



## Introduction au contrôle des pièces WAAM

Mathieu RAUCH - Jean-Yves HASCOËT - Stéphane TOUZÉ - Gatien PÉCHET - Alexia CHABOT - Ricardo VIOLA

Centrale Nantes / GeM - UMR CNRS 6183, 1 rue de la Noe, 44321 Nantes - France  
Joint Laboratory of Marine Technology (JLMT) Centrale Nantes - Naval Group - France

Contact : matthieu.rauch@ec-nantes.fr



## Centrale Nantes / GeM / Rapid Manufacturing



### • Procédés de fabrication additive basés des trajectoires

- Wire Arc Additive Manufacturing, FA composites, Usinage, Laser Metal Deposition, Powder Bed Fusion, Laser Bioprinting,



WAAM



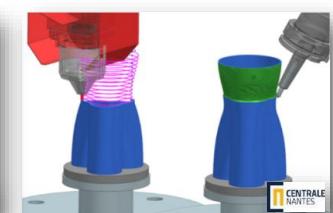
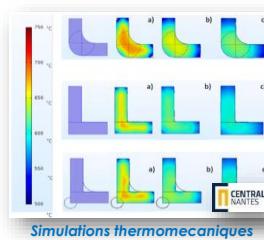
PBF



Polymers AM

### • Problématiques de recherche associées

- Design for Additive Manufacturing
- Génération de trajectoires
- Simulations Multiphysiques
- Monitoring In Situ
- Composants de grandes dimensions
- Parachèvements
- ...

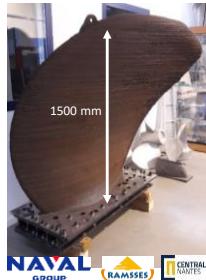


## Quelques démonstrateurs de grandes dimensions réalisés au laboratoire

### • Aéronautique



### Naval



### Train



### • Intérêt de la FA pour les composants de grandes dimensions à forte valeur ajoutée

- Gains de masse
- Gestion des stocks / maintenance
- -...



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

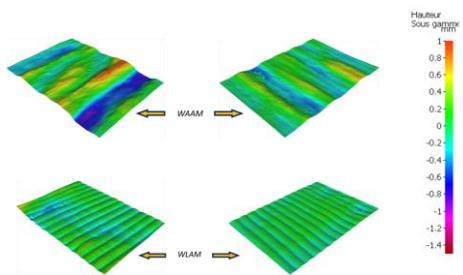
3

## Propriétés des surfaces de FA

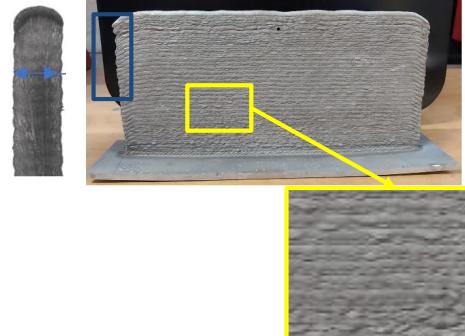
### • Les surfaces brutes de FA sont

- Ne convient pas aux exigences fonctionnelles sévères
  - Étanchéité, coefficients de friction, assemblages
- Zones possibles d'amorce de rupture
- Aspects de surface...

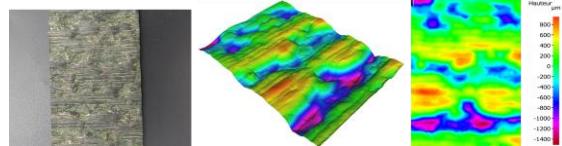
#### Aluminium Al2319



#### WAAM surface



#### Inconel 625



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

4

## Propriétés des structures WAAM et défaut associés



**CENTRALE  
NANTES  
RAPID  
MANUFACTURING**

- **Hétérogénéité matière**

- Anisotropie
- Gradients thermiques
- Porosités

- **Les méthodes de contrôle standard (métrologie classique, UT contact) sont inadaptées sur le brut de fabrication.**

- Nécessité d'approches spécifiques.



