

**Influence des paramètres
de soudage à l'arc électrique
sur les concentrations de fumées
et leurs composantes métalliques
État des connaissances**

Philippe Sarazin
Bouchra Bakhiyi
Martine Lévesque
Caroline Godin
Joseph Zayed

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1085

NOS RECHERCHES travaillent pour vous

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2020
ISBN : 978-2-89797-106-9
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail
Février 2020

Influence des paramètres de soudage à l'arc électrique sur les concentrations de fumées et leurs composantes métalliques

État des connaissances

Philippe Sarazin¹, Bouchra Bakhiyi², Martine Lévesque²,
Caroline Godin³, Joseph Zayed²

¹ IRSST

² Université de Montréal

³ MultiPrévention ASP

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1085



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document.

En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier MM. Nicolas Roy et Guillaume Piché, de Groupe ADF inc., ainsi que MM. Théo Ouellet et Luc Lafrenière, du Centre de métallurgie du Québec, pour leur contribution importante dans l'élaboration du devis de recherche et tout au long de l'évolution du projet. Ils expriment leur gratitude envers M^{mes} Marie-France d'Amours et Isabelle Vézina, conseillères en valorisation de la recherche à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), pour l'organisation des rencontres avec le comité de suivi du projet.

SOMMAIRE

Les opérations de soudage à l'arc électrique sont largement répandues dans de nombreux secteurs industriels comme ceux de la métallurgie, de la construction, de l'énergie hydroélectrique et de l'automobile. Les procédés de soudage principalement utilisés au Québec sont le soudage à l'arc sous gaz protecteur avec fil plein (*Gas Metal Arc Welding, GMAW*), le soudage à l'arc électrique avec fil fourré (*Flux Cored Arc Welding, FCAW; Metal Cored Arc Welding, MCAW*), le soudage à l'arc avec électrode enrobée (*Shielded Metal Arc Welding, SMAW*) et le soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (*Gas Tungsten Arc Welding, GTAW*).

En raison des températures élevées atteintes au point de fusion, les opérations de soudage produisent des fumées potentiellement toxiques constituées de particules et de gaz dont la composition et la proportion varient en fonction de nombreux facteurs, dont les procédés utilisés, la position de soudage et la nature des pièces à souder. Les risques qui sont associés à ces fumées et à leurs constituants (principalement le manganèse (Mn), le chrome hexavalent (Cr(VI)) et le nickel (Ni)) incluent la cancérogénicité, les atteintes au système nerveux central et les maladies bronchopulmonaires. Les fumées de soudage ont d'ailleurs été classées cancérogènes groupe 1 (cancérogène pour l'homme) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) en 2017.

La protection des travailleurs aux fumées de soudage est d'autant plus nécessaire que le nombre de Québécois exerçant des activités de soudage est élevé, soit environ 24 000, et que les normes et les valeurs limites d'exposition des fumées et de ses constituants sont fréquemment dépassées. Actuellement, la protection des travailleurs consiste à combiner des dispositifs de captage à la source, la ventilation générale ainsi que des équipements de protection individuelle. Ces approches ne permettent toutefois pas de protéger adéquatement la zone respiratoire des travailleurs dans plusieurs situations de travail. Or, la compréhension de l'influence des paramètres de soudage, tels le type d'électrode, ses caractéristiques ou encore la composition du gaz protecteur, offre une opportunité ayant pour but ultime de réduire l'exposition des travailleurs aux fumées de soudage.

Ainsi, l'objectif de la présente recherche est de contribuer à l'avancement des connaissances sur l'influence des paramètres de soudage sur les concentrations de fumées et leurs composantes métalliques générées lors des opérations de soudage à l'arc électrique.

Pour ce faire, une recherche documentaire sous forme de revue systématique de la littérature dans les bases de données bibliographiques, dans les bases de données factuelles et dans la littérature grise a été entreprise. Dix bases de données bibliographiques et douze sources en ligne, incluant des sites Web institutionnels et ceux de groupements professionnels, ont été interrogées sur une période allant de 2000 à 2018. En tout, 1764 références ont été recensées dont quarante-sept ont été retenues. Quarante-trois d'entre elles font état de travaux menés dans des conditions expérimentales et seulement quatre exposent des travaux effectués sur le terrain. Au total, 21 paramètres de soudage ont été évalués, conduisant ainsi à 85 situations d'évaluation (une situation d'évaluation correspond à la mesure de l'influence d'un paramètre de soudage sur le niveau de fumées générées, en matière de fumées totales et de contaminants

particuliers). Le gaz de protection et les caractéristiques de l'électrode ont été les paramètres les plus étudiés (chacun étant associé à environ 19 % des situations d'évaluation), suivis de la tension de courant et des procédés de soudage (respectivement 13 % et 8 % des situations d'évaluation). La majorité des situations d'évaluation étaient en lien avec le procédé GMAW¹ (65 %), suivie du SMAW (18 %), du FCAW (11 %) et finalement du GTAW et du MCAW (3 % chacun).

