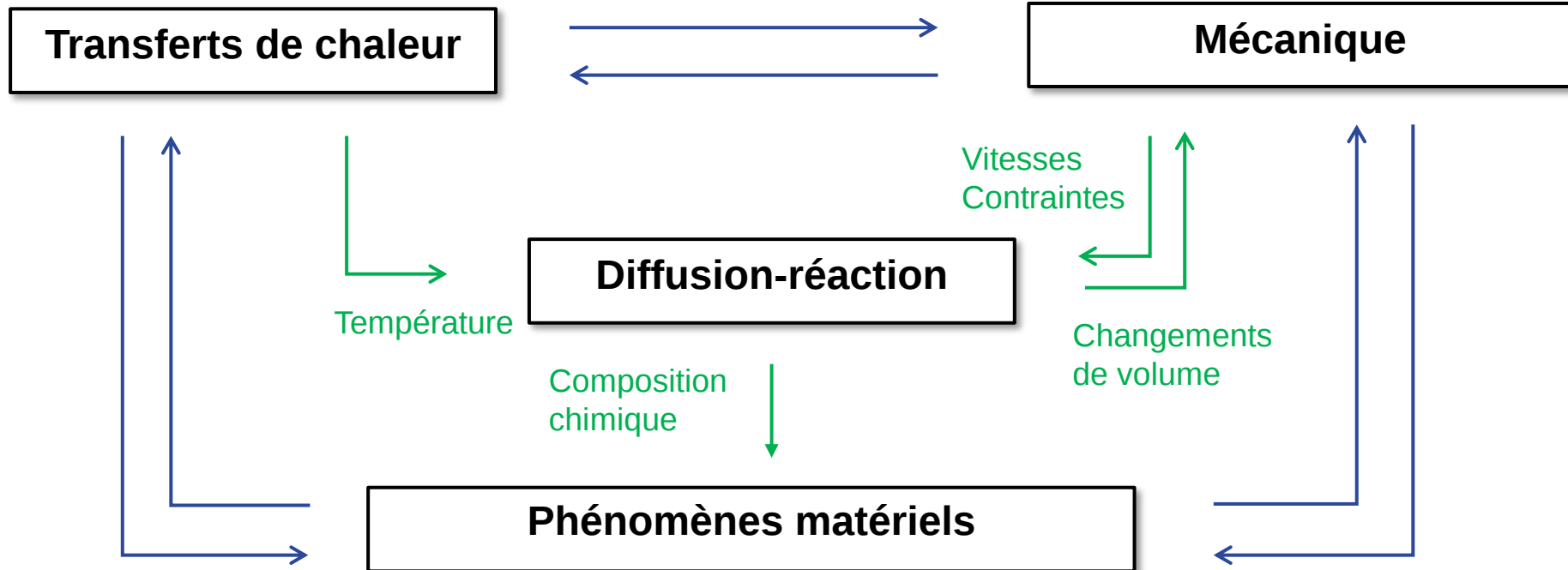
Couplages thermo-mécano-matériels

Procédés concernés : FA (LPBF, DED, WAAM...), usinage, mise en forme, traitements thermiques, traitements mécaniques de surface, fonderie, soudage, LCM, RTM...



Couplages avec l'électromagnétisme

Procédés concernés : fusion à arc sous vide, soudage à l'arc, chauffage par induction, soudage par résistance, mise en forme électromagnétique...



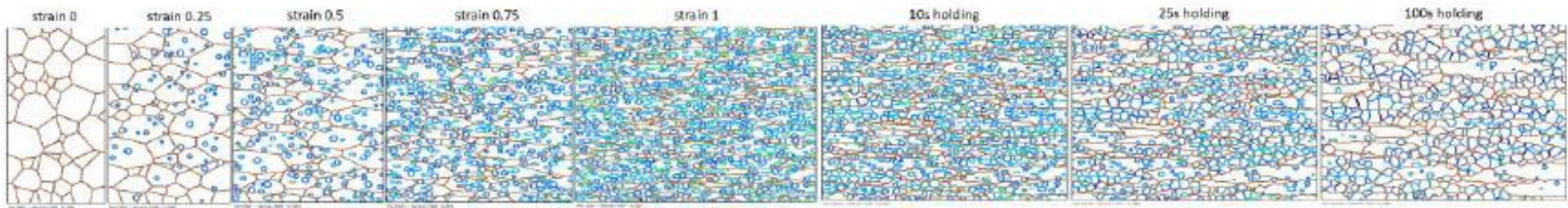
Couplages avec la diffusion-réaction d'éléments chimiques

Procédés concernés : traitements thermochimiques, cémentation...

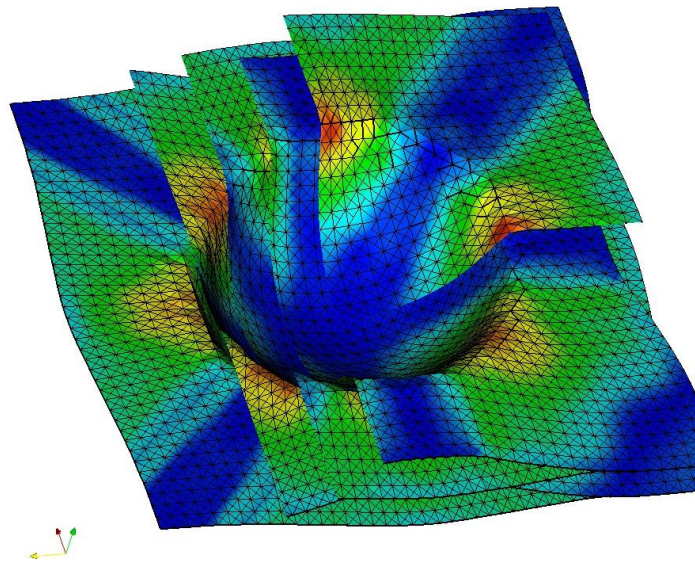
- **Echelle(s) du matériau**

- Les phénomènes matériels dépendent :
 - Du matériau
 - De la façon dont il est sollicité (souvent dans des conditions extrêmes)
 - hautes températures, vitesses de chauffage et de refroidissement très élevées
 - grandes déformations, grandes vitesses de déformations...
- Microstructure (métaux)
 - Pour les propriétés et le comportement mécanique macroscopique des solides
 - Calcul des tailles de grains, orientations... à coupler avec des modèles de plasticité cristalline
 - Peut être affectée par un traitement mécanique de surface
 - Transformations de phase, phénomènes de recristallisation, de restauration... peuvent être pris en compte par des modèles phénoménologiques couplés à des modèles de comportement
- Mésostructure (composites)
 - Pour la perméabilité, les propriétés élastiques, viscoélastiques et thermiques
 - Echelle des renforts et des fibres
 - Pour passer à l'échelle macro → Modèles homogénéisés

