



**HAL**  
open science

# Etude de l'impact environnemental du procédé de fabrication Wire Arc Additive Manufacturing

Antoine Balidas, Jean Yves Hascoet, Olivier Kerbrat

► **To cite this version:**

Antoine Balidas, Jean Yves Hascoet, Olivier Kerbrat. Etude de l'impact environnemental du procédé de fabrication Wire Arc Additive Manufacturing. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784360

**HAL Id: hal-04784360**

**<https://hal.science/hal-04784360v1>**

Submitted on 15 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Etude de l'impact environnemental du procédé de fabrication Wire Arc Additive Manufacturing

**Antoine BALIDAS (a), Olivier KERBRAT (a), Jean-Yves HASCOËT (b)**

*(a) Univ Rennes, ENS Rennes, CNRS, IPR, UMR 6251, [F-35000], France*

*(b) Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, [F-44000], France*

*Mail : [antoine.balidas@ens-rennes.fr](mailto:antoine.balidas@ens-rennes.fr)  
[Olivier.Kerbrat@ens-rennes.fr](mailto:Olivier.Kerbrat@ens-rennes.fr)  
[jean-yves.hascoet@ec-nantes.fr](mailto:jean-yves.hascoet@ec-nantes.fr)*

**Résumé :** La fabrication additive (FA) est utilisée dans le domaine de la mise en forme de pièces métalliques car elle présente des avantages par rapport aux procédés conventionnels mais son potentiel de soutenabilité est incertain. Les consommations d'énergie et de matière nécessaires à la fabrication sont importantes. Ainsi, la question de recherche de cet article est : « Quels sont les usages actuels de la FA qui présentent un potentiel de réduction d'impact environnemental véritable ? »

Dans ce cadre, une recherche bibliographique a été conduite sur les procédés de FA afin de cibler une technologie potentiellement pertinente pour la réduction d'impacts sur le cycle de vie. Le focus a ainsi été mis sur le procédé WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) car les données recueillies dans la littérature le présentent comme le procédé de FA le plus efficace énergétiquement. Tout d'abord, une analyse du procédé par rapport aux procédés de fabrication conventionnels a permis de mettre en évidence les étapes du cycle de vie où se produisent les réductions d'impacts, notamment l'étape de dépôt. Au cours de cette étape, l'augmentation du taux de déposition (et donc de la productivité) entraîne une réduction de la consommation énergétique. Des expérimentations ont alors été menées sur du WAAM à fort taux de déposition afin de créer une base de données des consommations d'énergies et de matière. Cette base a alors été exploitée pour identifier des cas de pièces réalisées en WAAM permettant une forte réduction d'impacts en comparaison avec les procédés de fabrication dits conventionnels.

**Mots clés :** Fabrication additive, WAAM, Analyse de cycle de vie, Productivité, Consommation énergétique, Specific Energy Consumption.

## 1 Introduction

La Fabrication Additive (FA) est un procédé qui, à partir d'un modèle 3D numérique, permet d'obtenir une pièce par déposition de matière couche par couche. Ainsi la technologie de FA se distingue des autres procédés de mise en forme de pièce comme le moulage ou les procédés soustractifs. Parmi les avantages de la FA, on trouve la réduction de la consommation de matière, la possibilité de réaliser des pièces avec des géométries complexes, en multi matériaux, de réparer une pièce endommagée (rechargement de pièce) ou encore de regrouper des pièces. Des secteurs comme l'aéronautique, l'automobile ou le médical présentent de plus en plus d'applications utilisant ce potentiel, donnant à la FA un statut de technologie « industrielle ». Avec les problématiques actuelles de soutenabilité des activités industrielles, il est donc nécessaire de statuer de l'effet positif ou négatif de la FA concernant l'impact environnemental qu'elle représente. Cet article a pour objectif d'identifier des utilisations pertinentes du WAAM impliquant une forte réduction de l'impact environnemental. Un état de l'art sur la consommation énergétique de la FA métallique et sur l'impact environnemental du WAAM est proposé en Section 2. La méthodologie d'analyse de l'impact du WAAM avec la démarche de cycle de vie est présentée dans la Section 3 ainsi que la méthode d'étude des paramètres de fabrication. Les résultats sont présentés et commentés en Section 4. Les principales conclusions sont données en Section 5 avec des perspectives pour de futures recherches.

