

Optimisation des contraintes résiduelles en fabrication additive pour Inconel 738 et René 77

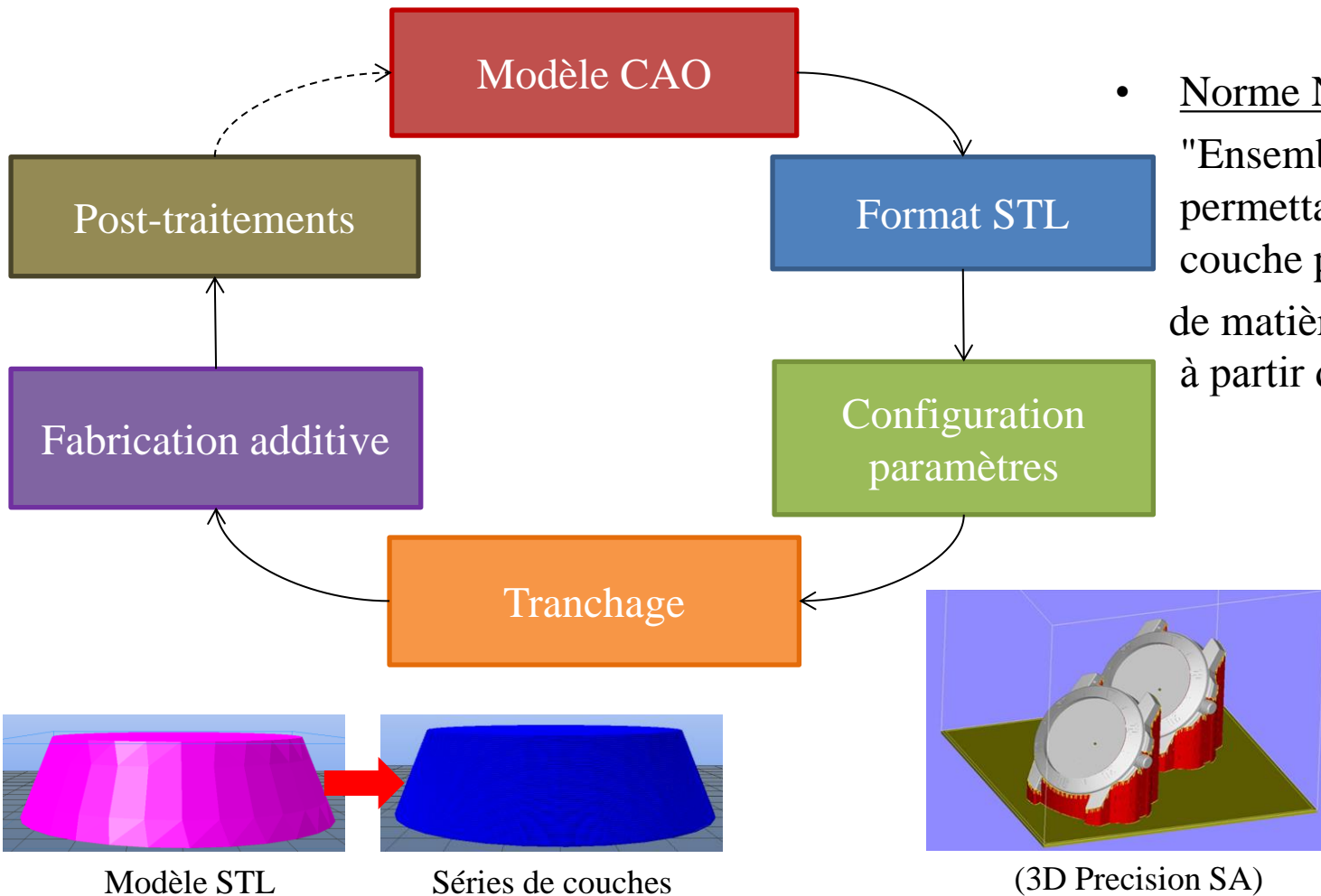
Soutenance bibliographique

Charlotte METTON
Mastère DMS Promotion 2015

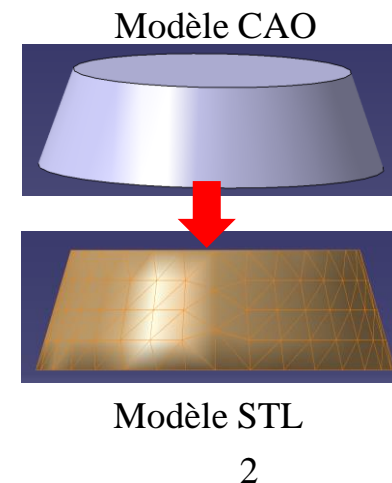
Encadrants professionnels : B. MACQUAIRE, G. MARION

Encadrants pédagogiques : M. MAZIERE, D. MISSOUM-BENZIANE

Principe de fonctionnement

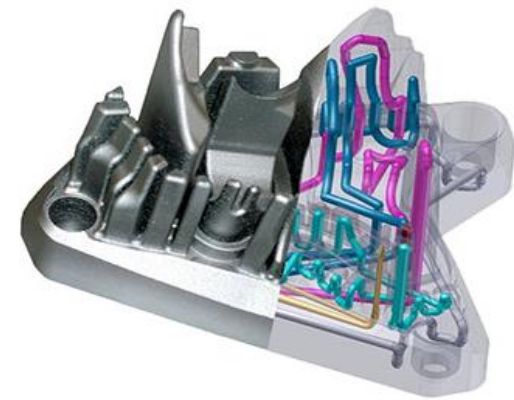


- Norme NF E 67-001 :
"Ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique."