Les résultats dont font état les références retenues mettent en évidence que le procédé SMAW est celui qui génère le plus de fumées alors que le procédé GTAW est celui qui en produit le moins. Pour le procédé GMAW, l'utilisation des modes pulsés et du CMT™ (variante technique du GMAW en court-circuit) génère quant à elle moins de fumées de Mn et de Cr(VI) que le procédé GMAW conventionnel. Les résultats ont toutefois montré que, bien qu'émettant plus de fumées, le procédé SMAW ne génère que peu de particules ultrafines (PUF) lorsque comparé aux procédés GMAW et GTAW.

Les résultats rapportés ont, en outre, clairement montré que l'augmentation de la fraction de gaz carbonique (CO₂) dans un mélange de gaz de protection induit une augmentation des quantités de fumées générées. L'augmentation de la tension, de l'intensité du courant et du diamètre de l'électrode entraîne également une plus grande génération de fumées et il en est de même lors de l'utilisation d'un flux plus important, au cœur même de l'électrode (FCAW) ou dans son enrobage (SMAW). Quant au procédé GMAW, le mode de transfert en pulvérisation pulsée entraîne une réduction des quantités de fumées générées comparativement aux modes de transfert en court-circuit et en pulvérisation axiale.

Globalement, cette recherche a permis d'observer que de nombreux paramètres de soudage influent sur la génération de fumées totales, de contaminants particuliers et de PUF, en les réduisant ou en les augmentant. Des études-terrains doivent cependant être menées pour bien évaluer l'influence des paramètres les plus prometteurs. Une attention particulière devra être accordée à la caractérisation de la taille des particules considérant leur nature chimique et leur risque potentiel pour la santé, plus spécifiquement pour les systèmes respiratoire et neurologique.

¹ Afin de ne pas alourdir le texte, les auteurs ont choisi d'utiliser les abréviations anglaises.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xi
1. INTRODUCTION	1
1.1 Soudage à l'arc électrique : portrait technique	1
1.1.1 Procédés de soudage principalement utilisés dans la fabrication de structures d'acier et d'équipements industriels	2
1.1.2 Procédé de soudage principalement utilisé dans les chantiers de construction, pour la maintenance et la réparation	5
1.1.3 Procédé de soudage principalement utilisé dans les industries pharmaceutiques, alimentaires et aérospatiales	6
1.2 Problématique de santé du travail.....	7
2. OBJECTIF DE RECHERCHE.....	13
3. MÉTHODOLOGIE	15
3.1 Critères d'éligibilité.....	15
3.2 Sources documentaires et stratégie de recherche	16
3.3 Processus de sélection des études.....	19
3.4 Compilation des données	20
3.5 Synthèse descriptive des résultats.....	21
3.6 Évaluation de la qualité des études retenues.....	21
4. RÉSULTATS	23
4.1 Résultats de la recherche documentaire	23
4.1.1 Diagramme de flux	23
4.1.2 Portrait général des études retenues.....	24
4.2 Résultats rapportés par type de procédé de soudage.....	27
4.2.1 GMAW (Gas Metal Arc Welding).....	27
4.2.2 SMAW (Shielded Metal Arc Welding - soudage à l'arc avec électrode enrobée).....	39
4.2.3 FCAW (Flux Cored Arc Welding).....	43

