

Programme doctoral transverse « fabrication additive métallique »

UE1 : Procédés et poudres (2 jours ; 12h)	2
UE1.1 Introduction générale	2
UE1.2 Production et caractérisation des poudres	3
UE2 : Modélisation du procédé (2 jours ; 16h)	4
UE2.1 Interaction électrons-matière	4
UE2.2 Modélisation du bain de fusion.....	4
UE2.3 Microstructure : solidification et transformation de phase	4
UE2.4 Modélisation Macroscopique : cinétique de refroidissement, contraintes résiduelles, déformations.	5
UE3 : Chaîne numérique (2 jours ; 16h)	6
UE3.1 Introduction pratique aux méthodes d'optimisation topologique de structures	6
UE3.2 Trajectoires et pilotage des machines SLM.....	6
UE3.3 Contrôle et recalage des modèles utilisés pour la simulation des procédés en FA	7
UE3.4 Cadre multi-échelle Arlequin pour la modélisation et simulation de la Fabrication Additive	7
UE4 : Caractérisations des pièces produites (2 jours ; 12h)	9
UE4.1 Caractérisations géométriques externes et internes des pièces fabriquées en FA	9
UE4.2 Caractérisations métallurgiques	9
UE4.3 Caractérisations mécaniques	10

UE1 : Procédés et poudres (2 jours ; 12h)

UE1.1 Introduction générale

Responsable : Pascal Aubry / CEA SEARS

Durée : 3h.

1. Introduction générale de la fabrication additive

Bref historique des procédés à l'origine de la fabrication additive (prototypage rapide, rechargement, soudage, ...) pour arriver jusqu'aux procédés de fabrication additive bonne matière (surtout métallique). L'intérêt de la chaîne numérique sera également considéré.

2. Intérêts de la fabrication additive

Présentation d'exemples de composants réalisés par fabrication additive qui illustrent bien l'intérêt de ce type de procédé : allègement de structures, intégration de fonctions, ...

3. Les principaux procédés de fabrication additive

On présentera les principaux procédés de fabrication additive existant en portant l'attention plus particulièrement sur les matériaux métalliques : fusion de fil arc, poudre, projection laser et faisceau d'électrons, dépôt de pâte, fusion sur lit de poudre laser et faisceau d'électron, ...

On présentera plus particulièrement les sources d'apport énergétique et les procédés de fusion sur lit de poudre

4. De la conception à la pièce. Présent et futur

- a. Etat de la CAO : Spécificité de la fabrication additive (analyse topologique, matériaux architecturés,...). L'état actuel et les potentialités d'innovation
- b. La préparation de la fabrication/CFAO : Les outils actuels de CFAO.
 - i. Géométrie. L'état actuel. Ses limites et les potentialités d'innovation.
 - ii. Les potentialités de la simulation.
- c. Un point sur les matériaux (on détaillera plus particulièrement les problématiques liées aux poudres métalliques). Point HSE.
- d. La fabrication.
 - i. Les systèmes existants (on détaillera surtout le procédé de fusion sur lit de poudre). Les besoins et les potentialités d'innovation
 - ii. Contrôle de procédé en ligne, hors ligne.
- e. Les post-traitements : Géométrie, Matériaux (traitements thermiques), Finitions de surface

5. Aspects technico-économiques

On donnera quelques éléments relatifs à la pénétration de la fabrication additive dans le marché de la fabrication au niveau mondial et européen et les perspectives.

UE1.1 Démonstration sur machine SLM

Responsable : Nicolas Muller / LURPA

Durée : 3h.

UE1.2 Production et caractérisation des poudres

Responsable : Stefan Drawin / ONERA

Durée : 6h

1 - Production des poudres métalliques *Participation de Laurent Chaffron (CEA)*

A partir d'une rapide présentation de l'historique de l'emploi des poudres, des quantités produites et des applications industrielles, ainsi que des propriétés recherchées, les principales techniques d'élaboration des poudres métalliques pour la métallurgie* seront passées en revue et comparées : atomisation de métaux liquides (avec autre fluide, centrifugation, plasma...), voies chimiques (réduction, précipitation...), dépôt électrolytique, procédés mécaniques (broyage, mécanosynthèse...). Les procédés de sphéroïdisation des particules seront aussi évoqués.