## 2 Etat de l'art

### 2.1 Consommation énergétique de la FA métallique

Cette section analyse des études ayant une considération pour la consommation énergétique d'un ou plusieurs procédés de FA métallique. Tout d'abord, il est intéressant d'identifier et de catégoriser les différents procédés qui sont l'objet de cette analyse. Concernant la FA métallique, on peut classer les procédés selon 3 familles basées sur le principe et la technologie de déposition de la matière (Figure 1). La technologie de Bound metal deposition (BMD), constituant la famille de l'extrusion de matière, étant encore à un stade de développement précoce a été écarté. Ainsi deux familles de procédés font l'objet de cette étude. Il s'agit du dépôt de matière sous énergie condensée, qui a pour principe la création par une source d'énergie d'un bain de fusion très localisé au niveau de la pièce auquel on apporte de la matière sous forme de poudre ou de fil, et la fusion sur lit de poudre qui consiste à déposer successivement de fines couches de poudre tout en apportant de l'énergie à certains endroits pour fusionner les zones formant la pièce désirée. Afin de pouvoir comparer les consommations d'énergie des procédés fonctionnant selon différents principes, la notion de Specific energy consumption (SEC) a été retenue. Il s'agit d'une valeur que l'on peut déterminer pour tous les procédés de mise en forme, exprimée en MJ/kg et qui représente l'énergie nécessaire pour mettre en forme 1 kg de matière. Dans le cas de la FA cela correspond à l'énergie nécessaire pour déposer 1 kg de matière.

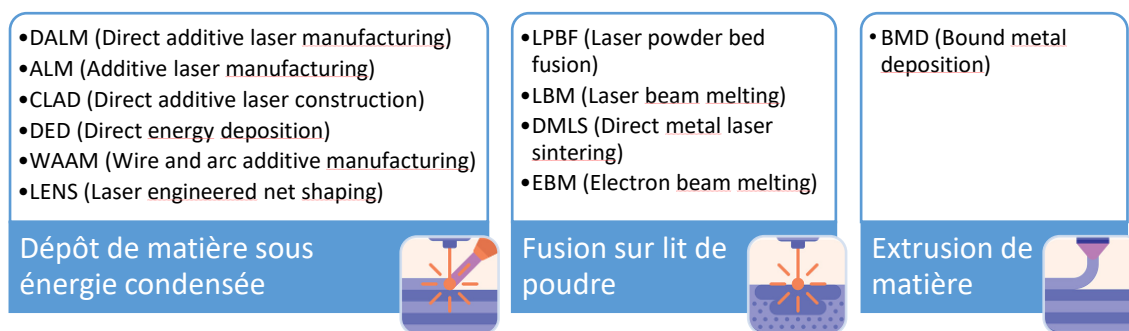


Figure 1 : Familles des technologies de FA métallique

La première étude permettant d'obtenir une valeur de SEC pour la mise en forme d'acier par FA (Baumers, 2011) s'intéresse à la consommation de plusieurs machines dont trois de fusion sur lit de poudre utilisant un laser représentant deux technologies différentes, le Selective Laser Sintering (SLM) et le Direct Metal Laser Sintering (DMLS). La consommation énergétique du DMLS est également étudiée dans un autre article (Ahmad, 2020) avec l'Electron Beam Melting (EBM) qui est une technologie de fusion sur lit de poudre utilisant un faisceau d'électrons et non un laser. Aussi, une étude (Teubler, 2019) traite d'une autre technologie de fusion sur lit de poudre laser avec le Laser Beam Melting (LBM) en comparaison avec le procédé conventionnel de tournage à chaud.

D'autres articles (Le Bourhis, 2014 et Liu, 2018) s'intéressent à la consommation d'un procédé de dépôt de matière sous énergie condensée, le Laser Engineered Net Shaping (LENS) utilisant un laser comme source d'énergie et déposant la matière sous forme de poudre. Concernant le WAAM, qui est également un procédé de dépôt de matière sous énergie condensée reprenant le principe de soudure à l'arc pour déposer un cordon formant couche par couche une pièce, plusieurs études (Jackson, 2018 et Priarone, 2019) le comparent à d'autres procédés, notamment le LENS ou l'usinage. Ces valeurs sont regroupées dans la Figure 2 permettant d'obtenir un intervalle de SEC pour les différentes technologies FA trouvées dans la littérature. A partir de ces valeurs, le WAAM apparaît comme la technologie de FA métallique la plus efficace énergétiquement.

