

FABRICATION ADDITIVE MULTIMATÉRIAU

Pierre Muller

Encadrement : Pascal Mognol et Jean-Yves Hascoët

**INSTITUT DE RECHERCHE EN COMMUNICATIONS ET CYBERNÉTIQUE NANTES
UMR CNRS 6597**

1 RUE DE LA NOE, BP 92101, 44321 NANTES CEDEX FRANCE

pierre.muller@ircsyn.ec-nantes.fr

- Unité mixte de recherche du Centre National de la Recherche Scientifique (UMR CNRS 6597)



- 12 équipes réparties sur 4 axes de recherches :

- Image, Signal, et Automatique
- Systèmes mécaniques et Productique
- Systèmes de Production
- Psychologie, Cognition, Technologie

- Environ 260 personnes : 100 enseignants chercheurs, 110 doctorants, 20 ingénieurs et techniciens...

- Plus d'informations : www.irccyn.ec-nantes.fr

Equipe Modélisation et Optimisation de Process de Production

« Définir, simuler puis optimiser l'ensemble du process de fabrication d'une pièce mécanique dans un contexte de conception Produit/Process »

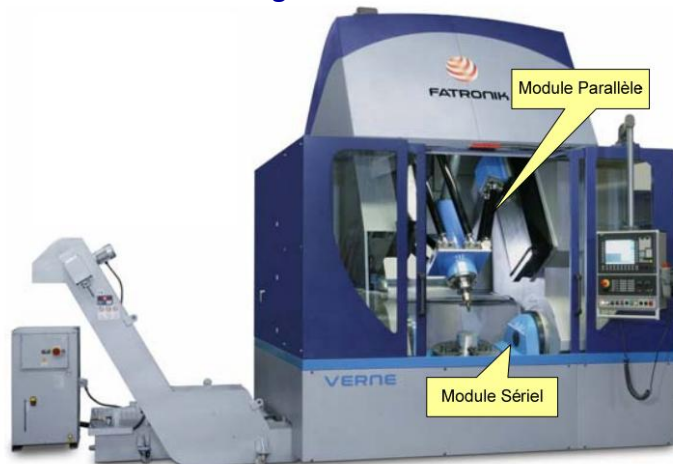
- Proposer un pilotage intelligent des machines
- Maitriser l'ajout de matière
- Proposer un environnement numérique nouveau



30 personnes : 13 enseignants chercheurs, 11 doctorants, 6 ingénieurs et techniciens

3 plateformes d'expérimentations

- Ecole Centrale de Nantes : UGV, fabrication additive et fabrication par formage
- IUT de Nantes : UGV
- ENS Cachan Bretagne : fabrication additive



UGV STRUCTURE PARALLELE



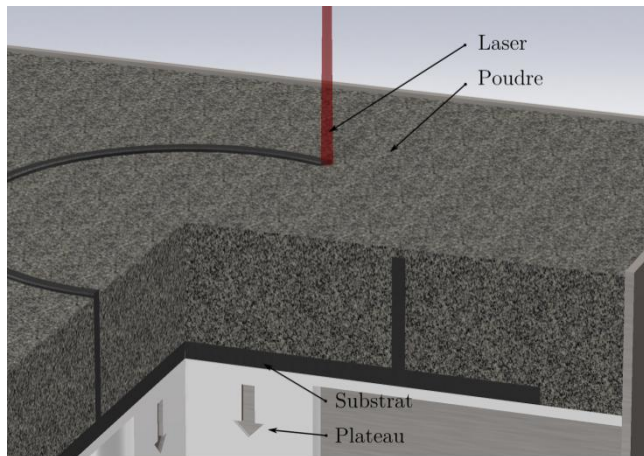
PROCEDURE LASER ET PROJECTION DE POUDDRE

Fabrication additive : le procédé

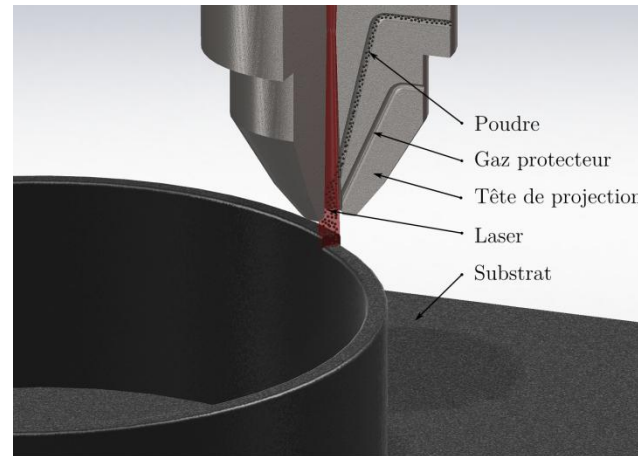
- Fabrication par enlèvement de matière / formage / ajout de matière
- Premier procédé : fin des années 80
- Prototypage rapide → Fabrication additive : petites séries, pièces complexes
- Principe : CAO → volume en 3D par assemblage de couches ou de points successifs
- Procédés métalliques : frittage laser de poudre et projection de poudre