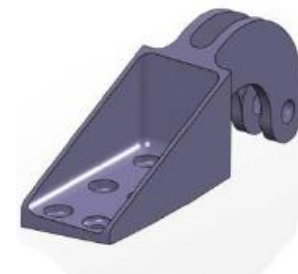
Intérêts FA

- Géométries complexes
- Optimisation topologique
- Réduction des assemblages
- Réduction des cycles de développement



Conduits de refroidissement (KONCEPT)

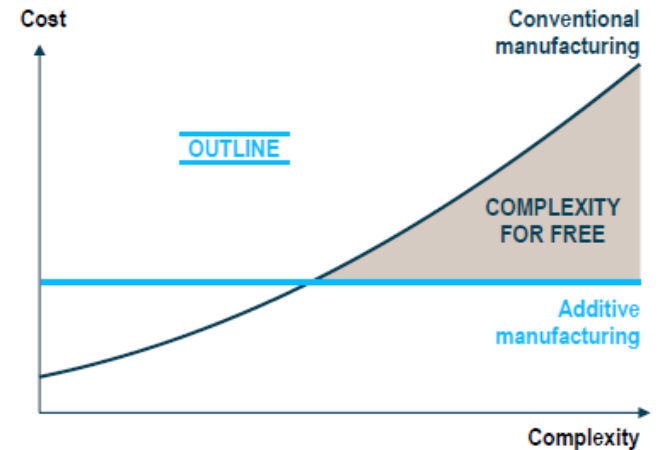
Meilleures fonctions
1 pièce = 12 sous-ensembles
Gain de masse



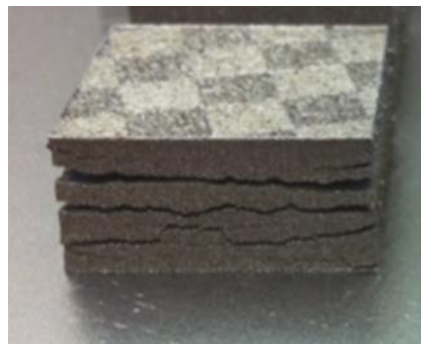
Charnière Airbus (EOS)

Challenges FA

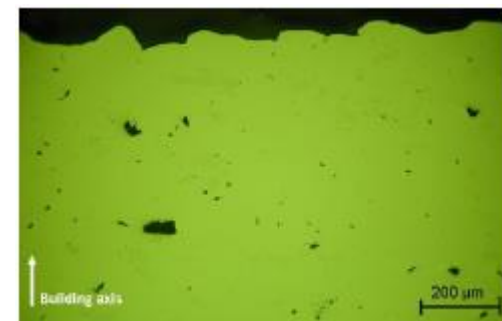
- Nouvelle démarche de conception
- Coûts/productivité
- Standardisation
- Imperfections
- Matériaux



(BERGER, 2013)



(KEMPEN et al., 2014)



(KRUTH et al., 2010)

FRANCE

- Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures, INSA Lyon
- Institut de mécanique et d'ingénierie, Bordeaux
- Institut Carnot M.I.N.E.S
- Pôle Européen de Plasturgie
- PIMM

SUISSE

- Laboratoire de Gestion et Procédés de Production, Institut de Production et Robotique
- Traitement des Matériaux Laser, Institut de physique appliquée, Université de Berne

USA

- Département de génie mécanique, Université Southern Methodist
- Dép. génie mécanique, Université du Texas
- Dép. génie industriel, Université de Louisville
- Dép. de génie mécanique, Université d'Alabama

Recherche

ROYAUME UNI

- CALM, Université d'Exeter
- Groupe de recherche sur la fabrication additive et l'impression 3D, Université de Nottingham
- Centre de recherche, Université de Loughborough
- AdAM, Université de Sheffield

ALLEMAGNE

- Institut des machines outils et gestion industrielle
- Institut Fraunhofer pour la technologie laser
- Dép. sciences des matériaux et génie mécanique, Université de Leuven
- DMRC

JAPON

- Université de Kanazawa
- Division des sciences mécaniques, Université d'Osaka
- Institut des matériaux d'ingénierie et de structures, Nagoya

CHINE

- Institut de recherche en métal, académie chinoise des sciences
- Institut de recherche sur la structure de la matière, académie chinoise des sciences

IRAN

- Département de génie mécanique, Université Kashan
- Département de génie mécanique, Université de technologie d'Ispahan



AFRIQUE DU SUD

- Dep. de génie mécanique Université de Cape Town
- Dép. de génie mécanique, Université de Technologie de péninsule du Cap

AUSTRALIE

- Centre de fabrication additive, Université de Monash
- Centre de fabrication additive, Université RMIT

