Aspects énergétiques du procédé WAAM

H. Klöcker
Centre SMS
Ecoles de Mines de Saint Etienne
klocker@emse.fr

INSPIRING INNOVATION INNOVANTE PAR TRADITION

SÉMINAIRE PMM 05/06/2020

Table des matières

I. WAAM
II. SOUDAGE
- II.1. Définitions
- II.2. Historique
- II. 3. Principaux types de soudage

III. WAAM OU PROCEDES CLASSIQUES
- III.1 Avantages inconvénients du WAAM
- III.2. La tonne équivalent pétrole (TEP)
- III.3. Elaboration des métaux aspects énergétiques
- III.4. Transformation des métaux
- III.5. Buy to fly
- III.6. Bilan énergétique approximatif

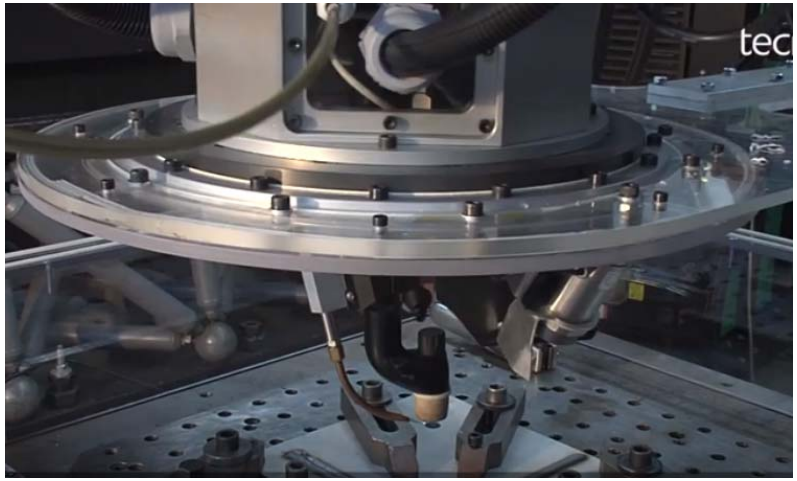
IV. WAAM & PROCEDES CLASSIQUES
- IV.1. Soudage intégré dans le procédé de fabrication
- IV.2. Soudage intégré dans le procédé de réparation

