

école \_\_\_\_\_  
normale \_\_\_\_\_  
supérieure \_\_\_\_\_  
paris—saclay \_\_\_\_\_

université  
PARIS-SACLAY

# Pilotage des procédés DED

Christophe Tournier

*Ecole normale supérieure Paris-Saclay*

*LURPA (Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée)*

Action Nationale de Formation du CNRS **FAB3D**

26 novembre 2025

# Agenda

---

## 1. Procédés DED

- Difficultés de maîtrise du procédé
- Chaîne numérique CFAO

## 2. Maîtrise du dépôt de cordon

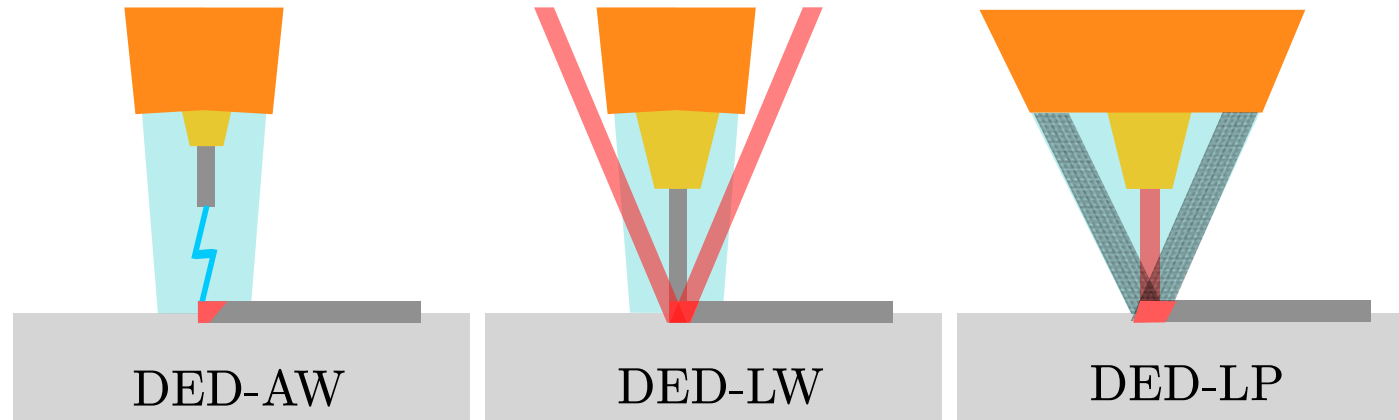
## 3. Assemblage de cordons









- Juxtaposition et empilement des cordons
- Remplissage

## 4. Pièces complexes

## 5. Contrôle en boucle fermée

# Procédés DED



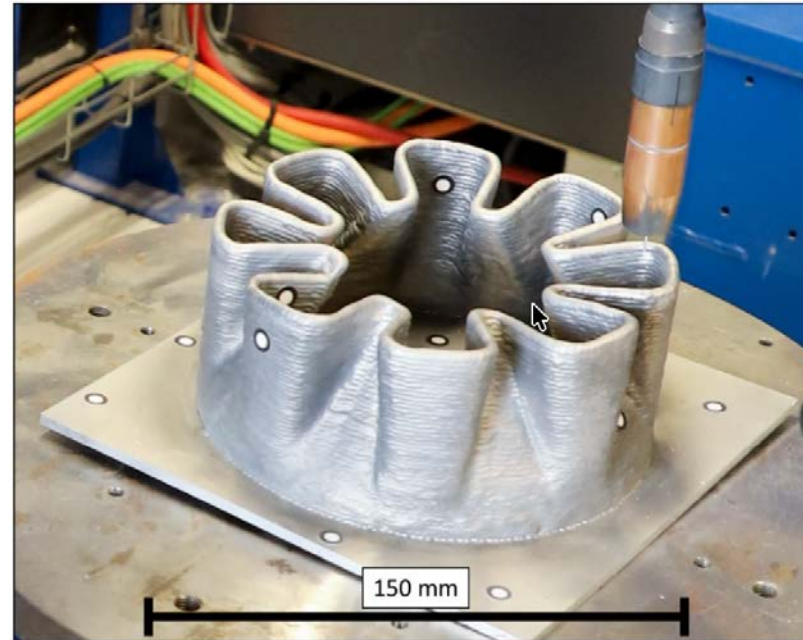
Apport d'énergie		Flux de matière		Production	
	Faisceau laser		Fil		Bain de fusion
	Arc électrique		Poudre		Cordon
			Gaz d'inertage		Substrat

[Pizzol 25]

# Procédés DED



Collecteur 5 en 1  
DED-LP (AddUp).  
La pièce fait 380 mm x 240 mm.  
15 h de fabrication.



Tuyère d'hélicoptère fabriquée en alliage  
d'aluminium  
DED-AW (G-SCOP).  
1h de fabrication.

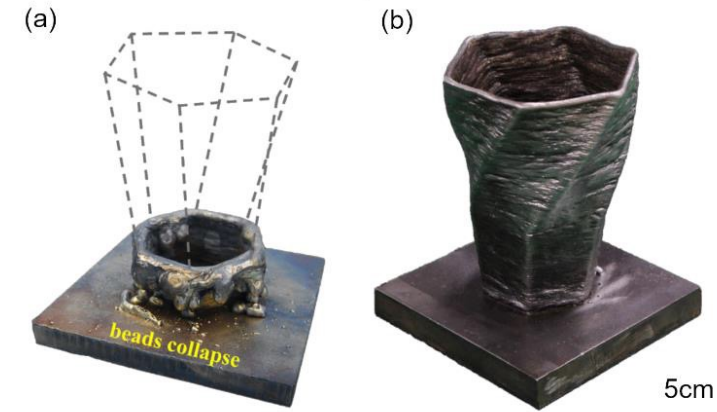


Pièce de démonstration en IN718  
DED-LW (LURPA).  
1h de fabrication.



# Les procédés DED : difficultés de mise en œuvre

- Les procédés DED sont des processus multi-physiques complexes affectés par des phénomènes couplés (thermique, mécanique, électrique, magnétique)
  - La mise en œuvre de paramètres procédé inappropriés influence la géométrie et la qualité des cordons et couches fabriqués
    - Processus de dépose de la matière difficile à contrôler
  - La quantité de chaleur apportée dans la pièce s'accumule
    - les bains liquides des cordons déposés sont grands et ont tendance à s'étaler,
    - le contrôle de la géométrie des cordons est plus difficile et risque d'effondrement de la structure
- Les phénomènes thermiques sont prépondérants



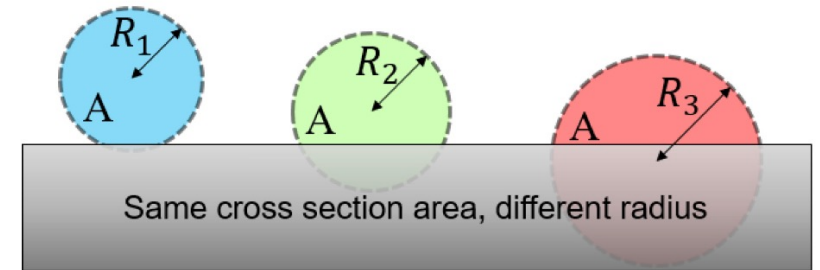
[Lu 2017]



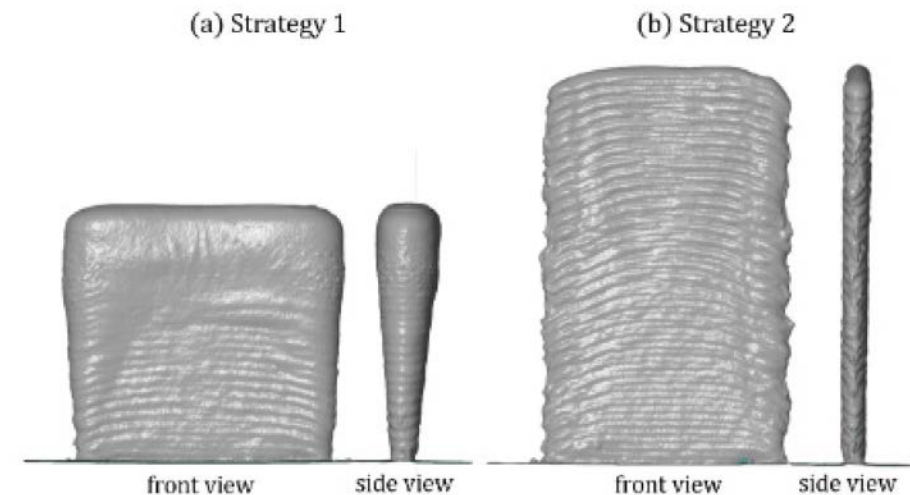
[Ding 2014]

# Les procédés DED : difficultés de mise en œuvre

- La forme géométrique du cordon est définie par l'environnement thermique proche du cordon de soudure [Dellarre 24]
- Un environnement avec trop d'énergie thermique crée un cordon trop mouillé (cordon rouge), et dans le cas contraire un cordon pas assez mouillé (cordon bleu).
- Deux murs fabriqués
  - L'un sans maîtrise thermique, avec une élévation globale de la température dans la pièce créant des cordons de plus en plus larges et de moins en moins hauts (a)
  - L'autre avec une meilleure maîtrise thermique, sans élévation globale de la température dans la pièce permettant d'avoir des cordons de géométrie régulière au centre du mur (b).



[Verbist 24]



[Ma 2021]

# Les procédés DED : difficultés de mise en œuvre

- Les contraintes résiduelles et les distorsions occasionnées sont une source majeure de déformation des géométries de pièces.
- La répétition couche après couche de fusions puis refroidissements de la matière génère des gradients thermiques importants dans la pièce qui affectent sa géométrie, mais aussi ses caractéristiques mécaniques et sa microstructure



[Xu 2018]

# Les procédés DED : difficultés de mise en œuvre

- Assurer une qualité géométrique satisfaisante et sans défaut

- Maîtriser les dimensions géométriques des cordons déposés

- La géométrie des cordons fabriqués dépend des paramètres du procédé

- Adapter la trajectoire à mettre en œuvre en fonction de la géométrie ciblée

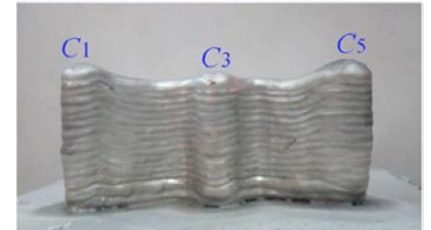
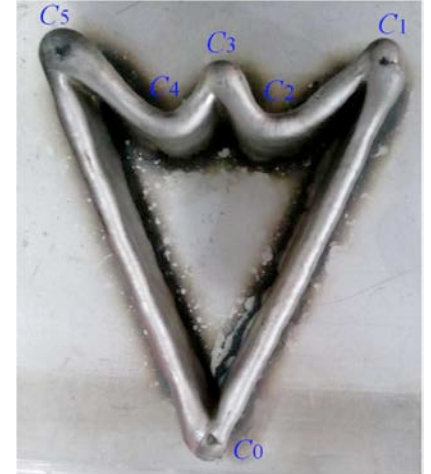
- Le choix de la trajectoire et de ses paramètres est déterminé par la géométrie à fabriquer et la géométrie des cordons individuels

- Une mauvaise adéquation conduit localement

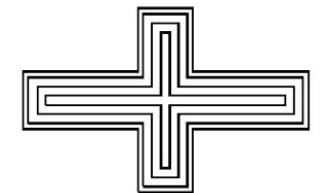
- à des lacunes ou à des accumulations de matière

- à des problèmes de santé matière

[Li 2018]

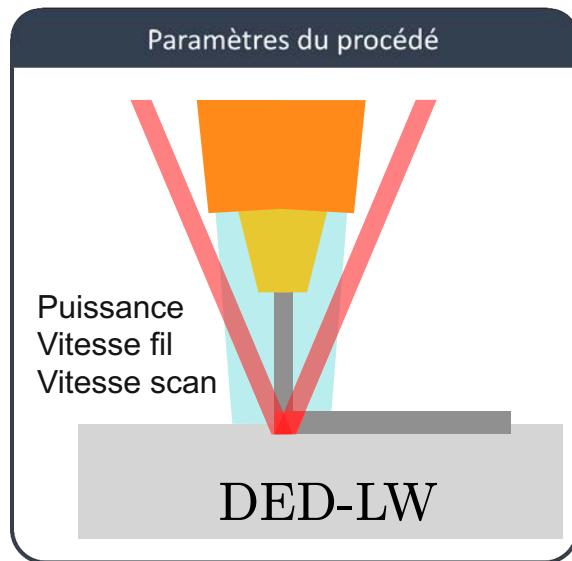


[Michel 2019]

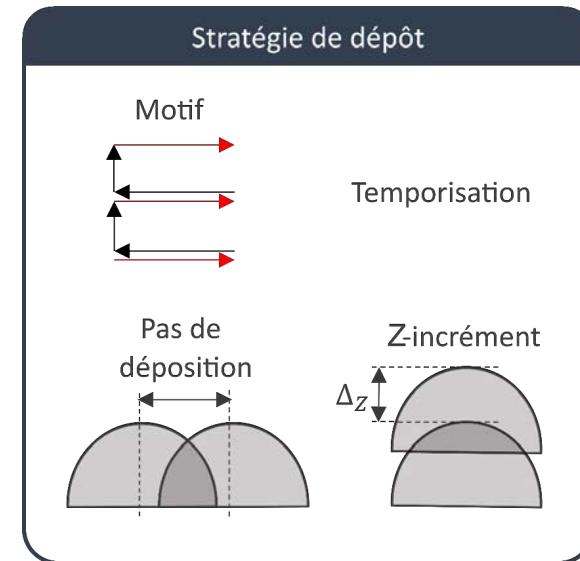
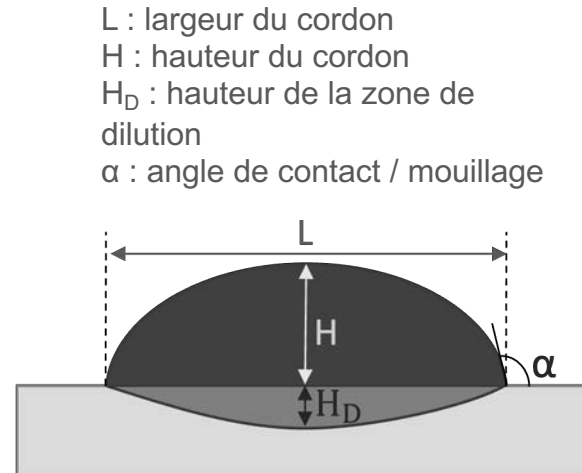


# Les procédés DED : stratégies de fabrication

## □ Paramètres des stratégies



[Brehier 24] [Pizzol 25]

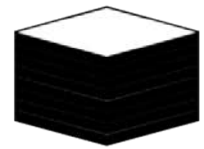


# Les procédés DED : stratégies de fabrication

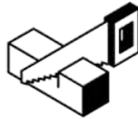
- **Stratégies en boucle ouverte : les phénomènes thermiques sont subis**
  - 1. Conserver des paramètres du procédé constants le long des trajectoires**
    - *La morphologie des cordons est a priori constante (aux phénomènes thermiques près)*
    - *Optimiser les trajectoires, le tranchage ou la forme de la pièce*
  - 2. Faire varier les paramètres du procédé le long des trajectoires selon un modèle morphologique**
    - *La morphologie des cordons est modifiée pour respecter la géométrie (aux phénomènes thermiques près)*
    - *Les trajectoires ou la méthode de tranchage sont simples*
- **Stratégies en boucle fermée : asservissement des paramètres pour maîtriser la thermique**
  - 3. Contrôle des paramètres du procédé le long des trajectoires**
    - *Paramètres modifiés en temps réel pour respecter la thermique et par conséquent la géométrie*
    - *L'instrumentation est plus complexe*

# Les procédés DED : chaîne numérique

- Quel que soit le procédé, le principe repose sur la fabrication d'une succession de tranches 2D ou 3D et l'empilement des entités.