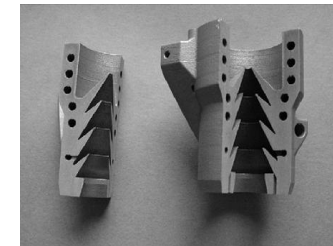
TROIS TYPES DE PROCÉDES



FRITTAGE LASER DE POUDRE



PROJECTION DE POUDRE



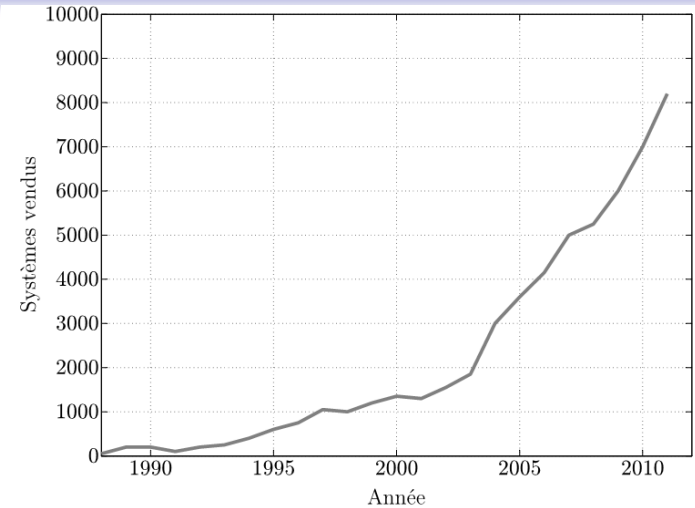
PIECES REALISEES EN FABRICATION ADDITIVE

Fabrication additive : intérêts et limites

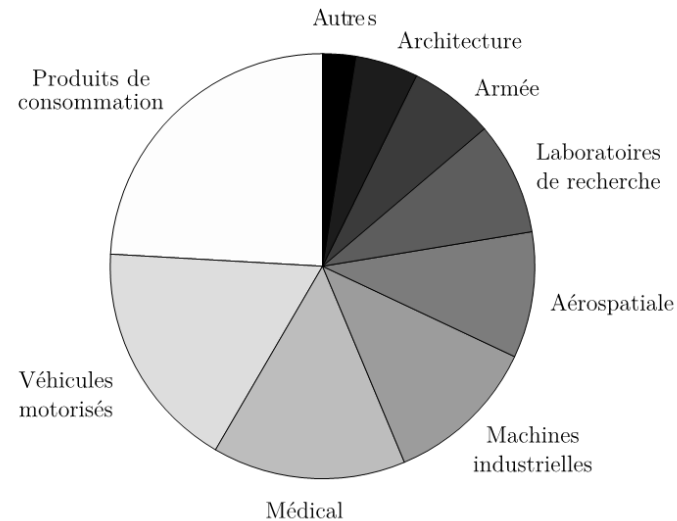
- Grand potentiel en terme de nouvelle conception
- Réduction du nombre de pièces
- Personnalisation
- Délais réduits

- Normalisation limitée
- Pas de procédures de contrôle spécifique
- Pas de données sur la répétabilité
- Concepteurs non familiarisés avec ces procédés
- Productivité restreinte

- Procédés en pleine croissance
- De nombreux domaines industriels impliqués



VENTES DE SYSTEMES DE FABRICATION



DOMAINES D'UTILISATION DES PRODUITS
ISSUS DE LA FABRICATION ADDITIVE

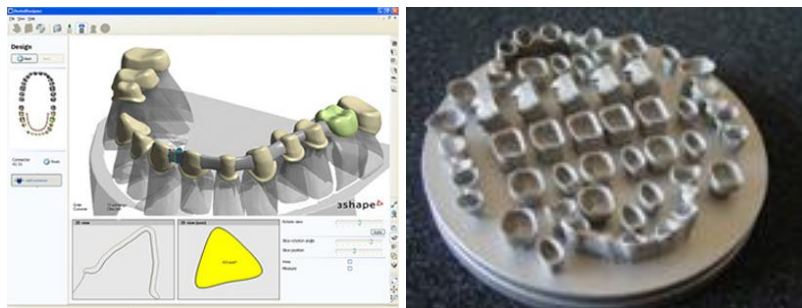
Exemple des dispositifs médicaux prothétiques

Les dispositifs médicaux

- Appareil de remplacement d'un membre ou d'un organe d'une façon aussi fonctionnelle et esthétique que possible
- Demande de plus en plus importante
- Fabrication actuelle longue, coûteuse et peu réactive

L'apport de la fabrication additive

- Intégration dans une chaîne numérique complète
- Personnalisation
- Capacité de réaliser des formes complexes
- Utilisation de matériaux métalliques et céramiques → multimatériaux