* On ne s'intéressera pas aux applications alimentaires, décoratives (peintures...), pyrotechniques...

2 - Caractérisation des poudres métalliques ; séparation

Les techniques de caractérisation des particules seront décrites pour ce qui est de la taille, forme, microstructure, composition chimique, porosité, etc. Les caractéristiques des particules seront reliées aux procédés de fabrication.

Les méthodes permettant de quantifier les propriétés des poudres seront présentées : échantillonnage, distribution granulométrique, densités (apparente, tapée), surface spécifique, coulabilité, etc. Ces propriétés seront mises en relation avec les caractéristiques des particules. Finalement, les techniques de classification des poudres (selon la taille des particules) seront présentées.

3 - Cahier des Charges pour les poudres en Fabrication Additive

On passera en revue toutes les propriétés des poudres pour préciser les spécifications nécessaires pour la fabrication additive. Cela comprend pour les différentes techniques : la taille des poudres et le spectre granulométrique recommandés, les défauts à éviter, etc. On abordera également le cas des éléments chimiques volatils qui peuvent nécessiter une compensation des pertes qui se produisent lorsque l'alliage est porté à très haute température. Ces informations seront données en lien avec les différentes normes actuelles sur les poudres.

4 - Visite de laboratoire

Si la formation peut avoir lieu à l'ONERA, un temps sera consacré à la visite de la tour d'atomisation et des laboratoires disposant de diverses techniques de caractérisation et de séparation.

UE2 : Modélisation du procédé (2 jours ; 16h)

UE2.1 Interaction électrons-matière

Responsable : Tiberiu Minea / LPGP

Durée : 4h.

Dans ce module on s'intéresse au procédé de fusion sur lit de poudre sous faisceau d'électrons. Dans un premier temps, les spécificités des faisceaux d'électrons par rapport aux faisceaux laser. Par la suite seront présentés les différentes méthodes de production d'électrons qui sont couramment utilisés pour réaliser un canon à électrons et les processus physiques adjacents permettant la mise en forme de tels faisceaux. Cette partie comporte des notions de vide (basse pression) et éventuellement du plasma. Les principales caractéristiques des canons à électrons seront données en explicitant leur fonctionnement, le mode de déviation du faisceau et les éventuelles aberrations. Enfin, une fois définies les gammes d'énergie et les intensités typiques du faisceau d'électrons, sont présentés les phénomènes induits lors de l'interaction des électrons énergétiques avec la matière granulaire, à l'état de poudre. Le cas des métaux sera traité en particulier, mais des extensions vers d'autres matériaux sont possible. Issue des phénomènes d'interaction, une série de normes d'hygiène et de sécurité s'impose lors du travail en EBM (Electron Beam Melting) et des consignes pour une manipulation en sécurité seront données.

UE2.2 Modélisation du bain de fusion

Stéphane Gounand (CEA SEMT)

Durée : 4h.

Cette présentation sera consacrée à la description et à la modélisation des principaux phénomènes physiques se produisant dans un bain de métal liquide. Ce bain ne reste en général pas statique car il peut être soumis à des forces motrices d'origines diverses (capillaires, électromagnétiques, etc.). Les écoulements ainsi engendrés peuvent alors avoir une influence importante sur la fabricabilité et la fiabilité de pièces métalliques obtenues par des procédés mettant en œuvre un chauffage tels que la fabrication additive et le soudage.

UE2.3 Microstructure : solidification et transformation de phase

Responsable : Denis Solas / ICMMO

Durée 4h

- Introduction
 - Relations microstructures / propriétés
 - Présentation des grandes familles d'alliage en métallurgie additive

- Transformations de phases
 - Diagrammes de phases.
 - Solidification : relation vitesse/gradient thermique

- Transformation de phases à l'état solide
- Traitements thermiques et CIC
- Les outils de caractérisation des microstructures
 - DRX, identification des phases, texture macroscopique
 - Microscopie optique
 - MEB : microstructure, composition chimique...
 - MEB-EBSD : orientation des grains
 - Analyse quantitative des microstructures
- Conclusion
- Démonstration sur microscope à l'ICMMO

UE2.4 Modélisation Macroscopique : cinétique de refroidissement, contraintes résiduelles, déformations.

