

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 »

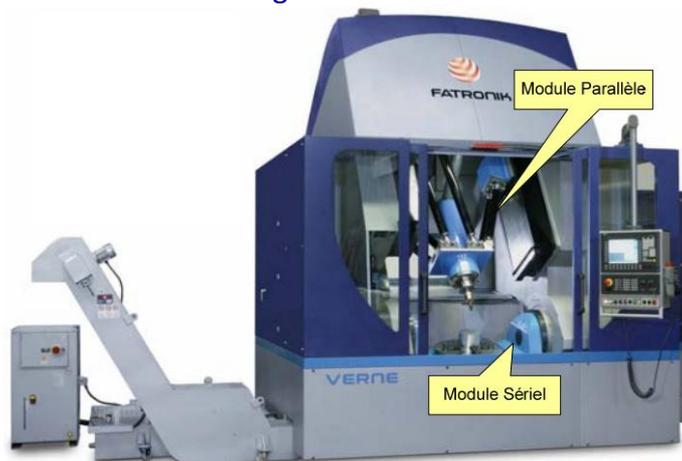
- Proposer un pilotage intelligent des machines
- Maitriser l'ajout de matière
- Proposer un environnement numérique nouveau



- 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



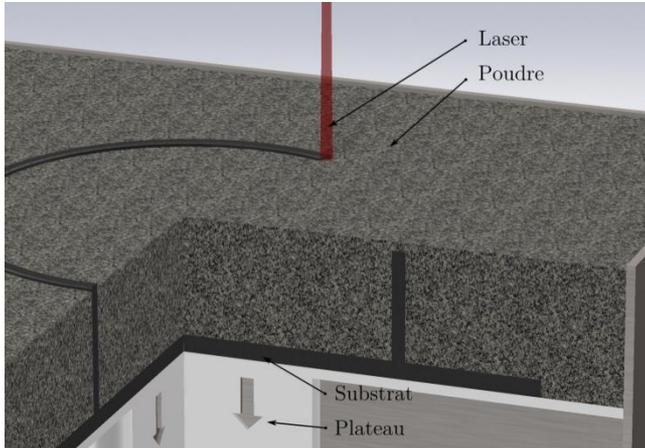
PROCEDURE LASER ET PROJECTION DE POUDDRE

Fabrication additive : le procédé

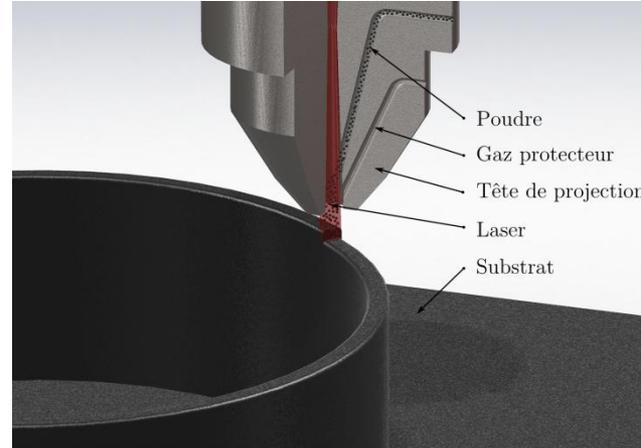
- Fabrication par enlèvement de matière / formage / ajout de matière
- Premier procédé : fin des années 80
- Prototypage rapide → Fabrication additive : petites séries, pièces complexes
- Principe : CAO → volume en 3D par assemblage de couches ou de points successifs
- Procédés métalliques : frittage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



