

# Fabrication de pièces en FA WAAM/WLAM à l'aide d'une solution robotisée KUKA/FRONIUS

**Rodolphe BOLOT, Alexandre MATHIEU,**  
[rodolphe.bolot@u-bourgogne.fr](mailto:rodolphe.bolot@u-bourgogne.fr), [alexandre.mathieu@u-bourgogne.fr](mailto:alexandre.mathieu@u-bourgogne.fr),

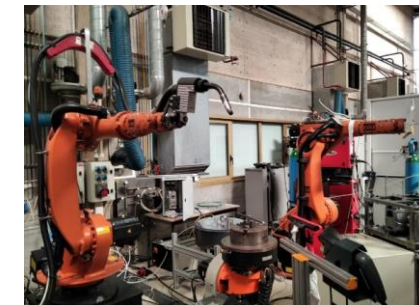
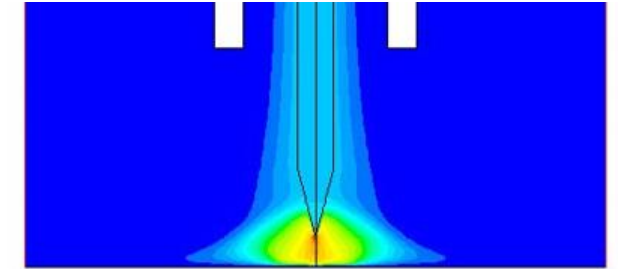
Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne  
ICB UMR CNRS 6303  
[icb.u-bourgogne.fr](http://icb.u-bourgogne.fr)

# Programme/scope

- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM
- WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé
- Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe
- Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre
- Next parts: le suite...
- Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!
- Perspectives intégration de capteurs

# Quelques mots sur l'ICB (UMR 6303)

- Environ 200 personnes (chercheurs + techniciens + personnels administratifs)
- 6 axes différents dont PMDM « **Procédés, Métallurgie, Durabilité, Matériaux** »
- **3 plateformes techniques principales dans l'axe « Matériaux & Procédés »**
  - DIJON: HIP (Hot Isostatic Pressing) et SPS (Spark Plasma Sintering)
  - BELFORT (UTBM): Projection thermique, fabrication additive SLM (dont TRUMPF TRUPRINT 1000), production de poudre (tour d'atomisation par gaz)
  - **LE CREUSOT / CHALON (environ 10 personnes)**
    - soudage laser / soudage conventionnel / procédés hybrides
    - soudage laser: TRUMPF **TRUDISK 6001**, 304P
    - soudage conventionnel: TIG, MIG, MAG, **CMT** + robots **KR8** & KR60
    - préparation d'échantillons, caractérisations mécaniques et métallurgiques, microscopie optique, MEB, etc.



# Introduction: WAAM

- WAAM pour « **Wire Arc Additive Manufacturing** »
- Cette techno consiste à fabriquer des ébauches de pièces par empilement de cordons de soudure (TIG, MIG, CMT)
- **Avantages:**
  - pas d'enceinte de confinement sous atmosphère contrôlée
  - protection locale du bain de fusion par le gaz de soudage
  - procédé de déposition rapide: 2-3 kg/h contre une centaine de grammes en LPBF
  - rendement de déposition élevé (peu de pertes): quasi 100% de matière déposée
  - procédé adapté à la fabrication additive de pièces de grandes dimensions
  - très grande variété de matériaux disponibles (tous les fils dédiés au soudage)
  - **préservation des ressources: on ne dépose de la matière que là où c'est nécessaire**
  - peu de copeaux à l'usinage (moins en tout cas)
- **Inconvénients:**
  - résolution moindre qu'en LPBF (fusion de lit de poudre): cordons de quelques mm de large (au lieu de 50µm)
  - nécessite une reprise d'usinage (ne permet que la fabrication d'ébauches)
  - niveau de contraintes potentiellement élevé et déformations possiblement élevées



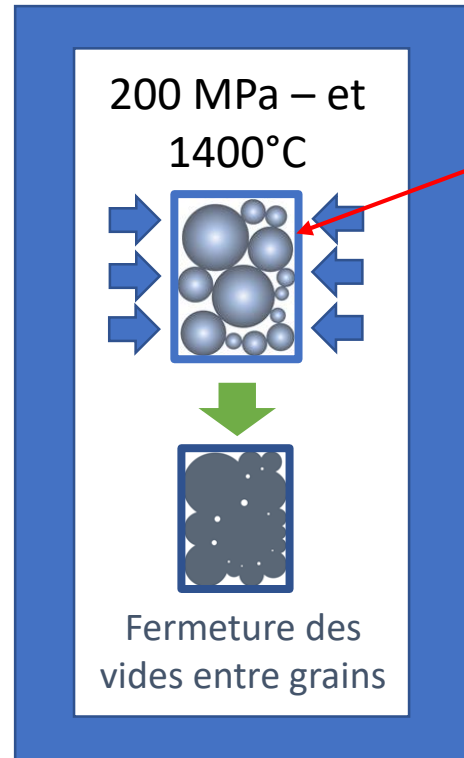
*Hélice Cupro alu chez Naval Group*

# Contexte local: Equipex+ CALHIPSO ANR-21-ESRE-0039\*



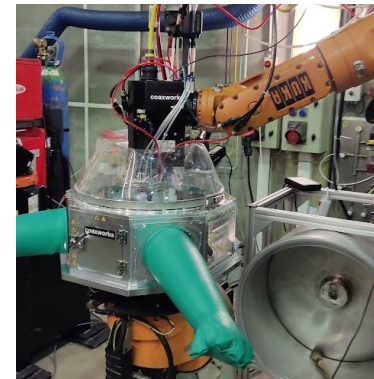
QUINTUS QIH60-URC2

Hauteur de chambre 1 m, et  $\phi$  420 mm



**Objectif:** développer le WAAM et le **WLAM** en tant que technologies spécifiques de fabrication de coques/préformes pour la fabrication de pièces pleines par HIP poudre

**Étape récente:** acquisition d'une tête laser-fil coaxiale (modèle Wire M de chez Coaxwork)



**Wire M head carried by a Kuka KR60 robot, with inert chamber**



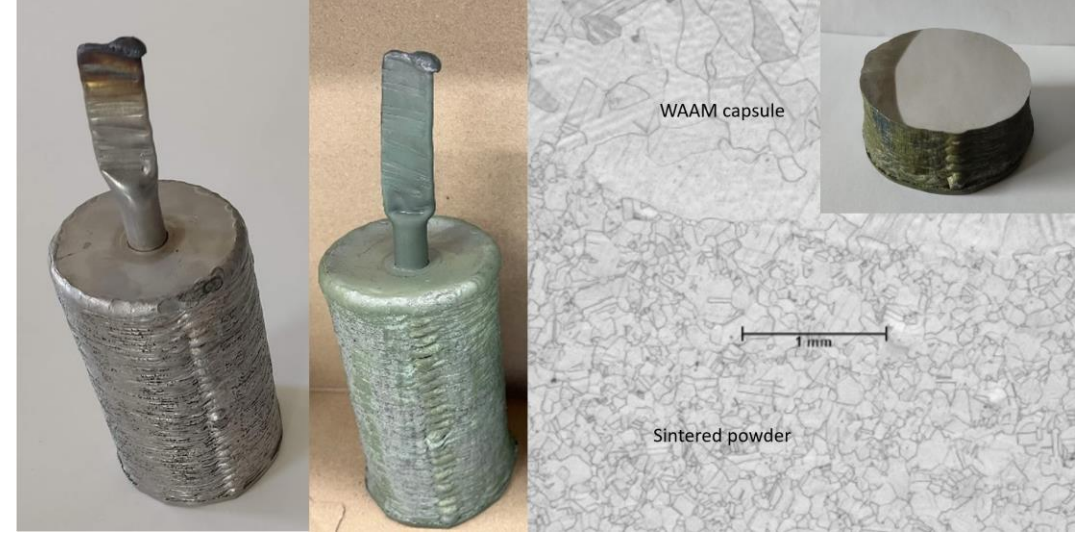
# Contexte local: Equipex+ CALHIPSO ANR-21-ESRE-0039\*



Conteneurs de poudre avant et après frittage CIC  
(fabrication conventionnelle)



2 conteneurs de poudre fabriqués par WAAM: l'un avec reprise d'usinage, l'autre sans



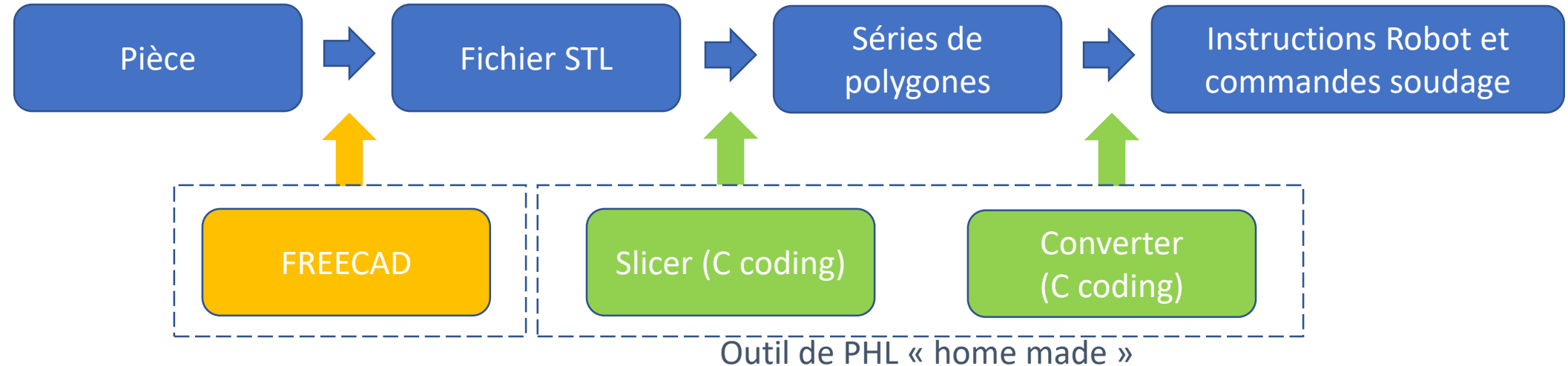
- **Contexte:** arrivée au Creusot de l'équipex+ CALHIPSO à l'été 2025: livraison du bâtiment & installation presse
- **Hypothèse:** le procédé **WAAM** permettra de fabriquer plus simplement des conteneurs/coques de formes complexes que les procédés conventionnels (mécano-soudage)

# Programme/scope

- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- **Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM**
- WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé
- Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe
- Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre
- Next parts...
- Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!
- Perspectives intégration de capteurs

# Objectif initial: développement du procédé WAAM en interne

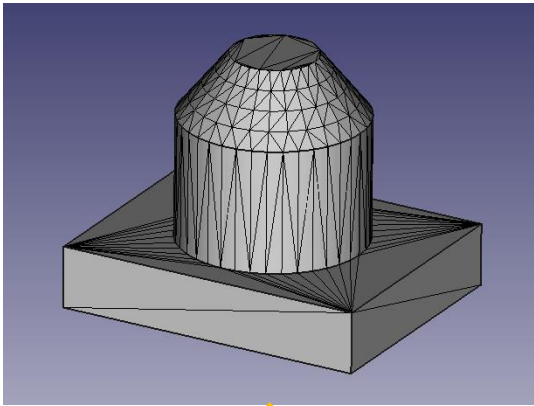
- Dans le cadre du projet région **COBAFIL** (**CO**ntrôle en temps réel du procédé de fa**B**rication Additive par arc-**fil**)  
*supporté par la "Région Bourgogne Franche-Comté" via l'EUR EIPHI*
- **Objectif:** développement d'un outil de PHL (Programmation Hors-Ligne) permettant la génération automatique des programmes robot (KRL) à partir de la CAO de la pièce à fabriquer **et intégrant des capteurs et moyens de vision** (procédé intelligent)
- Méthode:





# étape 1: Slicer

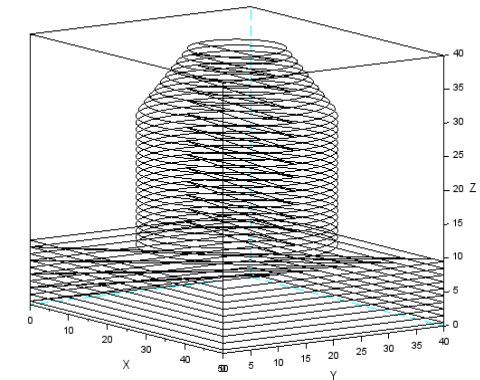
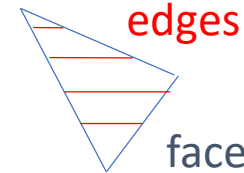
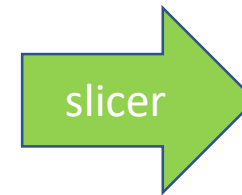
- DAO de la pièce: sous FREECAD (ou import puis export au format STL)