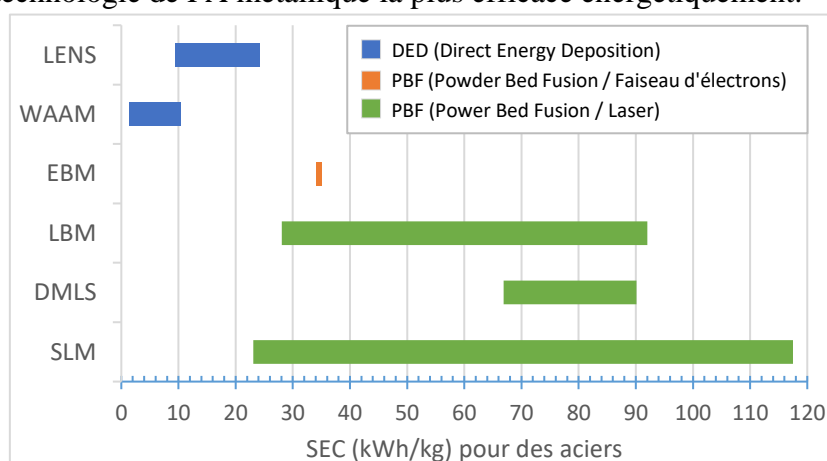


Figure 2 : Intervalles de SEC pour la FA

## 2.2 Impact environnemental du WAAM

L'impact environnemental potentiel des technologies de FA est un sujet d'étude relativement nouveau ce qui s'explique par la jeunesse des procédés et par leur manque de maturité. Il est difficile d'effectuer une analyse environnementale d'un procédé qui

bénéficie encore de développements importants afin de rencontrer les exigences demandées dans un contexte industriel. De plus, les adoptions de ces procédés par l'industrie encore peu nombreuses sont un frein à ce genre d'études qui s'intéressent à l'ensemble du cycle de vie autour du procédé de fabrication. Concernant le WAAM, les premières études recensées traitant d'un impact environnemental (Jackson, 2016 et Jackson, 2018) sont relativement récentes et s'intéressent à sa consommation énergétique en la comparant avec celle d'un autre procédé de FA métal, le LENS. Un élément marquant de ces études concerne le type de pièces fabriquées pour la comparaison. Il s'agit de pièces très simples : une plaque (de dimensions 100 mm, 100 mm, 1,5 mm) pour le premier article et une éprouvette de traction pour le second. Aussi, ces articles proposent des comparaisons dans des périmètres assez réduits autour de l'étape de fabrication en prenant en compte la production de fil ou de poudre et une étape de finition après la fabrication. Les articles recensés ensuite apportent des ouvertures selon quatre axes. Le premier concerne les procédés qui servent de comparaison au WAAM. Ces comparaisons impliquent des procédés traditionnels comme l'usinage ou le moulage (Bekker, 2018) ou d'autre technologie de FA métal comme le SLM (Kokare, 2023). Le deuxième axe d'évolution intègre plus d'éléments environnementaux dans les comparaisons comme une quantification des émissions de CO<sub>2</sub> en plus de l'aspect énergétique (Priarone, 2021) ou avec l'utilisation de méthodes comme ReCiPe permettant d'avoir une étude plus complète sur de nombreux critères normés (Dias, 2022 et Sword, 2023). Le troisième axe va de pair avec le précédent en élargissant le cycle de vie pris en compte. Cette approche s'éloigne du cycle réduit vu précédemment avec des études proposant des démarches plus complexes et plus complètes avec des scénarios intégrant la réparation d'une pièce (Priarone, 2020) ou détaillant plus les étapes de production de matières premières et de post-traitement (Reis, 2023). Le quatrième axe concerne les pièces étudiées et ici aussi, on remarque qu'elles gagnent en complexité. On a donc des études utilisant dans leur comparaison des pièces industrielles comme des pales destinées au secteur nautique (Campatelli, 2020) ou encore des pièces conçues spécifiquement pour la technologie WAAM avec l'optimisation topologique d'une poutre (Shah, 2023). Ce qui ressort de cet état de l'art sur l'impact environnemental du WAAM montrant la diversité des approches et des méthodes d'évaluation est la nécessité de définir une méthodologie d'analyse de ces études afin d'en proposer une synthèse. Ainsi, il devient possible d'en ressortir les consommations énergétiques par étapes du cycle de vie, les impacts environnementaux liés à ces consommations et l'influence des paramètres de fabrication.

### **3 Méthodologie**

#### *3.1 Synthèse des analyses de cycle de vie du WAAM*

Afin d'avoir une vue d'ensemble de l'impact potentiel du WAAM, une méthodologie d'analyse des différentes études a été mise en place. Ceci a pour but d'extraire des cas d'études une synthèse permettant d'en ressortir des observations générales sur le WAAM. La démarche mise en œuvre pour cette analyse repose sur la création de fiches pour chaque étude. Ces fiches sont standardisées pour ne regrouper que les informations pertinentes et nécessaires à notre synthèse finale. Ainsi, elles sont composées de cinq parties en plus des informations générales.