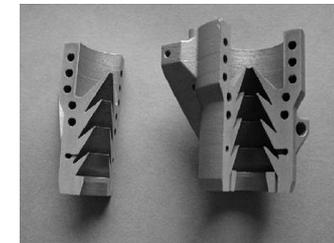
TROIS TYPES DE PROCÉDES



FRITTAGE LASER DE POUDRE



PROJECTION DE POUDRE



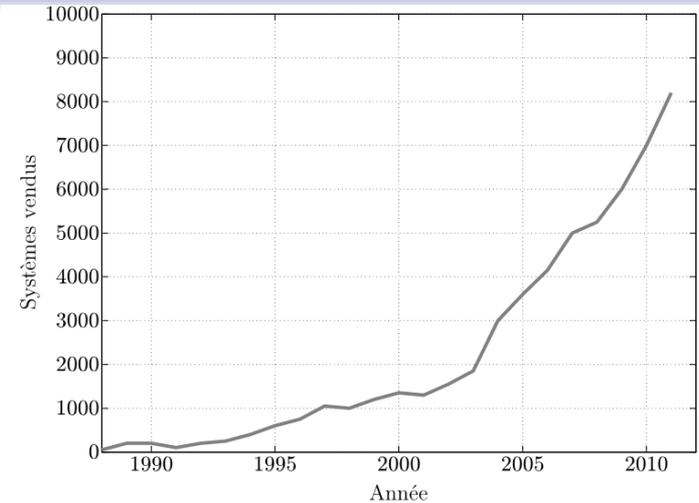
PIECES REALISEES EN FABRICATION ADDITIVE

Fabrication additive : intérêts et limites

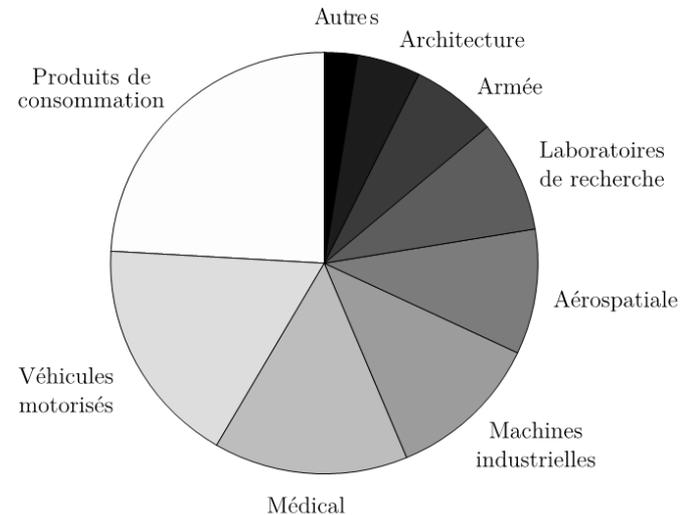
- Grand potentiel en terme de nouvelle conception
- Réduction du nombre de pièces
- Personnalisation
- Délais réduits

- 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

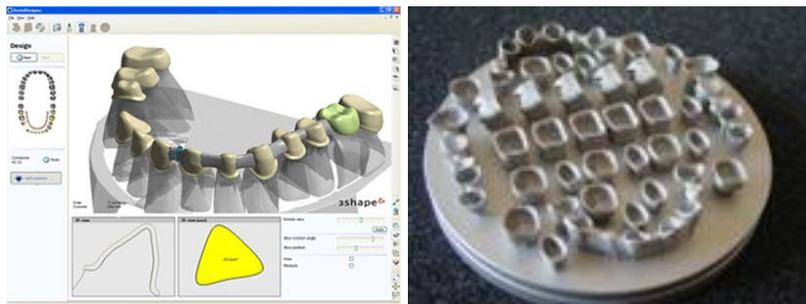
Exemple des dispositifs médicaux prothétiques

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



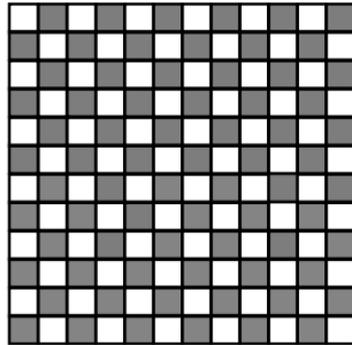
PROTHESE DE GENOU



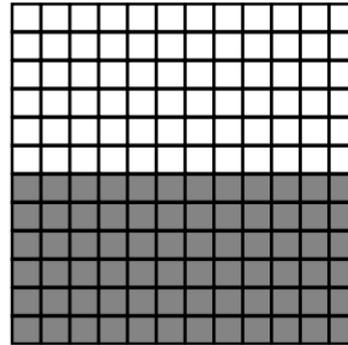
PROTHESE DE HANCHE

Functionally Graded Materials

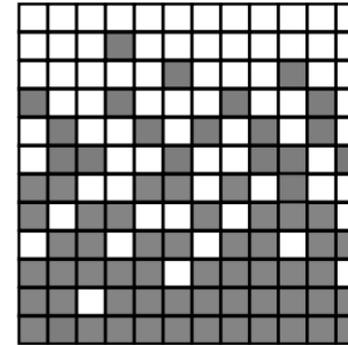
- Composition et microstructure changent graduellement → modification des propriétés



(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...