Contexte

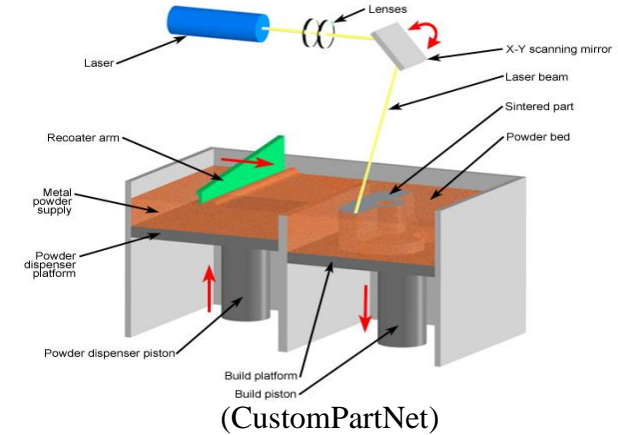
- Problématique multi-physique et multi-échelles
 - Contraintes résiduelles → problème en FA
 - Nécessité de définir un moyen de les caractériser pour garantir qualité des pièces finies
- Simulation numérique pour estimer de manière rapide ces contraintes résiduelles en fin de fabrication

Sommaire

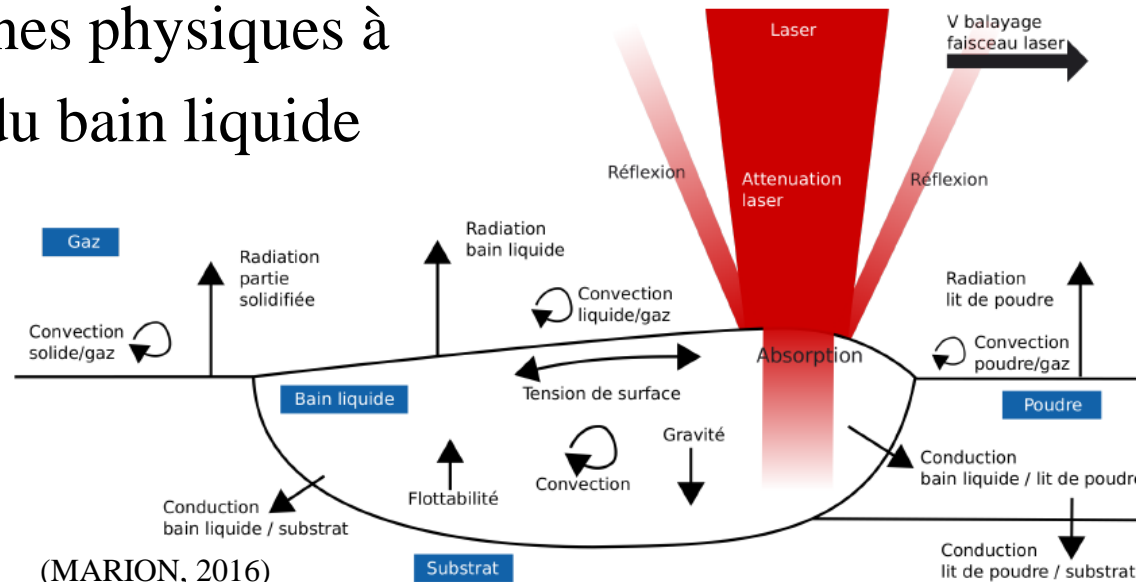
- I. Le procédé de fusion sélective laser
- II. Modèle numérique
- III. Matériaux de l'étude
- IV. Plan de travail

Présentation du procédé

- Technologie : Fusion Sélective Laser

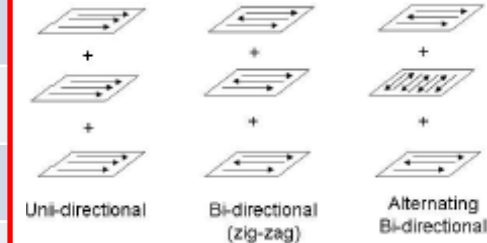


- Phénomènes physiques à l'échelle du bain liquide

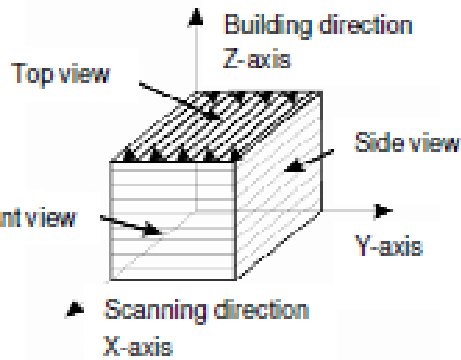


Paramètres opératoires

Paramètres de 1 ^{er} ordre	Paramètres de 2 nd ordre
Puissance laser	Température de préchauffage
Vitesse de balayage laser	Stratégie laser
Epaisseur de couche	Paramètres poudre
Diamètre du faisceau	Supports additionnels
Ecart vecteur	

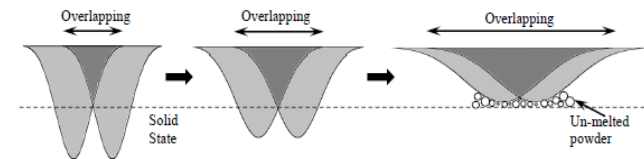


(KRUTH, 2010)

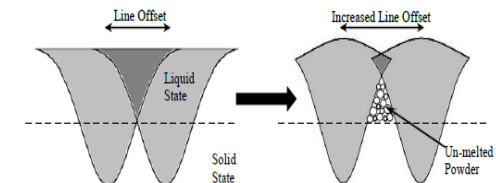


(KRUTH, 2010)