4.2.4	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding - soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène).....	45
4.2.5	MCAW (Metal-Cored Arc Welding - soudage à l'arc avec fil fourré de poudres métalliques)	46
4.3	Résultats rapportés en évaluant différents types de procédés	48
5.	DISCUSSION	51
5.1	Sommaire des résultats rapportés par les études retenues.....	51
5.1.1	Sommaire des résultats après modification de certains paramètres de soudage	51
5.1.2	Sommaire des résultats après évaluation des différents types de procédés	54
5.2	Limites de la recherche.....	55
5.2.1	Limites des études retenues.....	55
5.2.2	Limites des résultats.....	56
6.	CONCLUSION.....	57
	BIBLIOGRAPHIE	59
	ANNEXE A Exemple de résultats issus de l'interrogation du moteur de recherche Embase à l'aide des mots-clés	65
	ANNEXE B Liste des études retenues	67
	ANNEXE C Exemple de fiche d'extraction décrivant les études retenues	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Principaux polluants particuliers et gazeux contenus dans les fumées de soudage.....	9
Tableau 2.	Critères d'inclusion et d'exclusion utilisés dans les études.....	17
Tableau 3.	Sources documentaires consultées	18
Tableau 4 .	Portrait général des 47 études retenues	24
Tableau 5.	Nombre de situations d'évaluation pour les 21 paramètres de soudage ciblés par les études retenues.....	25
Tableau 6.	Situations d'évaluation par paramètre de soudage et par procédé.....	27
Tableau 7.	Paramètres de soudage évalués avec le procédé GMAW	28
Tableau 8.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du gaz de protection.....	29
Tableau 9.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification de la tension du courant	33
Tableau 10.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du mode de transfert.....	35
Tableau 11.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification de l'électrode	36
Tableau 12.	Résultats rapportés durant le procédé GMAW après modification de l'intensité du courant.....	37
Tableau 13.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification de la vitesse du fil	38
Tableau 14.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du diamètre des gouttes transférées au métal de base.....	38
Tableau 15.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du métal de base.....	38
Tableau 16.	Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification d'autres paramètres.....	39
Tableau 17.	Paramètres de soudage évalués avec le procédé SMAW	40
Tableau 18.	Résultats rapportés avec le procédé SMAW après modification de l'électrode	41
Tableau 19.	Résultats rapportés avec le procédé SMAW après modification de l'intensité du courant.....	42
Tableau 20.	Résultats rapportés avec le procédé SMAW après modification d'autres paramètres.....	43
Tableau 21.	Paramètres de soudage évalués avec le procédé FCAW	43

Tableau 22.	Résultats rapportés avec le procédé FCAW après modification de l'électrode	44
Tableau 23.	Résultats rapportés avec le procédé FCAW après modification de l'intensité du courant	44
Tableau 24.	Résultats rapportés avec le procédé FCAW après modification d'autres paramètres de soudage	45
Tableau 25.	Résultats rapportés avec le procédé GTAW après modification de l'intensité du courant et du gaz de protection	46
Tableau 26.	Résultats rapportés avec le procédé MCAW, après modification du gaz de protection et de la composition de l'électrode.....	47
Tableau 27.	Résultats rapportés après modification des procédés de soudage.....	49
Tableau 28.	Paramètres évalués avec plus d'un procédé de soudage	52
Tableau 29.	Sommaire des principaux résultats rapportés après modification de paramètres de soudage	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Principaux procédés de soudage à l'arc électrique, reliés au type d'électrode utilisée.	2
Figure 2.	Processus de sélection des études.	23

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADSA :	Alveolar Deposited Surface Area
AWS :	American Welding Society
CA :	Courant alternatif
CC :	Courant continu
CCHST :	Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail
CIRC :	Centre international de recherche sur le cancer
CMT™ :	Cold Metal Transfer
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CWA :	Canadian Welding Association
EU-OSHA :	European Agency for Safety and Health at Work
FCAW :	Flux Cored Arc Welding
GMAW :	Gas Metal Arc Welding
GMAW-P :	Gas Metal Arc Welding-Pulsed arc
GTAW :	Gas Tungsten Arc Welding
HSE :	Health and Safety Executive
INERIS :	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRS :	Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (France)
MAG :	Metal Active Gas
MCAW :	Metal Cored Arc Welding
MIG :	Metal Inert Gas
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA :	Occupational Safety and Health Administration

PICO :	Population/participants/processus, intervention, contrôle, outcome
PUF :	Particules ultrafines
RMD™ :	Regulated Metal Deposition
RSST :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SAW :	Submerged Arc Welding
SMAW :	Shielded Metal Arc Welding
STT™ :	Surface Tension Transfer
TEOS :	Orthosilicate de tétraéthyle
TMS :	Tétraméthylsilane
VEMP :	Valeur d'exposition moyenne pondérée

1. INTRODUCTION

Les opérations de soudage, incluant les techniques connexes de coupage, de brasage ou de gougeage, sont largement répandues dans de très nombreux secteurs industriels comme ceux de la métallurgie, de la construction, de l'énergie hydroélectrique et de l'automobile. Les activités de soudage sont utilisées aussi bien dans la fabrication de pièces métalliques, la coupe de métaux que pour la modification, la réparation et la maintenance d'équipements. Elles se pratiquent autant en atelier que sur un chantier (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2017; Godin, 2014; Institut National de Recherche Scientifique, 2012).