V. WAAM à Mines Saint Etienne
- IV.1. Financements & projets
- IV.2. Projets scientifiques

I. WAAM

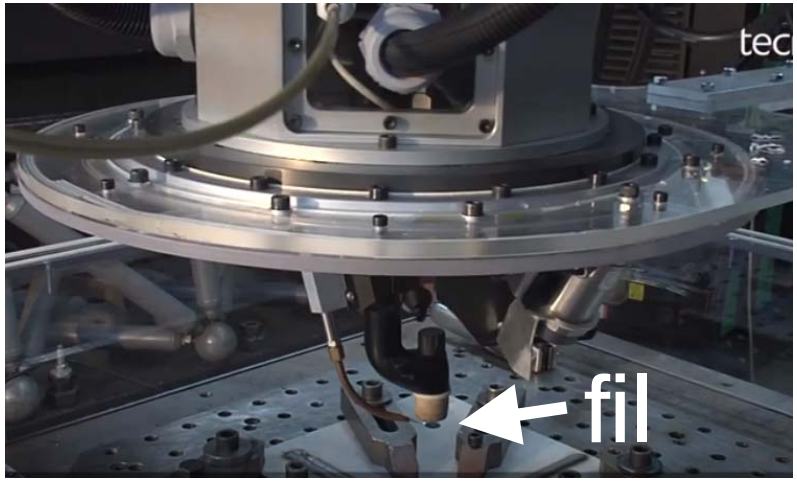
I. WAAM

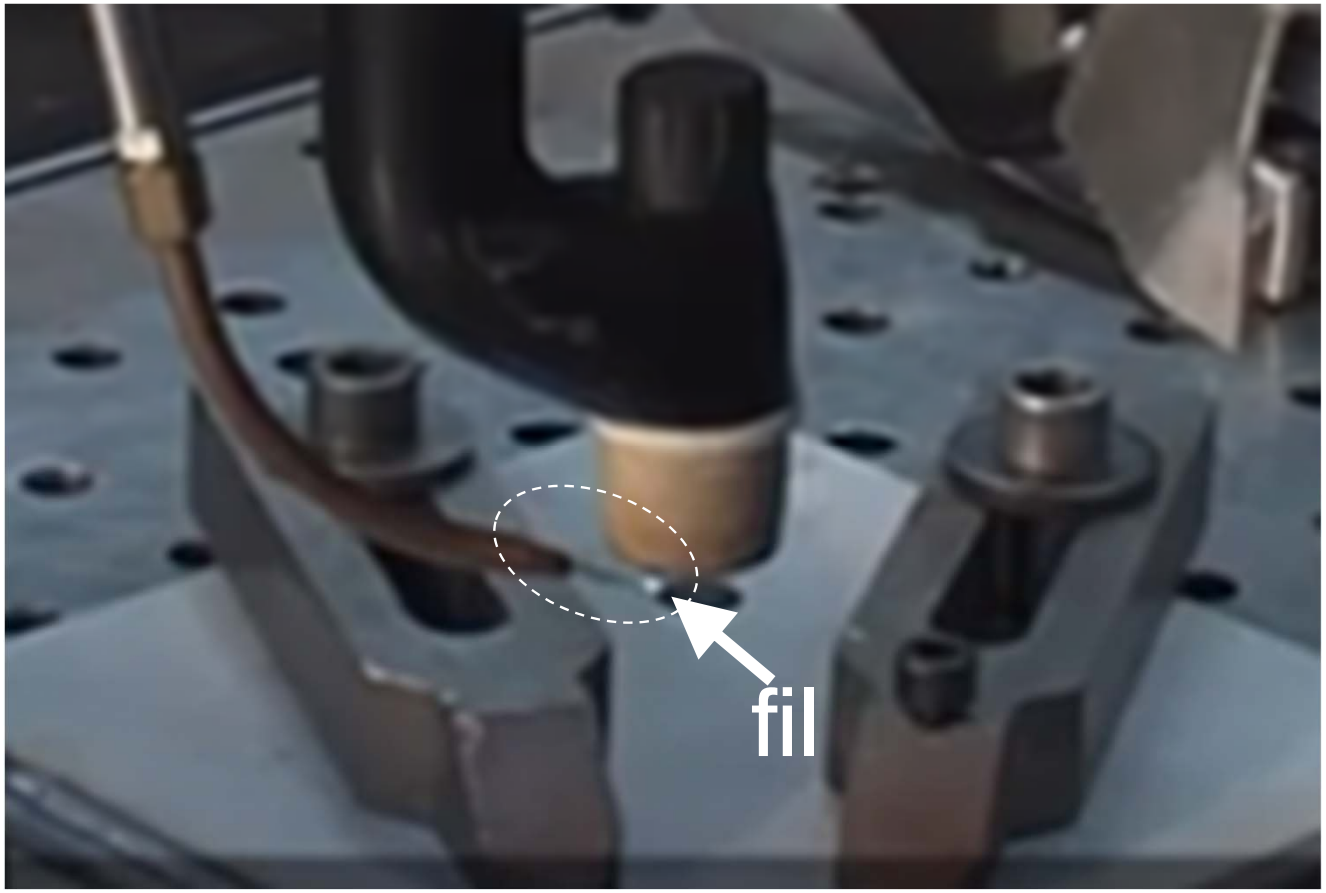
W A A M



I. WAAM

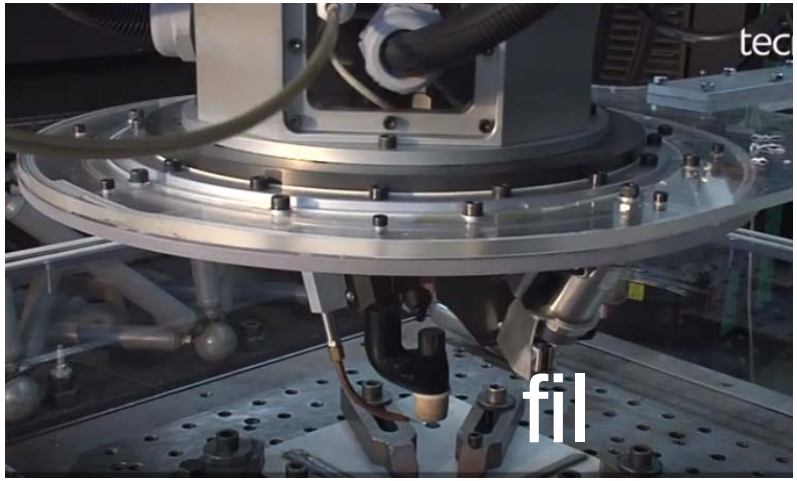
Wire A A M

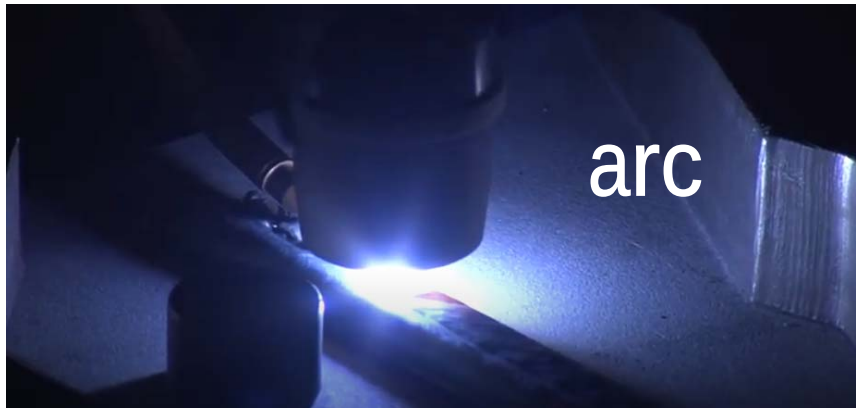




I. WAAM

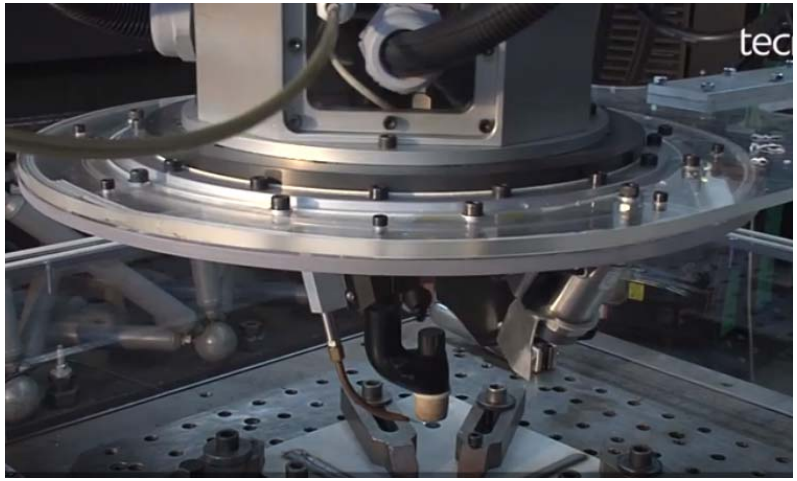
Wire Arc A M





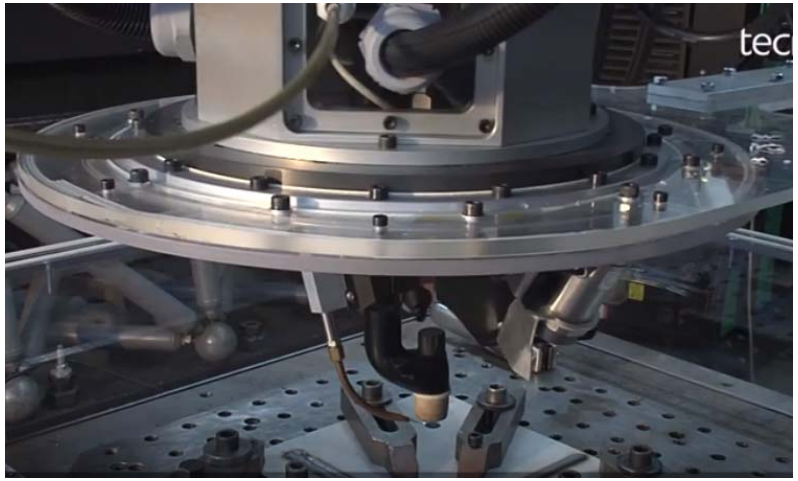
I. WAAM

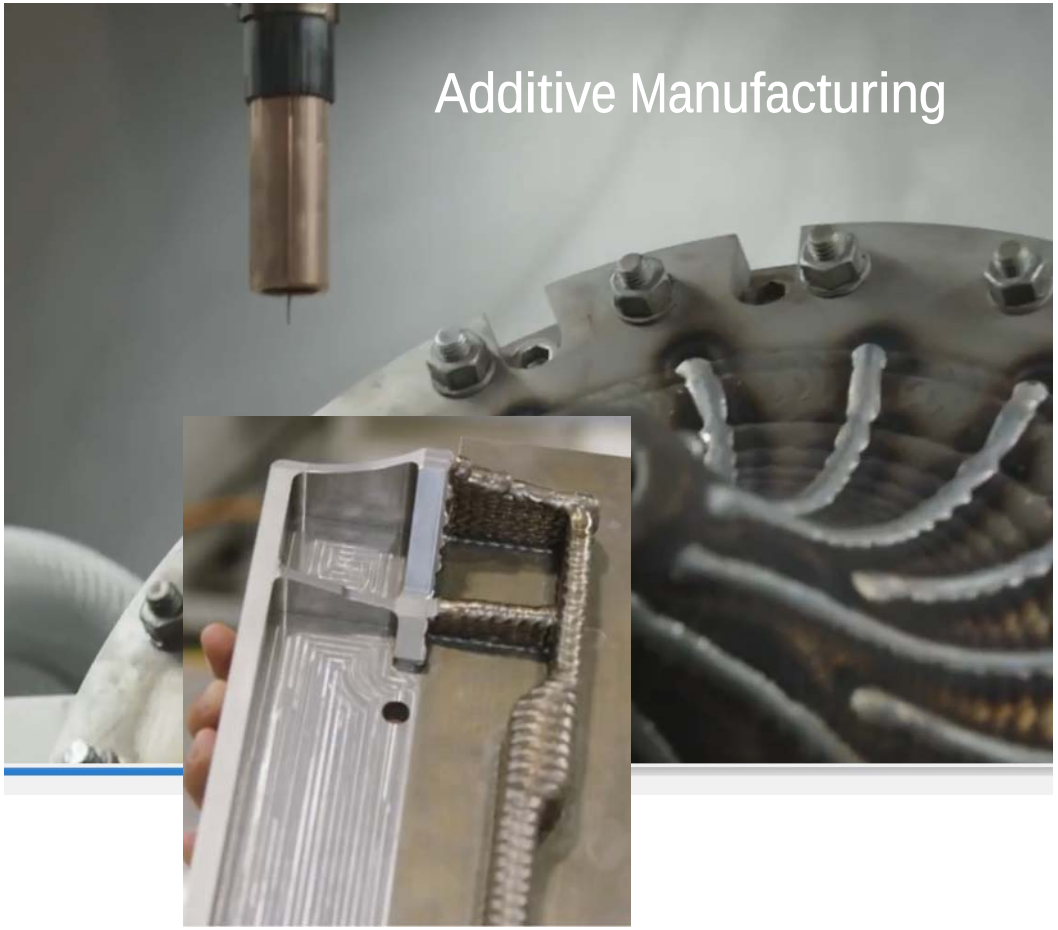
Wire Arc Additive Manufacturing



I. WAAM

Wire Arc Additive Manufacturing





II. SOUDAGE

II.1. Définitions

soudage

Le procédé d'assemblage de métaux par soudure

soudure

Une coalescence localisée de métaux produite par chauffage à la température adéquate

avec ou sans application de pression

avec ou sans utilisation de métal d'apport

matériau d'apport

Température de fusion < Température de fusion du métal de base

Température de fusion > 427°C (800°F)

II.2. Historique

Pendant plus de 2000 ans : joint par pression de contact (marteau, forge)

https://en.wikipedia.org/wiki/Scuttling_of_the_German_fleet_at_Scapa_Flow#:~:text=The%20scuttling%20of%20the%20German,the%20fate%20of%20the%20ships.

II.2. Historique

Pendant plus de 2000 ans : joint par pression de contact (marteau, forge)

Courant continu

1881 : M. de Meritens électrode de carbone + batteries pour produire -> arc

https://en.wikipedia.org/wiki/Scuttling_of_the_German_fleet_at_Scapa_Flow#:~:text=The%20scuttling%20of%20the%20German,the%20fate%20of%20the%20ships.