- Echelle(s) du matériau

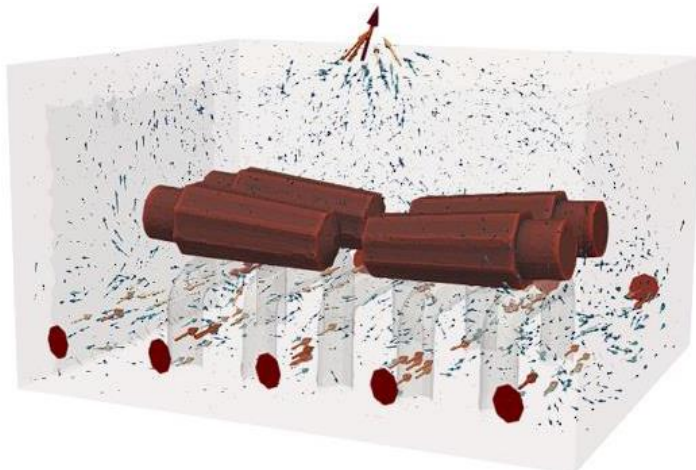


Simulation de la recristallisation (P. de Micheli)

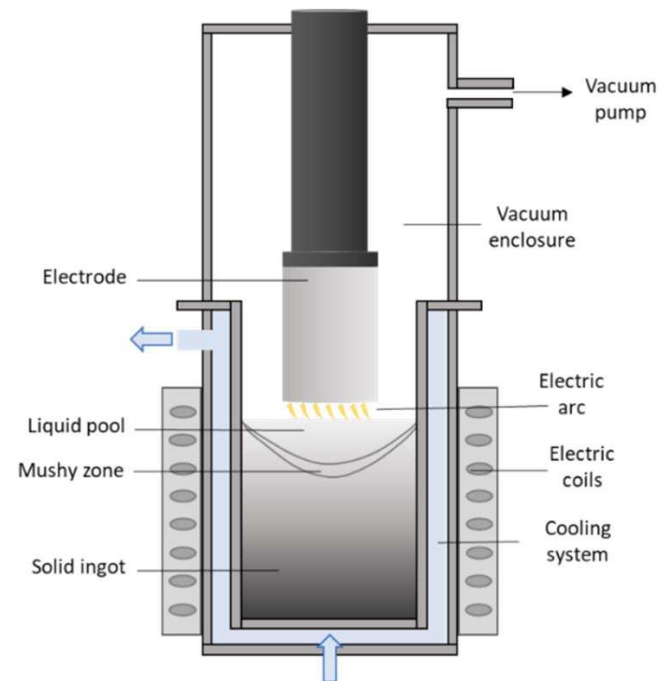


Simulations macroscopiques de la mise en forme des renforts par approche continue (E. Vidal-Salle)

- **Procédés globaux (élaboration de lingot, LCM, fonderie, forgeage...)**
 - Echelle du procédé (et de la pièce fabriquée)



Simulation du chauffage dans un four (L. Sardo)



Fusion à arc sous vide (I. Crassous)

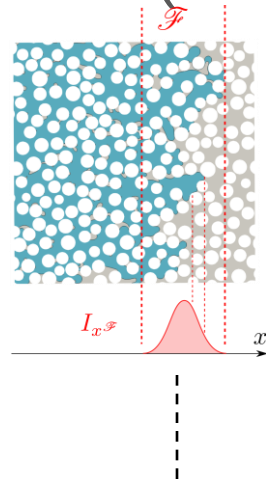
- Procédés globaux (élaboration de lingot, LCM, fonderie, forgeage...)
 - Echelle du procédé (et de la pièce fabriquée)

- **Full resolution**

(HPC - 25 days)

$$\ell_{medium} \gg \ell_{RVE} \\ \simeq (30 - 40) \bar{\phi}_{fibre}$$

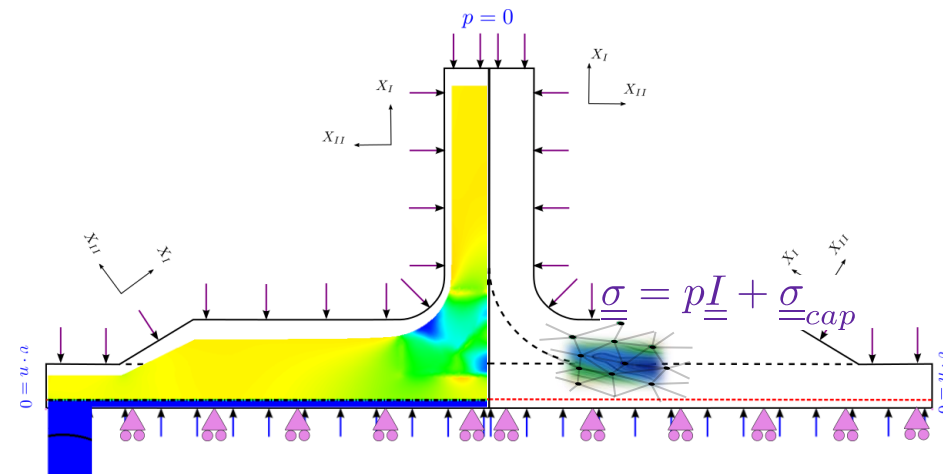
$$\ell_{medium} \lesssim \ell_{sat} (3 - 4) \bar{\phi}_{fibre}$$