Trois grandes catégories d'activités de soudage prédominent : a) le soudage à l'arc électrique est le plus répandu, notamment pour la fabrication de charpentes en métal ou en alliage et pour l'installation de tuyauterie; b) le soudage par résistance, ne produisant pas d'arc électrique et dont le soudage par point est très souvent utilisé dans l'industrie automobile; c) le soudage au gaz ou procédé oxygaz, utilisant l'oxygène et un gaz inflammable (acétylène ou propane), communément employé pour le soudage et le coupage des métaux et des alliages. Chacune de ces catégories comporte des procédés différents qui varient selon l'équipement utilisé ainsi que selon le type de pièce à souder (Godin, 2014; Occupational Safety and Health Administration, 2013).

1.1 Soudage à l'arc électrique : portrait technique

Sur plus de 80 procédés de soudage différents communément utilisés, la grande majorité des opérations de soudage est réalisée avec des procédés à l'arc électrique (Keane, M., Siert, Stone et Chen, 2016). Ces procédés consistent à faire circuler un courant électrique dans une électrode. L'arc électrique fournit la source de chaleur nécessaire à la fusion des métaux et des alliages de base. Il est amorcé par ionisation d'un gaz ou à l'aide d'un courant électrique de haute fréquence (Godin, 2014). Le type d'électrode employé diffère selon le procédé utilisé dont les principaux types sont présentés à la figure 1.

Ainsi, l'électrode peut être de type fusible, capable de fondre, ou de type non fusible. L'électrode fusible se présente sous forme de fil ou de baguette, avec présence ou non d'un flux. Ce dernier peut faire partie intégrante de l'électrode, en son cœur (fil-électrode fourré) ou en formant son enrobage (électrode baguette enrobée), ou encore être déposé sous forme de poudres. Lorsque le fil-électrode ne contient pas de flux, il est dit plein et nu. Il est toutefois possible de lui associer un flux pulvérulent, dont la fusion va submerger totalement l'arc électrique ainsi que le métal en fusion et créer ainsi un environnement protecteur. L'électrode non fusible est généralement en tungstène, associée ou non à des éléments d'alliage.

Lors des activités de soudage, les métaux ont tendance à réagir avec l'oxygène (O_2) et l'azote (N) contenus dans l'air pour former des oxydes et des nitrures. L' O_2 est également très réactif avec le carbone et tend à former du monoxyde de carbone. Afin de contrôler les nombreux défauts de soudage pouvant résulter de ces réactions chimiques, l'opération est effectuée sous protection gazeuse (gaz actifs ou gaz inertes) lorsqu'il n'y a pas de protection au moyen de flux.

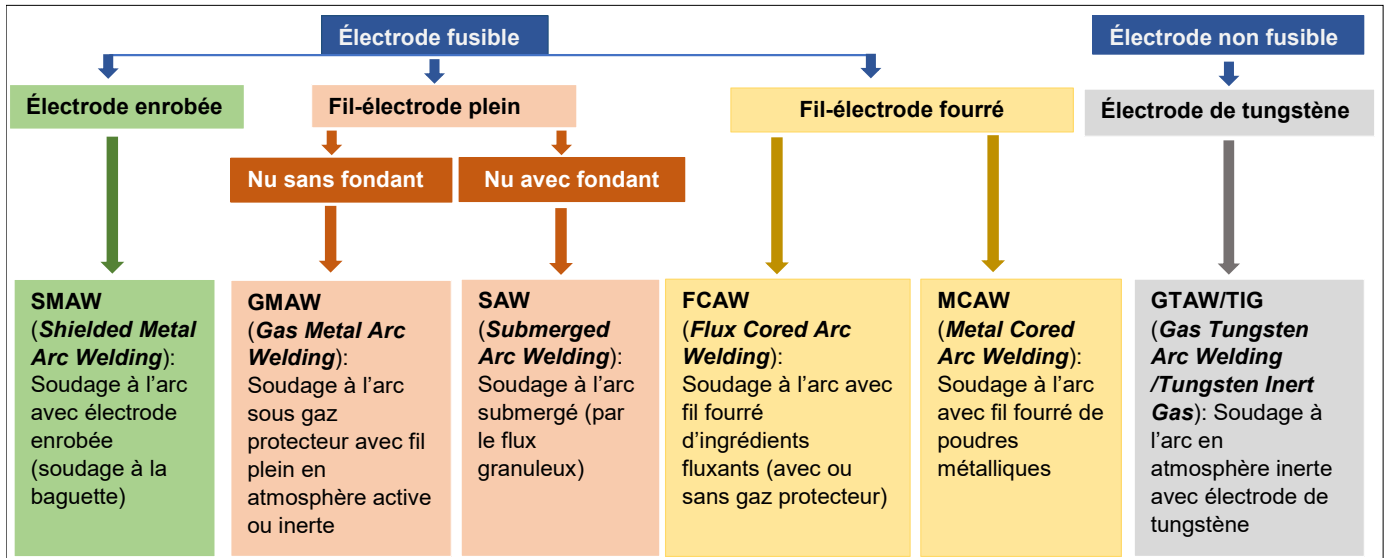


Figure 1. Principaux procédés de soudage à l'arc électrique, reliés au type d'électrode utilisée.

