



Revoir

# Contraintes résiduelles dans les produits de fabrication additive à arc filaire et leurs techniques de mesure : une revue systématique

Fakada Dabalo Gurmesa 1,\*<sup>1</sup>, Hirpa Gelgele Lemu 2,\*<sup>2</sup>, Yosef Wakjira Adugna 2<sup>2</sup> et Mesfin Demise Harsibo 3<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculté de génie mécanique, Jimma Institute of Technology, Jimma University, Jimma PO Box 378, Département

<sup>2</sup> d'Éthiopie de génie mécanique et structurel et de science des matériaux, Faculté des sciences et technologies, Université de Stavanger, N-4036 Stavanger, Norvège ; yosef.w.adugna@uis.no Département de

<sup>3</sup> génie mécanique, Collège d'ingénierie et de technologie, Université Wolkite, Welkite PO Box 07, Éthiopie ; mesfine2021@gmail.com

\* Correspondance : fd.gurmesa@stud.uis.no (FDG) ; hirpa.g.lemu@uis.no (HGL)

**Résumé :** Cette revue de la littérature propose une exploration approfondie des recherches menées sur les contraintes résiduelles (RS) dans les produits de fabrication additive à arc métallique (WAAM), en se concentrant particulièrement sur la façon dont les paramètres de processus influencent le phénomène. La motivation de l'étude est l'intérêt croissant porté à la technologie WAAM et l'observation selon laquelle RS joue un rôle crucial dans la détermination du comportement mécanique et de l'intégrité structurelle des composants WAAM. Ainsi, l'examen vise à fournir une meilleure compréhension de la relation entre les paramètres du processus et le RS afin d'optimiser le processus WAAM et d'assurer la durabilité des produits finaux. Il résume également les principales conclusions, techniques de mesure, défis et orientations futures dans ce domaine en évolution. La revue analyse également les techniques de mesure utilisées pour caractériser le RS dans les produits fabriqués par WAAM en fonction des paramètres du processus. Les techniques de mesure expérimentales et l'analyse numérique du RS pour déterminer les impacts du RS sur les réponses mécaniques des produits WAAM ont été discutées.

Des techniques de mesure expérimentales, telles que la diffraction des rayons X, la diffraction des neutrons (ND), le contour et le ND, la corrélation d'images numériques, le couplage thermomécanique et le contour, ainsi que les méthodes de forage de trous, ainsi que des simulations numériques telles que l'analyse par éléments finis, sont discutées pour déterminer les impacts du RS sur les réponses mécaniques des produits WAAM. De plus, il aborde l'influence des cycles thermiques, des vitesses de refroidissement et des stratégies de dépôt sur la formation de RS. Le rôle des propriétés des matériaux, telles que la conductivité thermique et les coefficients de dilatation, dans le développement du RS est également pris en compte. En offrant un aperçu complet des tendances et des connaissances actuelles en matière de recherche, cette revue constitue une ressource précieuse pour guider les recherches futures, favorisant ainsi l'avancement du WAAM en tant que technologie de fabrication robuste et efficace. L'étude souligne également l'importance des approches interdisciplinaires combinant des méthodes expérimentales et numériques pour aborder les problèmes complexes de RS dans WAAM, dans le but d'améliorer les performances et la fiabilité des composants fabriqués de manière additive.

**Mots-clés :** stress résiduel ; fabrication additive à arc filaire ; paramètres de processus ; mesure des contraintes résiduelles ; évaluation de la fabrication additive à arc filaire



Citation : Gurmesa, FD ; Lému, HG ; Adugna, YW ; Harsibo, MD Résiduel

Contraintes dans l'additif pour arc métallique

Produits de fabrication et leurs techniques de mesure : une revue systématique. Appl. Mécanique. 2024, 5, 420-449. <https://doi.org/10.3390/applmech5030025>

Reçu : 27 avril 2024

Révisé : 15 juin 2024

Accepté : 27 juin 2024

Publié : 10 juillet 2024



Copyright : © 2024 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

La fabrication additive Wire Arc (WAAM) est un processus de fabrication avancé classé dans la catégorie fabrication additive (FA) ou impression 3D. Il s'agit du processus impératif de fabrication de métaux pour les composants volumineux et complexes, utilisant des fils métalliques ou des alliages comme matière première. De plus, en raison de ses taux d'accumulation rapides, les caractéristiques métallurgiques des pièces fabriquées par WAAM, telles que la composition chimique et la formation de phases, sont meilleures que celles des autres techniques de FA [1-3]. Un aspect important qui freine encore cette technologie est la normalisation et la certification dans le cadre des contrôles non destructifs des pièces, qui sont discutées dans la littérature [4]. Dans ce contexte, il n'existe pas de normes pour les systèmes

et pas d'observation in situ ni de techniques de surveillance pour toute formation instantanée de défauts (contrainte résiduelle) qui peuvent être corrigés après sa formation, ce qui entraîne un gaspillage de matériaux et du temps de reproduction. WAAM est une technologie d'impression 3D innovante et polyvalente offrant une grande variété d'applications et plusieurs avantages en matière de fabrication.

Les premières enquêtes suggèrent que l'adoption des technologies de fabrication additive dans la construction pourrait potentiellement réduire les dépenses de main-d'œuvre, diminuer le gaspillage de matériaux et fabriquer des formes personnalisées complexes qui mettent généralement au défi le fabricant utilisant des techniques de construction conventionnelles [5-7]. Cependant, le secteur WAAM s'intéresse aux techniques à grande échelle avec des taux de dépôt élevés de FA pour produire des composants, allant de plusieurs centaines de millimètres à plusieurs mètres [8]. Il suscite une attention considérable dans la fabrication industrielle en raison de sa fabrication fiable de pièces métalliques à grande échelle à des taux de dépôt élevés [9]. Par ailleurs, Williams et al. [10] suggèrent que WAAM est un concurrent viable pour remplacer l'approche de fabrication existante impliquant des billettes solides ou des pièces forgées intensives, en particulier pour les composants de complexité faible à moyenne.

Dans le contexte des produits WAAM, la présence de RS et de déformations dues aux paramètres du processus devient un problème important car elles ont un impact substantiel sur la qualité, le coût et la précision du processus d'impression [11-13]. De plus, le WAAM, qui est un sous-ensemble de la FA, suscite un intérêt considérable de la part de tous les chercheurs en raison de ses divers avantages, notamment sa capacité à atteindre des taux de dépôt de métaux élevés et à produire des formes proches de la réalité, surpassant les méthodes de fabrication conventionnelles avec ses contraintes thermiques résiduelles plus élevées. (RS) [3,14-16]. Il s'agit d'une technique émergente de fabrication additive métallique qui offre progressivement un avantage concurrentiel par rapport aux méthodes traditionnelles de forgeage et de coulée [17]. En fonction des sources de chaleur, le procédé WAAM est classé en trois, à savoir : le soudage au gaz inerte, le soudage à l'arc métallique et l'arc plasma [18,19].

La nécessité et le but de cet article de synthèse sont d'étudier les techniques de mesure de RS dans les produits WAAM. Notamment, cet examen est essentiel pour comprendre en profondeur comment le RS est distribué dans les produits WAAM et comment il est en corrélation avec les paramètres de dépôt. Dans cette étude, les méthodes d'examen et de mesure du RS, l'impact du RS sur les caractéristiques des matériaux des produits WAAM et les paramètres de processus basés sur des analyses expérimentales et numériques ont été discutés, tandis que l'atténuation du RS et l'affinement de la structure des grains des pièces de couche créées. amélioré sur la base des méthodes expérimentales a été discuté. Dans cette revue, les effets des paramètres de processus tels que le diamètre du fil, la longueur de balayage avec la largeur, la hauteur (épaisseur) du cordon, le comportement du courant d'arc [20], la tension, la vitesse de déplacement, la séquence de soudage (position de soudage) [21], les types de blindage. le gaz, et son débit sur RS sont pris en compte. En outre, des études sur les conséquences de l'état de surface des billes intercouches et du temps entre les passes sur la forme du dépôt et sur la manière dont la hauteur augmente de manière additive ont été prises en compte.

Cette revue se concentre également principalement sur la façon de mesurer les RS fabriqués avec WAAM, en s'appuyant sur les données pertinentes de la littérature existante. Les techniques de mesure de RS par des approches expérimentales sont principalement la diffraction des neutrons [22-24] et la diffraction des rayons X (DRX) [25-27], qui sont réalisées dans une profondeur de couche limitée de produits imprimés, tandis que la diffraction des rayons X basée sur le synchrotron le rayon peut pénétrer plusieurs millimètres dans les métaux et alliages. D'autres méthodes telles que la méthode de jauge de contrainte de forage de trous, la mesure de contrainte par ultrasons (USM), l'analyse du bruit de Barkhausen, l'élimination de couches (forage de trous profonds), la méthode de contour et la technique de forage de trous incrémentiel ont été utilisées, et certaines d'entre elles ont été utilisées. pas encore été utilisé. Il est important de noter que cet examen délimite explicitement ceux qui ont été utilisés et ceux qui ne l'ont pas été.

Le format de l'article est le suivant : après cette section introductive, la section 2 fournit des détails sur les matériaux et les méthodes utilisés dans la recherche. Viennent ensuite les sections 3 et 4, qui présentent respectivement un aperçu des produits de WAAM et discutent de l'impact de RS affectant les attributs mécaniques des composants WAAM.

La section 5 se concentre sur l'explication des stratégies d'atténuation pour la RS et explore les applications pratiques. La section 6 sert de section de discussion, offrant une analyse détaillée et

interprétation des résultats. Enfin, la section 7 résume l'article en décrivant les éléments clés points et fournir un aperçu des orientations de recherche futures.

2. Matériels et méthodes

Cette revue se concentre sur la littérature scientifique publiée au cours des dix dernières années, qui englobe des sources principalement publiées entre 2015 et 2024. Cette recherche est sur la base de la structure d'évaluation de la déclaration PRISMA présentée dans la figure 1. Pour assurer une couverture complète des recherches connexes, l'enquête cible les défauts principalement sur les RS des produits WAAM basés sur les nombreux processus et opérationnels paramètres. Pour atteindre l'objectif de cet article de synthèse, la revue se concentre sur les dernières publications (comme indiqué sur la base des données fournies dans la figure 2, avec un contenu thématique organisés autour de problématiques spécifiques. La recherche a été limitée aux sources contenant exclusivement des articles publiés en anglais. Il comprend des articles dans les revues scientifiques suivantes bases de données : scientific.net, Scopus, Elsevier, Science Direct, Web of Science, Compendia, Google Scholar, IEEE Xplore, ProQuest, ASM Digital Library, SpringerLink, Mendeley et ResearchGate, spécialiste de la sémantique, SCISPACE, PubMed, DOAJ, JSTOR, MDPI, BASE, SAGE, Taylor et Francis, et d'autres. Il a utilisé l'expression anglaise pour rechercher des termes tels que Mesure AM, WAAM, RS, analyse des paramètres de processus, évaluation de la qualité dans WAAM, Défauts des produits WAAM, caractérisation de la microstructure des produits WAAM, WAAM contrôle de la qualité, enquête WAAM RS et descriptions descriptives supplémentaires fréquemment utilisés termes pour s'aligner précisément sur les objectifs de l'examen. Pour atteindre cet objectif, ces

Appl. Mécanique. 2024, 5, POUR L'EXAMEN PAR LES PAIRS, des combinaisons statistiques et l'analyse des données de plusieurs études ont été utilisées pour dessiner conclusions globales.

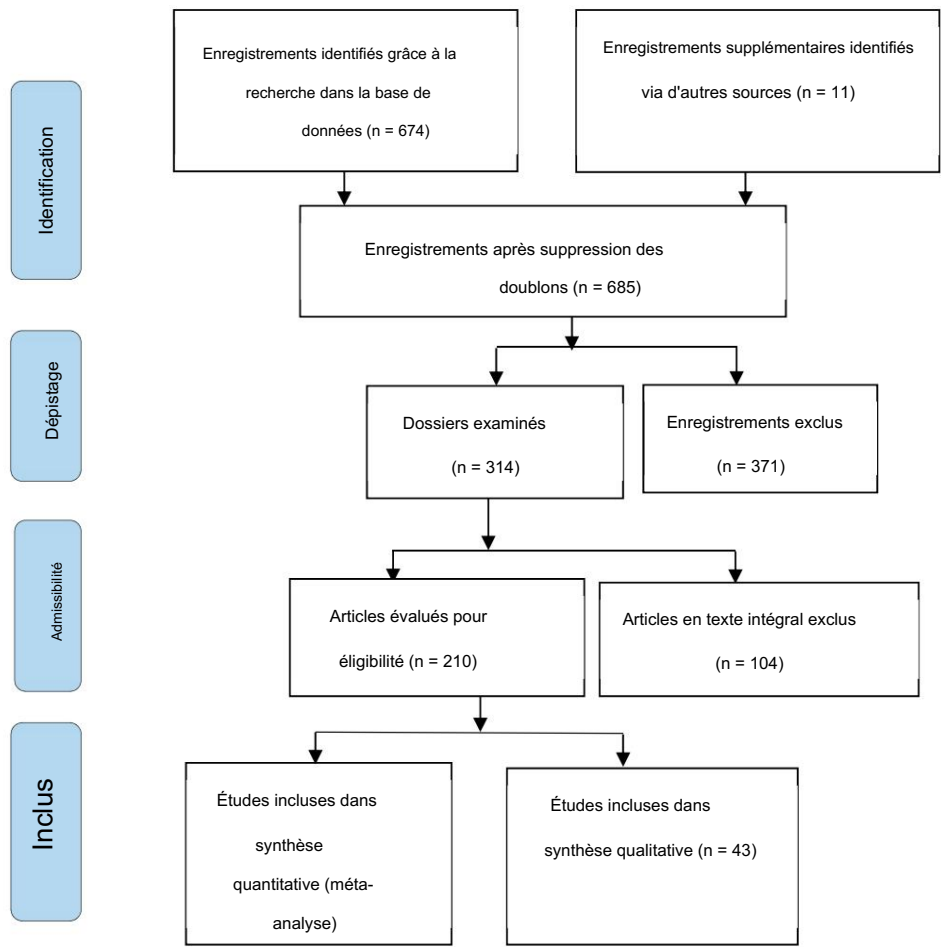


Figure 1. Organigramme illustrant le processus de sélection et de sélection des études.

Figure 1. Organigramme illustrant le processus de sélection et de sélection des études.

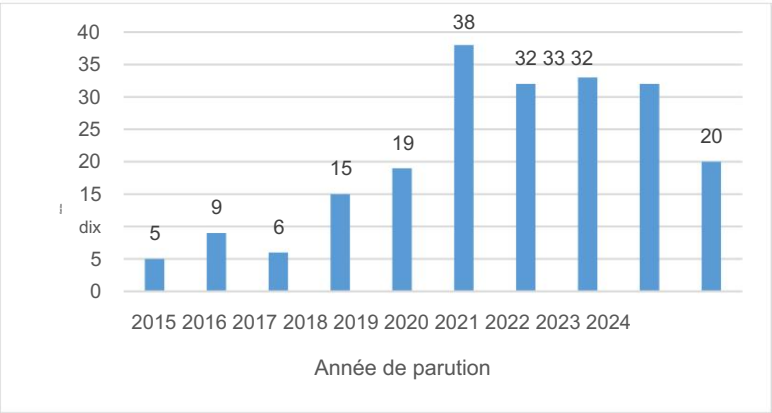


Figure 2. Données statistiques sur les articles examinés d'une fabrication additive à processus laser (WAAM) additive à arc métallique (WAAM) de 2015 à 2024.

3. Aperçu du WAAM des processus et des produits Le nombre évalué de domaines de recherche de RS dans le WAAM est présenté dans la figure 2, illustrant le nombre annuel de publications de recherche. Les graphiques à barres de la figure montrent qu'il y a eu une augmentation notable de l'intérêt de la recherche pour la RS dans les pièces WAAM au cours des dernières années, avec un taux de dépôt rapide, un exploit qui est un défi à réaliser avec la FA traditionnelle. Le nombre croissant de publications dans ce domaine. Un nombre de citations élevé est généralement une méthode [28,29]. Dans ce cas, le fil est fourni à la torche de soudage et fondu par un arc électrique, ce qui indique un grand intérêt pour le sujet auprès de la communauté des chercheurs. Pour le thème choisi, l'arc trie [30]. Des portiques à commande numérique robotisés ou informatisés sont utilisés pour définir la stratégie principale utilisée pour filtrer les articles récupérés à 685. Enfin, le nombre total d'articles ayant réussi le contrôle (inclus dans cet article) est de 209.

3. Aperçu du WAAM des processus et des produits

Dans cette technologie, les composants volumineux et complexes sont fabriqués à partir de plusieurs matériaux avec un taux de dépôt rapide, un exploit difficile à réaliser avec les méthodes traditionnelles de FA [28,29]. Dans ce cas, le fil est amené à la torche de soudage et fondu par un arc électrique [30]. Des portiques à commande numérique robotisés ou informatisés sont utilisés pour régler le mouvement du processus d'impression couche par couche jusqu'à l'apparence souhaitée des composants obtenus [10]. Le modèle numérique 3D sert de modèle à ce processus WAAM. L'utilisation du guidage robotique dans WAAM permet un puissant mélange d'automatisation et de flexibilité de conception, associé à des processus de production efficaces. Cependant, la réponse des caractéristiques matérielles des produits fabriqués par fil-arc (WAAMed) est influencée à la fois par les robots automatisés et par la commande numérique informatisée pour construire les pièces et l'apport de chaleur associé [31].

Fondamentalement, les étapes utilisées pour le processus d'impression dans les produits WAAM englobent de nombreuses activités à chaque étape, à commencer par le modèle CAO. Ces étapes décrivent le flux de travail général pour la production de composants à l'aide de WAAM, garantissant une fabrication efficace et fiable de pièces métalliques complexes. Le processus de WAAM sera divisé en six étapes principales, depuis la préparation du fichier CAO jusqu'à la séparation des composants jusqu'au post-traitement [10]. Les étapes de planification de la procédure utilisées par WAAM pour produire des composants sont illustrées à la figure 3.

Essentiellement, le RS est inhérent aux composants WAAM en raison des divers paramètres de processus qui peuvent avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques, la résistance à la fatigue et l'intégrité structurelle des pièces. De plus, la mesure de RS dans les structures WAAM est difficile en raison de son processus long et du manque de résolution suffisante [32]. L'importance de comprendre RS dans les produits WAAM est essentielle pour maintenir l'intégrité structurelle afin de remédier aux défaillances prématurées et de garantir les performances mécaniques des produits [18,33]. Les caractéristiques des matériaux déposés peuvent varier au cours du processus WAAM, affectant l'évolution de RS [34], en raison de la zone affectée thermiquement (HAZ) à proximité du bain de soudure [35]. La mesure RS aide également à comprendre, prédire et corriger les inexactitudes dimensionnelles causées par les distorsions, garantissant ainsi que les produits WAAM respectent les tolérances souhaitées [36,37]. De même, une connaissance précise de RS est importante pour améliorer la qualité des produits et garantir que les composants WAAM répondent à leurs performances. En réduisant le

et prolonger la durée de vie des équipements et machines coûteux [40,41]. De plus, il est hautement capable de construire des structures métalliques de grande taille et/ou complexes et rentables, principalement en raison de son taux de dépôt supérieur [3,7,30,42-47]. WAAM est bien adapté à la création de pièces métalliques de grande taille et présente un potentiel d'utilisation dans l'industrie de la construction parmi diverses méthodes de FA [20]. Les principaux avantages de ces méthodes de fabrication incluent leur productivité, leur adéquation aux applications industrielles et leur capacité à éliminer les risques de défauts, de pannes, de retouche et/ou de refabrication. Elles peuvent réduire les coûts de production et minimiser le gaspillage de matériaux par rapport aux autres techniques de FA [48,49].

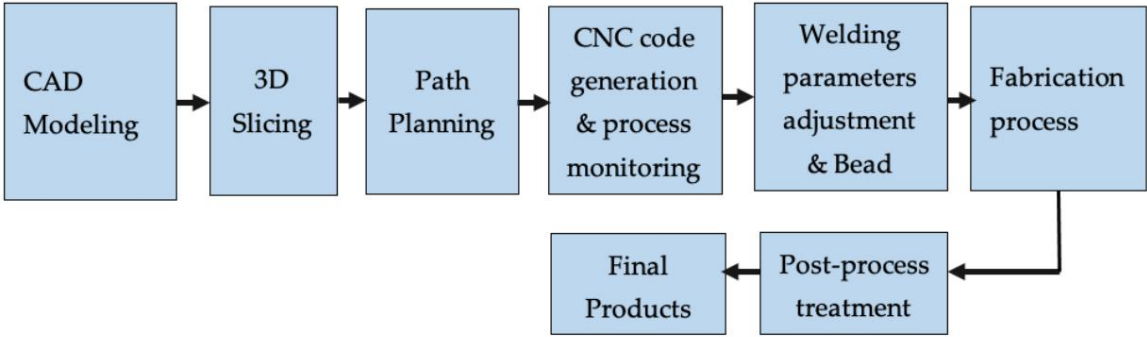


Figure 3. Étapes utilisées par WAAM pour produire des composants.