Microstructures

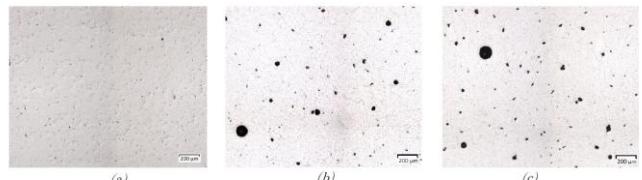


Figure 2.3 - Échantillon avec la stratégie d'accroche : (a) CMT Advanced, (b) CMT pulsé, (c) talon en CMT pulsé

## Agenda



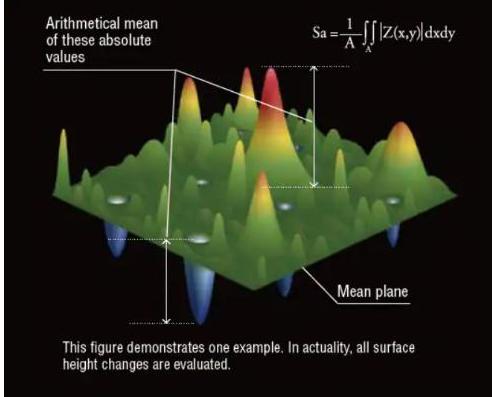
**CENTRALE  
NANTES  
RAPID  
MANUFACTURING**

- Contexte du WAAM
- Quels critères de mesure de surfaces ?
- Monitoring In-Situ : vers des approches couplées
- Contrôle Santé Matière : Apport des Ultrasons Multi-éléments (PAUT).
- Conclusion & Perspectives.



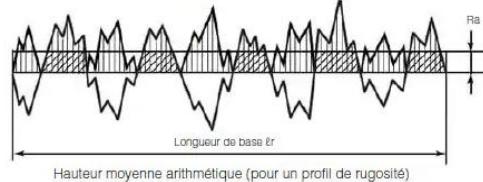
## Mesures de surface

- Paramètres  $S_a$ ,  $R_a$ ,  $P_a$ ,  $W_a$



«  $S_a$  » : Moyenne arithmétique de la hauteur de pic (valeurs absolues)

$$R_a, P_a, W_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx$$



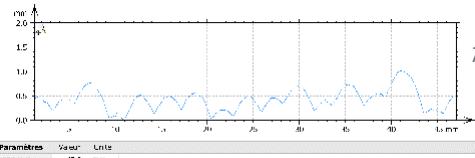
«  $R_a$  » : moyenne des mesures de la rugosité linéaire

«  $W_a$  » : moyenne des mesures de l'ondulation linéaire

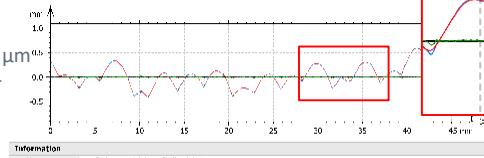
«  $P_a$  » : moyenne des écarts moyens arithmétiques de profil brut (sans filtre ondulation / rugosité)

## Critères de mesure - LINEAIRE

- Choix du  $\lambda_c = 800 \mu\text{m}$  pour séparation de la micro-rugosité et des ondulations de cordons liées au procédé WAAM, sur les pièces brutes.



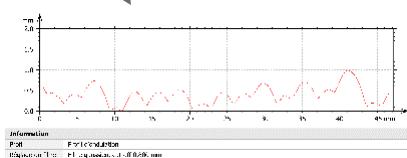
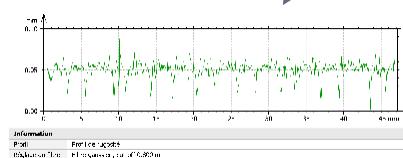
$\lambda_c = 800 \mu\text{m}$



Mesures :