II.2. Historique

Pendant plus de 2000 ans : joint par pression de contact (marteau, forge)

Courant continu

1881 : M. de Meritens électrode de carbone + batteries pour produire -> arc
1885 : brevet de N. Benardos and S. Olszewski (électrode en carbone+ dynamos)
1888 : N. G. Slavianoff : Electrode = métal d'apport (pensé pour réparation)
1890 : C. L. Coffin brevet soudage bout à bout
1892 : C.L. Coffin brevet électrode métal d'apport (cfr. Slavianoff)
1907,1912 :Kjellberg : brevets électrode couverte

} Utilisation artisanale par forgerons

https://en.wikipedia.org/wiki/Scuttling_of_the_German_fleet_at_Scapa_Flow#:~:text=The%20scuttling%20of%20the%20German,the%20fate%20of%20the%20ships.

II. SOUDAGE

II.2. Historique

Pendant plus de 2000 ans : joint par pression de contact (marteau, forge)

Courant continu

1881 : M. de Meritens électrode de carbone + batteries pour produire -> arc
1885 : brevet de N. Benardos and S. Olszewski (électrode en carbone+ dynamos)
1888 : N. G. Slavianoff : Electrode = métal d'apport (pensé pour réparation)
1890 : C. L. Coffin brevet soudage bout à bout
1892 : C.L. Coffin brevet électrode métal d'apport (cfr. Slavianoff)
1907,1912 :Kjellberg : brevets électrode couverte

1915 : réparation par soudage des bateaux allemands coulés à Scapa Flow

Courant alternatif

1929 : Miller soudeuse à courant alternatif
1936 : Miller soudeuse à courant haute fréquence
1930 : Hobart et Devers brevet : utilisation d'un arc protégé par gas inert

1942 : Russel Merideth : soudage DC (TIG) de magnesium

Electrode en W avec protégée par He, refroidie à l'air, 75A

75 ans de dévelopement de générateurs

https://en.wikipedia.org/wiki/Scuttling_of_the_German_fleet_at_Scapa_Flow#:~:text=The%20scuttling%20of%20the%20German,the%20fate%20of%20the%20ships.

II. SOUDAGE

II.2. Historique

Pendant plus de 2000 ans : joint par pression de contact (marteau, forge)

Courant continu

1881 : M. de Meritens électrode de carbone + batteries pour produire -> arc
1885 : brevet de N. Benardos and S. Olszewski (électrode en carbone+ dynamos)
1888 : N. G. Slavianoff : Electrode = métal d'apport (pensé pour réparation)
1890 : C. L. Coffin brevet soudage bout à bout
1892 : C.L. Coffin brevet électrode métal d'apport (cfr. Slavianoff)
1907,1912 :Kjellberg : brevets électrode couverte

1915 : réparation par soudage des bateaux allemands coulés à Scapa Flow

Courant alternatif

1929 : Miller soudeuse à courant alternatif
1936 : Miller soudeuse à courant haute fréquence
1930 : Hobart et Devers brevet : utilisation d'un arc protégé par gas inert

1942 : Russel Merideth : soudage DC (TIG) de magnesium

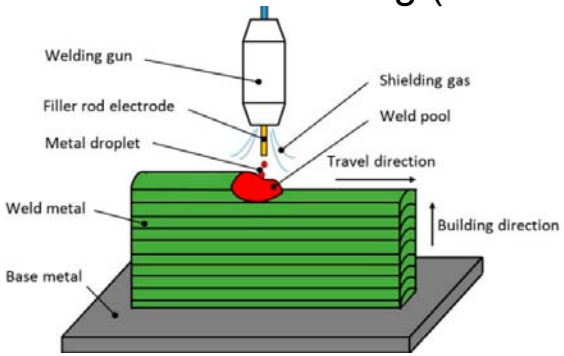
Electrode en W avec protégée par He, refroidie à l'air, 75A
1943 : Electrode en W avec He et courant alternatif : vrai TIG
1955 : Premier appareil AC/DC

75 ans de développement des générateurs

https://en.wikipedia.org/wiki/Scuttling_of_the_German_fleet_at_Scapa_Flow#:~:text=The%20scuttling%20of%20the%20German,the%20fate%20of%20the%20ships.

II. 3. Principaux types de soudage

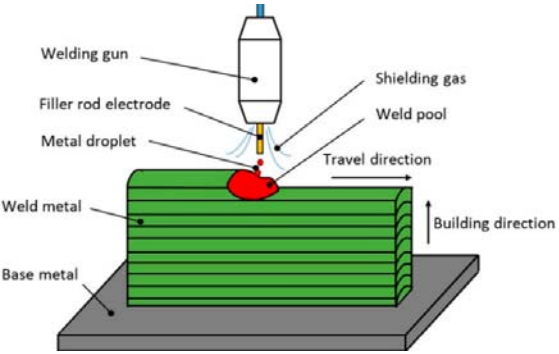
Gas Metal Arc Welding (GMAW)



Métal d'apport fait électrode

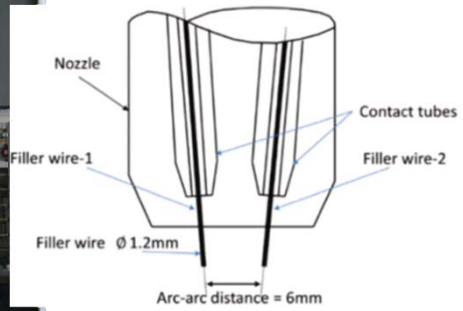
II. 3. Principaux types de soudage

Gas Metal Arc Welding (GMAW)



Métal d'apport fait électrode

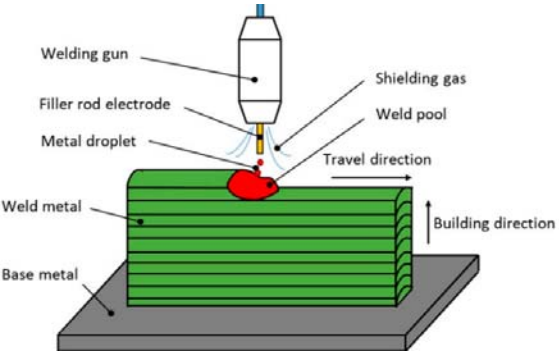
Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)



Electrode en tungstène

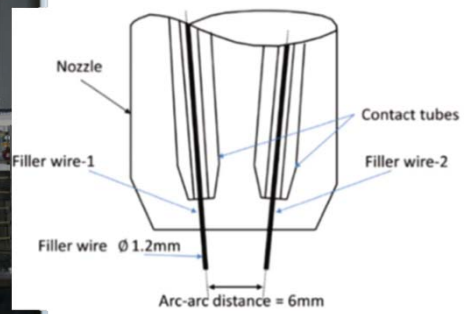
II. 3. Principaux types de soudage

Gas Metal Arc Welding (GMAW)



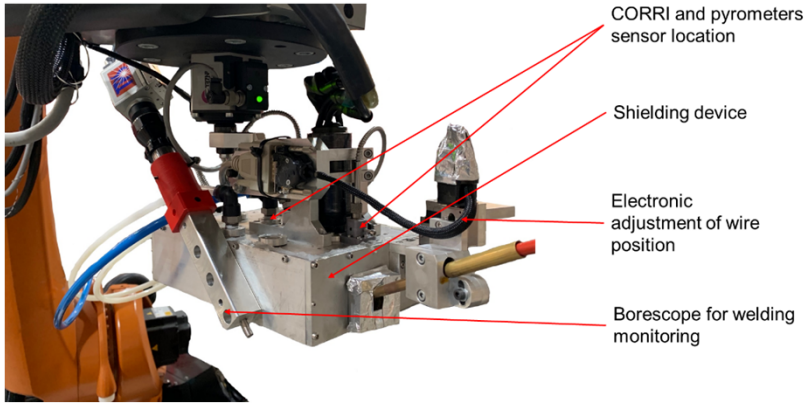
Métal d'apport fait électrode

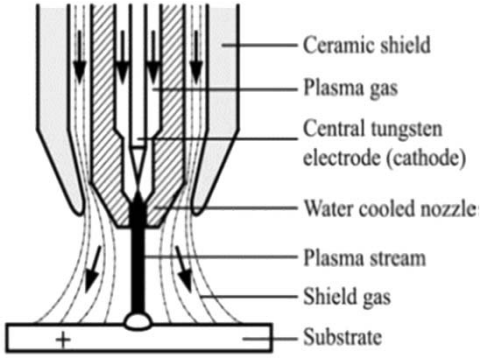
Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)