- La première partie permet de présenter le cas d'étude utilisé dans l'article pour effectuer l'analyse. Elle décrit en plus des caractéristiques techniques de la pièce (géométrie, dimensions, matériaux...), le contexte autour de son étude ce qui nous informe sur la fabrication, les contraintes qu'elle doit respecter ou encore l'intégration ou non à un système. Cette partie présente aussi les autres procédés qui sont comparés au WAAM.
- La deuxième partie est la plus importante et propose des arbres de processus pour les différents scénarios et procédés de l'étude. Ces arbres répondent à la problématique majeure concernant la synthèse des différentes études, celle-ci étant que chacune d'entre elles possède une manière différente de présenter le cadre et les étapes de son cycle de vie et qu'elles y font apparaître chacune les données sous une forme différente. Ainsi, la démarche de reconstruction de ces arbres sous une même forme avec également un vocabulaire unique facilite la comparaison entre les différents articles et donc le travail de synthèse.
- La troisième partie regroupe les données techniques de fabrication des pièces et permet principalement de nous informer sur les paramètres d'utilisation du WAAM qui peuvent grandement varier d'un équipement à un autre.
- La quatrième partie regroupe les différents inventaires associés aux processus unitaires par lesquels passe la pièce. Ils correspondent donc aux flux de matières et d'énergie nécessaires tout au long du cycle de vie. Ces inventaires sont différenciés par nature (énergie, gaz, matériaux...), par étape du processus et par procédé de fabrication avec la construction de tableaux récapitulatifs pour chaque catégorie. Ces données brutes sont mises en forme en calculant des SEC pour chaque étape lorsque cela est possible afin de compléter les flux des arbres de processus.
- Enfin la dernière partie s'intéresse à la manière dont sont évalués et comparés les impacts environnementaux en reprenant les figures et conclusions des études. Elle présente donc les critères de comparaison, les démarches et méthodes utilisées ainsi que les résultats obtenus.

Ces fiches regroupent donc des éléments commentés et analysés extraits directement des articles (présentation des équipements et pièces étudiées, résultats des analyses de cycle de vie) et des éléments reconstruits spécifiquement (arbres des processus, inventaires) pour faciliter l'analyse entre les différentes études.

### 3.2 Analyse des paramètres de fabrication de pièce par WAAM

Un aspect qui découle des analyses de cycle de vie et qui nous intéresse pour déterminer l'impact environnemental du WAAM est l'influence des paramètres de fabrication sur la consommation d'énergie. A partir des données techniques et des inventaires de flux, il est possible d'associer à un ensemble de paramètres une consommation d'énergie, exprimée sous la forme d'un SEC. Et ainsi, en généralisant cette démarche aux différentes études, un lien peut être établi entre l'évolution d'un ou plusieurs paramètres et celle de la consommation énergétique. Une fois ce lien établi et vérifié, il peut permettre de définir une démarche pour la fabrication WAAM permettant une réduction d'impact.

## 4 Résultats et discussions

### 4.1 Impact environnemental du WAAM

La synthèse des articles traitant de l'impact environnemental du WAAM nous permet d'établir plusieurs résultats généraux sur ce procédé.

#### 4.1.1 Consommation énergétique du WAAM

Tout d'abord, la réutilisation des données d'inventaires sur la consommation énergétique permet de regrouper les énergies consommées pour trois étapes du cycle de vie pour différents métaux. Le choix a été fait de limiter la synthèse à trois étapes (production matières premières, production de fil (qui inclus le laminage et le tréfilage) et la fabrication WAAM) car il s'agit des étapes les plus représentées et ayant un nombre suffisant de valeurs pour une comparaison entre les différents articles.

A partir de ces valeurs, il est possible d'établir par matériau la part de consommation d'une étape du cycle afin de déterminer quelles étapes sont les plus consommatrices d'énergie et si cette répartition évolue d'un cas d'étude à un autre. Ce travail (Figure 3) réalisé pour deux matériaux, l'acier et l'alliage de titane, montre que la répartition des consommations est peu impactée par les différents cas d'étude et que les étapes avant fabrication (production de matières premières et de fil) sont plus consommatrices d'énergie que la fabrication avec l'accentuation de ce phénomène pour l'alliage de titane.

