



Introduction au contrôle des pièces WAAM

Matthieu RAUCH - Jean-Yves HASCOËT - Stéphane TOUZÉ - Gatién 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

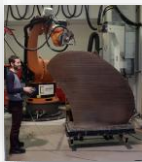


• Procédés de fabrication additive basés des trajectoires

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



WAAM



LMD



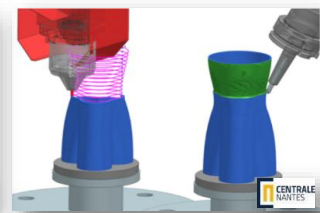
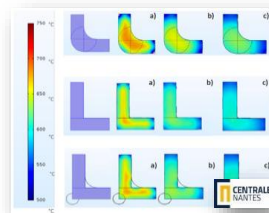
PBF



Polymers AM

• Problématiques de recherche associées

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



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

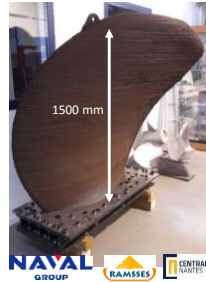
Quelques démonstrateurs de grandes dimensions réalisés au laboratoire



• 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

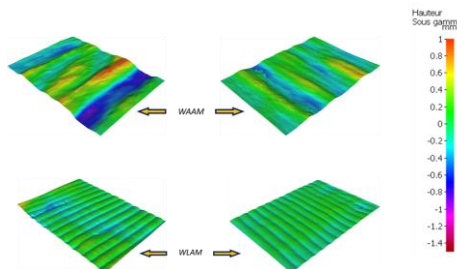
Propriétés des surfaces de FA



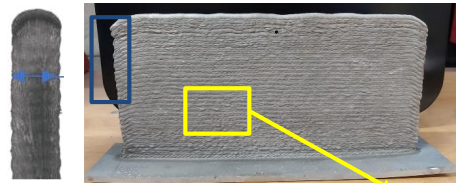
• Les surfaces brutes de FA sont

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

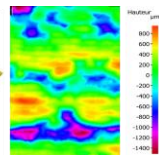
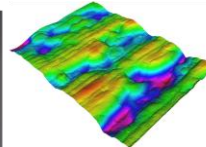
Aluminium Al2319



WAAM surface



Inconel 625



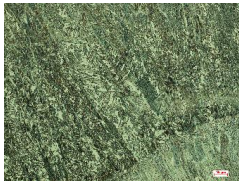
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

4

Propriétés des structures WAAM et défaut associés



- **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

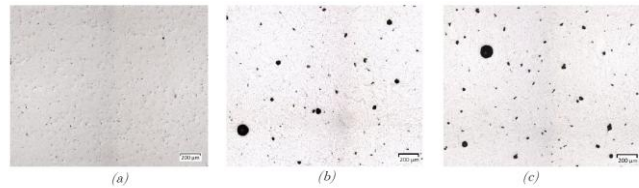


Figure 2.3 - Échantillon avec la stratégie d'accroche : (a) CMT Advanced, (b) CMT pulsé, (c) talon en CMT pulsé

ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

5

Agenda

- 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.



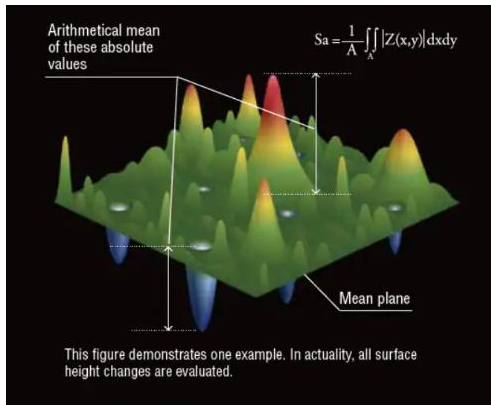
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

6

Mesures de surface

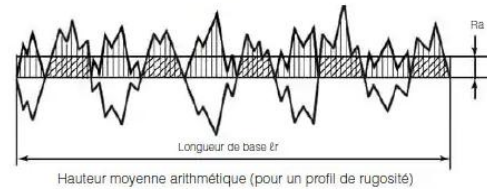


• Paramètres Sa, Ra, Pa, Wa



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

$$Ra, Pa, Wa = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx$$



« Ra » : moyenne des mesures de la rugosité linéaire

« Wa » : moyenne des mesures de l'ondulation linéaire

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

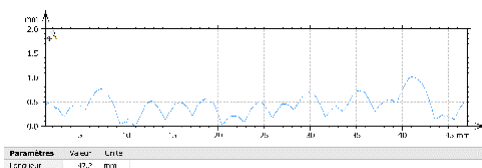
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