- **Darcy's simplification**

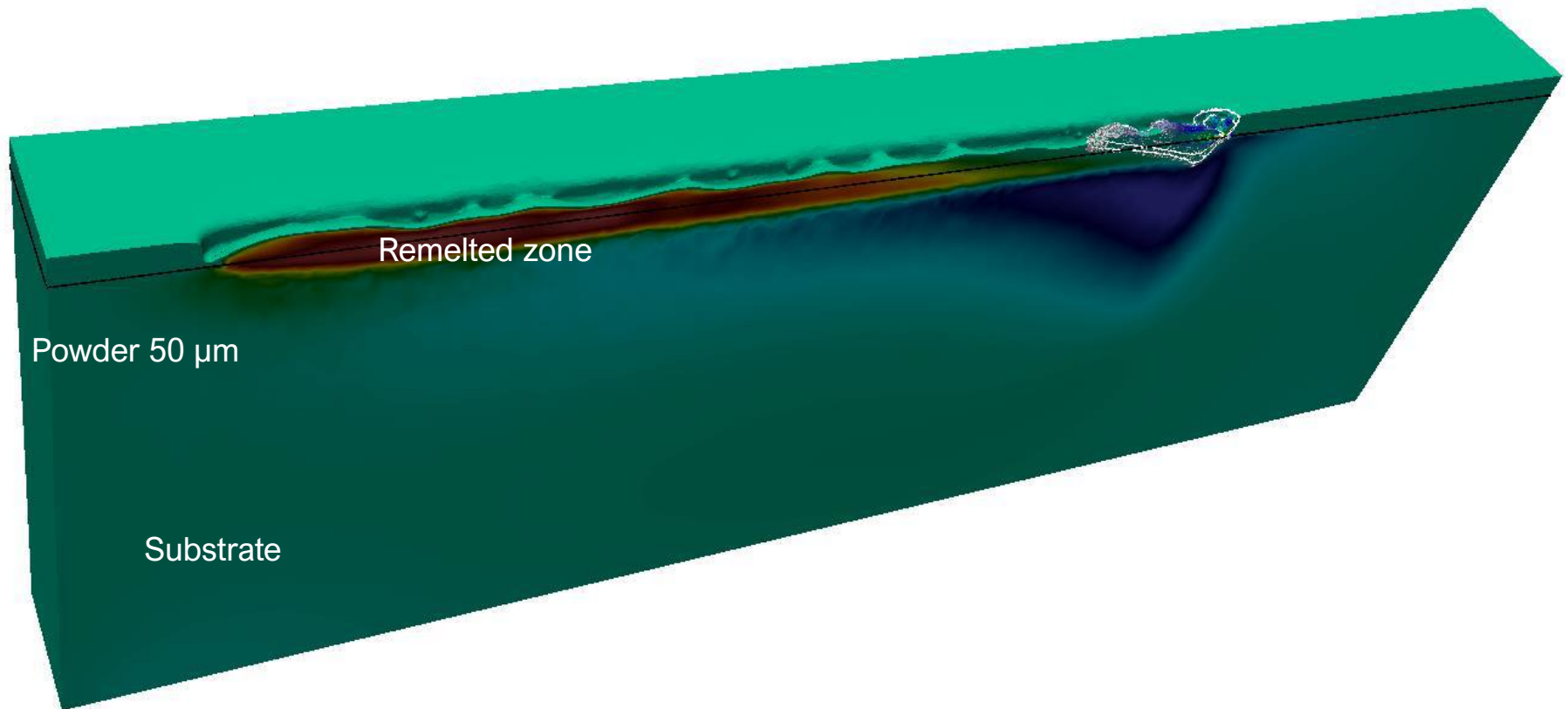
(2s CPU)

$$\langle \underline{v} \rangle = -\mathcal{N} \left(\underline{\underline{K_{sat}}}(\bar{r}, V_f, \ell_s) \right) \frac{\nabla \langle P \rangle^L}{\eta}$$



Transition d'échelle pour la perméabilité (S. Drapier)

- **Procédés mettant en jeu un chargement mobile par rapport à la matière : fabrication additive, coupe orthogonale, rectification, soudage, laminage...**
- Echelle du procédé (voisinage du chargement ou de la source de chaleur mobile)
 - Différents types d'analyse selon qu'on s'intéresse au procédé ou aux conséquences induites
- Echelle de la pièce fabriquée
 - En général pour les conséquences induites et nécessaire pour les distorsions