Responsable : Daniel Weisz-Patrault / LMS

Durée 4h

- Plasticité, viscoplasticité à haute température et température variable : caractérisation, modélisation, identification
- Calculs de structure sous chargements thermomécaniques : couplages forts, couplages faibles, trajets de chargements à température variable
- Contraintes résiduelles : lien avec incompatibilités de déformation, comment les estimer ?

UE3 : Chaîne numérique (2 jours ; 16h)

UE3.1 Introduction pratique aux méthodes d'optimisation topologique de structures

Responsable : Grégoire Allaire / CMAP

Durée : 4h

Ce cours d'école doctorale d'une durée de 3 heures est une introduction aux concepts de base des méthodes d'optimisation topologique de structures qui se fera principalement sous la forme d'une mise en œuvre sur ordinateur à l'aide du logiciel d'éléments finis FreeFem++ et d'une bibliothèque de scripts d'optimisation de forme développée au CMAP.

Les notions d'optimisation géométrique et topologique de formes seront introduites. Les algorithmes de type « variation de frontière », SIMP et lignes de niveaux seront présentés et testés par les étudiants. On se limitera à des modèles simples comme l'élasticité linéarisée ou la conduction thermique et à la dimension deux d'espace.

Les étudiants devront avoir préalablement installé le logiciel FreeFem++ sur leur ordinateur portable.

UE3.2 Trajectoires et pilotage des machines SLM

Responsable : Didier Dumur / L2S

Durée 4h

Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO)

Dans le cadre des procédés SLM et EBM, l'étape de FAO doit permettre de définir le découpage en tranches de la pièce et de calculer les trajectoires 2D en fonction de la stratégie de lasage. On montre comment les paramètres intrinsèques associés à cette méthodologie ont une influence majeure sur la distribution de l'énergie thermique dans la pièce.

Modélisation de la chaîne opto-mécanique

Il s'agit de modéliser le chemin optique du laser depuis la source jusqu'au lit de poudre en passant par les miroirs de la tête de scanning 3 axes dans le but d'établir les équations des transformations géométriques directe et inverse, nécessaires au pilotage du système et à sa calibration.

Pilotage de la machine

Dans cette partie on modélise le comportement de la tête de scanning et en particulier les galvanomètres qui pilotent les miroirs ainsi que les capteurs associés. Mise en œuvre d'une démarche expérimentale d'identification des paramètres de la machine.

Etude de la structure d'implantation des lois de commande et des stratégies de commande classiques (feedback et feedforward) : structure, méthode de réglage et implantation.

UE3.3 Contrôle et recalage des modèles utilisés pour la simulation des procédés en FA

Responsable : Ludovic Chamoin / LMT

Durée 4h

Contrôle des modèles

Dans le cadre de la fabrication additive, les divers modèles mathématiques et numériques employés doivent être contrôlés afin de certifier la qualité des résultats de simulation numérique. De plus, un compromis entre précision et coût de calcul doit être trouvé. Dans cette partie, on revisite donc les outils classiques permettant d'estimer les différentes sources d'erreur et d'adapter de façon optimale les modèles afin d'atteindre ce compromis. En partant du contrôle classique des maillages dans le cadre de la méthode des éléments finis, on aborde le contrôle des modèles multi-échelles, des couplages entre modèle fin et modèle grossier « homogénéisé », ainsi que des modèles réduits par PGD ou bases réduites.

Identification et recalage des modèles

On s'intéresse ici à la validation des modèles par rapport à des données expérimentales, c'est-à-dire à la confrontation (avec minimisation de l'écart) entre les résultats de simulation numérique et les informations recueillies sur le système réel. On aborde les diverses techniques permettant, dans un cadre déterministe ou stochastique, d'identifier ou recalibrer les paramètres du modèle à partir de mesures sur le système réel. L'accent est mis sur la pertinence des stratégies employées pour résoudre les problèmes inverses associés, et diverses applications pratiques sont présentées.