WAAM peut être utilisé pour réparer et restaurer des composants endommagés ou usés et prolonger la durée de vie des équipements et des machines coûteux [40,41]. De plus, c'est capable de construire des structures métalliques de grande taille et/ou complexes et rentables, principalement et une automatisation qui permet un contrôle précis des paramètres de dépôt et de la capacité grâce à son taux de dépôt supérieur [3,7,30,42-47]. WAAM est bien adapté à la création de pièces métalliques de grande taille et présente un potentiel d'utilisation dans le secteur de la construction parmi divers Méthodes AM [20]. Les principaux avantages de ces méthodes de fabrication incluent leur productivité, adéquation aux applications industrielles et capacité à réduire les matériaux déchets par rapport à d'autres techniques de FA [48,49].

3.1. Un système robotique pour WAAM

Les systèmes robotiques jouent un rôle important dans les processus WAAM, offrant une polyvalence et automatisation qui permettent un contrôle précis des paramètres de dépôt et de la capacité pour gérer des géométries complexes [50,51]. Ces systèmes intègrent des capteurs avancés et technologie d'automatisation pour surveiller et ajuster les paramètres d'impression en temps réel, garantissant une qualité constante et un dépôt précis des matériaux. L'étude rapportée dans [52] concentré sur deux paramètres WAAM, à savoir (1) la vitesse de dévidage du fil et (2) la vitesse de déplacement du robot et étudié leurs effets sur les dimensions métallurgiques et dimensionnelles. stabilité et caractéristiques mécaniques des matériaux. L'étude portait sur la production de pièces en acier inoxydable 308L à parois fines utilisant le système WAAM, réalisé en deux pas. Tout d'abord, l'effet du courant de soudage, de la tension et de la vitesse de déplacement sur la forme des cordons de soudure individuels a été examiné, et ces facteurs ont été affinés pour la construction de murs en acier 308L. Deuxièmement, une analyse complète a été menée sur l'influence de la microstructure et des caractéristiques mécaniques des parois en acier WAAM 308L, ce qui se traduit par des propriétés mécaniques améliorées adaptées aux applications industrielles. Robotique composants pour le processus d'impression avec le chemin d'indentation (Figure 4a), la configuration pour l'expérimentation (figure 4b) et le parcours de l'outil de dépôt sont illustrés à la figure 4.

Les algorithmes génétiques (AG) sont utilisés pour améliorer le processus de sélection des paramètres dans dépôt de forme quasi net pour minimiser les vides et les substances excédentaires dans le WAAM processus [53]. Un processus de dépôt ininterrompu est planifié en vérifiant le chevauchement conditions dans les zones d'échange de robots pour éviter les collisions [54,55]. De même, une continuité le processus de dépôt est soigneusement planifié en vérifiant les zones où les robots pourraient se chevaucher ou rapprochez-vous les uns des autres dans les zones d'échange de robots. Cette planification minutieuse est effectuée pour éviter toute collision entre les robots, garantissant des opérations fluides et sûres. Le robot des conseils seront fixés sur la vitesse de soudage souhaitée, ce qui affecte l'accumulation de chaleur et entraîne des variations du RS dans les produits, ainsi que le guidage robotisé pour surveiller le processus dans le WAAM décrit dans la figure 4. L'utilisation de la planification du chemin a été proposé [53,54] d'incorporer le chevauchement des cordons et d'améliorer la stabilité structurelle interne en minimiser la hauteur ; à terme, cela influence le RS dans les produits WAAM.

murs en acier. Deuxièmement, une analyse complète a été menée sur l'influence de la microstructure et des caractéristiques mécaniques des parois en acier WAAM 308L, ce qui a permis d'améliorer les propriétés mécaniques adaptées aux applications industrielles. La composition robotique pour le processus d'impression avec le chemin d'indentation (Figure 4a), la configuration pour l'expérimentation (Figure 4b) et le chemin de l'outil de dépôt sont illustrés dans la Figure 4.

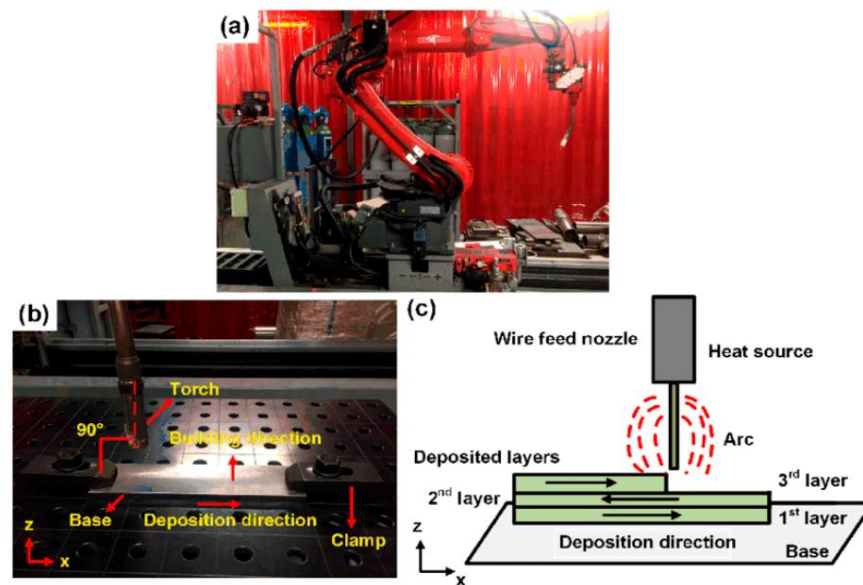


Figure 4. (a) Configuration du système robotique WAAM, (b) configuration pour l'expérimentation, (c) chemin de trajectoire d'outil [53]. Copyright 2019, MDPI, conformément à la licence CC BY, accès libre.

### 3.2. Contrainte résiduelle dans les produits WAAMed

WAAM fait référence aux techniques (G) les utilisées pour créer des pièces à partir de la sélection des paramètres RS dans les produits WAAMed. Les conditions de dépôt sont contrôlées par les paramètres de RS dans le W en cas de chargement ou de contrainte cyclique, il peut accélérer l'initiation et la propagation des fissures [53]. Un processus de dépôt ininterrompu est planifié en vérifiant le chevauchement qui est à l'origine d'une défaillance prématurée [56]. Ce RS peut provenir de divers facteurs, conditions dans les zones d'échange de robots pour éviter les collisions [54,55]. De même, un continu tel que les cycles de chauffage et de refroidissement associés à la dilatation différentielle pendant le processus de dépôt est soigneusement planifié en vérifiant les zones où les robots pourraient effectuer le processus de soudage, la contraction des matériaux pendant le temps de refroidissement et d'autres processus. Cette planification minutieuse est effectuée selon les paramètres [59–62]. Ainsi, on peut dire que le rapport de chaque bête est une valeur presque optimale. Les conditions de traitement le RS induit. Dans le processus WAAM, le composant induira une tension thermique et la chaleur lorsque les températures fluctuent avec l'avancement de la fabrication [64,65]. et entraîne des variations du RS dans les produits, ainsi que le guidage robotique à Ce réglage se fait en contrôlant les valeurs des débits de fil et de la vitesse de déplacement suivre le processus dans le WAAM décrit dans la figure 4. L'utilisation de la planification de chemin étai (TS). Avec un apport thermique plus élevé, le RS inférieur est observé à la surface de la couche supérieure. a été proposé [53, 54] pour incorporer le chevauchement des billes et améliorer la stabilité structurelle interne grâce à des durées de refroidissement de longue durée [66]. Le soudage RS a été mesuré à l'aide de cinq expériences (méthodes de mesure des contraintes résiduelles) : la méthode de contour (CM), la méthode de diffraction (iDHD), le forage incrémental de trou central (iCHD) et la méthode de contour (CM) [67].

Autres et à mesurer les contraintes résiduelles des produits WAAM, ils ont découvert des améliorations produits WAAMed à l'intérieur de la disposition des grains et les propriétés matérielles des composants (les neufs [68]. La transformation de gros grains allongés en grains plus petits et uniformes. en forme de RS dans les composants fabriqués [55]. Lorsque le composant de ce RS est soumis à des grains dans les couches interne et intermédiaire, cela se fait en ajustant la quantité de RS. L'initiation et la propagation des fissures sont affectées par les caractéristiques mécaniques des composants fabriqués par les cycles de chauffage et de refroidissement associés à la dilatation différentielle pendant le processus de soudage, à la contraction des matériaux pendant le temps de refroidissement et à d'autres par- 3.3. Méthodes de mesure des contraintes

Par rapport à la mesure de RS dans d'autres méthodes conventionnelles, la mesure de RS dans WAAM produits est plus difficile en raison de l'histoire thermique complexe, de l'hétérogénéité microstructurale, de la complexité géométrique et de la nécessité de techniques de mesure spécialisées. Relever ces défis nécessite une combinaison de méthodes expérimentales avancées, des étalons d'étalonnage précis et des outils de modélisation et de simulation robustes. Compréhension et surmonter ces défis est essentiel pour garantir l'intégrité structurelle et les performances des composants WAAM dans les applications pratiques. Généralement, il existe deux mesures techniques de RS pour pièces fabriquées en WAAM, à savoir méthodes expérimentales et numériques, qui sont examinés et rapportés dans les sous-sections suivantes.

3.3.1. Méthodes expérimentales pour la mesure RS dans les pièces WAAM

Plusieurs articles de synthèse dans différents types de littérature ont étudié l'examen de la RS dans les produits WAAM en utilisant diverses techniques (71). Initialement, ces études se sont concentrées sur les contraintes dans les lignes centrales de la section transversale de la théorie générale des poutres, en effectuant une analyse théorique de l'évolution des contraintes le long de ces lignes sans supposer une distribution de contraintes spécifique, considérée comme RS. Par la suite, la recherche s'est étendue à l'amélioration des modèles de prévision du gauchissement basés sur la théorie générale des poutres [72]. D'autres techniques incluent la diffraction des neutrons (ND) [22-24,73], la diffraction des rayons X (XRD) [25-27,74], la méthode des contours [13,75-77], les méthodes de forage de trous [31], le modèle de couplage thermomécanique [78], la corrélation d'images numériques (DIC) [79], le forage de trous profonds (DHD) [80], le synchrotron Operando et la diffraction des rayons X synchrotron (SXR) [81,82]. Le choix des méthodes dépend d'éléments tels que le matériau, la taille du composant, la géométrie et le niveau de précision requis pour la mesure. Une modélisation précise du processus est cruciale pour comprendre et contrôler la RS. Par exemple, l'analyse XRD est utilisée pour identifier la taille des grains observés dans les fines bandes et la ferrite de bainite créées en raison des cycles thermiques, tandis que les tests de pénétration de colorant sont utilisés pour étudier les défauts de surface et les comportements à la corrosion des composants WAAM [65,66,68,83].

Le choix de la méthode de mesure appropriée est régi par des facteurs tels que l'accessibilité, la résolution, la précision et la profondeur de pénétration des contraintes souhaitée. Le tableau 1 répertorie les méthodes utilisées pour la mesure RS sur différents matériaux ainsi que le résumé des études expérimentales. Comme le montre le tableau, les méthodes les plus utilisées, selon l'aperçu de la littérature, sont la XRD, la ND, la corrélation d'images numériques (DIC), la SXR, l'élimination de couches (forage profond), la méthode des contours et la méthode des trous incrémentaux. -méthode de perçage.

Tableau 1. Résumé des méthodes expérimentales de mesure des contraintes résiduelles (RS).

| Méthodes      | Matériaux                           | Résultats                                                                                                                                                                                                                                                                           | Réf.       |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ND            | Acier inoxydable 316L               | L'influence des paramètres du procédé sur RS est à peine perceptible dans la zone fondue.                                                                                                                                                                                           | [22]       |
|               | Alliage Fe3Al                       | Les gros grains colonnaires entraînent une anisotropie et RS est tendu dans le sens de la construction, et la tension jusqu'à la compression augmente progressivement du début à la fin du processus de dépôt.                                                                      | [23]       |
|               | AA6061                              | RS indique l'apparition de contraintes de traction d'une plus grande ampleur dans les pièces construites, tandis que le substrat présente moins de contraintes de compression. Aucune dissemblance significative n'a été observée dans les propriétés mécaniques.                   | [59]       |
|               | Alliage d'aluminium 2319            | RS le long de la direction de construction dans le mur déposé est une contrainte de traction, s'étendant jusqu'au sol. Les parois laminées entre passes ont réduit le RS pour améliorer la résistance dans le sens longitudinal.                                                    | [24]       |
|               | Fe3Al                               | Les RS et les distorsions résultant du processus WAAM sont des préoccupations majeures car elles influencent non seulement la tolérance de la pièce, mais peuvent également provoquer une défaillance prématurée du composant final pendant le service.                             | [83]       |
|               | en acier inoxydable 304L            | L'altération de RS dans l'échantillon après l'introduction d'un nouveau dépôt. Les contraintes longitudinales étaient principalement liées à la traction, atteignant leur maximum à la limite entre le matériau parent et les couches où les charges thermiques étaient appliquées. | [84]       |
|               | Inconel 625                         | Les mesures ont montré qu'un RS inférieur se formait dans les matériaux fonctionnellement classés (FGM) à interface directe par rapport au FGM à gradient lisse.                                                                                                                    | [85]       |
| Contour et ND | Alliage Ti-6Al-4V, acier inoxydable | La contrainte dans la plaque de base varie RS. Les paramètres de réseau n'étaient pas valides dans la plaque de base pour les mesures ND. La découpe d'une sortie sans contrainte a été utilisée pour corriger les échantillons de référence.                                       | [73,74,86] |

Tableau 1. Suite

| Méthodes                               | Matériaux                                        | Résultats                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Réf.    |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| DRX                                    | Alliage C-276                                    | L'amplitude de traction RS a été perçue dans le sens du déplacement par rapport à l'orientation de construction. La déformation résiduelle dans le réseau révèle le RS dans le matériau. La plus grande amplitude de RS compressive a été trouvée dans l'axe de construction.                              | [87]    |
|                                        | Alliage Al-5356                                  | La hauteur de la poutre peut avoir un impact à la fois sur le niveau et la configuration du RS longitudinal dans le substrat et dans la poutre. Cette variation affecte principalement la RS transversale dans le substrat et a une influence minime sur le faisceau lui-même.                             | [88]    |
|                                        | G 79 5 M21<br>Mn4Ni1.5CrMo (EN ISO 16834-A) [89] | La RS, la dureté et la microstructure sont influencées par les paramètres de soudage, la géométrie et la conception des composants. L'apport de chaleur entraîne une diminution de la traction RS, ce qui entraîne une structure de grain et une réponse mécanique défavorables.                           | [25]    |
|                                        | Acier inoxydable austénitique SS308L (SS)        | Accumulation de RS compressive attribuée à un apport de chaleur élevé et à des taux de refroidissement rapides. Des contraintes plus importantes se sont produites plus près de la base de soudage que dans d'autres zones.                                                                                | [26]    |
|                                        | Alliage Al-6Cu-Mn                                | L'avancement de RS indique que la zone la plus cruciale de l'échantillon se trouve à proximité du substrat, où dominent des contraintes de traction importantes proches de la limite d'élasticité du matériau.                                                                                             | [27]    |
|                                        | Année 91 (modifiée 9Cr–1Mo) -acier               | RS fait varier les caractéristiques du matériau et sa structure microscopique WAAMed ferritique/martensitique (FM). Le traitement thermique appliqué à l'acier initialement fabriqué n'a pas supprimé ses propriétés anisotropes.                                                                          | [80]    |
| CIVD                                   | Inconel 625                                      | Les processus thermiques de post-traitement peuvent améliorer la résistance à la corrosion et atténuer le RS. Les mesures ont indiqué que l'approche à gradient lisse produisait des phases secondaires comme la phase d (Ni3Nb) et des carbures, qui étaient absents dans la méthode d'interface directe. | [85,90] |
|                                        | Acier doux (AWS ER70S-6)                         | Le DIC a été utilisé pour superviser la distorsion en flexion des composants WAAM lors de leur libération des profilés en H serrés, et les tensions résiduelles ont été déduites de la répartition des contraintes observée pendant le processus de desserrage.                                            | [77,91] |
|                                        | Acier doux (G3Si1) et SS austénitique (SS304)    | Les RS sont sous compression dans la section en acier doux et sous tension dans la section en acier inoxydable austénitique (SS). Ces contraintes fluctuent dans l'épaisseur en raison des différences de vitesse de refroidissement sur les surfaces intérieures et extérieures.                          | [78]    |
| Forage de trous                        | Ti-6Al-4V                                        | La taille des grains a diminué après la thérapie par impact ultrasonique et le RS des pièces fabriquées en WAAM après post-UIT est amélioré.                                                                                                                                                               | [76,92] |
| Accouplement thermomécanique & Contour | Aciers inoxydables (SS) SUS308LSi                | RS est en traction dans les couches bordant la surface supérieure de la surface, en compression dans les couches proches de la surface du substrat et en traction près de la face inférieure du substrat.                                                                                                  | [13]    |

Les techniques de mesure RS répertoriées dans le tableau 1 peuvent généralement être classées en trois catégories : (1) non destructives ; (2) semi-destructif ; et (3) destructrices sont mentionnées dans le tableau 1 avec de brèves descriptions, alors que certaines techniques n'ont pas été utilisées dans les recherches antérieures. Les techniques non destructives (CND) telles que XRD et ND sont des méthodes courantes de haute précision et sont fréquemment préférées pour mesurer RS dans les composants WAAM. Le choix des méthodes dépend de principes fondamentaux tels que le matériau, la taille des composants, la géométrie et le niveau de précision requis pour la mesure.

Il est clair que parmi les techniques de mesure RS, la ND a été plus largement utilisée par les chercheurs en raison de sa nature non destructive, qui permet de maintenir la véracité des pièces, tandis que la diffraction des rayons X est la deuxième méthode utilisée. Le diagramme circulaire illustré à la figure 5 représente les hiérarchies des techniques utilisées pour mesurer RS dans les produits WAAM. La déformation élastique en RS est calculée à partir de la variation de l'espacement du réseau [23]. Dans ce cas, tout st

Appl. Mécanique, 2024, 5, POUR EXAMEN PAR LES PAIRS



Figure 5. Distribution des champs de recherche sous forme de diagramme circulaire, triée en fonction de la quantité de RS.

### 3.2.2 Analyse RS intégrée de RS dans les AAD

D'après l'analyse numérique de RS, il y a des modèles mathématiques souvent basés sur l'analyse par éléments finis (FEA) ou autres méthodes de calcul, et les mêmes procédures sont effectuées pour déterminer RS dans le processus WAAM pour simuler des processus thermiques et mécaniques se produisant pendant la fabrication additive. Ces modèles intègrent les propriétés des matériaux, les paramètres de processus [68] et les conditions aux limites pour simuler le dépôt, tandis que les paramètres de mentionnent la proportion la plus élevée et/ou la proportion la plus faible.

[68] et les conditions aux limites pour simuler le dépôt, tandis que les techniques de mesure de la chaleur transfèrent, ainsi que les processus de refroidissement ultérieurs. En résolvant les équations régissant le transfert de chaleur, ces simulateurs numériques prévoient l'évolution de RS au sein d'une pièce. De même, pour les transferts de masse, ces simulateurs numériques prévoient la déviation du RS en raison d'un déplacement affecté RS et la déformation dans les composants WAAM. [93] Le tableau 2 donne un aperçu de la déformation de RS dans les composants WAAM. [93] Le tableau 3 montre un aperçu de l'analyse numérique

matières premières et leurs résultats lorsqu'ils sont utilisés dans le processus WAAM.