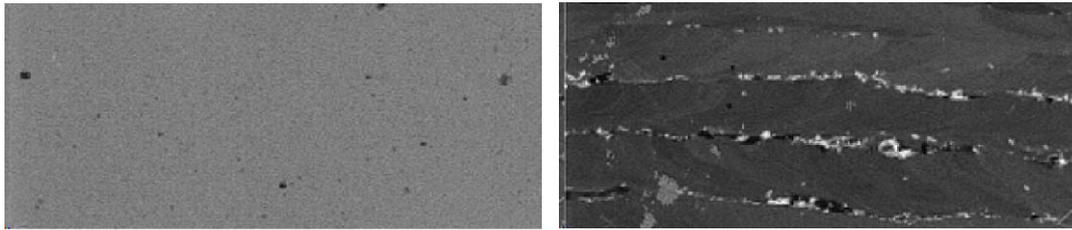
- ... les limites scientifiques sont encore nombreuses

| 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 |

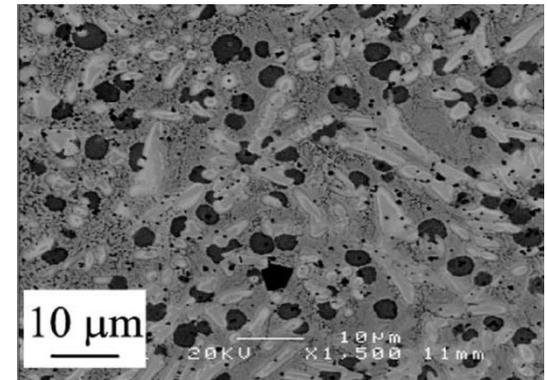
CARACTERISTIQUES DES PROCEDES

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

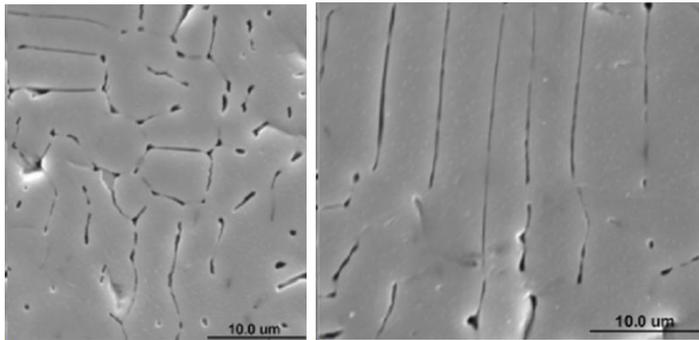


LIAISONS ENTRE COUCHES : INFLUENCE DE L'ENTHALPIE DE MELANGE

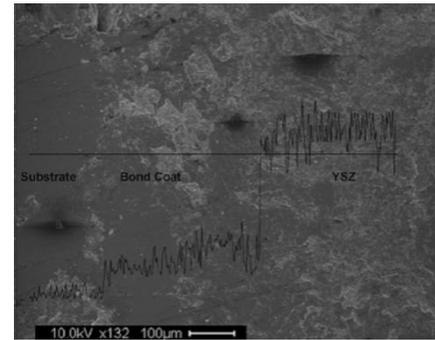


SEGREGATIONS

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



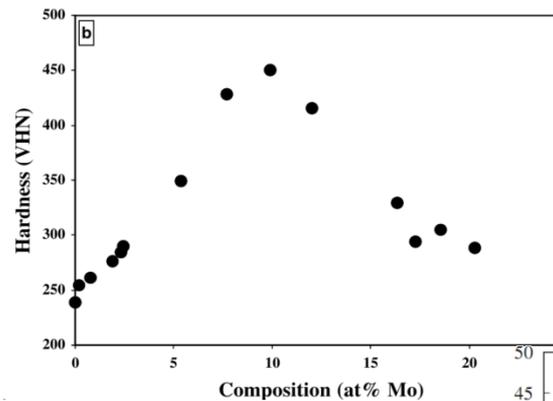
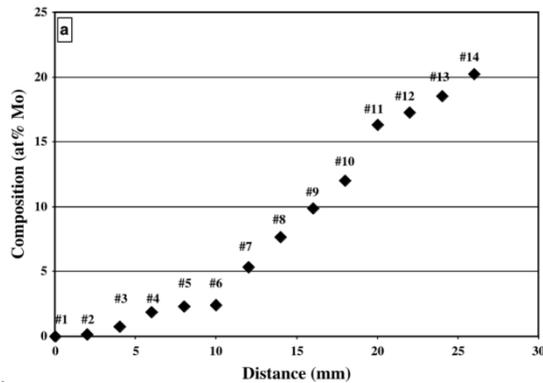
MICROSTRUCTURE D'UNE STRUCTURE CERAMIQUE