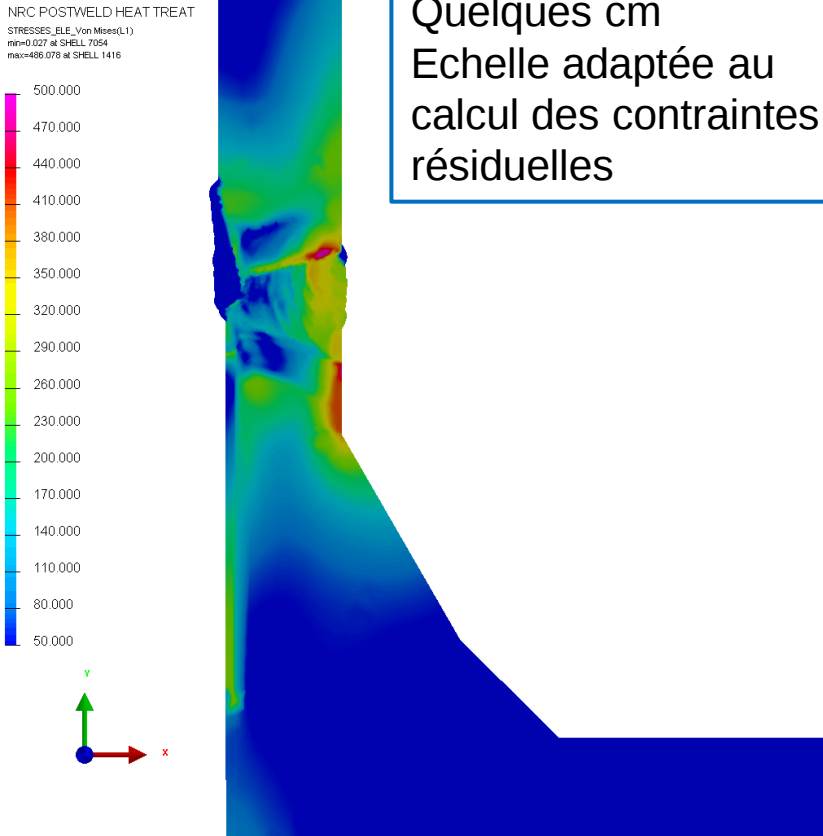


L-PBF d'une céramique (Alumine) (M. Bellet) - Thèse Qiang Chen, 2018

Problèmes multiéchelles

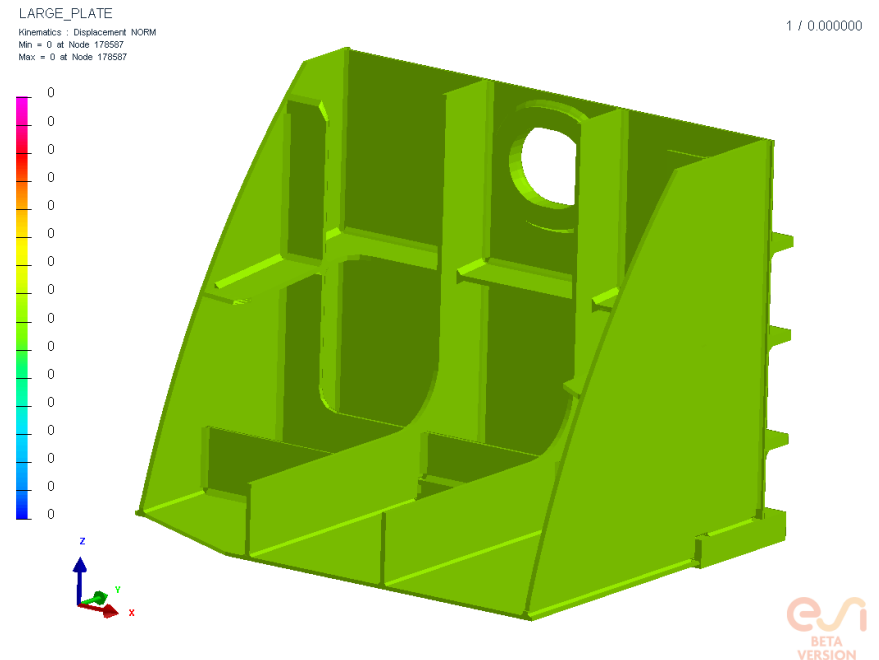
Joint soudé

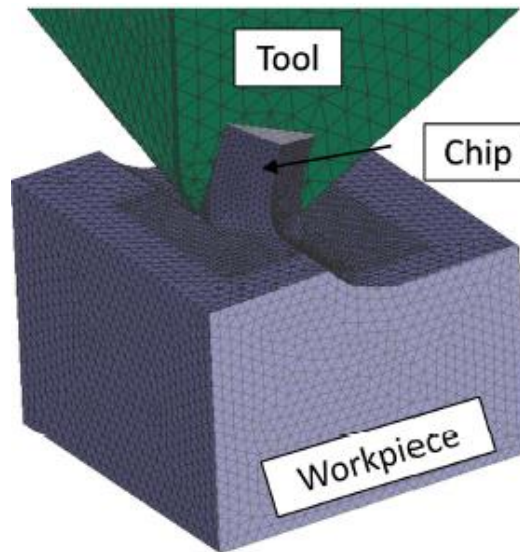
Quelques cm
Echelle adaptée au
calcul des contraintes
résiduelles



Structure

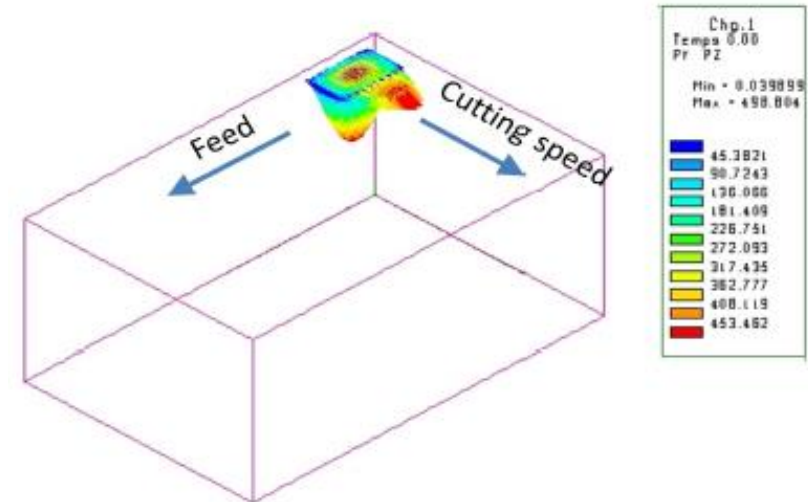
- Quelques mètres
- Incorpore plusieurs joints soudés
- Nécessaire pour la détermination des distorsions





Problèmes multiéchelles

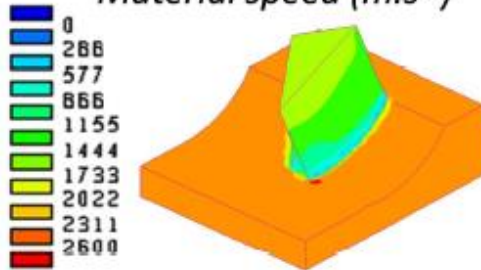
Mechanical loadings onto the final surface



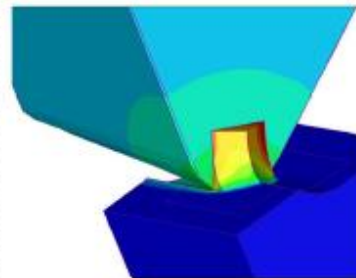
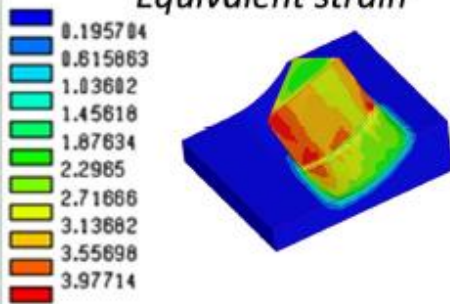
Mechanical

Thermal

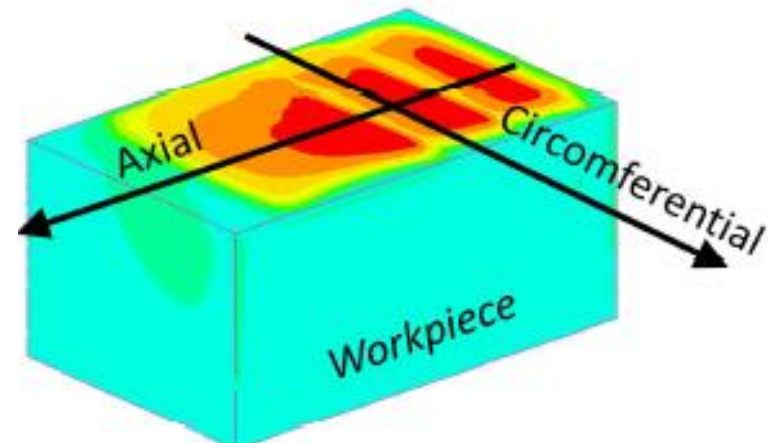
Material speed ($m.s^{-1}$)