Electrode en tungstène

PAW (Plasma Arc Welding)

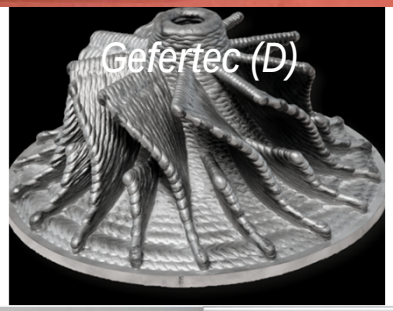




III.1 Avantages inconvénients du WAAM

Avantages par rapport aux autres procédés de fabrication additive

- pièces de grandes dimensions
- taux de dépose 10 fois supérieurs aux autres procédés de fabrication additive
- pas de problèmes de sécurité liés à la manipulation de poudre
- installation peu onéreuse



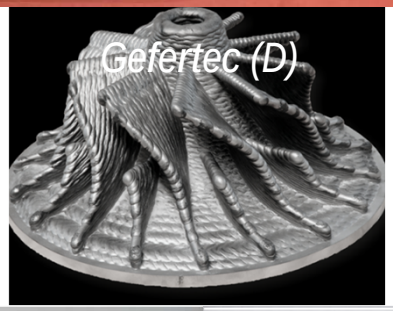
III.1 Avantages inconvénients du WAAM

Avantages par rapport aux autres procédés de fabrication additive

- pièces de grandes dimensions
- taux de dépose 10 fois supérieurs aux autres procédés de fabrication additive
- pas de problèmes de sécurité liés à la manipulation de poudre
- installation peu onéreuse

« Inconvénients pour tous les procédés de fabrication additive»

- fortes distorsions possibles
- contraintes résiduelles
- Microstructures de solidification



III.1 Avantages inconvénients du WAAM

Avantages par rapport aux autres procédés de fabrication additive

- pièces de grandes dimensions
- taux de dépose 10 fois supérieurs aux autres procédés de fabrication additive
- pas de problèmes de sécurité liés à la manipulation de poudre
- installation peu onéreuse

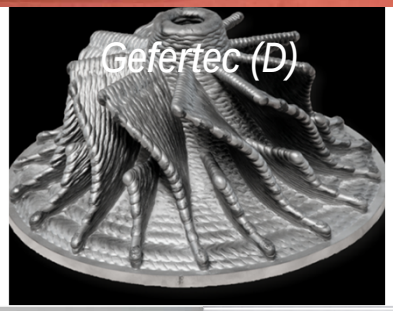
« Inconvénients pour tous les procédés de fabrication additive»

- fortes distorsions possibles
- contraintes résiduelles
- Microstructures de solidification

Coût énergétique

Matière première

Prodways (Fr)


Gefertec (D)

Université de Cranfield (GB)

III. WAAM ou procédés classiques ?

III.1 Avantages inconvénients du WAAM

Avantages par rapport aux autres procédés de fabrication additive

- pièces de grandes dimensions
- taux de dépose 10 fois supérieurs aux autres procédés de fabrication additive
- pas de problèmes de sécurité liés à la manipulation de poudre
- installation peu onéreuse

« Inconvénients pour tous les procédés de fabrication additive»

- fortes distorsions possibles
- contraintes résiduelles
- Microstructures de solidification

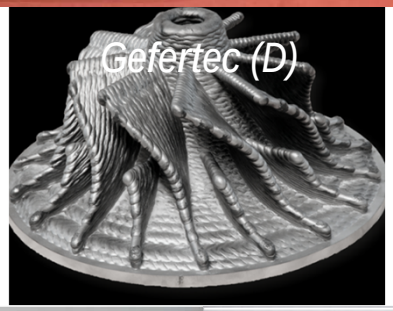
Coût énergétique

Matière première

+ production de barreaux

+ production de fil

Prodways (Fr)


Gefertec (D)

Université de Cranfield (GB)

III. WAAM ou procédés classiques ?

III.1 Avantages inconvénients du WAAM

Avantages par rapport aux autres procédés de fabrication additive

- pièces de grandes dimensions
- taux de dépose 10 fois supérieurs aux autres procédés de fabrication additive
- pas de problèmes de sécurité liés à la manipulation de poudre
- installation peu onéreuse

« Inconvénients pour tous les procédés de fabrication additive»

- fortes distorsions possibles
- contraintes résiduelles
- Microstructures de solidification

Coût énergétique

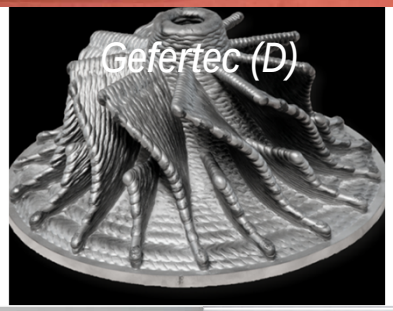
Matière première

+ production de barreaux

+ production de fil

+ dépose

Prodways (Fr)


Gefertec (D)

Université de Cranfield (GB)

III.2. La tonne équivalent pétrole (TEP)

1 TEP (7,6 barils,1 baril = 159 L) = 41GJ = 11.63 MWh

=1 300 kg d'anthracite = 1 160 L de fioul, =1 200 m^3de gaz naturel.

1 l d'essence ~10 kWh

III.2. La tonne équivalent pétrole (TEP)

1 TEP (7,6 barils,1 baril = 159 L) = 41GJ = 11.63 MWh

=1 300 kg d'anthracite = 1 160 L de fioul, =1 200 m^3de gaz naturel.

1 l d'essence ~10 kWh

III.3. Elaboration des métaux aspects énergétiques

Minerai brut broyé lavé fonte convertisseur

III.2. La tonne équivalent pétrole (TEP)

1 TEP (7,6 barils,1 baril = 159 L) = 41GJ = 11.63 MWh

=1 300 kg d'anthracite = 1 160 L de fioul, =1 200 m^3de gaz naturel.

1 l d'essence ~10 kWh

III.3. Elaboration des métaux aspects énergétiques

Minerai brut broyé lavé fonte convertisseur

Acier primaire : 5.6 MWh/tonne (0.5TEP)
Acier recyclé : 0.450 MWh/tonne
Ciment : 1MWh/tonne

Aluminium primaire : 15MWh/tonne (1.3TEP)
Aluminium recyclé : 0.75MWh/tonne

III.2. La tonne équivalent pétrole (TEP)

1 TEP (7,6 barils,1 baril = 159 L) = 41GJ = 11.63 MWh

=1 300 kg d'anthracite = 1 160 L de fioul, =1 200 m^3de gaz naturel.

1 l d'essence ~10 kWh

III.3. Elaboration des métaux aspects énergétiques

Minerai brut — broyé lavé — fonte — convertisseur

Acier primaire : 5.6 MWh/tonne (0.5TEP)

Acier recyclé : 0.450 MWh/tonne

Ciment : 1MWh/tonne

Aluminium primaire : 15MWh/tonne (1.3TEP)

Aluminium recyclé : 0.75MWh/tonne

1 aciérie à 5 millions de tonnes/an = 7 millions de foyers

III. WAAM ou procédés classiques ?

III.2. La tonne équivalent pétrole (TEP)

1 TEP (7,6 barils,1 baril = 159 L) = 41GJ = 11.63 MWh

=1 300 kg d'anthracite = 1 160 L de fioul, =1 200 m^{3}de gaz naturel.