Fichier STL de la pièce:  
maillage surfacique à  
l'aide de faces  
triangulaires

```
facet normal 0.000000 0.000000 -1.000000
  outer loop
    vertex 25.520000 -0.000000 -0.000000
    vertex -20.645252 15.000000 -0.000000
    vertex 7.886443 24.270510 0.000000
  endloop
endfacet
facet normal -0.000000 -0.000000 -1.000000
  outer loop
    vertex -20.645252 -15.000000 0.000000
    vertex -20.645252 15.000000 -0.000000
    vertex 25.520000 -0.000000 -0.000000
  endloop
endfacet
```

Structure d'un fichier  
STL: liste de faces  
chacune définie par 3  
points



Liste de polygones  
fermés pour chaque  
tranche

# étape 2: quelques expériences pour apprendre le format des instructions et ajuster les stratégies



Toute première pièce fabriquée de manière conventionnelle (i.e., programmation in-situ) : 15 cordons tous fabriqués de la gauche vers la droite

Diminution de la hauteur de la pièce entre le point d'amorçage de l'arc et le point de sortie



Toute première coque fabriquée de manière conventionnelle: toutes les couches fabriquées en tournant dans le sens +

Amélioration de la **stratégie de scan:**

- Alternance de la direction de scan à chaque couche
- Alternance du point de départ lors de chaque couche (1 fois sur 2 en face opposée)



# étape 3: conversion des polygones en instructions robot

- étape 3: connaissance du format des instructions (langage KRL) et optimisation de la stratégie de scanning pour produire automatiquement les trajectoires robot (et les commandes de soudage) de manière robuste

```
LIN POSREF:{X -10.247248,Y -35.087479,Z 5.319844, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS  
LIN POSREF:{X -40.450851,Y -13.143278,Z 5.319844, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS  
LIN POSREF:{X -36.536751,Y -1.096916,Z 5.319844, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS  
LIN POSREF:{X -25.000000,Y 34.409550,Z 5.319844, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS  
PRE_ARC_OFF_MSD(AMDWW1)  
ARC_OFF_MSD()  
WAIT SEC TPOSTGAS  
;ENDFOLD SPLINE S3  
  
; FOLD SPLINE S4  
$BWDSTART = FALSE  
LDAT_ACT=LCPDAT1  
FDAT_ACT=FP1  
BAS(#CP_PARAMS,VSOUD)  
LIN POSREF:{X 40.450851,Y -13.143278,Z 6.835469, A 90.0,B 0.0,C 135.0}  
PRE_ARC_ON_MSD(AMDSS,#UNSYNC_ARC)  
ARC_ON_MSD(AMDSS)  
WAIT SEC TWAIT1  
LIN POSREF:{X 30.029228,Y 18.931175,Z 6.835469, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS  
LIN POSREF:{X 25.000000,Y 34.409550,Z 6.835469, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS  
LIN POSREF:{X -8.725075,Y 34.409550,Z 6.835469, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS  
LIN POSREF:{X -25.000000,Y 34.409550,Z 6.835469, A 90.0,B 0.0,C 135.0} C_DIS
```

instructions successives d'un polygone  
par commandes LIN avec option C\_DIS

Arrêt de l'arc et pause

Déplacement vers le premier point du  
polygone suivant

Arc ignition et pause (short time)

Liste des instructions pour le polygone  
suivant LIN commands avec option C\_DIS

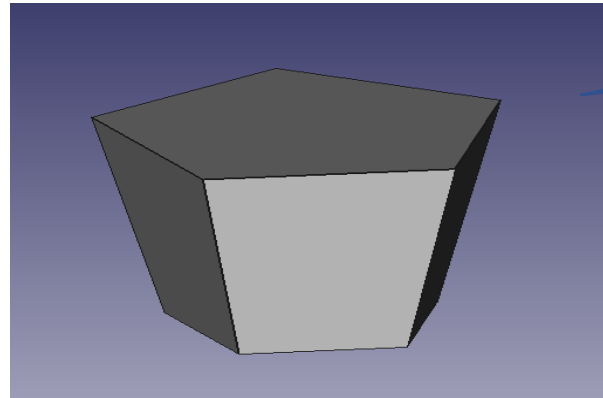
Les  
programmes  
ainsi  
générés sont  
**propres et  
dépourvus  
d'erreurs**

# Programme/scope

- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM
- **WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé**
- Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe
- Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre
- Next parts...
- Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!
- Perspectives intégration de capteurs

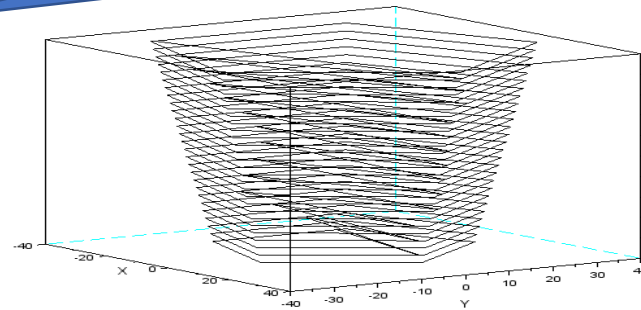
# Février 2022: première pièce fabriquée via PHL

- Exemple 1: Pentagone avec agrandissement progressif suivant la hauteur (i.e., with z coordinate)



Regular pentagon  
(5x108°) / edge size:  
30 mm (bottom)  
45 mm (top)

86 faces dans le fichier STL



Robot trajectories:  
27 layers  
932 LIN commands  
0 error in the src file

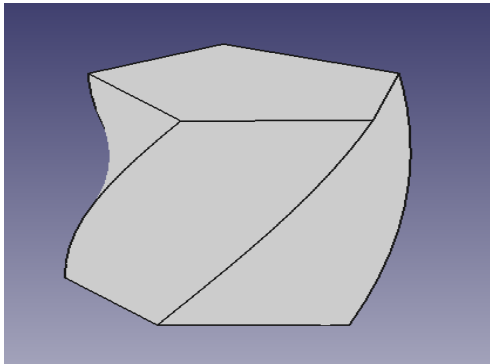


WAAM manufacturing  
Average height: 34 mm  
(about 1,25 mm/layer)

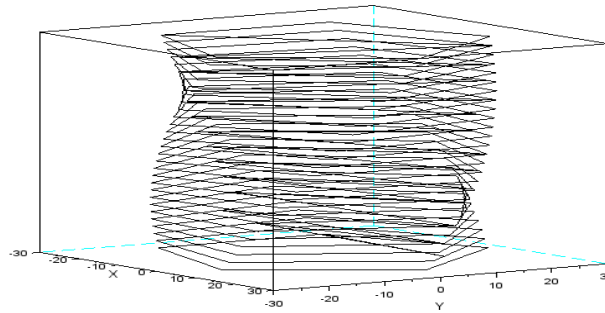


# Février 2022: seconde pièce fabriquée via PHL

- Exemple 2: twist progressif du pentagone (0.2 tours, 72°)



Regular pentagon  
(5x108°) / edge size:  
30 mm (bottom)  
Global twist angle: 72°



Robot trajectories:  
27 layers  
2372 LIN commands  
0 error in src file



WAAM manufacturing  
Average height: 34 mm  
(about 1,25 mm/layer)

# Transition mode GMAW conventionnel vers CMT

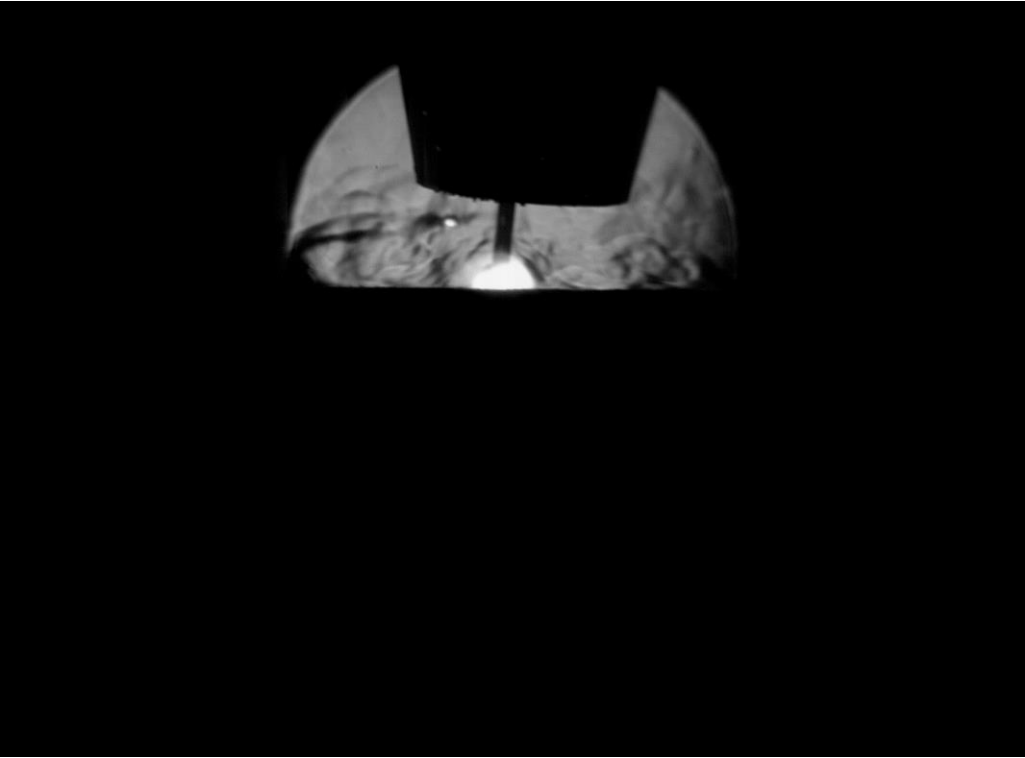


Mode GMAW: 7 m/min d'avance / 256 A

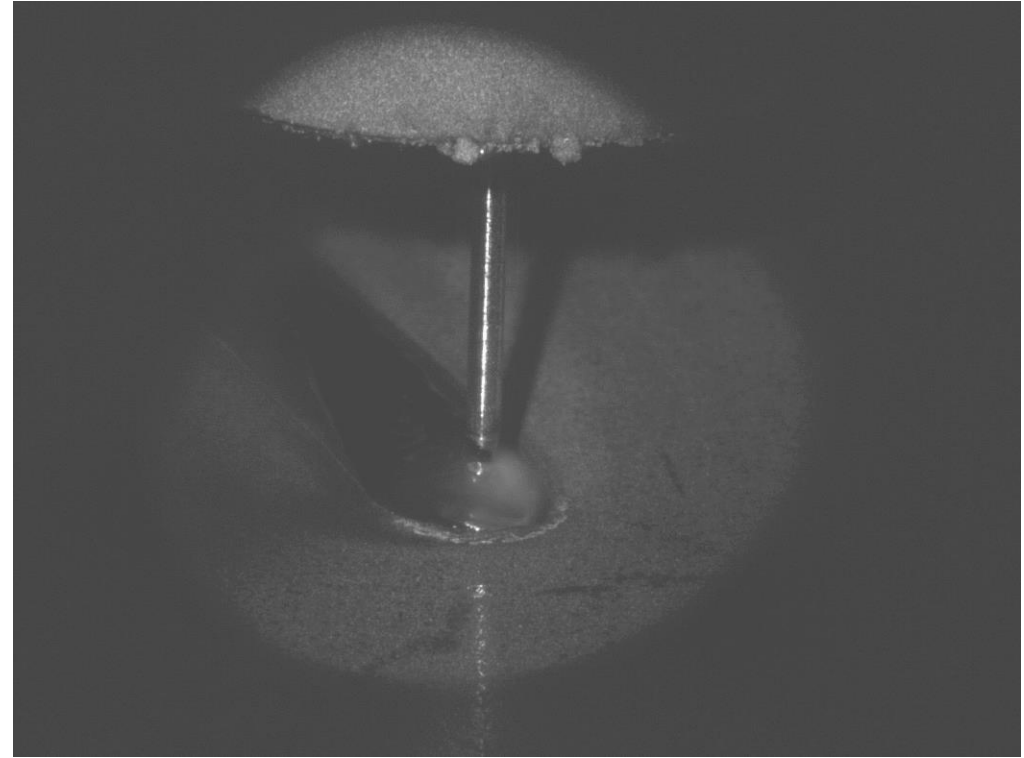


Mode GMAW: 9 m/min d'avance / 313 A

# Transition mode GMAW conventionnel vers CMT



Mode CMT: Cold Metal Transfer (arc intermittent)



Mode CMT: Cold Metal Transfer (retrait du fil)