7

Critères de mesure - LINEAIRE

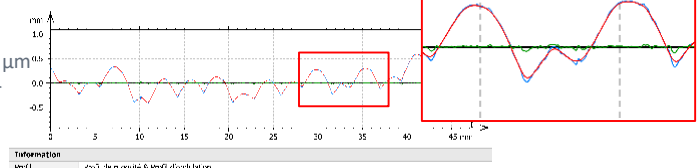


• Choix du $\lambda_c = 800 \mu m$ pour séparation de la micro-rugosité et des ondulations de cordons liées au procédé WAAM, sur les pièces brutes.



Profil primaire

$\lambda_c = 800 \mu m$

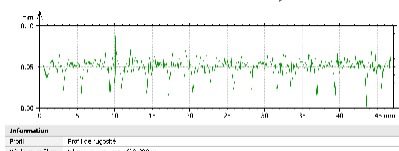


Décomposition rugosité / ondulation

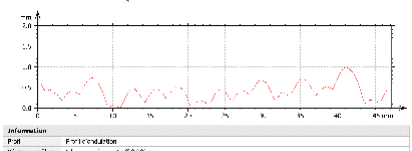
Mesures :

Pa (μm), Ra (μm), Wa (μm)

-> Wa est représentatif des ondulations de cordons



Profil de rugosité



Profil d'ondulation

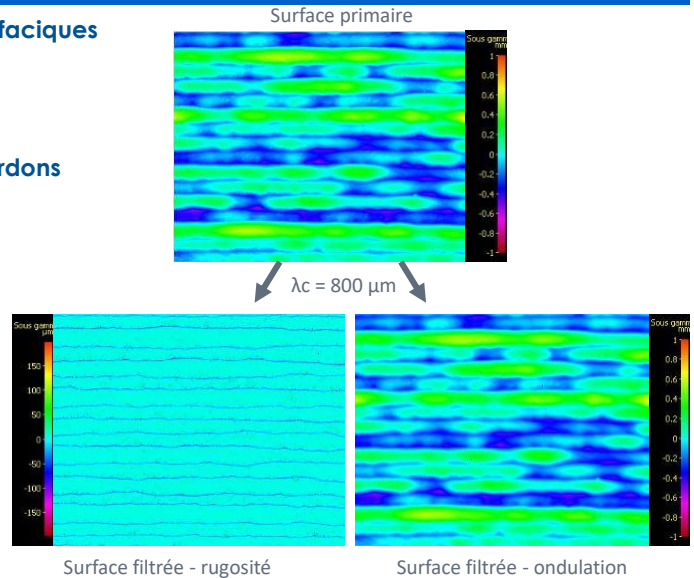
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

8

Critères de mesure - Surfacing



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



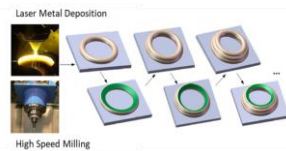
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

9

Parachèvement des pièces WAAM



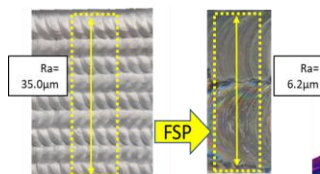
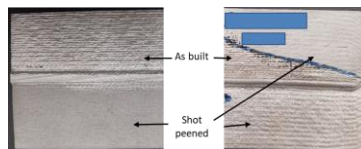
- Objectifs
 - Amélioration des topologies de surfaces
 - Amélioration des propriétés mécaniques
 - Tenue en fatigue