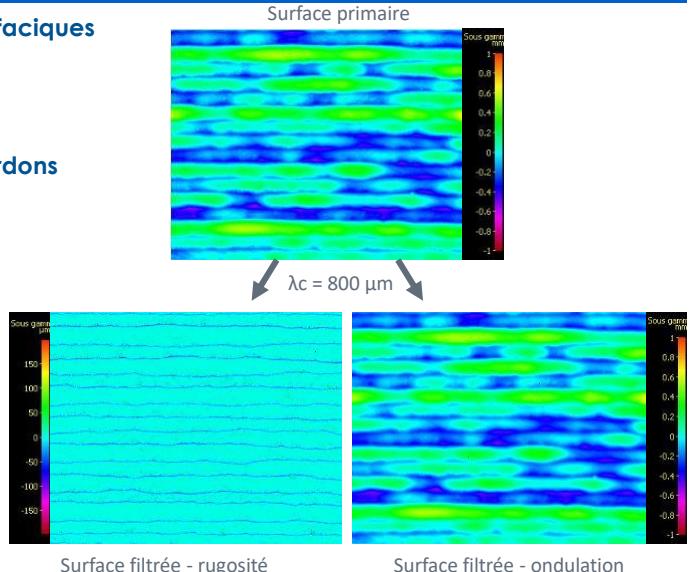
$P_a$  ( $\mu\text{m}$ ),  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ),  $W_a$  ( $\mu\text{m}$ )

->  $W_a$  est représentatif des ondulations de cordons



## Critères de mesure - Surfacique

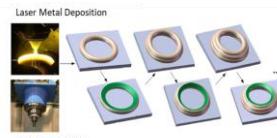
- Idem, choix  $\lambda_c = 800 \mu\text{m}$  pour les mesures surfaciques
- Mesures :
- $\text{Sa P} (\mu\text{m})$ ,  $\text{Sa R} (\mu\text{m})$ ,  $\text{Sa W} (\mu\text{m})$
- ->  $\text{Wa}$  est représentatif des ondulations de cordons



## Parachèvement des pièces WAAM

### Objectifs

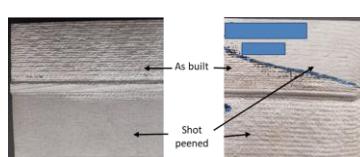
- Amélioration des topologies de surfaces
- Amélioration des propriétés mécaniques
  - Tenue en fatigue



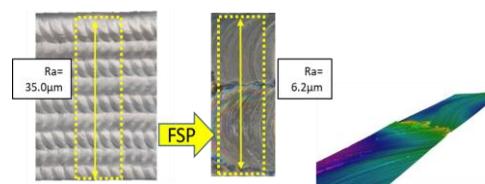
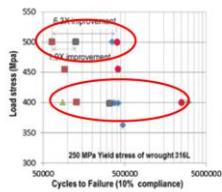
### Procédés par Enlèvement de Matière

### Traitements Surfaciques

- Procédés lasers
- Ajouts de matière



A	Roughness with WJ
As built ( $\text{Ra} = 35 \mu\text{m}$ )	
WJ finished ( $\text{Ra} = 6.5 \mu\text{m}$ )	