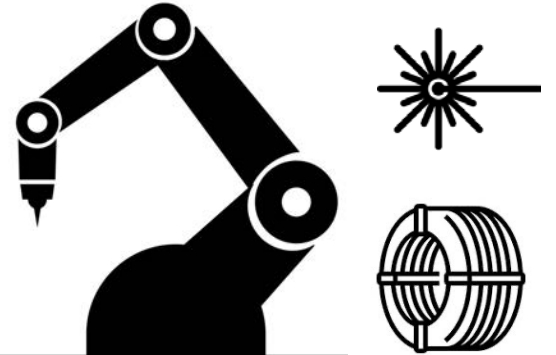
Modèle 3D  
(CAO)



FAO



FAO



Exécution

- Décomposition en entités
- Tranchage en couches planes ou non planes

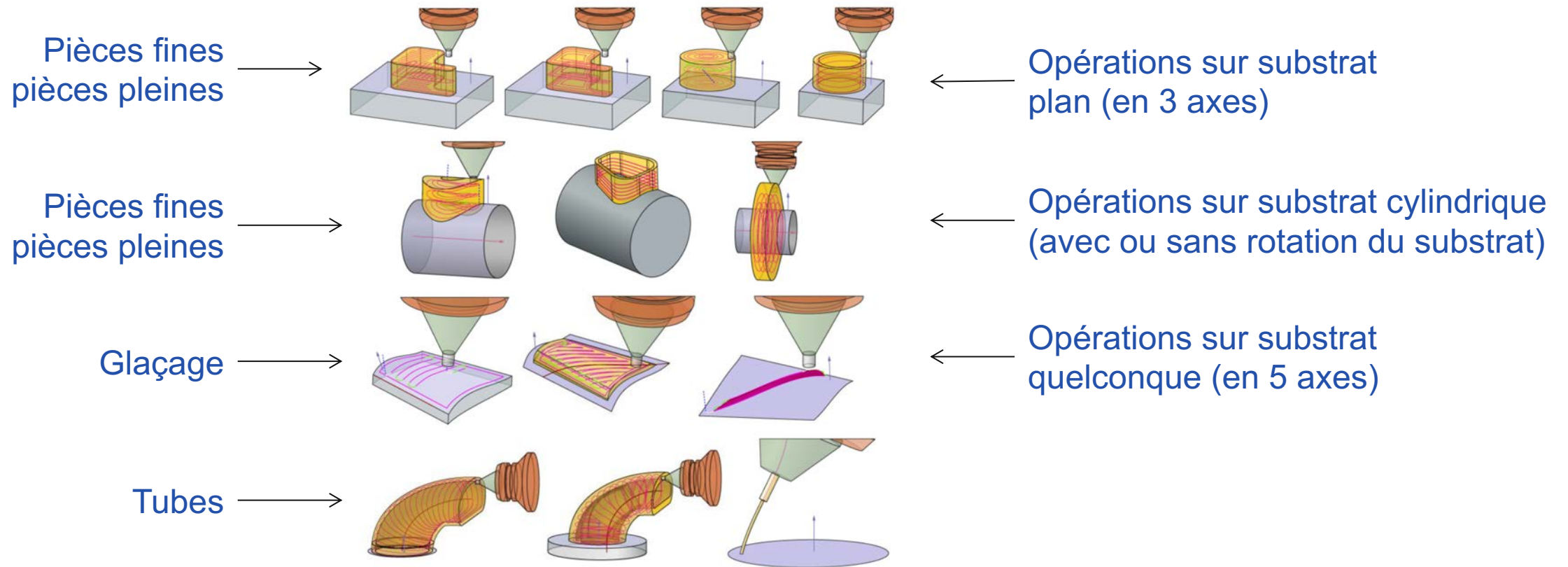
- Paramètres du procédé
- Trajectoires par couche
- Empilement des couches

- Pilotage en BO ou BF
- Mesure des grandeurs (température, taille bain de fusion, etc.)
- Calcul des consignes



# Les procédés DED : logiciels de FAO (NX)

Remarque : stratégies à géométrie de cordons fixe (boudins de section circulaire)

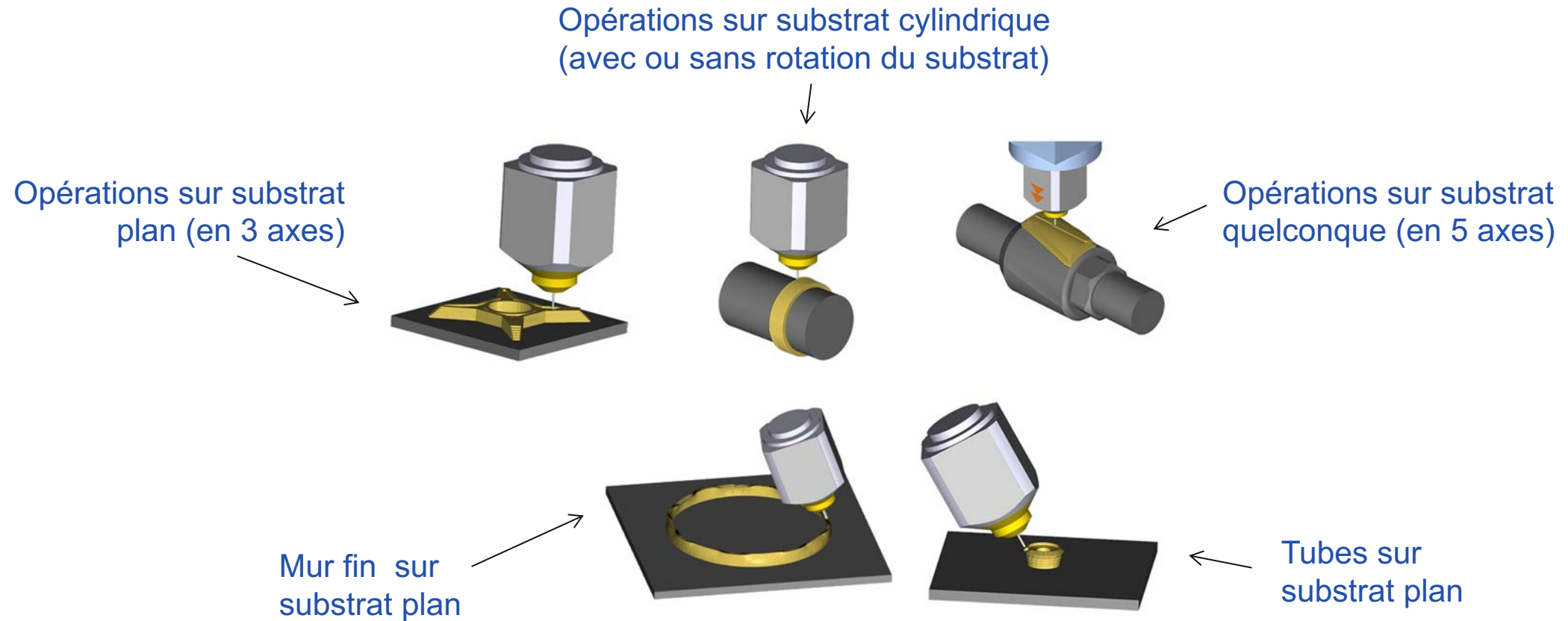




# Les procédés DED : logiciels de FAO (ESPRIT)



Remarque : stratégies à géométrie de cordons fixe (boudins de section circulaire)



# Maitrise du dépôt de cordons

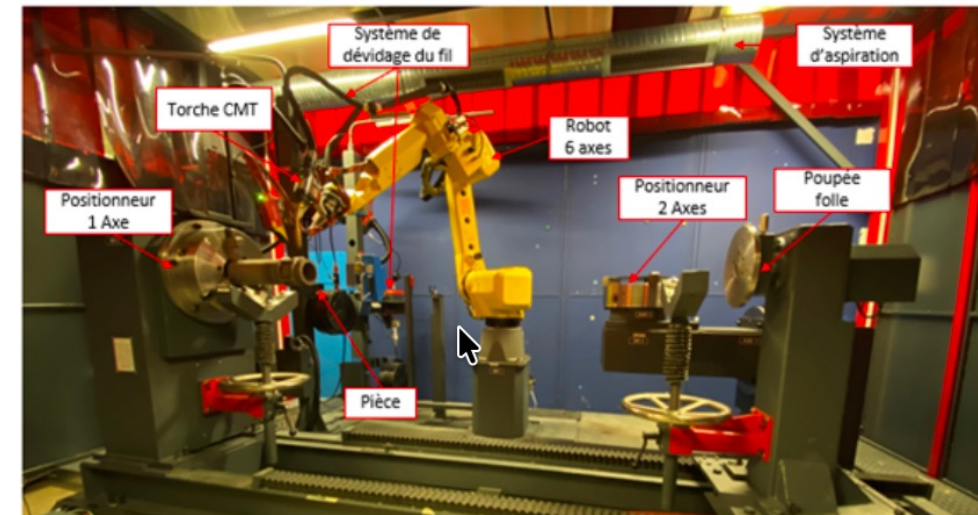
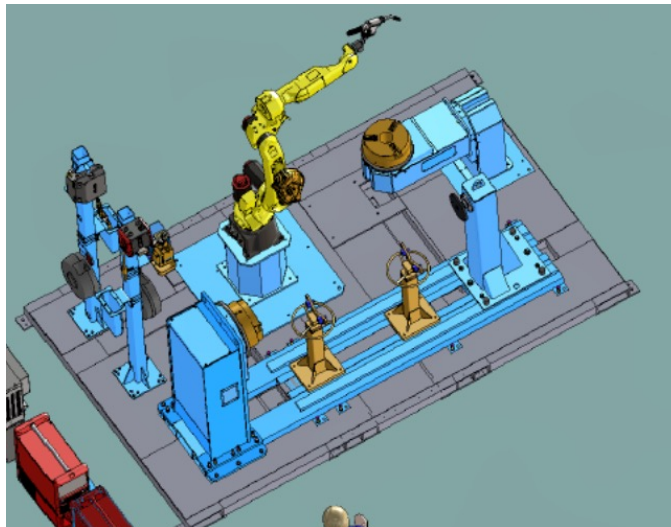
Exemple du procédé DED-AW

# Plateforme Additive Factory Hub

## □ Plateforme DED-AW (WAAM)

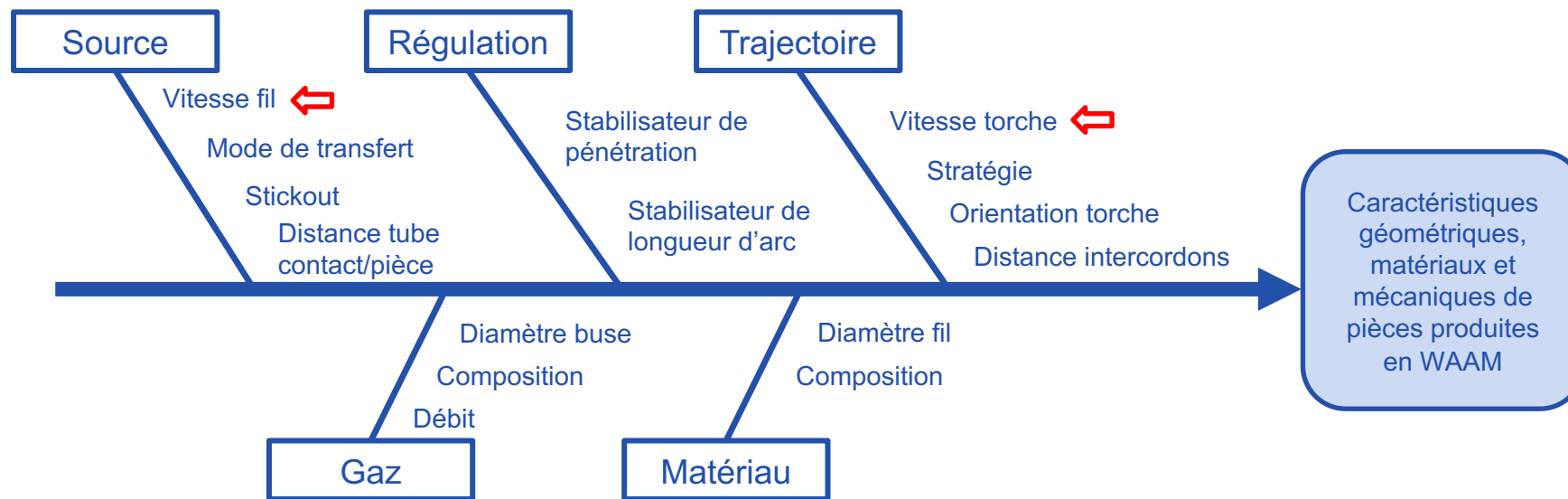
- Robot anthropomorphe 6 axes Fanuc Arc Mate 120iC équipé d'un contrôleur R-30iB.
- Soudage CMT, TIG, Plasma, Source Fronius TPS 600i

- Thèse de François Rouchon : *Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM*, juin 2022, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay.



# Maitrise du dépôt de cordons

- Objectif : Identifier la relation entre les paramètres procédé et les dimensions géométriques des cordons pour établir un modèle prédictif



# Maitrise du dépôt de cordons

- Objectif : Identifier la relation entre les paramètres procédé et les dimensions géométriques des cordons pour établir un modèle prédictif

$V_f$

Vitesse fil

$V_a$

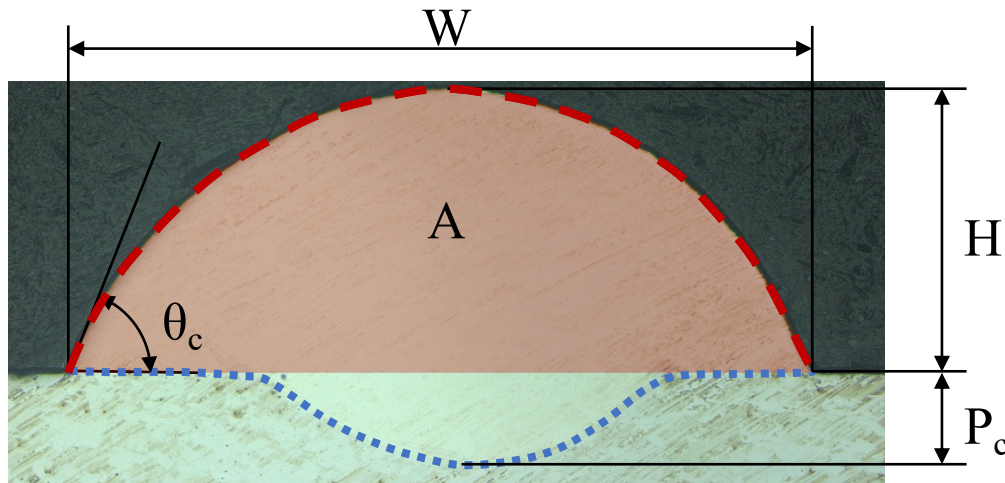
Vitesse  
d'avance

$$\text{Ratio } \lambda = \frac{V_f}{V_a}$$

**P**

Puissance source

Liens entre dimensions et paramètres



[1] Ghanadi et Pasebani, 2024

Dimensions :

Hauteur **H**

Largeur **W**

Aire **A**

DED-AW :  
Tension et intensité  
pilotées par la source  
en fonction de  $V_f$   
(loi de synergie).  
DED-LW : à gérer



# Maitrise du dépôt de cordons

## □ Caractérisation expérimentale

- Cordons rectilignes
- Substrat plan
- Plan d'expériences
  - *Fabrication et mesure des cordons*
  - *Fastidieux, chronophage, mais indispensable !*

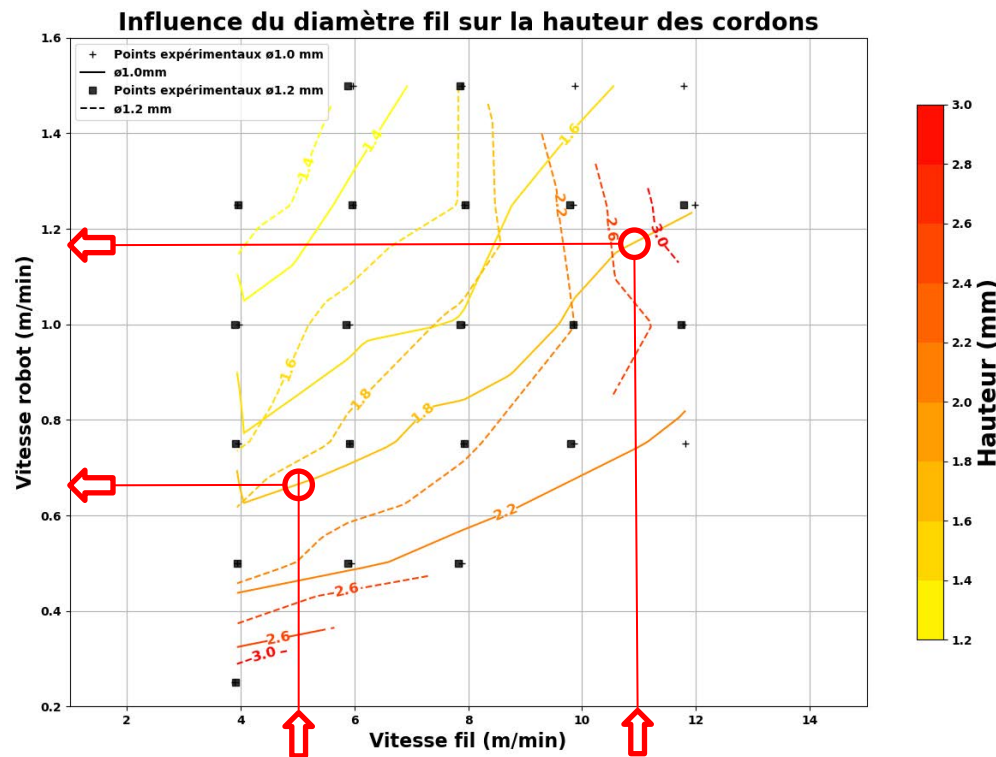


# Maitrise du dépôt de cordons

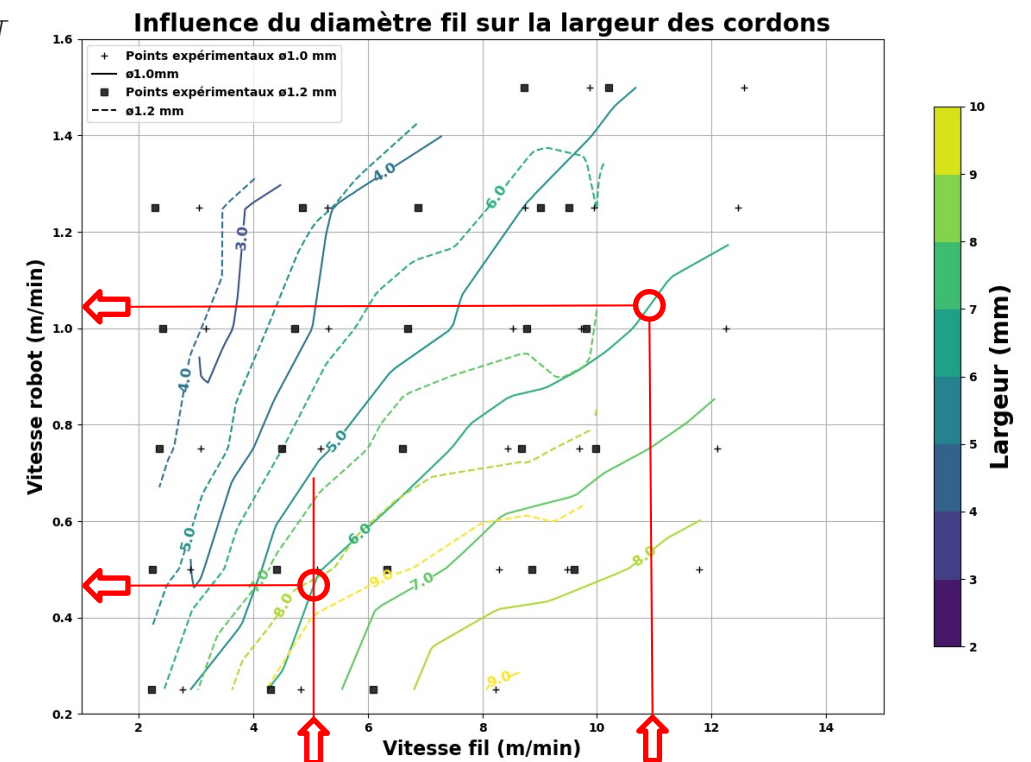
## □ Construction d'un abaque

### ▪ Interpolation bilinéaire des données expérimentales

Fil X90-IG,  
gaz M14  
synergie CMT



Différentes recettes pour la même hauteur (1,8mm)