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

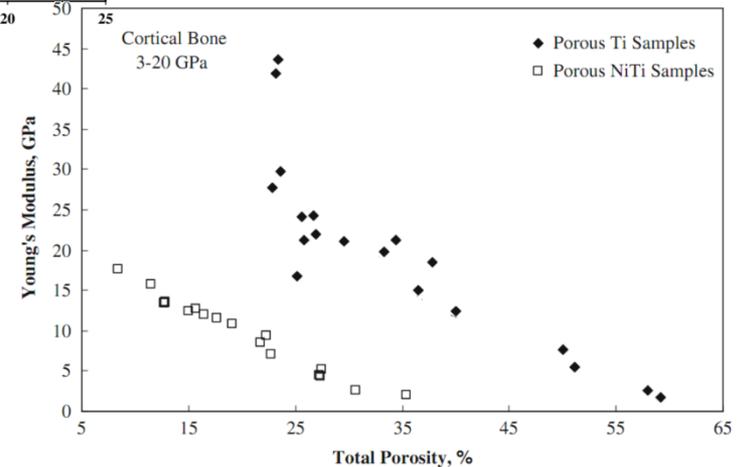
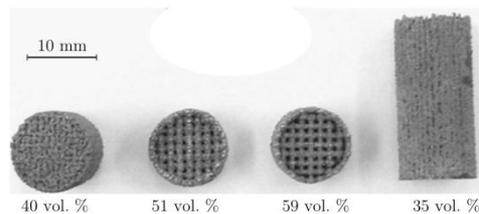


RELATION DURETE
COMPOSITION

- Gradients métalliques et céramiques :

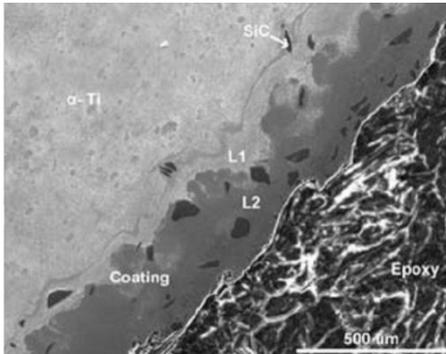
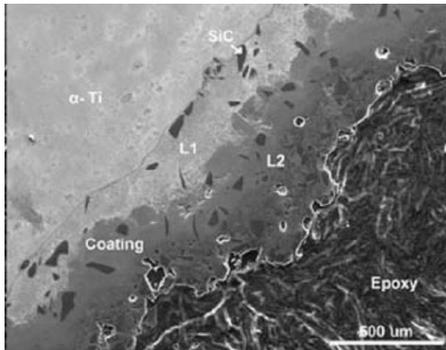
- Caractéristiques mécaniques : dureté et usure
- Caractéristiques biologiques

MODULE D'ELASTICITE
D'UNE STRUCTURE POREUSE

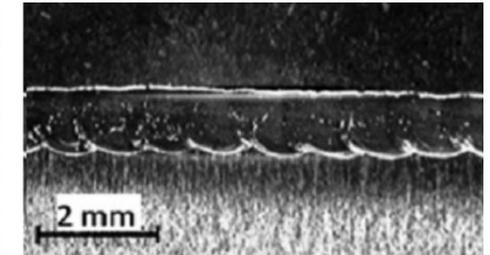
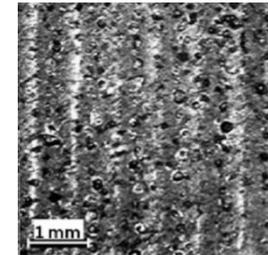
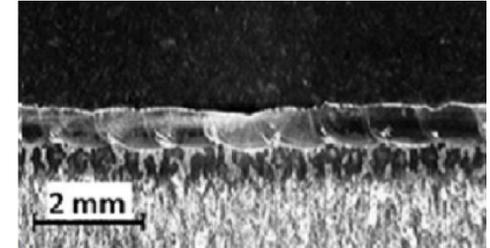
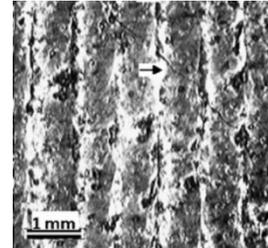