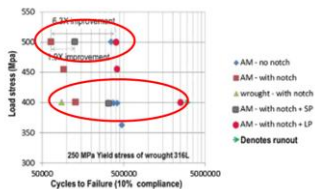
- Procédés par Enlèvement de Matière

- Traitements Surfacing

- Procédés lasers
- Ajouts de matière



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



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

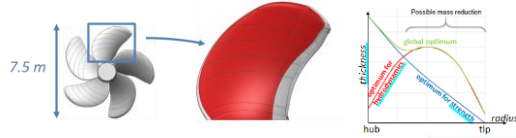
10

Mesures de structures fabriquées par scan 3D

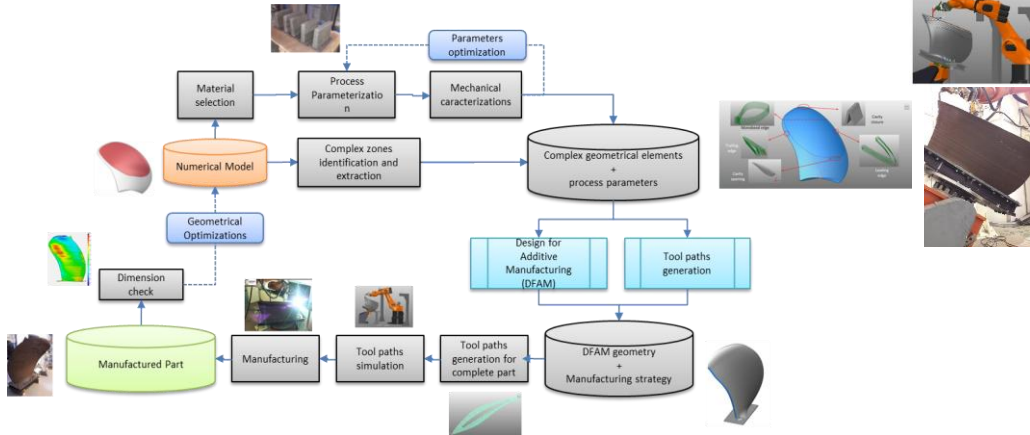


- Impact attendu

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



- **DfAM et méthodologie**



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

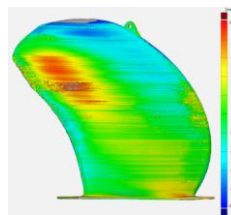
11

Mesures de structures fabriquées par scan 3D



- **Résultat obtenu**

- 1% d'ecart / 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 directive 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

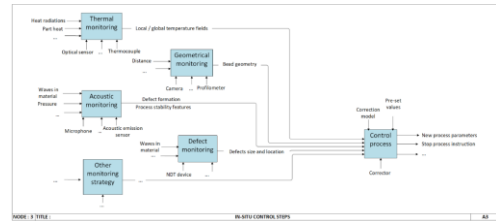


• Procédés WAAM

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

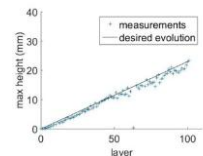
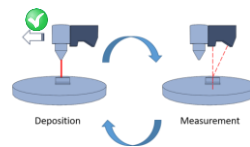
• Monitoring multiphysique

- Thermique
- Géométrique
- Acoustique
- Electrique
- Ultrasonique



• De la correction vers la génération de trajectoires en ligne

- 1 seul paramètres 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



Contrôle
thermique local



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

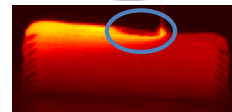
Bibliographie :

Mesure : [Smurov 2013]

Rétroaction : [Xiong 2013, Farshidianfar 2016]

**Contrôle thermique local insuffisant
Le global influence sur le local**

Contrôle
thermique global



Phénomènes thermiques dans la pièce
Transferts de chaleur

Bibliographie :

Mesure : [Yang 2017, Wu 2018]