Dialogue essais-calculs et asservissement numérique du procédé

Cette partie propose une ouverture vers un axe de recherche actuel qui vise à faire interagir, en temps réel, un processus physique réel avec le modèle de simulation numérique associé. Ce dialogue est aujourd'hui envisageable avec les puissances informatiques et les outils de mesure disponibles. Après avoir rapidement montré les concepts mis en jeu, on illustre la démarche sur des applications récentes et on étudie son potentiel pour le pilotage par asservissement numérique des procédés de fabrication additive.

UE3.4 Cadre multi-échelle Arlequin pour la modélisation et simulation de la Fabrication Additive

Responsable : Hachmi Ben Dhia MSSMAT

Durée 4h

La fabrication additive (FA) est une famille de procédés de fabrication de pièces par rajout par empilement de couches de matières et des transformations très localisées de cette matière, en utilisant différentes sources d'énergie. La FA a plusieurs intérêts. Un des principaux est qu'elle permet la fabrication continue de pièces de grande complexité géométrique ; ces dernières pouvant être le résultat d'une optimisation topologique, par simulations numériques. Les propriétés mécaniques et métallurgiques et les précisions géométriques, y compris sur l'état des surfaces des pièces fabriquées, sont des quantités d'intérêts majeures. L'accès à ces

propriétés exige (en plus de l'expérimentation) le passage par des modélisations mathématique et des simulations numériques multi-modèles et multi-échelles de ces procédés pour limiter les coûts des calculs.

Le cadre de modélisation Arlequin, initié dans [1] (cf. aussi [2], [3] et [4]) permet le couplage flexible de modèles et d'échelles grâce à un principe de superposition locale de patchs micro, pouvant être mouvants, à des modèles substrat macro. Paraissant fait pour la Fabrication Additive, ce cadre est exposé dans ce cours.

Dans une première partie de 1,5h, le cadre Arlequin est positionné rapidement dans le paysage de méthodes de simulation par raffinements/enrichissements différents. Les idées principales sur lesquelles repose Arlequin, ainsi que les ingrédients techniques, porteurs de ces idées, sont donnés. L'application à un problème modèle, montrant qu'Arlequin est une méthodologie de Partition de Modèles, en révèle le potentiel. La recherche de choix pertinents pour les ingrédients d'Arlequin est discutée sur la base de considérations théoriques et étayée par des exemples simples. Un exercice 1d, permettant aux élèves de toucher l'approche, termine cette première partie du cours.

Dans le temps restant (1,5h, après une pause), l'utilisation du Cadre Arlequin pour modéliser et traiter des applications multi-modèles ou multi-échelles avancées est étudiée et étayée numériquement. A travers ces applications, L'adéquation d'Arlequin avec la modélisation et simulation de la Fabrication Additive est alors abordée. Des résultats numériques (tirés de la thèse de R. Ruysen) seront montrés et discutés.

Quelques Références

- [1] H. Ben Dhia, Multiscale mechanical problems: the Arlequin method, C. R. Acad. Sci. 1998
- [2] H. Ben Dhia, G. Rateau, Mathematical Analysis of the mixed Arlequin method, C. R. Acad. Sci, 2001
- [3] H. Ben Dhia, G. Rateau, The Arlequin method as a flexible engineering design tool, Int. J. for Numerical Methods in Engineering., 2005
- [4] H. Ben Dhia, Further Insights by theoretical investigations of the multiscale Arlequin method, Int. J. for Multiscale Computational Engineering, 2008

UE4 : Caractérisations des pièces produites (2 jours ; 12h)

UE4.1 Caractérisations géométriques externes et internes des pièces fabriquées en FA

Responsable : Yann Quinsat / LURPA

Durée 4h

Principe de mesure par tomographie à rayon X

Dans le cadre de la fabrication additive, les divers procédés employés permettent la réalisation de pièces de géométries complexes comportant des structures internes non mesurable par des moyens usuels de mesure. L'objectif de cette partie est de décrire le principe de la mesure par tomographie à rayon X qui permet d'obtenir un ensemble de données volumétriques représentatif à la fois de la géométrie externe, mais aussi interne de la pièce.