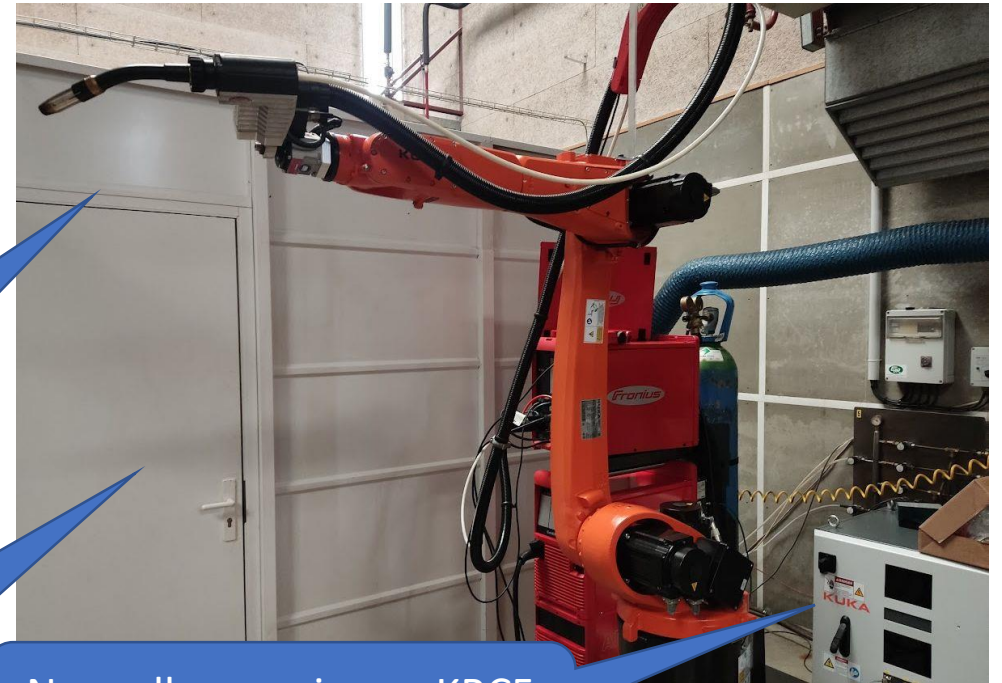
# Février 2023: Upgrade de notre installation



Nouveau poste de soudage (CMT vers CMT advanced)

Nouveau robot KR8 / installation février 2023

Quelques modifications ont été requises dans l'outil de génération de trajectoires



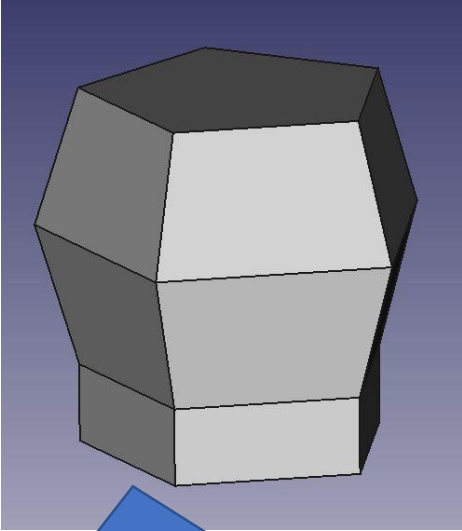
Nouvelle armoire en KRC5 (au lieu de KRC2)



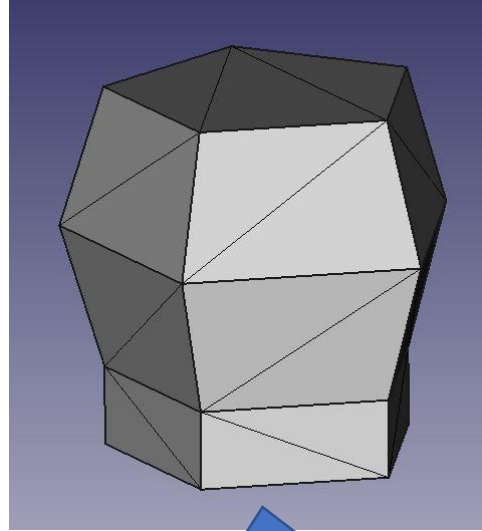
# Avril 2023: pièce sélectionnée T-time PFT3D/ICB

## Objectif accueillir 40 personnes pour une double démo

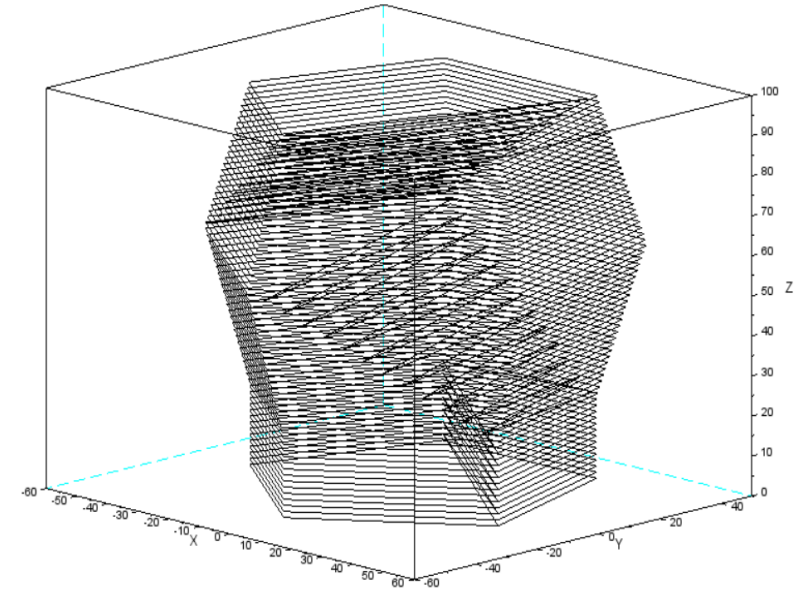
- Base pentagone avec élargissement puis rétrécissement



Regular pentagon ( $5 \times 108^\circ$ ) /  
edge size:  
50 mm (bottom)  
64 mm (au + large)  
Hauteur: 97 mm



Maillage STL le plus  
simple: 36 faces  
(2 par face carrée, et  
3 par face penta)



Trajectoires Robot avec  
connexions face opposée



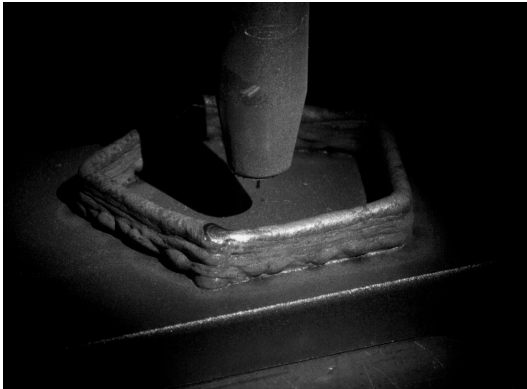
# Observation du procédé de fabrication



- Moyens mis en œuvre: Eclairage de la scène avec une diode laser CAVITAR (810 nm)
- Utilisation d'une camera PHANTOM synchronisée pour observer le procédé de fabrication sans saturation due à l'arc
- Paramètres de déposition:
  - Matériau: 316L
  - Diamètre de fil: 0.8 mm
  - Débit de fil: 12.5 m/min
  - Courant d'arc: 128 A
  - Tension d'arc: 16 V
  - Gaz de soudage: Ar
  - Vitesse de soudage: 0.75 m/min

# Bilan du T-time WAAM (PFT3D/ICB) du 25 avril 2023

- Co-organisation (avec Platform3D) d'un T-time sur le sujet du WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) en présence d'une quarantaine d'extérieurs dont de nombreux industriels locaux
- Le WAAM permet l'impression rapide d'ébauches de pièces métalliques de grandes dimensions dans une multitudes de matériaux (tous les fils de soudage peuvent être utilisés)
- Lors des démos, la mise en œuvre de moyens de visualisation (éclairage par diode laser CAVITAR à 810 nm + caméra PHANTOM) a permis à l'ensemble des participants d'observer le processus de dépôt de cordons sans aveuglement par l'arc de soudage
- Applications/perspectives: fabrication des conteneurs de poudre pour compaction HIP
- Article de presse (JSL): <https://www.lejsl.com/economie/2023/04/26/les-t-time-moments-d-echange-entre-entrepreneurs-et-platform-3d>
- Vidéo:



Animation:



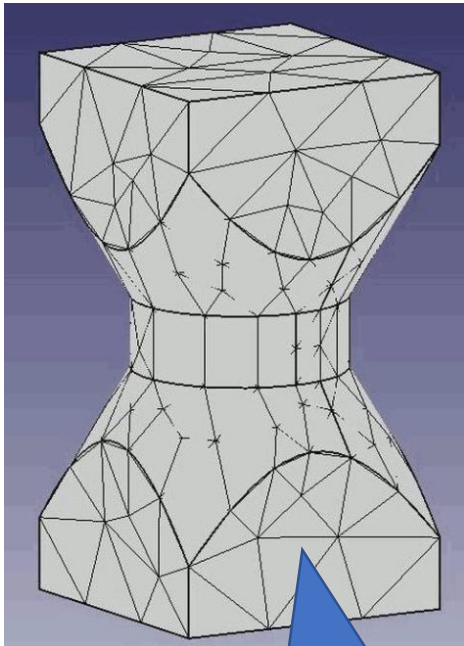
pièce finale:



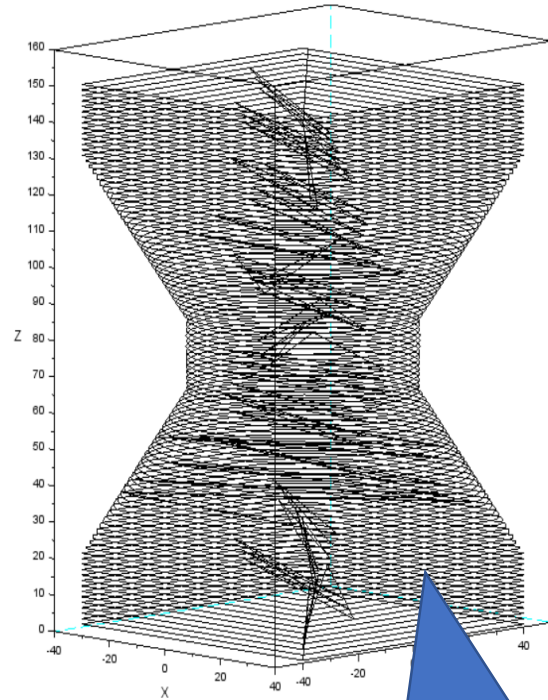
Atelier « usinage »  
mené en // à l'IUT

# Autre pièce de démo

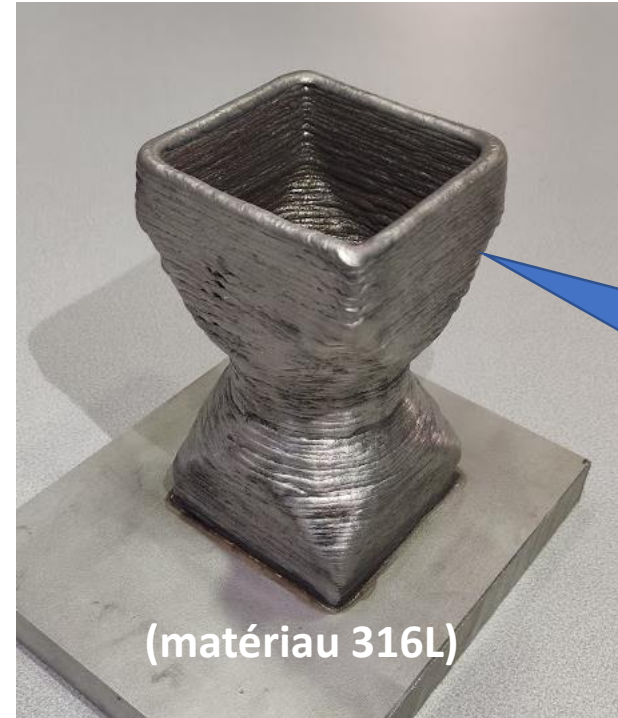
- Transition de carré à circulaire puis circulaire à carré