Tableau 2. Aperçu de l'analyse numérique rapportée à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) des outils et des matériaux liés aux technologies

u de l'analyse numérique rapportée à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM), des outils et technologies WAAM.

| Matériau du |             | Logiciels FEM               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Résumé | Réf. |
|-------------|-------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|
|             |             | logiciel FEM                | Une évaluation thermomécanique de l'acier WAAM B91 a été réalisée (ER90S-séquentiellement pour évaluer la variation                                                                                                                                                                                                                                                             |        |      |
|             | ANY         | ANY                         | des contraintes résiduelles dans tout l'acier B91                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |        | [11] |
| ANY         | 2019        | Acier B91 (ER90S-B91 acier) | composant effectué séquentiellement pour évaluer la variation de la contrainte résiduelle                                                                                                                                                                                                                                                                                       |        | [11] |
|             |             | Simufact                    | Les changements dynamiques de température, l'altération, l'accumulation de contraintes et la déformation revêtent une importance significative pour les applications impliquant des températures élevées. Les changements dynamiques de température, l'altération, l'accumulation de contraintes, et la déformation revêtent une importance significative pour les applications |        | [40] |
| Additif     |             | Aciers                      | Le modèle de dépôt et de déplacement ont un impact sur le RS et le gauchissement des pièces WAAM. Les résultats des simulations thermomécaniques FE montrent que le modèle de dépôt et la vitesse de déplacement ont un impact sur RS et                                                                                                                                        |        |      |
| Additif     | 2023.2      | Aciers                      | Le modèle de dépôt et de déplacement ont un impact sur le RS et le gauchissement des pièces WAAM. Les résultats des simulations thermomécaniques FE montrent que le modèle de dépôt et la vitesse de déplacement ont un impact sur RS et                                                                                                                                        |        | [40] |
|             |             | Alliage d'aluminium         | Le modèle de dépôt et de déplacement ont un impact sur RS et le gauchissement des pièces WAAM. Les résultats des simulations thermomécaniques FE montrent que le modèle de dépôt et la vitesse de déplacement ont un impact sur RS et                                                                                                                                           |        | [94] |
| ABAQUS      |             | Alliage d'aluminium         | L'augmentation de la température et du gradient thermique dans le dépôt et le déplacement ont un impact sur RS et le gauchissement des pièces WAAM. Les résultats des simulations thermomécaniques FE montrent que le modèle de dépôt et la vitesse de déplacement ont un impact sur RS et                                                                                      |        | [94] |
|             | ABAQUS 2019 |                             | Utilisation d'un modèle 3D complet de transfert de chaleur transitoire pour calculer la distribution de température et le gradient dans le processus WAAM pour divers [95]                                                                                                                                                                                                      |        |      |
|             |             | Inconel 718                 | paramètres de processus, ce qui donne RS. Les données de température dérivées ont été utilisées dans un modèle mécanique pour prévoir la RS et la distorsion.                                                                                                                                                                                                                   |        |      |

Tableau 2. Suite

| Logiciels FEM      | Matériel                                                                      | Résumé                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Réf.  |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ABAQUS 2010        | Inconel 718                                                                   | Utilisation d'un modèle 3D complet de transfert de chaleur transitoire pour calculer la distribution de température et le gradient dans le processus WAAM pour divers paramètres de processus, ce qui aboutit à RS. Les données de température dérivées ont été utilisées dans un modèle mécanique pour prévoir la RS et la distorsion.                                                                                                                                                        | [95]  |
|                    | Acier Carbone                                                                 | Les résultats de la modélisation indiquent qu'à mesure que le nombre de couches déposées augmente, la température maximale augmente, ce qui entraîne une RS, tandis que la vitesse de refroidissement moyenne diminue.                                                                                                                                                                                                                                                                         | [96]  |
|                    | Acier inoxydable austénitique (304) et acier à faible teneur en carbone (A36) | En modifiant systématiquement une propriété mécanique à la fois, nous avons isolé l'influence de chacune sur la formation de RS dans des soudures différentes. Les résultats montrent que la contrainte résiduelle longitudinale dans les soudures identiques et différentes peut être diminuée dans la zone de soudure d'une quantité équivalente à la contrainte provoquée par la force de traction mécanique appliquée une fois que la force de tension est relâchée après refroidissement. | [97]  |
|                    | Acier API X65                                                                 | Les conditions thermiques et RS sont prévues avec précision pour permettre la régulation de la forme, de la microstructure et des caractéristiques mécaniques de la zone de fusion dans le joint de soudage à l'arc submergé.                                                                                                                                                                                                                                                                  | [98]  |
| ABAQUS 2019        | Acier de construction Fil ER70S-6                                             | Les contraintes résiduelles et la déformation de deux constructions étendues ont été examinées, révélant des résultats numériques très cohérents et une correspondance favorable avec les résultats expérimentaux.                                                                                                                                                                                                                                                                             | [99]  |
|                    | Acier EH36                                                                    | L'effet de la vitesse de balayage sur les profils thermiques et RS indique que des vitesses de balayage plus élevées entraînent des températures de pointe réduites et des vitesses de refroidissement accrues, conduisant ainsi à une augmentation de la part volumique de martensite dans le dépôt.                                                                                                                                                                                          | [100] |
|                    | Alliage d'aluminium                                                           | Le RS et la déformation ont été calculés à l'aide de la méthode des sources de chaleur mobiles (MHS) et de la méthode de la fonction de température segmentée (STF).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | [101] |
|                    | Ti-6Al-4V, acier S355JR et AA2319                                             | Les rayons de profil réduits du rouleau éliminent efficacement presque toutes les tractions RS à proximité des surfaces.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | [32]  |
| MSC. mars 2021     | Y309L                                                                         | Un RS élevé est généré dans les couches de dépôt et également au milieu du substrat.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | [102] |
| MSC. Mars 2014.2.0 | Mastic de soudage G3Si1                                                       | La simulation et la validation concernant les variations de géométrie et de microstructure au sein des passes de soudage ont été réalisées avec RS Reality et la simulation en utilisant la mesure de l'inertie des thermocouples.                                                                                                                                                                                                                                                             | [103] |
|                    | S316L                                                                         | Les variations de RS sont influencées à la fois par la distribution fluctuante de la température pendant la phase de congélation et par les forces appliquées à la structure WAAM après le processus de refroidissement.                                                                                                                                                                                                                                                                       | [104] |
| COMSOL-5.4 2018    | Acier inoxydable 304                                                          | Des images à grande échelle et des enregistrements à grande vitesse ont été utilisés pour le mur construit afin de vérifier l'exactitude des mesures du bain de fusion et la forme du dépôt déterminé, qui a déterminé le RS en partie.                                                                                                                                                                                                                                                        | [105] |

Drexler et coll. [106] ont abordé la modélisation numérique des RS et des distorsions se produisant dans les pièces WAAM avec dépôt par tissage. Les contraintes thermiques prévues numériquement sur diverses couches de soudage ont été représentées pour une évaluation expérimentale ultérieure menée dans [107]. De même, la simulation par éléments finis (EF), ainsi que l'analyse thermique, ont généré des chemins appropriés en segmentant un scan de surface 3D de la zone de réparation prévue [41]. Comme l'illustre le diagramme circulaire de la figure 6 (réf. également le tableau 2), la majeure partie de l'analyse numérique de RS a été étudiée à l'aide d'ABUQAS 2010 et 2019.

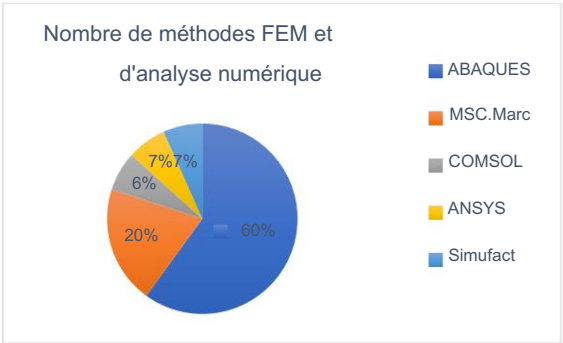


Figure 6. Quantité de publications pour RS FEM, processus WAAM et processus WAAM publiées avec certains matériaux.

3.4. Facteurs influençant RS dans WAAM

Les chercheurs et les ingénieurs peuvent caractériser et comprendre le comportement RS dans WAAM en utilisant des méthodes expérimentales et l'analyse par éléments finis pour finir (FEA) les composants WAAM en employant et les performances des produits. De nombreux paramètres, de la qualité des pièces et des performances des produits. Beaucoup de ceux qui peuvent influencer RS dans les pièces WAAM sont discutés dans [58], tandis qu'un profil qui inclut un comprend une évaluation de la hauteur globale, de la largeur et de la douceur de chacun générée et rapportée dans [108]. Paramètres de dépôt [109], apport thermique, température intercouche, la durée des pauses intercouches étaient des facteurs significatifs influençant la formation. La température et la durée des pauses entre les couches étaient des facteurs influençant la répartition des pores dans les alliages d'aluminium 5183 imprimés dans le pro-WAAM. De même, différentes vitesses de déplacement de soudage auxquelles les défauts deviennent visibles impliquent également la vitesse d'alimentation du fil et la vitesse de déplacement dans le processus de soudage [111]. En revanche, le substrat implique également à la fois la vitesse de dévidage du fil et la vitesse de déplacement dans le processus de soudage [111]. L'épaisseur du substrat (lit ou plaque de base) s'est avérée avoir une influence majeure sur la distribution RS. L'épaisseur du substrat (lit ou plaque de base) s'est avérée avoir une influence majeure sur la hauteur du dépôt distal RS. Du fait du substrat, traction RS aussi élevée que la valeur du matériau distribution le long de la hauteur du dépôt. En raison du substrat, une traction RS aussi élevée que la valeur de la limite d'élasticité a été discutée dans [112]. Les distributions RS dans les directions longitudinale et transversales indiquent que la contrainte longitudinale se déplace de manière significative. Les directions nable et transversale indiquent que la contrainte longitudinale se déplace de manière significative depuis le dépôt vers la tension dans la plaque de base [113].

De plus, un substrat plus épais induit un RS plus important qu'un substrat plus fin. Un substrat de fusion déposé (processus d'impression) peut être constitué d'un format 2xxx. qui est utilisé pour le bain fondu déposé (processus d'impression) peut être constitué d'une plaque d'alliage d'aluminium-aluminium 2 x x x pour la matière première en alliage d'aluminium [114, 115]. Dans l'impression 3D directe, la position de l'échantillon imprimé est importante pour la qualité des pièces imprimées [64]. La position de l'échantillon imprimé est importante pour la qualité des pièces imprimées [64]. C'est parce que l'expansion des isothermes ne parvient pas à atteindre le fond d'une plaque épaisse, ce qui entraîne une accumulation accrue de chaleur [116, 117]. La technique contrôlant les RS inhérents et les distorsions est confrontée à de nombreux défis dans les produits WAAM, conduisant à des résultats imprévisibles. Les solutions WAAM sont confrontées à de nombreux défis, conduisant à une intégrité structurelle imprévisible des pièces imprimées. Pour cette raison, certains ouvrages identifient que l'intégrité naturelle des pièces imprimées. Pour cette raison, certaines publications identifient que différents paramètres de processus tels que le débit de fil, la vitesse de déplacement, l'apport de chaleur, le chemin de dépôt, la longueur du trajet déposé, la longueur, la largeur et la profondeur (épaisseur) des composants imprimés ont des effets [46,55,118]. Le la largeur et la profondeur (épaisseur) des composants imprimés ont des effets [46,55,118]. Les principaux défauts induits dans les composants de fabrication métallique dus à ces paramètres dans le processus WAAM sont RS, déformation, porosité, fissures et la distorsion. Ainsi, les facteurs de défauts les plus courants des produits WAAM sont les paramètres du processus, paramètres qui limitent l'acceptation de cette technologie [119-123]. D'une autre manière, le non- dépouille et le bossage des défauts et les bosses sont les défauts courants trouvés dans les produits WAAM, tandis que les influences majeures de la hauteur, de la largeur et de la couche stable du dépôt produisent un apport de chaleur par influences majeures de la hauteur, de la largeur et de la couche stable du dépôt produisent un apport de chaleur

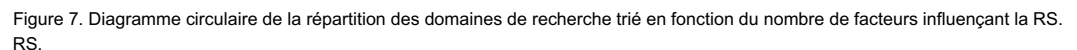
Les effets des conditions de traitement, tels que la température intercouche, la hauteur du dépôt et le substrat ont des effets sur le comportement RS. Les effets de la température intercouche, la hauteur du dépôt et l'épaisseur du substrat sur le comportement RS ont été étudiés dans la littérature [112, 124, 125]. La majorité des substrats ont révélé le RS non- RS, tandis que les billes de dépôt ont révélé des RS de déformation, tandis que les billes de dépôt ont révélé des RS de déformation, tandis que les billes de dépôt ont révélé des RS de déformation. Le processus WAAM présente des défis de fabrication, dont l'un est l'intégrité de distance absolue est intégré au de précision et de précision. Les paramètres de processus, tels que la température intercouche, la hauteur du dépôt, l'épaisseur du substrat, la longueur, la largeur et la profondeur (épaisseur) des composants imprimés ont des effets [46,55,118]. Les principaux défauts induits dans les composants de fabrication métallique dus à ces paramètres dans le processus WAAM sont RS, déformation, porosité, fissures et la distorsion. Ainsi, les facteurs de défauts les plus courants des produits WAAM sont les paramètres du processus, paramètres qui limitent l'acceptation de cette technologie [119-123]. D'une autre manière, le non- dépouille et le bossage des défauts et les bosses sont les défauts courants trouvés dans les produits WAAM, tandis que les influences majeures de la hauteur, de la largeur et de la couche stable du dépôt produisent un apport de chaleur par influences majeures de la hauteur, de la largeur et de la couche stable du dépôt produisent un apport de chaleur

tension, courant, vitesse de déplacement et hauteur de couche [128]. Ces paramètres régissent divers aspects du processus de dépôt, notamment l'apport de chaleur, la vitesse de refroidissement et les gradients thermiques. Comprendre comment les modifications de ces paramètres influencent RS est essentiel pour obtenir des performances optimales du produit WAAM [111]. La sélection des paramètres géométriques des billes dans le processus WAAM est nécessaire pour optimiser les matériaux en excès et minimiser le vide créé dans les multiples couches de dépôts de billes. Les paramètres de processus et d'autres facteurs influençant la RS dans les composants WAAM sont résumés et répertoriés dans le tableau 3.

Tableau 3. Facteurs influençant RS dans la fabrication additive à arc filaire.

| Paramètres de processus et<br>Autres facteurs                                                                                   | brève description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Réf.                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Propriétés des matériaux :<br>soudabilité des matériaux                                                                         | Tous les matériaux ne conviennent pas également au WAAM. Le procédé nécessite souvent des matériaux présentant de bonnes caractéristiques de soudabilité, telles qu'une faible susceptibilité à la fissuration et de bonnes propriétés de fusion. Par exemple, la conductivité thermique des matériaux, le coefficient de dilatation thermique et les transformations de phase peuvent avoir un impact sur la RS induite.                                                                                                     | [13,34,129,130]        |
| Puissance de dépôt : courant et<br>tension d'arc                                                                                | Dans le processus WAAM, le contrôle de l'apport de chaleur est essentiel pour éviter la surchauffe, la distorsion et les problèmes métallurgiques, tels qu'une croissance excessive des grains ou des transformations de phase. Les variations de l'apport de chaleur modifient les conséquences de RS sur la soudabilité des matériaux.                                                                                                                                                                                      | [25,65,66,114,130,131] |
| Vitesse : vitesse d'alimentation du<br>fil, vitesse de déplacement du<br>soudage et taux de dépôt                               | Un dépôt et un refroidissement rapides peuvent entraîner une augmentation du RS, en particulier à proximité de la zone de dépôt. La solidification rapide et le taux de dépôt plus élevé peuvent provoquer des gradients thermiques et des vitesses de refroidissement différentielles, entraînant des niveaux plus élevés de RS en traction. L'augmentation de la vitesse de déplacement du soudage réduit le temps que le matériau passe dans la zone à haute température et conduit à une diminution de l'amplitude de RS. | [113,132-134]          |
| Gaz de protection : types de gaz<br>de protection et débit de gaz de protection                                                 | Le gaz de protection joue un rôle crucial dans les processus WAAM car il protège le bain de fusion fondu de la contamination atmosphérique et influence les caractéristiques de transfert de chaleur pendant le dépôt. Le type de gaz de protection, les débits de gaz tels que l'argon et l'hélium et les gaz réactifs comme le CO2 et l'O2 peuvent avoir des effets significatifs sur la formation de RS dans les produits WAAM.                                                                                            | [3,37,135]             |
| Distance entre les buses : Distance entre la<br>pointe de la buse et la pièce de travail<br>(Distances de la torche de soudage) | La distance de la torche de soudage dans les processus WAAM peut avoir une influence significative sur RS dans les produits finaux. L'optimisation de la distance entre la pointe de la buse et la distance de travail dans les processus WAAM implique d'équilibrer l'apport de chaleur, les taux de refroidissement, le contrôle de la distorsion, la liaison intercouche et la formation de défauts pour minimiser le RS et garantir la production de pièces de haute qualité.                                             | [23,24]                |
| Position d'impression : angle de<br>l'électrode par rapport à la couche (fil)<br>(θ) et hauteur de la couche                    | La position d'impression affecte la dissipation et l'accumulation de chaleur, influençant ainsi la vitesse de refroidissement et les gradients thermiques à l'intérieur de la pièce. La position d'impression affecte l'écoulement du métal en fusion et la géométrie des billes déposées entraîne une variation de RS.                                                                                                                                                                                                       | [36,64,128,136,137]    |
| Épaisseur de couche : épaisseur du<br>substrat, épaisseur du dépôt                                                              | La diminution de l'épaisseur de la couche dans la fabrication WAAM peut conduire à des cycles thermiques plus courts et à une réduction de l'apport de chaleur par couche. Cela peut entraîner une RS globale inférieure en raison d'une moindre distorsion thermique et d'une taille réduite de la ZAT.                                                                                                                                                                                                                      | [124,138]              |
| Taux de refroidissement : dépôt de<br>temps de couche, temps de<br>séjour entre les couches                                     | Les cycles de chauffage et de refroidissement rapides impliqués dans le WAAM peuvent conduire au développement de RS et de distorsions importants dans les pièces fabriquées. Ceux-ci peuvent nuire à l'intégrité structurelle et à la précision dimensionnelle des composants, ce qui rend difficile l'obtention des propriétés de soudure souhaitées et, par conséquent, la modification du RS dans les pièces imprimées.                                                                                                   | [57-60 102 136]        |
| Substrat de préchauffage<br>(Plaque de base)                                                                                    | Le préchauffage du substrat dans les processus WAAM offre plusieurs avantages pour la gestion du RS dans les produits finaux. En réduisant les gradients thermiques, en atténuant la distorsion, en améliorant la liaison métallurgique, en améliorant la ductilité et en optimisant les taux de refroidissement, le préchauffage contribue à créer des pièces avec des niveaux de RS inférieurs et des propriétés mécaniques améliorées.                                                                                     | [96 137 138]           |
| Géométrie des pièces : formes des<br>pièces imprimées et volume des<br>pièces                                                   | La géométrie des pièces imprimées dans les processus WAAM influence considérablement RS. Comprendre comment la complexité de la forme, l'orientation des pièces, le volume et les modèles d'accumulation de matériaux affectent les gradients thermiques et les vitesses de refroidissement est crucial pour gérer RS et garantir la production de pièces de haute qualité avec les propriétés mécaniques et la précision dimensionnelle souhaitées dans WAAM.                                                                | [9,26]                 |
| Traitement thermique après soudage<br>(PWHT)                                                                                    | PWHT joue un rôle crucial dans la gestion des RS dans les produits WAAM. En soumettant les pièces à des cycles de chauffage et de refroidissement contrôlés, PWHT peut atténuer efficacement le RS, améliorer les propriétés des matériaux et améliorer la qualité globale et la mise en œuvre des pièces fabriquées.                                                                                                                                                                                                         | [1,4,60,112,139]       |
| Modèle de numérisation                                                                                                          | Le modèle de balayage joue un rôle crucial en influençant l'accumulation de chaleur, les vitesses de refroidissement lors du dépôt AM et, par conséquent, la formation de RS.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | [100]                  |
| Remplisseur de fil : remplisseur de fil<br>diamètres et qualité du fil                                                          | Le diamètre du fil d'apport et la qualité du fil sont deux facteurs clés qui peuvent influencer considérablement le RS dans les produits WAAM.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Non étudié             |

Appl. Mécanique. 2024, 5, POUR EXAMEN


$$\text{Apport de chaleur (J/mm)} = \frac{\text{Volts} \times \text{ampères} \times 60}{\text{Vitesse de déplacement (mm/min)}} = \quad \times A \quad (2)$$

où  $v$  est la vitesse de déplacement. Vora et coll. [147] ont étudié que la tension avait la plus grande influence sur la largeur des billes, suivie par la vitesse de déplacement et le rapport du mélange gazeux.

caractéristiques [143]. Sur la base de l'hypothèse de dissipation d'énergie et des équations associées, divers processus de fabrication additive utilisant des faisceaux d'énergie peuvent être comparés de manière plus approfondie lorsqu'ils sont soumis à un apport d'énergie égal. Cette comparaison sert de base à la détermination des paramètres initiaux du processus et à l'ajustement dynamique des principaux paramètres [146]. La quantité d'apport de chaleur générée dans l'arc de soudage par unité de longueur de la soudure est exprimée en kilo Joules par millimètre de longueur de la soudure (kJ/mm), comme indiqué dans l'équation (1).

$$\text{Énergie de l'arc (kJ/mm)} = \text{Volts} \times \text{Ampères} = V \times I \quad (1)$$

où V est en volts et I est en ampère (A). La quantité d'apport de chaleur générée dans l'arc de soudage par unité de longueur du processus de soudage est représentée dans l'équation (2), et de différentes manières selon la norme ASME IX QW-409.1 de l'American Society of Mechanical Engineers [132].

$$\text{Apport de chaleur (J/mm)} = \frac{\text{Volts} \times \text{ampères} \times 60}{\text{Vitesse de déplacement (mm/min)}} = \frac{V \times A}{v} \quad (2)$$

où v est la vitesse de déplacement. Vora et coll. [147] ont étudié que la tension avait la plus grande influence sur la largeur des billes, suivie par la vitesse de déplacement et le rapport du mélange gazeux.