Différentes recettes pour la même largeur (6mm)

➤ On ne peut pas maîtriser en même temps la largeur et la hauteur

# Maitrise du dépôt de cordons

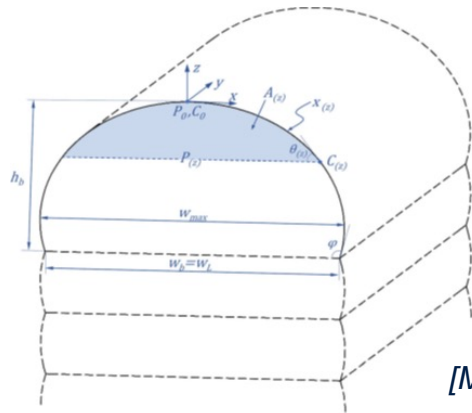
## □ Modélisation analytique de la géométrie du cordon

### ■ Modèles d'association

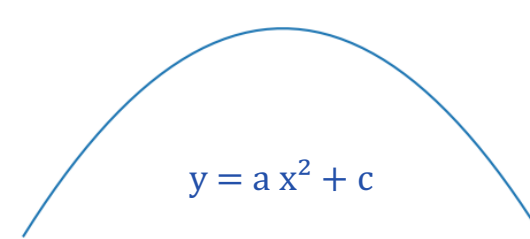
- *Parabolique*
- *Sinusoidale*
- *Gaussienne*
- *Arc de cercle*

### ■ Modèles analytiques

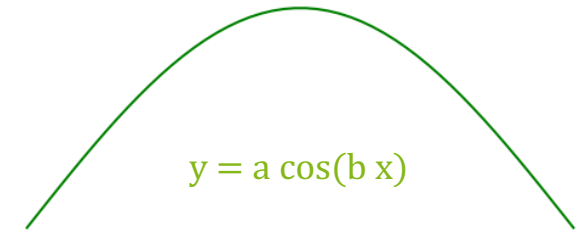
- *Équilibre entre la pression hydrostatique et la tension de surface*



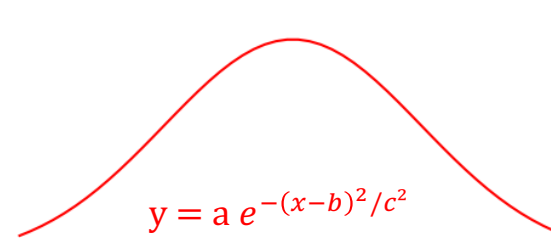
[Mohebbi2020]



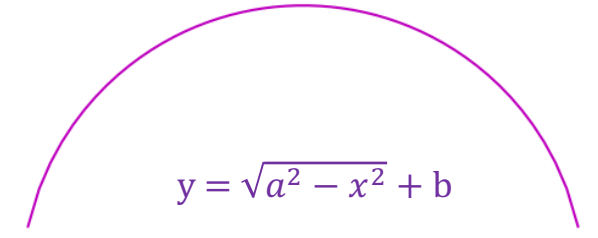
$$y = a x^2 + c$$



$$y = a \cos(b x)$$



$$y = a e^{-(x-b)^2/c^2}$$



$$y = \sqrt{a^2 - x^2} + b$$

[Cao2011], [Xiong2013], [Ding2015]



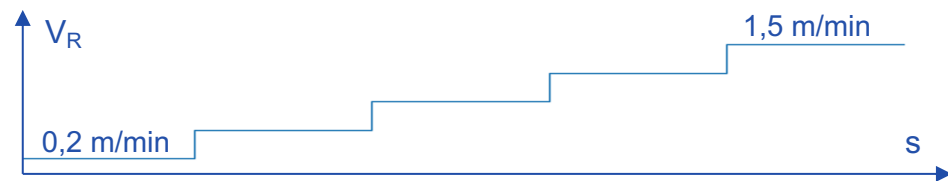
# Maîtrise du dépôt de cordons

## □ Objectif

- Piloter l'évolution de la géométrie des cordons en cours de fabrication

## □ Expérimentations

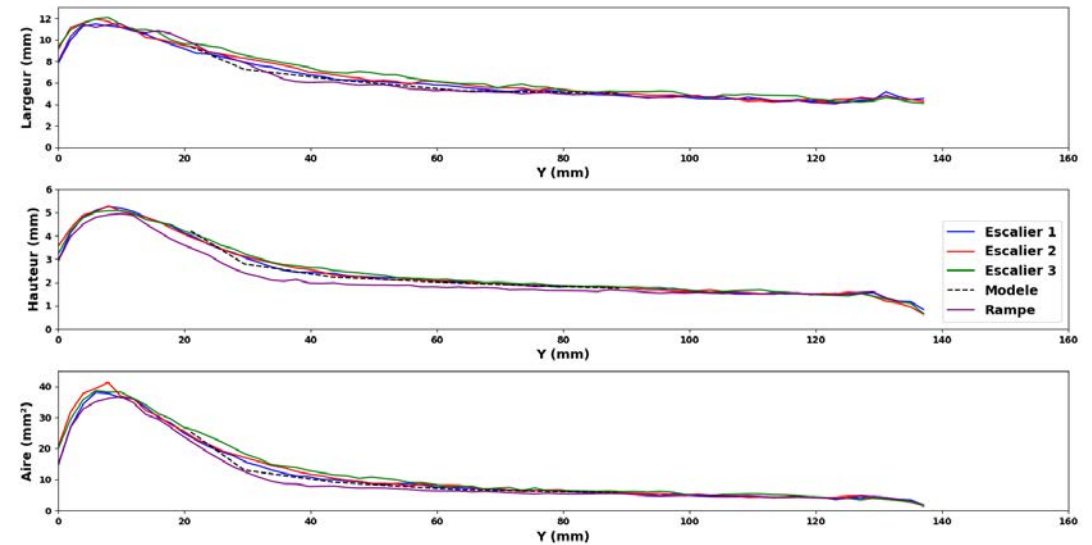
- Vitesse variable
- Paliers de vitesse : longueur de chaque marche : 10, 5 et 1 mm



Escalier 3

Escalier 2

Escalier 1



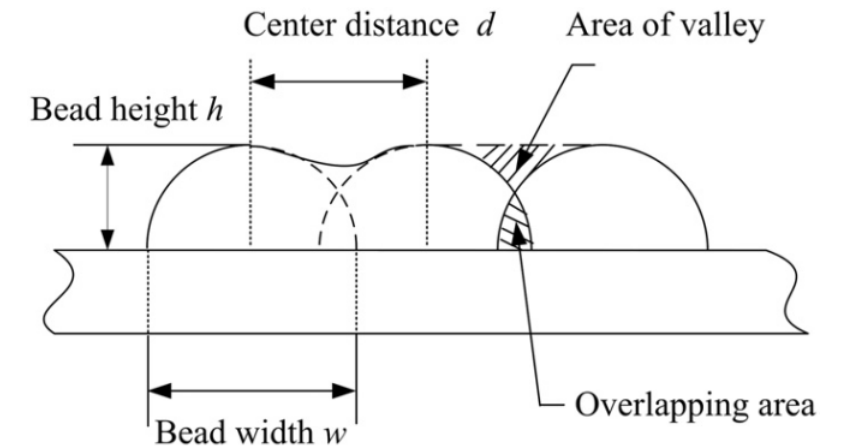
# Assemblage de cordons

# Juxtaposition de cordons

- Cette situation est largement rencontrée lors du remplissage de couches
- Comprendre et maîtriser la juxtaposition des cordons en fonction de leur géométrie et de la distance qui les sépare

## Modèle « Flat top Overlapping » [Cao2011],[Xiong2013],[Aiyiti2006]

- Repose sur la conservation des aires entre la zone de chevauchement et la vallée créée entre 2 cordons.
- La distance  $d^*$  optimale est obtenue lorsque la surface entre les 2 cordons est plane et que l'aire de la zone de chevauchement est égale à l'aire de la vallée.

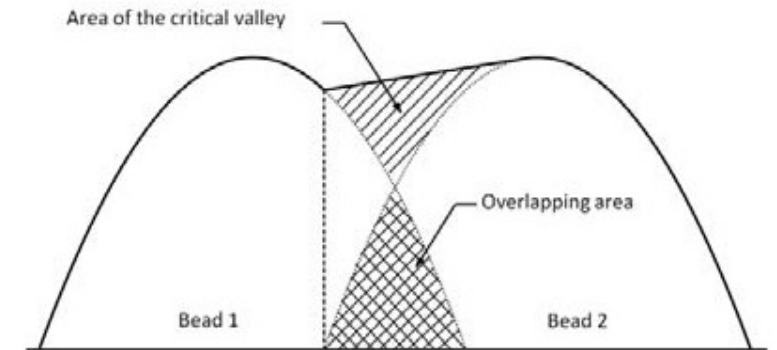


# Juxtaposition de cordons

- Cette situation est largement rencontrée lors du remplissage de couches
- Maîtriser et comprendre comment les cordons se joignent en fonction de leur topologie et de la distance qui les sépare

## Modèle « Tangent Overlapping » [Ding2015]

- Ici la surface supérieure de la zone de vallée est tangente uniquement au sommet du cordon 2.
- La distance optimale  $d^*$  est la distance entre les 2 cordons permettant de remplir la zone de vallée au maximum sans déformer le cordon 2 à cause d'un excédent de matière.

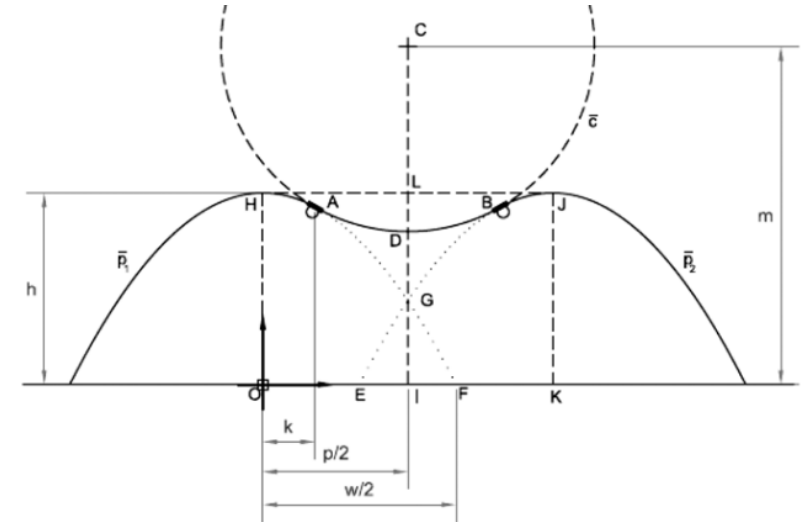


# Juxtaposition de cordons

- Cette situation est largement rencontrée lors du remplissage de couches
- Maîtriser et comprendre comment les cordons se joignent en fonction de leur topologie et de la distance qui les sépare

## Modèle « Double Tangent Overlapping » [Suryakumar2011]

- Modèle TOM en considérant que la surface supérieure est tangente aux 2 cordons et forme donc un arc de cercle
- Conservation de l'aire entre la zone de chevauchement et la zone de vallée entre 2 cordons à sections polynomiales.



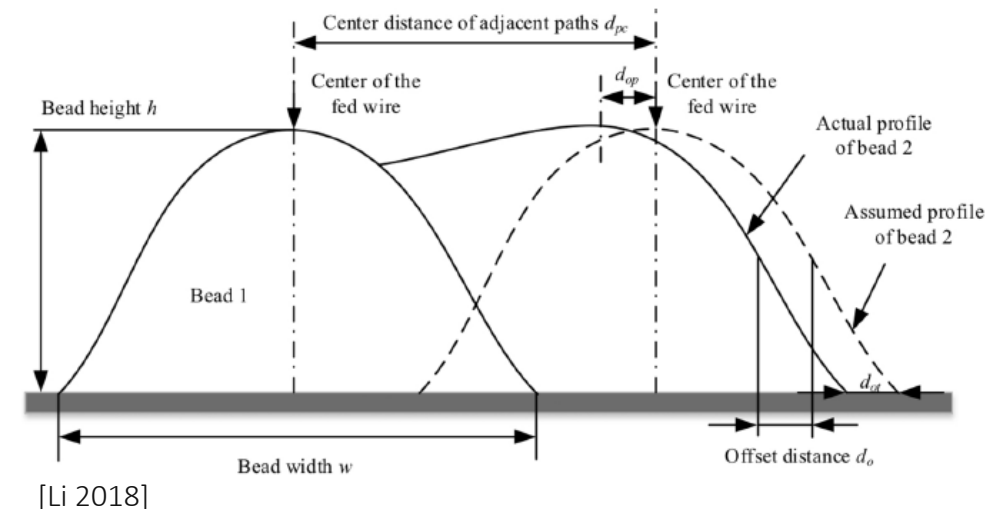
# Juxtaposition de cordons

## □ Décalage des cordons

- Le comportement du bain liquide dont résulte la géométrie du cordon fabriqué semble différent en présence d'un cordon adjacent déposé antérieurement
- Effet d'étalement du cordon qui se traduit par un décalage du centre du cordon fraîchement déposé par rapport à la position de la trajectoire programmée

➤ Effet lié à la tension de surface (DED-XX)

➤ Effet lié à l'arc qui suit le plus court chemin (DED-AW)



# Juxtaposition de cordons

## □ Décalage des cordons

- Le comportement du bain liquide dont résulte la géométrie du cordon fabriqué semble différent en présence d'un cordon adjacent déposé antérieurement
- Effet d'étalement du cordon qui se traduit par un décalage du centre du cordon fraîchement déposé par rapport à la position de la trajectoire programmée



*Exemple en DED-LW*

[Pizzol 25]