DAO fichier STL



Trajectoires sous  
Scilab

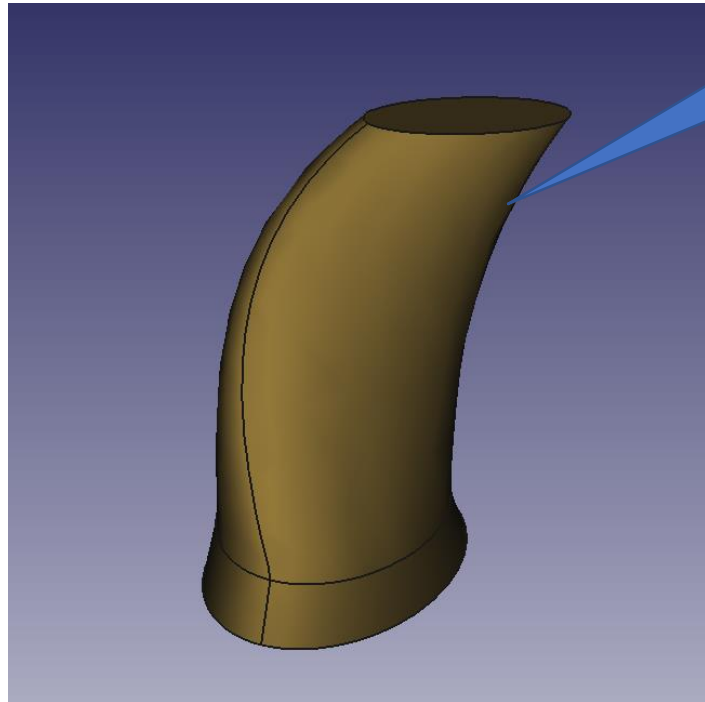


Pièce actuellement en  
expo à l'I3M Institut  
Marey Maison de la  
Métallurgie à Dijon



# Autres pièces imprimées lors de TP avec les master pro PC2M

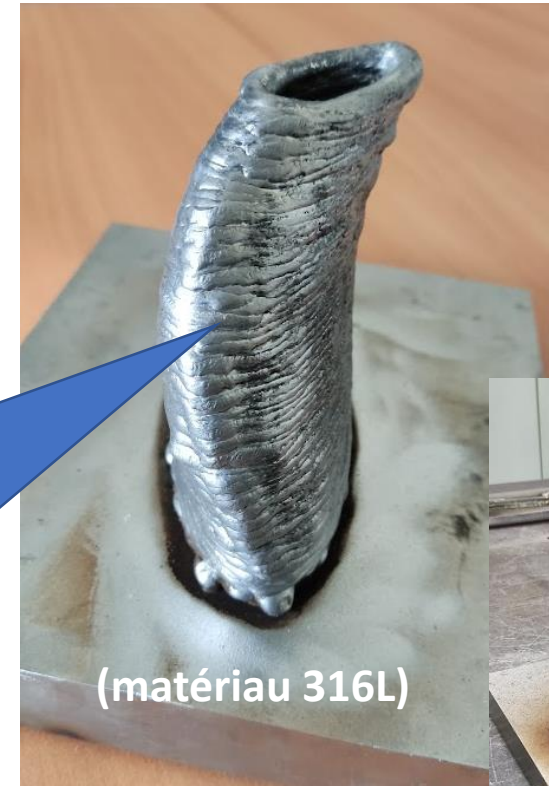
- Pièce préalablement dessinée par les étudiants de M2



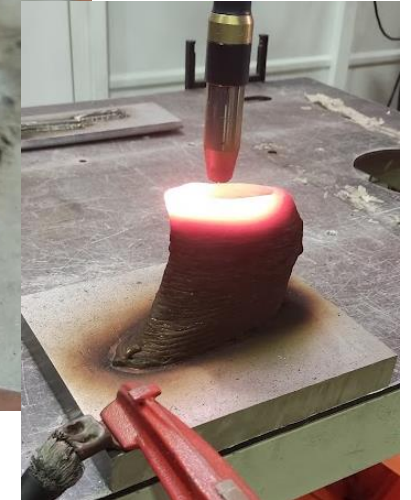
Pièce ressemblant à une sorte de pale

Cette pièce présente quelques défauts:

- Première couche: pas de préchauffage
- Couches suivantes: taux de superposition limite (formation d'un petit trou: avance dans le vide)

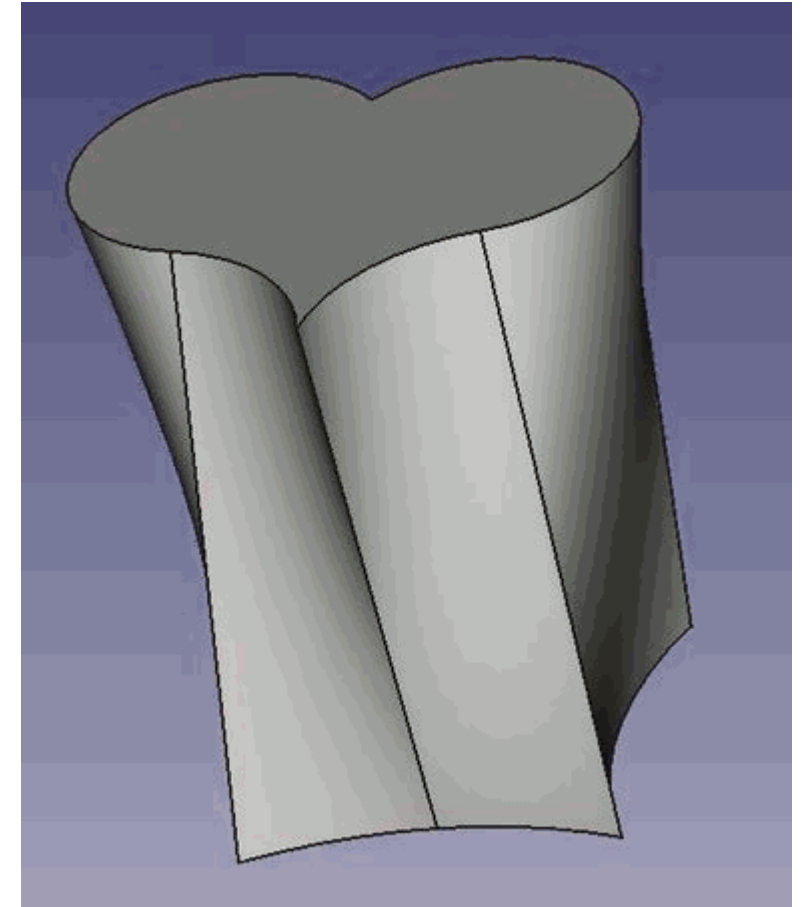


(matériau 316L)



# 15 février 2024: Impression d'un conteneur de poudre cylindrique avec les M2 du master PC2M

Impression d'un premier conteneur:



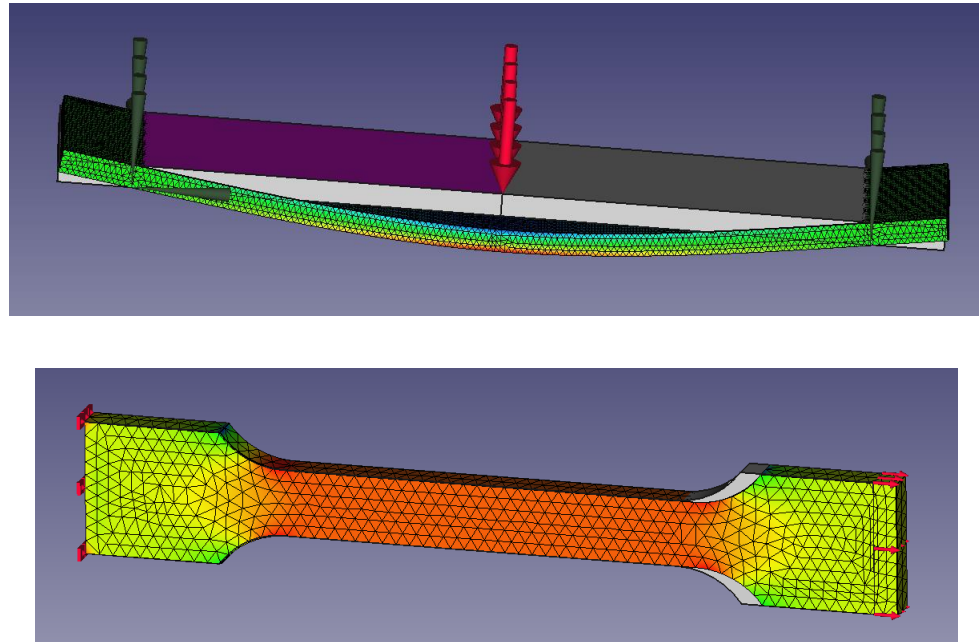


# Programme/scope

- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM
- WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé
- **Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe**
- Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre
- Next parts...
- Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!
- Perspectives intégration de capteurs

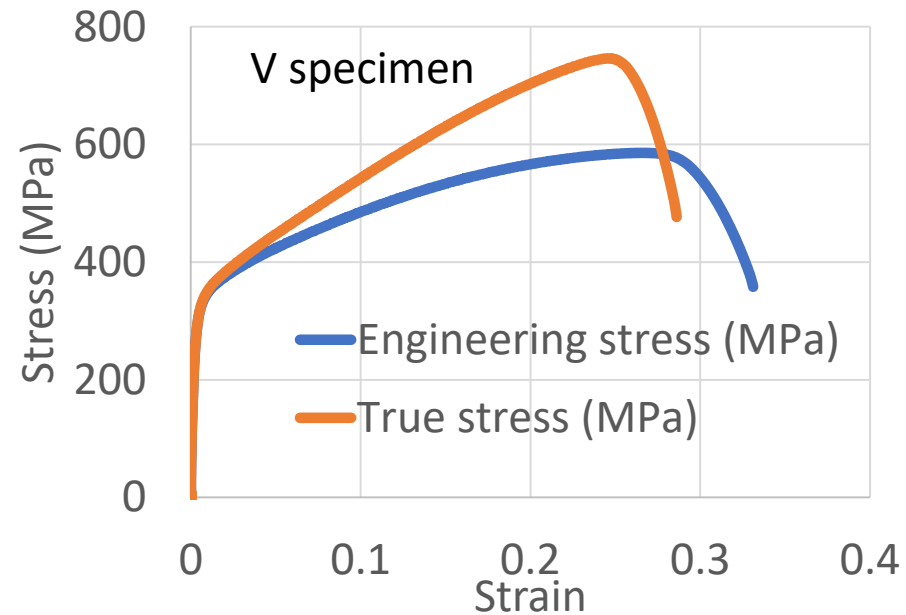
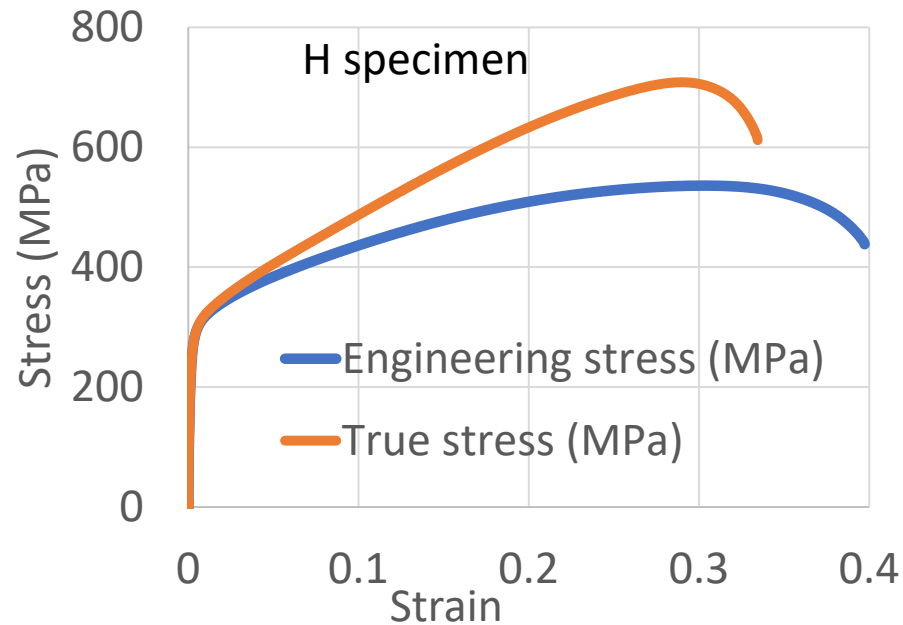
# Partie 2: Propriétés mécaniques des matériaux

- Fabrication de poutres dans les directions verticale et horizontale
- Les poutres ont ensuite été usinées et testées en flexion 3 points (but module de Young)
- Des éprouvettes de traction ont ensuite été usinées pour mesurer la  $R_m$  (UTS) et l'allongement max



# Propriétés mécaniques

- Le module de Young est un peu plus faible relativement à celui du 316L de référence
- La limite élastique est de l'ordre de 300 MPa quelle que soit la direction (H ou V)
- Les UTS correspondent aux attentes (540 MPa pour la direction H, 585 MPa pour la direction V)
- Les élongations maxi sont elles aussi conventionnelles (40% suivant la direction H, 33% pour la direction V)