CHAINE NUMERIQUE



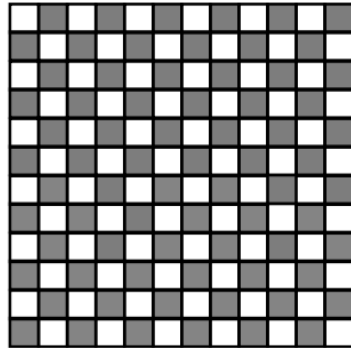
PROTHESE DE GENOU



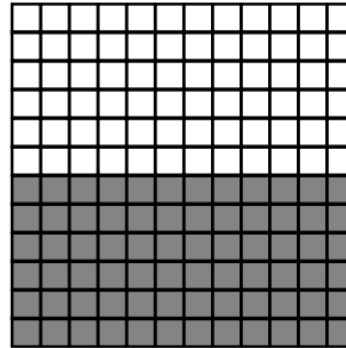
PROTHESE DE HANCHE

Functionally Graded Materials

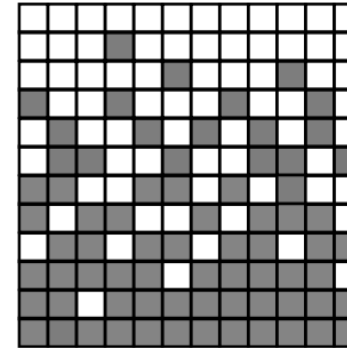
- Composition et microstructure changent graduellement → modification des propriétés



(a) Matériau homogène



(b) Matériaux collés



(c) FGM

COMPOSITION DES FGM

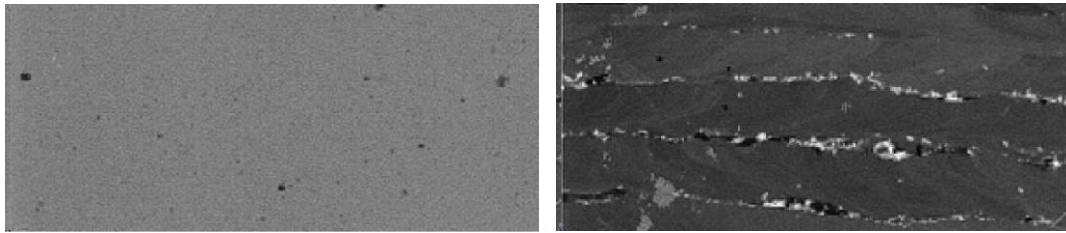
- Apparition du concept FGM à la fin des années 80
- Applications : aéronautique, médical, outillage...
- Moyens de réalisation variés ...
- ... la fabrication additive a de sérieux atouts...
- ... les limites scientifiques sont encore nombreuses

Procédé	état	épaisseur	Matériaux
CVD	Gazeux	1 mm	Céramiques
Pulvérisation plasma	Liquide	Quelques mm	Métaux et céramiques
SHS	Solide	Quelques mm	Métaux et céramiques
Métallurgie des poudres	Solide	Quelques cm	Métaux et céramiques

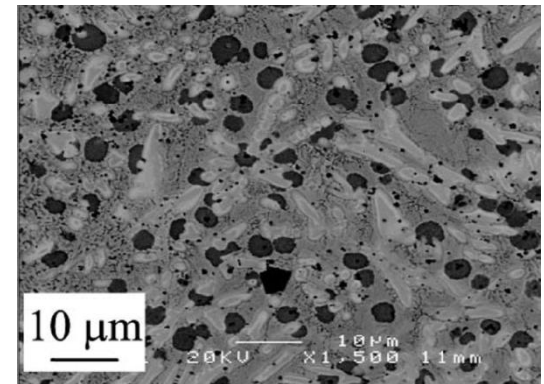
CARACTERISTIQUES DES PROCEDES

Etat de l'art : matériau

- Gradients métalliques :
 - Microstructure : phases, taille et orientation des grains
 - Lien entre microstructure et phénomènes macroscopiques : ségrégations → fissures
 - Macrostructure : fusion des poudres, liaisons entre couches, interface substrat et structure

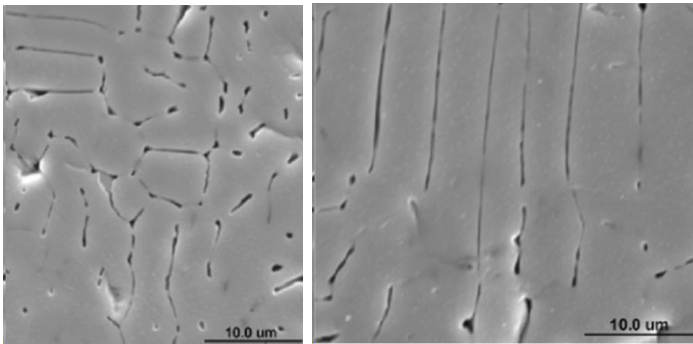


LIAISONS ENTRE COUCHES : INFLUENCE DE L'ENTHALPIE DE MELANGE

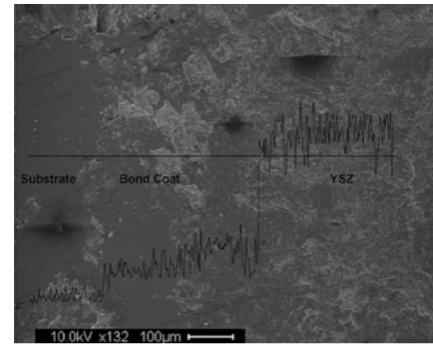


SEGREGATIONS

- Gradients métalliques et céramiques :
 - Microstructure : composition et phases, orientation des grains.
 - Macrostructure : intérêt du FGM par rapport bimatériaux