Sources : adaptée de (Godin, 2014; Institut national de recherche scientifique, 2010; Praxair Technology Inc., 2019).

Le gaz a également un rôle prépondérant dans les propriétés du cordon de soudure. Les principaux gaz actifs utilisés sont le dioxyde de carbone (CO_2) ou un mélange d'argon (Ar) et de CO_2 . Ils produisent une réaction chimique dans le bain de fusion aidant à contrôler les effets nuisibles pour la soudure. Les principaux gaz inertes utilisés sont l'argon (Ar) et l'hélium (He) ou un mélange des deux. Ils agissent en enveloppant le bain de fusion pour ainsi créer une barrière physique empêchant la contamination par l'air. Ainsi, lorsque l'électrode est de type non fusible, le soudage s'opère en présence d'un gaz de protection inerte qui, une fois chauffé et ionisé, forme un plasma conducteur d'électricité, plus ou moins long, fin et concentré et pouvant s'étendre sur la surface de la pièce à souder, selon le procédé (Centre de formation CWB, 2006; Institut National de Recherche Scientifique, 2010; Praxair Technology Inc, 2019).

Les procédés de soudage peuvent être regroupés selon leur champ d'application principal :

- Fabrication de structures d'acier et d'équipements industriels;
- Chantiers de construction, maintenance et réparation;
- Industries pharmaceutiques, alimentaires et aérospatiales.

1.1.1 Procédés de soudage principalement utilisés dans la fabrication de structures d'acier et d'équipements industriels

Ces procédés permettent le soudage dans toutes les positions de la plupart des métaux et alliages de différentes épaisseurs, tels que les aciers au carbone et faiblement alliés, les aciers inoxydables et les alliages de nickel.

GMAW (*Gas Metal Arc Welding* - soudage à l'arc sous gaz protecteur avec fil plein)

Principe de fonctionnement

Le GMAW nécessite le passage d'un arc électrique entre le métal de base et un fil-électrode fusible, plein et nu (sans flux ou fondant). Selon le type de gaz de protection utilisé, le GMAW est également nommé MIG (*Metal Inert Gas*, soudage à l'arc en atmosphère inerte), ou MAG (*Metal Active Gas*, soudage à l'arc en atmosphère active). Le gaz protecteur peut être soit de l'Ar ou de l'He ou un mélange des deux pour le procédé MIG, soit du CO₂ ou un mélange de CO₂ et d'Ar pour le MAG. Le fil-électrode, provenant d'une bobine, se dévide continuellement sous l'action de la gâchette en passant par le pistolet de soudage. L'arc jaillit entre le fil-électrode fusible et la pièce à souder, générant une chaleur qui fait fondre l'extrémité du fil ainsi qu'une partie du métal de base de la zone soudée, formant ainsi le bain de fusion. L'arc propulse dans le bain de fusion la goutte de métal en fusion vers la pièce à souder où elle se mélange au métal de base fondu, formant ainsi la soudure. La protection du bain de fusion contre la contamination provenant de l'atmosphère ambiante est assurée par un apport de gaz (Centre de formation CWB, 2006; Godin, 2014).

Modes de transfert

Le GMAW possède différents modes de transfert. Le mode choisi dépend de l'intensité du courant, du diamètre du fil-électrode, de la composition du gaz de protection, de la composition chimique du fil-électrode et du type de source de courant du poste de soudage. Les principaux modes de transfert sont les suivants : court-circuit, globulaire, pulvérisation axiale et pulvérisation axiale pulsée. Le GMAW en mode court-circuit, globulaire ou en pulvérisation axiale est dit conventionnel (Centre de formation CWB, 2006; Wallace, Landon, Song et Echt, 2001).