Equivalent strain



$T(^{\circ}C)$



Transferts de chaleur

Formulations en température ou en enthalpie

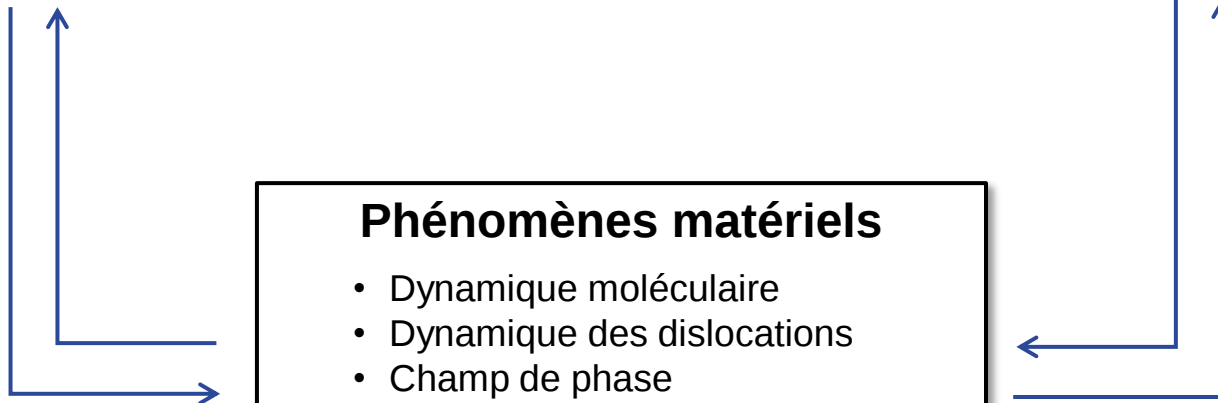
- MEF
- MVF...

Mécanique

- MEF
- MVF
- MED
- PFEM...
- Level-set, VOF, ALE...

Phénomènes matériels

- Dynamique moléculaire
- Dynamique des dislocations
- Champ de phase
- Plasticité cristalline
- Modèles phénoménologiques...



Transferts de chaleur

Formulations en température ou en enthalpie

- MEF
- MVF...

Mécanique

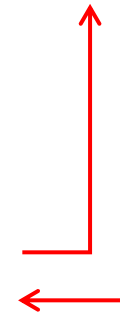
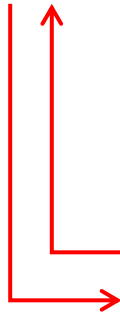
- MEF, PFEM
- MVF
- MED...
- Level-set, VOF, ALE...



Electromagnétisme

Formulations en potentiel vecteur, champ magnétique, potentiel scalaire

- MEF, MEIF
- Equations de circuit



Transferts de chaleur

Formulations en température ou en enthalpie

- MEF
- MVF...

Mécanique

- MEF
- MVF
- MED...
- Level-set, VOF, ALE...



Diffusion-réaction

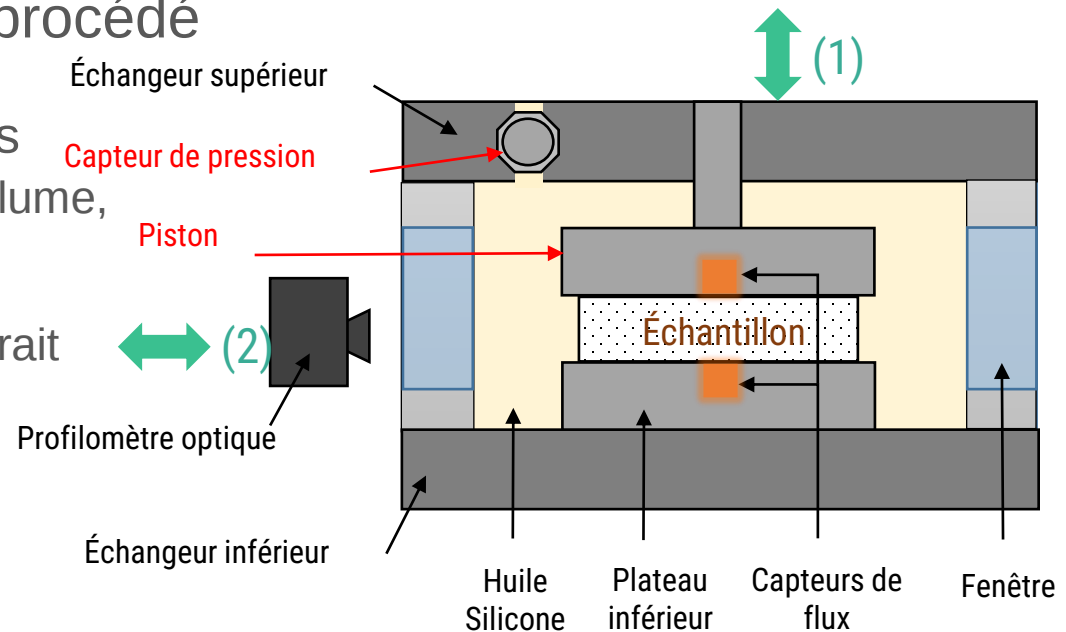
Formulations en fractions dissoutes ou totales en éléments