Critères
Géométriques et morphologiques
Mécaniques
Métallurgiques
Economiques



(GONG, 2013)



Contraintes résiduelles

- Définition : contraintes sans application d'effort extérieur

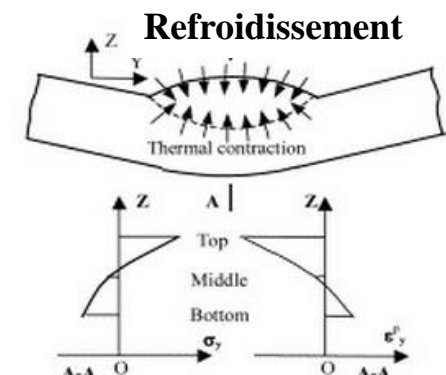
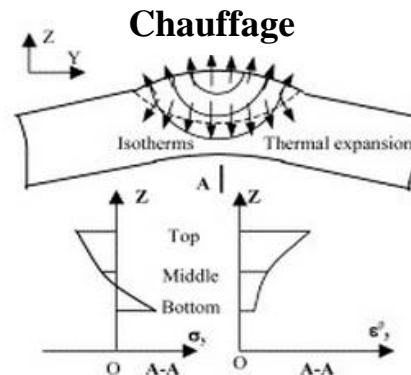
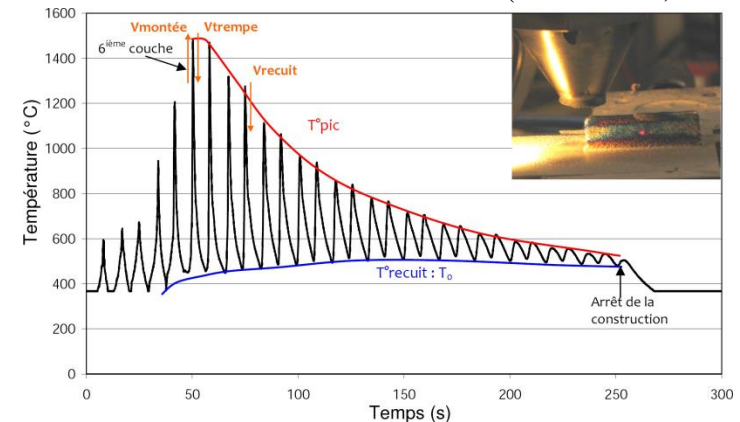
(LONGUET, 2010)

- 2 Types :

- De compression
- De traction → déformation - fissuration

- Origines :

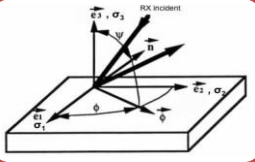
- Gradients thermiques
- Cycles d'expansion/contraction des couches solidifiées
- Métallurgique



(HU et al., 2002)

Techniques de mesures

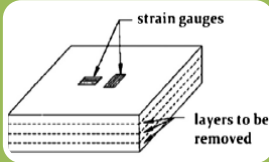
Méthode
non destructive



Méthode de diffraction par rayons X

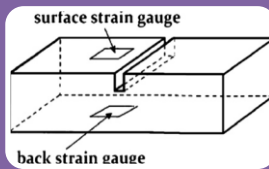
- Versatile, macro et micro contraintes
- Petites pièces, système principalement en laboratoire

Méthodes
destructives



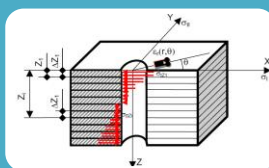
Méthode de retirement de couches successives

- Mesure déformations pendant découpage d'une pièce
- Formes simples



Méthode de la compliance

- Mesure déformée d'une rainure dans structure pendant usinage
- Ne mesure pas toutes les contraintes dans le plan

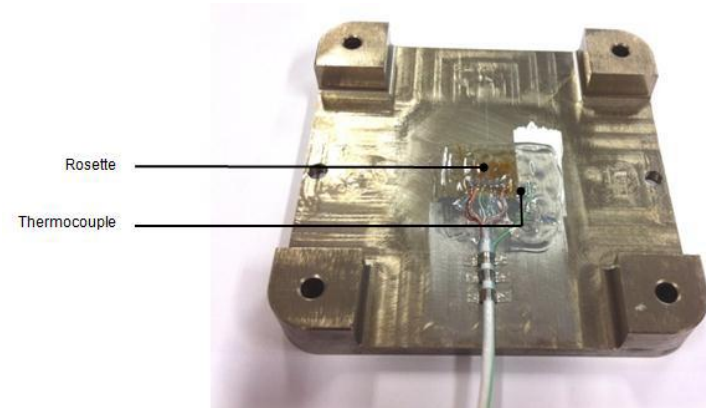
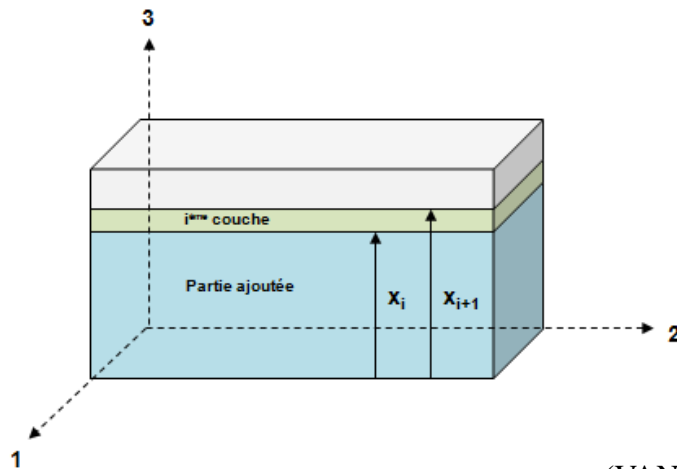