Mode de transfert en court-circuit

Ce type de mode de transfert est associé à une tension et à une intensité de courant faible à moyen. Le dépôt de métal se fait de manière discontinue, en une alternance de temps d'arc et de temps de court-circuit. Durant la phase lors de laquelle l'arc électrique est créé, une goutte se forme à l'extrémité du fil-électrode, puis grossit jusqu'à établir un contact avec le bain de fusion, créant ainsi un court-circuit. Au cours de cette période de court-circuit, le courant augmente rapidement, faisant apparaître un pincement entre la partie solide et la partie liquide du fil-électrode, facilitant le détachement de la goutte. Un nouveau cycle de formation de la goutte de métal recommence lorsque l'arc s'établit à nouveau entre le fil-électrode et la pièce à souder (Keane, M. J., Siert, Chen et Stone, 2014; Wallace, Landon, *et al.*, 2001).

La discontinuité de l'arc électrique en mode court-circuit cause de l'instabilité et contribue ainsi à des projections des gouttes de métal fondu (Centre de formation CWB, 2006; Keane, M. J. *et al.*, 2014). Différentes variantes du GMAW en mode court-circuit (ou GMAW modifié) ont donc été développées afin de stabiliser l'effet de pincement agissant sur l'extrémité du fil-électrode : *Surface Tension Transfert* (STT™) par Lincoln Electric, *Regulated Metal Deposition* (RMD™) par Miller Electric et *Cold Metal Transfer* (CMT™) par Fronius. Le STT™ et le RMD™ contrôlent le courant de façon précise afin d'optimiser le transfert de la goutte de métal fondue dans le bain de fusion. Quant au procédé CMT™, sa principale caractéristique est l'introduction, dans le

contrôle du procédé, d'un mouvement de va-et-vient du fil-électrode. À la suite du court-circuit, la goutte bouge de l'avant à l'arrière à une fréquence pouvant atteindre 130 Hz. La rétraction du fil-électrode permet à la goutte de se détacher en absence de courant. En plus de l'interruption du court-circuit, ce type de transfert de métal requiert une intensité de courant plus faible, ce qui réduit l'apport en chaleur et permet un procédé presque sans projection. Le procédé CMT™ est donc relativement plus froid que le procédé GMAW conventionnel (Keane, M. J. *et al.*, 2014; Selvi, Vishvaksean et Rajasekar, 2018).

Mode de transfert globulaire

Lorsque les valeurs de tension et de courant augmentent au-dessus de celles utilisées pour le mode court-circuit, le passage au transfert globulaire s'effectue. Les gouttes formées ont un diamètre de 1,5 à 3 fois plus grand que celui du fil-électrode. Elles tombent par gravité dans le bain de fusion, ce qui limite l'usage de ce procédé à la position à plat. De plus, la goutte de métal suit une trajectoire aléatoire qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc. Ce mode de transfert est généralement évité en raison de son instabilité et parce qu'il génère trop de projections et d'éclaboussures de métal en fusion (Centre de formation CWB, 2006; Keane, M. J. *et al.*, 2014).

Mode de transfert en pulvérisation axiale

Le courant de transition correspond à l'intensité de courant qui se situe entre le transfert globulaire et le mode par pulvérisation axiale. La plage de valeurs de ce dernier dépend du diamètre, de la composition et de la longueur terminale du fil-électrode, ainsi que de la composition du gaz de protection (Centre de formation CWB, 2006). Le gaz de protection employé lors du transfert par pulvérisation axiale contient de l'Ar à une concentration minimum de 85 %. Les gouttes de métal transférées sont très fines, leur diamètre étant plus petit que celui du fil-électrode, et rejoignent le bain de fusion sous forme d'un jet continu. Ce mode de transfert génère un minimum de projection et est caractérisé par un arc relativement doux et calme. Cependant, en raison des valeurs élevées de courant et de tension, le bain de fusion est plutôt large et difficile à contrôler lors du soudage en position verticale ou au plafond. Il convient par conséquent davantage au soudage dans les positions à plat et horizontale (Centre de formation CWB, 2006; Keane, M. J. *et al.*, 2014).

Mode de transfert en pulvérisation axiale pulsée

Ce transfert nécessite la formation d'une gouttelette de métal fondu par impulsion de courant. De ce fait, seule la quantité nécessaire de courant est émise pour transférer la gouttelette de l'arc au bain de fusion. Contrairement aux autres modes GMAW dans lesquels le courant est continu, celui en pulvérisation axiale pulsée (GMAW-P) permet la chute du courant lorsqu'une puissance supplémentaire n'est pas nécessaire entraînant ainsi le refroidissement du procédé. La valeur moyenne du courant étant de l'ordre de celle du transfert globulaire, il semble que ce soit cette période de refroidissement qui permet un bain de fusion de plus petite dimension (Centre de formation CWB, 2006; Keane, M. J. *et al.*, 2014; Pires, Quintino, Amaral et Rosado, 2010).