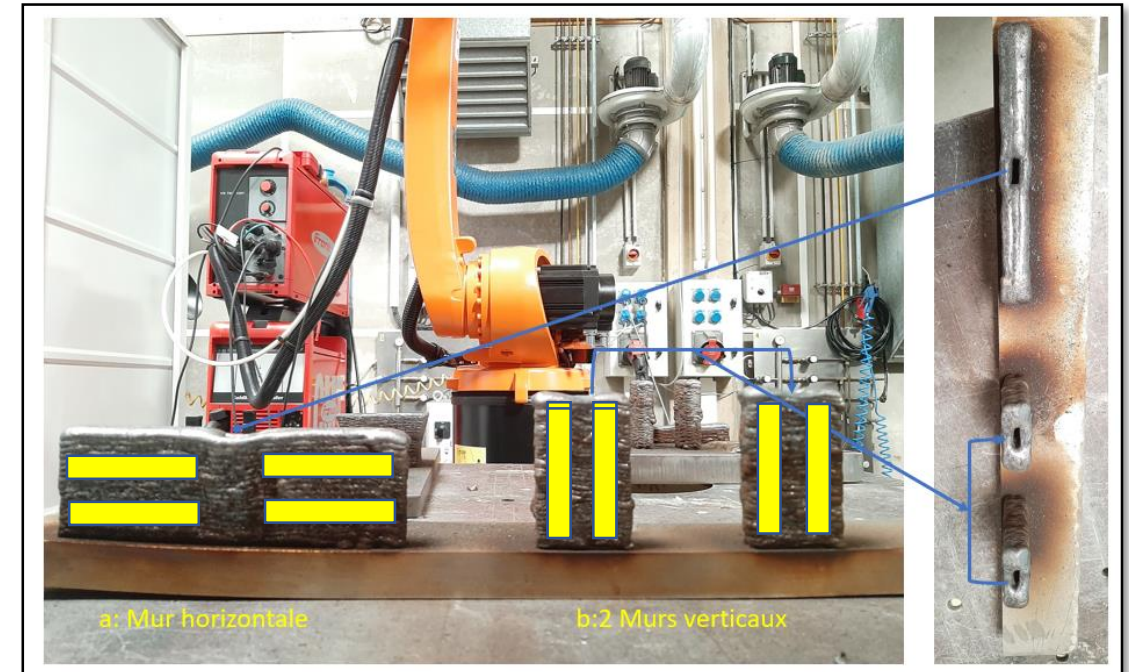
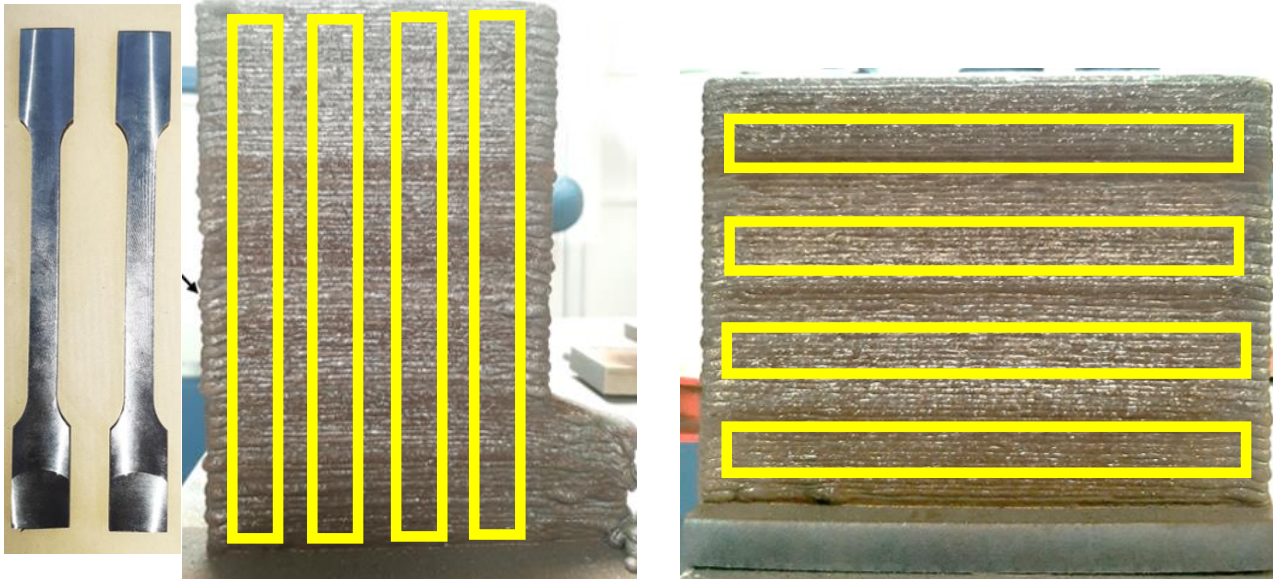




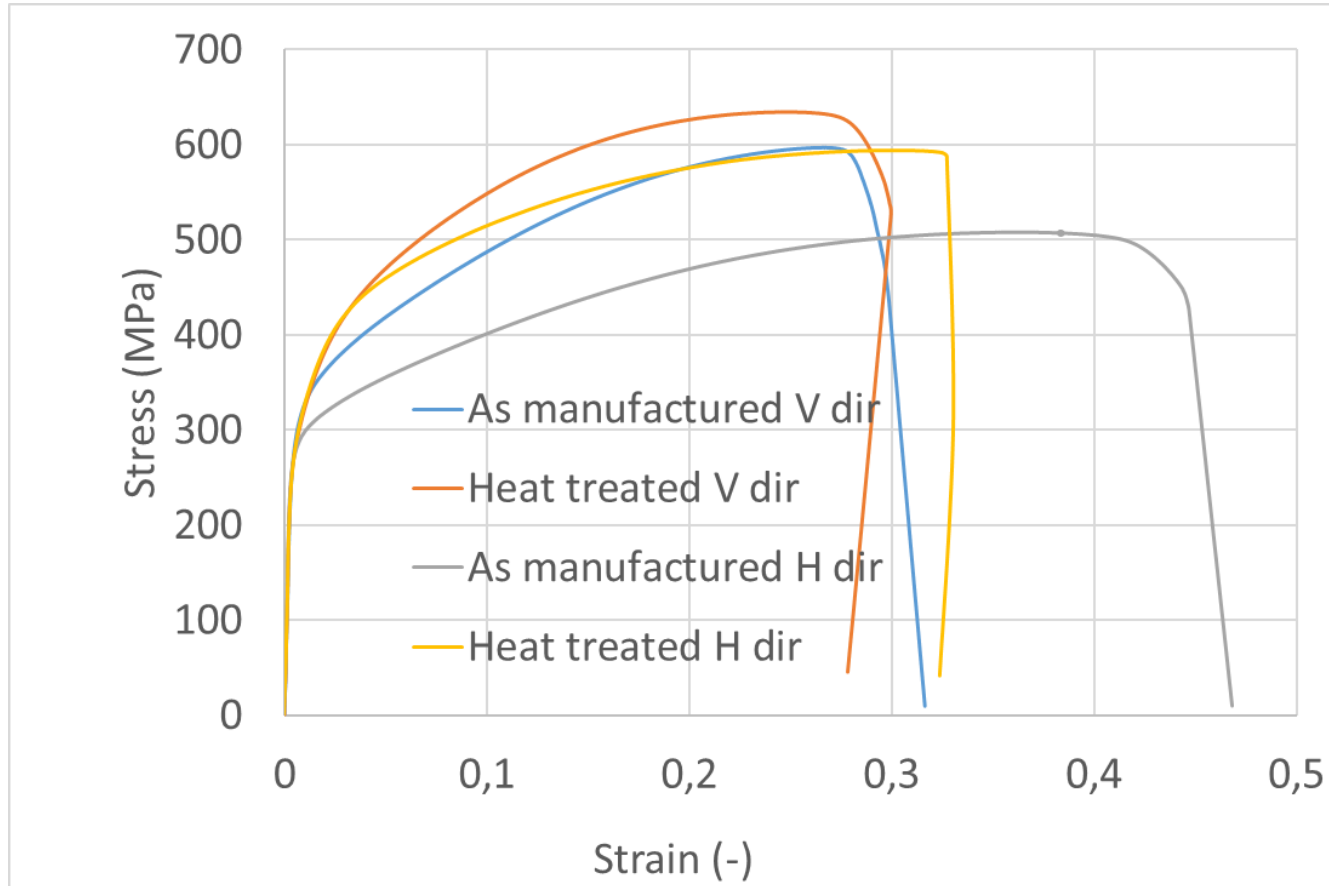
# Traitement thermique (950°C)



- De nouveaux échantillons ont été fabriqués et 50% ont subi un TT (950°C durant 1 heure)
- Les paramètres de déposition ont été conservés
- Courant moyen 140A, tension moyenne 16V, Vitesse d'avance du fil 12 m/min, Vitesse de soudage 0.008 m/s (0.48 m/min)



# Effets d'un traitement thermique: tests de traction



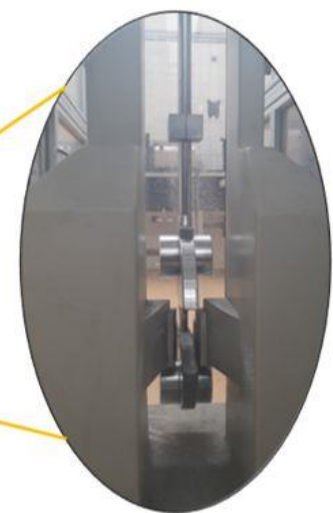
- Le traitement thermique réalisé a donné lieu à une augmentation de la résistance mécanique (UTS) et diminution de l'élongation maximale



# Effets du traitement thermique: résilience

Sample	KV (J)	KCV (J/cm <sup>2</sup> )
As manufactured H	108	135
As manufactured V	151	189
Heat treated H	37	46
Heat treated V	25	31

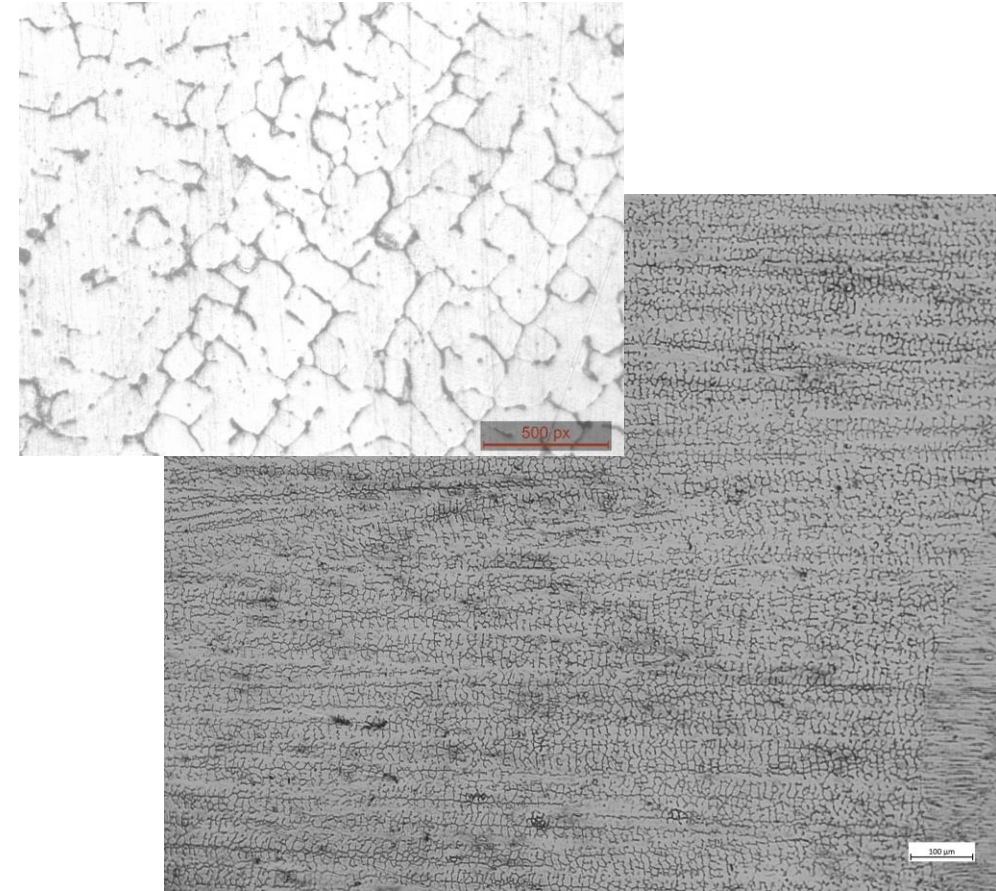
- Le traitement thermique à 950°C a provoqué une forte baisse de l'énergie absorbée lors d'un impact, ce qui tend à indiquer que des fractures tendent à se propager plus facilement après traitement (fragilisation liée à des changements de phases?)