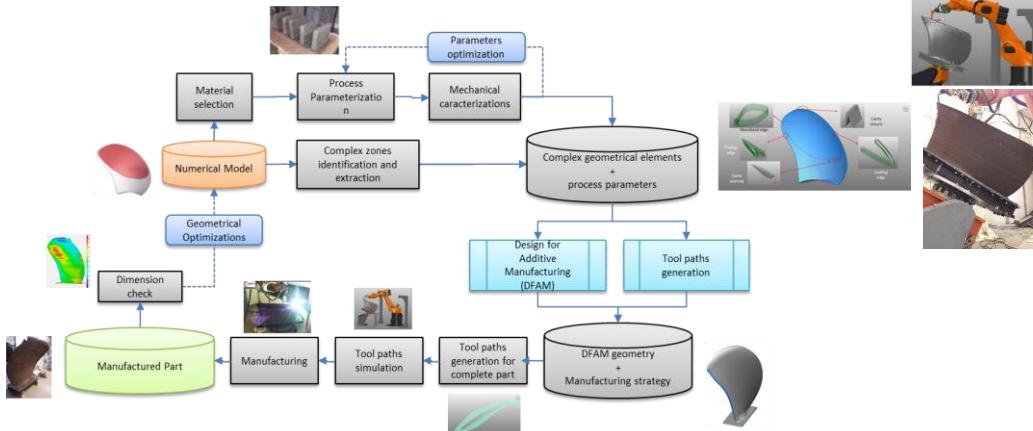


## Mesures de structures fabriquées par scan 3D

### Impact attendu

- Réduction de bruit et des vibrations
- Amélioration des performances hydro

### DfAM et méthodologie



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

11

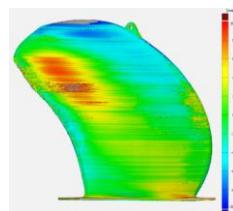
## Mesures de structures fabriquées par scan 3D

### Résultat obtenu

- 1% d'écart / modèle CAO
  - Opération de Best Fit critique
- Démonstrateur prêt pour le parachèvement

### Quelques résultats

- Pale creuse: gain de masse 50%
- Efficacité améliorée de 5%
- Réduction des bruits résiduels
  - En accord avec les directives de protection de la faune marine
- Réductions des vibrations
  - Gains de masse pour le système d'entraînement



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

12

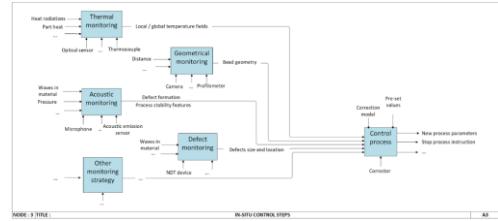
## Monitoring multiphysique en fabrication additive arc-fil et LMD

### • Procédés WAAM

- Procédés à trajectoires + pilotés par commande numérique
- Phénomènes complexes mis en jeu

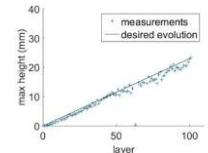
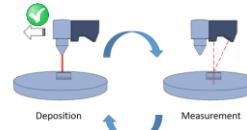
### • Monitoring multiphysique

- Thermique
- Géométrique
- Acoustique
- Électrique
- Ultrasonique



### • De la correction vers la génération de trajectoires en ligne

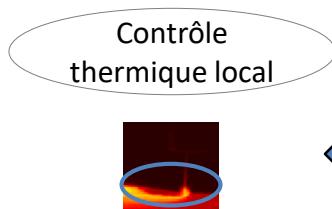
- 1 seul paramètre dans des cas simples
- Pièce « réelles »; intérêt du multicapteur et de stratégies de contrôle élaborées
- Vers la génération de trajectoire en ligne
  - Approches « 1ère pièce bonne »



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

13

## Monitoring Thermique



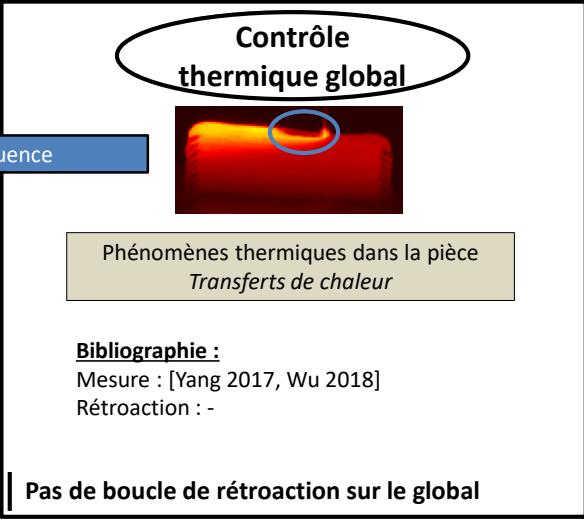
Phénomènes thermiques au bain de fusion  
Apport de chaleur, vitesses de solidification

#### Bibliographie :

Mesure : [Smurov 2013]