La couche déposée pendant le processus de fabrication pour la formation des perles est supposée être semi-circulaire. Le taux de dépôt, R, qui dépend du diamètre du fil, de la vitesse d'alimentation du fil et de la densité du fil, est exprimé par l'équation (3).

$$R = \frac{\pi d^2 v_p}{4} = \rho v A_{ww} \quad (3)$$

où d est le diamètre du fil, v est la vitesse de dévidage du fil (WFS) et  $\rho$  est la densité du fil et la section transversale du fil de soudage  $A_{ww}$ .

#### 4. Impact de RS sur les propriétés mécaniques des composants WAAM Bien que

WAAM ait démontré sa capacité à produire des composants de moyenne à grande taille à partir d'aluminium pour l'automobile et les industries connexes, il ne peut pas encore servir de méthode de production complète en raison de défis pratiques. telles que des propriétés mécaniques inégales et un RS significatif [148]. RS affecte de manière significative les matériaux et les caractéristiques mécaniques du composant fabriqué. Par exemple, cela peut affecter les propriétés mécaniques, telles que la résistance, la dureté et la ductilité des produits, en les rendant différentes des propriétés intrinsèques du matériau. Un apport de chaleur élevé dans le processus WAAM entraîne une réduction des contraintes de traction au sein du composant et peut conduire à des propriétés mécaniques et à une microstructure indésirables [149, 150].

Les caractéristiques microstructurales ont un impact sur les propriétés des matériaux des produits fabriqués WAAM, y compris les niveaux de contraintes résiduelles. La microstructure des produits WAAM joue un rôle essentiel dans le développement et la distribution du RS, qui affecte les nombreuses propriétés mécaniques interdépendantes. En raison de l'existence de RS dans les produits WAAM provoquée par l'augmentation de la vitesse de soudage ou du paramètre de répartition de la chaleur, les propriétés des matériaux peuvent varier considérablement [103, 151]. La microstructure résultante et le niveau RS dans WAAM sont directement corrélés aux propriétés mécaniques ultimes. Les recherches sur la porosité interne des billes formées et sa capacité à produire des composants à grande échelle démontrent des propriétés de traction et de fatigue insuffisantes [152]. Cette porosité est le résultat de la RS en affectant le processus de solidification et la capacité du gaz à s'échapper pendant le dépôt [153, 154]. De même, RS peut influencer diverses propriétés mécaniques des pièces fabriquées de plusieurs manières en modifiant la résistance, la ténacité, la microstructure, la résistance à la fatigue, la fissuration et le délaminage des produits WAAM [152, 155].

Les RS formés au cours du processus de fabrication ont un impact marqué sur les performances mécaniques et peuvent entraîner un détachement des structures de support, une déformation de forme indésirable et une initiation prématurée de fissures [76]. Les paramètres d'entrée, la microstructure résultante, les traitements post-fabrication et RS ont des impacts significatifs sur le résultat mécanique final.

5,5. imaire, peut influencer diverses propriétés des pièces de fabrication de plusieurs manières en modifiant la résistance, la ténacité, la microstructure, la durée de vie en fatigue, la fissuration et le délaminage des produits WAAM [152, 155].

Les RS formés au cours du processus de fabrication ont un impact marqué sur les performances mécaniques et peuvent entraîner un détachement des structures de support, une déformation de forme434 indésirable et une initiation prématurée de fissures [76]. Les paramètres d'entrée, la microstructure résultante, les traitements post-fabrication et le RS ont des impacts significatifs sur les caractéristiques mécaniques des produits WAAM [156, 157]. La précision de fabrication des pièces fabriquées par WAAM n'est pas seulement influencée par la précision du positionnement de la torche, mais également par la stabilité du processus de formage [158].

La figure 8 illustre les défis et les RS inhérents aux pièces WAAM. Les pièces sont chauffées et sont des phénomènes dus à la haute technologie de la fabrication lors du processus de fabrication. Pour obtenir une bonne structure de grain dans chaque couche, une grande profondeur de construction profonde de minimale de pénétration de la déformation plastique doit dépasser la somme de la profondeur de refusion et de la hauteur du nouveau matériau. Pour éviter la formation de la déformation plastique, la profondeur minimale de déformation plastique doit dépasser la profondeur combinée de refusion et la hauteur de la couche nouvellement déposée [32].

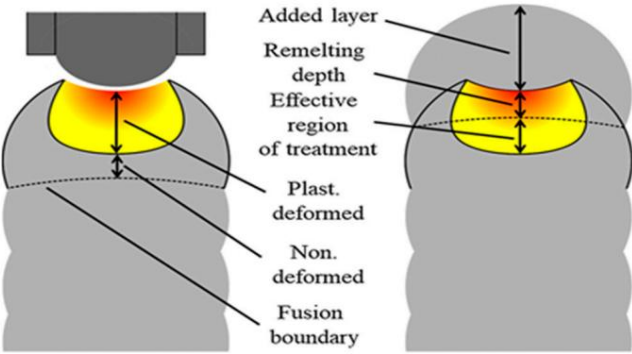


Figure 8. Schéma illustrant le phénomène de refusion se produisant lors du processus de dépôt [32]. Copyright 2019, conformément à la licence CC BY, accès libre.

Les expériences pour l'étude de RS ont été menées sur les systèmes basés WAAM utilisant un procédé en billes simple et utilisant des composants et des outils les paramètres de stockage et de courant de soudage variables. La dépendance de la formation de billes sur le nombre de courts circuits par unité de longueur est expliquée dans [49]. Même si la technologie WAAM est économe en énergie La méthode de fabrication pour la production de métal, les accumulations de chaleur pendant le dépôt, les résultats métallurgiques et les propriétés mécaniques associées peuvent modifier les profils RS à travers le coupe transversale des composants fabriqués [11, 13, 159]. L'impact de l'orientation de la construction et programme de traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques des parois minces Les composants ont été examinés dans [160]. Les distributions de RS au sein du composant le long les chemins de dépôt, tant internes qu'externes, sont égaux à zéro [161, 162].

Globalement, la compréhension et la maîtrise de RS sont essentielles pour garantir le bon fonctionnement mécanique. fiabilité, précision dimensionnelle et performances fonctionnelles des produits WAAM dans divers applications. De nombreux efforts de recherche se sont concentrés sur la caractérisation de la RS, le développement de méthodes prédictives modèles et la mise en œuvre de techniques de fabrication avancées, qui sont essentielles pour faire progresser le domaine du WAAM et libérer tout son potentiel dans les applications industrielles [100]. Comprendre la répartition de l'apport de chaleur et ses implications, y compris les phénomènes transitoires répartition de la température, transformation des matériaux, accumulation de contraintes et distorsion, revêt une importance significative pour les applications impliquant des aciers à haute résistance. La simulation numérique peut offrir des informations précieuses pour évaluer ces facteurs [40]. Le RS et la déformation impactent significativement les performances des composants [97]. En raison de cycles répétitifs, RS se confine à l'intérieur des composants, provoquant toute une série de défauts tels que des fissures, déformations, gauchissements et durée de vie réduite des composants [163].

5. Stratégies d'atténuation pour RS dans WAAM et applications pratiques

La génération de RS et la distorsion de certaines parties empêchent son large adoption en raison de la historiques complexes d'accumulation thermique caractéristiques des composants WAAM [164]. Cependant, les stratégies d'atténuation du RS dans divers processus de fabrication dans WAAM impliquent plusieurs techniques pour réduire ou gérer le RS qui peuvent avoir un impact sur la fiabilité et la fonctionnalité de composants fabriqués. Un procédé hybride de WAAM et de laminage haute pression capable de la construction de composants à grande échelle produit de faibles RS et distorsions préjudiciables [165, 166]. Dans le de la même manière, les méthodes numériques peuvent offrir une compréhension supplémentaire de la façon dont le roulage peut être

efficacement utilisé pour diminuer RS et générer les déformations plastiques nécessaires pour améliorer propriétés microstructurales [32]. Combiner le processus WAAM avec d'autres fabrications Les processus, y compris les techniques d'usinage ou soustractives, peuvent aider à éliminer les excès matériel. Cette fabrication hybride est utilisée dans l'industrie des dispositifs médicaux pour produire pièces WAAM à faible contrainte avec des géométries complexes ou ajouter des fonctionnalités complémentaires pour réduire RS [167].

Le contrôle de RS est vital pour garantir la durabilité et la fiabilité de ces composants critiques [ 130]. Une compilation de différentes méthodes pour atténuer le RS et la distorsion dans WAAM a été assemblée pour offrir un modèle pour les progrès futurs [168]. Fini la simulation élément-processus offre une méthode efficace pour explorer des stratégies permettant d'atténuer ces distorsions et RS [169]. Certaines méthodes fournissaient des techniques pour gérer le RS, améliorer les propriétés mécaniques et éliminer les défauts comme la porosité [10, 170]. Quelques mesures d'atténuation courantes les stratégies et les applications pratiques sont répertoriées et expliquées avec des applications pratiques dans Tableau 4.

Tableau 4. Stratégies d'atténuation pour la RS et applications pratiques.

| Méthodes                                       | Matériel et Stratégies           | Applications pratiques et résultats                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Réf.           |
|------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Passe inter roulante                           | Alliage Ti-6Al-4V                | Améliore la liaison et l'adhésion entre les couches successives de matériel. Il permet également de redistribuer les contraintes en appliquant une force de compression, conduisant à des structures de grains raffinées et minimisant les résultats de distorsion dans RS.                                                                                     | [24,75,76,171] |
| Traitement thermique (HT)                      | Acier de nuance 91, Ti-6Al-4V    | Le post-traitement HT implique des cycles de chauffage et de refroidissement contrôlés pour soulager RS. Le HT est largement utilisé dans le secteur aérospatial pour réduire le RS dans WAAM pour produire des aubes de turbine, améliorant ainsi la durée de vie et les performances.                                                                         | [82 139 172]   |
| Grenaillage                                    | Alliage d'aluminium 2319         | Le grenaillage consiste à soumettre la surface d'un composant à un bombardement avec de petites particules à grande vitesse pour induire des contraintes de compression qui contrecarrer la traction RS. Il est utilisé dans le secteur automobile pour améliorer la résistance à la fatigue des composants de suspension produits par WAAM.                    | [173,174]      |
| Roulage et laser grenaillage par choc          | Acier à faible teneur en carbone | Les méthodes éliminent les tractions nuisibles RS au sommet du mur WAAM, améliorant ainsi la durée de vie en fatigue et ralentissant les taux de croissance des fissures. Le la région inférieure du mur WAAM démontre des conditions RS améliorées, conduisant à des performances de fatigue améliorées, le tout obtenu sans surface traitement par roulement. | [175]          |
| Roulant                                        | AA2319, acier S335JR             | Des charges de roulement accrues entraînent une déformation plastique équivalente maximale élevée et une pénétration plus profonde de la déformation plastique équivalente donne lieu à RS.                                                                                                                                                                     | [32]           |
| Paramètre optimisation                         | Alliage Al-Cu4.3-Mg1.5           | Ajustement des paramètres du processus WAAM, tels que la vitesse de dépôt et la couche épaisseur, peut optimiser les conditions de construction pour diminuer RS. Systématique l'optimisation des paramètres est appliquée dans l'industrie de la construction pour réduire RS dans des structures métalliques imprimées WAAM à grande échelle.                 | [36]           |
| Sélection des matériaux                        | alliages d'aluminium             | Choisir des matériaux aux propriétés adaptées, telles qu'une faible dilatation thermique coefficients, peuvent minimiser la formation de RS pendant WAAM. Spécialisé les matériaux sont utilisés dans le secteur de l'énergie pour créer un WAAM haute performance composants avec RS réduit.                                                                   | [176,177]      |
| Surveillance en cours de processus et contrôle | Superalliage IN718               | Les systèmes de surveillance et de contrôle en temps réel ajustent les paramètres du processus pendant WAAM pour minimiser la formation de RS. La surveillance et le contrôle en cours de processus sont utilisés dans la fabrication aérospatiale pour réduire les variations RS dans les conditions critiques composants du moteur.                           | [178]          |
| Laminage à chaud et formage à froid            | Fil de soudage ER70S-6           | L'incorporation de raidisseurs WAAM aux extrémités des brides des tôles laminées à chaud Il est démontré que les sections en l aboutissent à la création de RS de traction favorables, qui sont bénéfiques pour la stabilité structurelle, atteignant des valeurs maximales équivalent à la limite d'élasticité du matériau.                                    | [179]          |
| Grenaillage et UIT                             | Alliage Ti et alliage Al         | Grâce au traitement par impact ultrasonique (UIT), au raffinement du grain et au la randomisation de l'orientation est réalisée, contribuant ainsi à la amélioration du RS et de la résistance mécanique.                                                                                                                                                       | [180]          |
| Roulant                                        | Alliages de titane               | Offrent également des avantages substantiels tels que la diminution du RS et de la distorsion comme affinage de la structure du grain.                                                                                                                                                                                                                          | [181]          |

Dans cette étude, nous explorons comment divers facteurs tels que les paramètres du processus, le substrat le chauffage et le refroidissement influencent l'apparence des perles formées pendant le WAAM de l'Inconel 625 sur

8. Une approche a été développée pour analyser la forme du mur construit, en se concentrant sur l'acier EN 8. De plus, l'historique de température du bain de fusion pendant le dépôt sur sa symétrie inhérente pour garantir une utilisation efficace des matériaux. De plus, il utilise un pyromètre infrarouge (IR) pour examiner comment ces facteurs affectent les techniques de thermographie pour contrôler la symétrie du bassin de fusion [18]. Ce taux de refroidissement volumique, qui a son tour a un impact sur la géométrie des billes [137, 182]. Pour la morphologie la géométrie de dépôt  $V$  ( $m^3$ ) se déduit facilement du trajet (plus précisément l' aspect des billes, il est essentiel de respecter le volume de matière apportée et la taille la longueur du parcours de soudage  $l_{scan}$  ( $m$ ), la vitesse du fil  $v_w$  ( $m \cdot s^{-1}$ ), le diamètre de la pièce [183]. Les graphiques de la figure 9 illustrent la répartition des travaux publiés sur le fil  $d_w$  ( $m$ ) et la vitesse de soudage  $v_t$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) [26, 142] tels qu'exprimés dans l'équation (4), approches utilisées pour atténuer le stress résiduel et indiquer la fréquence de leur adoption dans les applications WAAM. Ces graphiques présentent différentes méthodes d'atténuation du RS dans le Processus WAAM par rapport au nombre de méthodes utilisées publiées dans les articles. (4)

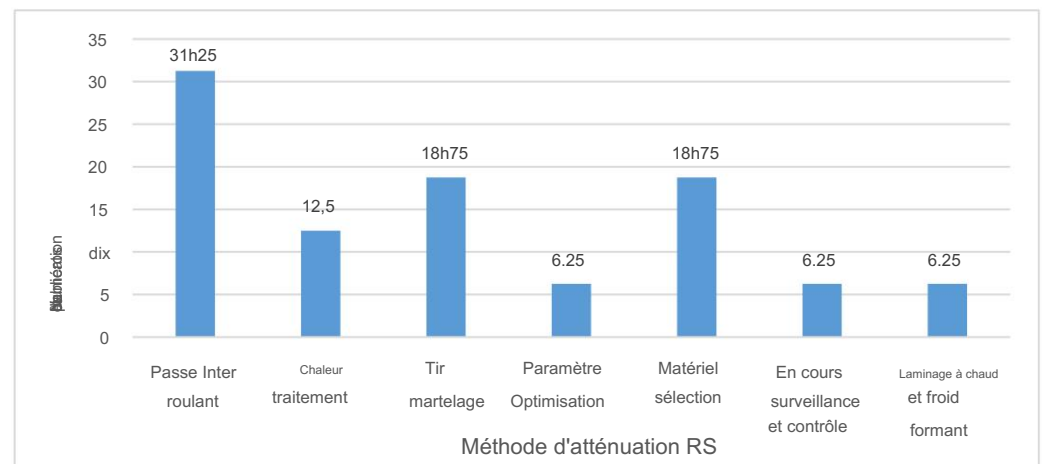


Figure 9. Méthode d'attribution de RS RS rapportée à la publication en pourcentage.

[illegible]

$$= \frac{2}{3} \quad (7)$$

Le débit volumique est exprimé dans l'équation (8),

$$= \quad \times \quad (8)$$

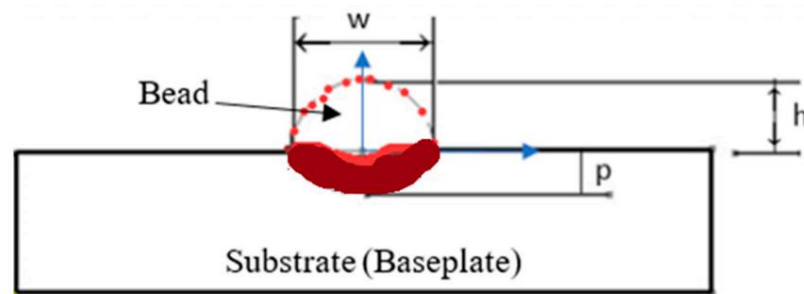


Figure 10. Formation de perles du profil parabolique lors du processus WAAM.

La représentation géométrique de différentes billes ou perles est combinée à l'algorithme détermine les conditions de traitement requises pour que les deux matériaux obtiennent une homogénéité hauteurs de couche de perles [188]. Un segment géométriquement défectueux d'une perle, ou un défaut géométrique, est un défaut entraînant des vides dans la pièce imprimée finale en raison d'une fusion incomplète (9) entre deux segments de perles superposés de forme irrégulière [189]. Il est préférable d'écrire ou  $dw$  est le diamètre du fil et la vitesse du fil. Equations d'équation (8) et la même parabole en termes de paramètres de processus  $vw$ , vitesse d'alimentation du fil et  $vt$ -torche (9), la largeur  $w$  du cordon est déterminée à partir de l'équation (10). La configuration géométrique du cordon de soudure créé via WAAM diffère de celui des méthodes de soudage conventionnelles [490,191]. Le profil des billes sur le substrat peut être considérée comme une forme de parabole symétrique, qui est prévue sur la figure 10 et présentée dans l'équation (5). À partir de l'équation (10), le remplacement de  $w$  dans l'équation (6) donnera l'équation (11).

$$y = a + cx^2 \quad (5)$$

Pour résoudre  $a$  et  $c$  dans l'équation (5), l'épaisseur (hauteur) et la largeur des perles sont substitués dans l'équation de la parabole pour trouver les constantes  $a$  et  $c$ . Les points de retournement, pour les différents diamètres de fil, les perles formées varient en épaisseur et en largeur. Cependant, si l'on se réfère à l'équation (6), on ne peut pas déterminer les paramètres de soudage car le résultat de  $c < 0$ , comme illustré sur la figure 10, et le profil du cordon exprimé sous la forme  $y$  compris l'angle de la torche, la vitesse de déplacement du fil, le débit d'alimentation en charge et les conditions de refroidissement [192]. Car l'équation parabolique peut être résolue comme l'équation (6). Une épaisseur de couche ( $h$ ), une largeur de cordon ( $w$ ) et une vitesse de torche ( $v$ ) particulières, le débit volumétrique ( $Q$ ) requis pour un remplissage complet est fourni par l'équation (12).

$$une = h; c = - \frac{4h}{w^2} \quad (12)$$

Définir la paramétrique optimale dans le processus WAAM serait avantageux pour  $y = h - \frac{2hx^2}{w}$  le dépôt progressif de cordons de soudure couche par couche dans la fabrication additive des composants [193,194].

Koli et coll. [128] ont étudié les produits WAAM constitués de fil de SS308L d'un diamètre de 1,2 mm. L'aire d'une perle (aire de la perle parabolique) par rapport à sa paramétrique géométrique est utilisée pour fabriquer les échantillons. Les paramètres, tels que la vitesse de soudage, le courant d'arc, obtenus à partir de l'équation (7).

$$UNE = \frac{2 \text{ heures}}{3} \quad (7)$$

Le débit volumique est exprimé dans l'équation (8),

$$Q = \frac{2}{3} hw \times vt \quad (8)$$

Pour le fil, lorsque le bain de fusion s'écoule, le débit volumique est fourni par l'équation (9).

$$Q = \frac{\pi}{4} d_w^2 \times vw \quad (9)$$

où  $dw$  est le diamètre du fil et  $vw$  est la vitesse du fil. Équation des équations (8) et (9), la largeur  $w$  du cordon est déterminée à partir de l'équation (10).

$$w = \frac{3\pi d_w^2 vw}{8hvt} \quad (dix)$$

À partir de l'équation (10), le remplacement de  $w$  dans l'équation (6) donnera l'équation (11).

$$y = h \left( 1 - \frac{16hvt_x^2}{3\pi vwd^2 z_w} \right) \quad (11)$$

Pour les différents diamètres de fil, les perles formées varient en épaisseur et en largeur. Cependant, la forme du cordon déposé est fortement influencée par de nombreux paramètres de soudage, notamment l'angle de la torche, la vitesse de déplacement du fil, la vitesse d'alimentation en charge et les conditions de refroidissement [192]. Pour une épaisseur de couche ( $h$ ), une largeur de cordon ( $w$ ) et une vitesse de torche ( $vt$ ) particulières, le débit volumétrique ( $Q$ ) requis pour un remplissage complet est fourni par l'équation (12).

$$Q = vtw h \quad (12)$$

Définir les paramètres optimaux dans le processus WAAM serait avantageux pour le dépôt progressif de cordons de soudure couche par couche dans la fabrication additive des composants [193, 194]. Koli et coll. [128] ont étudié les produits WAAM constitués de fil de SS308L d'un diamètre de 1,2 mm utilisé pour fabriquer les échantillons. Les paramètres, tels que la vitesse de soudage, le courant d'arc et le débit du gaz de protection, ont été les plus influents pour affecter les multiples réponses des produits WAAM.