FCAW (*Flux Cored Arc Welding* - soudage à l'arc électrique avec fil fourré)

Principe de fonctionnement

Le procédé de soudage à l'arc FCAW avec fil-électrode tubulaire, rempli de flux (ou fil fourré) ainsi que d'autres ingrédients, nécessite le passage d'un arc électrique entre le fil-électrode et le métal de base. Ce flux permet de stabiliser l'arc électrique, d'engendrer des gaz et d'apporter des éléments d'alliage au cordon de soudure. Il contribue également à créer un laitier permettant de protéger l'arc et le métal fondu de l'atmosphère ambiante. Le FCAW est utilisé avec ou sans gaz de protection. Lorsque le soudage est effectué sous protection gazeuse, la décomposition des éléments contenus dans le flux permet d'apporter une protection additionnelle. En cours de soudage, et comme dans le procédé GMAW, la chaleur de l'arc fait fondre l'extrémité de l'électrode (tube métallique et flux au centre) et une partie du métal de base. L'arc transfère ensuite le métal fondu de l'électrode vers la pièce à souder pour former le cordon de soudure (Centre de formation CWB, 2006; Godin, 2014).

MCAW (*Metal Cored Arc Welding* - soudage à l'arc avec fil fourré de poudres métalliques)

Principe de fonctionnement

Le procédé MCAW requiert l'utilisation d'un fil-électrode tubulaire rempli de poudres métalliques et combine les caractéristiques des fils fourrés du FCAW et des fils pleins du GMAW. Le fil-électrode, dépourvu d'ingrédients fluxants, ne contient que des éléments désoxydants et d'autres éléments servant à stabiliser l'arc électrique. La protection du bain de fusion est assurée par la présence d'un gaz d'origine extérieure comme pour le procédé GMAW. Ces fils fourrés de poudres métalliques utilisés dans le procédé MCAW permettent d'obtenir habituellement un cordon de soudure plus large et arrondi que le procédé GMAW et offrent également un plus fort taux de dépôt (Centre de formation CWB, 2006).

SAW (*Submerged Arc Welding* - soudure à l'arc submergé)

Principe de fonctionnement

Le soudage à l'arc submergé est un procédé totalement automatique et utilise un courant électrique alternatif ou continu. Ce procédé fonctionne avec des fils-électrodes simples ou complexes, composés notamment de fils pleins ou fourrés multiples. Le courant passant par l'électrode produit un arc électrique entre le bout de celle-ci et le matériau à souder. Cet arc est submergé par le flux granuleux qui se dépose sur la pièce à souder, ce qui permet notamment de stabiliser l'arc et de protéger le bain de fusion de l'atmosphère (Godin, 2014; Praxair Technology Inc, 2019).

1.1.2 Procédé de soudage principalement utilisé dans les chantiers de construction, pour la maintenance et la réparation

Le procédé SMAW, *Shielded Metal Arc Welding* ou soudage à l'arc avec électrode enrobée, est très souvent utilisé dans les chantiers de construction, en raison de la simplicité des équipements, de sa tolérance au milieu extérieur et de sa capacité à souder dans toutes les

positions (à plat, à l'horizontale, à la verticale et au plafond). Il est essentiellement utilisé pour souder l'acier au carbone et l'acier inoxydable (Godin, 2014) et est souvent le seul à être employé dans les ateliers lorsque le soudage représente seulement une faible proportion de l'ensemble des techniques de fabrication utilisées (Centre de formation CWB, 2006).

Principe de fonctionnement

Lors de l'utilisation du procédé SMAW, l'arc jaillit entre l'extrémité d'une électrode métallique enrobée et le matériel de base à souder. Contrairement aux procédés de soudage présentés précédemment, où l'apport du fil-électrode se faisait de façon continue à l'aide d'une bobine se dévidant, l'électrode métallique utilisée pour le procédé SMAW est une baguette de longueur fixe se consommant pendant la procédure de soudage, d'où l'appellation soudage à la baguette. Cette dernière doit donc être remplacée manuellement lorsqu'elle est fondue afin de poursuivre l'opération de soudage. Le temps d'arc est en conséquence plus court par rapport au temps total de soudage tandis que le taux de dépôt est bas. La chaleur produite par l'arc fait fondre la surface du joint, le bout de l'électrode ainsi que le flux, libérant ainsi des gaz de protection qui protègent le bain de fusion. Le métal d'apport est transféré à travers l'arc jusqu'à la pièce à souder où il se mélange au métal de base fondu (Centre de formation CWB, 2006; Godin, 2014).