# Juxtaposition de cordons : exemples en DED-AW

## □ Configuration expérimentale

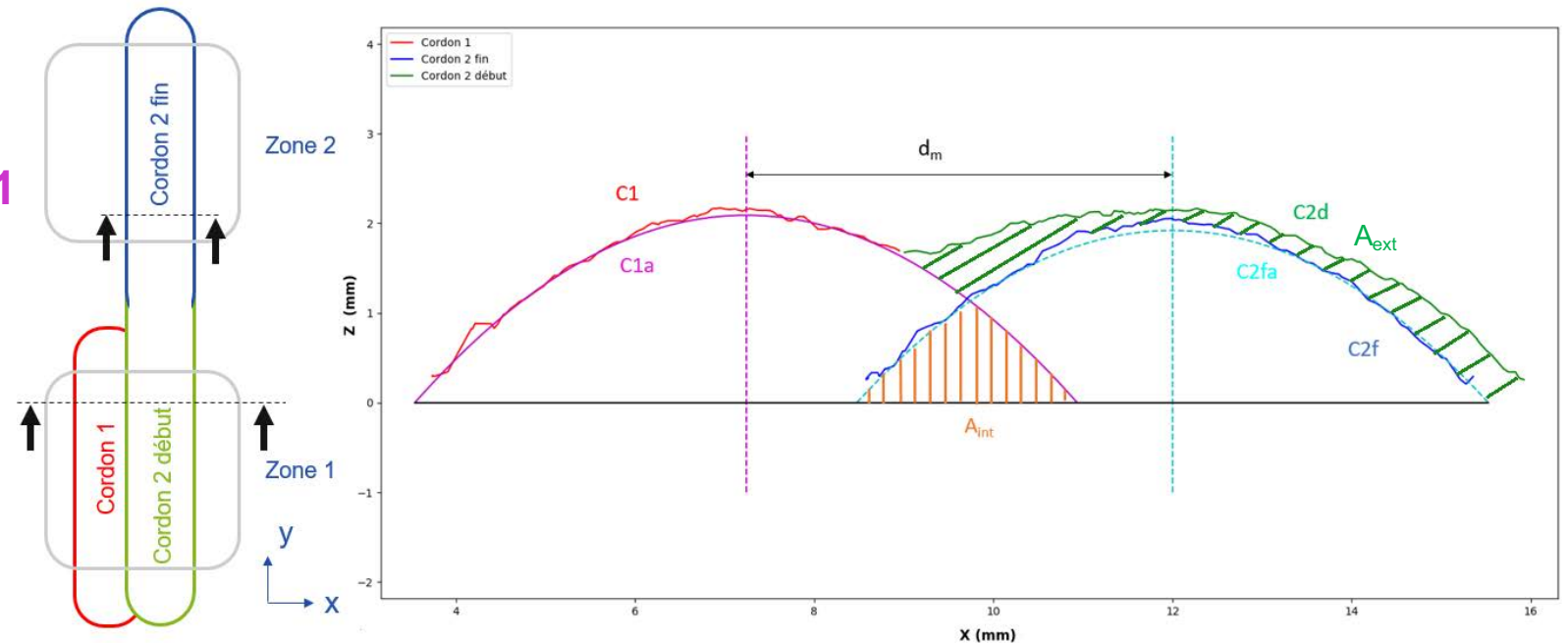
**C1 : mesure cordon 1**

**C1a : modèle polynomial cordon 1**

**C2d : mesure début cordon 2**

**C2f : mesure fin cordon 2**

**C2fa : modèle poly. fin cordon 2**



Fil X90-IG  $\varnothing 1,0$  mm ; gaz M14 ; synergie CMT 3248

$V_r = 0,75$  m/min ;  $V_f = 8$  m/min ;  $l = 10,67$

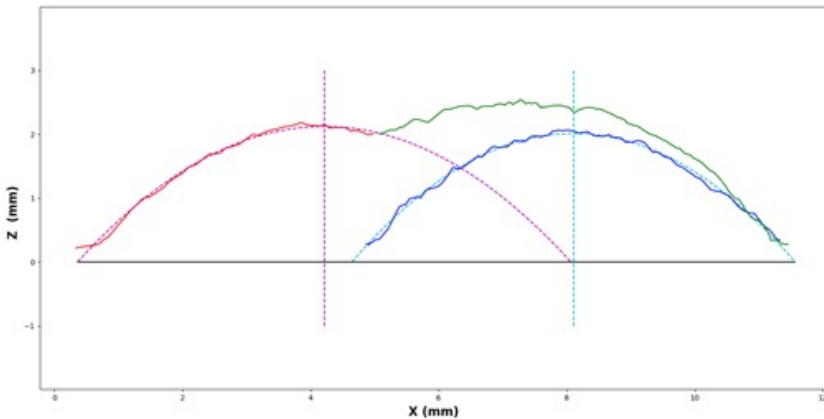
[Rouchon 22]



# Juxtaposition de cordons : exemples en DED-AW

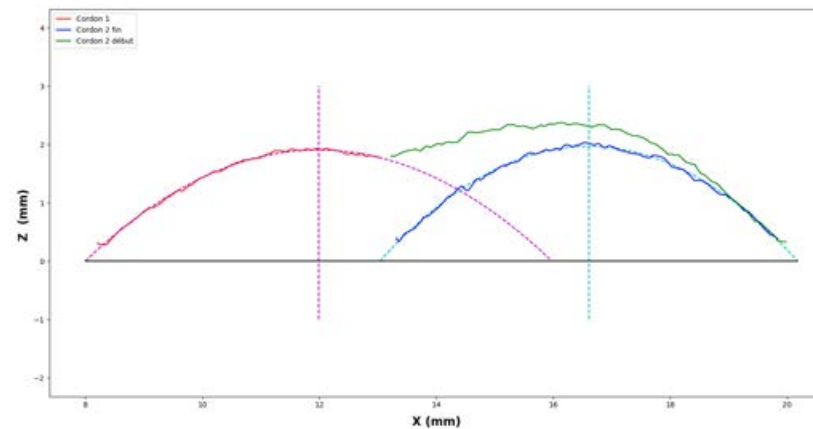
- Plan d'expériences avec  $0.6w < d_{\text{prog}} < 0.8 w$  ( $w$  largeur)
- Ligne moyenne du second cordon ne semble pas se décaler significativement lorsqu'il est juxtaposé

$d_{\text{prog}} = 0,6.w = 3,92\text{mm}$   
 $d_m = 4,05\text{mm}$   
 $> \varepsilon = +3,2\%$



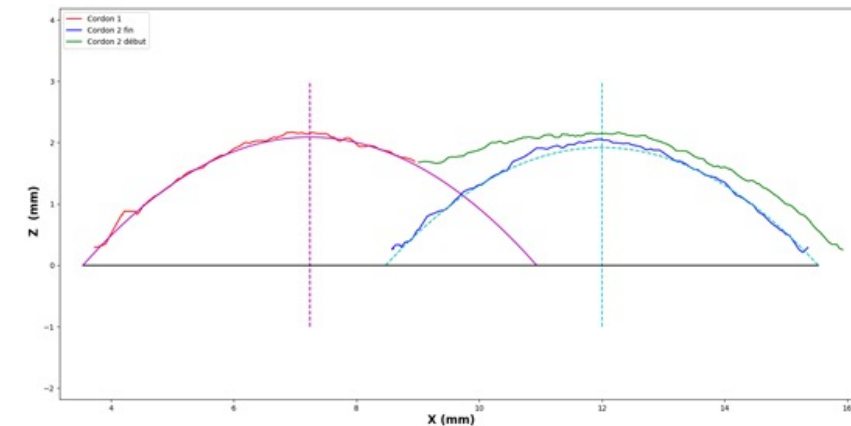
Allure « **Tangent Overlapping** » ?  
Aire int :  $1,55 \text{ mm}^2$   
Aire ext :  $1,01 \text{ mm}^2$   
 $> -35\%$

$d_{\text{prog}} = 0,7.w = 4,57\text{mm}$   
 $d_m = 4,44\text{mm}$   
 $> \varepsilon = -3\%$



Allure « **Tangent Overlapping** » ?  
Aire int :  $1,29 \text{ mm}^2$   
Aire ext :  $1,35 \text{ mm}^2$   
 $> +5\%$

$d_{\text{prog}} = 0,8.w = 5,23\text{mm}$   
 $d_m = 4,79\text{mm}$   
 $> \varepsilon = -8,4\%$



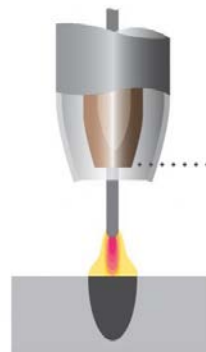
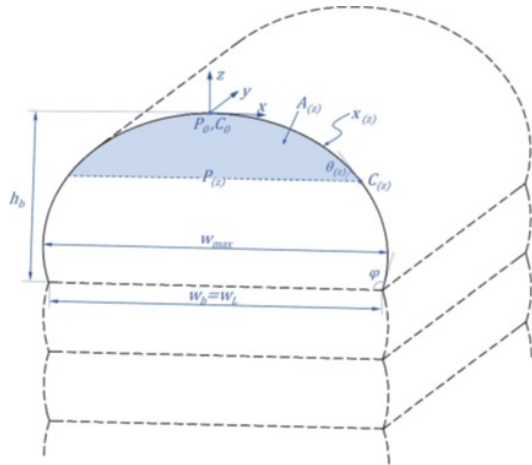
Allure « **Double Tangent Overlapping** » ?  
Aire int :  $1,10 \text{ mm}^2$   
Aire ext :  $1,26 \text{ mm}^2$   
 $> +15\%$

# Empilements de cordons

## □ Modèle analytique [Mohebbi2020]

- Modèle physique avec prise en compte de la tension de surface

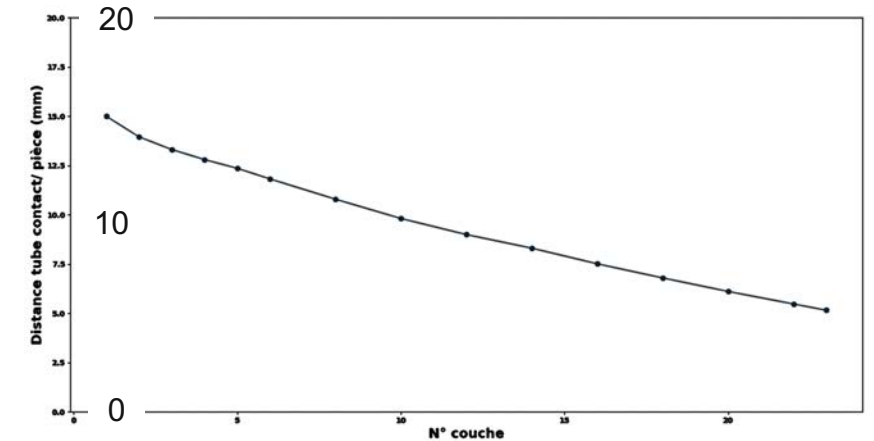
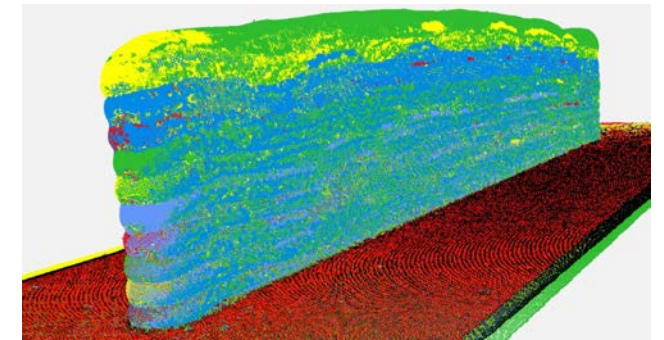
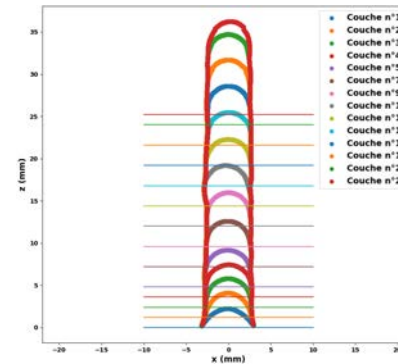
□ Paramètres difficiles à identifier



*Dérive de la distance  
tube contact / pièce*

## □ Expériences en DED-AW [Rouchon 22]

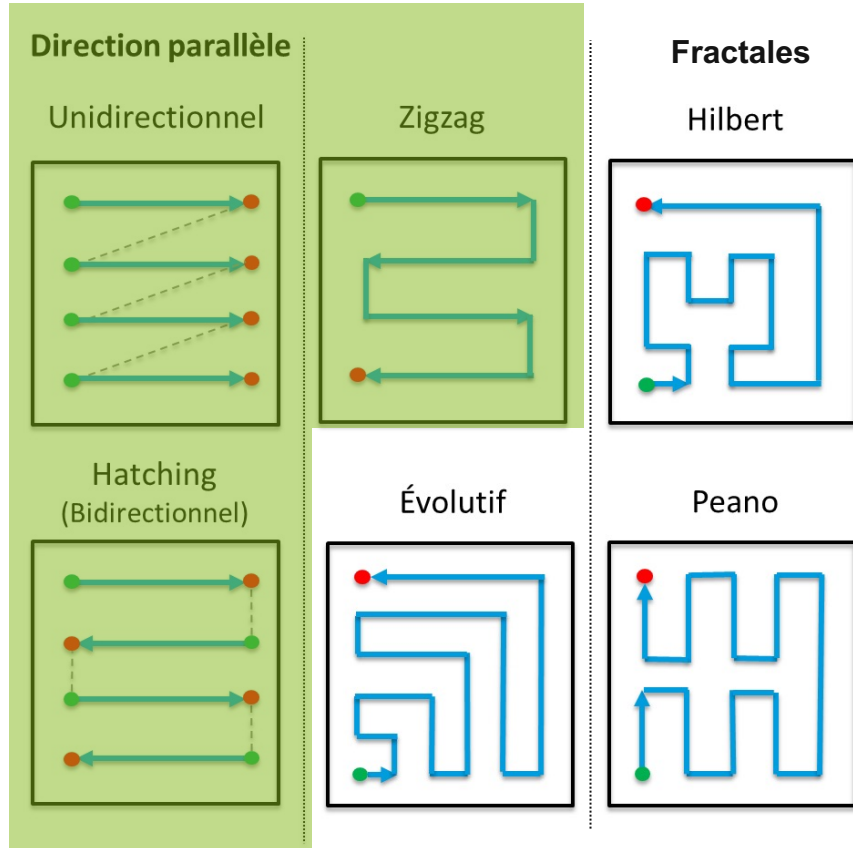
- Mauvaise appréciation de la hauteur de couche