Les applications pratiques des composants imprimés par les procédés WAAM sont principalement applicables dans les industries de l'automobile [155], de l'aérospatiale [195], navale et de la défense [196,197], qui utilisent des matériaux comme l'aluminium en raison de leur haute qualité et de leur résistance avec moins de masse. Généralement, le WAAM est très demandé dans des secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale, les usines chimiques, le maritime, le nucléaire, la construction navale et l'énergie, où il est utilisé pour fabriquer des composants tels que des pièces d'avion, des châssis automobiles et des hélices marines [8,65, 88 148 151 198-204]. Le procédé WAAM dans ces industries utilisait largement des séries d'alliages d'aluminium telles que 2xxx (Al-Cu), 4xxx (Al-Si) et 5xxx (Al-Mg) [199,205,206]. Les composants aérospatiaux produits dans le processus WAAM, tels que les aubes de turbine, les profils aérodynamiques et les éléments structurels, doivent être soigneusement contrôlés dans le RS pour éviter une défaillance prématurée et maintenir des normes de performance élevées [86,129,207,208]. WAAM est également utilisé pour produire des pièces de moteur telles que des culasses et des pistons [129].

## 6. Discussion

Outre la mesure de RS mentionnée précédemment, certains défauts liés au soudage peuvent potentiellement survenir dans les composants WAAMed. Ces mesures incluent de nombreux facteurs qui influencent les amplitudes du RS WAAM, qui sont décrits dans le tableau 1 avec plusieurs références. Les inclusions consistent principalement en trois classifications de méthodes de mesure RS, qui sont discutées à la section 3.4. Parmi ces trois techniques, les techniques de mesure non destructives sont les plus applicables. Cependant, dans de grands échantillons, la déformation de certains composants peut être difficile à déterminer ou ne peut pas être identifiée avec précision en raison de variations de RS différentes dans la pénétration de la lumière du faisceau de profondeur à travers les composants [209]. Des recherches supplémentaires sont néanmoins nécessaires pour examiner en profondeur les RS présents dans les produits WAAM, résultant de différents paramètres de processus. Les processus de traitement thermique post-fabrication peuvent avoir un impact significatif sur l'élimination des défauts. Bien que de nombreux défauts aient pu être éliminés dans les produits WAAMed, le RS n'a été minimisé dans la mesure du possible que grâce au traitement thermique [137] et à d'autres processus mentionnés dans le tableau 4.

La qualité des composants métalliques fabriqués en WAAM dépend sérieusement de paramètres clés tels que la vitesse de déplacement, l'apport de chaleur, la vitesse de dévidage du fil, la direction de dépôt, les propriétés des matériaux, etc., et d'autres sont mentionnés dans le tableau 1. Bien qu'un apport de chaleur élevé soit nécessaire pour atteindre un taux de dépôt rapide dans le WAAM, cela présente également des défis tels que le RS et les distorsions. Par conséquent, la gestion de l'apport de chaleur devient cruciale, en particulier lors de la fabrication de gros composants métalliques à l'aide du WAAM, car elle a un impact direct sur le taux de dépôt et l'intégrité structurelle [1,47].

### 6.1. Défis et limites

Comme toute technique de fabrication, WAAM présente son propre ensemble de défis et de limites dans la mesure et le contrôle du RS. Il peut être utilisé pour fabriquer des géométries complexes, ce qui rend difficile la prévision et la mesure précise de la RS, en particulier dans les structures complexes. Les produits WAAM présentent souvent des microstructures et des propriétés matérielles hétérogènes en raison de la solidification rapide et des cycles thermiques rencontrés lors du dépôt. Les variations telles que la composition du matériau, la structure des grains et les transformations de phase peuvent influencer l'ampleur et la distribution de RS, compliquant ainsi la mesure et l'interprétation. La mesure du RS dans les produits WAAM pose plusieurs défis en raison des caractéristiques uniques du processus de fabrication et des propriétés des matériaux qui en résultent. Par exemple, les techniques de contrôle non destructif telles que les tests par ultrasons ou la diffraction des rayons X sont prometteuses pour mesurer le RS dans les produits WAAM ; L'adaptation de ces techniques aux caractéristiques uniques des matériaux et géométries de fabrication additive présente des défis techniques. Le défi commun lors du test est la capacité des dimensions de profondeur de pénétration du faisceau lumineux à travers les produits imprimés. Le WAAM implique le dépôt successif de couches de matériau, ce qui peut entraîner des distributions RS anisotropes. Mesurer et caractériser avec précision ces modèles de contraintes complexes nécessite des techniques avancées capables d'analyser les variations de contraintes dans différentes directions et profondeurs au sein du matériau [210].

Les propriétés et le comportement des différents matériaux peuvent varier considérablement de différentes manières, ce qui rend difficile l'établissement d'une approche universelle pour la mesure et le contrôle RS. La gestion des RS est un aspect critique dans le WAAM pour garantir la qualité et les performances des composants fabriqués. Il existait des normes industrielles limitées pour mesurer et contrôler la RS dans le WAAM. L'absence de procédures standardisées peut entraver l'adoption de cette technologie dans des applications critiques. De nombreuses enquêtes ne peuvent pas fournir une ampleur spécifique de RS. Ils indiquent plutôt des résultats numériques et montrent le caractère tout au long des opérations de fabrication du WAAM par modélisation.

La quantification de ce RS n'est pas assignée à tous les paramètres de procédé et de soudage. Par exemple, il n'est pas attribué à partir des paramètres d'entrée tels que le diamètre du fil, les directions de soudage, la longueur, la largeur, l'épaisseur et le volume des produits, il y a une comparaison des composants imprimés. De même, il n'est pas attribué à partir de paramètres liés au soudage, tels que la vitesse de soudage, le gaz de soudage, le débit de gaz, les volts, les courants de crête et le gaz de protection [1,4]. Les techniques utilisées dans les enquêtes antérieures pour mesurer la RS dans les produits WAAM sont déjà répertoriées dans le tableau 2.

Dans l'autre cas, le gaz de protection, les types de gaz de protection et le débit du gaz de protection affectent la distribution et la quantité de RS dans les produits WAAM. De même, les types de gaz de protection, avec leur débit, tels que l'argon et l'hélium, et les gaz réactifs comme le dioxyde de carbone et l'oxygène, peuvent avoir un impact significatif sur la formation de RS dans les produits WAAM [3,138,149]. Cependant, les chercheurs n'ont pas identifié la quantité optimale de gaz de protection ni les types de gaz de protection avec d'autres processus et paramètres d'entrée au cours du processus WAAM. De plus, plusieurs raisons qui font de RS un WAAM sont le chauffage et le refroidissement rapides, le dépôt multicouche, les paramètres de processus, les transformations de phase des matériaux et la géométrie des pièces.

L'analyse de la littérature, en général, indique qu'une recherche et une amélioration continues dans ces domaines sont essentielles pour faire progresser la compréhension et le contrôle de RS dans les applications des produits WAAM.

### 6.2. Directions futures

Les défis et les limites du contrôle de RS dans les produits WAAM sont abordés dans la section 6.1. Sur la base des mesures, des atténuations et des limites trouvées dans les recherches antérieures, qui peuvent être mentionnées et recommandées, d'autres études dans les recherches futures pourraient se concentrer sur l'optimisation des paramètres du processus WAAM. En élucidant la relation complexe entre les paramètres de processus dans WAAM et RS, cette revue contribue et conduit à l'optimisation du processus de paramètres, en utilisant les techniques de mesure RS et

assurance de la fiabilité du produit [69]. De même, certaines des méthodes de mesure RS, qui n'ont pas été utilisées dans les produits WAAM lors de recherches antérieures, sont :

- (1) Méthodes non destructives

(2) Méthodes semi-destructives

(3) Méthodes destructrices
- Ondes ultrasoniques

■ Barkhausen magnétique

■ Noyau d'anneau

■ Méthode des trous profonds

■ Courbure du pont

■ Techniques de coupe

■ Conformité aux fentes ou aux fissures

D'une autre manière, le diamètre du fil d'apport affecte directement la vitesse de dépôt et la chaleur générée dans WAAM. Des diamètres de fil plus grands entraînent généralement des taux de dépôt plus élevés, mais conduisent également à un taux d'apport thermique accru par unité de longueur. Cet apport thermique accru peut influencer les gradients de refroidissement et les gradients d'apport thermique au sein du matériau déposé, affectant ainsi la propagation et l'étendue du RS. L'influence du diamètre du fil sur le dépôt en bain fondu pour former des billes est décrite dans la section 6 à l'aide de formules pour présenter les relations entre la hauteur et la largeur tout au long du processus WAAM. En raison de l'impact significatif de la taille des fils, la taille optimale des diamètres de fil sur le RS dans les produits WAAM n'a pas été identifiée lors d'enquêtes antérieures. De plus, parmi les catégories de mesure RS, les techniques appropriées et les limitations liées à la géométrie des billes formées ne sont pas étudiées.

- Étant donné que les recherches antérieures ne couvrent pas la dépendance aux matériaux, les modifications méthodologiques, le domaine d'application et les questions de recherche connexes du WAAM dans la littérature existante, il existe de nombreuses opportunités pour les recherches à venir d'explorer diverses possibilités, notamment :
1. La plupart des chercheurs ont fréquemment utilisé des matériaux non utilisés. -des méthodes destructives telles que XRd, ND et quelques autres techniques semi-destructives et entièrement destructives de mesure de RS dans le WAAM des composants. Ainsi, les études futures pourront mettre en œuvre les techniques énumérées ci-dessus.

2. À l'avenir, les chercheurs devraient déterminer la quantité et les variétés de gaz de protection les plus appropriées, en plus d'autres paramètres de processus et d'entrée, tout au long des processus WAAM.

3. Comme expliqué dans la section 5, la formule mathématique fournit une formation particulière du profil des perles et la relation entre le diamètre du fil et la largeur et l'épaisseur (hauteur) des perles. En conséquence, le diamètre du fil, l'épaisseur et la largeur des perles peuvent varier. Par conséquent, la répartition de la chaleur du procédé entraîne une variation de RS dans les pièces WAAM. Par conséquent, les recherches futures pourront se concentrer sur une variété de diamètres de fil afin de réduire le RS dans les pièces WAAM comportant un diamètre de fil inférieur.

4. La capacité de soudage des matériaux dépend de leurs propriétés physiques qui influencent l'accumulation de RS dans les produits WAAM. À l'avenir, d'autres efforts de recherche devraient viser à étudier ces propriétés physiques des matériaux, répertoriées dans le tableau 3, ainsi que d'autres effets ajustables par robot sur les composants fabriqués par RS via WAAM.

7. Conclusions

En conclusion, cette revue de la littérature a approfondi les recherches approfondies entourant l'étude et la mesure du RS dans les produits WAAM, avec un accent particulier sur l'influence des paramètres de fabrication. L'importance de RS dans la détermination des caractéristiques matérielles et de l'intégrité structurelle des composants WAAM a été soulignée tout au long des travaux d'examen. De plus, l'étude a fourni un résumé exhaustif des principales conclusions, méthodes de mesure, problèmes et orientations futures dans le domaine dynamique WAAM.

L'examen met en évidence le rôle essentiel de RS dans la définition de la constance dimensionnelle des produits WAAM, en soulignant la nécessité d'une mesure et d'un contrôle précis pour une utilisation efficace. Synthétisant diverses études, techniques et méthodologies de recherche, le travail de revue a offert une compréhension précieuse de l'état actuel de la recherche dans ce domaine. De plus, cette revue sert de guide aux futurs chercheurs pour utiliser les autres techniques de mesure RS, celles qui n'ont pas encore été réalisées, et comparer les techniques précédentes utilisées dans la littérature. En particulier, l'examen a indiqué qu'aucun

des travaux ont été rapportés sur l'impact du RS dans les pièces fabriquées en WAAM sur les résistances à la fatigue et au fluage, que nous aimerions aborder dans nos travaux continus dans ce domaine.

Pour mesurer les produits RS WAAMed, des méthodes expérimentales, y compris des techniques semi-destructives (uniquement forage de trous), destructives (méthode de contour) et non destructives (telles que la cristallographie neutronique et la diffraction des rayons X, la corrélation d'images numériques et les rayons X synchrotron diffraction) ont été rapportés.

Dans l'ensemble, cette revue comprend l'examen et la mesure des techniques RS dans les produits WAAM en fonction des paramètres d'entrée et d'autres influences des produits RS. Grâce à une évaluation et une coordination méticuleuses de la littérature existante, cette revue souligne l'importance de comprendre les facteurs influençant et atténuant les méthodes de RS dans les produits de WAAM.

Contributions des auteurs : Les rôles des auteurs dans cette étude sont décrits comme suit : FDG a proposé le titre et contribué à la conceptualisation, à la méthodologie, à l'enquête et à la préparation de l'ébauche originale. HGL a contribué à la conceptualisation et a fourni les ressources, la supervision, l'administration du projet, la révision, la révision du manuscrit et l'obtention du financement. YWA a participé à l'édition et à la révision du manuscrit. MDH a également participé à l'organisation et à l'analyse des données du manuscrit. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du

Financement : Cette étude a reçu le soutien de l'initiative INDMET sous le numéro de subvention 62862, qui a été financée par le programme NORHED II.

Déclaration de disponibilité des données : Les contributions originales présentées dans l'étude sont incluses dans l'article, des demandes complémentaires peuvent être adressées aux auteurs correspondants.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

## Les références

1. Kumar, MB ; Sathiya, P. ; Senthil, SM Une revue critique de la fabrication additive à arc filaire d'alliages à base de nickel : principes, paramètres de processus, microstructure, propriétés mécaniques, effets du traitement thermique et défauts. J. Braz. Soc. Mécanique. Sci. Ing. 2023, 45, 1–27.
2. Tangestani, R. ; Farrahi, GH; Shishegar, M. ; Aghchehkandi, BP; Ganguly, S. ; Mehmanparast, A. Effets du roulement vertical et par pincement sur les distributions de contraintes résiduelles dans les composants fabriqués de manière additive en fil et en arc. J. Mater. Ing. Effectuer. 2020, 29, 2073-2084. [\[Référence croisée\]](#)
3. Derekar, KS Aspects de la fabrication additive par arc métallique (WAAM) de l'alliage d'aluminium 5183. Ph.D. Thèse, Coventry University, Coventry, Royaume-Uni, 2020 ; pp. 1 à 227.
4. Rodrigues, TA; Duarte, V. ; Miranda, RM; Santos, TG; Oliveira, JP État actuel et perspectives sur la fabrication additive par fil et arc (WAAM). Matériaux 2019, 12, 1121. [\[CrossRef\]](#)
5. Laghi, V. ; Palerme, M. ; Gasparini, G. ; Veljkovic, M. ; Trombetti, T. Évaluation des paramètres mécaniques de conception et des facteurs de sécurité partiels pour l'acier inoxydable fabriqué avec additif Wire-and-Arc. Ing. Structure. 2020, 225, 111314. [\[Réf. croisée\]](#)
6. Cunningham, CR ; Flynn, JM; Shokrani, A. ; Dhokia, V. ; Newman, ST Article de révision invité : Stratégies et processus pour une haute fabrication additive à arc filaire de qualité. Ajouter. Fab. 2018, 22, 672-686. [\[Référence croisée\]](#)
7. Klobčar, D. ; Baloš, S. ; Basic, M. ; Djurić, A. ; Lindic, M. ; Šćetec, A. WAAM et autres technologies non conventionnelles de fabrication d'additifs métalliques. Av. Technologie. Maître. 2020, 45, 1–9. [\[Référence croisée\]](#)
8. Mathews, R. ; Karandikar, J. ; Tyler, C. ; Smith, S. Accumulation de contraintes résiduelles dans la fabrication additive à grande échelle de fil-arc de Ti-6Al-4V. turing. Procedia CIRP 2024, 121, 180-185. [\[Référence croisée\]](#)
9. Wu, B. ; Poële, Z. ; van Duin, S. ; Li, H. Comportement thermique dans la fabrication additive à arc filaire : caractéristiques, effets et contrôle. Dans Transactions sur la fabrication de soudage intelligent ; Springer : Singapour, 2019 ; p. 3-18.
10. Williams, Sud-Ouest ; Martine, F. ; Addison, AC ; Ding, J. ; Pardal, G. ; Colegrove, P. Fabrication additive Wire + Arc. Maître. Sci. Technologie. 2016, 32, 641-647. [\[Référence croisée\]](#)
11. Jiménez, X. ; Dong, W. ; Paul, S. ; Klecka, MA; To, modélisation des contraintes résiduelles AC avec transformation de phase pour additif d'arc filaire Fabrication d'acier B91. JOM 2020, 72, 4178-4186. [\[Référence croisée\]](#)
12. Jin, W. ; Zhang, C. ; Jin, S. ; Tian, Y. ; Wellmann, D. ; Liu, W. Fabrication additive par arc métallique d'aciers inoxydables : une revue. Appl. Sci. 2020, 10, 1563. [\[Réf. croisée\]](#)
13. Huang, W. ; Wang, Q. ; Homme, ; Kitano, H. Caractéristiques de distribution des contraintes résiduelles dans les composants typiques des murs et des tuyaux construits par fabrication additive à arc filaire. J. Manuf. Processus. 2022, 82, 434-447. [\[Référence croisée\]](#)
14. Mohan Kumar, S. ; Rajesh Kannan, A. ; Pravin Kumar, N. ; Pramod, R. ; Siva Shanmugam, N. ; Vishnu, AS ; Channabasavanna, SG Caractéristiques microstructurales et intégrité mécanique du matériau à gradient fonctionnel SS321/Inconel 625 fabriqué par additif pour arc métallique . J. Mater. Ing. Effectuer. 2021, 30, 5692-5703. [\[Référence croisée\]](#)