1 l d'essence ~10 kWh

III.3. Elaboration des métaux aspects énergétiques

Minerai brut — broyé lavé — fonte — convertisseur

Acier primaire : 5.6 MWh/tonne (0.5TEP)
Acier recyclé : 0.450 MWh/tonne
Ciment : 1MWh/tonne

Aluminium primaire : 15MWh/tonne (1.3TEP)
Aluminium recyclé : 0.75MWh/tonne

1 aciérie à 5 millions de tonnes/an = 7 millions de foyers

https://www.industrie-techno.com/article/la-production-d-acier-reclamera-moins-d-energie.12050
https://eneff-industrie.info/quickinfos/energieintensive-branchen/daten-zu-besonders-energiehungrigen-produktionsbereichen/

III.4. Transformation des métaux

Laminage ronds

Laminage fils

Forge

kWh/tonne de produit	
Fil	190
Rond à béton	150
Poutrelle	140
Tôle forte	120
Coil.	105
Tôle fine	230

https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

III.4. Transformation des métaux

Laminage ronds

Laminage fils

Forge

kWh/tonne de produit	
Fil	190
Rond à béton	150
Poutrelle	140
Tôle forte	120
Coil.	105
Tôle fine	230

https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

III.4. Transformation des métaux

Laminage ronds

Laminage fils

Forge

MWh/tonne de produit	
Fil	190
Rond à béton	150
Poutrelle	140
Tôle forte	120
Coil.	105
Tôle fine	230

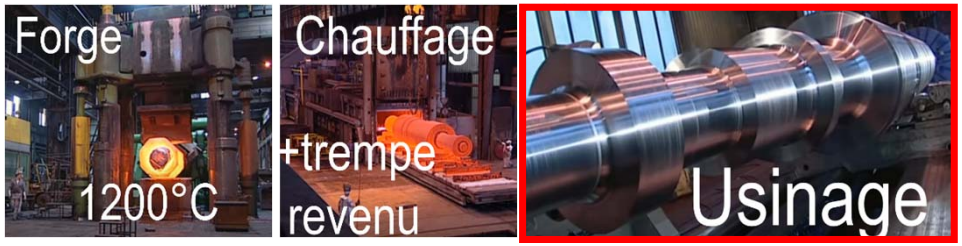
https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

III.4. Transformation des métaux

Laminage ronds

Laminage fils

Forge



kWh/tonne de produit	
Fil	190
Rond à béton	150
Poutrelle	140
Tôle forte	120
Coil.	105
Tôle fine	230

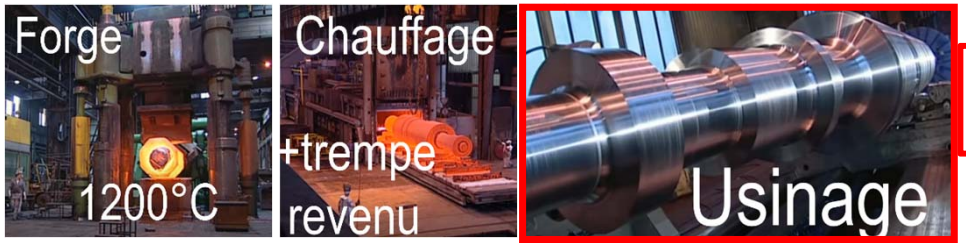
https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

III.4. Transformation des métaux

Laminage ronds

Laminage fils

Forge

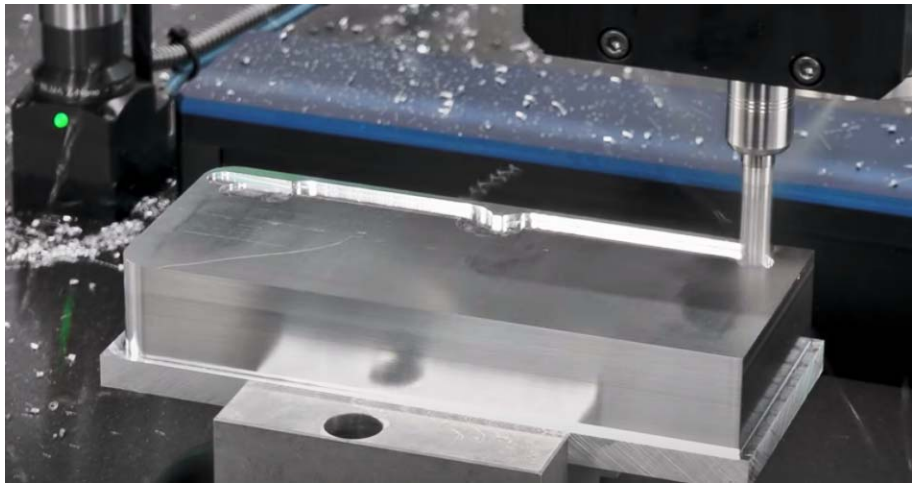


kWh/tonne de produit	
Fil	190
Rond à béton	150
Poutrelle	140
Tôle forte	120
Coil.	105
Tôle fine	230

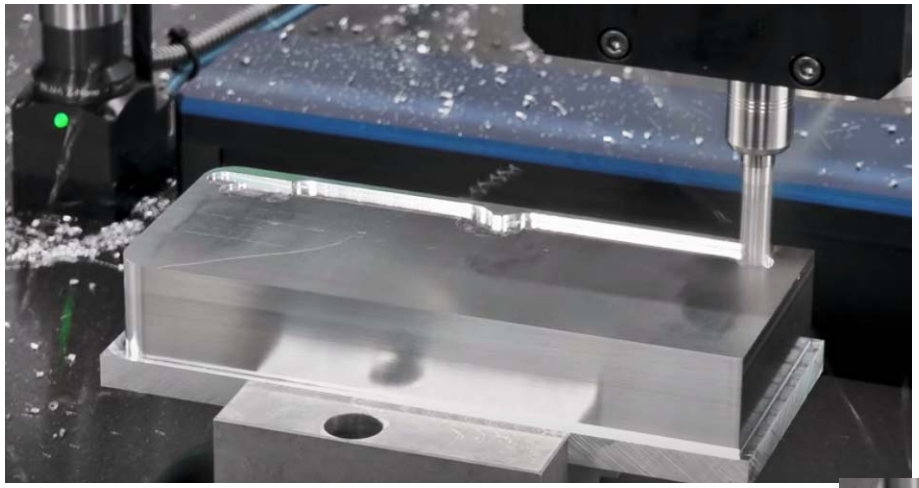
RATIO : BUY TO FLY

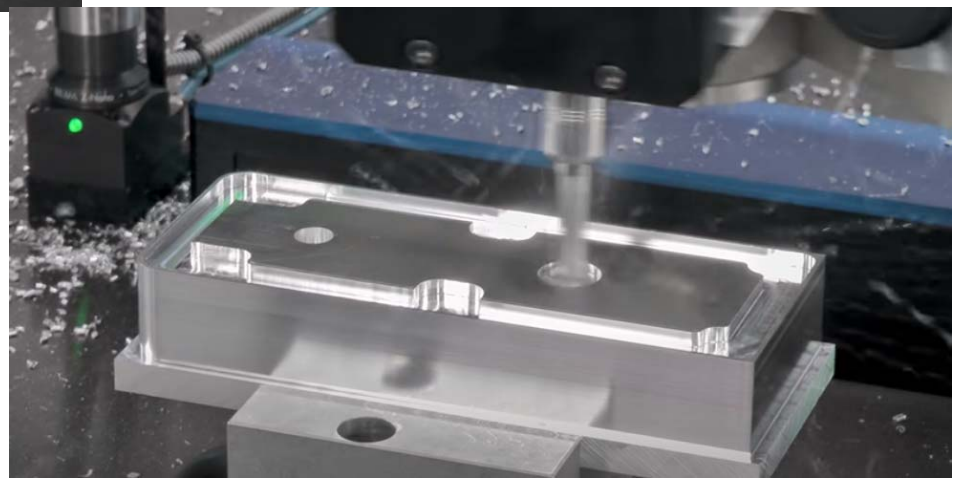
https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