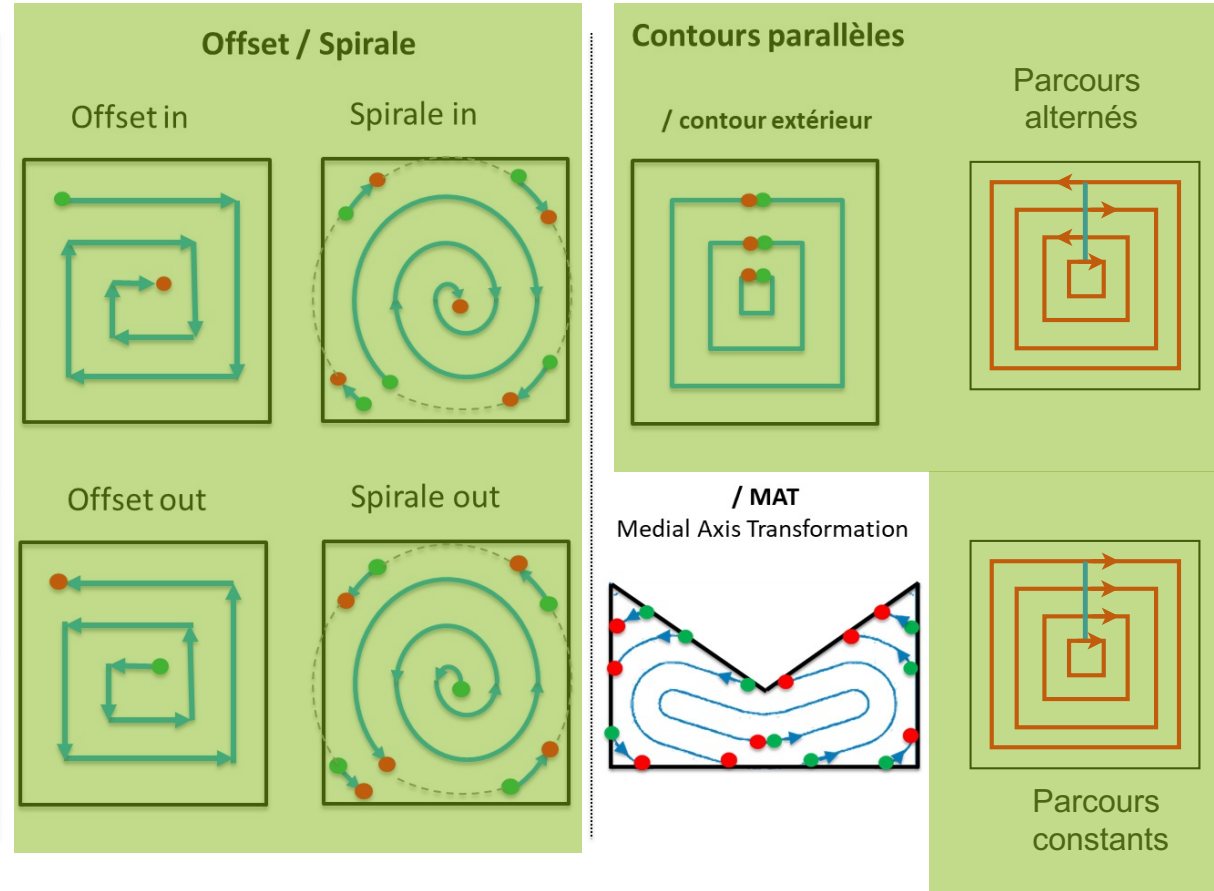
# Stratégies de remplissage

# Stratégies de remplissage

Implémentées dans les logiciels



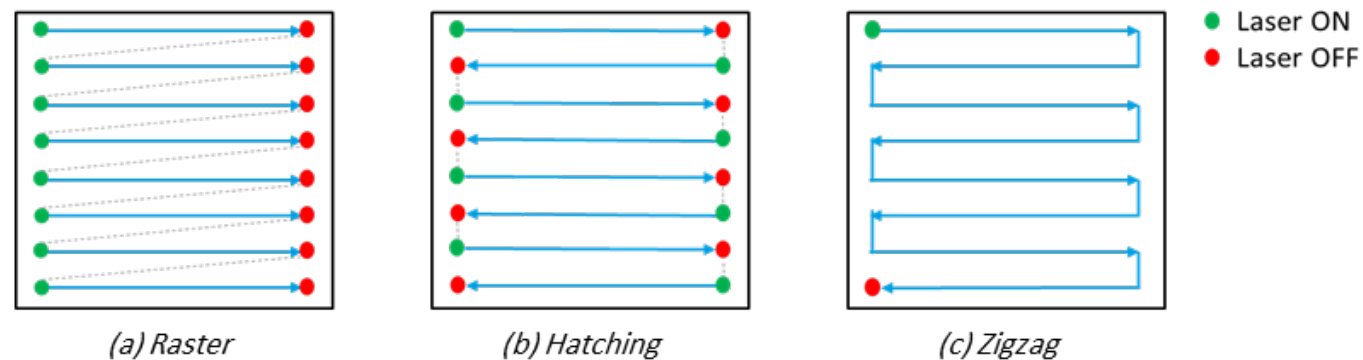
Implémentées dans les logiciels



# Stratégies de remplissage

## □ Trajectoires rectilignes parallèles

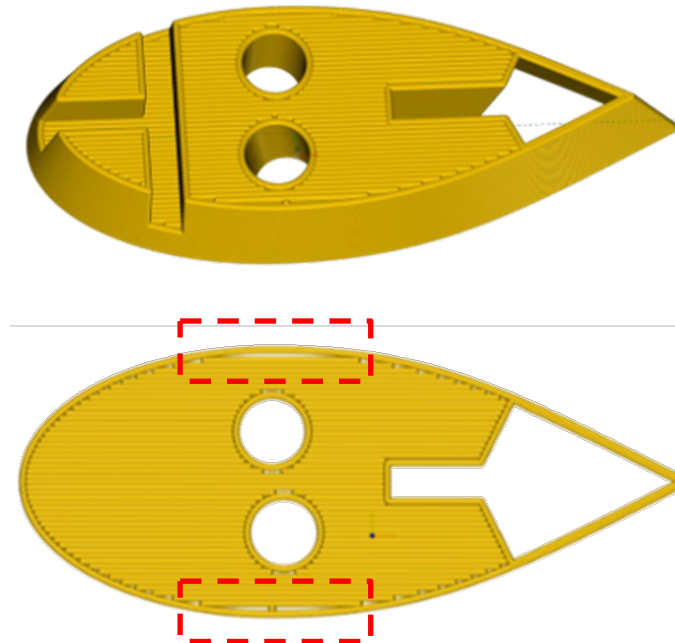
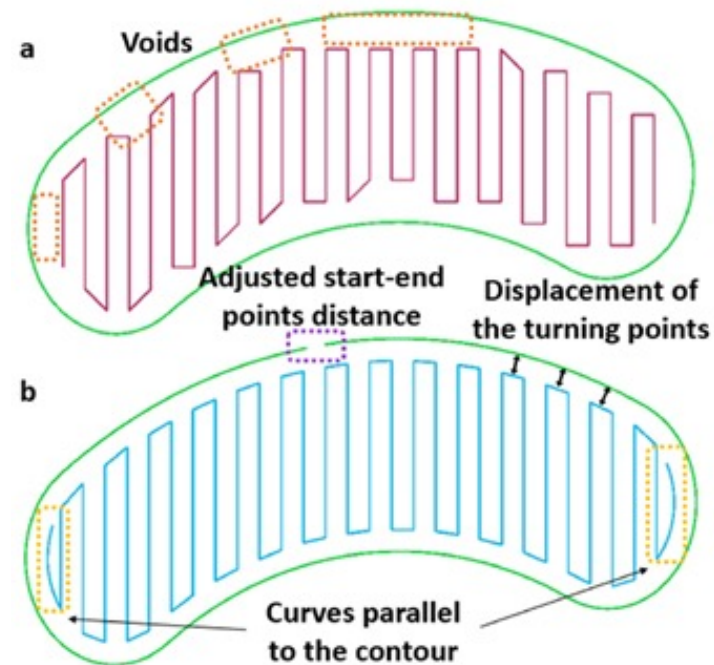
- La buse/torche se déplace selon des lignes droites parallèles, en mode oneway (raster) ou en mode zig-zag.
- **Avantage**
  - *stratégie simple à mettre en œuvre, la trajectoire est facile à calculer*
- **Inconvénients**
  - *Nombreux arrêts de la source donc de phases de retrait de fil et de reprise (risque de défauts)*
  - *Changements de direction à la fin de chaque segment (ralentissement, accumulation de chaleur)*
  - *Nombreux trajets en mode rapide sans interaction avec la matière*



# Stratégies de remplissage

## □ Trajectoires rectilignes parallèles

- **Nécessite d'effectuer une trajectoire de contournage pour garantir la finition du bord de la pièce.**
  - *Présence possible de lacunes ou de zones non couvertes par l'outil entre le remplissage et le contour de la pièce.*
  - *Ajuster la distance entre passes ou d'ajouter des portions de trajectoires dans les zones concernées [Flores19].*



# Stratégies de remplissage

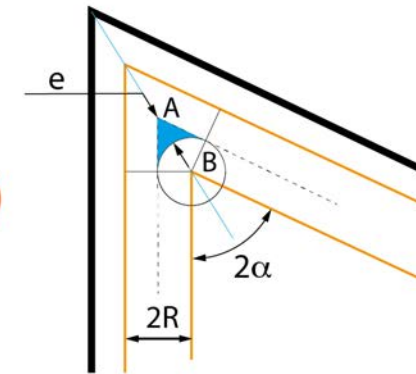
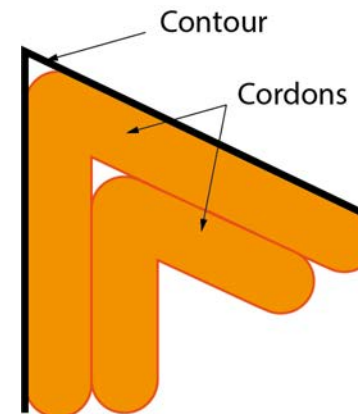
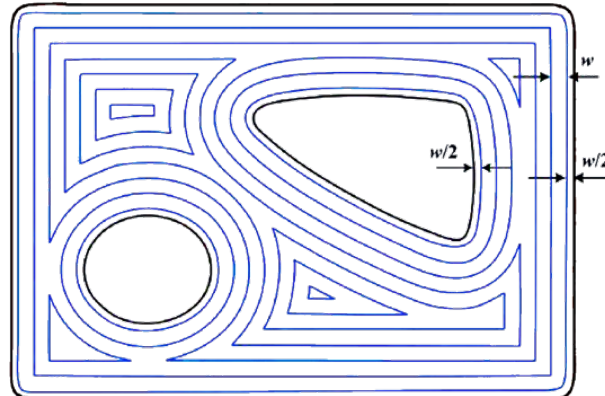
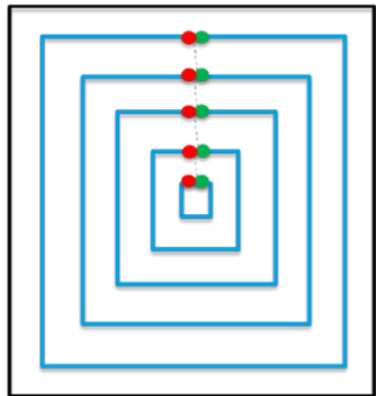
## □ Trajectoires en contour

### ■ Avantage

- Permet de remplir plus facilement sans lacune au bord et respect de la géométrie sur les bords

### ■ Inconvénient

- Présence de zones vides ou oubliées par l'algorithme. Le dépôt d'un cordon dans ces zones peut être plus compliqué ou impossible.



$$R = L_{AB} \sin \alpha$$

$$e = L_{AB} - R$$

$$e = R \left( \frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right)$$



# Stratégies de remplissage

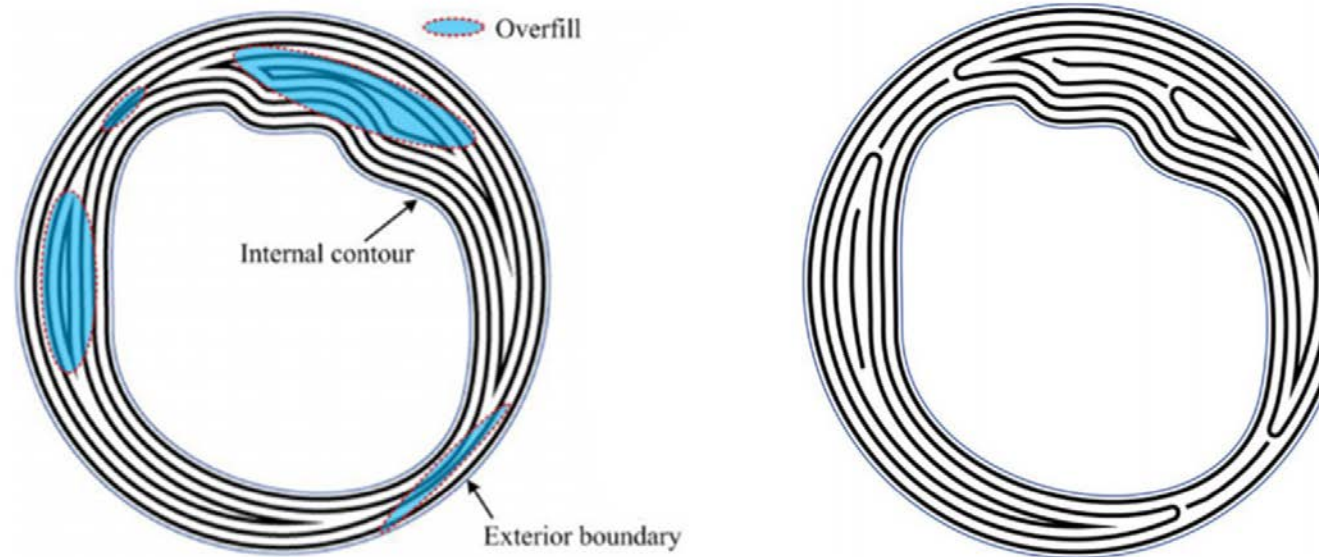
## □ Trajectoires en contour

### ▪ **Avantage**

- *Permet de remplir plus facilement sans lacune, respect de la géométrie sur les bords*

### ▪ **Inconvénient**

- *Présence de zones vides ou « surchargée ». Le dépôt d'un cordon dans ces zones peut être plus compliqué ou impossible.*

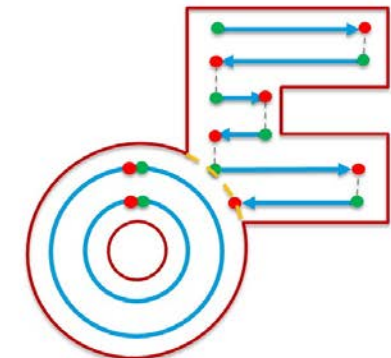
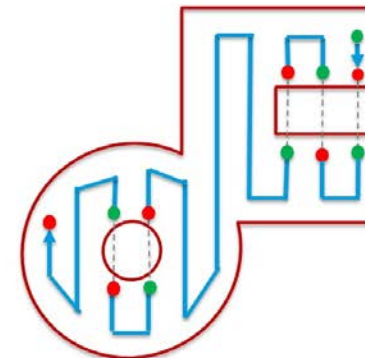
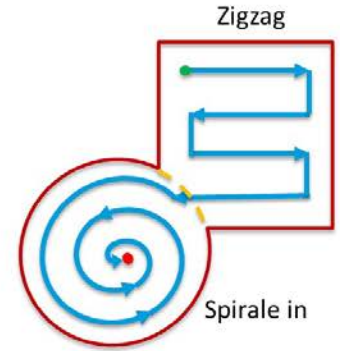
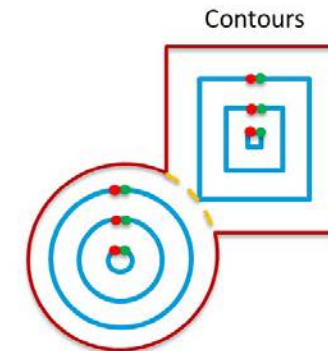
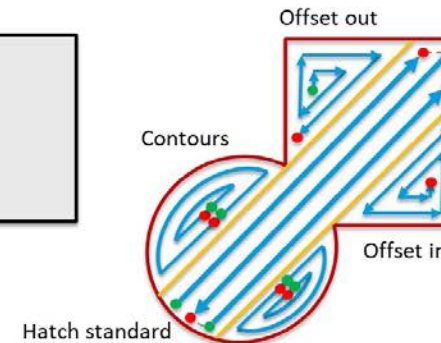
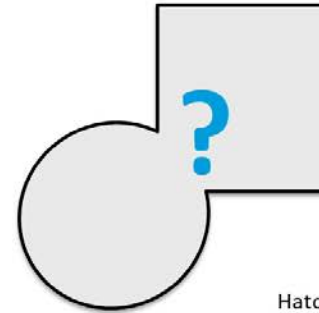




# Stratégies de remplissage

## □ Stratégies combinées

- Dépend des entités à fabriquer
- Pas de découpage automatique dans les logiciels de FAO

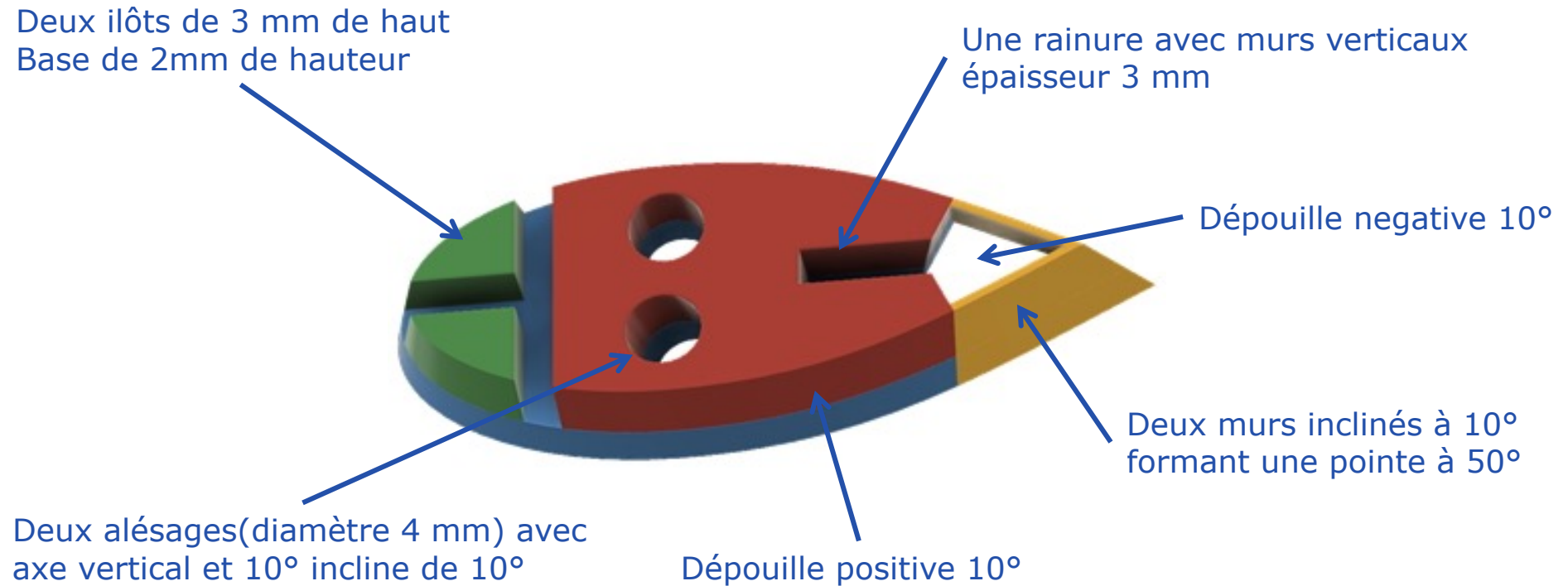


# **Etude comparative des stratégies de remplissage**

**Exemple d'une production en DED-LP**

# Pièce test

- La pièce d'essai proposée présente une géométrie en protrusion (40 x 16 x 5 mm) avec une dépouille de 10° et différentes caractéristiques :