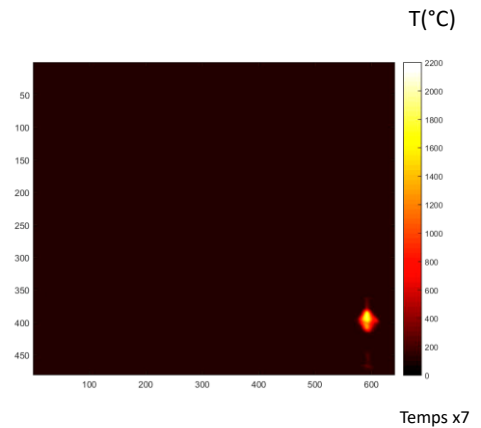
Rétroaction : -

Pas de boucle de rétroaction sur le global

ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

14

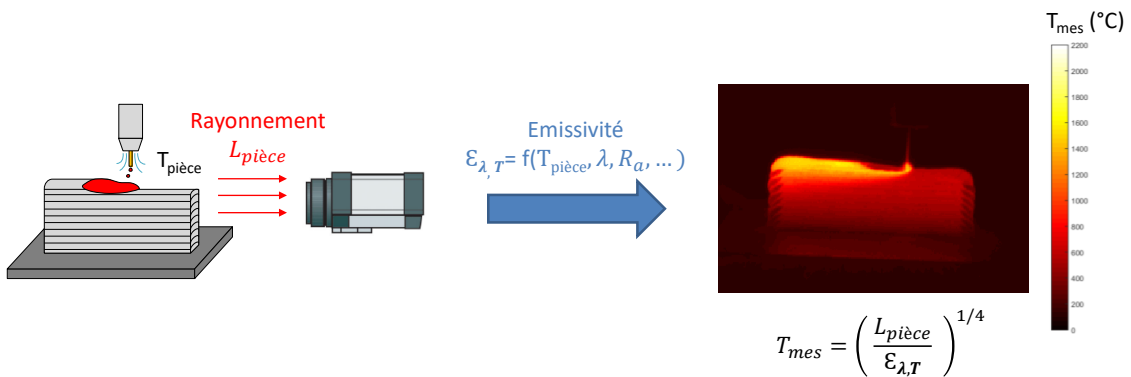
Montage : caméra thermique fixe



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

15

Caméra thermique infrarouge



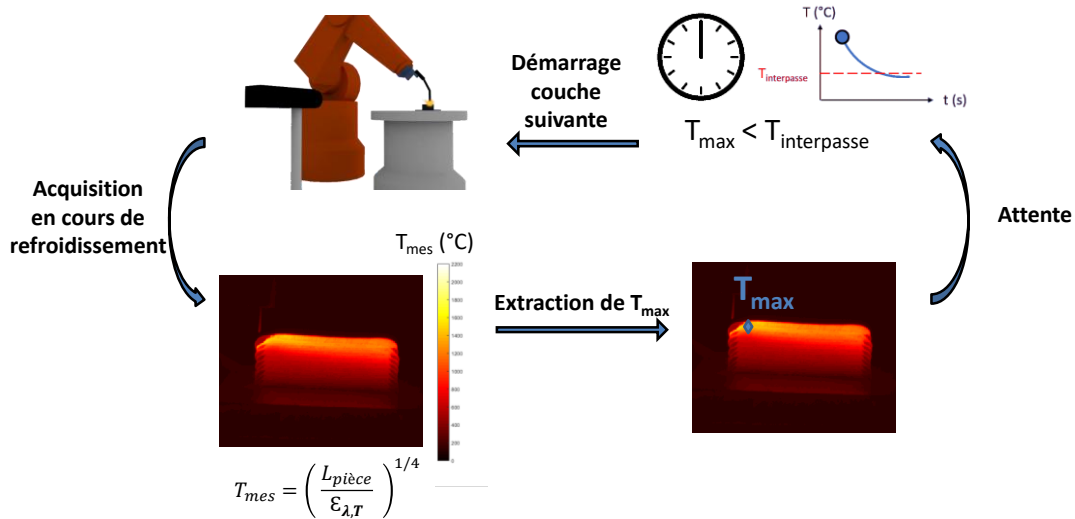
Une erreur de 1% d'émissivité entraîne 10% d'erreur sur T mesurée¹
Nécessité de déterminer précisément l'émissivité ϵ

1 : [Mattei 2005]

ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

16

Boucle de rétroaction



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

17

Monitoring Thermique du WAAM

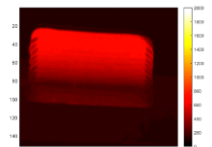
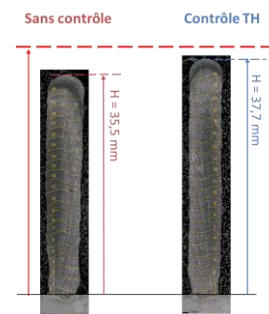
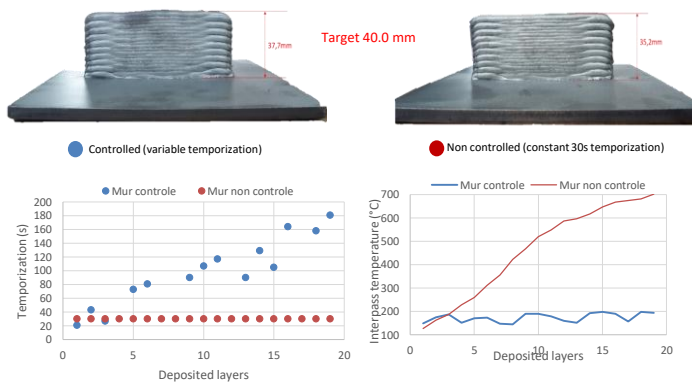