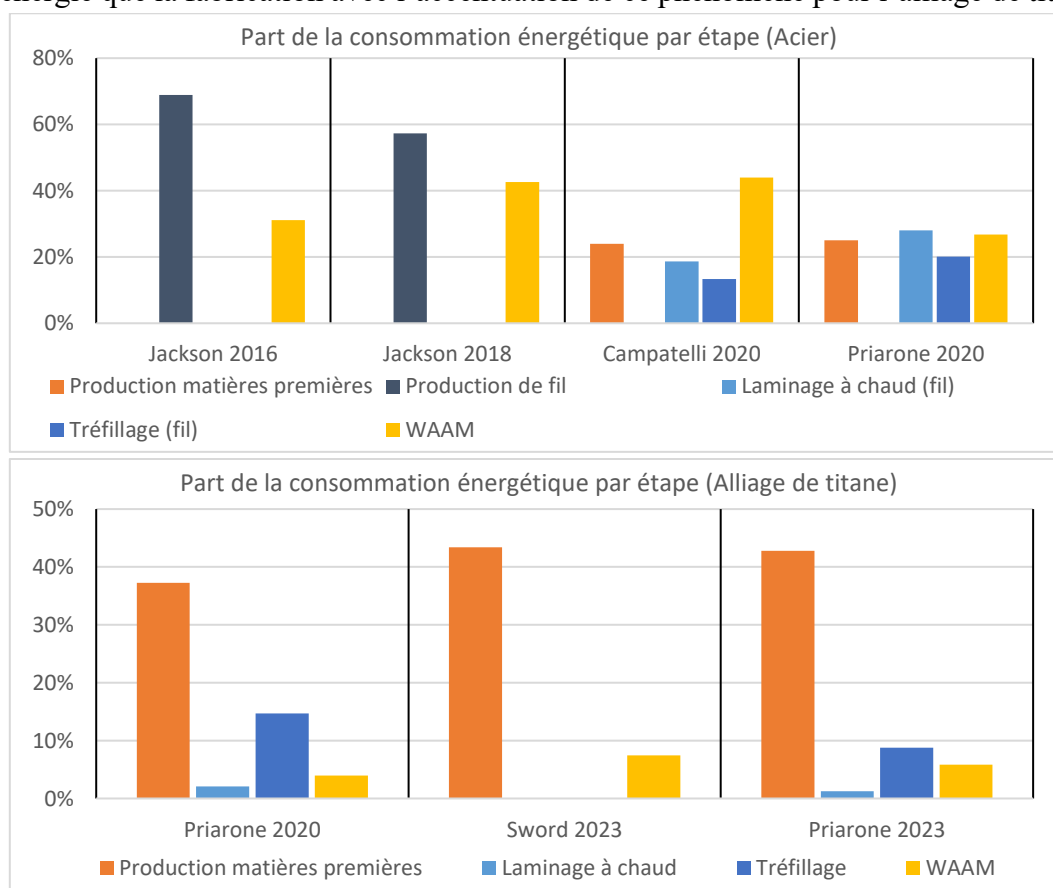


Figure 3: Répartitions de la consommation énergétique pour l'acier et l'alliage de titane

#### 4.1.2 Conversion en impact environnemental

La suite de l'analyse de la consommation énergétique consiste à la convertir en impact environnemental sous la forme d'émission de CO<sub>2</sub>. Le (Tableau 1) présente cette conversion avec les émissions exprimées en kgCO<sub>2</sub>/kg de matière déposée. Ce calcul s'appuie sur des valeurs de SEC ou d'énergie totale calculées à partir des inventaires obtenus dans les fiches. Cette énergie est ensuite mise en relation avec la valeur des émissions de CO<sub>2</sub> par MJ d'électricité produit par le mix énergétique français qui correspond à 8,33g de CO<sub>2</sub> par MJ produit.

Tableau 1 : Impact environnemental de la consommation énergétique du WAAM

Référence	Matériau	Consommation énergétique WAAM (MJ/kg)	Emissions associées (kgCO <sub>2</sub> /kg)
Jackson 2016	Acier ER70S-6	32,3	0,269
Jackson 2018	Acier ER70S-6	37,5	0,313
Bekker 2018	Inox 308L	9,79	0,082
Priarone 2019	Acier ER70S-6	4,54	0,038
Campatelli 2020	Acier EN S235JR	19,76	0,165
Priarone 2020	Aluminium AA2319	6,3	0,053
Priarone 2020	Acier ER70S-6	23,7	0,198
Priarone 2020	Titane Ti-6Al-4V	33,4	0,278
Priarone 2021	Acier AISI H13	6,7	0,059
Dias 2022	Inox AISI 316L	9,77	0,081
Kokare 2023	Acier ER70 HSLA	4,22	0,035
Shah 2023	Acier S355 / Inox 304	8,85	0,074
Reis 2023	Acier ER90	4,98	0,042
Reis 2023	Acier ER90	7,2	0,060
Reis 2023	Acier ER90	8,1	0,068
Sword 2023	Titane Ti-6Al-4V	14,9	0,124

#### 4.1.3 Comparaison avec les procédés traditionnels

La synthèse effectuée permet aussi la comparaison avec d'autres procédés comme l'usinage et le moulage qui sont les procédés pour lesquels on dispose du plus de données comparatives. Ces comparaisons englobent les consommations d'énergie et de matière. En ce qui concerne l'énergie, selon les études, le procédé WAAM permet en moyenne une réduction de 28% de la consommation par rapport à l'usinage et présente une consommation équivalente par rapport au moulage.