15. Kumar, V. ; Singh, A. ; Bishwakarma, H. ; Mandal, A. Simulation du processus de fabrication additive à arc métallique (Waam) Utilisation du logiciel de soudage Simufact. J. Manuf. Ing. 2023, 18, 080-085. [\[Référence croisée\]](#)
16. Knezovic, N. ; Sujet, A. Fabrication additive de fils et d'arcs (WAAM) : une nouvelle avancée dans la fabrication. Dans Notes de cours sur les réseaux et les systèmes ; Springer International Publishing : New York, NY, États-Unis, 2019 ; Volume 42, p. 65-71.
17. Costello, SCA; Cunningham, CR ; Xu, F. ; Shokrani, A. ; Dhokia, V. ; Newman, ST L'état de l'art du dépôt d'énergie dirigé par arc filaire (WA-DED) en tant que processus de fabrication additive pour la fabrication de gros composants métalliques. Int. J. Informatique. Intégré. Fab. 2023, 36, 469-510. [\[Référence croisée\]](#)
18. Barath Kumar, MD; Manikandan, M. Évaluation du processus, des paramètres, de l'atténuation des contraintes résiduelles, des post-traitements et des simulations d'analyse par éléments finis de la technique de fabrication additive à arc métallique. Métaux et matériaux internationaux. Inst. coréen. Rencontré. Maître. 2022, 28, 54-111. [\[Référence croisée\]](#)
19. Paskual, A. ; Álvarez, P. ; Suárez, A. Étude sur les procédés de soudage à l'arc pour la fabrication additive à taux de dépôt élevé. Procédure CIRP 2018, 68, 358-362.
20. Shukla, P. ; Tired, B. ; Kiran, DV; Bukkapatnam, S. Comportement de l'arc dans le processus de fabrication additive à arc filaire. Procedia Manuf. 2020, 48, 725-729. [\[Référence croisée\]](#)
21. Zhao, XF ; Wimmer, A. ; Zaeh, MF Enquête expérimentale et simulative de séquences de soudage sur induction thermique distorsions dans la fabrication additive à arc filaire. Prototype rapide J. 2023, 29, 53-63. [\[Référence croisée\]](#)
22. Cambon, C. ; Bendaoud, I. ; Rouquette, S. ; Soulié, F. Un benchmark WAAM : Des paramètres process aux effets thermiques sur la soudure forme de la piscine, microstructure et contraintes résiduelles. Maître. Aujourd'hui Commun. 2022, 33, 104235. [\[Réf. croisée\]](#)
23. Hönnige, J. ; Seow, CE ; Ganguly, S. ; Xu, X. ; Cabeza, S. ; Coules, H. ; Williams, S. Étude des contraintes résiduelles et de l'évolution microstructurale du fil laminé tel que déposé et entre les passes ainsi que de l'alliage Inconel 718 fabriqué de manière additive à l'arc après traitement de vieillissement. Maître. Sci. Ing. A 2020, 801, 140368. [\[CrossRef\]](#)
24. Hönnige, JR ; Colegrove, Pennsylvanie ; Ganguly, S. ; Eimer, E. ; Kabra, S. ; Williams, S. Contrôle des contraintes résiduelles et de la distorsion dans Fabrication additive fil d'aluminium + arc avec laminage. Addit Manuf. 2018, 22, 775-783. [\[Référence croisée\]](#)
25. Schröpfer, KWD ; Wildenhain, RS; Kannengiesser, AHT; Hensel, AKJ Influence du processus WAAM et des aspects de conception sur les contraintes résiduelles dans les aciers de construction à haute résistance. Monde soudé 2023, 67, 987-996.
26. Geng, R. ; Du, J. ; Wei, Z. ; Xu, S. ; Ma, N. Modélisation et observation expérimentale de la géométrie du dépôt et de l'évolution de la microstructure d'un alliage d'aluminium fabriqué par fabrication additive fil-arc. J. Manuf. Processus. 2021, 64, 369-378. [\[Référence croisée\]](#)
27. Klein, T. ; Spoerk-Erdely, P. ; Schneider-Broeskamp, C. ; Oliveira, JP; Faria, GA Contraintes résiduelles dans un alliage Al – 6Cu – Mn (ER2319) déposé par fil et énergie dirigée par arc, déterminées par diffraction des rayons X à haute énergie et dispersion d'énergie. Rencontré. Maître. Trans. A 2024, 55, 736-744. [\[Référence croisée\]](#)
28. Ermakova, A. ; Mehmanparast, A. ; Ganguly, S. ; Razavi, N. ; Berto, F. Enquête sur les propriétés mécaniques et de rupture du fil et des composants en acier à faible teneur en carbone fabriqués de manière additive. Théorique. Appl. Fract. Mécanique. 2020, 109, 102685. [\[Réf. croisée\]](#)
29. Derekar, KS Un examen de la fabrication additive à arc filaire et des progrès dans la fabrication additive à arc filaire de l'aluminium. Maître. Sci. Technologie. 2018, 34, 895-916. [\[Référence croisée\]](#)
30. Taşdemir, A. ; Nohut, S. Un aperçu de la fabrication additive à arc filaire (WAAM) dans l'industrie de la construction navale. Structure offshore des navires. 2020, 16, 1-18. [\[Référence croisée\]](#)
31. Müller, J. ; Grabowski, M. ; Müller, C. ; Hensel, J. ; Unglaub, J. ; Thiele, K. ; Kloft, H. ; Dilger, K. Conception et identification des paramètres des barres d'acier fabriquées de manière additive en fil et en arc (WAAM) destinées à être utilisées dans la construction. Métaux 2019, 9, 725. [\[CrossRef\]](#)
32. Abbaszadeh, M. ; Hönnige, JR; Martine, F. ; Néto, L. ; Kachaev, N. ; Colegrove, P. ; Williams, S. ; Klusemann, B. Étude numérique de l'effet du roulement sur l'induction localisée de contraintes et de déformations pour les structures fabriquées par additif fil + arc . J. Mater. Ing. Effectuer. 2019, 28, 4931-4942. [\[Référence croisée\]](#)
33. Chanson, SS ; Chen, J. ; Quan, G. ; Oui, J. ; Zhao, Y. Analyse numérique et conception d'arcs à fil remplis de béton fabriqués de manière additive tube d'acier sous compression axiale. Ing. Structure. 2024, 301, 117294. [\[Réf. croisée\]](#)
34. Wu, Q. ; Mukherjee, T. ; Brigade des stupéfiants. ; DebRoy, T. Contraintes résiduelles dans la fabrication additive fil-arc – Hiérarchie des variables influentes. Ajouter. Fab. 2020, 35, 101355. [\[Réf. croisée\]](#)
35. Ding, D. ; Poêle, Z. ; Cuiuri, D. ; Li, H. Fabrication additive de composants métalliques par fil : technologies, développements et intérêts futurs. Int. J. Adv. Fab. Technologie. 2015, 81, 465-481. [\[Référence croisée\]](#)
36. Jafari, D. ; Vaneker, THJ; Gibson, I. Fabrication additive de fils et d'arcs : opportunités et défis pour contrôler la qualité et la précision des pièces fabriquées. Maître. Des. 2021, 202, 109471. [\[Réf. croisée\]](#)
37. Wu, B. ; Poêle, Z. ; Chen, G. ; Ding, D. ; Yuan, L. ; Cuiuri, D. ; Li, H. Atténuation de la distorsion thermique dans l'arc filaire fabriqué de manière additive Pièce Ti6Al4V utilisant un refroidissement actif entre passes. Sci. Technologie. Souder. Rejoindre. 2019, 24, 484-494. [\[Référence croisée\]](#)
38. Rozaimi, M. ; Yusof, F. Défis de recherche, stratégie de contrôle qualité et de surveillance pour la fabrication additive Wire Arc. J. Mater. Rés. Technologie. 2023, 24, 2769-2794.
39. Ahmad, B. ; Zhang, X. ; Guo, H. ; Fitzpatrick, MOI ; Neto, LMSC ; Williams, S. Influence des stratégies de dépôt sur les résidus Contrainte dans le fil + additif d'arc fabriqué en titane Ti-6Al-4V. Métaux 2022, 12, 253. [\[CrossRef\]](#)
40. Schönegger, S. ; Moschinger, M. ; Enzinger, N. Simulation informatique de soudage d'une fabrication additive à arc de fil plasma procédé pour l'acier à haute résistance. EUR. J. Mater. 2024, 4, 2297051. [\[Réf. croisée\]](#)
41. Qvale, P. ; Njaastad, EB; Bræin, T. ; Ren, X. Une méthode de simulation rapide pour la gestion thermique dans la fabrication additive à arc filaire réparation d'une structure à paroi mince. Int. J. Adv. Fab. Technologie. 2024, 132, 1573-1583. [\[Référence croisée\]](#)

42. Wang, C. ; Suder, W. ; Ding, J. ; Williams, S. L'effet de la taille du fil sur la fabrication additive de fils à taux de dépôt élevé et d'arc plasma de Ti-6Al-4V. *Confiture. Acad. Dermatol.* 2021, 288, 116842. [\[Réf. croisée\]](#)
43. Gupta, AK ; Bansal, H. ; Madan, A. Étude sur le processus de fabrication additive à arc métallique CNC pour un taux de dépôt et une résistance mécanique plus élevés. *Av. Robot. Automatique.* 2022, 10, 9695.
44. Ananda, PA WAAM Demande pour la société EPC. Conférence Web MATEC. 2019, 269, 05002. [\[Réf. croisée\]](#)
45. Li, Y. ; Dong, Z. ; Miao, J. ; Liu, H. ; Babkin, A. ; Chang, Y. Amélioration de la précision de formage dans la fabrication additive à arc filaire (WAAM) : Une revue. *Prototype rapide. J.* 2022, 29, 673-686. [\[Référence croisée\]](#)
46. Chaurasia, M. ; Sinha, MK Enquêtes sur les paramètres de processus de fabrication additive à arc métallique (WAAM) : une revue ; Notes de cours en génie mécanique ; Springer Nature : Singapour, 2021 ; pp. 845-853.
47. Gowthaman, PS ; Jeyakumar, S. ; Sarathchandra, D. Effet de l'apport de chaleur sur la microstructure et les propriétés mécaniques du 316L Acier inoxydable fabriqué par fabrication additive à arc métallique. *J. Mater. Ing. Effectuer.* 2024, 33, 5536-5546. [\[Référence croisée\]](#)
48. Tomar, B. ; Shiva, S. ; Nath, T. Une revue de la fabrication additive à arc filaire : paramètres de traitement, défauts, amélioration de la qualité et les avancées récentes. *Maître. Aujourd'hui Commun.* 2022, 31, 103739. [\[CrossRef\]](#)
49. Voropaev, A. ; Korsmik, R. ; Tsiulskiy, I. Caractéristiques de la fusion et du transfert de fils d'apport dans la fabrication additive à arc métallique de Pièces métalliques. *Matériaux* 2021, 14, 5077. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
50. Chen, C. ; Il h. ; Zhou, S. ; Lian, G. ; Huang, X. ; Feng, M. Prédiction du profil multibilles des composants fabriqués par fil robotique et additif d'arc de manière récursive à l'aide d'une analyse de forme de goutte axisymétrique. *Physique virtuelle. Prototype.* 2023, 18, 1-24. [\[Référence croisée\]](#)
51. Ayed, A. ; Valence, A. ; Soutiens-gorge, G. ; Bernard, H. ; Michaud, P. ; Balcaen, Y. ; Alexis, J. Effets des paramètres du procédé WAAM sur les propriétés métallurgiques et mécaniques des gisements Ti-6Al-4V. Dans *Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing : Actes de la deuxième conférence internationale sur les matériaux avancés, la mécanique et la fabrication (A3M'2018)*, Hammamet, Tunisie, 17-19 décembre 2018 ; Notes de cours en génie mécanique ; Springer International Publishing : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2020 ; p. 26-35.
52. Mai, DS ; Doan, savoirs traditionnels ; Paris, H. Engineering Science and Technology, an International Journal Fabrication additive par fil et arc de composants en acier inoxydable 308L : Optimisation des paramètres de traitement et des propriétés des matériaux. *Ing. Sci. Technologie. Int. J.* 2021, 24, 1015-1026.
53. Lin, Z. ; Goulas, C. ; Ouais, W. ; Hermans, MJ Microstructure et propriétés mécaniques des gisements d'acier à carbone moyen obtenus via la fabrication additive de fils et d'arcs à l'aide de fils à âme métallique. *Métaux* 2019, 9, 673. [\[CrossRef\]](#)
54. Chanson, GH ; Lee, CM ; Kim, DH Enquête sur la planification des chemins pour réduire les erreurs de hauteur des pièces d'intersection dans la fabrication additive filaire-arc. *Matériaux* 2021, 14, 6477. [\[CrossRef\]](#)
55. Zhou, Z. ; Shen, H. ; Liu, B. ; Du, W. ; Jin, J. ; Lin, J. Prédiction des contraintes thermiques résiduelles pour les parcours d'outils continus dans un additif fil-arc fabrication : une méthode basée sur les données à trois niveaux. *Physique virtuelle. Prototype.* 2022, 17, 105-124. [\[Référence croisée\]](#)
56. Guo, C. ; Li, G. ; Li, S. ; Hu, X. ; Lu, H. ; Li, X. ; Xu, Z. ; Chen, Y. ; Li, Q. ; Lu, J. ; et coll. Fabrication additive de superalliages à base de Ni : Contraintes résiduelles, mécanismes de formation de fissures et stratégies d'inhibition des fissures. *Nano Mater. Sci.* 2023, 5, 53-77. [\[Référence croisée\]](#)
57. Scotti, FM ; Teixeira, FR ; da Silva, LJ ; de Araújo, DB ; Reis, RP ; Scotti, A. Gestion thermique dans WAAM via le CMT Processus avancé et technique de refroidissement actif. *J. Manuf. Processus.* 2020, 57, 23-35. [\[Référence croisée\]](#)
58. Ahsan, MRU ; Tanvir, ANM ; Ross, T. ; Elsayy, A. ; Oh, MS ; Kim, DB Fabrication de structures bimétalliques fabriquées de manière additive (BAMS) en acier à faible teneur en carbone et en acier inoxydable austénitique 316L avec fabrication additive fil + arc. *Prototype rapide J.* 2020, 26, 519-530. [\[Référence croisée\]](#)
59. Wu, Q. ; Maman, Z. ; Chen, G. ; Liu, C. ; Fou, Ma, S. Obtention d'une microstructure fine et de surplombs non supportés par fabrication additive à arc pulsé à faible apport de chaleur. *J. Manuf. Processus.* 2017, 27, 198-206. [\[Référence croisée\]](#)
60. Doumenc, G. ; Couturier, L. ; Courant, B. ; Paillard, P. ; Benoît, A. ; Gautron, E. ; Girault, B. ; Pirling, T. ; Cabeza, S. ; Gloaguen, D. Enquête sur la microstructure, la dureté et les contraintes résiduelles du fil et de l'arc additif fabriqués en alliage d'aluminium 6061 pour citer cette version : HAL Id : Hal-03827007. *Materialia* 2022, 25, 101520. [\[CrossRef\]](#)
61. Tröger, J.-A. ; Hartmann, S. ; Treutler, K. ; Potschka, A. ; Wesling, V. Optimisation des paramètres de processus basée sur la simulation pour la fabrication additive à arc filaire. *Programme. Ajouter. Fab.* 2024. [\[Référence croisée\]](#)
62. Nagallapati, V. ; Khare, VK ; Sharma, A. ; Simhambhatla, S. Gestion thermique active et passive dans l'additif Wire Arc Fabrication. *Métaux* 2023, 13, 682. [\[CrossRef\]](#)
63. Ahsan, M. ; Seo, G.-J. ; Ventilateur, X. ; Liaw, PK ; Motaman, S. ; Haase, C. ; Kim, DB Effets des paramètres de processus sur la forme des perles, la microstructure et les propriétés mécaniques dans la fabrication additive fil + arc de l'alliage à haute entropie Al0.1CoCrFeNi. *J. Manuf. Processus.* 2021, 68, 1314-1327. [\[Référence croisée\]](#)
64. Lui, T. ; Yu, S. ; Shi, Y. ; Huang, A. Formage et propriétés mécaniques de la fabrication additive à arc métallique pour support d'hélice marine. *J. Manuf. Processus.* 2020, 52, 96-105. [\[Référence croisée\]](#)
65. Su, C. ; Chen, X. ; Gao, C. ; Wang, Y. Effet de l'apport thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages Al-Mg fabriqués par WAAM. *Appl. Le surf. Sci.* 2019, 486, 431-440. [\[Référence croisée\]](#)
66. Scharf-Wildenhain, R. ; Haelsig, A. ; Hensel, J. ; Wandtke, K. ; Schröpfer, D. ; Kromm, A. ; Kannengiesser, T. Influence du contrôle thermique sur les propriétés et les contraintes résiduelles des composants en acier à haute résistance soudés par additif. *Métaux* 2022, 12, 951. [\[CrossRef\]](#)
67. Javadi, Y. ; Forgeron, M. ; Venkata, KA ; Naveed, N. ; Forsey, A. ; François, J. ; Ainsworth, R. ; Truman, C. ; Forgeron, D. ; Hosseinzadeh, F. ; et coll. Mesure des contraintes résiduelles en round robin sur un joint soudé par faisceau d'électrons entre l'acier inoxydable austénitique 316L(N) et l'acier ferritique P91. *Int. J. Presse. Navire. Pépin.* 2017, 154, 41-57.

68. Saleh, B. ; Fathi, R. ; Tian, Y. ; Radhika, N. ; Jiang, J. ; Ma, A. Fondamentaux et avancées de la fabrication additive à arc filaire : matériaux, paramètres de processus, applications potentielles et tendances futures. Dans Archives du génie civil et mécanique ; Springer : Londres, Royaume-Uni, 2023 ; Volume 23, pages 1 à 71.
69. Rosli, NA; Alkahari, MR ; ben Abdollah, MF; Maidin, S. ; Ramli, FR; Herawan, SG Examen de l'effet de l'apport de chaleur pour l'arc filaire procédé de fabrication additive. J. Mater. Rés. Technologie. 2021, 11, 2127-2145. [\[Référence croisée\]](#)
70. Li, JZ; Alkahari, MR ; Rosli, NAB ; Hasan, R. ; Sudin, Minnesota ; Ramli, FR Examen de la fabrication additive à arc filaire pour l'impression métallique 3D Examen de la fabrication additive à arc filaire pour l'impression métallique 3D. Int. J. Autom. Technologie. 2019, 13, 346-353.
71. Woo, W. ; Kim, D.-K. ; Kingston, E. ; Luzin, V. ; Salvemini, F. ; Hill, MR Effet des couches intermédiaires et des stratégies de balayage sur la répartition des contraintes résiduelles à travers l'épaisseur dans une structure en acier ferritique-austénitique fabriquée de manière additive. Maître. Sci. Ing. Un 2019, 744, 618-629.
72. Geng, H. ; Li, J. ; Gao, J. ; Lin, X. Modèle théorique de contrainte résiduelle et de gauchissement pour la fabrication additive de fils et d'arcs Panneaux raidis. Métaux 2020, 10, 666. [\[CrossRef\]](#)
73. Rouquette, S. ; Cambon, C. ; Bendaoud, I. ; Soulié, F. Contraintes résiduelles dans les éprouvettes ss316l après dépôt de fil d'apport fondu. Dans Actes de l'ICRS 11 — 11e Conférence internationale sur les contraintes résiduelles, Nancy, France, 27-30 mars 2022.
74. Kumaran, M. ; Senthilkumar, V. ; Panicke, CJ; Shishir, R. Enquête sur les contraintes résiduelles dans la fabrication additive de travaux de réparation par processus de dépôt d'énergie dirigé sur un substrat en acier laminé à chaud SS316L. Maître. Aujourd'hui Proc. 2021, 47, 4475-4478. [\[Référence croisée\]](#)
75. Michurova, T. ; Sydow, B. ; Thiede, T. ; Sizova, I. ; Ulbricht, A. ; Bambach, M. ; Bruno, G. Contraintes résiduelles et microstructure d'un Démonstrateur hybride de fabrication additive à arc filaire Ti-6Al-4V. Métaux 2020, 10, 701. [\[CrossRef\]](#)
76. Martina, F. ; Roy, MJ; Szost, BA; Terzi, S. ; Colegrove, Pennsylvanie ; Williams, Sud-Ouest ; Withers, PJ ; Meyer, J. ; Hofmann, M. Contrainte résiduelle du fil tel que déposé et laminé + composants de fabrication additive à l'arc Ti – 6Al – 4V. Maître. Sci. Technologie. 2016, 32, 1439-1448. [\[Référence croisée\]](#)
77. Liu, C. ; Lin, C. ; Wang, J. ; Wang, J. ; Yan, L. ; Luo, Y. ; Yang, M. Répartitions des contraintes résiduelles dans des spécimens épais extraits d'un grand fil circulaire et maquette de fabrication additive d'arc. J. Manuf. Processus. 2020, 56, 474-481.
78. Yang, Y. ; Porte-poisse.; Liu, C. ; Xiao, M. ; Lu, J. ; Fan, H. ; Ma, S. Contrainte résiduelle, propriétés mécaniques et morphologie des grains de l' alliage Ti-6Al-4V produit par fabrication additive de fils et d'arc assistée par traitement par impact ultrasonique. Métaux 2018, 8, 934. [\[Référence croisée\]](#)
79. Boruah, D. ; Dewagtere, N. ; Ahmad, B. ; Nunes, R. ; Tacq, J. ; Zhang, X. ; Guo, H. ; Verlinde, W. ; De Waele, W. Corrélation d'images numériques pour mesurer les contraintes résiduelles en plein champ dans les composants fabriqués avec des fils et des arcs additifs. Matériaux 2023, 16, 1702. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
80. Rani, KU ; Kumar, R. ; Mahapatra, MM; Mulik, RS; Swierczy 'nska, A. ; Fydrych, D. ; Pandey, C. Wire Arc Additive Fabriqué en acier doux et propriétés austénitiques et contraintes résiduelles. Matériaux 2022, 15, 7094. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
81. Gao, L. ; Chuang, AC; Kenesei, P. ; Ren, Z. ; Balderson, L. ; Sun, T. Une étude synchrotron operando sur l'effet de l' état de fusion du fil sur les microstructures de solidification de l'Inconel 718 dans le dépôt d'énergie dirigé par fil-laser. Int. J. Mach. Fabrication d'outils. 2024, 194, 104089. [\[Réf. croisée\]](#)
82. Robin, IK ; Sprouter, DJ ; Sridharan, N. ; Snead, LL; Zinkle, SJ Enquête basée sur le synchrotron sur l'anisotropie et la microstructure de l'acier de qualité 91 fabriqué par additif à l'arc filaire. J. Mater. Rés. Technologie. 2024, 29, 5010-5021. [\[Référence croisée\]](#)
83. Kumar, V. ; Mandal, A. ; Das, AK; Kumar, S. Étude paramétrique et caractérisation de l'acier fabriqué par additif à l'arc filaire structures. Int. J. Adv. Fab. Technologie. 2021, 115, 1723-1733. [\[Référence croisée\]](#)
84. Shen, C. ; Reid, M. ; Liss, K.-D. ; Poële, Z. ; Peut, ; Cuiuri, D. ; van Duin, S. ; Li, H. Déterminations des contraintes résiduelles par diffraction neutronique dans les composants en aluminure de fer à base de Fe3Al fabriqués par fabrication additive à arc filaire (WAAM). Ajouter. Fab. 2019, 29, 100774. [\[Réf. croisée\]](#)
85. Rouquette, S. ; Cambon, C. ; Bendaoud, I. ; Cabeza, S. ; Soulié, F. Effet de l'ajout de couches sur les contraintes résiduelles de l'additif Wire Arc Spécimens fabriqués en acier inoxydable. J. Manuf. Sci. Ing. 2024, 146, 1-12. [\[Référence croisée\]](#)
86. Rodrigues, TA; Farias, FWC; Zhang, K. ; Shamsolhodaei, A. ; Shen, J. ; Zhou, N. ; Schell, N. ; Capek, J. ; Polatidis, E. ; Santos, TG; et coll. Fabrication additive de fils et d'arcs de matériaux fonctionnels en acier inoxydable 316L/Inconel 625 : Développement et caractérisation. J. Mater. Rés. Technologie. 2022, 21, 237-251. [\[Référence croisée\]](#)
87. Théodore, J. ; Couturier, L. ; Girault, B. ; Cabeza, S. ; Pirling, T. ; Frapier, R. ; Bazin, G. ; Courant, B. Relation entre la microstructure et la déformation et la contrainte résiduelles dans les aciers inoxydables alliés in situ par le procédé de fabrication additive à arc double (D-WAAM) . Materialia 2023, 30, 101850. [\[CrossRef\]](#)
88. Kumar, MB ; Manikandan, M. Évaluation de la microstructure, des contraintes résiduelles et des propriétés mécaniques dans différents plans de superalliage à base de nickel fabriqué avec additif fil + arc. Rencontré. Maître. Int. 2022, 28, 3033-3056. [\[Référence croisée\]](#)
89. Consommables de soudage pour les aciers ayant une limite d'élasticité > 460 MPa. Disponible en ligne : <https://www.welmet.cz/wp-content/uploads/2019/04/2-SM-pro-oceli-s-mez%C3%AD-kluzu-nad-460-MPa.pdf> (consulté le 26 juin 2024).
90. Soleil, J. ; Hensel, J. ; Kohler, M. ; Dilger, K. Contraintes résiduelles dans les composants en aluminium fabriqués de manière additive par fil et arc. J. Manuf. Processus. 2021, 65, 97-111. [\[Référence croisée\]](#)
91. Rodrigues, TA; Farias, FWC; Avila, JA; Maawad, E. ; Schell, N. ; Santos, TG; Oliveira, JP Effet des traitements thermiques sur l'Inconel 625 fabriqué par fabrication additive fil et arc : analyse par diffraction des rayons X synchrotron in situ. Sci. Technologie. Souder. Rejoindre. 2023, 28, 534-539. [\[Référence croisée\]](#)