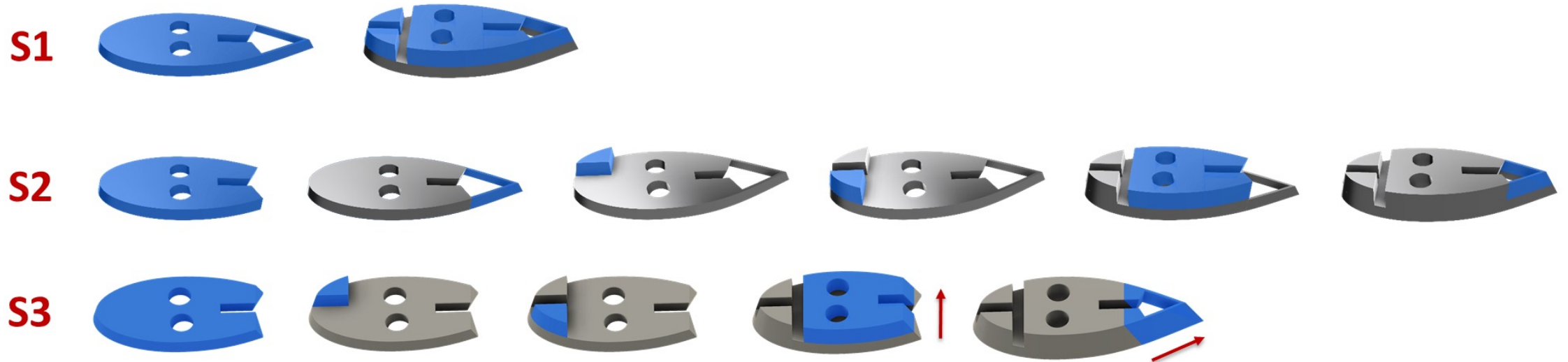


# Pièce test

## □ Décomposition :

## ➤ Scénario 1 : construction couche par couche

- Scénario 2 : construction entité par entité (risques de collisions avec la buse)
- Scénario 3 : construction de la pointe en 5-axes (risques de collisions avec la buse)

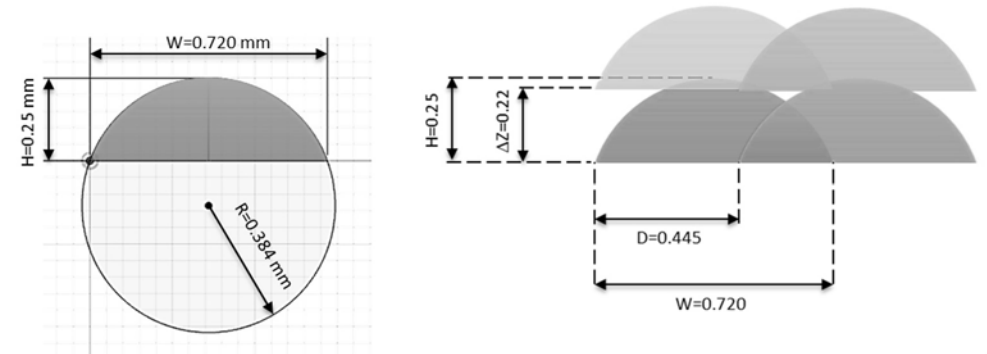


# Paramètres du procédé

- Procédé DED-LP
- Matériau : IN718
- Machine : BeAM modulo400



## Morphologie des cordons



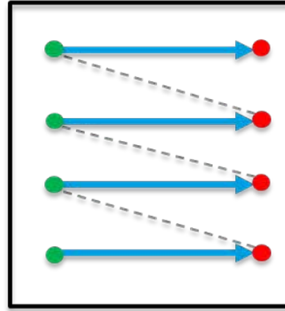
## □ Paramètres

Laser power P [W]	Velocity V [mm/min]	Powder feed Q [g/min]	Layer thik. $\Delta z$ [mm]	Hatch dist. D [mm]	Bead width W [mm]	Bead height H [mm]	Temp. switch [s]	Temp. per layer [s]
325	2000	6	0.22	0.445	0.72	0.25	0.2	10

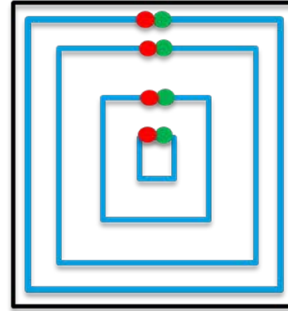
Temps d'attente  
Laser On/Off

# Stratégies de fabrication

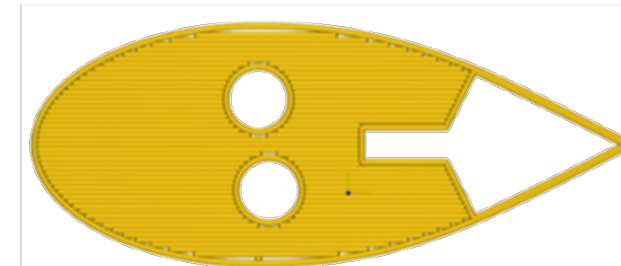
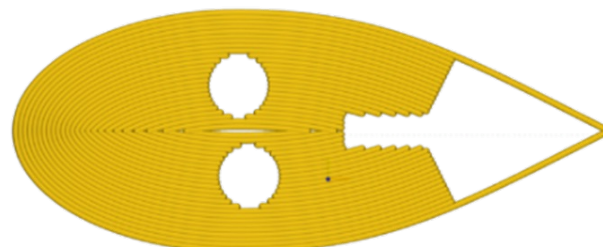
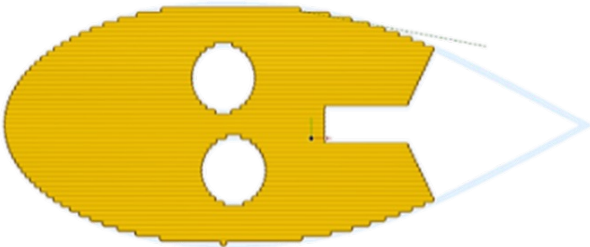
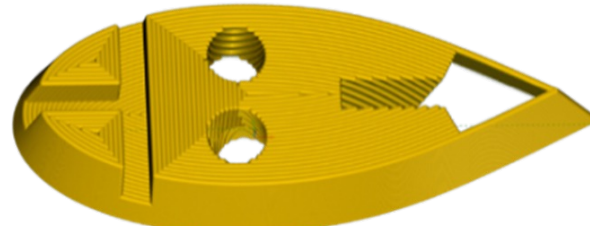
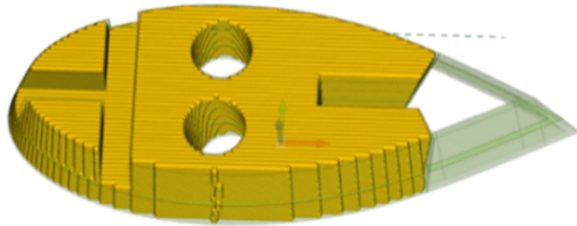
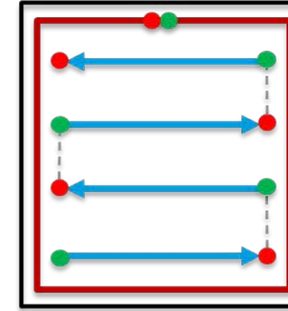
Unidirectional



Concentric



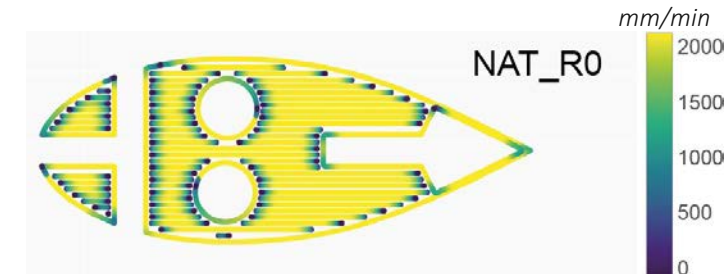
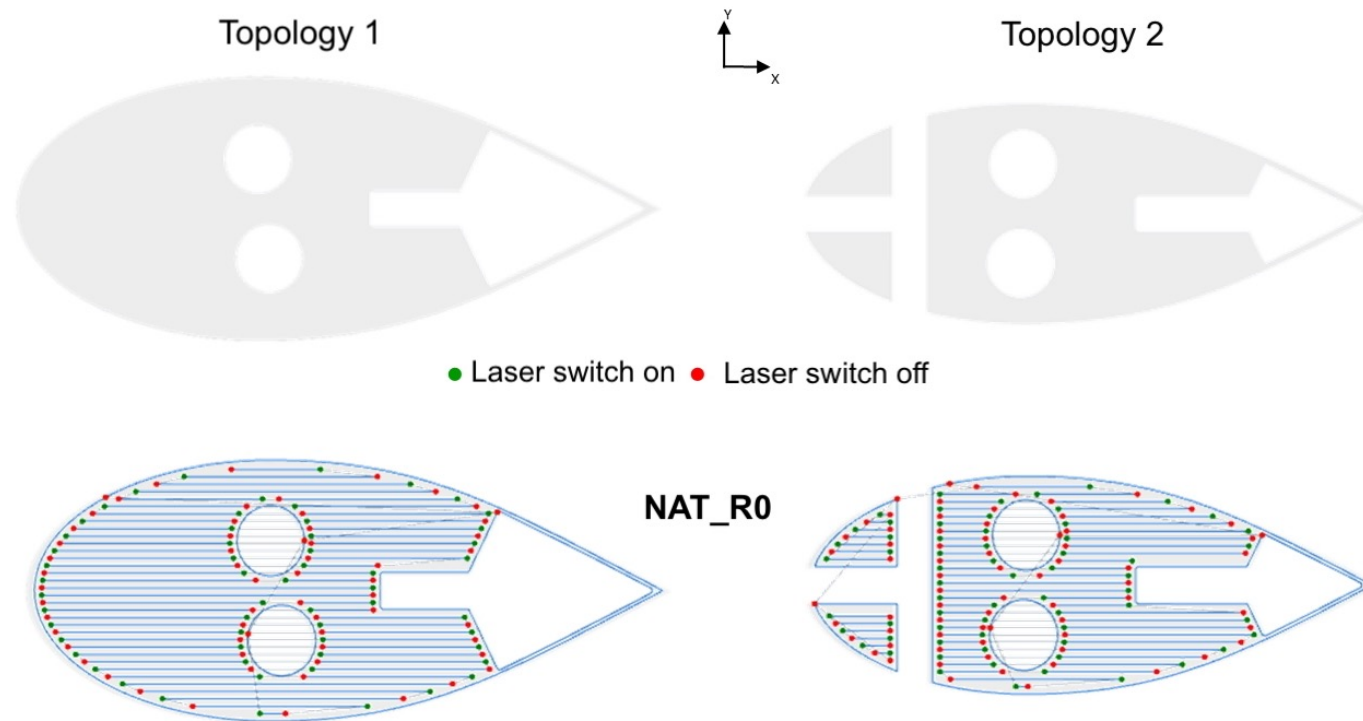
Natural





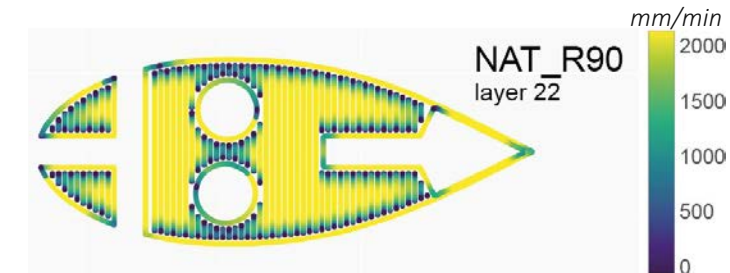
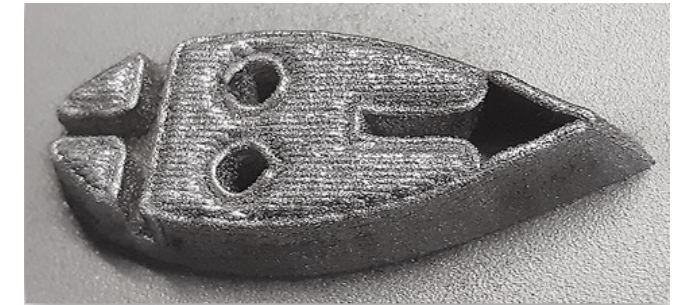
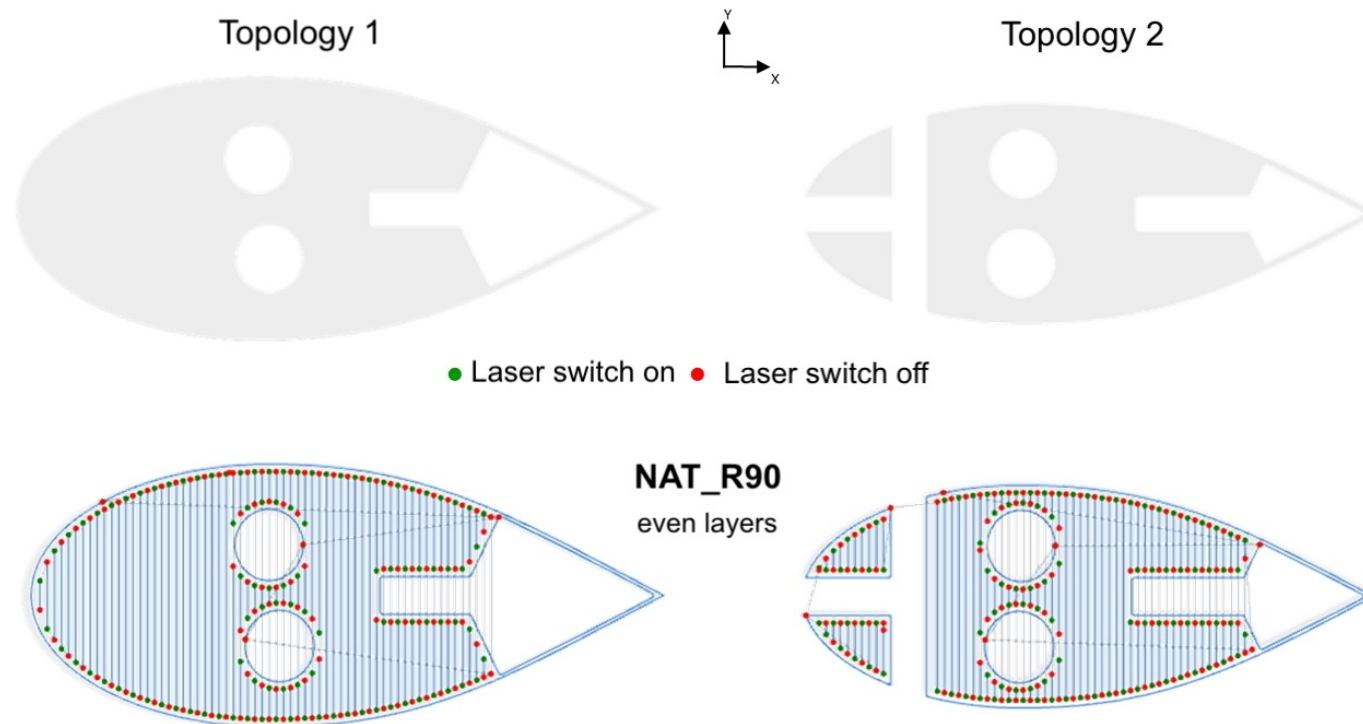
## □ NATural R0

- Stratégie Raster, contour intérieur et extérieur, mur avec deux cordons.



## □ NATural R90

- Stratégie Raster, contour intérieur et extérieur, mur avec deux cordons et rotation de 90° entre les couches.



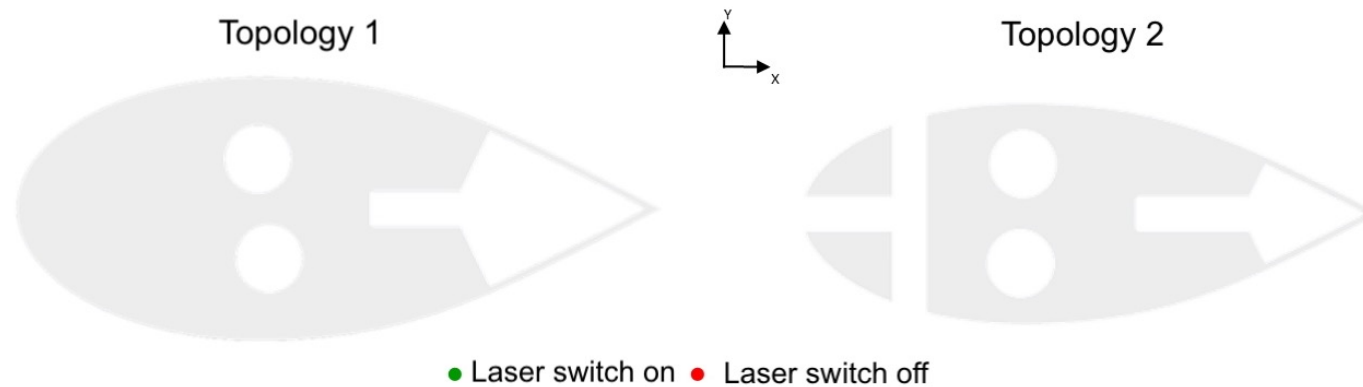
*Beaucoup de passes,  
beaucoup de ralentissements*



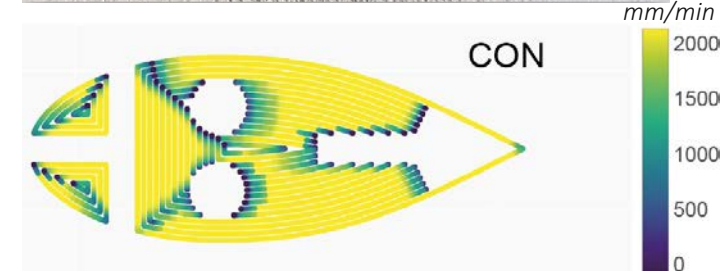
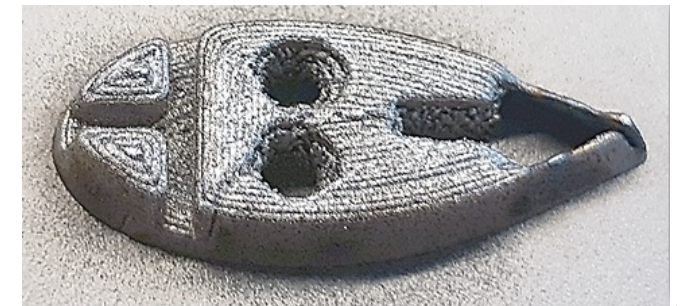
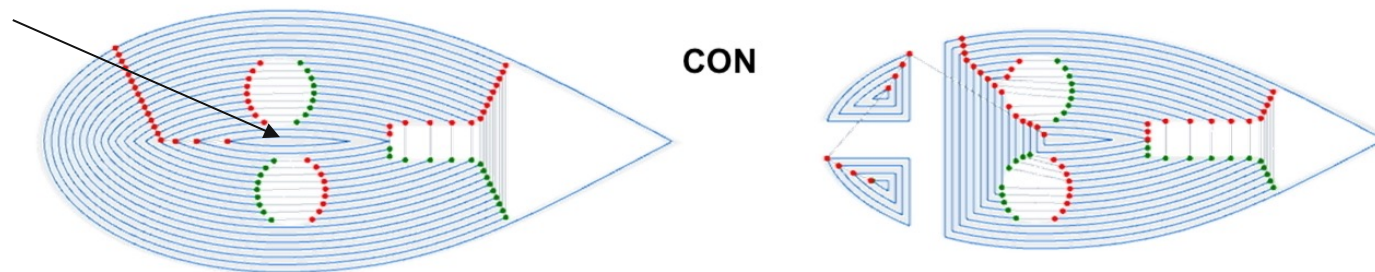
## □ CONcentric

- Parallèle au contour extérieur, mur avec un cordon, pas de contournage intérieur.