• Approche proposée

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

• Resultats

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

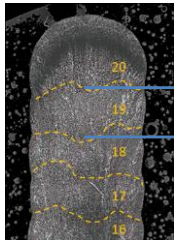
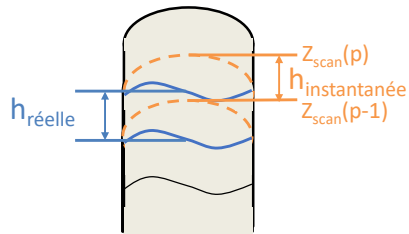


ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

18

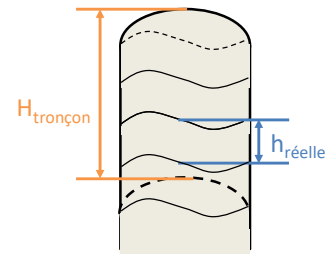
Mesure de h_{couche} 

Post-fabrication

Mesure couche à couche¹

$$h_{\text{instantanée}} = h_{\text{réelle}} ?$$

In-situ

Mesure moyenne²

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

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

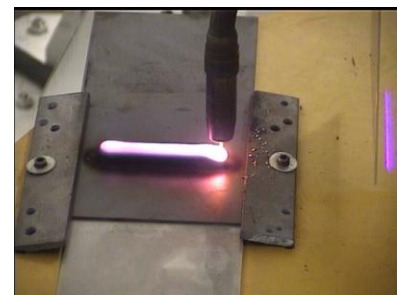
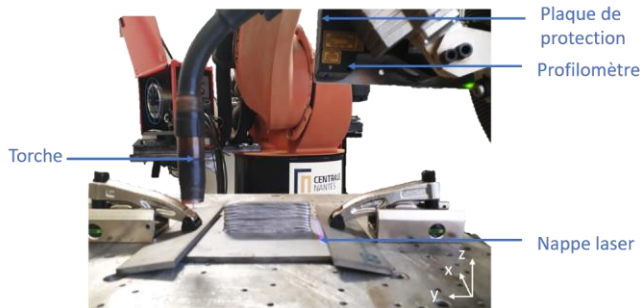
1 : [Xiong 2014, Han 2018]

2 : [Garmendia 2018]

ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

19

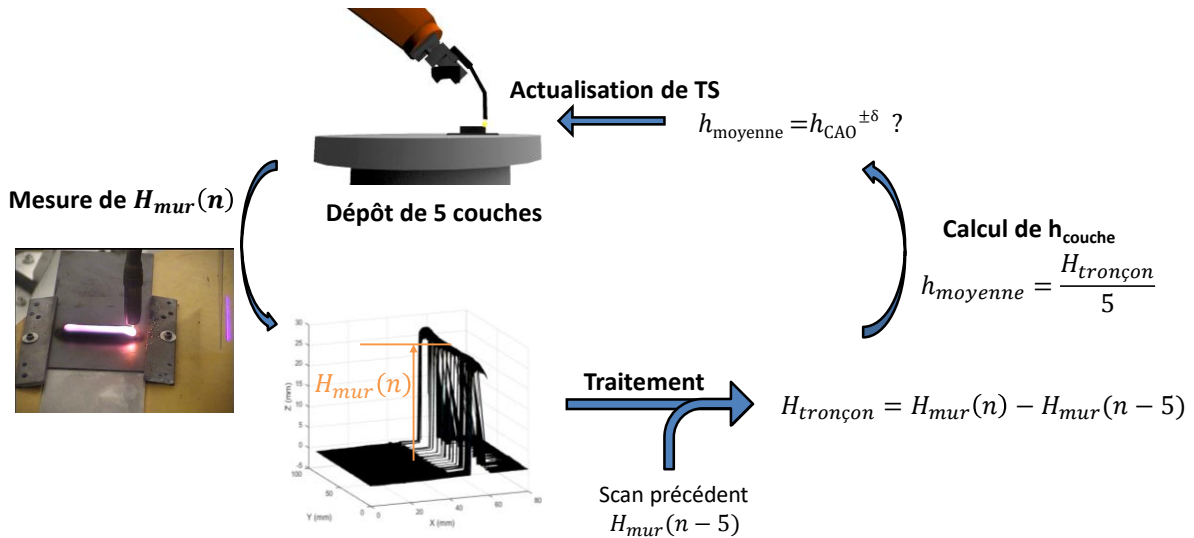
Montage : profilomètre embarqué



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

20

Boucle de rétroaction



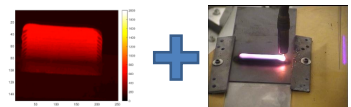
ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