92. Wandtke, K. ; Becker, A. ; Schröpfer, D. ; Kromm, A. ; Kannengiesser, T. ; Scharf-Wildenhain, R. ; Haelsig, A. ; Hensel, J. Évolution des contraintes résiduelles pendant le fraisage de rainures pour le soudage de réparation et la fabrication additive à l'arc filaire de composants en acier à haute résistance. *Métaux* 2024, 14, 82. [\[CrossRef\]](#)
93. Wu, Q. ; Mukherjee, T. ; Liu, C. ; Lu, J. ; DebRoy, T. Contraintes résiduelles et distorsion dans l'impression de motifs sur titane et nickel alliages. *Ajouter. Fab.* 2019, 29, 100808. [\[Réf. croisée\]](#)
94. Han, Y. Une étude par éléments finis de la fabrication additive à arc métallique d'alliage d'aluminium. *Appl. Sci.* 2024, 14, 810. [\[Réf. croisée\]](#)
95. Khaled, H. ; Abusalma, J. Étude paramétrique des contraintes résiduelles dans les pièces fabriquées avec additifs en fil et en arc. La thèse de master, Université Old Dominion, Norfolk, VA, États-Unis, 2020.
96. Saadatmand, M. ; Talemi, R. Étude sur le cycle thermique des murs en acier au carbone Wire Arc Additive Manufactured (WAAM) utilisant simulation numérique. *Fraternité. Ed Integrita Strutt.* 2020, 14, 98-104. [\[Référence croisée\]](#)
97. Eisazadeh, H. ; Achuthan, A. ; Goldak, J. ; Aidun, D. Effet des propriétés des matériaux et de la charge de tension mécanique sur la contrainte résiduelle formation dans la soudure différente GTA 304-A36. *J. Mater. Processus. Technologie.* 2015, 222, 344-355. [\[Référence croisée\]](#)
98. Nezamdost, MR ; Esfahani, MRN ; Hashemi, SH ; Mirbozorgi, SA Étude du domaine de la température et des contraintes résiduelles du soudage à l'arc submergé par la méthode des éléments finis et des expériences. *Int. J. Adv. Fab. Technologie.* 2016, 87, 615-624. [\[Référence croisée\]](#)
99. Huang, H. ; Homme, ; Chen, J. ; Feng, Z. ; Murakawa, H. Vers une simulation à grande échelle des contraintes résiduelles et des distorsions dans les fils et fabrication additive à l'arc. *Ajouter. Fab.* 2020, 34, 101248. [\[Réf. croisée\]](#)
100. Han, YS Wire Arc Additive Manufacturing : une étude des paramètres de processus à l'aide de simulations multiphysiques. *Matériaux* 2023, 16, 7267. [\[Réf. croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
101. Jia, J. ; Zhao, Y. ; Dong, M. ; Wu, A. ; Li, Q. Simulation numérique de la contrainte résiduelle et de la déformation des pièces WAAM en alliage d'aluminium basée sur la méthode de la fonction de température. *Trans. Soudure en Chine. Inst.* 2020, 29, 1–8.
102. Feng, G. ; Wang, autoroute ; Deng, D. ; Zhang, J. Simulation numérique des contraintes résiduelles et de la déformation dans un additif à arc métallique Fabrication. *Cristaux* 2022, 12, 803. [\[CrossRef\]](#)
103. Graf, M. ; Pradjadhiana, KP ; Hälsig, A. ; Manurung, YHP ; Awiszus, B. Simulation numérique de la fabrication additive à arc métallique (WAAM). Dans les actes de la conférence AIP ; Éditions AIP : Long Island, NY, États-Unis, 2018 ; Tome 960, p. 140010.
104. Ahmad, SN ; Manurung, YH ; Mat, MF ; Minggu, Z. ; Jaffar, A. ; Pruller, S. ; Leitner, M. Procédure de simulation FEM pour l'analyse de la distorsion et des contraintes résiduelles de la fabrication additive à arc filaire. Dans la série de conférences IOP : Science et ingénierie des matériaux ; Éditions IOP : Bristol, Royaume-Uni, 2020 ; Tome 834, p. 012083.
105. Cadiou, S. ; Courtois, M. ; Carin, M. ; Berckmans, W. ; Le masson, P. Transfert thermique 3D, écoulement des fluides et modèle électromagnétique pour le froid fabrication additive par arc de fil de transfert métallique (Cmt-Waam). *Ajouter. Fab.* 2020, 36, 101541. [\[Réf. croisée\]](#)
106. Drexler, H. ; Haunreiter, F. ; Raberger, L. ; Reiter, L. ; Hütter, A. ; Enzinger, N. Modélisation numérique des distorsions et des contraintes résiduelles lors de la fabrication additive à l'arc filaire d'un alliage ER 5183 avec dépôt par tissage. *BHM Bergund Hüttenmännische Monatshefte* 2024, 169, 38-47. [\[Référence croisée\]](#)
107. Bonifaz, EA ; Palomeque, JS Un modèle mécanique en procédé de fabrication additive fil + Arc. *Programme. Ajouter. Fab.* 2020, 5, 163-169. [\[Référence croisée\]](#)
108. Reyes-Gordillo, E. ; Gómez-Ortega, A. ; Morales-Estrella, R. ; Pérez-Barrera, J. ; Gonzalez-Carmona, J. ; Escudero-García, R. ; Alvarado-Orozco, J. Effet des paramètres de transfert de métal froid lors de la fabrication additive à arc métallique de murs multicouches Ti6Al4V . 2022. Disponible en ligne : <https://www.researchsquare.com/article/rs-1946459/v1> (consulté le 26 juin 2024).
109. Silva, WF Évaluation des propriétés des préformes en Inconel ® 625 fabriquées selon la technologie WAAM. *Rés. Carré.* 2024. Disponible en ligne : <https://www.researchsquare.com/article/rs-3591195/v1> (consulté le 26 juin 2024).
110. Derekar, KS ; Addison, A. ; Joshi, SS ; Zhang, X. ; Laurent, J. ; Xu, L. ; Melton, G. ; Griffiths, D. Effet des techniques de gaz inerte métallique pulsé (MIG pulsé) et de transfert de métal à froid (CMT) sur la dissolution de l'hydrogène dans la fabrication additive à arc filaire (WAAM) de l'aluminium. *Int. J. Adv. Fab. Technologie.* 2020, 107, 311-331. [\[Référence croisée\]](#)
111. Rosli, NA ; Alkahari, MR ; Ramli, FR ; Sudin, Minnesota ; Maidin, S. Influence des paramètres de processus dans les additifs pour fils et arcs Fabrication (WAAM). *Processus. J. Mech. Ing.* 2020, 17, 69-78. [\[Référence croisée\]](#)
112. Derekar, KS ; Ahmad, B. ; Zhang, X. ; Joshi, SS ; Laurent, J. ; Xu, L. ; Melton, G. ; Addison, A. Effets des variantes de processus sur les contraintes résiduelles dans la fabrication additive à arc métallique d'alliage d'aluminium 5183. *J. Manuf. Sci. Ing. Trans.* 2022, 144, 071005. [\[Référence croisée\]](#)
113. Yuan, Q. ; Liu, C. ; Wang, W. ; Wang, M. Répartition des contraintes résiduelles dans un grand échantillon fabriqué par fabrication additive fil-arc . *Sci. Technologie. Souder. Rejoindre.* 2023, 28, 137-144. [\[Référence croisée\]](#)
114. Fu, R. ; Tang, S. ; Lu, J. ; Cui, Y. ; Li, Z. ; Zhang, H. ; Xu, T. ; Chen, Z. ; Liu, C. Fabrication additive à l'arc à fil chaud d'alliage d'aluminium avec une porosité réduite et un taux de dépôt élevé. *Maître. Des.* 2021, 199, 199109370. [\[CrossRef\]](#)
115. Zhang, C. ; Li, Y. ; Gao, M. ; Zeng, X. Fabrication additive à l'arc filaire d'un alliage Al-6Mg utilisant un transfert de métal froid à polarité variable arc comme source d'énergie. *Maître. Sci. Ing. Un* 2018, 711, 415-423. [\[Référence croisée\]](#)
116. Corbin, DJ ; Nassar, AR ; Reutzel, EW ; Kistler, Caroline du Nord ; Abeille, AM ; Michaleris, P. Impact des paramètres de dépôt d'énergie dirigée sur la distorsion mécanique du Ti-6Al-4V déposé au laser. Dans les actes du 27e Symposium international annuel sur la fabrication de formes libres solides — Une conférence sur la fabrication additive SFF, Austin, Texas, États-Unis, 8-10 août 2016 ; pp. 670-679.
117. Xiong, J. ; Lei, Y. ; Li, R. Analyse par éléments finis et validation expérimentale du comportement thermique des pièces à parois minces dans la fabrication additive basée sur GMAW avec différentes températures de préchauffage du substrat. *Appl. Thermie. Ing.* 2017, 126, 43-52. [\[Référence croisée\]](#)

118. Zhao, J. ; Quan, GZ; Zhang, YQ; Maman, AA ; Jiang, LH ; Dai, WW ; Jiang, Q. Influence de la stratégie de chemin de dépôt sur les contraintes résiduelles et la déformation dans la fabrication additive par tissage fil-arc de pièces de disque. J. Mater.

Rés. Technologie. 2024, 30, 2242-2256. [\[Référence croisée\]](#)

119. Ouellet, T.; Croteau, M. ; Bois-Brochu, A. ; Lévesque, J. Fabrication additive par arc métallique d'alliages d'aluminium. Ing. Proc. 2023, 43, 16. [\[Référence croisée\]](#)

120. Zhang, J. ; Wang, X. ; Paddéa, S. ; Zhang, X. Comportement de propagation des fissures de fatigue dans le Ti-6Al-4V fabriqué avec additif fil + arc : Effets de la microstructure et des contraintes résiduelles. Maître. Des. 2016, 90, 551-561. [\[Référence croisée\]](#)

121. Gu, J. ; Gao, M. ; Yang, S. ; Bai, J. ; Zhai, Y. ; Ding, J. Microstructure, défauts et propriétés mécaniques de l'alliage Al[ $\text{sbnd}$ ]Cu4.3-Mg1.5 fabriqué de manière additive par fil + arc. Maître. Des. 2020, 186, 108357. [\[Réf. croisée\]](#)

122. Kindermann, RM; Roy, MJ ; Morana, R. ; Francis, JA Effets de l'hétérogénéité microstructurale et des défauts structurels sur le comportement mécanique des composants Inconel 718 fabriqués de manière additive fil + arc. Maître. Sci. Ing. A 2022, 839, 142826. [\[Référence croisée\]](#)

123. Yildiz, AS; Koc, BI; Yilmaz, O. Détermination du comportement thermique pour le processus de fabrication additive à arc filaire. Procedia Manuf. 2020, 54, 233-237. [\[Référence croisée\]](#)

124. Pawlik, J. ; Cie'slik, J. ; Bembenek, M. ; Góral, T. ; Kapayeva, S. ; Kapkenova, M. Sur l'influence du coefficient d'apport d'énergie linéaire/chaleur sur la dureté et la géométrie des cordons de soudure dans les revêtements GMAW Stringer riches en chrome. Matériaux 2022, 15, 6019. [\[Référence croisée\]](#)

125. Romanenko, D. ; Prakash, VJ; Kuhn, T. ; Moeller, C. ; Hintze, W. ; Emmelmann, C. Effet des paramètres du processus DED sur la distorsion et l'état de contrainte résiduelle des composants Ti-6Al-4V fabriqués de manière additive pendant l'usinage. Procedia CIRP 2022, 11, 271-276. [\[Référence croisée\]](#)

126. Mu, H. ; Polden, J. ; Li, Y. ; Lui, F. ; Xia, C. ; Pan, Z. Contrôle adaptatif basé sur un modèle couche par couche pour la fabrication additive à arc filaire de structures à parois minces. J. Intell. Fab. 2022, 33, 1165-1180. [\[Référence croisée\]](#)

127. Liu, B. ; Lan, J. ; Liu, H. ; Chen, X. ; Zhang, X. ; Jiang, Z. ; Han, J. Les effets des paramètres de traitement lors de la fabrication additive à arc métallique de l'acier inoxydable 308L sur la formation d'une structure à paroi mince. Matériaux 2024, 17, 1337. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)

128. Ali, MH; Han, YS Une analyse par éléments finis sur l'effet du modèle de balayage et de l'énergie sur les contraintes et déformations résiduelles dans la fabrication additive à arc filaire de l'acier EH36. Matériaux 2023, 16, 4698. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)

129. Chen, S. ; Lui, T. ; Wu, X. ; Lei, G. Effet synergique des carbures et déformation résiduelle sur le comportement mécanique du superalliage Ni-17 Mo-7Cr fabriqué par fabrication additive à arc filaire. Mater Lett. 2021, 287, 129291. [\[Réf. croisée\]](#)

130. Winczek, J. ; Gucwa, M. ; Makles, K. ; Mi'cian, M. ; Yadav, A. La quantité de chaleur apportée à la soudure par unité de longueur et par unité volume. IOP Conf. Ser. Maître. Sci. Ing. 2021, 1199, 012067. [\[Réf. croisée\]](#)

131. Koli, Y. ; Arora, S. ; Ahmad, S. ; Priya Yuvaraj, N. ; Khan, ZA Enquêtes et optimisation multi-réponses des paramètres du processus de transfert de métal à froid de fabrication additive à arc filaire pour la fabrication d'échantillons SS308L. J. Mater. Ing. Effectuer. 2023, 32, 2463-2475. [\[Référence croisée\]](#)

132. Cambon, C. ; Rouquette, S. ; Bendaoud, I. ; Bordreuil, C. ; Wimpory, R. ; Soulie, F. Simulation thermomécanique de couches superposées réalisées par fabrication additive fil + arc et transfert de métal à froid GMAW. Weld World 2020, 64, 1427-1435. [\[Référence croisée\]](#)

133. Omiyale, BO; Olugbade, TO ; Abioye, TE; Farayibi, PK Fabrication additive à l'arc filaire d'alliages d'aluminium pour l'aérospatiale et applications automobiles : une revue. Maître. Sci. Technologie. 2022, 38, 391-408. [\[Référence croisée\]](#)

134. Wang, J. ; Poêle, Z. ; Charpentier, K. ; Han, J. ; Wang, Z. ; Li, H. Étude comparative sur l'orientation cristallographique, la précipitation, la transformation de phase et la réponse mécanique de l'alliage NiTi riche en Ni fabriqué par WAAM à des températures de chauffage de substrat élevées. Maître. Sci. Ing. A 2021, 800, 140307. [\[CrossRef\]](#)

135. Ding, J. ; Colegrove, P. ; Martine, F. ; Williams, S. ; Wiktorowicz, R. ; Palt, MR Développement d'un dispositif de protection locale à flux laminaire pour la fabrication additive fil + arc. J. Mater. Processus. Technologie. 2015, 226, 99-105. [\[Référence croisée\]](#)

136. Tonelli, L. ; Laghi, V. ; Palerme, M. ; Trombetti, T. ; Ceschini, L. Plaques AA5083 (Al – Mg) produites par fabrication additive fil et arc : effet de l'orientation de l'échantillon sur la microstructure et les propriétés de traction. Programme. Ajouter. Fab. 2021, 6, 479-494. [\[Référence croisée\]](#)

137. Zhang, C. ; Shen, C. ; Hua, X. ; Li, F. ; Zhang, Y. ; Zhu, Y. Influence de la stratégie de planification du chemin de fabrication additive fil-arc sur l' état des contraintes résiduelles dans une seule couche d'accumulation. Int. J.Adv. Fab. Technologie. 2020, 111, 797-806. [\[Référence croisée\]](#)

138. Denlinger, ER ; Heigel, JC; Michaleris, P. ; Palmer, TA Effet du temps de séjour inter-couches sur la distorsion et les contraintes résiduelles dans la fabrication additive d'alliages de titane et de nickel. J. Mater. Processus. Technologie. 2015, 215, 123-131. [\[Référence croisée\]](#)

139. Gudur, S. ; Nagallapati, V. ; Pawar, S. ; Muvvala, G. ; Simhambhatla, S. Une étude sur l'effet du chauffage et du refroidissement du substrat sur la géométrie des perles dans la fabrication additive à arc filaire et sa corrélation avec la vitesse de refroidissement. Maître. Aujourd'hui Proc. 2019, 41, 431-436. [\[Référence croisée\]](#)

140. Singh, S. ; Jinoop, AN; Tarun Kumar, région du Grand Toronto ; Palani, IA ; Paul, CP ; Prashanth, KG Effet du retard intercouche sur la microstructure et les propriétés mécaniques des structures murales fabriquées par arc métallique. Matériaux 2021, 14, 4187. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)

141. Bermingham, MJ; Nicastro, L. ; Kent, D. ; Chen, Y. ; Dargusch, MS Optimisation des propriétés mécaniques des composants Ti-6Al-4V produits par fabrication additive fil + arc avec traitements thermiques post-processus. J. Alliages Compd. 2018, 753, 247-255. [\[Référence croisée\]](#)

142. Kumar, A. ; Maji, K. Sélection des paramètres de processus pour le dépôt de forme quasi nette dans la fabrication additive à arc filaire par Algorithme génétique. J. Mater. Ing. Effectuer. 2020, 29, 3334-3352. [\[Référence croisée\]](#)

143. Ali, Y. ; Henckell, P. ; Hildebrand, J. ; Reimann, J. ; Bergmann, JP; Barnikol-Oettler, S. Fabrication additive à l'arc filaire pour travail à chaud acier à outils avec procédé CMT. J. Mater. Processus. Technologie. 2019, 269, 109-116. [\[Référence croisée\]](#)