Méthode du perçage incrémental

- Mesure déformations autour d'un trou pendant perçage pas à pas
- Sensibilité + résolution limitées

Techniques de mesures

- Méthode de VAN BELLE → Pour validation modèle numérique
 - Mesure des déformations au cours du procédé
 - Obtention gradient de contraintes
 - Parallélépipède carré $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3 \rightarrow 250$ couches de $40 \mu\text{m}$

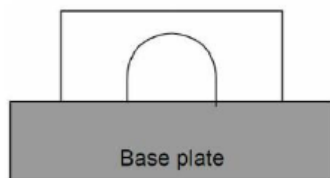


(VAN BELLE, 2012)

Techniques de mesures

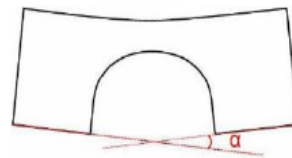
- Méthodes géométriques → Pour validation analyses de sensibilité
 - Mesure lors de la séparation pièce/plateau
 - Géométries éprouvettes spécifiques

<u>Méthode « bridge curvature »</u>	<u>Méthode « twin cantilever curvature »</u>
Mesure angle de distorsion	Mesure déformations à plusieurs endroits

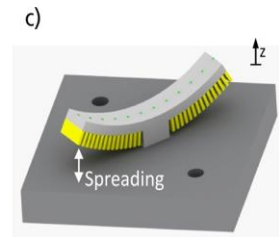
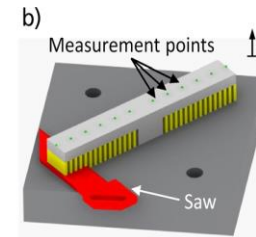
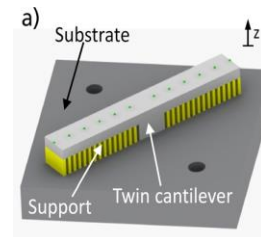


(a)

(BUCHBINDER et al., 2014)