Mouton Charpy du département GMP

# Conclusions/propriétés

- Le traitement thermique à 950°C a induit :
  - une légère augmentation du  $R_m$  quelle que soit l'orientation
  - une légère diminution de l'allongement maximal
  - une forte baisse de la résistance à l'impact (Résilience – test Charpy)
- Nous devons poursuivre nos investigations pour comprendre
  - La phase d'origine est principalement austénitique ( $\gamma$ -phase)
  - ...mais avec un squelette de ferrite  $\delta$  (vers 6-7% au ferritscope)
  - Il y a possiblement eu des changements de phase lors du traitement thermique à 950°C (phase  $\sigma$ )
- **Etape suivante:**  
Fabrication de conteneurs de poudre pour la compaction CIC (HIP)



# Programme/scope

- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM
- WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé
- Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe
- **Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre**
- Next parts...
- Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!
- Perspectives intégration de capteurs

# Mars 2024: Préparation de 2 conteneurs: l'un avec reprise d'usinage, l'autre sans

Préparation de 2 conteneurs pour frittage de poudre par CIC:



*A droite le conteneur précédant après reprise d'usinage  
A gauche, un second conteneur imprimé en paramétrie fine (3-4 mm au lieu de 7)*



*Les 2 mêmes conteneurs après remplissage de poudre et mise sous vide*



- Le frittage de poudre par HIP s'est parfaitement déroulé pour le conteneur sans reprise



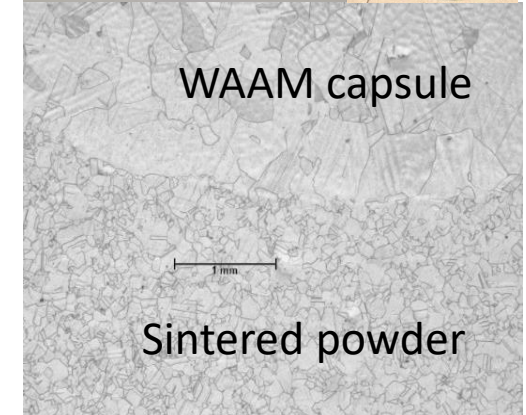
# Preuve de concept ! Fabrication d'une pièce pleine et dense (ici cylindre plein) à partir d'un conteneur fabriqué WAAM

## - Les étapes:

- Remplissage de poudre (316L) via système vibrant
- Mise en place d'un filtre
- Tirage au vide et chauffage à 300°C
- Pinçage du tube de remplissage et soudage
- Frittage suivant cycle conventionnel :
- 2 cycles de mise sous vide / mise sous Argon de l'enceinte
- Mise en pression à 100 bars
- Montée à 1200°C – 1020 bars (10°C/min puis 5)
- **Maintient 4h**
- Refroidissement naturel puis décompression à partir de 150°C

## - Conclusions:

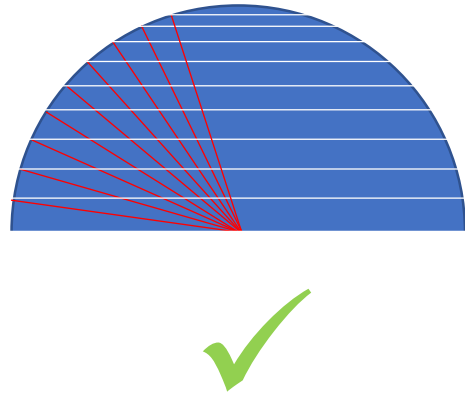
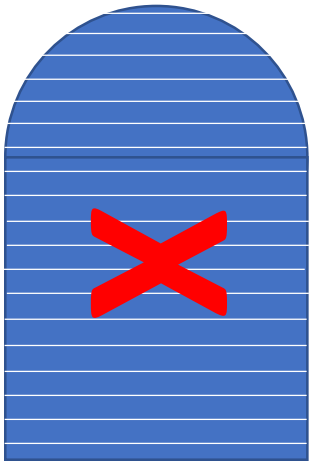
- **La structure de grain est grossière dans la paroi du conteneur WAAM**
- **La taille de grain est fine dans la poudre agglomérée/compactée/frittée**
- **La CIC a permis la suppression du squelette ferritique (retour à un matériau 100% austénitique)**





# Début 2025: impression directe d'un conteneur cylindrique avec couvercle dôme

- objectif fermeture d'un cylindre (ou cône ou autre) via une demi-sphère
- Méthode proposée: ça ne peut pas être fait sans y porter une attention particulière avec slicing conventionnel, c'est difficilement envisageable !  
...les couches sont réalisées avec un porte-à-faux croissant (de plus en plus dans le vide)



**Solution 1:** slicing progressivement resserré de sorte à correspondre à des segments inclinés de dimensions constantes.

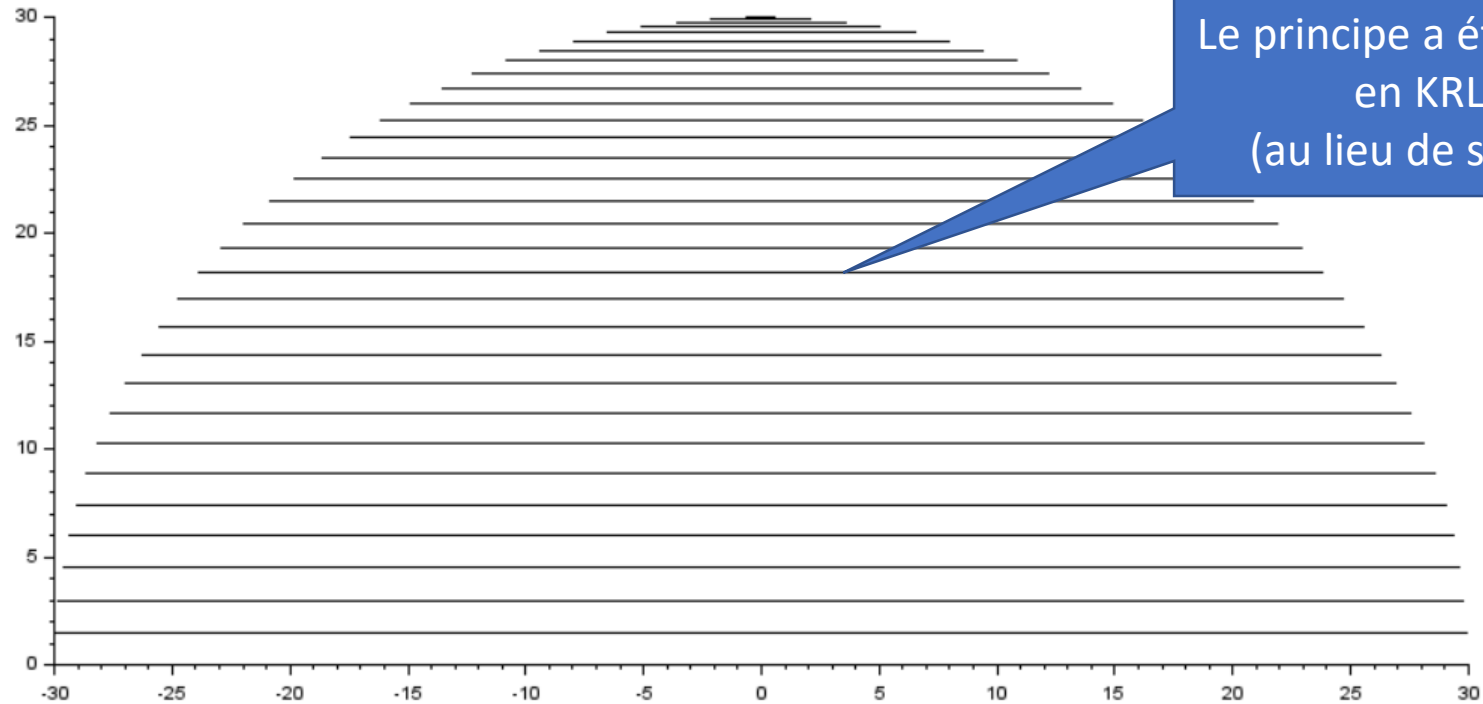
Chaque couche devra correspondre à une hauteur (inclinée) de 1,5 mm (exemple)  
Pour un diamètre de 60, on aurait  $L=\theta R$ , d'où  $\theta=L/R=1,5/30=0,05 \text{ rad}=2,865^\circ$ , soit 31 couches pour  $90^\circ$  (au lieu de  $30/1,5=20$  pour un slicing régulier)

# Préparation: code scilab pour raffinement progressif du slicing

Exemple de code scilab:

```
clear all;
diam=60;
seg=1.5;
dteta=seg/(diam/2);
nseg=int((%pi/2)/dteta);
for i=1:nseg+1
    angle=(i-1)*dteta
    x(i)=(diam/2)*cos(angle);
    z(i)=(diam/2)*sin(angle);
    xs(1)=-x(i);
    xs(2)=x(i);
    zs(1)=z(i);
    zs(2)=z(i);
    plot2d(xs,zs);
end
//plot2d(x,z);
//plot2d(-x,z);
```

Les lignes de code permettent d'obtenir la figure suivante:



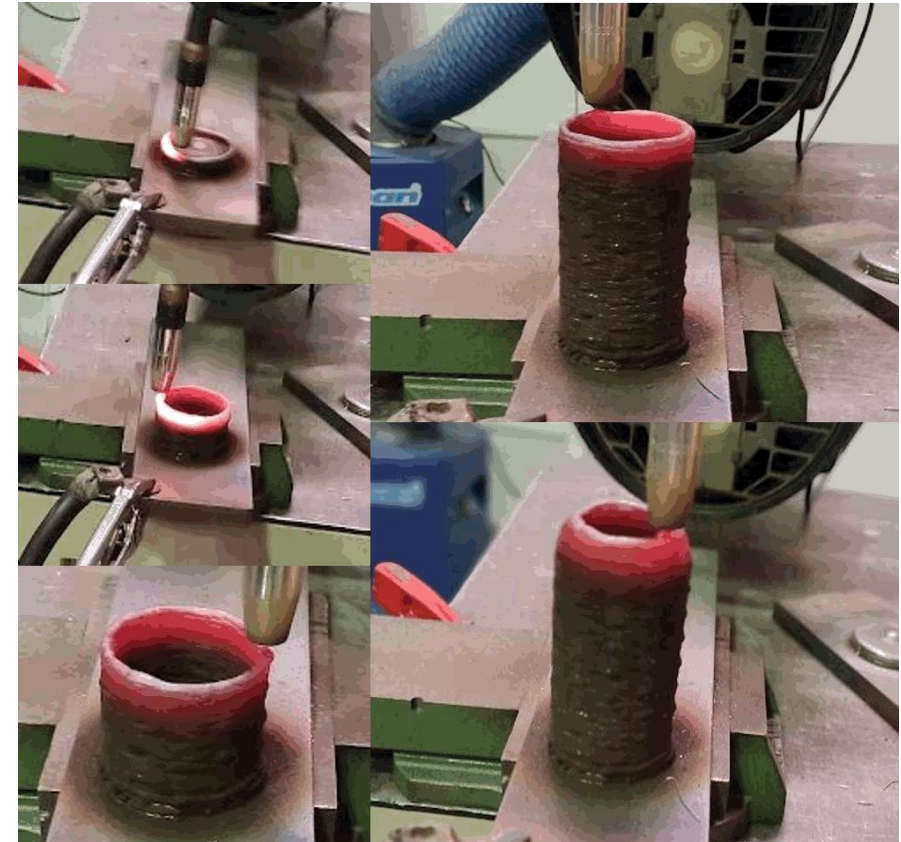
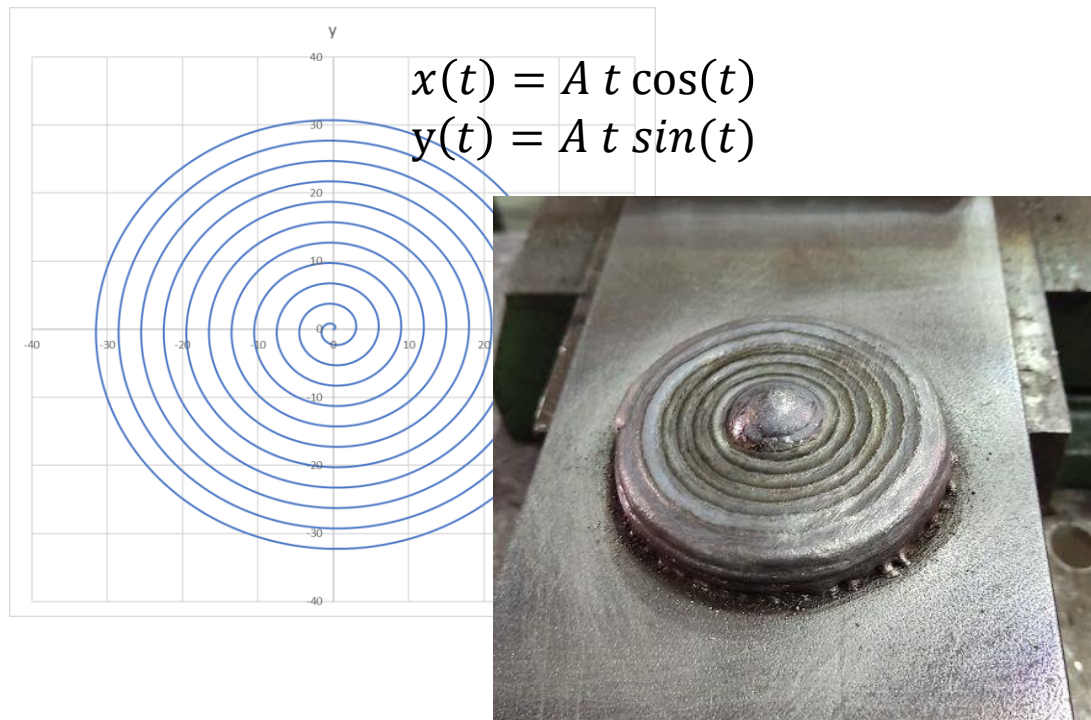
Le principe a été repris  
en KRL  
(au lieu de scilab)

Sous Scilab, l'exécution pourra être réalisée via `exec('halfsp.sce')` où le fichier 'halfsp.sce' contiendra les lignes de code correspondantes...