III.5. Buy to fly

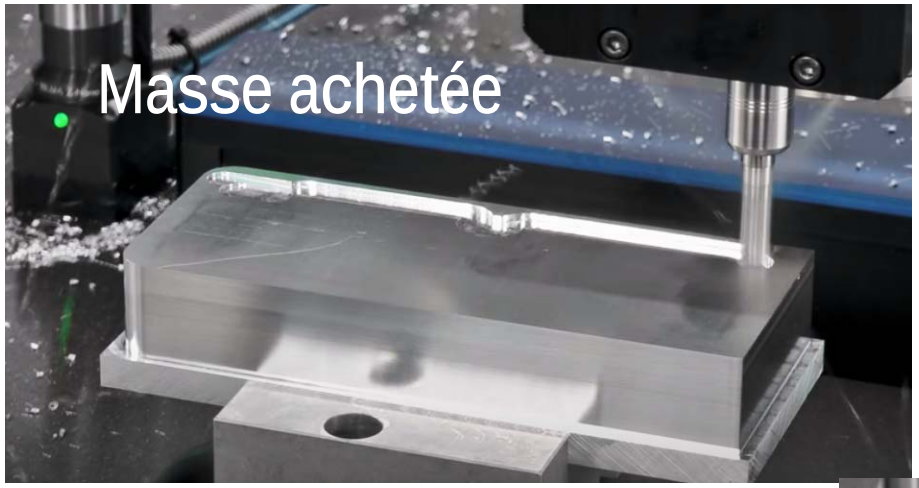


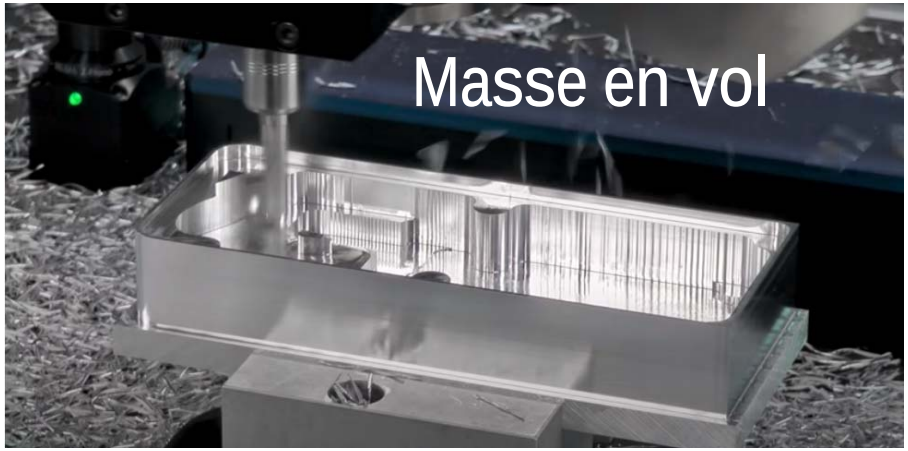
III.5. Buy to fly

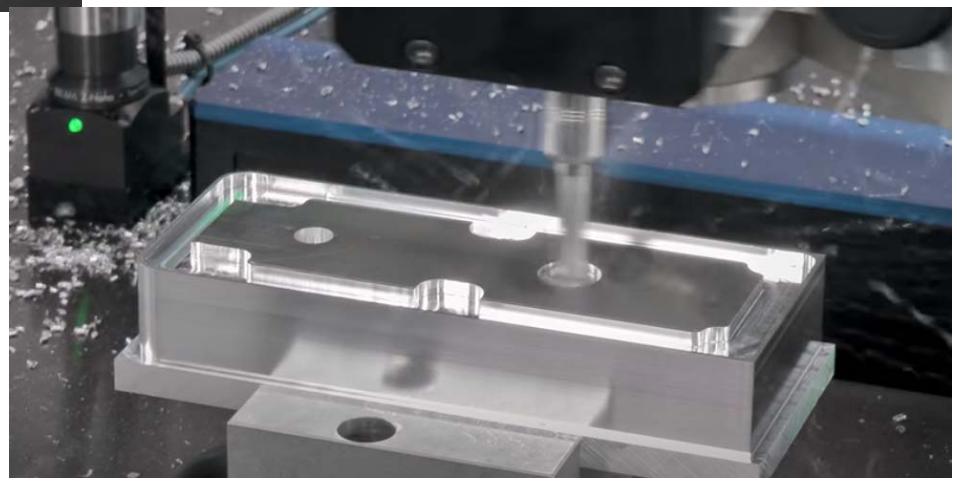




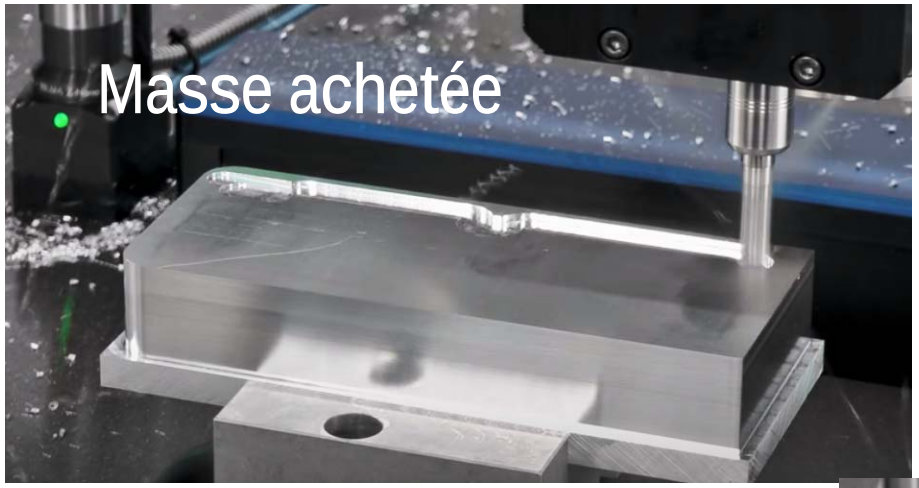
III.5. Buy to fly

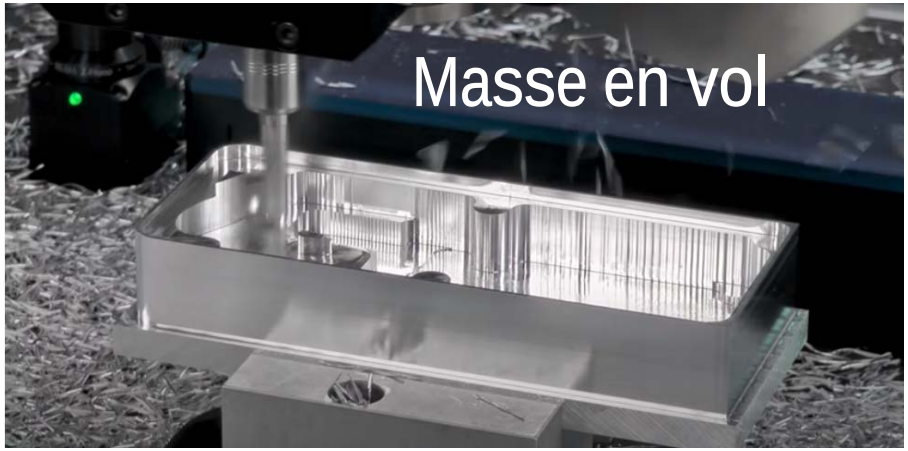




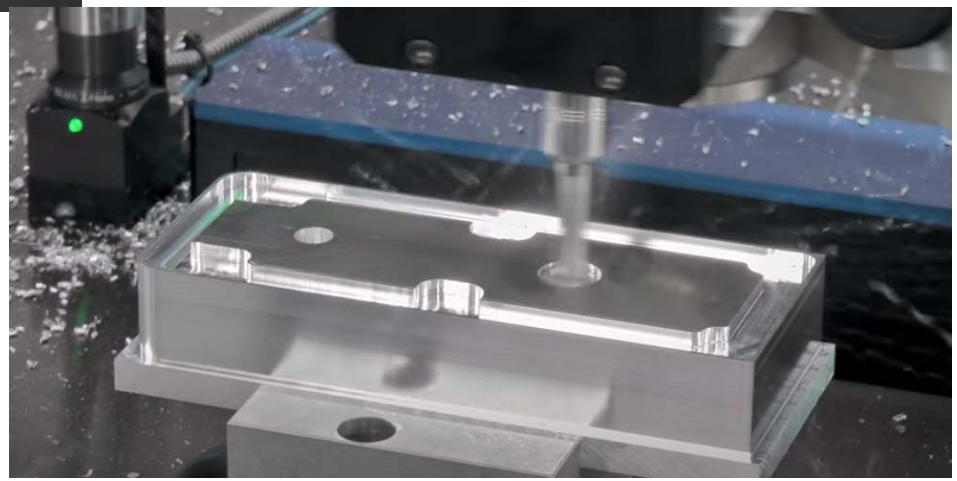


III.5. Buy to fly





$$BTF = \frac{\text{Masse achetée}}{\text{Masse en vol}}$$



III.6. Bilan énergétique approximatif

M_{finale}=masse en kg

E=énergie utilisée

X=50%d'acier récupéré

III.6. Bilan énergétique approximatif

M_{finale}=masse en kg

E=énergie utilisée

X=50%d'acier récupéré

$$E_{classique} = BTF_1 * M_{finale} * \left(\underbrace{5600X + (1-X) * 460}_{\substack{élaboration \\ acier}} + \underbrace{230}_{forge} \right) + Usinage$$