Rétroaction : [Xiong 2013, Farshidianfar 2016]

Contrôle thermique local insuffisant  
Le global influe sur le local



Phénomènes thermiques dans la pièce  
Transferts de chaleur

#### Bibliographie :

Mesure : [Yang 2017, Wu 2018]

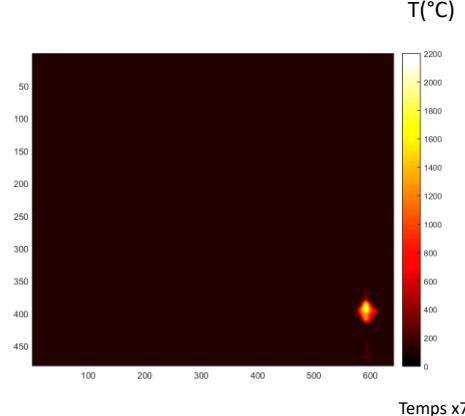
Rétroaction : -

Pas de boucle de rétroaction sur le global

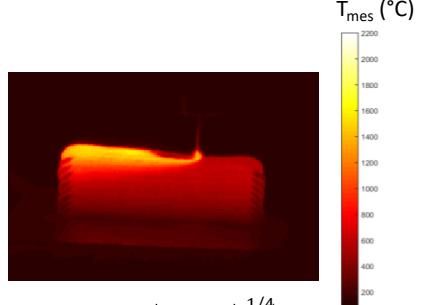
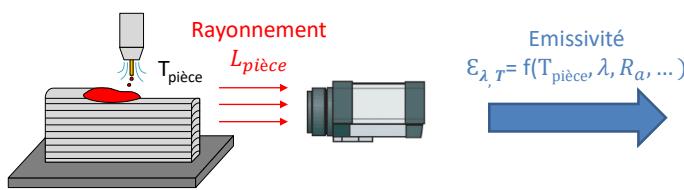
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

14

## Montage : caméra thermique fixe



## Caméra thermique infrarouge



$$T_{mes} = \left( \frac{L_{pièce}}{\varepsilon_{\lambda,T}} \right)^{1/4}$$

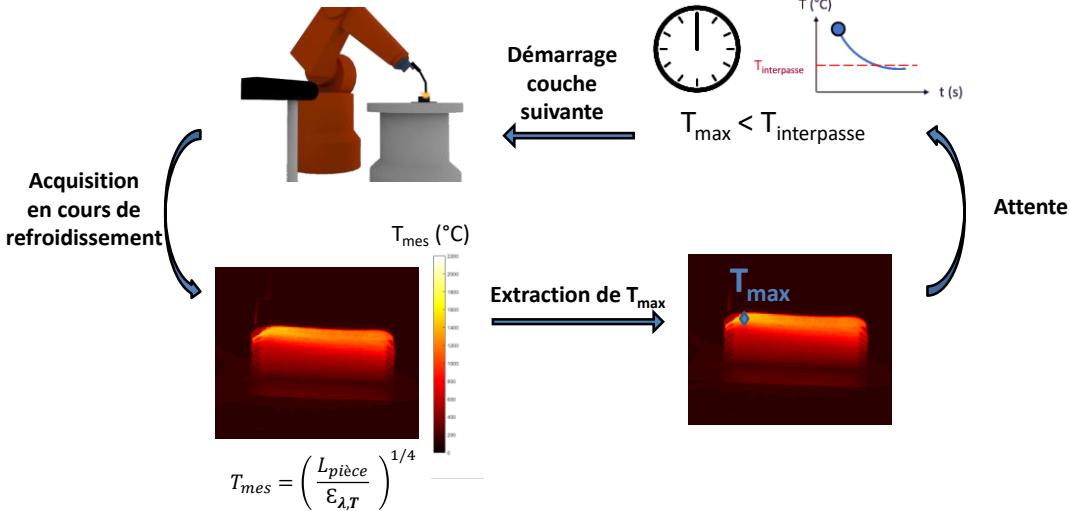
Une erreur de 1% d'émissivité entraîne 10% d'erreur sur  $T$  mesurée<sup>1</sup>  
Nécessité de déterminer précisément l'émissivité  $\varepsilon$