# Impression directe socle/cylindre/dôme sans dépose

Etape 1: socle multicouche avec trajectoire en spirale

Etape 2: cylindre et dôme

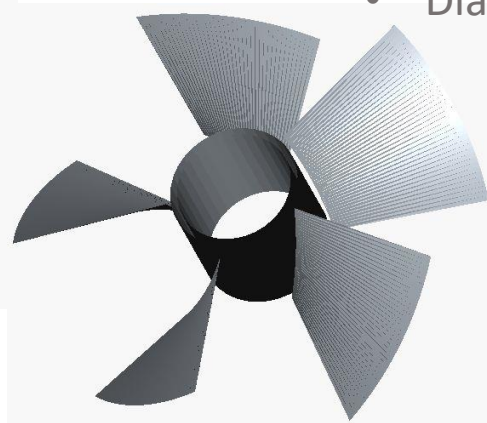
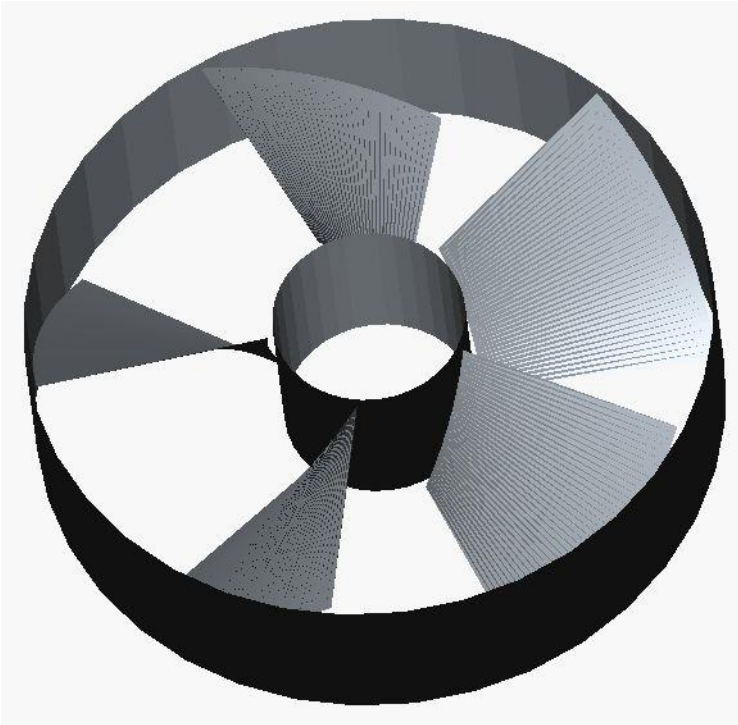


# Programme/scope

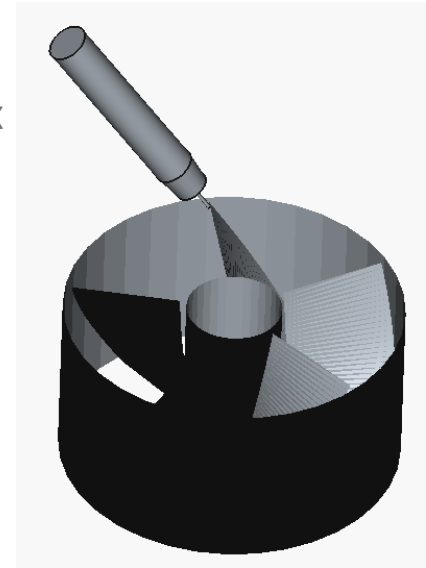
- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM
- WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé
- Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe
- Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre
- **Next parts...**
- Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!
- Perspectives intégration de capteurs



# Notre prochain défi (prochaine famille de pièces)



- Les programmes robot sont prêts depuis plusieurs semaines
- Petits soucis « logistique » (chauffage/aération atelier)
- **Pour la première fois ils incluent l'inclinaison de l'outil (dispositif de soudage)**
- y compris variation de l'inclinaison le long de chaque segment
- Pas de slicing: tout en programmation dure
- Programme entièrement paramétrable:
- Diamètres/remplissage de l'axe ou non / jeux

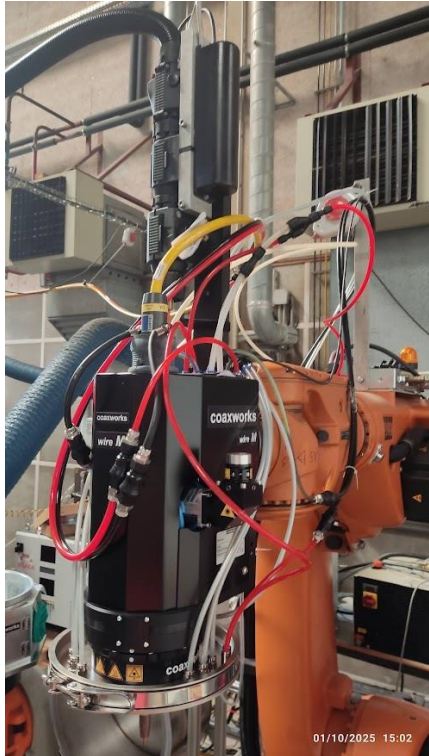


# Programme/scope

- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM
- WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé
- Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe
- Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre
- Next parts...
- **Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!**
- Perspectives intégration de capteurs

# La tête WLAM Coaxworks Wire M

## La tête coaxworks



- **Compatible avec notre laser TRUMPF TRUDISK 6001** (Yb-YAG 1030 nm)  
(puissance nominale 6 kW, fibres 100, 200, 400, 600µm)
- **Inclut un split du faisceau laser en 3** et une focalisation des 3 faisceaux autour du fil (10 mm plus en aval de la sortie de fil)
- **Installée sur un robot permettant une charge supérieure**  
(KR60 au lieu de KR8)
- **Réutilisation d'un ancien dévidoir DINSE**
- **Équipements:**
  - Installation simultanée d'une boîte à gants pour fab add sous Argon
  - Pas de capteur de force pour le dévidage de fil
  - Système d'éclairage dans l'UV et caméra équipée d'un filtre

# Une sensibilité élevée en WLAM (versus WAAM)

## Some key features in AM using WLAM (coaxworks head)



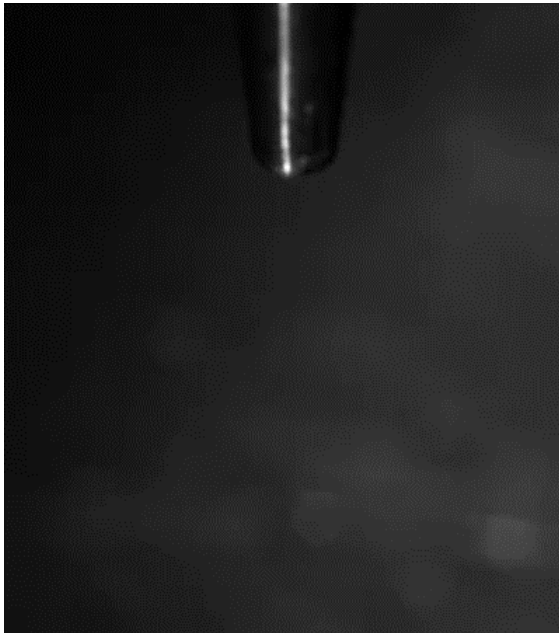
- **Peu de tolérance relativement à la distance focale:** la distance entre le TCP et la surface (ou cordon n-1) doit être bien maîtrisée !
- **L'irradiation laser doit commencer exactement au moment où le fil arrive sur la surface.** La tempo entre les déclenchements du fil et du laser doit être bien ajustée (à définir à partir de la Vitesse d'avance du fil et de la distance pointe du fil à cordon)
- **La puissance du laser doit être réduite après les premiers cordons** (la dissipation thermique évolue)



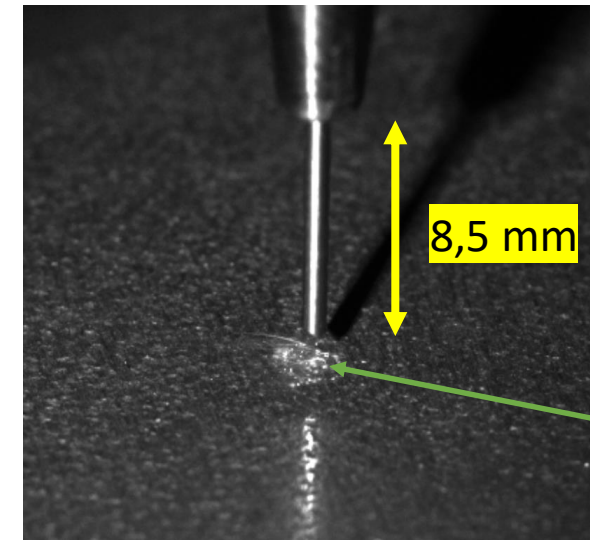
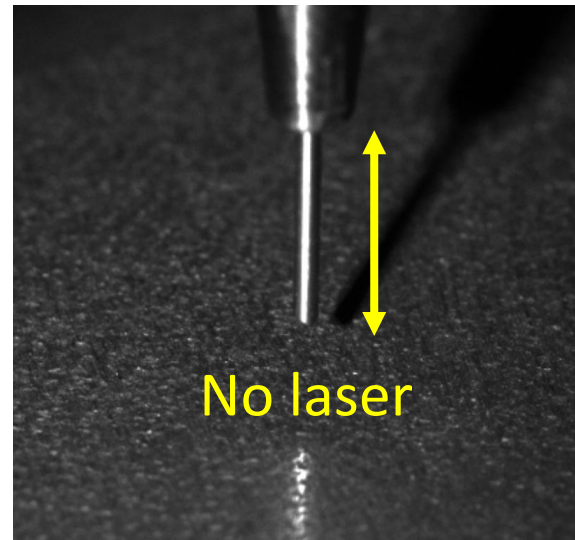
# Points clés en WLAM (tête Wire M)

## Prérequis n°1: bonne synchro entre le fil et l'irradiation laser

...en l'absence de capteur d'effort au niveau du dévidage de fil



Wire feed: 2,3 m/min

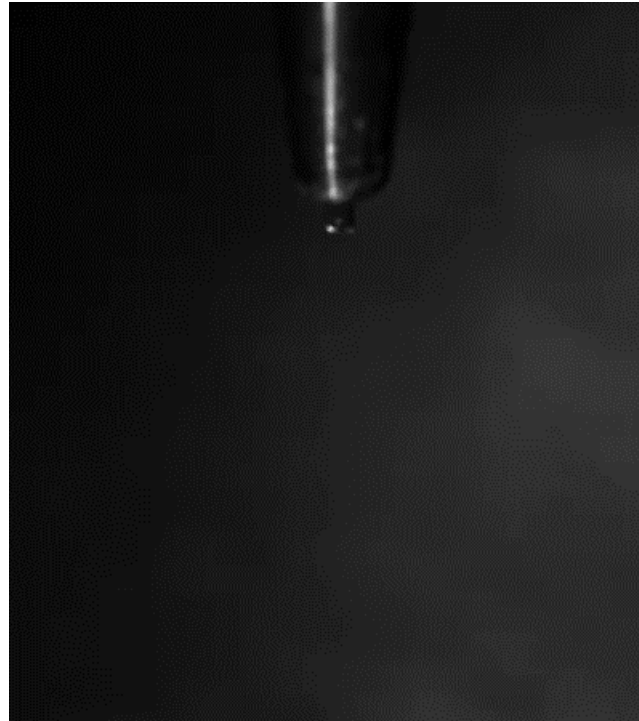


Laser

En étant capable de regarder ce qui se passe (via camera adaptée), on peut deviner ce qui ne va pas (exemple tempo inadaptée)

# Points clés en WLAM (avec tête Wire M)

**Prérequis n°2:** ajuster/diminuer la puissance après quelques passes



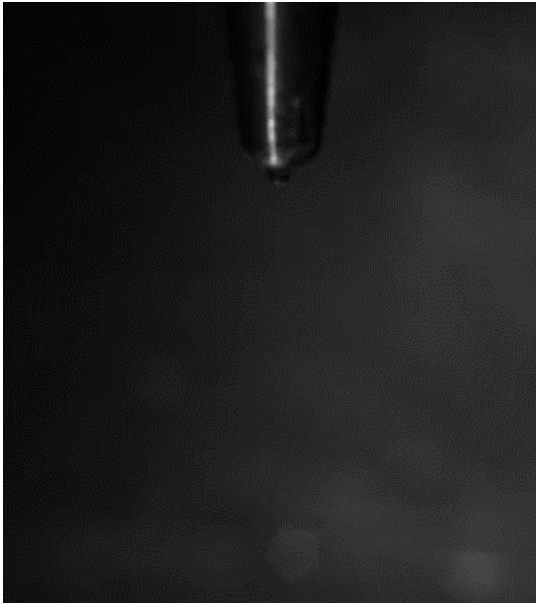
La dissipation thermique évolue après élaboration des premiers cordons...