Extraction de surface à partir de données volumétriques

Il s'agit d'analyser le processus d'extraction des données volumétriques permettant d'obtenir un maillage représentatif de la géométrie de la pièce. Les méthodes de seuillage et de reconstruction seront plus particulièrement développées.

Sources d'incertitude et limitation

Cette partie est plus particulièrement centrée sur la description et l'analyse des sources d'incertitude lors de la mesure en tomographie. Un autre aspect abordé concernera les limitations du procédé et la possibilité d'effectuer des mesures de topographie de surface.

UE4.2 Caractérisations métallurgiques

Responsable : Fanny Balbaud CEA SEARS

Durée 4h

De même que tout composant fabriqué par des procédés conventionnels, les composants fabriqués par fabrication additive doivent répondre à un cahier des charges en termes de sollicitations rencontrées. Ces sollicitations peuvent être environnementales (milieu corrosif, oxydant...), thermiques (haute ou basse température, cyclage...), elles peuvent également être liées à des phénomènes d'usure et à des frottements. Ces sollicitations sont de plus associées à une durée de vie demandée au composant, ce dernier pouvant être remplaçable ou non, auquel cas l'exigence sur l'intégrité du composant tout au long de sa durée de vie sera cruciale.

Ce cours présentera au travers d'exemples issus de cas industriels (nucléaire, aéronautique, spatial...) :

- les problématiques de résistance à la corrosion (ex : retraitement), à l'oxydation haute température (ex : aéronautique) incluant les exigences de tenue des matériaux, les

essais de qualification des matériaux/composants et de compréhension phénoménologique qui peuvent être mis en œuvre. On comparera des résultats obtenus sur des pièces fabriquées par des procédés conventionnels à des résultats obtenus sur des pièces fabriquées par fabrication additive. On montrera également les intérêts potentiels des procédés de fabrication additive vis-à-vis de ces problématiques (absence de soudures, pureté du matériau de base...).

- les problématiques de vieillissement thermique et de cyclage thermique.
- les problématiques de tribologie et de résistance au frottement. Dans ce cas, on pourra présenter l'utilisation de la projection laser pour la réalisation de revêtements permettant d'améliorer la tenue des matériaux au frottement. Des exemples pourront être donnés comme le cas du remplacement des stellites (matériau base cobalt) dans les réacteurs nucléaires.

UE4.3 Caractérisations mécaniques

Responsable : Eric Charkaluc / LMS

Durée 4h

Dans cette UE, on aborde la caractérisation des propriétés mécaniques des alliages obtenus par FA.

Comme pour tout procédé de fabrication, la caractérisation des propriétés mécaniques obtenues en fabrication additive requiert l'usage d'éprouvettes « représentatives » du procédé final utilisé pour la pièce cible, incluant les éventuels post-traitements. Les technologies les plus utilisées actuellement introduisant, parmi de nombreux autres paramètres, une direction de fabrication, les caractérisations sont alors faites en faisant varier l'orientation du chargement appliqué par rapport à cette direction particulière.

Ce cours va donc commencer par présenter les protocoles généralement mis en place dans la littérature afin de définir les lots d'éprouvettes à tester dans le cas des procédés PBF et LMD. Il se poursuivra par une synthèse des propriétés obtenues avant et après post-traitement dans le cas des alliages courants : titanes, aciers, base nickel, aluminium. On y abordera les propriétés statiques (traction, fluage) et en fatigue.

Dans une seconde partie, on tentera d'établir un lien entre d'éventuelles anisotropies observées et les microstructures en s'appuyant, entre autres, sur des mesures de champs de déformation.

Enfin, à partir de quelques articles issus de la littérature, les étudiants feront une présentation critique des résultats présentés dans ceux-ci (méthodologie, éprouvettes choisies, résultats comparés à ce qui aura été vu en cours, etc.).