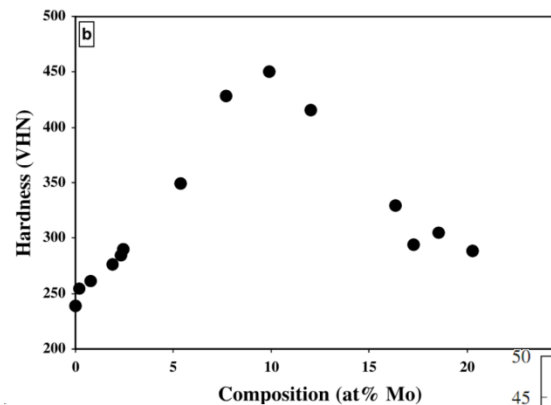
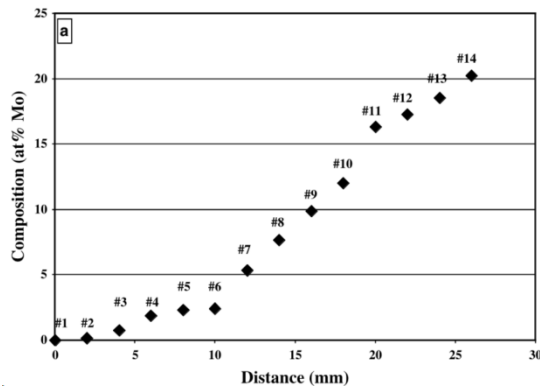
MICROSTRUCTURE D'UNE STRUCTURE CERAMIQUE



PROFIL DE COMPOSITION

- Gradients métalliques :

- Caractéristiques mécaniques : dureté (relation microstructure/dureté), module d'élasticité (relation microstructure/dureté)
- Caractéristique physicochimique : oxydabilité
- Caractéristiques biologiques : culture de cellules sur des structures réalisées en fabrication additive, usure dans des milieux biologiques

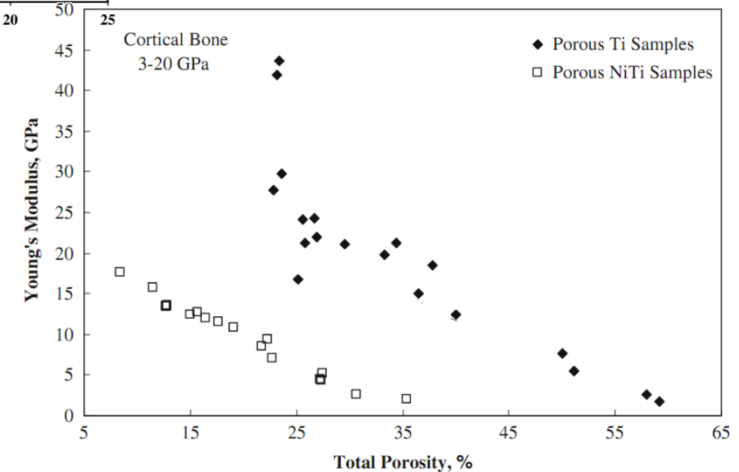
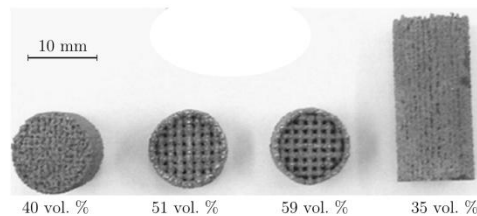


RELATION DURETE
COMPOSITION

- Gradients métalliques et céramiques :

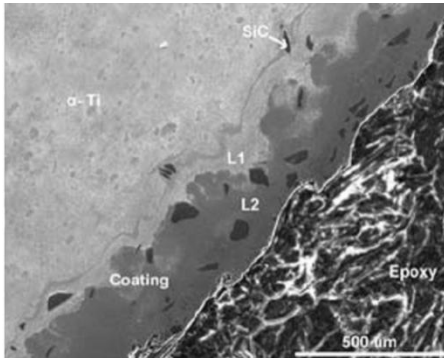
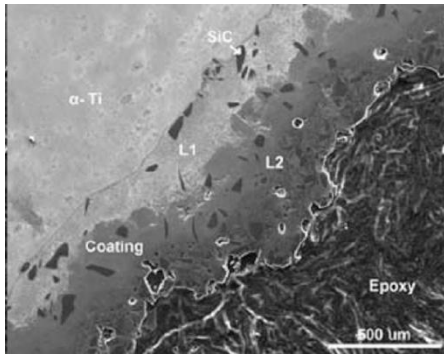
- Caractéristiques mécaniques : dureté et usure
- Caractéristiques biologiques

MODULE D'ELASTICITE
D'UNE STRUCTURE POREUSE

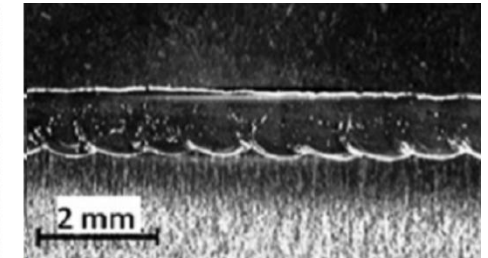
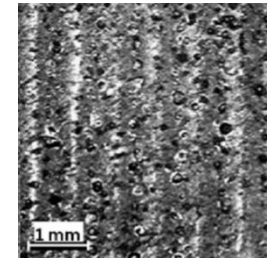
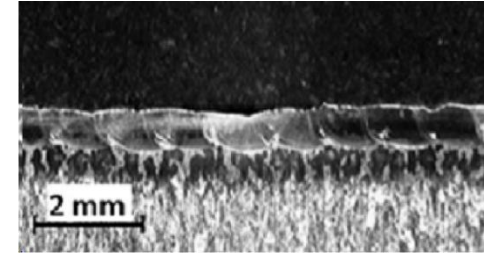
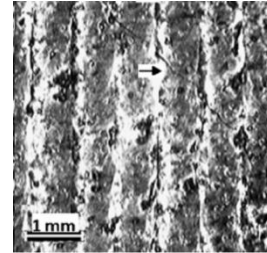