Il convient alors de diminuer la puissance laser pour maintenir un cordon stable

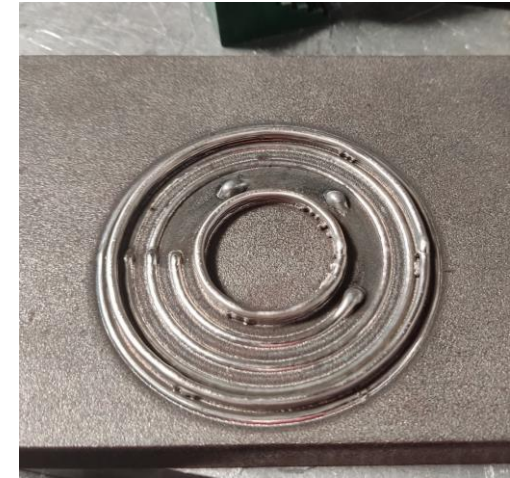
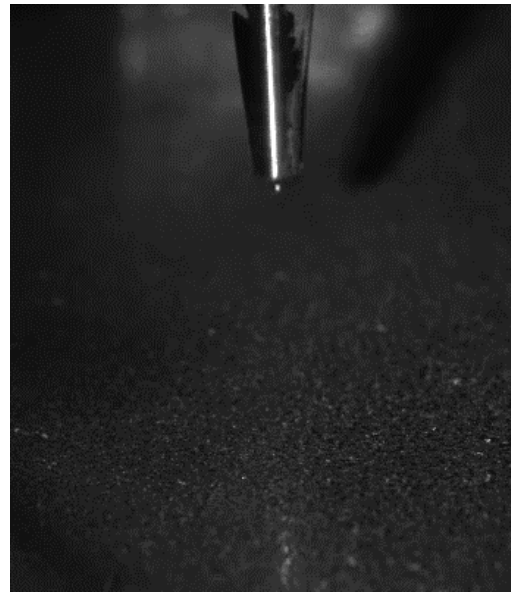
...dans le cas contraire, la fusion peut devenir instable comme montré sur le premier film

# Points clés en WLAM (avec tête Wire M)

Quelques cordons en +:



Cordons circulaires:



Pour plus de couches, il convient de bien maîtriser la distance tête/cordons  
Notre idée est d'ajouter un contrôle de la hauteur TCP/cordon sous-jacent...

# Programme/scope

- Introduction: le laboratoire ICB, le WAAM
- Contexte: Equipex+ CALHIPSO
- Préparation/slicing/PHL pour impression WAAM/WLAM
- WAAM quelques pièces fabriquées en interne / visu procédé
- Propriétés mécaniques (traction/résilience) + test effet trempe
- Impression de conteneurs/coques pour CIC poudre
- Next parts...
- Expérience WLAM (avec tête coaxworks): les clés!
- **Perspectives intégration de capteurs**



# Problématiques résiduelles

- Maîtrise imparfaite de l'épaisseur de chaque cordon
- Cette épaisseur varie notamment avec la température de la couche sous-jacente
- **Respect des cotes approximatif suivant la hauteur...**



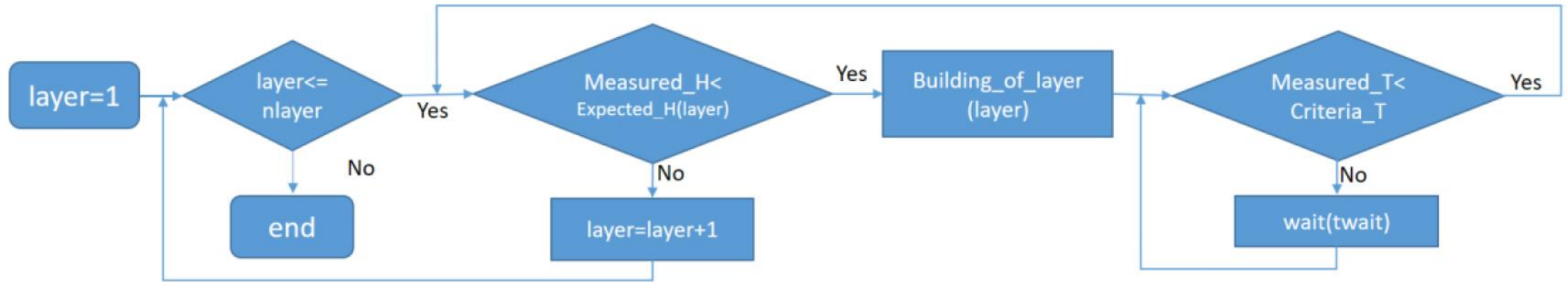
## Exemple de dérive de la hauteur:

- 20 cordons réalisés avec un temps d'attente de 10 s: épaisseur 32 mm (1,6 mm / cordon)
- 20 cordons réalisés avec un temps d'attente de 5 s: épaisseur 29 mm (1,45 mm / cordon)

- Il nous faut contrôler le procédé (température et hauteur de pièce) **en temps réel**

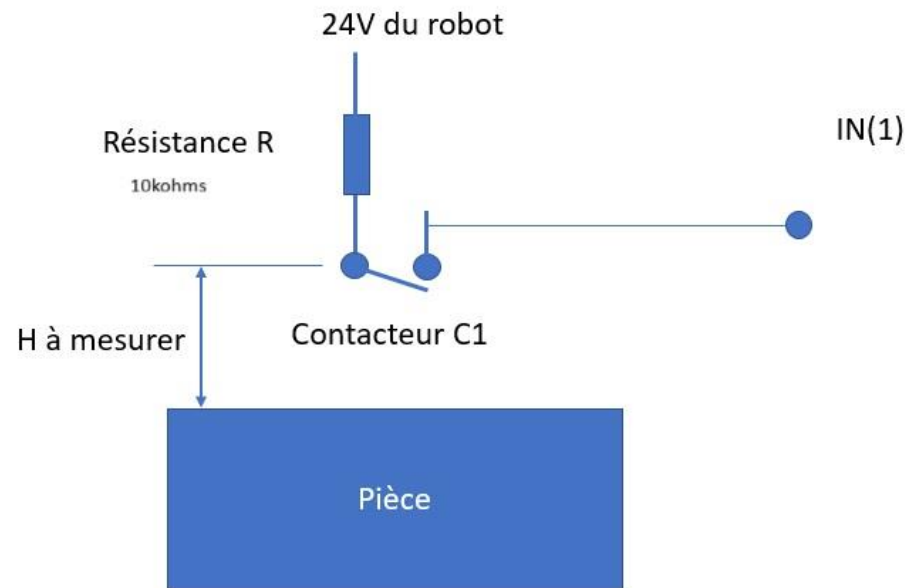
# Intégration de capteurs via boucle de rétroaction en 2 temps dans la gestion de la robotique

- Nous avons tout d'abord prévu une boucle de rétroaction intégrant **2 capteurs** et interagissant avec le programme robot comme suit:



- Cette boucle nécessite un contrôle en température (pyrométrie) et un autre pour le suivi de la hauteur (système optique) pour Measured\_H et Measured\_T...
- Le langage KRL est tout à fait adapté à l'intégration de ce type de boucle (le codage correspondant intégrant des boucles structurées de type « tant que » est déjà écrit...)

# Exemple de mesure directe de la distance outil/cordon avec un contacteur



- Utilisation de la sortie 24V de l'armoire KRC5
- Résistance R pour limiter le courant envoyé sur \$IN[1]
- Descente lente du capteur porté/fixé sur le robot jusqu'à fermeture du circuit électrique via le contacteur
- Une entrée libre (ici \$IN[1]) du microcontrôleur est alors activée
- L'idée est de descendre **tant que** \$IN[1] n'est pas activée...
- Le position Z du robot est alors enregistrée (et comparée à sa valeur attendue)

# Conclusions/Perspectives

- Robot KUKA KR8 reçu et installé ✓
- Poste de soudage FRONIUS CMT mis à jour (version advanced) ✓

**09/2024: post-doc Hichem Aberbach (ex doctorant de l'équipe) de 09/24 à 08/25**

- Financement:

This work is supported by the EIPHI Graduate School (contrat ANR 17-EURE-0002) and Bourgogne-Franche-Comté Region.

- Plusieurs projets ont depuis été déposés ces dernières années sur le sujet
- 2024: ...
- 2024: CAPSCIC (EUR EIPHI): objectif mise en œuvre de 4 technologies distinctes pour la fabrication de capsules (WAAM, WLAM, imprimante 3D Lynxter S600D, imprimante 3D Desktop Metal)
- Ces 2 imprimantes sont de type liant/poudre: une pièce verte est imprimée, le liant est ensuite éliminé (four), et un frittage à  $P_{atm}$  est réalisé (au four) / limitation = volume de l'imprimante ( $\phi 300$  h450 mm)
- Étape 1: quelle épaisseur de paroi pour assurer l'étanchéité du conteneur en impression liant/poudre?
- Une étape de frittage CIC de la capsule seule sera-t-elle nécessaire pour la rendre étanche ?
- En cas de succès, une tête liant/poudre pourrait être acquise et montée sur robot

Projet  
COBAFIL



# Info/perspectives (cv à transmettre rapidement)

- **Nous recherchons un stagiaire type Master 2: (thèse possible derrière cadre ANR)**

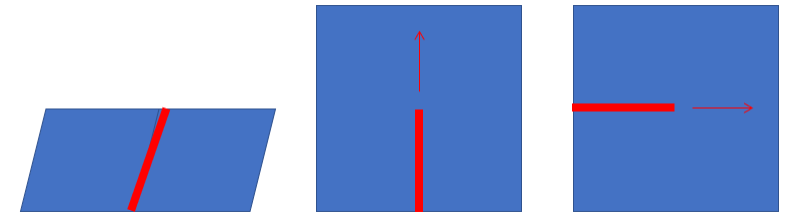
- Thème remplissage multi-passes de chanfreins étroits (e 30 mm, idem FA type GTAW)
- Un coté modélisation d'arc est attendu/prévu
- Ref. récente:

Electromagnetic–Computational Fluid Dynamics Couplings in Tungsten Inert Gas Welding Processes—Development of a New Linearization Procedure for the Joule Production Term

Thierry TCHOUMI, François PEYRAUT, Rodolphe BOLOT, Appl. Mech.- n° 5(1) – 2024 – 121-140

- **Perspectives:**

- Passage à une version 3D plus couteuse en temps de calculs
- Couplage (direct ou non) avec **modèle VOF** pour la prédiction du bain et de la morphologie de cordon
- **Influence de la position de soudage** / prise en compte de la gravité (soudage à plat au sol, cordon vertical sur paroi verticale, cordon horizontal sur paroi verticale, en voute: à minima 3 configs...)



# Notre nouvelle plateforme HIP CALHIPSO



**Merci pour votre attention**

Contact

[Rodolphe.bolot@ube.fr](mailto:Rodolphe.bolot@ube.fr)