Etat de l'art : procédé

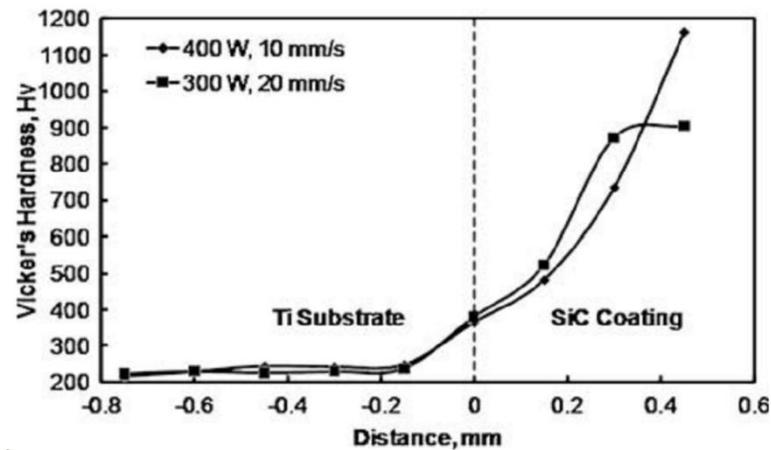
- Maîtrise de la composition : projection de mélanges réalisées au préalable
- Prise en compte de l'historique thermique : cycle de préchauffe
- Influence des paramètres
- Caractérisation dimensionnelle du FGM



INFLUENCE DES
PARAMETRES



DEPOSITION SANS ET AVEC
UN CYCLE DE PRECHAUFFE



- Conception :

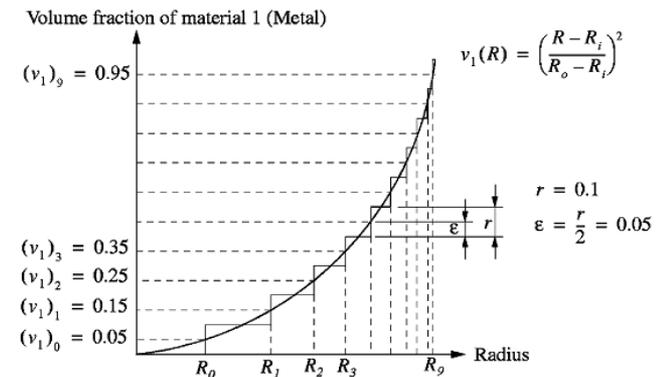
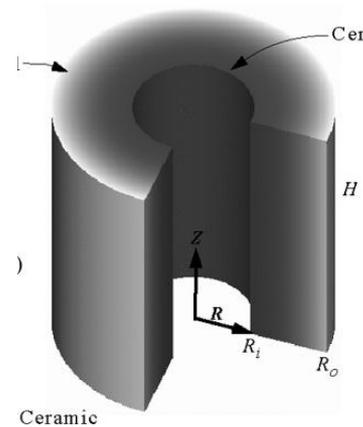
- Modèles d'optimisation : composition/comportement mécanique ou thermique
- Ne prend pas en compte le procédé