1 : [Mattei 2005]

## Boucle de rétroaction



CENTRALE  
NANTES  
RAPID  
MANUFACTURING



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

17

## Monitoring Thermique du WAAM



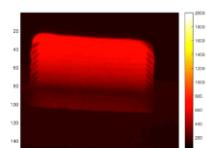
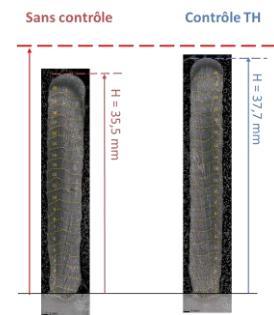
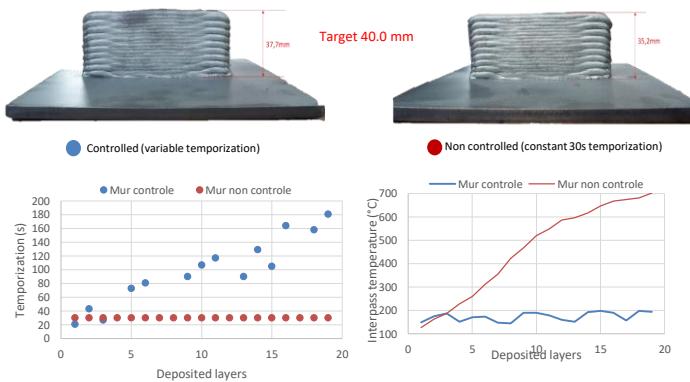
CENTRALE  
NANTES  
RAPID  
MANUFACTURING

### • Approche proposée

- Adapter les temporisations entre couches pour contrôler la température pièce
- Mise en œuvre en comparant 2 murs WAAM

### • Résultats

- Microstructure plus proche des attentes du cahier des charges
- Meilleur contrôle géométrique ... mais non suffisant

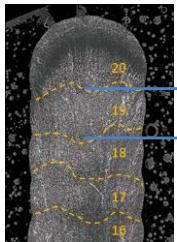


ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

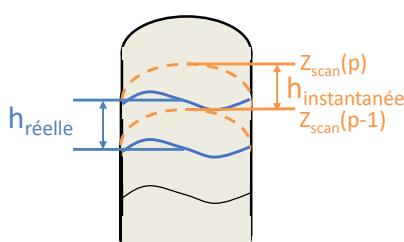
18

Mesure de  $h_{couche}$ 

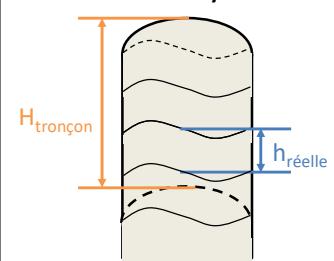
## Post-fabrication



## In-situ

Mesure couche à couche<sup>1</sup>

$$h_{instantanée} = h_{réelle} ?$$

Mesure moyenne<sup>2</sup>

$$h_{moyenne} = \frac{H_{tronçon}}{n_{tronçon}}$$

$h_{réelle}$  non accessible directement en *in-situ*  
Considération d'une  $h_{couche}$  moyenne

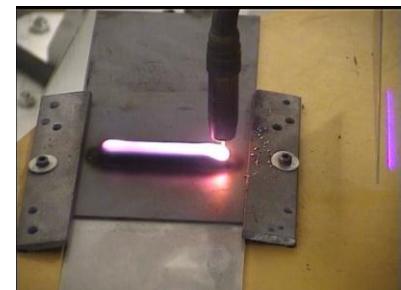
1 : [Xiong 2014, Han 2018]

2 : [Garmendia 2018]

ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

19

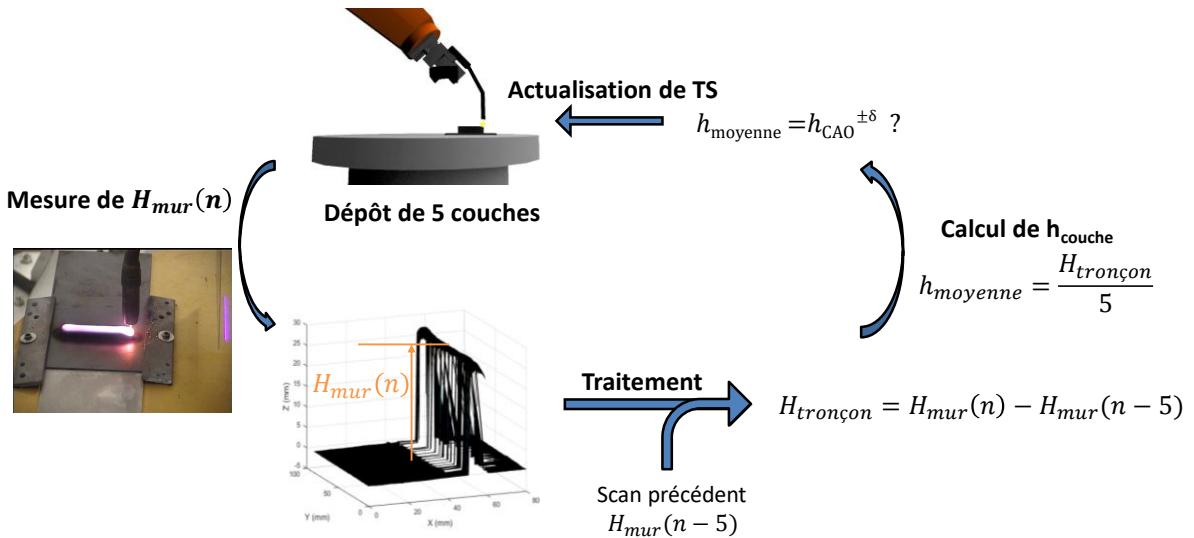
## Montage : profilomètre embarqué



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

20

## Boucle de rétroaction

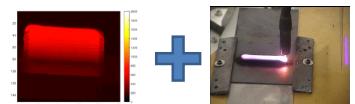


ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

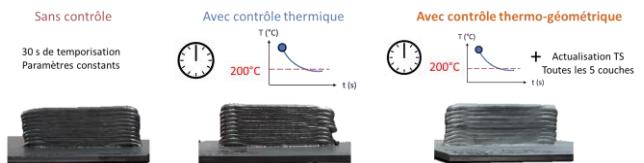
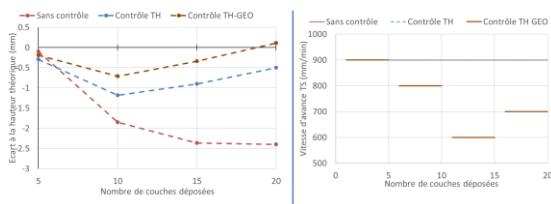
21

## Approche couplée thermique et géométrique

- Mesures de températures pièce par camera thermique
- Mesures de hauteur de couche par profilomètre
- Cas d'usage: deux murs de 20 couches en acier inoxydable
  - (a) sans contrôle
  - (b) correction de vitesse toutes les 5 couches + temporization intercouches adaptatives
- Acquisition de données et tracabilité
  - Capteurs et systems externes
  - Directeur de Commande Numérique



Combined thermal and geometrical controls



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

22

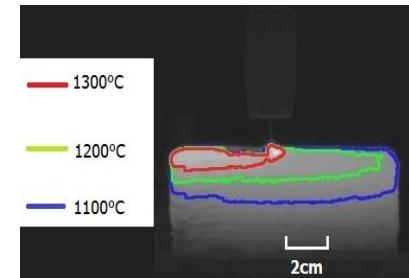
## Monitoring thermique et géométrique

### • Pilotage en boucle fermée

- Objectif : mitiger l'accumulation thermique en cours de fabrication
- Moyen : boucle de rétroaction
  - Moyen de mesure : caméra thermique
  - Indicateur monitoré : taille de HTZ (Zone au dessus d'un seuil de température)
  - Paramètre de rétroaction : paramètre opératoire  $S$  (vitesse procédé)
    - Lié proportionnellement à vitesse d'avance TS et vitesse de dévidage FR
  - Rapport WFS/TS constant : permet d'avoir la même quantité de matière déposée à chaque couche quelque soit la valeur de  $S$