Etat de l'art : procédé

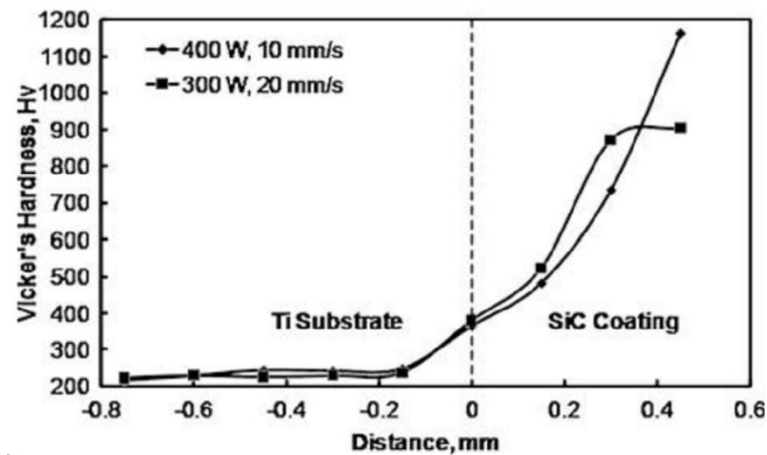
- Maîtrise de la composition : projection de mélanges réalisées au préalable
- Prise en compte de l'historique thermique : cycle de préchauffe
- Influence des paramètres
- Caractérisation dimensionnelle du FGM



INFLUENCE DES
PARAMETRES



DEPOSITION SANS ET AVEC
UN CYCLE DE PRECHAUFFE



- Conception :

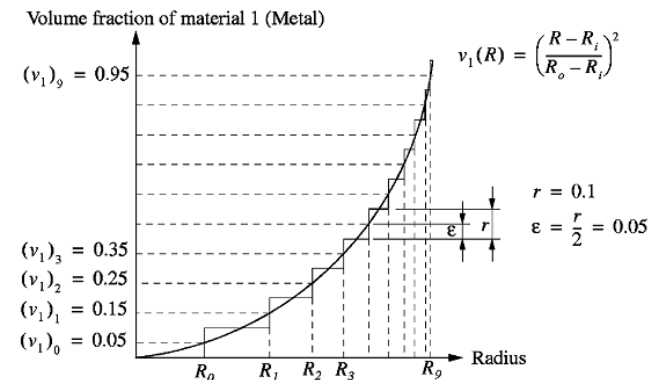
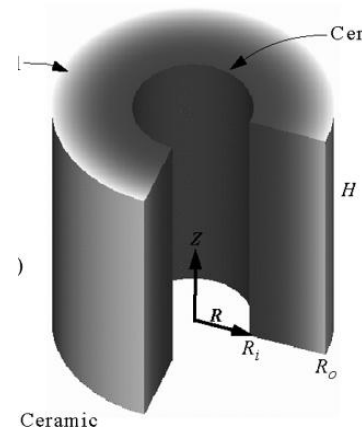
- Modèles d'optimisation : composition/comportement mécanique ou thermique
- Ne prend pas en compte le procédé



- CAO/CFAO :

- Modèle numérique : ne prend pas en compte le paramètre matériau
- Développement d'outils de description des FGM
- Outils de FAO limités : pas de prise en compte du procédé ou FGM discrétisé