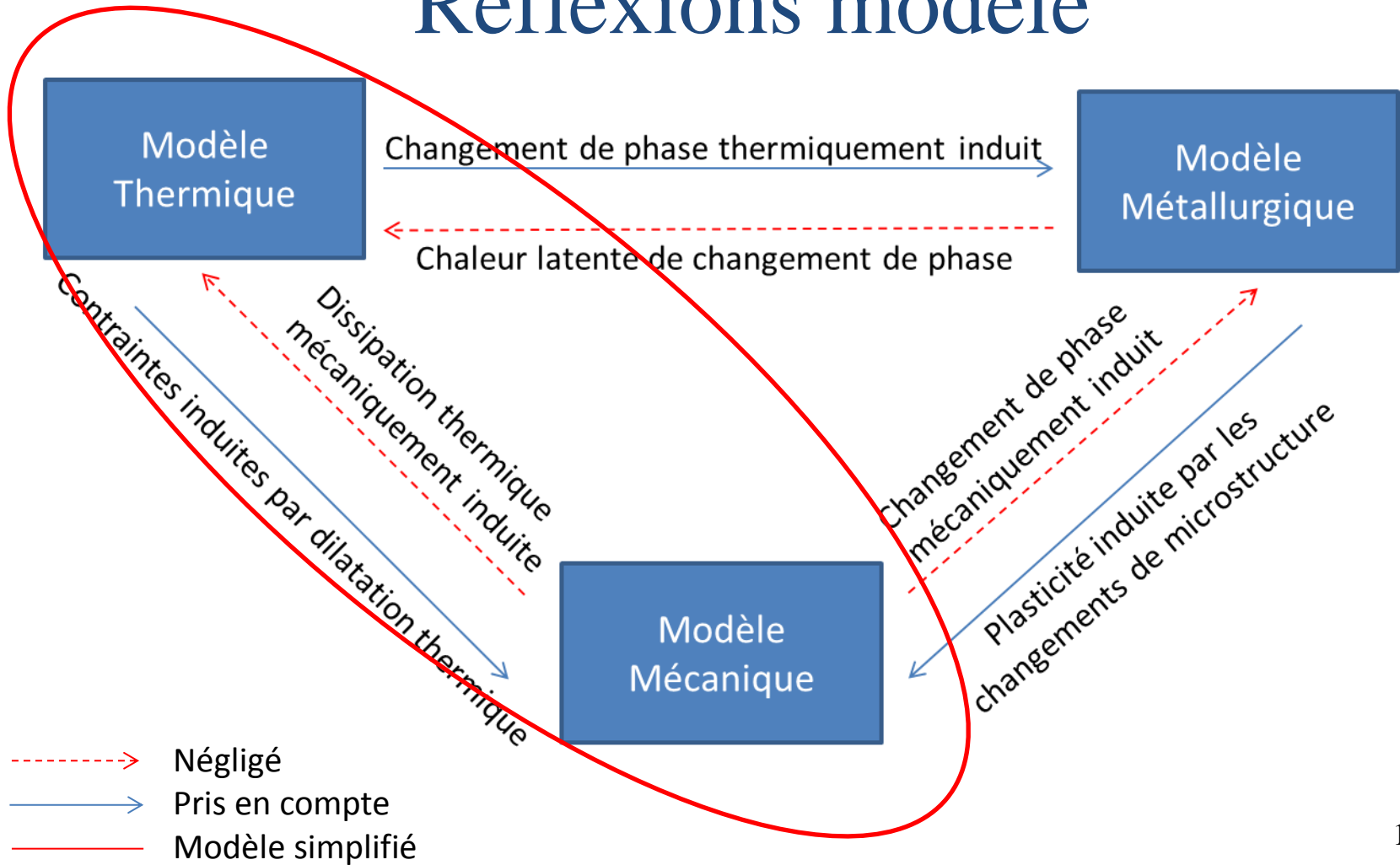


(b)



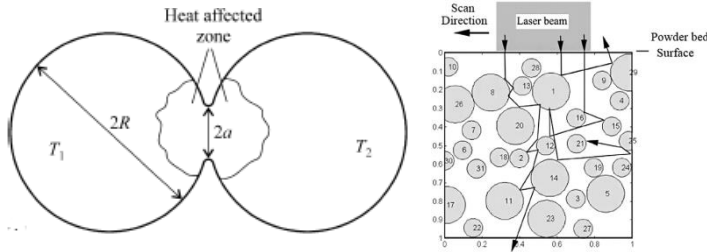
(KRUTH et al., 2010)

Réflexions modèle

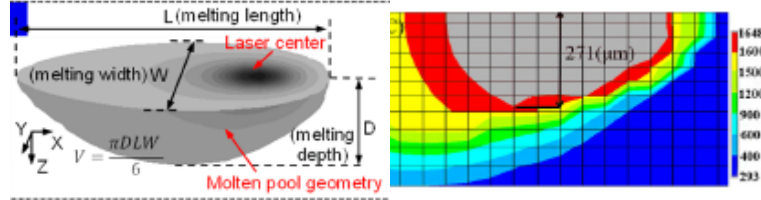


Réflexion échelles

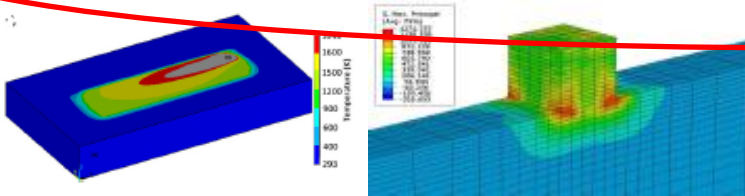
Lit de poudre



Bain liquide



Cordons



Couche par couche

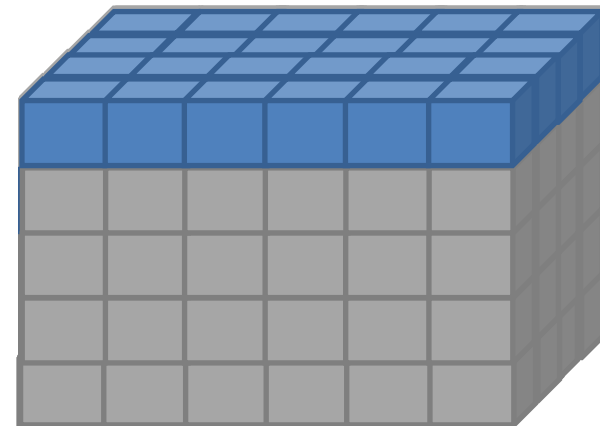
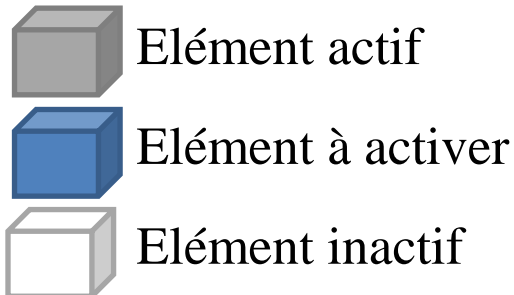
+ : Temps de calcul
 - : Précision ?

(GUSAROV et al., 2003) (FOROOZMEHR et al., 2015) (FU & GUO, 2014) (VAN BELLE, 2013)

Stratégie de modélisation

- Types d'éléments
 - Air
 - ~~Poudre~~ → conductivité/absorptivité lit de poudre, retrait, CL
 - Solide