- Souvent 1D
- MEF, MVF, MDF



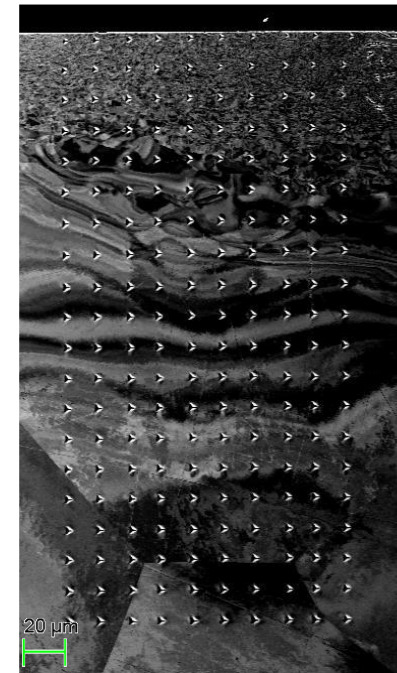
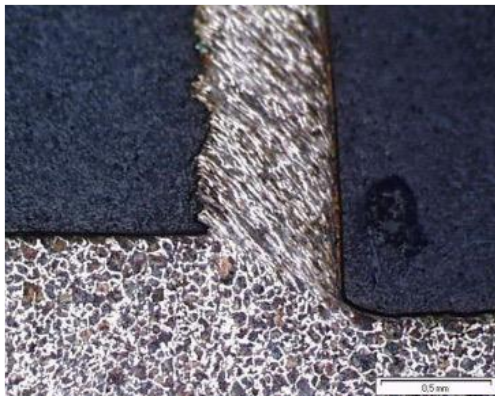
Phénomènes matériels

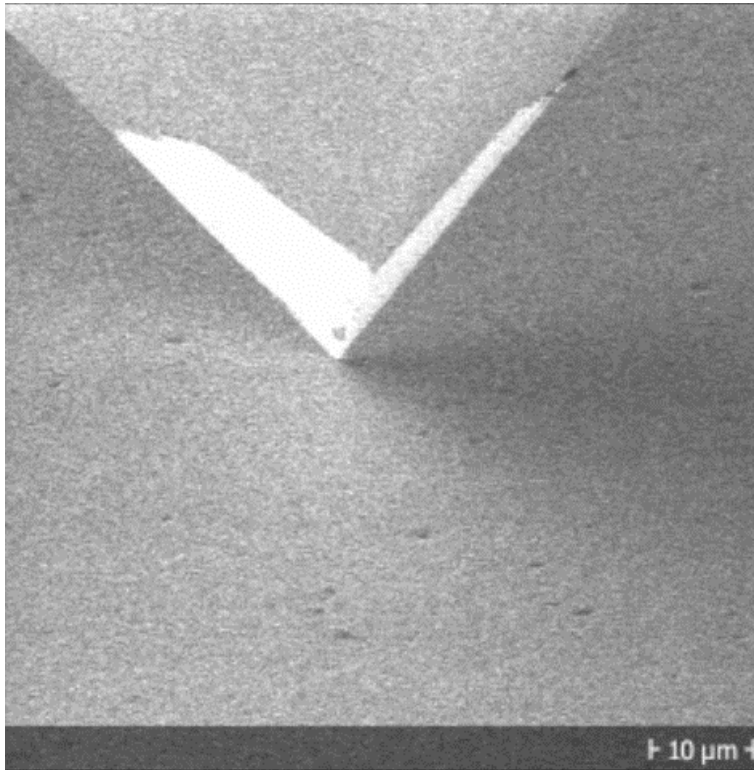
- **Des modèles de simulation numérique éprouvés sont aujourd'hui disponibles pour simuler les procédés**
 - Des codes de calcul (généralistes ou dédiés) sont disponibles
- **De nouveaux moyens de caractérisation expérimentale permettent des mesures de plus en plus précises**
 - Mesures en cours de procédé
 - Mesures au cours de la cuisson des résines
 - de variations de volume,
 - des coefficients d'expansion thermique et de retrait chimique
 - des cinétiques de cristallisation (thermoplastiques)



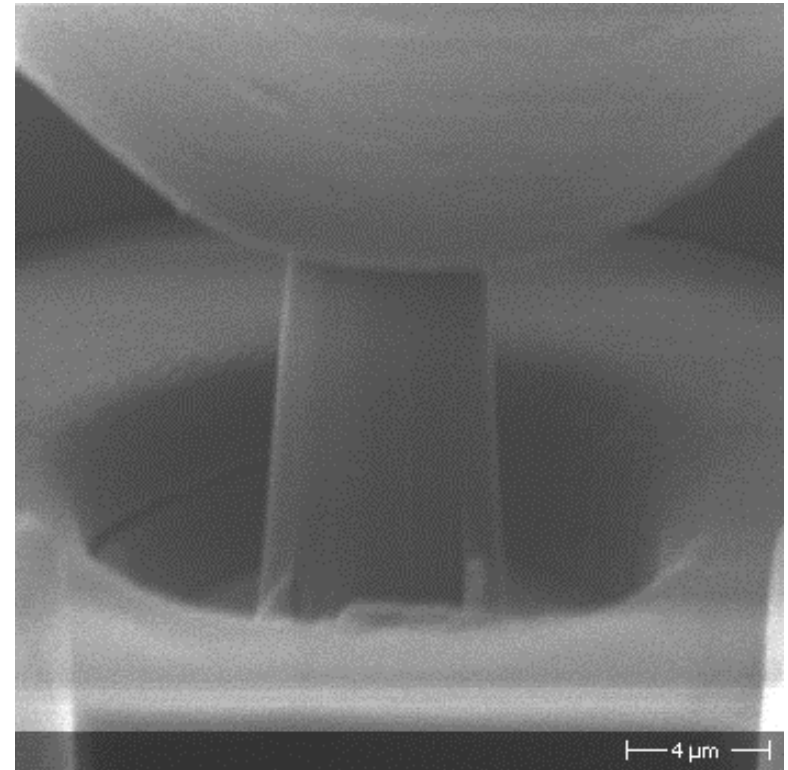
PVT-Haddoc(S. Lecorre)

- **De nouveaux moyens de caractérisation expérimentale permettent des mesures de plus en plus précises**
 - Mesures in-situ (en surface)
 - de champs cinématiques et d'efforts par corrélation d'image
 - de température par thermographie infrarouge en surface
 - Tomographie aux rayon X,
 - Mesures locales de propriétés (nano-indentation instrumentée)...