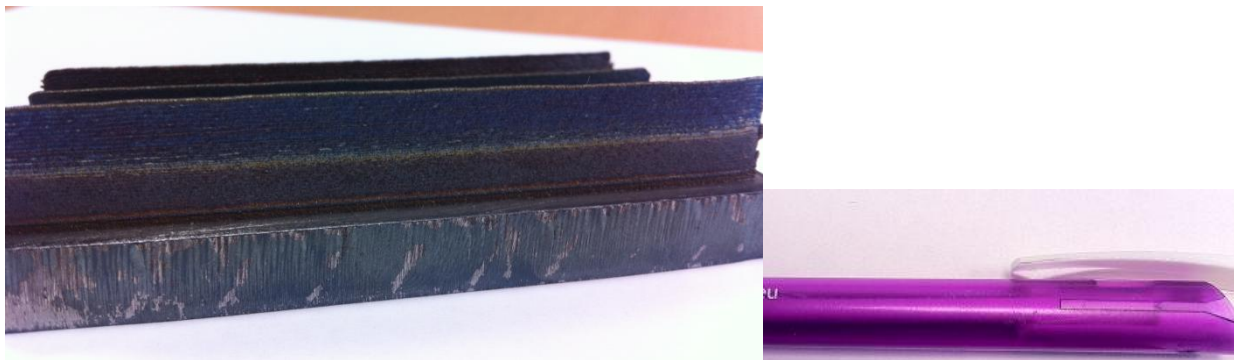
METHODE DE REPRESENTATION ET DE FABRICATION D'UN FGM



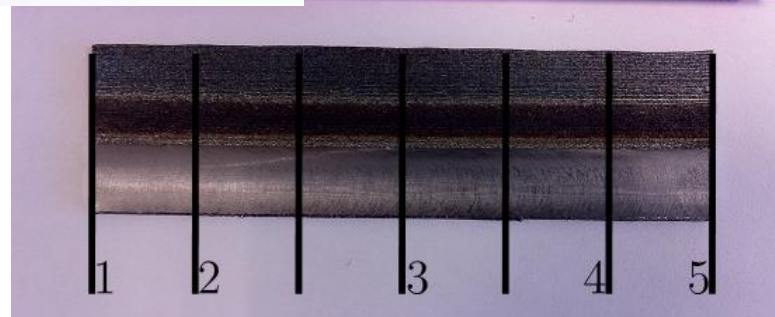
- **Matériau**
 - Observation → Prédétermination (simulations thermiques, métallurgiques...)
 - Fabrication de pièce de taille importante sans fissure (effet d'échelle)
- **Produit**
 - Caractéristiques morphologiques
- **Procédé**
 - Influence des paramètres
- **Méthodologie**
 - Prise en compte du procédé lors de la conception
 - CAO et FAO
- **Notre positionnement**
 - Proposition d'une nouvelle méthode pour fabriquer des pièces complexes multimatériaux
 - FGM continu : caractérisation et comparaison par rapport à un FGM discrétisé
 - Réalisation de pièces complexes
 - Mise en place d'une méthodologie : conception FGM → fabrication

Premier essai : fabrication et analyse d'une structure FGM

- Aspects techniques
 - Fonctionnement des deux pots de poudres simultanément
 - Gestion des débits
 - Modification rapide des débits
- Réalisation de premières structures FGM
 - Fabrication de gradient continu



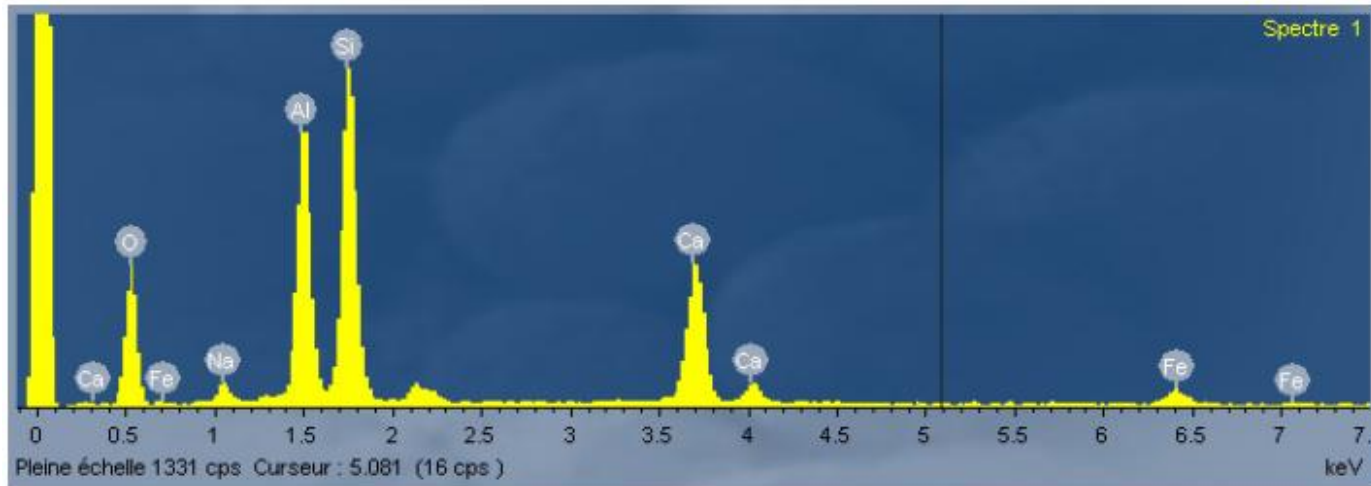
STRUCTURE FGM



POTS DE POUVRE

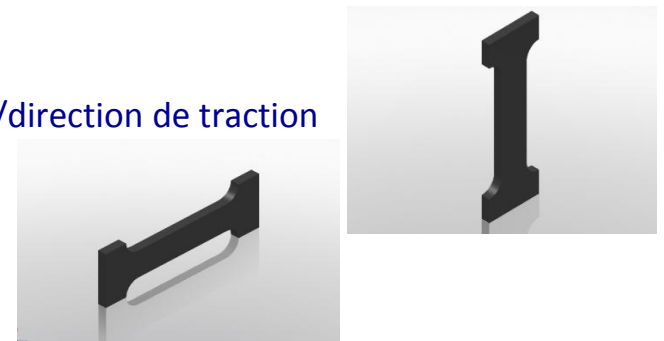
Caractérisation d'une structure FGM

- Analyse matériau (MEB)
 - Analyses semi-quantitatives de la composition
 - Cartographies