Pour l'utilisation de matières premières, le WAAM présente également un avantage par rapport aux deux autres procédés puisqu'on observe une réduction de 65% en moyenne (pouvant même aller jusqu'à 89%) en comparaison avec l'usinage et une réduction de 25% par rapport au moulage.

Ces résultats sont également à mettre en perspective avec le fait que toutes les comparaisons ici présentées sont faites pour une même pièce : or, une des spécificités de la fabrication additive est d'être capable de produire des pièces avec des géométries complexes et s'adapte très bien à des démarches de conception comme l'optimisation topologique qui permet d'optimiser la forme et la masse d'une pièce pour répondre à des contraintes mécaniques. Dans ce cas, illustré par la Figure 4 qui présente deux poutres, une fabriquée conventionnellement et l'autre optimisée topologiquement et fabriquée par WAAM, on observe une réduction de 47% d'utilisation de matières premières. Ce résultat est intéressant sachant que la fabrication d'une poutre traditionnelle est caractérisée par très peu de pertes de matières.



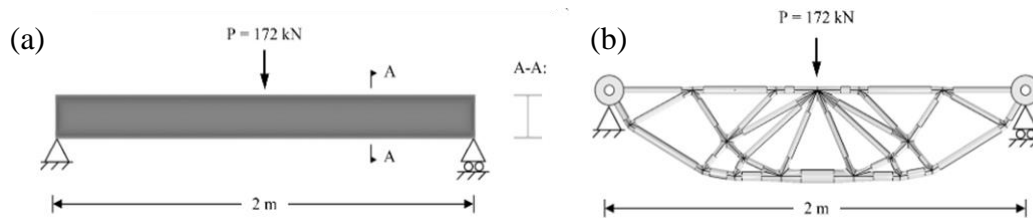


Figure 4 : (a) Poutre conventionnelle, (b) Poutre optimisée topologiquement pour le WAAM (Shah, 2023)

## 4.2 Influence du taux de déposition sur la consommation énergétique

### 4.2.1 Etude des paramètres de fabrication

L'ensemble des bases de données techniques extraites des articles permet d'accéder aux paramètres de fabrication WAAM. Le Tableau 2 présente la mise en relation entre ces données et les SEC associées à la fabrication WAAM. Un élément marquant de ce tableau est le fait qu'aucun paramètre n'est disponible pour l'ensemble des cas ce qui résulte du manque d'information accessible dans les articles. Cependant, il est possible, à partir des données présentes de calculer un taux de déposition dans tous les cas où il n'est pas explicitement donné. Ainsi, notre étude peut se concentrer sur ce paramètre qui est exprimé en kg/h et qui représente la quantité de matière déposée par unité de temps. Cette définition en fait un paramètre intéressant pour une étude puisqu'il a un impact direct sur le temps de production d'une pièce.

En étudiant les SEC associées aux taux de déposition, on note que pour des valeurs qui sont toutes autour de 1kg/h, le SEC varie peu entre 4.22 et 8.1MJ/kg à l'exception d'une valeur de 23.7MJ/kg qui est plus importante de par l'utilisation d'une technologie plasma (PAW) qui est plus consommatrice que la technologie GMAW qui est utilisée autrement.

Tableau 2 : Données expérimentales de la littérature pour la fabrication WAAM

Référence	Type machine	Type matériau	Gaz de protection	Débit gaz de protection (L/min)	Vitesse d'alimentation du fil (m/min)	Diamètre du fil (mm)	Taux de déposition (kg/h)	Vitesse de déposition (mm/min)	Temps d'attente (s)	SEC (MJ/kg)
Priarone 2019	CNC / GMAW	Acier		14	4,55	0,8	0,9	300	100	4,54
Campatelli 2020	CNC / GMAW	Acier	82% Ar, 18% CO <sub>2</sub>	14	4,6		1,06	200		6,64
Priarone 2020 (2)	Robot multi-axes / PAW	Acier		14			0,94			23,7
Kokare 2023		Acier	82% Ar, 18% CO <sub>2</sub>		3	1	1,1	360		4,22
Reis 2023 (1)	GMAW	Acier	88% Ar, 12% CO <sub>2</sub>	16	3	1	1,1	360	180	4,98
Reis 2023 (2)	GMAW	Acier	88% Ar, 12% CO <sub>2</sub>	16	3	1	1,1	360	180	7,2
Reis 2023 (3)	GMAW	Acier	88% Ar, 12% CO <sub>2</sub>	16	3	1	1,1	360	180	8,1