- 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

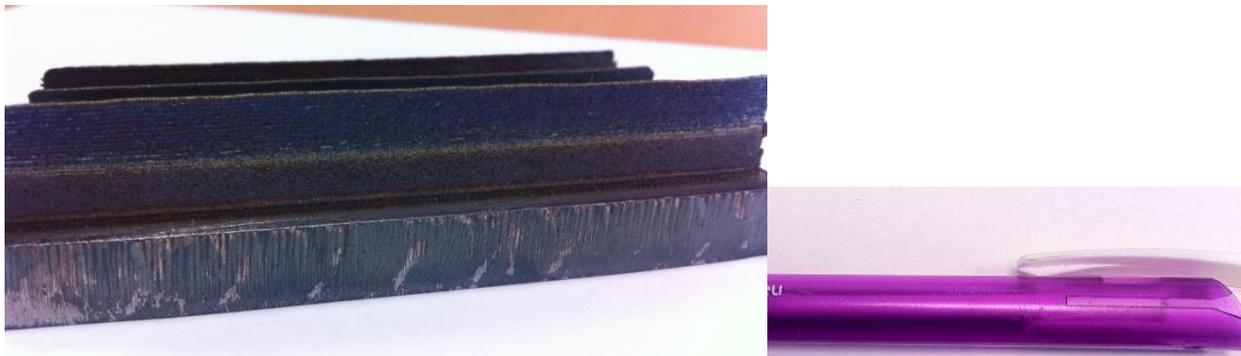
METHODE DE REPRESENTATION ET DE FABRICATION D'UN FGM



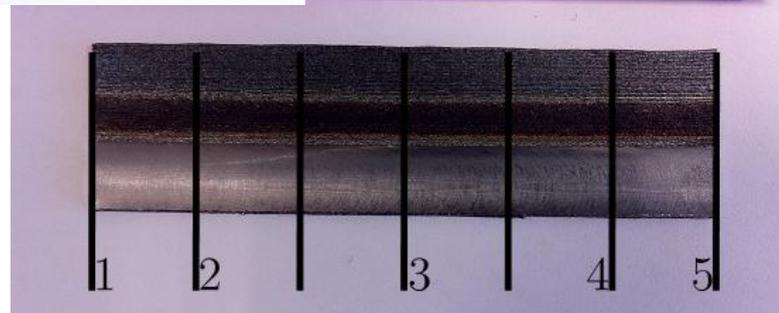
- **Matériau**
 - Observation → Prédétermination (simulations thermiques, métallurgiques...)
 - Fabrication de pièce de taille importante sans fissure (effet d'échelle)
- **Produit**
 - Caractéristiques morphologiques
- **Procédé**
 - Influence des paramètres
- **Méthodologie**
 - Prise en compte du 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