Même pièce échelle x10

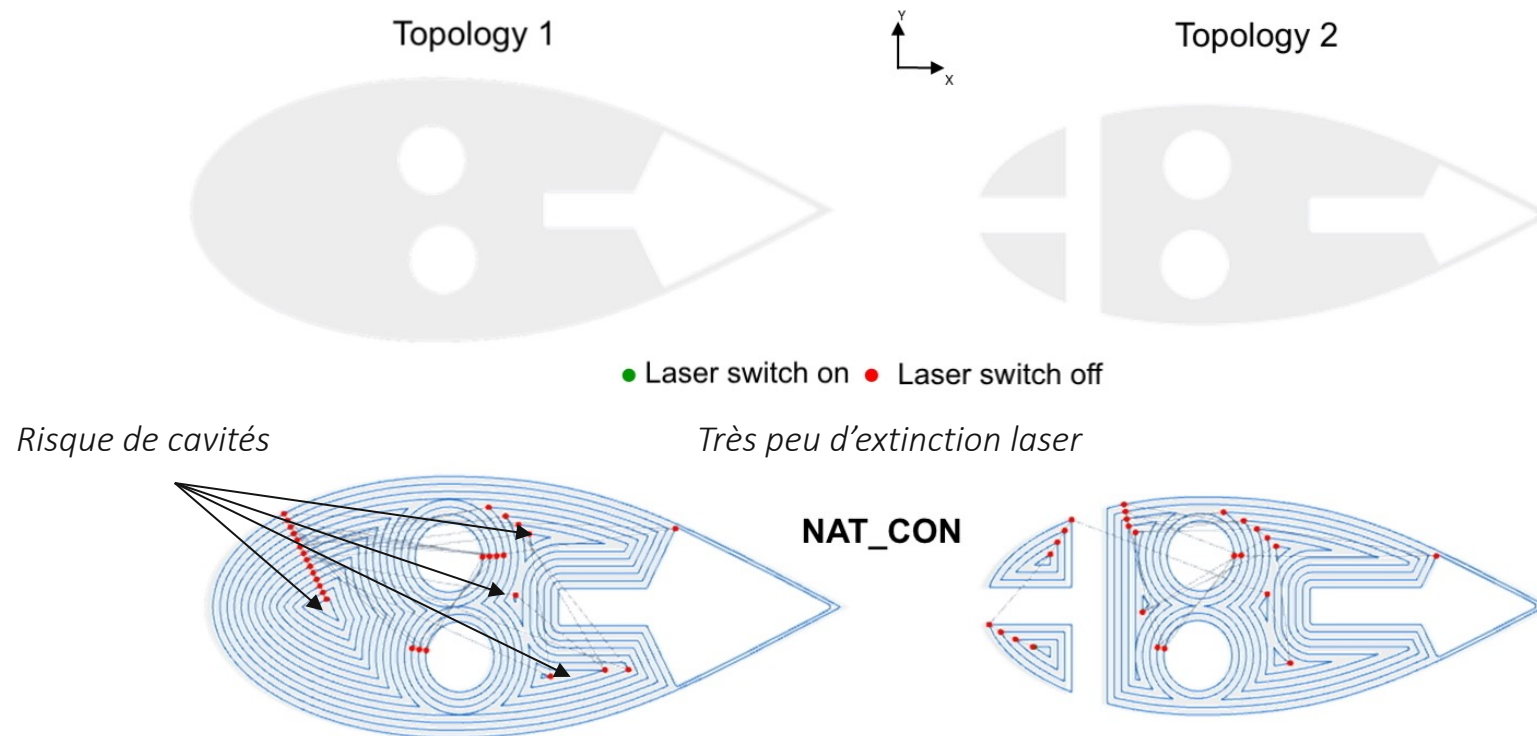


Risque de cavités

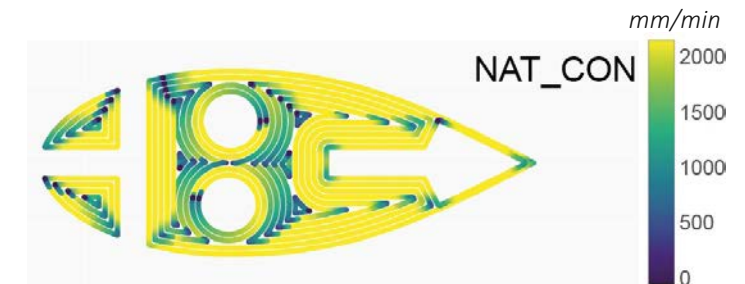


## □ NAT\_CON




- Parallèle aux contours intérieur et extérieur, mur avec deux cordons



Cavités



# Analyse cinématique

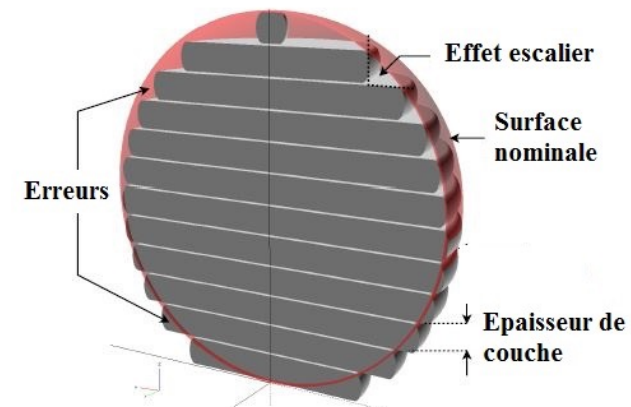
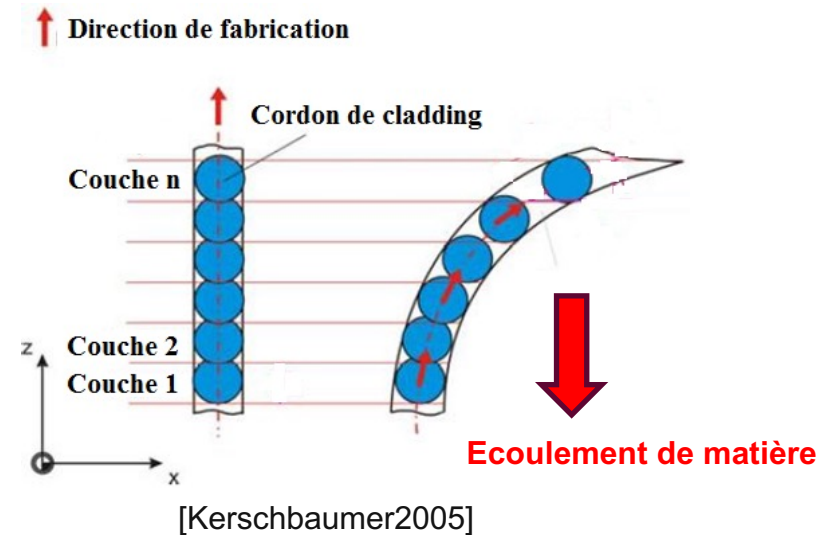
	Temps Total [min]		Laser On		Laser Off		Extinction Laser (temporisation)	
NAT_R0	27:09 <div>+25%</div>		09:51 <div>1</div> <i>Longues lignes droites</i>		04:21 <div>+40%</div>		09:07 <div>+190%</div> <i>Bcp de passes //</i>	
NAT_R90	31:23 <div>+44%</div> <i>La stratégie la plus lente</i>		10:30 <div>+7%</div> <i>Courtes lignes droites couche paire</i>		05:17 <div>+70%</div> <i>Beaucoup d'interpasses</i>		11:46 <div>+220%</div> <i>Bcp passes courtes (couche paire)</i>	
CON	23:42 <div>+9%</div> <div>!</div> <i>Un seul cordon pour le mur</i>		10:03 <div>+2%</div> <i>Longues courbes</i>		03:06 <div>1</div>		06:42 <div>+83%</div>	
NAT_CON	21:48 <div>1</div>		11:02 <div>+12%</div> <i>Traj. courbes avec petit rayons</i>		03:16 <div>+5%</div>		03:40 <div>1</div>	

# Pièces complexes



# Pièces complexes

- Volume en porte-à-faux
  - Ecoulement de matière
- Géométries avec angle de devers important
  - Modification de l'orientation de la buse en continue
  - Fabrication 5 axes
- Surfaces de formes complexes
  - *Effet escalier*
  - *Erreurs volumétriques*



# Pièces complexes

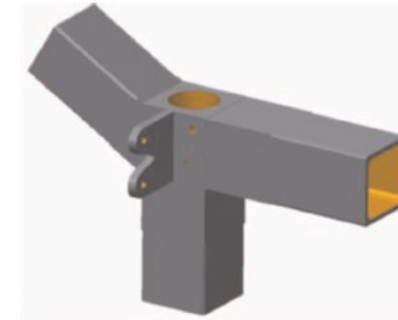
## □ Volume en porte-à-faux

### ➤ Ecoulement de matière

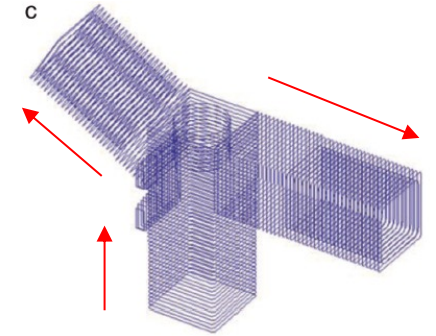
- Production 3 axes avec support
- Production « 5 axes » sans support

## ■ Tranchage Plan multi-directions

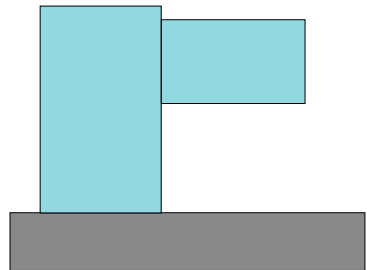
- Tranches planes avec changement de direction de fabrication



[Ding2016]

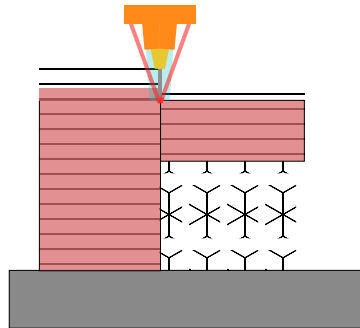


Géométrie nominale

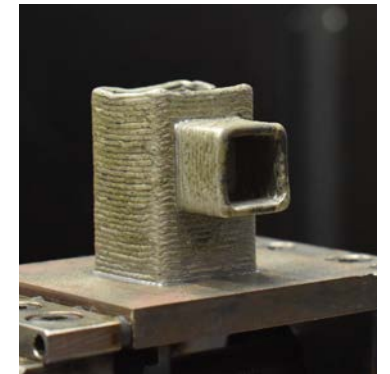
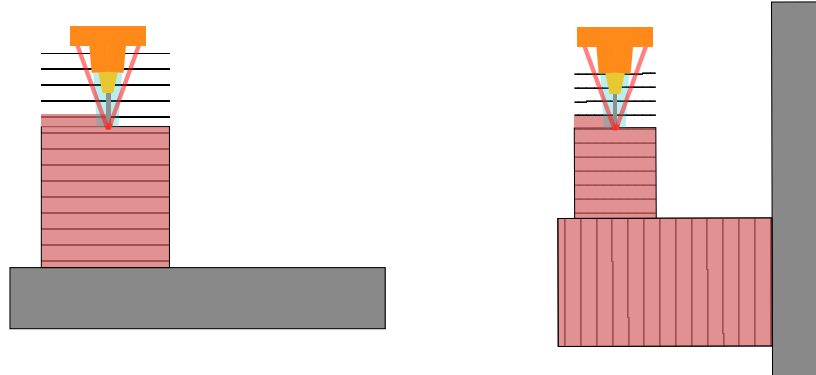


[Pizzol 2025]

Production 3 axes  
(avec supports)



Production 5 axes (sans support)



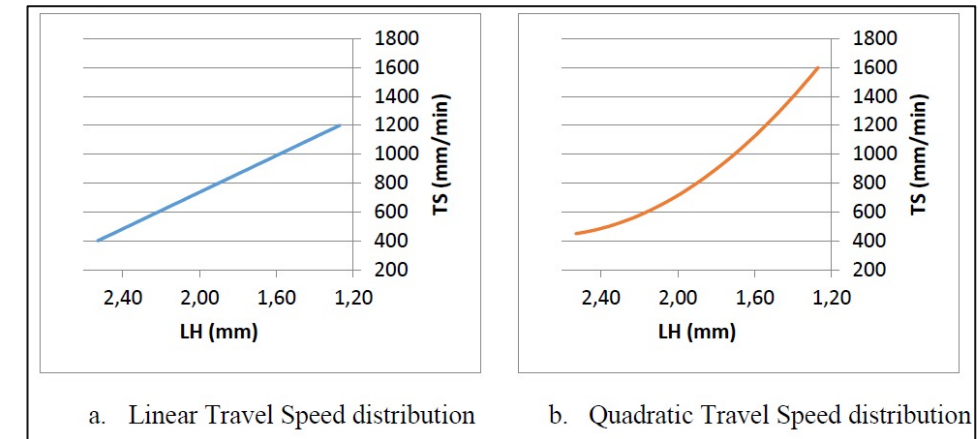
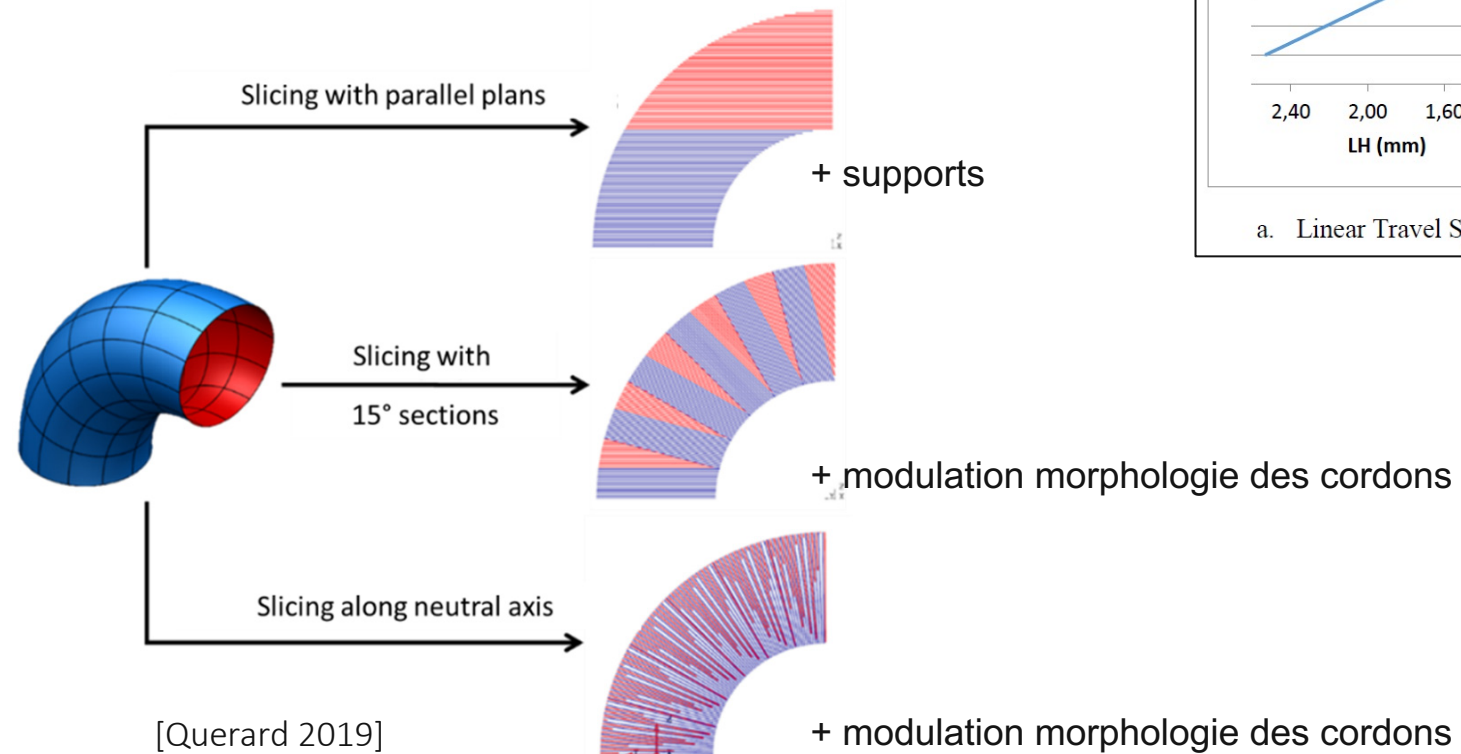
DED-LW [Pizzol 2025]  
LURPA ENS Paris-Saclay