### 4.2.2 Expérimentation sur le taux de déposition

Les valeurs de taux de déposition extraites de la littérature ne permettent pas de déterminer son influence sur la consommation énergétique. Ainsi, nous avons mis en place une expérimentation proposant pour différentes valeurs de taux de déposition une mesure de SEC. Celle-ci prend place à la RM Plateform de l'école Centrale de Nantes avec un équipement WAAM utilisant la technologie CMT (Cold Metal Transfert).

Le calcul du SEC est déterminé à partir de la consommation énergétique du générateur alimentant l'arc électrique pendant la déposition d'un cordon d'acier (Figure 5). A celle-

ci est ajoutée une consommation fixe pour l'équipement déplaçant la torche constitué d'un robot Yaskawa 7 axes. Cette démarche est répétée en augmentant le taux de déposition allant de 0,8 à 4,4 kg/h. L'augmentation du taux de déposition implique l'adaptation des paramètres de déposition afin d'obtenir des cordons similaires pour chaque essai. Ainsi, le rapport entre la vitesse d'alimentation du fil et la vitesse de déplacement de la torche reste constant afin d'assurer la même quantité de matière déposée par unité de surface.

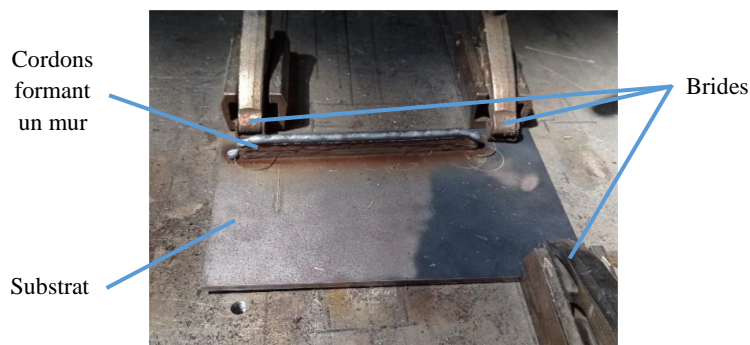


Figure 5 : Cordons déposés lors de l'expérimentation

L'évolution du SEC de cet équipement peut être présentée en fonction du taux de déposition utilisé (Figure 6). On observe une augmentation du SEC avec celle du taux de déposition ainsi qu'une valeur maximale de 1,95 MJ/kg pour un taux de déposition de 4,4 kg/h. Ces valeurs sont inférieures à celles de la littérature (le Tableau 1 mentionne des valeurs supérieures à 4 MJ/kg) ce qui peut s'expliquer par un apport d'énergie moins important caractéristique du CMT par rapport aux autres technologie WAAM.

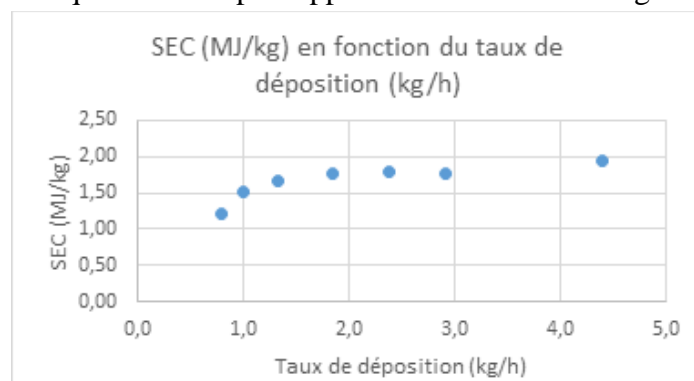


Figure 6 : Evolution du SEC en fonction du taux de déposition

Ces résultats indiquent qu'une utilisation du WAAM avec un haut taux de déposition entraîne une consommation maîtrisée d'énergie. Le WAAM apparaît donc comme une technologie de FA performante et permettant une réduction d'impact.