21

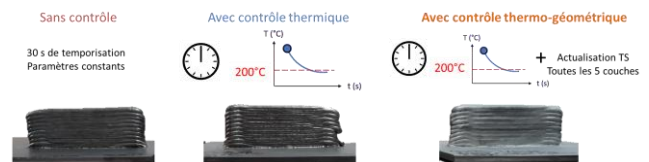
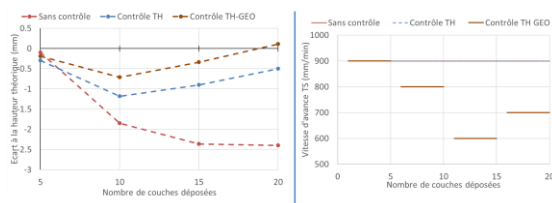
Approche couplée thermique et géométrique



- 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 controle
 - (b) correction de vitesse toutes les 5 couches + temporization intercouches adaptatives
- **Acquisition de données et traçabilité**
 - Capteurs et systems externes
 - Directeur de Commande Numérique



Combined thermal and geometrical controls



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

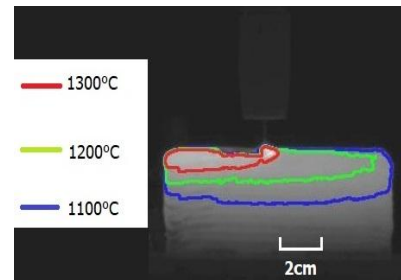
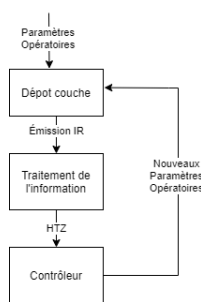
22

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

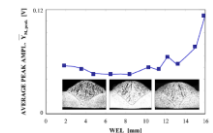
- Proposer une stratégie de monitoring acoustique facile à mettre en œuvre.

• Stratégie Proposée

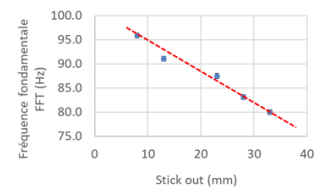
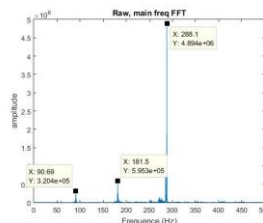
- Utilisation d'un microphone pour enregistrer le son pendant le processus.
- Analyse par Transformée de Fourier Rapide (FFT) pour définir des marqueurs et des critères.

• Tests et Modélisation

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



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



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

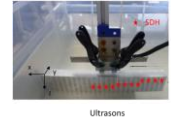
24

Contrôle par CND Ultra sons



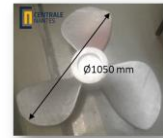
• Contexte

- 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



• Approche

- Proposer une méthode de CND pour le contrôle de l'intégrité structurale 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)

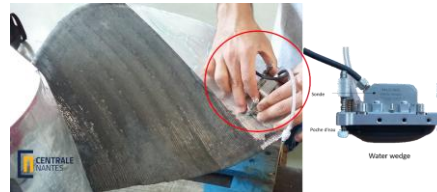
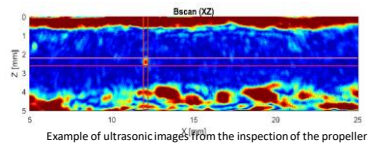


Illustration of the ultrasonic NDT inspections of the propeller.

ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

25

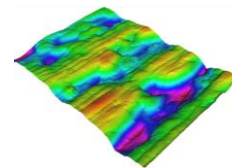
Conclusions



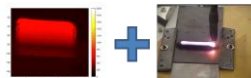
• Des critères de mesures à adapter pour les composants WAAM

• 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



Combined thermal and geometrical controls



ANF Fab3D métallique – 25/11/2025 - Bourges

26



Introduction au contrôle des pièces WAAM

Matthieu 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