# Pièces complexes

## □ Volume en porte-à-faux

### ■ Tranches planes non uniformes

- Variation des paramètres  $P$ ,  $V$ ,  $D$  [Querard2019]
- Utilisation de l'architecture multiaxes continue



# Pièces complexes

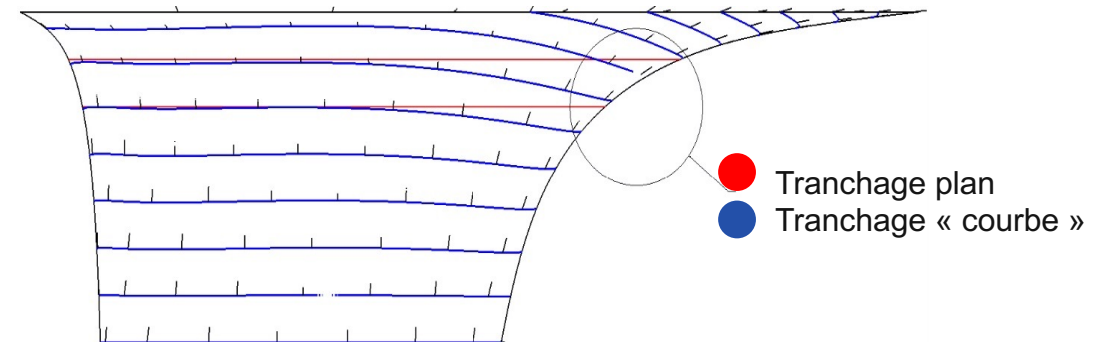
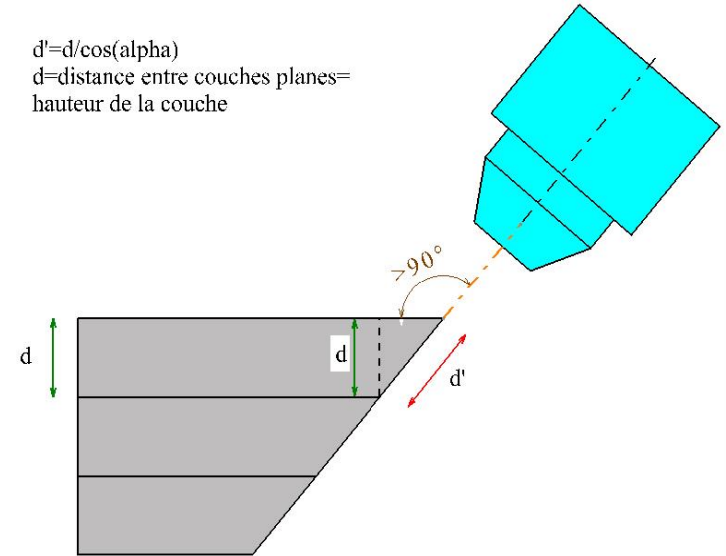
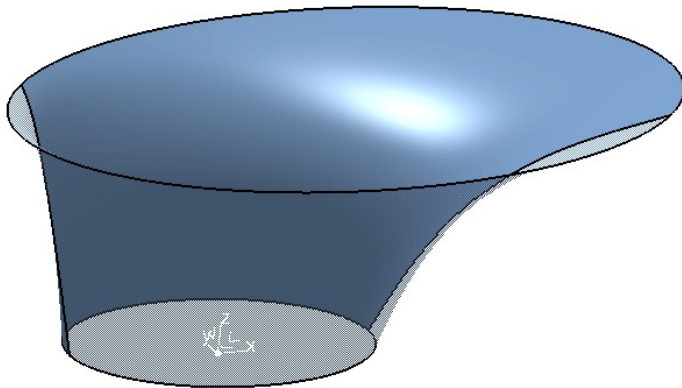
## □ Volume en porte-à-faux

### ■ Pour les configurations en 5 axes :

- Variation de la distance du dépôt  $d$  avec l'orientation de la buse
- Épaisseur de couche ne doit pas être uniforme

### ➤ Tranchage adaptatif

- Tranchage non plan [Flores2018]
- Algorithmes spécifiques





# Contrôle du procédé

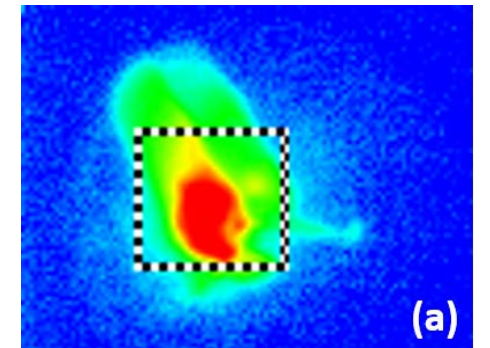
## Exemple en DED-LW

# Boucle de contrôle « thermique » en DED-LW

- **Caméra coaxiale de contrôle temps réel (E-MAqS)**
  - Le signal passe par le chemin optique du laser
  - Système de surveillance et de pilotage via le suivi de la température et de la taille du bain de fusion.
    - Sensible au-dessus de 700°C à la gamme NIR
    - Fréquence d'échantillonnage jusqu'à 220 Hz
    - Champ de vision réglable selon grossissement (2x2 ou 100x100mm<sup>2</sup>)
  - Paramètres à configurer
    - **temp** : température moyenne de consigne de la fenêtre de mesure active
    - **threshold** : température seuil à partir de laquelle le pixel est pris en compte pour la régulation
    - **P\_min** : valeur minimale de la puissance du laser
    - **P\_max** : valeur maximale de la puissance du laser
    - **P\_start** : puissance de démarrage, tant que la température mesurée n'a pas dépassée la valeur seuil



Zone de capture  
de la caméra  
centrée sur le  
bain de fusion.



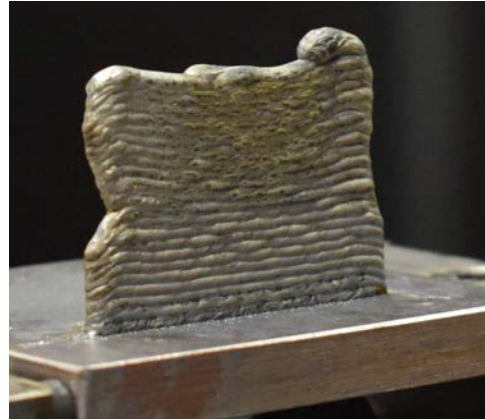
# Boucle de contrôle en DED-LW

## □ Paramètres de fabrication

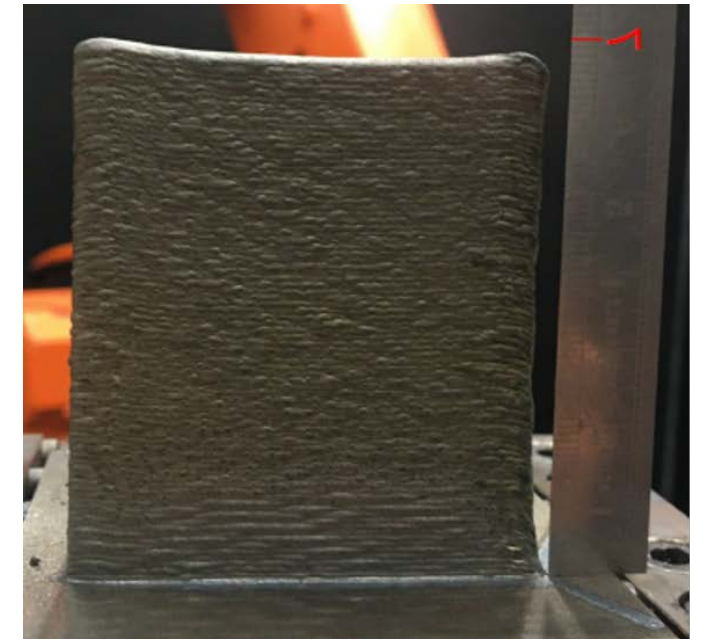
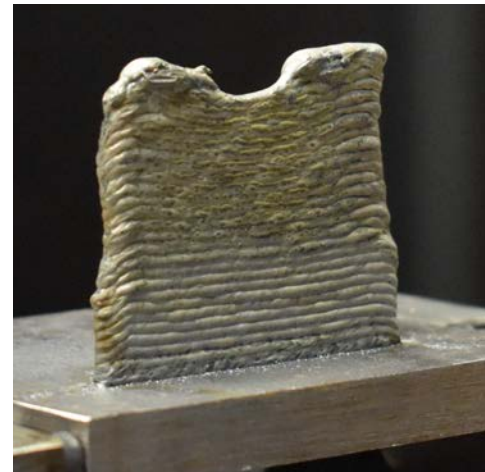
- Matériau IN718 ; Diamètre du fil = 1,2 mm ;
- Vitesse de la tête : 1 m/min ;
- Puissance nominale du laser : 2200 W ;
- Vitesse du fil : 2 m/min ;
- Longueur du mur : 60 mm ;
- Z-incrément : 0,8 ;
- Stratégie : unidirectionnelle ;

## □ Paramètres de pilotage

- Température : 1900°C ;
- Threshold : 1800°C ;
- P\_min : 1800 W ;
- P\_max : 2400 W ;
- P\_start : 2200 W.



*Echecs de production sans régulation active.*



*101 couches avec régulation active.  
Arrêt manuel de la production, pas de défauts.  
[Brehier 2024]*

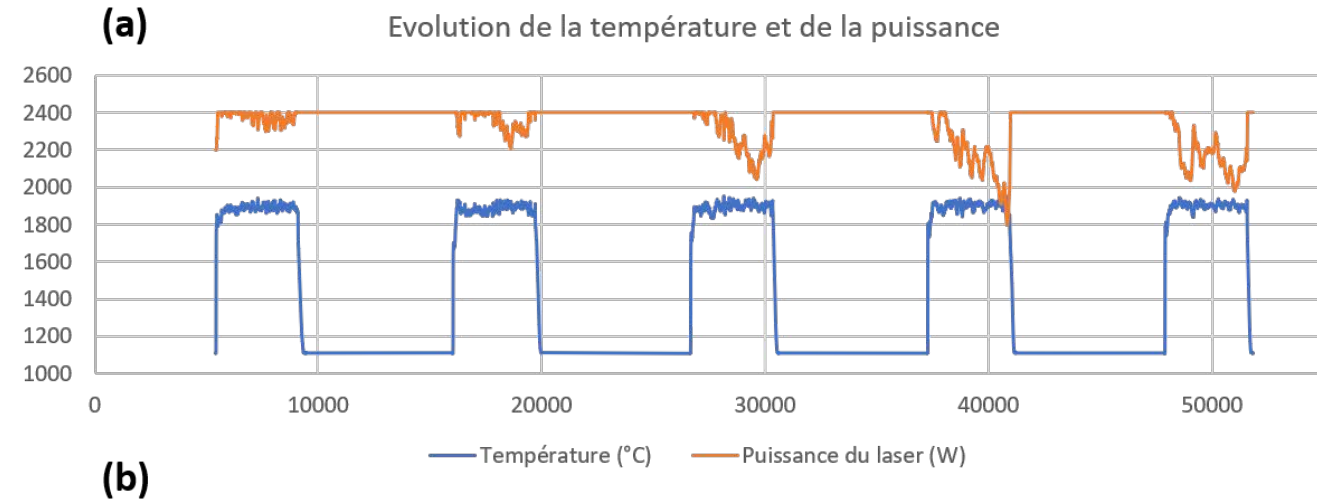
# Boucle de contrôle en DED-LW

## □ Signaux pour les 5 premières couches (a)

- La température cible est respectée
- La puissance commence à être régulée et variable au sein même d'une couche
  - Conduction de la chaleur dans le substrat pour les toutes premières couches

## □ Signaux pour les 5 dernières couches (b)

- La température cible est respectée
- La puissance est régulée et constante
  - Le substrat est trop loin, régime thermique permanent en convection.



# Merci de votre attention

**Christophe Tournier**

LURPA ENS Paris-Saclay

4 avenue des sciences, 91190 Gif-sur-Yvette

[christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr](mailto:christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr)

# Références bibliographiques

---

[Rouchon 22] François Rouchon, Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM, juin 2022, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay.

[Roch 24] Clément Roch, Intégration des spécificités d'une configuration coaxiale multifaisceaux pour la maîtrise du procédé de fabrication additive laser-fil, juillet 2024, Thèse de doctorat de Université Paris-Saclay

[Brehier 24] Synthèse de stratégies de fabrication pour la maîtrise de la microstructure des pièces produites par dépôt de matière sous énergie concentrée, décembre 2024, Thèse de doctorat de Université Paris-Saclay

[Pizzol 25] Léo Pizzol, Élaboration de gammes de fabrication pour l'hybridation des procédés DED-fil et usinage 5 axes, Décembre 2025, Thèse de doctorat de Université Paris-Saclay

[Dellarre 24] Anthony Dellarre, Asservissement thermique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing : vers un asservissement des procédés Direct Energy Deposition, octobre 2024, Thèse de doctorat de Université Grenoble Alpes

[Querard 2019] Vincent Querard. Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM. Thèse de doctorat de l'École centrale de Nantes, 2019.

[MA 2021] Chergui MA, Simulation Based deposition Strategies Evaluation and Optimization in Wire Arc Additive Manufacturing. Phdthesis, Université Grenoble Alpes, 2021.

[Aiyiti 2006] W. Aiyiti, W. Zhao, B. Lu, and Y. Tang. Investigation of the overlapping parameters of mpaw-based rapid prototyping. Rapid Prototyping Journal, 12, pp 165–172, 2006

[Cao 2011] Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, and W. Wang. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27(3), pp 641–645, 2011.

[Ding 2014] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. et al. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. Int J Adv Manuf Technol 73, 173–183 (2014).

# Références bibliographiques

- [Ding 2015] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015, 8). A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.
- [Flores 2018] Flores, J., Garmendia, I., & Pujana, J. (2018, 11). Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101, 2111-2120.
- [Kerschbaumer 2005] Kerschbaumer, M., Ernst, G., & O'Leary, P. (2005). Tool path generation for 3D laser cladding using adaptive slicing technology. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America.
- [Li 2018] Y. Li, Y. Sun, Q. Han, G. Zhang, and I. Horváth. Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts. Journal of Materials Processing Technology, 252, pp 838–848, 2018.
- [Lu 2017] X. Lu, Y. F. Zhou, X. L. Xing, L. Y. Shao, Q. X. Yang, and S. Y. Gao. Open-source wire and arc additive manufacturing system : formability, microstructures, and mechanical properties. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93(5), pp 2145–2154, 2017.
- [Michel 2019] F. Michel, H. Lockett, J. Ding, F. Martina, G. Marinelli, and S. Williams. A modular path planning solution for wire + arc additive manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 60, pp 1–11, 2019.
- [Mohebbi 2020] M.S. Mohebbi, M. Kühl, and V. Ploshikhin. A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (waam). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 109(3), pp 877–891, 2020.
- [Suryakumar2011] S. Suryakumar, K.P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender, and D. Sharma. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing. Computer-Aided Design, 43(4), pp 331–344, 2011.
- [Verbist 24] Verbist D, Museau M, Vignat F, Lavernhe S (2024) A methodology for weld bead geometry and operating conditions determination in Wire Arc Additive Manufacturing. In: 12th JCM 2024 - 33rd INGEGRAP International, Valencia, Espagne
- [Xiong 2013] J. Xiong, G. Zhang, H. Gao, and L. Wu. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29(2), pp 417–423, 2013
- [Xu 2018] Xu F, Dhokia V, Colegrove P, McAndrew A, Williams S, Henstridge A, Newman ST (2018) Realisation of a multi-sensor framework for process monitoring of the wire arc additive manufacturing in producing Ti-6Al-4V parts. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 31:785–798.