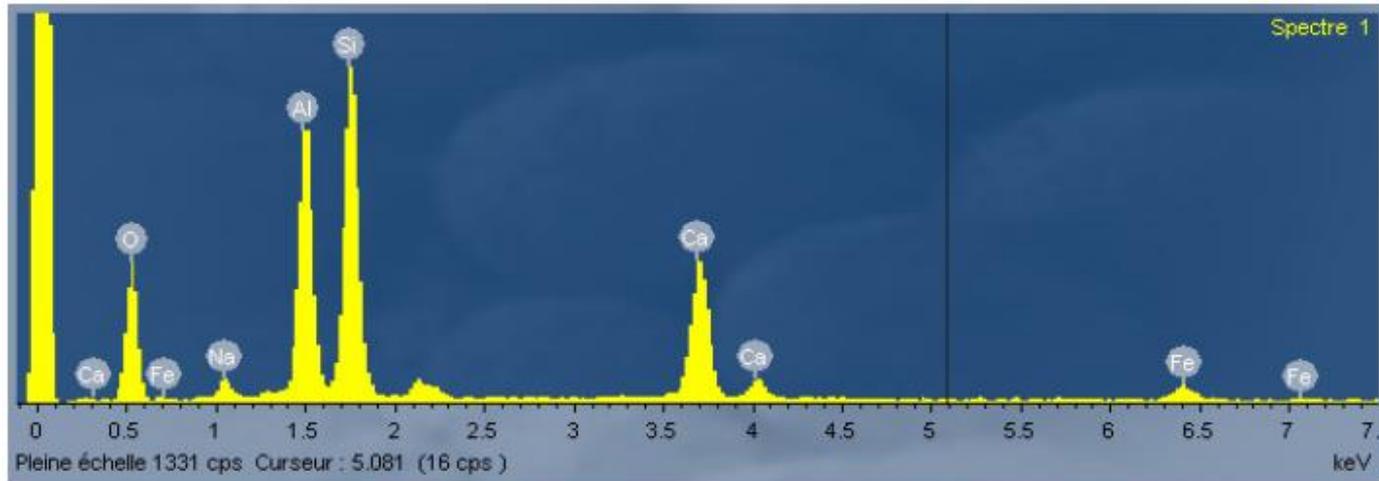
STRUCTURE FGM



POTS DE POUDRE

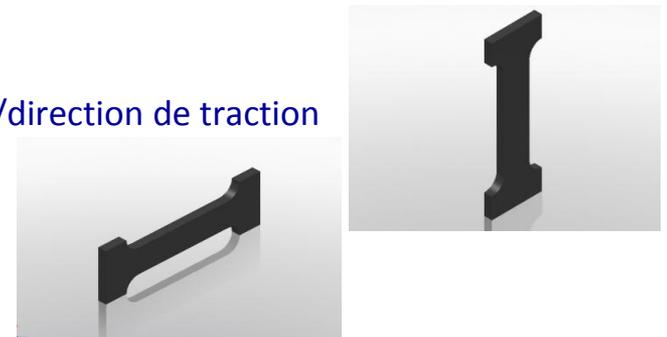
Caractérisation d'une structure FGM

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



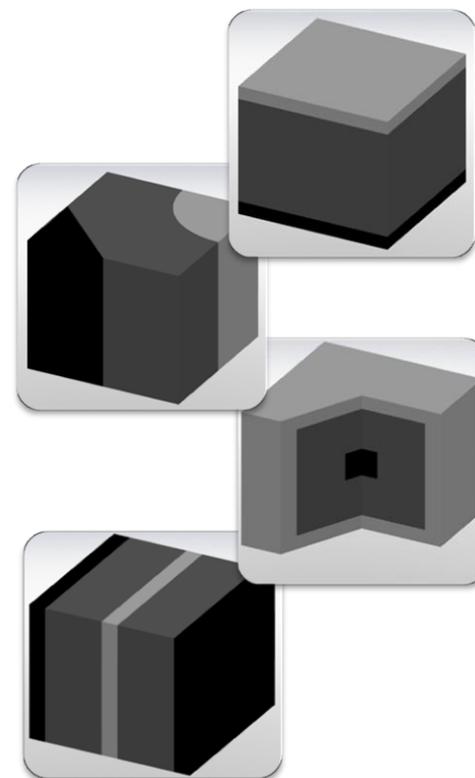
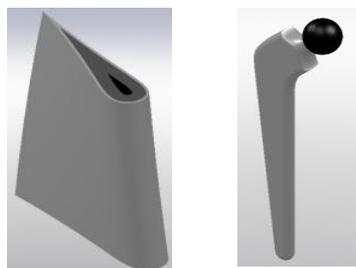
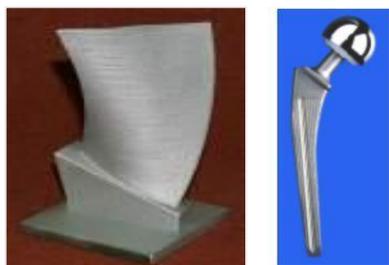
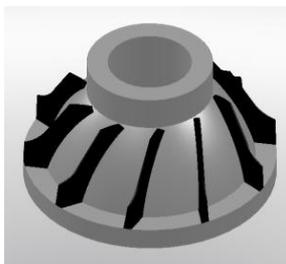
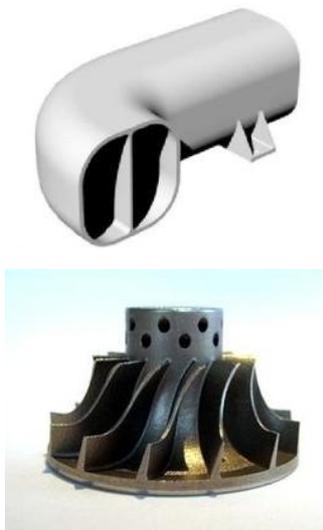
SPECTRE MEB

- 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

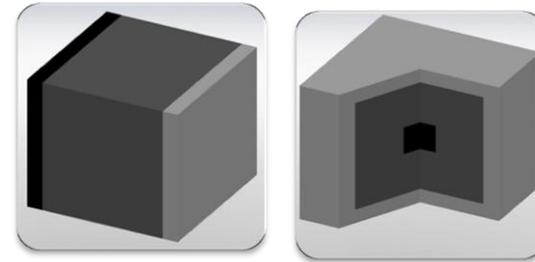
PROPOSITION DE MODIFICATION
MULTI MATERIAU

TIPOLOGIES DE GRADIENTS

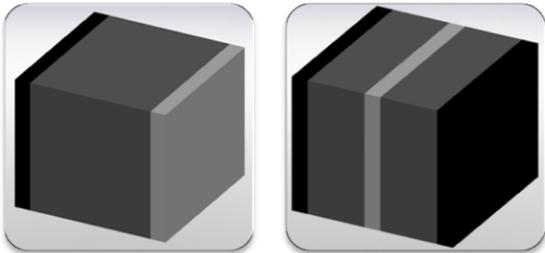
Typologie de gradients : catégorisation

- Définir les différentes catégories de gradients

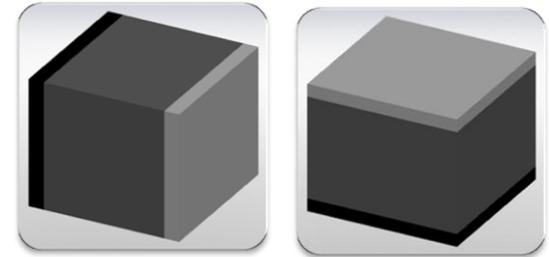
- Nombre de zones
- Directions du gradient
- Formes des lignes de gradient
- Direction de fabrication