- Simulation ajout de matière

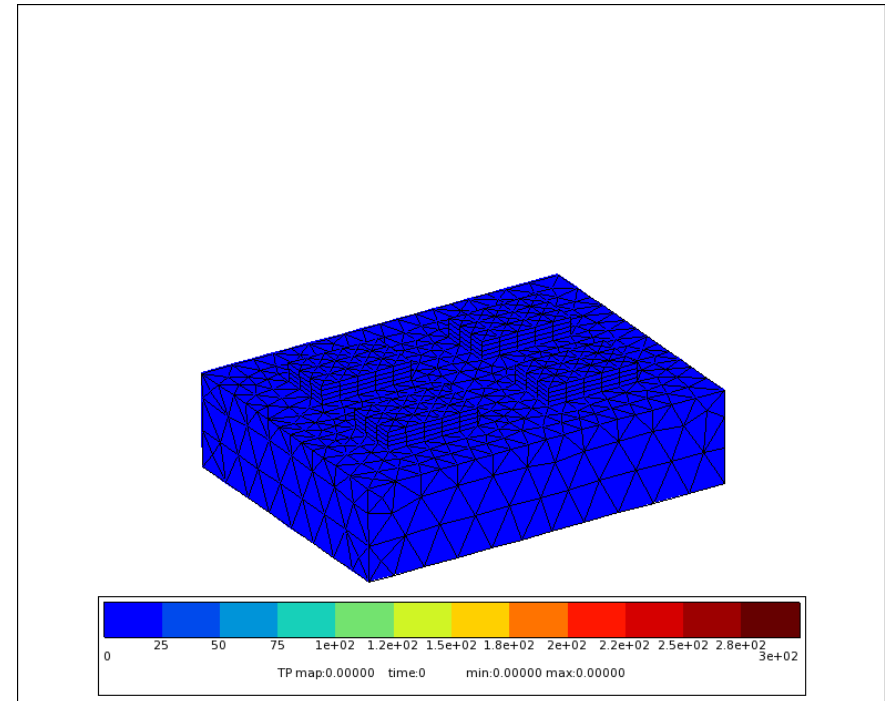
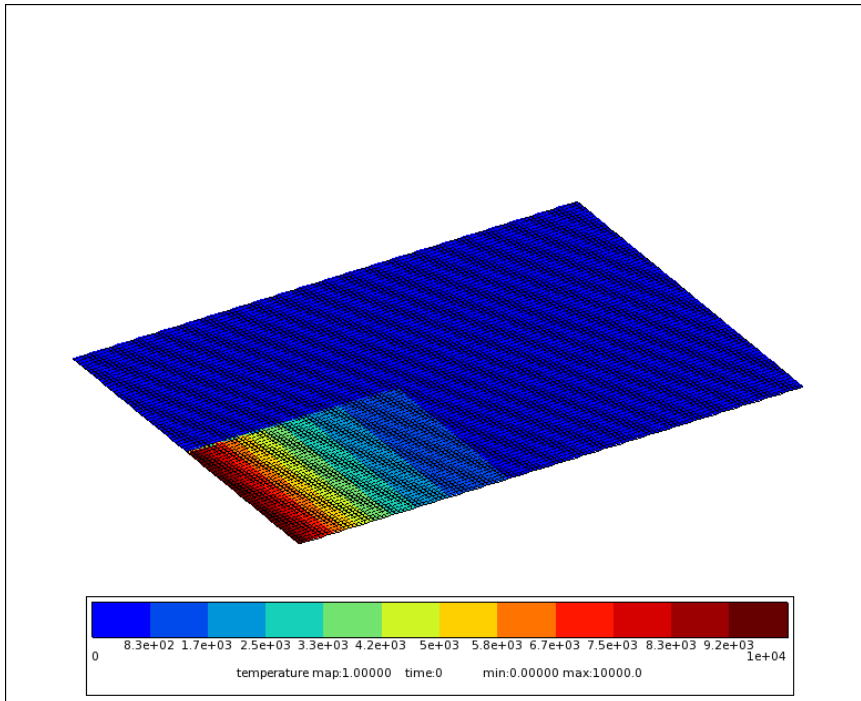


Modèle thermique

- Résolution équation de la chaleur sur Zebulon/Zset
- Conditions aux limites :
 - **Apports thermiques** :
 - Champ de température $\underline{T}(x, y, t)$
 - Flux thermique surfacique $\underline{q}(x, y, t)$
 - **Pertes** :
 - Conduction
 - Convection
 - Radiation

Modèle thermique

- Résultats :



Modèle mécanique

- $\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^{vp} + \underline{\underline{\varepsilon}}^{th}$
 - $\underline{\underline{\varepsilon}}^e$: Déformation élastique
 - $\underline{\underline{\varepsilon}}^{vp}$: Déformation visco-plastique
 - $\underline{\underline{\varepsilon}}^{th}$: Dilatation thermique
- Stratégie :
 - 1^{er} temps : thermo-élasticité
 - 2^{ème} temps : identification loi de comportement avec données bibliographiques

Intérêts

- Simuler les contraintes/déformations lors de la fabrication d'une pièce
 - Modèle simplifié pour analyse rapide
 - Vérification nécessaire : modèle par cordons + essai VAN BELLE sur cube
- Etude paramétrique
 - Design d'une éprouvette technologique
 - Analyse de sensibilité sur thermique et épaisseur plateau de fabrication
 - Validation par essais expérimentaux

Caractéristiques

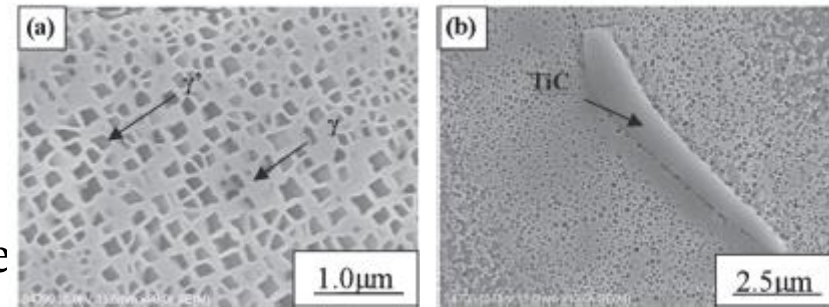
- Matériaux : Inconel 738 et René 77
- Superalliages base nickel