$$= \left(BTF_1 * M_{finale} * 3330 + Usin. \right) kWh$$

III.6. Bilan énergétique approximatif

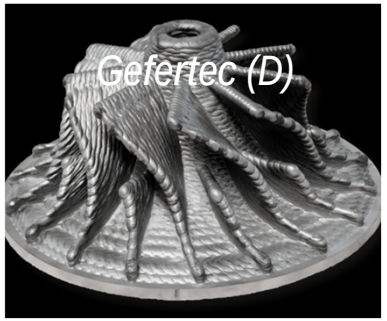
M_{finale}=masse en kg

E=énergie utilisée

X=50%d'acier récupéré

$$E_{classique} = BTF_1 * M_{finale} * \left(\underbrace{5600X + (1-X) * 460}_{\substack{élaboration \\ acier}} + \underbrace{230}_{forge} \right) + Usinage$$

$$= \left(BTF_1 * M_{finale} * 3330 + Usin. \right) kWh$$



III.6. Bilan énergétique approximatif

M_{finale}=masse en kg

E=énergie utilisée

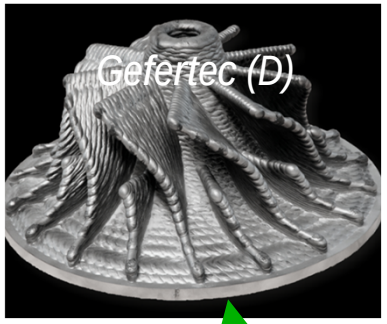
X=50%d'acier récupéré

$$E_{classique} = BTF_1 * M_{finale} * \left(\underbrace{5600X + (1-X)*460}_{\substack{élaboration \\ acier}} + \underbrace{230}_{forge} \right) + Usinage$$

$$= \left(BTF_1 * M_{finale} * 3330 + Usin. \right) kWh$$

$$E_{WAAM} = BTF_2 * M_{finale} * \left(\underbrace{5600X + (1-X)*460}_{\substack{élaboration \\ acier}} + \underbrace{150}_{\substack{élabor. \\ barres}} + \underbrace{190}_{\substack{élabor. \\ barres}} \right) \begin{matrix} +Dépose \\ +Usinage \end{matrix}$$

$$= \left(BTF_2 * M_{finale} * 3330 + Dépose \right) kWh$$



III.6. Bilan énergétique approximatif

M_{finale}=masse en kg

E=énergie utilisée

X=50%d'acier récupéré

$$E_{classique} = \left(BTF_1 * M_{finale} * 3330 + Usin.\right) kWh$$

$$E_{WAAM} = \left(BTF_2 * M_{finale} * 3330 + Dépose\right) kWh$$

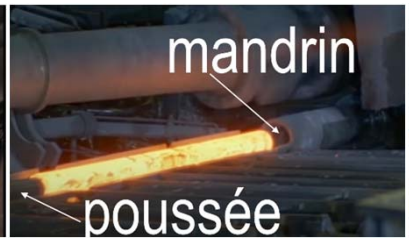
$$\frac{E_{WAAM}}{E_{classique}} \approx \frac{BTF_2}{BTF_1} + O^2(process)$$

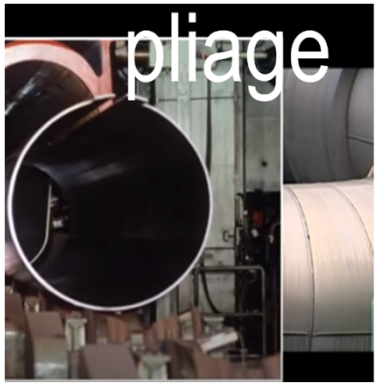
III. WAAM ou procédés classiques ?

Pièce	Fabrication	Masse (kg)	BTF	Coût (k€)	Réd. coût
Nervure pour BAE (alliage Al)	usiné	17	6.5	7.2	-
	WAAM	17	2.2	5.1	29%
Nervure pour Bombardier (acier)	Usiné	36	12	1.6	-
	WAAM	36	2.3	0.7	55%

IV.1. Soudage intégré dans le procédé de fabrication

Fabricat. tubes





https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

IV.2. Soudage intégré dans le procédé de réparation

Alliages moulés

https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

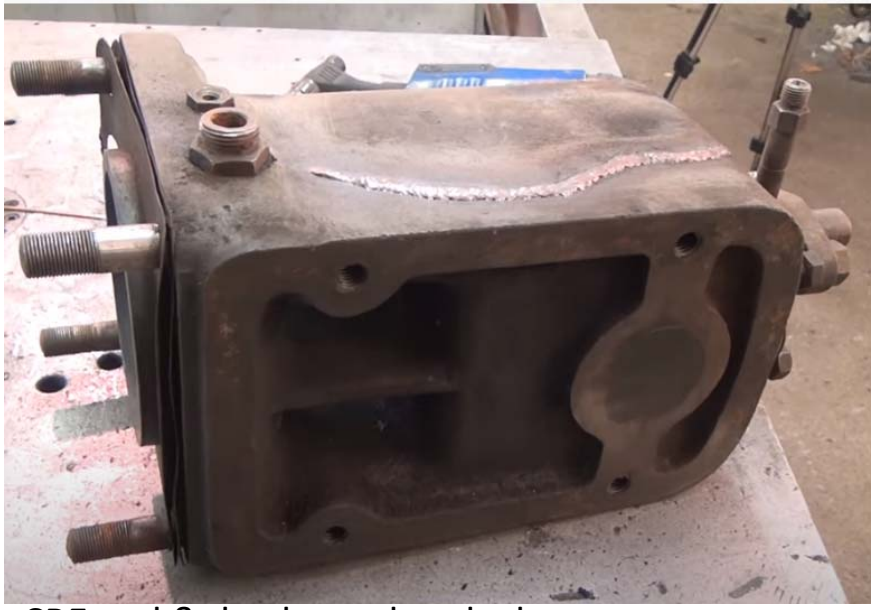
IV.2. Soudage intégré dans le procédé de réparation

Alliages moulés

https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

IV.2. Soudage intégré dans le procédé de réparation

Alliages moulés



https://www.youtube.com/watch?v=9GdaCRE_p_k&ab_channel=mdock

IV.1. Financements & projets

IRICE 2019 : IRICE région Auvergne Rhône Alpes (500k€ TTC) : marché public publié, clôture 30/11/2020