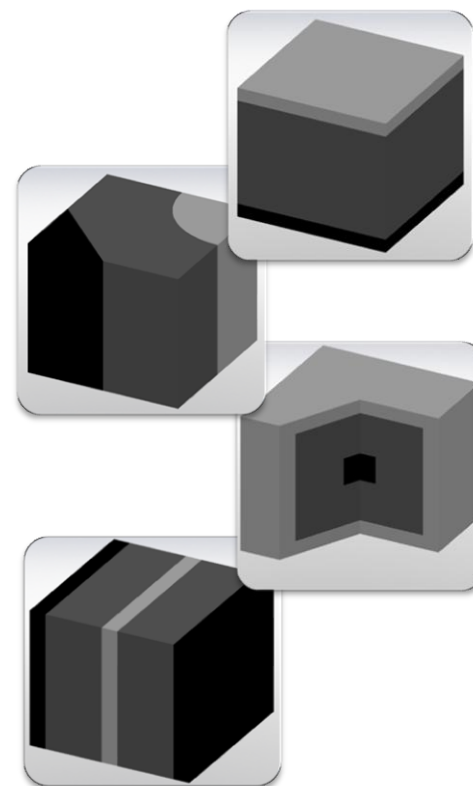
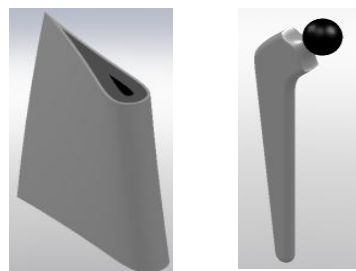
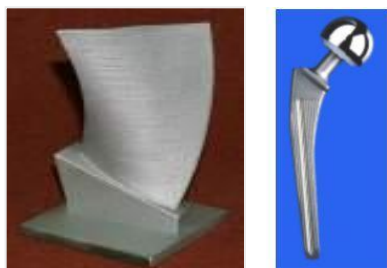
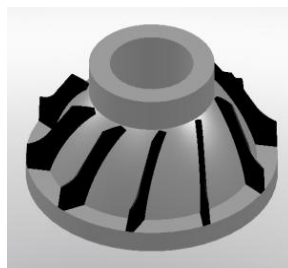
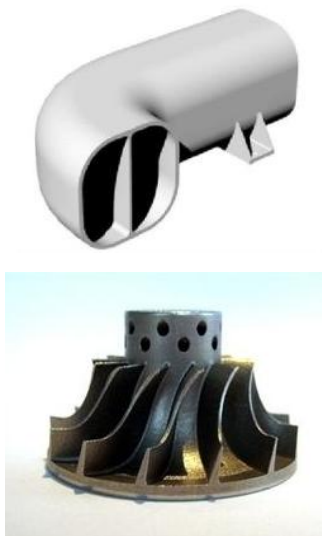
SPECTRE MEB

- Caractéristiques mécaniques (éprouvettes de traction)
 - Fabrication des éprouvettes de traction
 - Paramètres : discrétisation, stratégie, direction de fabrication/direction de traction



Typologie de gradients : catégorisation

- Catégoriser les typologies de gradients



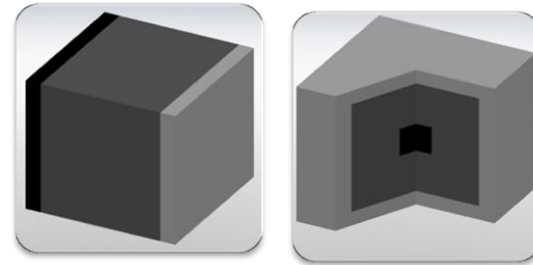
PIECES REALISEES PAR UN PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE

PROPOSITION DE MODIFICATION MULTI MATERIAU

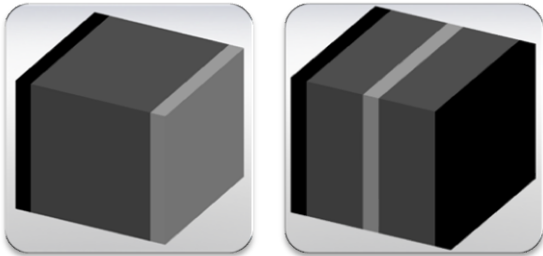
TIPOLOGIES DE GRADIENTS

Typologie de gradients : catégorisation

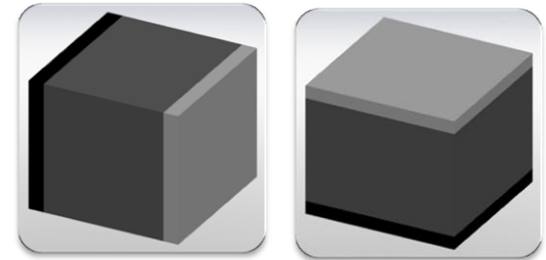
- Définir les différentes catégories de gradients
 - Nombre de zones
 - Directions du gradient
 - Formes des lignes de gradient
 - Direction de fabrication