## 5 Conclusions

Dans cet article, un état de l'art de la consommation énergétique des procédés de FA métallique a été dressé sous la forme de l'analyse des SEC. Cela a permis d'identifier le WAAM comme l'un des procédés les plus efficace énergétiquement et donc ayant un fort potentiel de réduction d'impact. Le WAAM a donc fait l'objet d'une étude bibliographique sur les analyses environnementales plus approfondie. Afin de permettre une comparaison efficace de ces études, une méthodologie de synthèse sous forme de fiches a été mise en place avec la reconstruction d'arbres des processus et la présentation

des données d'inventaires utilisées. Grâce à cela, une comparaison entre le WAAM et des procédés traditionnels (usinage et moulage) a pu être effectuée sur les aspects de consommation d'énergie et de matière première. Il ressort de cette comparaison un avantage du WAAM pour les critères évalués sur les cas d'études rencontrés. Cela a également permis la mise en avant d'une expérimentation s'intéressant à l'évolution du SEC en fonction du taux de déposition indiquant une faible augmentation de la consommation énergétique pour de hauts taux de déposition.

## Références

- N. Ahmad, E.U. Enemuoh (2020) *Energy modeling and eco impact evaluation in direct metal laser sintering hybrid milling*, *Heliyon*, vol 6, issue 1.
- M. Baumers, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft, R. Hague (2011) *Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter?. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011*.
- A.C.M. Bekker, J.C. Verlinden (2018) *Life cycle assessment of wire+arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel*, *Journal of Cleaner Production*, vol 177, pp 438-447.
- F. Le Bourhis, O. Kerbrat, L. Dembinski, J.Y. Hascoet, P. Mognol (2014) *Predictive Model for Environmental Assessment in Additive Manufacturing Process*, *Procedia CIRP*, vol 15, pp 26-31.
- G. Campatelli, F. Montevecchi, G. Venturini, G. Ingarao, P.C. Priarone (2020) *Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison*, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol 7, pp 1-11.
- M. Dias, J.P.M. Pragana, B. Ferreira, I. Ribeiro, C.M.A Silva (2022) *Economic and Environmental Potential of Wire-Arc Additive Manufacturing*, *Sustainability*, vol 14, 5197.
- M.A. Jackson, A. Van Asten, J.D. Morrow, S. Min, F.E. Pfefferkorn (2016) *A Comparison of Energy Consumption in Wire-based and Powder-based Additive-subtractive Manufacturing*, *Procedia Manufacturing*, vol 5, pp 989-1005.
- M.A. Jackson, A. Van Asten, J.D. Morrow, S. Min, F.E. Pfefferkorn (2018) *Energy Consumption Model for Additive-Subtractive Manufacturing Processes with Case Study*, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol 5, pp 459-466.
- S. Kokare, J.P. Oliveira, T.G. Santos, R. Godina (2023) *Environmental and economic assessment of a steel wall fabricated by wire-based directed energy deposition*, *Additive Manufacturing*, vol 61, 103316.
- Z. Liu, Q. Jiang, W. Cong, T. Li, H.C. Zhang (2018) *Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes*, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol 15, pp 2273-2282.
- P.C. Priarone, G. Campatelli, F. Montevecchi, G. Venturini, L. Settineri (2019) *A modelling framework for comparing the environmental and economic performance of WAAM-based integrated manufacturing and machining*, *CIRP Annals*, vol 68, issue 1, pp 37-40.
- P.C. Priarone, E. Pagone, F. Martina, A.R. Catalano, L. Settineri (2020) *Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing*, *CIRP Annals*, vol 69, issue 1, pp 37-40.
- P.C. Priarone, G. Campatelli, A.R. Catalano, F. Baffa (2021) *Life-cycle energy and carbon saving potential of Wire Arc Additive Manufacturing for the repair of mold inserts*, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol 35, pp 943-958.
- R.C. Reis, S. Kokare, J.P. Oliveira, J.C.O. Matias, R. Godina (2023) *Life cycle assessment of metal products: A comparison between wire arc additive manufacturing and CNC milling*, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol 6, 100117.
- I.H. Shah, N. Hadjipantelis, L. Walter, R.J. Myers, L. Gardner (2023) *Environmental life cycle assessment of wire arc additively manufactured steel structural components*, *Journal of Cleaner Production*, vol 389, 136071.
- J.I. Sword, A. Galloway, A. Toumpis (2023) *An environmental impact comparison between wire + arc additive manufacture and forging for the production of a titanium component*, *Sustainable Materials and Technologies*, vol 36, e00600.
- J. Teubler, S. Weber, P. Suski, I. Peschke, C. Liedtke (2019) *Critical evaluation of the material characteristics and environmental potential of laser beam melting processes for the additive manufacturing of metallic components*, *Journal of Cleaner Production*, vol 237, 117775.