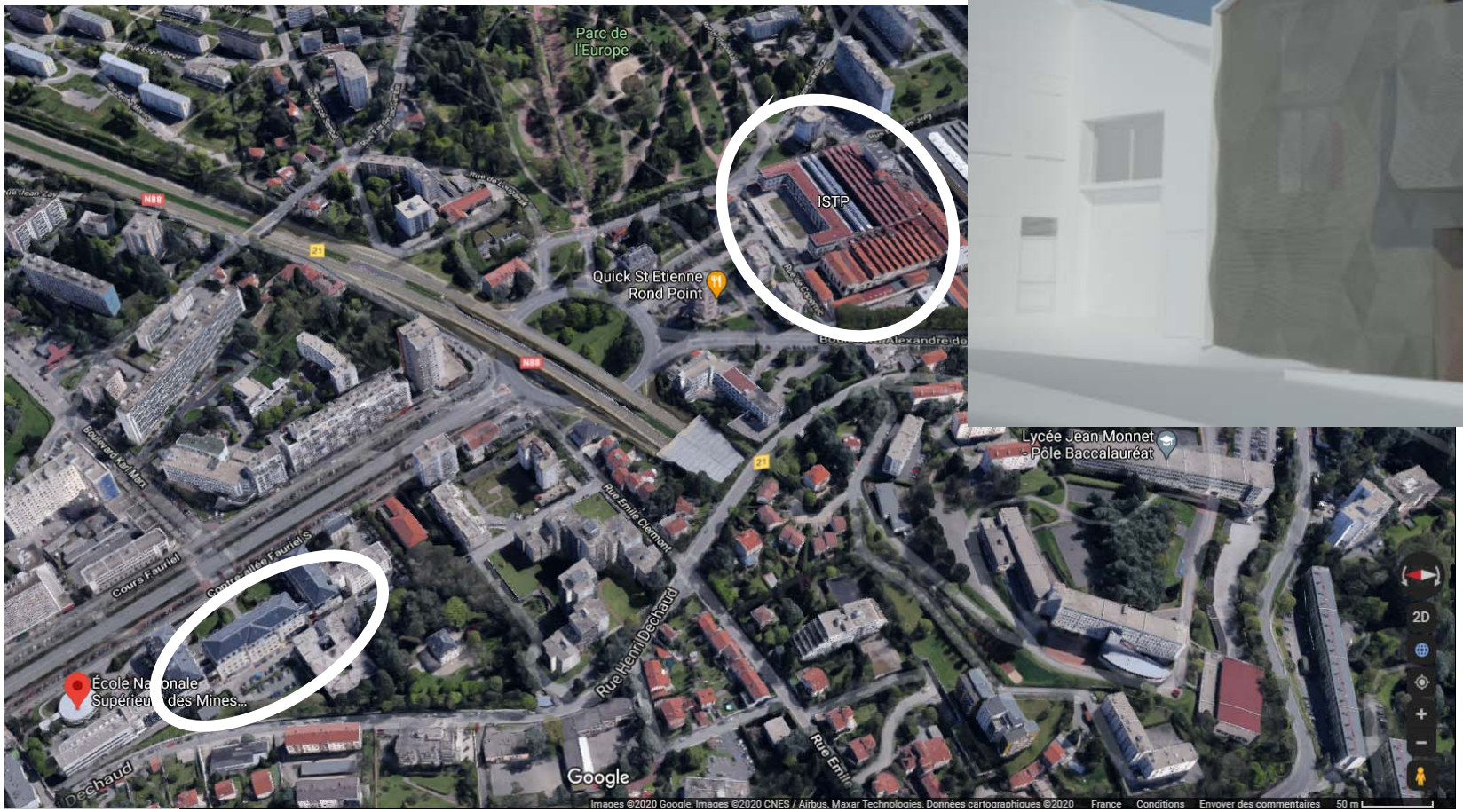
IV.1. Financements & projets

IRICE 2019 : IRICE région Auvergne Rhône Alpes (500k€ TTC) : marché public publié, clôture 30/11/2020

IV. WAAM à Mines Saint Etienne

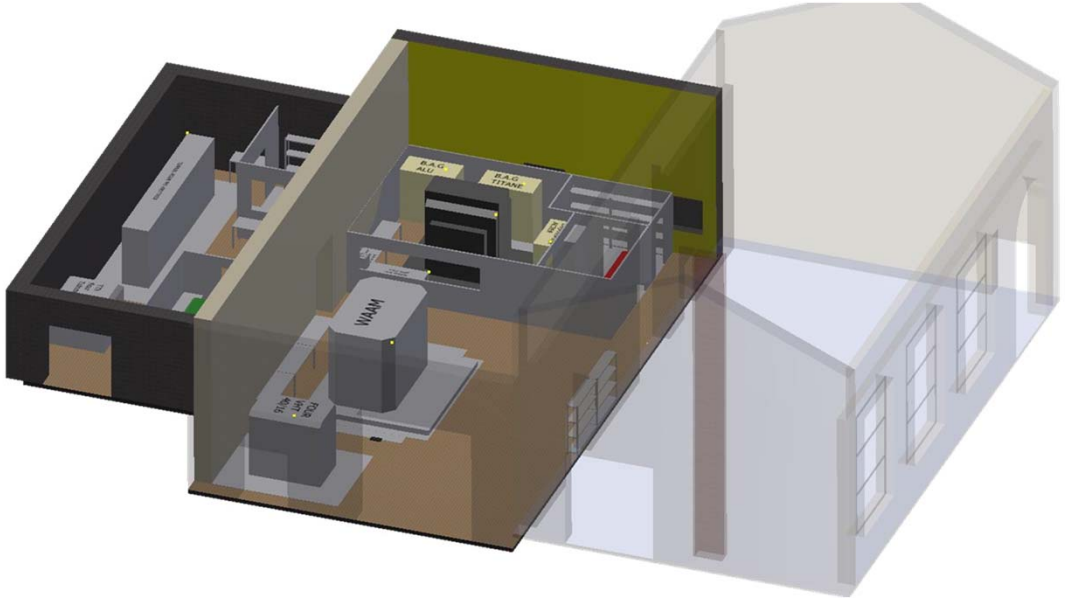
IV.1. Financements & projets

IRICE 2019 : IRICE région Auvergne Rhône Alpes (50



IV.1. Financements & projets

IRICE 2019 : IRICE région Auvergne Rhône Alpes (500k€ TTC) : marché public publié, clôture 30/11/2020



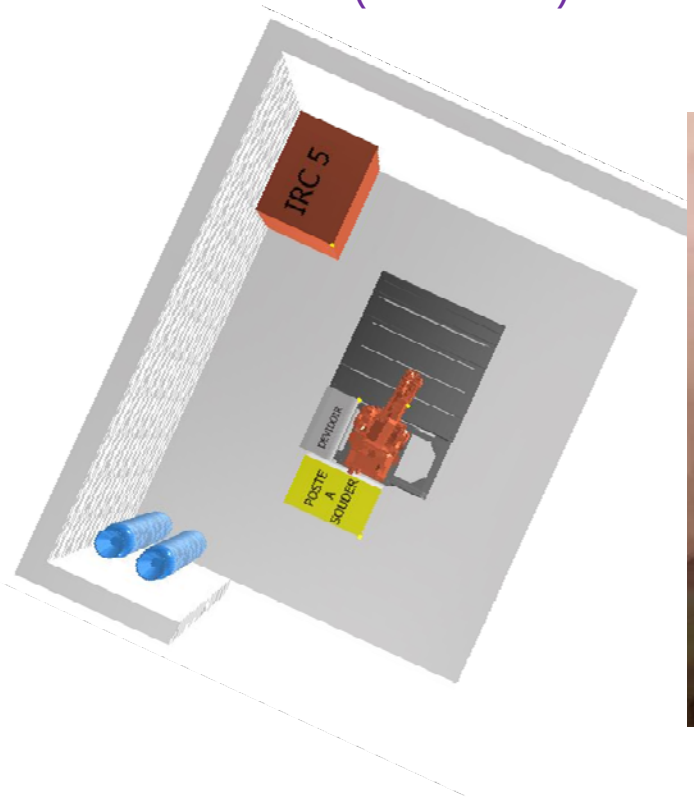
Installation fin 2021

IV.1. Financements & projets

Financements :

IRICE 2019 : IRICE région Auvergne Rhône Alpes (500k€ TTC) : marché public publié, clôture 30/11/2020

IMT 2020 : FabAI (500k€ TTC) à rembourser



Flex WAAM
en cours d'installation

IV.2. Projets scientifiques

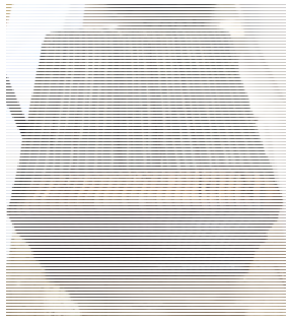
Thèse IMT (Aurélien Villani, J.M. Bergheau, H. Klöcker) : Antoine Herbeaux

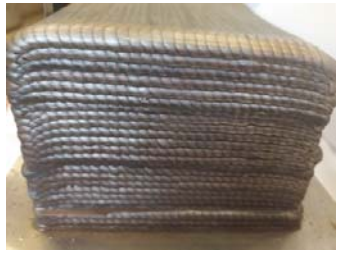
Simulation des microstructures de solidification WAAM

Masters recherche

2 masters Mines Saint Etienne avec Framatome : microstructure et tenue mécanique de structure WAAM 304L

1 master enise/Mines avec Framatome : simulation des microstructure





Pack ambition recherche EMSE-ENISE-Framatome ESI : microstructures, tenue mécanique, distorsions et contraintes résiduelles

ANR 2021 : EMSE-ENISE-SAFMETAL-Framatome : Réparation des pièces en acier moulé par WAAM

Merci à

Krzysztof WOLSKI : *initiateur du projet aide permanente pendant les dépôts*
Christophe Desrayaud : *interface avec initiative 3D pendant les dépôts du projet*
Edith Durand : *part très active dans la rédaction du cahier de charge*
collaboration permanente sur le projet WAAM
Nathalie Gerardi : *mise en œuvre de l'offre public d'achat*
Aurélien Villani : *co-encadrement de la première thèse sur le sujet*
Jean-Michel Bergheau (enise) : dépôt de pack ambition recherche et d'ANR sur le sujet

MINES Saint-Étienne
Une école de l'IMT

Institut Mines-Télécom

CIMES
Creating Integrated MEchanical Systems

La Région Auvergne-Rhône-Alpes

Ingénierie Lyon - Saint-Etienne
Inge'LySE

Merci pour votre temps