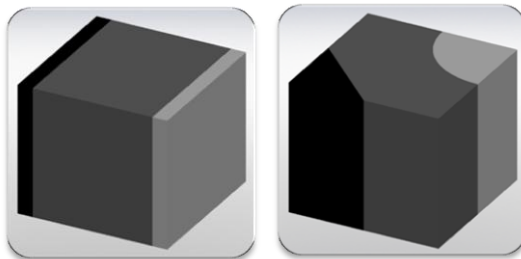
DIRECTIONS DU GRADIENT



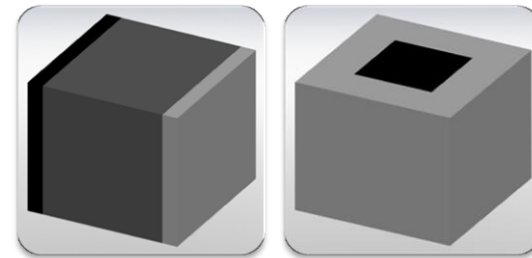
NOMBRE DE ZONES



DIRECTION DE FABRICATION



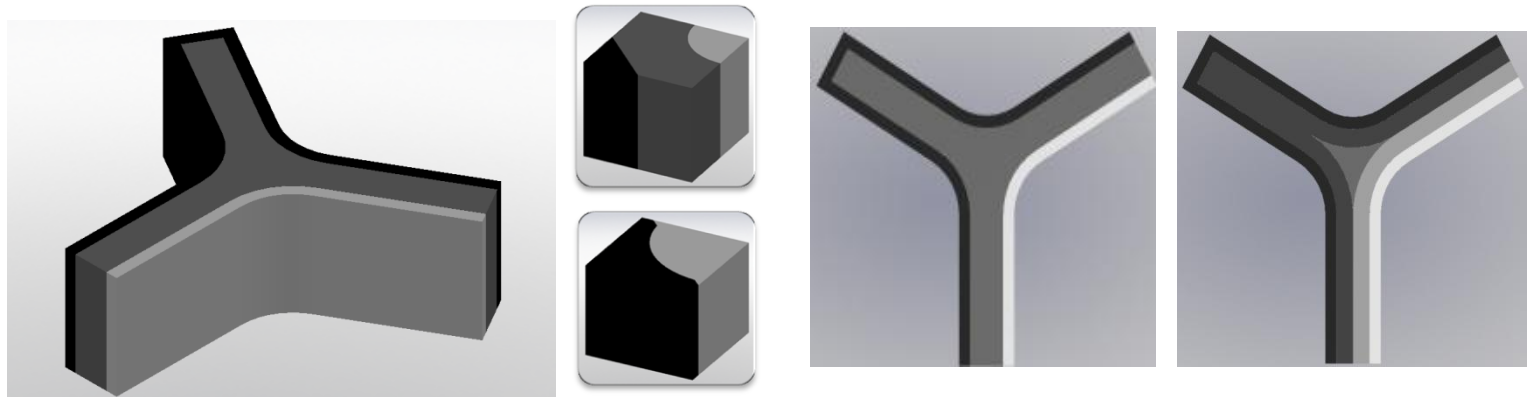
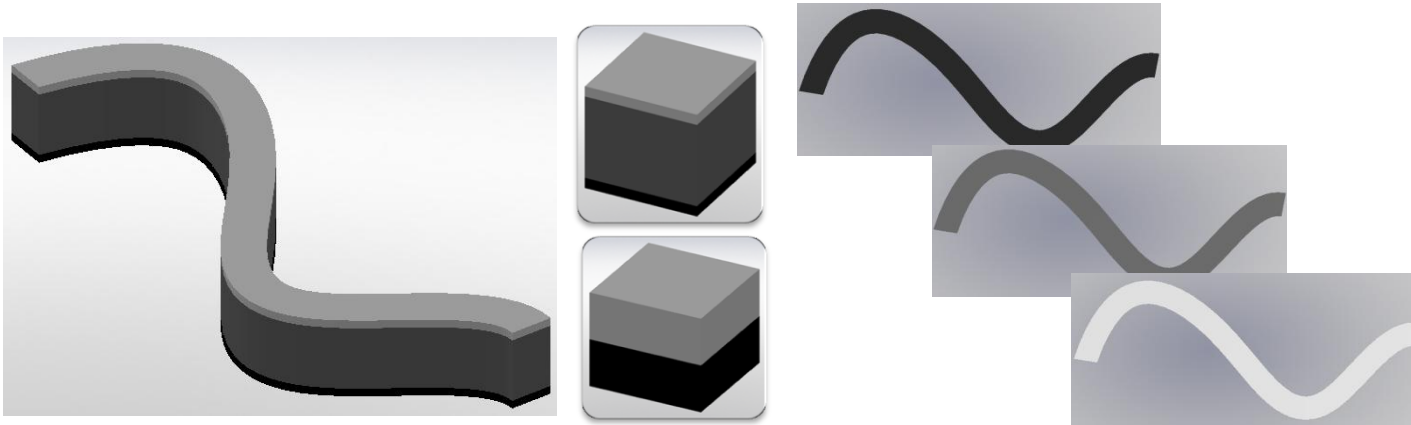
LIGNES DE GRADIENT



LIGNES DE GRADIENT

Typologie de gradients : stratégies et essais associés

- Associer les typologies à des stratégies
- Utiliser des stratégies existantes / mettre en place de nouvelles stratégies optimisées



Les travaux à venir

- Réaliser des pièces fonctionnelles FGM et les caractériser
- Associer les stratégies aux différentes typologies de gradient
- Mettre en place de nouvelles stratégies
- Mettre en place une méthodologie pour passer d'une CAO avec définition des matériaux à une FAO
- ...