Essai de nanoindentation



Compression de micro-piliers usinés
par FIB (Focused Ions Beam)

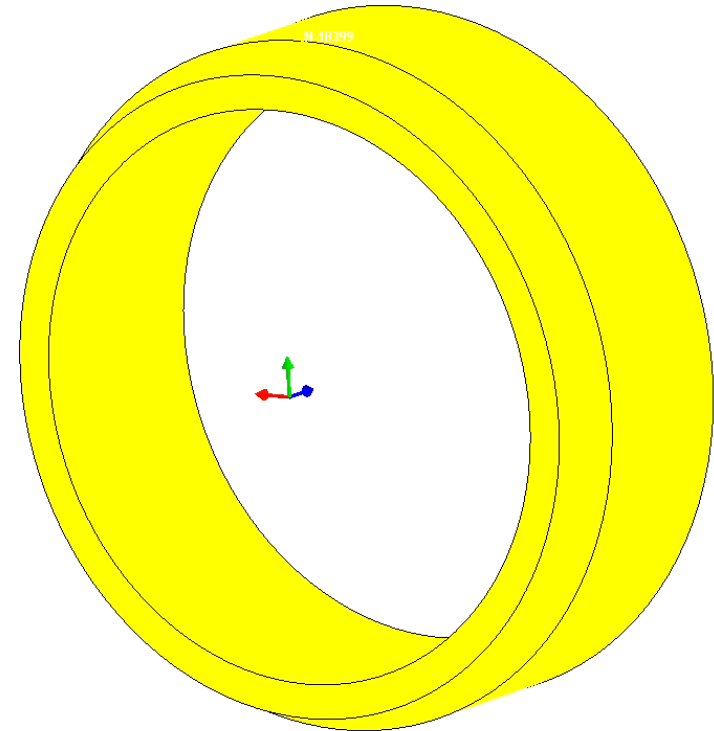
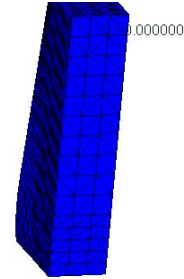
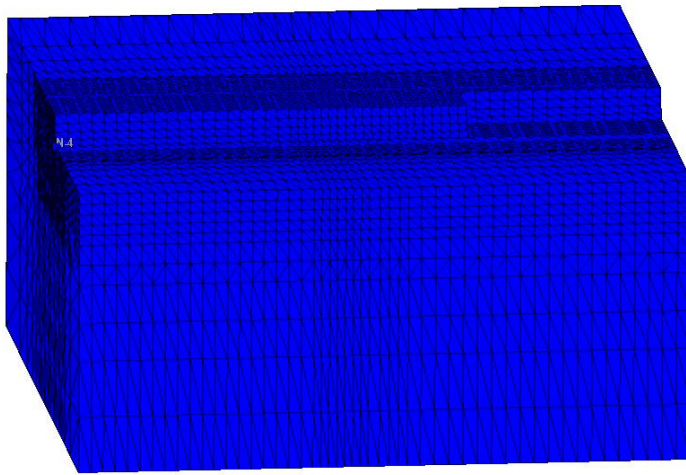
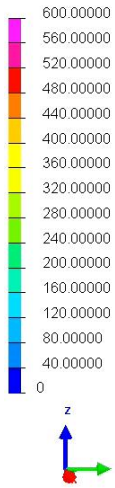
- **Mais**

- Des modèles de comportement souvent complexes
 - Des coûts et des temps de caractérisation très élevés
- Des données d'entrée pas toujours bien maîtrisées
 - Nécessité de recalibrer (par des méthodes inverses)
 - des paramètres de lois de comportement,
 - des paramètres de source de chaleur,
 - des conditions aux limites (coefficients d'échange)...
 - Données en fonction de la température (par exemple) souvent limitées
 - ...
- Qui réduisent l'accès aux outils de simulation dans un contexte industriel

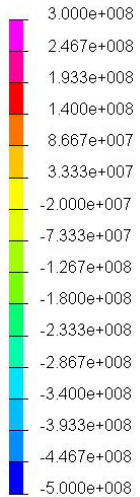
- **Comment faciliter l'utilisation de la simulation numérique des procédés dans un contexte industriel**
 - Raccourcir les temps de simulation et la quantité des résultats à traiter
 - Choisir la bonne échelle de modélisation
 - Ne pas systématiquement faire du 3D, réduire la taille des modèles en prenant en compte les symétries du problème, ...
 - Développer des algorithmes spécifiques (repère mobile, méthodes nodales, maillage qui suit la source....)
 - Développer des modèles réduits?

CALCUL NODAL TOURNAGE

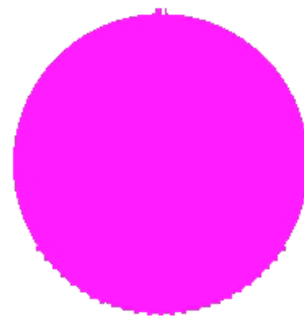
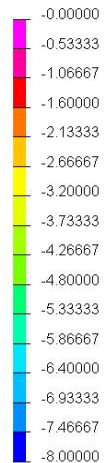
NODE : DEFORMATIONS_NOD Von Mises
Min = 0 at Node 4
Max = 0 at Node 4