144. Laghi, V. ; Palerme, M. ; Tonelli, L. ; Gasparini, G. ; Ceschini, L. ; Trombetti, T. Propriétés de traction et caractéristiques microstructurales de l'acier inoxydable austénitique 304L produit par fabrication additive fil et arc. *Int. J. Adv. Fab. Technologie*. 2020, 106, 3693-3705. [\[Référence croisée\]](#)
145. Dinovitzer, M. ; Chen, X. ; Laliberté, J. ; Huang, X. ; Frei, H. Effet des paramètres du processus de fabrication additive par fil et arc (WAAM) sur la géométrie et la microstructure des perles. *Ajouter. Fab*. 2019, 26, 138-146. [\[Référence croisée\]](#)
146. Naveen Srinivas, M. ; Vimal, KEK; Manikandan, N. ; Sritharanandh, G. Optimisation paramétrique et modélisation de régression multiple pour la fabrication de plaques minces en alliage d'aluminium par fabrication additive à arc filaire. *Int. J. Interagir. Des. Fab*. 2022. [\[Référence croisée\]](#)
147. Zavdoveev, A. ; Pozniakov, V. ; Baudin, T. ; Kim, HS; Klochkov, I. ; Motrunich, S. ; Heaton, M. ; Aquier, P. ; Rogante, M. ; Denisenko, A. ; et coll. Optimisation des paramètres de soudage à l'arc pulsé pour la fabrication additive à l'arc au fil dans les applications d'aciers austénitiques. *Int. J. Adv. Fab. Technologie*. 2022, 119, 5175-5193. [\[Référence croisée\]](#)
148. Lu, X. ; Li, MV ; Yang, H. Comparaison de la fabrication additive fil-arc et poudre-laser pour le superalliage IN718 : considération unifiée pour la sélection des paramètres de processus en fonction de la densité d'énergie volumétrique. *Int. J. Adv. Fab. Technologie*. 2021, 114, 1517-1531. [\[Référence croisée\]](#)
149. Vora, J. ; Pandey, R. ; Dodiya, P. ; Patel, V. ; Khanna, S. ; Vaghasia, V. ; Chaudhari, R. Fabrication d'une structure à parois multiples grâce à l'étude paramétrique de la géométrie des perles du processus WAAM basé sur GMAW du SS309L. *Matériaux* 2023, 16, 5147. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
150. Athaib, NH; Haleem, AH ; Al-Zubaidy, B. Un examen de la fabrication additive à arc filaire (WAAM) de composites d'aluminium, processus, classification, avantages, défis et applications. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1973, 012083. [\[CrossRef\]](#)
151. Scharf-Wildenhain, R. ; Haelsig, A. ; Hensel, J. ; Wandtke, K. ; Schröpfer, D. ; Kannengiesser, T. Contrôle thermique et effets liés à la conception sur les propriétés et les contraintes de soudage des composants WAAM des aciers de construction à haute résistance. *Monde de soudure* 2023, 67, 55-65. [\[Référence croisée\]](#)
152. Zhang, J. ; Zhang, X. ; Wang, X. ; Ding, J. ; Traoré, Y. ; Paddéa, S. ; Williams, S. Sélection du chemin de fissure à l'interface du forgé et du fil + arc additif fabriqué Ti-6Al-4V. *Maître. Des.* 2016, 104, 365-375. [\[Référence croisée\]](#)
153. Yang, YH; Guan, ZP ; Maman, PK ; Ren, MW; Jia, HL; Zhao, P. ; Zha, M. ; Wang, HY Fabrication additive à l'arc filaire d'un nouvel alliage ATZM31 Mg : évolution de la microstructure et propriétés mécaniques. *J. Magnés. Alliages* 2023, 10, 44. [\[CrossRef\]](#)
154. Koli, Y. ; Yuvaraj, N. ; Sivanandam, A. ; Vipin. Contrôle du phénomène de bossage et analyse des propriétés mécaniques des échantillons fabriqués par fabrication additive Al-Si à l'arc filaire à l'aide d'un processus de transfert de métal à froid. *Proc. Inst. Mécanique. Ing. Partie C J. Mech. Ing. Sci.* 2022, 236, 984-996. [\[Référence croisée\]](#)
155. Jing, Y. ; Croc, X. ; Xi, N. ; Chang, T. ; Duan, Y. ; Huang, K. Amélioration des propriétés de résistance à la traction et de fatigue de l'alliage d'aluminium 2319 fabriqué de manière additive par fil-arc par grenailage par choc laser de surface. *Maître. Sci. Ing. A* 2023, 864, 144599. [\[CrossRef\]](#)
156. Chi, J. ; Cai, Z. ; Wan, Z. ; Zhang, H. ; Chen, Z. ; P'tit, Li, Y. ; Peng, P. ; Guo, W. Effets du traitement thermique combiné au choc laser sur l'alliage de titane Ti17 fabriqué par fil et arc additif : microstructures, contraintes résiduelles et propriétés mécaniques. *Le surf. Manteau. Technologie*. 2020, 396, 125908. [\[Référence croisée\]](#)
157. Sousa, BM; Coelho, FGF; Junior, GMM ; de Oliveira, professionnel de la santé ; da Silva, NN Analyse thermique et microstructurale des intersections fabriquées par fabrication additive à arc filaire (WAAM). *Monde soudé* 2024, 68, 1653-1669. [\[Référence croisée\]](#)
158. Ma, D. ; Xu, C. ; Sui, S. ; Tian, J. ; Guo, C. ; Wu, X. ; Zhang, Z. ; Remennik, S. ; Shechtman, D. Évolution de la microstructure et propriétés mécaniques de l'alliage Mg-Gd-Y-Zr fabriqué de manière additive par arc métallique par post-traitements thermiques. *Physique virtuelle. Prototype*. 2023, 18, 1-22. [\[Référence croisée\]](#)
159. Szost, BA; Terzi, S. ; Martine, F. ; Boisselier, D. ; Prytuliak, A. ; Pirling, T. ; Hofmann, M. ; Jarvis, DJ Une étude comparative des techniques de fabrication additive : contraintes résiduelles et analyse microstructurale des composants Ti-6Al-4V imprimés CLAD et WAAM. *Maître. Des.* 2016, 89, 559-567. [\[Référence croisée\]](#)
160. Kumar, A. ; Maji, K. ; Shrivastava, A. Enquêtes sur la géométrie des dépôts et les propriétés mécaniques de l'additif pour arc métallique Fabriqué en Inconel 625. *Int. J. Précis. Ing. Fab.* 2023, 24, 1483-1500. [\[Référence croisée\]](#)
161. Vázquez, L. ; Rodriguez, Minnesota ; Rodriguez, moi; Alvarez, P. Influence des traitements thermiques post-dépôt sur la microstructure et propriétés de traction des pièces en ti-6al-4v fabriquées par cmt-waam. *Métaux* 2021, 11, 1161. [\[CrossRef\]](#)
162. Geng, H. ; Li, J. ; Xiong, J. ; Lin, X. ; Zhang, F. Optimisation de l'alimentation en fil pour la fabrication additive basée sur GTAW. *J. Mater. Processus. Technologie*. 2017, 243, 40-47. [\[Référence croisée\]](#)
163. Li, R. ; Xiong, J. ; Lei, Y. Enquête sur l'évolution des contraintes thermiques induite par la fabrication additive par fil et arc pour les pièces circulaires à parois minces. *J. Manuf. Processus*. 2019, 40, 59-67. [\[Référence croisée\]](#)
164. Gupta, NK ; Ganesan, GB ; Karadé, S. ; Mehta, AK ; Karunakaran, KP Effet de plusieurs technologies sur la minimisation des contraintes résiduelles dans la fabrication additive. Dans *Actes de l'ICRS 11 — 11e Conférence internationale sur les contraintes résiduelles*, Nancy, France, 27-30 mars 2022 ; p. 040150.
165. Ali, MH; Han, YS Effet des transformations de phase sur la stratégie de numérisation dans la fabrication de Waam. *Matériaux* 2021, 14, 7871. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
166. Gorniakov, V. ; Soleil, Y. ; Ding, J. ; Williams, S. Modélisation et optimisation du processus hybride de fabrication additive à arc filaire et laminage à haute pression. *Maître. Des.* 2022, 223, 111121. [\[Réf. croisée\]](#)
167. Gornyakov, V. Modélisation et évaluation efficaces du laminage pour l'atténuation des contraintes résiduelles et de la distorsion dans l'additif pour arc métallique Fabrication. *doctorat Thèse*, Cranfield University, Cranfield, Royaume-Uni, 2021. Volume 7. p. 265.

168. Zhang, T. ; Li, H. ; Gong, H. ; Ding, J. ; Wu, Y. ; Diao, C. ; Zhang, X. ; Williams, S. Fabrication additive hybride fil-arc et effet du processus de laminage sur la microstructure et les propriétés de traction de l'Inconel 718. J. Mater. Processus. Technologie. 2022, 299, 321-326. [\[Référence croisée\]](#)
169. Srivastava, S. ; Garg, RK; Sharma, VS ; Sachdeva, A. Mesure et atténuation des contraintes résiduelles dans la fabrication additive filaire : un examen de l'approche de modélisation du continuum à l'échelle macro. Cambre. Calculer. Méthodes Ing. 2021, 28, 3491-3515. [\[Référence croisée\]](#)
170. Montevocchi, F. ; Venturini, G. ; Scippa, A. ; Campatelli, G. Modélisation par éléments finis du processus de fabrication additive filaire-arc. Procedia CIRP 2016, 55, 109-114. [\[Référence croisée\]](#)
171. Bankong, BD; Abioye, TE; Olugbade, TO ; Zuhailawati, H. ; Gbadeyan, OO; Ogedengbe, TI Examen des méthodes de post-traitement pour la fabrication additive à arc filaire de haute qualité. Maître. Sci. Technologie. 2023, 39, 129-146. [\[Référence croisée\]](#)
172. Hönnige, JR ; Colegrove, Pennsylvanie ; Ahmad, B. ; Fitzpatrick, MOI ; Ganguly, S. ; Lee, TL; Williams, SW Contrôle des contraintes résiduelles et de la texture dans les intersections de fil Ti-6Al-4V + arc fabriquées de manière additive par soulagement des contraintes et roulement. Maître. Des. 2018, 150, 193-205. [\[Référence croisée\]](#)
173. Li, K. ; Klecka, MA; Chen, S. ; Xiong, W. Fabrication additive fil-arc et optimisation du post-traitement thermique sur la microstructure et propriétés mécaniques de l'acier de nuance 91. Ajouter. Fab. 2021, 37, 101734. [\[Réf. croisée\]](#)
174. Nie, L. ; Wu, Y. ; Gong, H. ; Chen, D. ; Guo, X. Effet du grenaillage sur la redistribution du champ de contraintes résiduelles lors du soudage par friction malaxage de l'alliage d'aluminium 2219. Matériaux 2020, 13, 3169. [\[CrossRef\]](#)
175. Soleil, R. ; P'tit, Zhu, Y. ; Guo, W. ; Peng, P. ; Cong, B. ; Soleil, J. ; Che, Z. ; Li, B. ; Guo, C. ; et coll. Contrôle de la microstructure, des contraintes résiduelles et des propriétés de traction de l'alliage d'aluminium 2319 fabriqué par additif fil-arc avec grenaillage par choc laser. J. Alliages Compd. 2018, 747, 255-265. [\[Référence croisée\]](#)
176. Ermakova, A. ; Razavi, N. ; Cabeza, S. ; Gadalska, E. ; Reid, M. ; Paradowska, A. ; Ganguly, S. ; Berto, F. ; Mehmanparast, A. L' effet du traitement de surface et de l'orientation sur le taux de croissance des fissures de fatigue et la répartition des contraintes résiduelles des composants en acier à faible teneur en carbone fabriqués de manière additive par arc métallique. J. Mater. Rés. Technologie. 2023, 24, 2988-3004. [\[Référence croisée\]](#)
177. Ding, Y. ; Muñoz-Lerma, JA; Trask, M. ; Chou, S. ; Marcheur, A. ; Brochu, M. Considérations sur la microstructure et les propriétés mécaniques dans la fabrication additive d'alliages d'aluminium. Mme Bull. 2016, 41, 745-751. [\[Référence croisée\]](#)
178. Busachi, A. ; Erkoyuncu, J. ; Colegrove, P. ; Martine, F. ; Ding, J. Conception d'un système de fabrication basé sur WAAM pour les applications de défense. Procedia CIRP 2015, 37, 48-53. [\[Référence croisée\]](#)
179. Abusalma, H. ; Eisazadeh, H. ; Hejripour, F. ; Bunn, J. ; Aidun, D. Étude paramétrique de la formation de contraintes résiduelles dans le fil et l'arc La fabrication additive. J. Manuf. Processus. 2022, 75, 863-876. [\[Référence croisée\]](#)
180. Kyvelou, P. ; Huang, C. ; Li, J. ; Gardner, L. Contraintes résiduelles dans les sections en I en acier renforcées par fabrication additive à l'arc filaire. Dans Structures ; Elsevier : Amsterdam, Pays-Bas, 2024 ; Tome 60.
181. Wu, B. ; Poêle, Z. ; Ding, D. ; Cuiuri, D. ; Li, H. ; Xu, J. ; Norrish, J. Une revue de la fabrication additive de métaux à l'arc filaire : propriétés, défauts et amélioration de la qualité. J. Manuf. Processus. 2018, 35, 127-139. [\[Référence croisée\]](#)
182. Colegrove, Pennsylvanie ; Donoghue, J. ; Martine, F. ; Gu, J. ; Prangnell, P. ; Hönnige, J. Application des méthodes de déformation globale pour l'amélioration des propriétés microstructurales et matérielles et le contrôle des contraintes résiduelles et de la distorsion dans les composants fabriqués de manière additive. Scr. Maître. 2017, 135, 111-118. [\[Référence croisée\]](#)
183. Karmuhilan, M. ; Sood, AK Modèle de processus intelligent pour la prédiction de la géométrie des billes dans WAAM. Maître. Aujourd'hui Proc. 2018, 5, 24005-24013. [\[Référence croisée\]](#)
184. Tang, S. ; Wang, G. ; Huang, C. ; Li, R. ; Zhou, S. ; Zhang, H. Enquête, modélisation et optimisation des zones anormales des cordons de soudure dans la fabrication additive par fil et arc. Prototype rapide J. 2020, 26, 183-195. [\[Référence croisée\]](#)
185. Veiga, F. ; Suárez, A. ; Aldalur, E. ; Bhujangrao, T. Effet du mode de transfert de métal sur la symétrie de la géométrie des perles en waam aluminium. Symétrie 2021, 13, 1245. [\[CrossRef\]](#)
186. Ding, D. ; Poêle, Z. ; Cuiuri, D. ; Li, H. Un modèle de chevauchement multibilles pour la fabrication robotisée de fils et d'arcs additifs (WAAM). Calcul robotique. Intégré. Fab. 2015, 31, 101-110. [\[Référence croisée\]](#)
187. Geng, H. ; Xiong, J. ; Huang, D. ; Lin, X. ; Li, J. Un modèle de prédiction de la taille géométrique des couches dans la fabrication additive de fils et d'arcs utilisant la méthodologie de surface de réponse. Int. J. Adv. Fab. Technologie. 2017, 93, 175-186. [\[Référence croisée\]](#)
188. Banaee, SA; Kapil, A. ; Maréfat, F. ; Sharma, A. Modèle de chevauchement généralisé pour la fabrication additive multi-matériaux à arc filaire (WAAM). Physique virtuelle. Prototype. 2023, 18, e2210541. [\[Référence croisée\]](#)
189. Surovi, NA; Soh, GS Acoustic, identification des défauts géométriques basée sur les caractéristiques dans la fabrication additive à arc filaire. Physique virtuelle. Prototype. 2023, 18, e2210553. [\[Référence croisée\]](#)
190. Zhao, Yukon ; Li, GT ; Liu, A. Optimisation du modèle de qualité géométrique pour la fabrication additive de fils et d'arcs basée sur l'algorithme adaptatif multi-objectifs du loup gris. Informatique douce. 2020, 24, 17401-17416. [\[Référence croisée\]](#)
191. Alomari, Y. ; Birosz, MT; Andó, M. Optimisation de l'orientation des pièces pour le processus de fabrication additive de fils et d'arcs pour les convexes et des formes non convexes. Sci. Rep.2023 , 13, 2203. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
192. Wani, ZK; Abdullah, AB Contrôle de la géométrie des billes dans le profil fabriqué par additif à arc métallique - Une revue. Pertanika J. Sci. Technologie. 2024, 32, 917-942. [\[Référence croisée\]](#)
193. Vora, J. ; Parikh, N. ; Chaudhari, R. ; Patel, VK ; Paramar, H. ; Pimenov, DY; Giasin, K. Optimisation de la morphologie des perles pour l'arc filaire à base de GMAW d'acier 2,25 Cr-1,0 Mo à l'aide de fils à âme métallique. Appl. Sci. 2022, 12, 5060. [\[CrossRef\]](#)
194. Wang, C. ; Bai, H. ; Ren, C. ; Croc, X. ; Lu, B. Un modèle de prédiction complet de la géométrie des perles dans les additifs de fil et d'arc fabrication. J. Phys. Conf. Ser. 2020, 1624, 022018. [\[Réf. croisée\]](#)

195. Chintala, A. ; Tejaswi Kumar, M. ; Sathishkumar, M. ; Arivazhagan, N. ; Manikandan, M. Développement technologique pour la production d'Inconel 625 dans des applications aérospatiales à l'aide d'un processus de fabrication additive à arc filaire. J. Mater. Ing. Effectuer. 2021, 30, 5333-5341.  
[\[Référence croisée\]](#)
196. Hamrani, A. ; Bouarab, FZ; Agarwal, A. ; Ju, K. ; Akbarzadeh, H. Avancées et applications des procédés à fils multiples dans la fabrication additive : une revue systématique complète. Physique virtuelle. Prototype. 2023, 18, e2273303. [\[Référence croisée\]](#)
197. Queguineur, A.; Rückert, G. ; Cortial, F. ; Hascoët, JY Évaluation de la fabrication additive par arc filaire pour des composants de grandes dimensions dans des applications navales. Weld World 2018, 62, 259-266. [\[Référence croisée\]](#)
198. Li, J. ; Cui, Q. ; Pan, C. ; Xu, P. ; Luo, W. ; Li, J. Châssis de véhicule intégré fabriqué par fabrication additive fil et arc : génération de structure, optimisation du radian d'impression et prévision des performances. Physique virtuelle. Prototype. 2024, 19, e2301483.  
[\[Référence croisée\]](#)
199. Singh, SR; Khanna, P. Fabrication additive à arc filaire (WAAM) : Un nouveau processus pour façonner les matériaux d'ingénierie. Maître. Aujourd'hui Proc. 2021, 44, 118-128. [\[Référence croisée\]](#)
200. Vishnukumar, M. ; Pramod, R. ; Rajesh Kannan, A. Fabrication additive à l'arc filaire pour la réparation des structures en aluminium dans les applications marines. Maître. Lett. 2021, 299, 130112. [\[Réf. croisée\]](#)
201. Shah, A. ; Aliyev, R. ; Zeidler, H. ; Krinke, S. Un examen des développements récents et des défis du processus de fabrication additive à arc métallique (WAAM). J. Manuf. Maître. Processus. 2023, 7, 97. [\[Réf. croisée\]](#)
202. Chaturvedi, M. ; Scutelnicu, E. ; Rusu, CC; Mistodie, LR; Mihailescu, D. ; Subbiah, Fabrication additive AV Wire Arc : revue des découvertes récentes et des défis liés aux applications industrielles et à la caractérisation des matériaux. Métaux 2021, 11, 939.  
[\[Référence croisée\]](#)
203. Bo, tilă, LN Considérations concernant les alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie aéronautique/aérospatiale et l'utilisation d'additifs pour arc filaire fabriquant du WAAM pour leurs applications industrielles. Essai 2020, 4, 9-24.
204. Liu, J. ; Xu, Y. ; Ge, Y. ; Hou, Z. ; Chen, S. Fabrication additive par fil et arc de composants métalliques : revue des recherches récentes développements. Int. J. Adv. Fab. Technologie. 2020, 111, 149-198. [\[Référence croisée\]](#)
205. Arana, M. ; Ukar, E. ; Rodriguez, moi; Aguilar, D. ; Álvarez, P. Influence de la stratégie de dépôt et du traitement thermique sur les propriétés mécaniques et la microstructure des composants WAAM en aluminium 2319. Maître. Des. 2022, 221, 110974. [\[Réf. croisée\]](#)
206. Thapliyal, S. Défis associés à la fabrication additive à arc filaire (WAAM) d'alliages d'aluminium. Maître. Aujourd'hui Proc. 2019, 221, 112006. [\[Réf. croisée\]](#)
207. Zhao, Y. ; Li, F. ; Chen, S. ; Lu, Z. Stratégie de planification de processus basée sur des blocs unitaires de WAAM pour un composant complexe en forme de coque. Int. J. Adv. Fab. Technologie. 2019, 104, 3915-3927. [\[Référence croisée\]](#)
208. Pantalón, H. ; Arora, A. ; Gopakumar, GS ; Chadha, U. ; Saeidi, A. ; Patterson, AE Applications de la fabrication additive à arc filaire (WAAM) pour la fabrication de composants aérospatiaux. Int. J. Adv. Fab. Technologie. 2023, 127, 4995-5011. [\[Référence croisée\]](#)
209. Bachus, NA; Strantz, M. ; Clausen, B. ; D'Elia, CR ; Colline, M. ; Ko, JP ; Païen, DC ; Brown, DW Nouvelle cartographie des contraintes résiduelles triaxiales en vrac dans un échantillon de pont fabriqué de manière additive en couplant la diffraction des rayons X à dispersion d'énergie et les mesures de la méthode de contour. Ajouter. Fab. 2024, 83, 104070. [\[Réf. croisée\]](#)
210. Gordon, JV ; Haden, CV; Nied, HF; Vinci, RP ; Harlow, DG Anisotropie, texture et contraintes résiduelles de croissance des fissures de fatigue dans l'acier austénitique fabriqué par fabrication additive au fil et à l'arc. Maître. Sci. Ing. A 2018, 115, 60-66. [\[Référence croisée\]](#)

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.