%Masse	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	C	B	Zr
IN 738 LC	61	16	8.5	1.7	2.6	1.7	0.9	3.4	3.4	0.11	0.01	0.05
René77	58	14.6	15	4.20	-	-	-	4.3	3.3	0.07	0.016	0.04

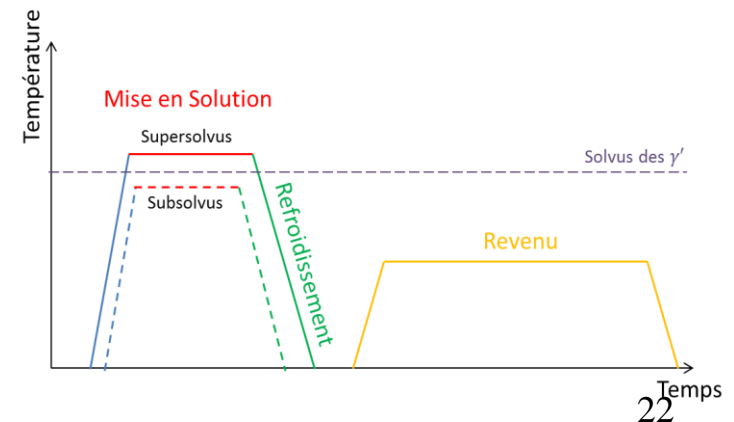
- Catégorie difficilement soudables

Propriétés

- Microstructure :
 - Matrice γ : solution solide
 - Phase γ' : composé intermétallique
 - Carbures + borures
- Durcissement par :
 - Précipitation phase γ'
 - Précipitation carbures + borures
 - Durcissement de solution solide



Microstructure du René 77 brut de fonderie
(WANG et al., 2011)



Propriétés

Propriétés		IN 738	René 77
Thermique	Conductivité thermique	✓ f(T)	~ f(T)
	Capacité calorifique massique	✓ f(T)	~ f(T)
	Masse volumique	✓ f(T)	~ f(T)
	Coefficients d'échange par convection, émissivité, absorptivité	✓	✗
Mécanique	Coefficient de dilatation thermique	✓ f(T)	~ f(T)
	Modèle élasto-plastique essais de traction	✓ f(T)	✓ f(T)
	Modèle élasto-visco-plastique fluage, relaxation	✓ f(σ , T) f(ϵ , T)	✗

Tâches	Semestre 1	Semestre 2						
		Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Mi Septembre
Recherche propriétés matériaux	←→							
Commande poudres		◆						
Développement modèle avec équipe VAL	←→							
1 ^{er} calculs		←→						
Design éprouvette		←→						
Expérimentation				←→				
Comparaison modèle-essai					←→			
Etude paramétrique à l'aide du modèle		←→						

Merci pour votre attention
Avez-vous des questions ?

Bibliographie

- AUGER, S. et al. (2010). *Détermination des contraintes résiduelles par les méthodes de relaxation*. Astelab
- BERGER, R. (2013). *Additive manufacturing : A game changer for the manufacturing industry?* Munich
- DELEUZE, C. (2010). *Méthodologie d'analyse des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X sur des pièces d'alliage de titane de nuance Ti-10V-2Fe-3Al*. Thèse – Mines ParisTech
- DEMBINSKI, L. et al. (2012). La micro-fusion laser sur lit de poudre, influence du sens de construction : application a la l'alliage inconel 718. Proceedings of AEPR'12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing
- FOROOZMEHR, A. et al. (2015). *Finite Element Simulation of Selective Laser Melting process considering Optical Penetration Depth of laser in powder bed*. Materials and Design 89, 255–263
- FU, C., & GUO, Y. (2014). *Three-Dimensional Temperature Gradient Mechanism in Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 136.
- GONG, H et al. (2013), The Effects of Processing Parameters on Defect Regularity in Ti-6Al-4V - Parts Fabricated By Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. 26

Bibliographie

- GUSAROV, A., LAOUI, T., FROYEN, L., & TITOV, V.-I. (2003). *Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering*. International Journal of Heat and Mass Transfer 46, 1103–1109
- HU, Z. et al. (2002). *Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, p1427–1439
- KEMPEN, K. et al. (2014). *Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Volume 136, Issue 6
- KRUTH, J.-P. et al. (2010). *Part and material properties in selective laser melting of metals*. 16th International Symposium on Electromachining
- LONGUET, A. (2010). *Modélisation du procédé de projection laser - Application au Ti-6Al-4V*. Thèse - Mines ParisTech
- MARION, G. (2016). *Modélisation de procédés de fabrication directe de pièces aéronautiques et spatiales en Ti-6Al-4V par projection et fusion sélective d'un lit de poudre par laser : Approche thermique, métallurgique et mécanique*. Thèse - Mines ParisTech
- WANG, H.-S. et al. (2011). *Microstructure Evolution of Laser Repair Welded Rene 77₂₇ Nickel-Based Superalloy Cast*. Materials Transactions, Vol. 52, No. 12, pp. 2197 to 2204