- Identification de la hauteur de la pièce



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

23

## Acoustic Monitoring

### • Contexte

- Le son est utilisé par les soudeurs pour le contrôle en cours de processus (in-process control).

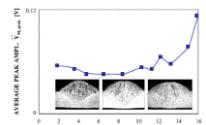
### • Objectif

- Proposer une stratégie de monitoring acoustique facile à mettre en œuvre.

### • Stratégie Proposée

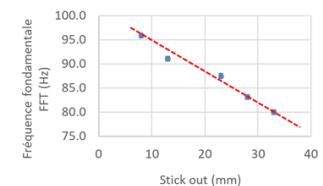
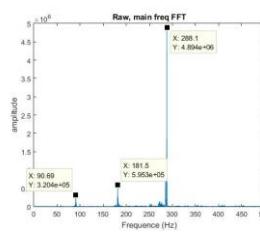
- Utilisation d'un microphone pour enregistrer le son pendant le processus.
- Analyse par Transformée de Fourier Rapide (FFT) pour définir des marqueurs et des critères.

Link between stick out and acoustic measured in GMAW.  
[Grada 2003]



### • Tests et Modélisation

- Tests avec des valeurs de stick-out variables (longueur de fil libre) pour établir un modèle.



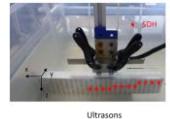
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

24

## Contrôle par CND Ultra sons

### • Contexte

- Essentiellement, prospections de diverses techniques de CND sur des blocs fabriqués par DED [Xu 2017]
- Formation potentielle de défauts (inclusions gazeuses, manque de fusion, etc.) durant la fabrication



Ultrasons

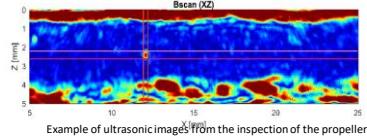
### • Approche

- Proposer une méthode de CND pour le contrôle de l'intégrité structurelle en environnement de production (ou de fabrication)
- Accent particulier mis sur l'étalonnage de la méthode pour le dimensionnement des défauts



### • Exemple

- Inspection de composants en alliage d'aluminium (allant de blocs massifs à une pale d'hélice)



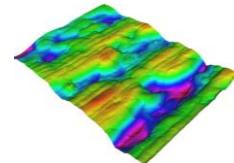
Example of ultrasonic images from the inspection of the propeller.



Illustration of the ultrasonic NDT inspections of the propeller.

## Conclusions

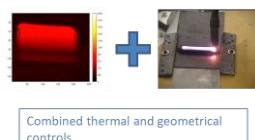
### • Des critères de mesures à adapter pour les composants WAAM



### • Apport du monitoring géométrique et du contrôle in-situ

- Détection au plus tôt d'éventuel défauts
- Approches correctives en boucle fermée
- Mise en place de méthodologies multiphysiques

### • Vers des approches couplées avec la simulation multiphysique





## RNF Fab3D métallique

Procédés de dépôts plasma et laser par fil fondu pour l'impression métallique 3D (WAAM et WLAM)

Bourges, 24-25-26 novembre 2025

## Introduction au contrôle des pièces WAAM

Mathieu RAUCH - Jean-Yves HASCOËT - Stéphane TOUZÉ - Gatien PÉCHET - Alexia CHABOT - Ricardo VIOLA

Centrale Nantes / GeM - UMR CNRS 6183, 1 rue de la Noe, 44321 Nantes - France

Joint Laboratory of Marine Technology (JLMT) Centrale Nantes - Naval Group - France

Contact : matthieu.rauch@ec-nantes.fr