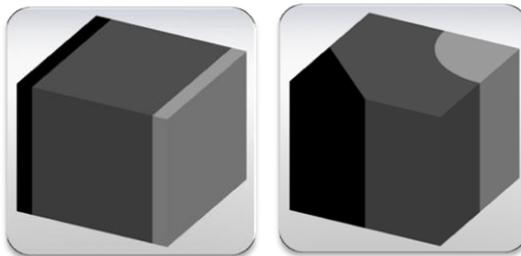
DIRECTIONS DU GRADIENT



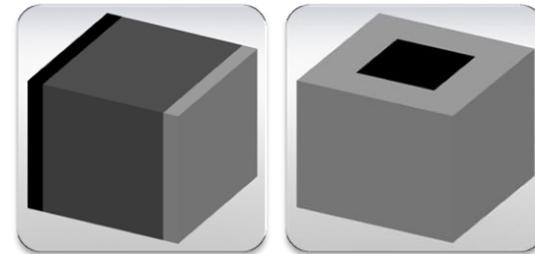
NOMBRE DE ZONES



DIRECTION DE FABRICATION



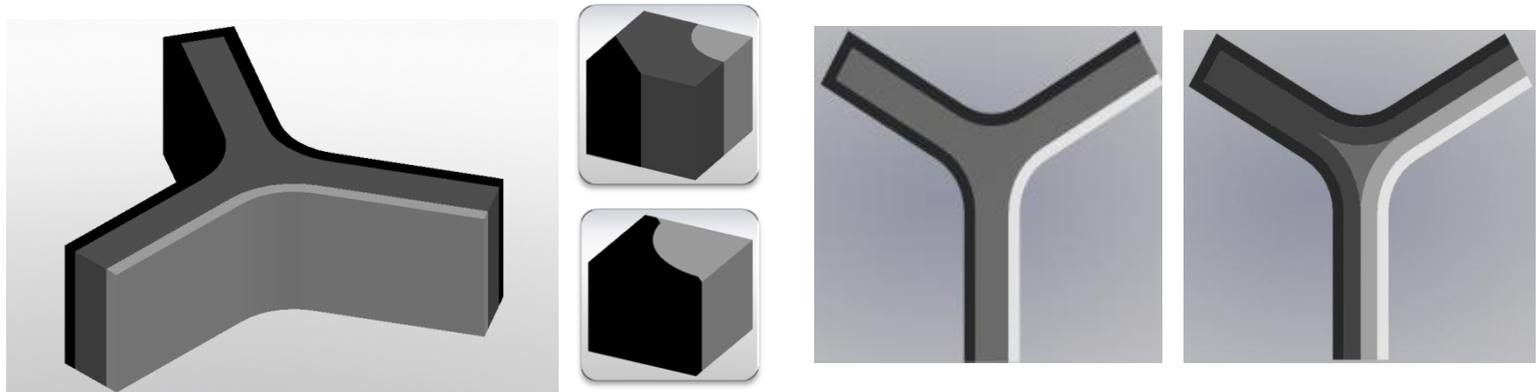
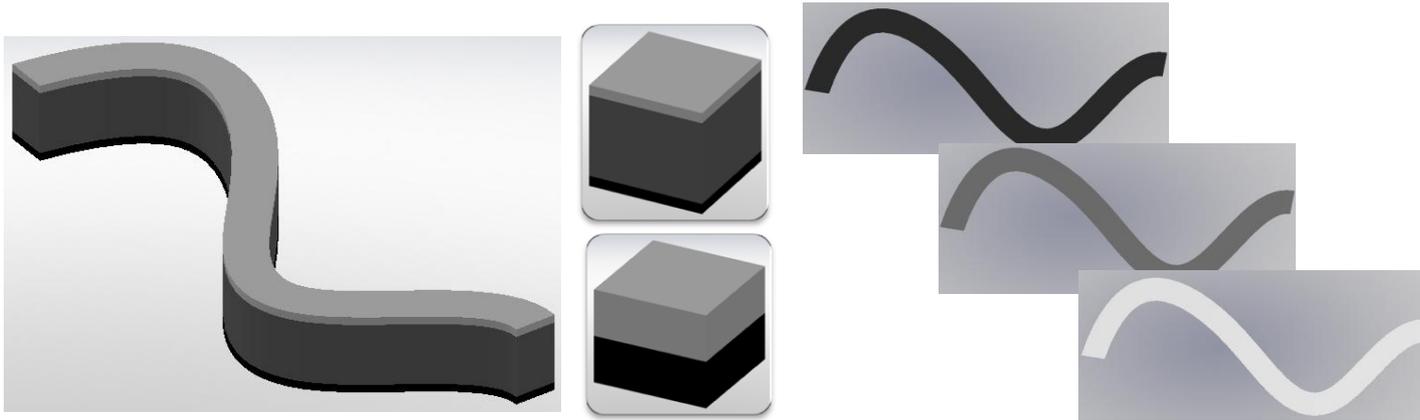
LIGNES DE GRADIENT



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
- ...