Axial stress



Vertical displacement



Classical model

2500.0
2010.0
1520.0
1030.0
540.0
50.0



P2W1

MTF model

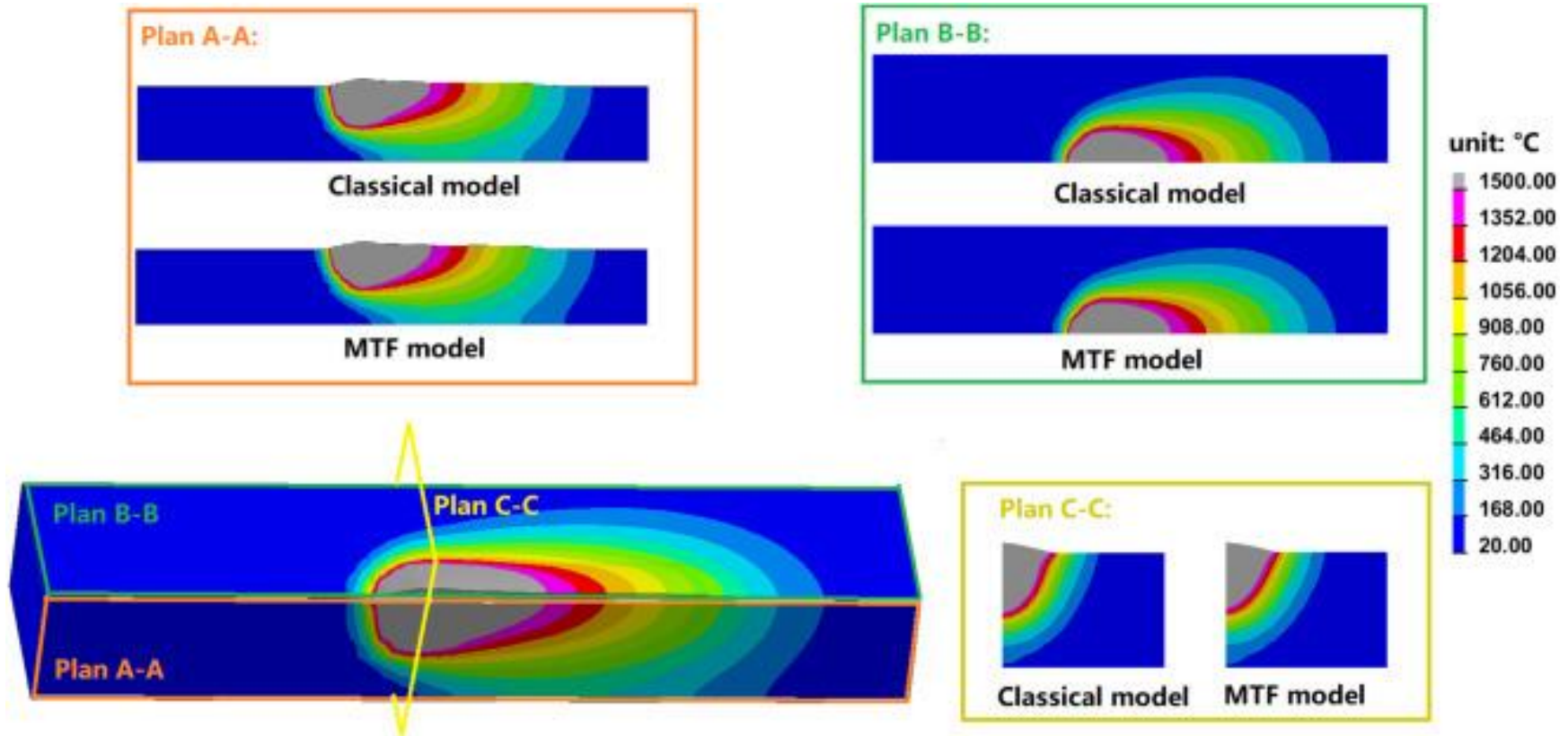
2500.0
2010.0
1520.0
1030.0
540.0
50.0



P2W1

Jia, Y., Saadlaoui, Y., Feulvarch, E., Bergheau, J.-M. (2024). An efficient local moving thermal-fluid framework for accelerating heat and mass transfer simulation during welding and additive manufacturing processes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 419, 116673.

Modèle thermo-fluide avec suivi de la source de chaleur



Jia, Y., Saadlaoui, Y., Feulvarch, E., Bergheau, J.-M. (2024). An efficient local moving thermal-fluid framework for accelerating heat and mass transfer simulation during welding and additive manufacturing processes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 419, 116673.

- **Comment faciliter l'utilisation de la simulation numérique des procédés dans un contexte industriel**
 - Utiliser des modèles ne comportant que les phénomènes essentiels et maîtrisés (sur lesquels on possède des données fiables et dont on connaît la marge d'erreur) ?

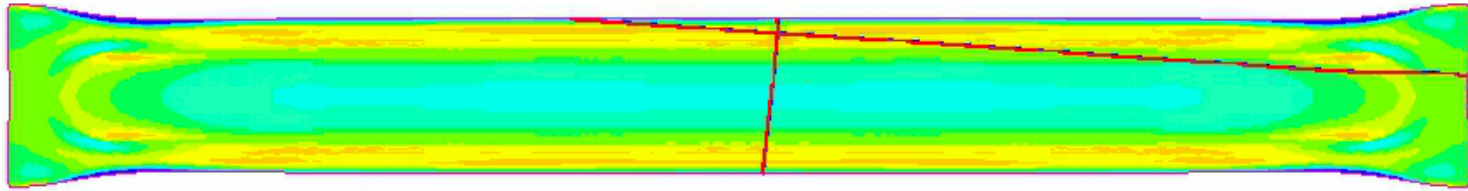
Un bon modèle est un modèle maîtrisé par son utilisateur dont il sait ce qu'il peut en attendre et ce qu'il ne lui donnera pas

- La place de l'IA?

La réalité = Ce qu'on sait + ce qu'on ne sait pas (F. Chinesta)

- En mécanique des matériaux (modèles de comportement reposant sur des données) ?
- En simulation des procédés ?
 - Développer des approches hybrides (jumeaux numériques) associant :
 - des modèles physiques contenant les phénomènes physiques essentiels et qu'on maîtrise (modélisation, caractérisation expérimentale...)
 - des « modèles » reposant sur des données pour ce qu'on ne maîtrise pas

- **Comment intégrer les conséquences induites par un procédé sur un nouveau procédé ou dans les études de durée de vie et de risque de rupture**
 - Exemples :
 - Usinage d'une pièce forgée
 - Découpe d'une pièce trempée
 - Analyse de fatigue après fabrication...
 - Propriétés mécaniques
 - Etat mécanique résiduel (contraintes résiduelles, écrouissage...)
 - Des modèles de comportement mécanique différents
 - Pour la simulation des procédés
 - Pour les études de durée de vie
 - Un même modèle pour toutes les analyses ? ou des modèles différents → comment passer de l'un à l'autre?



XFEM investigation of a crack path in residual stresses resulting from quenching », *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 75, 2013, pp. 62-70.

- **Voies d'amélioration**

- Améliorer encore la compréhension des phénomènes physiques impliqués
 - Intégrer plus de physique dans les simulations numériques (prise en compte de la microstructure, de la plasticité cristalline, modélisation des contacts...)
 - Poursuivre le développement des techniques de caractérisation notamment in-situ (vers le 3D)
- Rendre les simulations plus rapides notamment en développant des méthodes numériques spécifiques adaptées à certains procédés
- Continuer à développer les procédés de fabrication additive
- Développer le chainage de procédé et le passage à la durée de vie
- Faciliter la diffusion des méthodes de simulation numérique des procédés auprès des entreprises industrielles (notamment les PME et ETI)
 - En développant des modélisations physiques plus simples dont on maîtrise la précision
 - En développant des bases de données
 - En développant des modèles de données (IA)

Merci pour votre participation