1.1.3 Procédé de soudage principalement utilisé dans les industries pharmaceutiques, alimentaires et aérospatiales

C'est principalement le procédé GTAW, *Gas Tungsten Arc Welding* ou soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène, qui est utilisé dans les industries pharmaceutiques, alimentaires et aérospatiales. Il peut être utilisé pour souder tous les métaux et alliages bien qu'il ne soit que peu employé pour le soudage des fontes et du fer forgé (Centre de formation CWB, 2006). Il s'agit d'un procédé lent auquel on recourra principalement pour le soudage des métaux de faible épaisseur. Il exige de stricts contrôles de qualité. Dans l'industrie aéronautique, il est largement employé pour la fabrication de réservoirs et de la tuyauterie des moteurs de fusées (Centre de formation CWB, 2006).

Principe de fonctionnement

Le GTAW est un procédé sous gaz de protection avec électrode de tungstène réfractaire (non fusible). L'arc électrique jaillit entre l'électrode de tungstène et la pièce à souder. L'électrode ne participe pas au bain de fusion pendant le soudage. Le bain de fusion et l'électrode non fusible sont protégés de l'atmosphère ambiante par un gaz de protection inerte tels que l'Ar ou l'He. Du métal d'apport est habituellement ajouté au procédé (sous la forme d'une baguette comme dans le procédé SMAW), bien que celui-ci ne fasse pas partie du circuit électrique de soudage. Une fois fondu par la chaleur de l'arc, ce métal est ensuite transféré au bain de fusion (Centre de formation CWB, 2006; Godin, 2014).

1.2 Problématique de santé du travail

En raison des températures élevées atteintes au point de fusion, les opérations de soudage produisent des fumées potentiellement toxiques selon des processus complexes incluant notamment la vaporisation, la combustion, la décomposition et l'oxydation, et la pyrolyse. Ces fumées proviennent essentiellement des éléments suivants (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2017; Godin, 2014; Institut National de Recherche Scientifique, 2010) :

- métal d'apport (fil-électrode ou baguette);
- métal ou alliage de base;
- matériaux de revêtement des pièces à souder (p. ex. : peintures au plomb, aux résines et antirouilles, revêtements époxydes et de polyuréthane, huile, calamine, salissures et zinc dans le cas des tôles protégées par galvanisation);
- flux, dont la combustion permet de dégager un gaz protégeant le bain de fusion de l'air ambiant; ce bain étant constitué du métal de base fondu et du métal d'apport;
- gaz de protection passant par le pistolet de soudage;
- traces de solvants utilisés pour dégraisser les pièces à souder, des lubrifiants, ainsi que des produits décapants, dans le cas des opérations de brasage.

Ces fumées sont constituées de particules et de gaz dont la composition et la proportion varient en fonction de nombreux facteurs dont les procédés utilisés, la position de soudage et la nature des pièces à souder. Les principaux polluants particulaires et gazeux contenus dans les fumées, leurs sources, les risques pour la santé des travailleurs qui leur sont associés ainsi que les valeurs d'exposition moyenne pondérée (VEMP) de différentes fumées et gaz, sont présentés au tableau 1. La VEMP est définie comme étant la « concentration moyenne, pondérée pour une période de 8 heures par jour, en fonction d'une semaine de 40 heures, d'une substance chimique (sous forme de gaz, poussières, fumées, vapeurs ou brouillards) présente dans l'air au niveau de la zone respiratoire du travailleur »².

La VEMP des fumées de soudage est de 5 mg/m³ (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail/CNESST, 2019). Les risques qui leur sont associés incluent notamment la cancérogénicité, des atteintes au système nerveux central, des maladies bronchopulmonaires dont l'asthme et les fibroses pulmonaires, des défaillances rénales ainsi que des irritations notamment respiratoires et cutanéomuqueuses. Les polluants à potentialité cancérogène incluent entre autres le béryllium, le chrome hexavalent, le cadmium, le nickel, le plomb et le formaldéhyde. Les fumées de soudage viennent d'être tout récemment classées cancérogènes groupe 1 (cancérogène pour l'homme) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), alors qu'elles étaient jusqu'alors intégrées au groupe 2B (cancérogène possible pour l'homme) (Guha *et al.*, 2017). À titre d'exemple, une large étude de cohorte a permis de conclure que l'exposition aux fumées de soudage pourrait augmenter les risques de développement des cancers du rein et de la vessie (MacLeod, Harris, Tjepkema, Peters et Demers, 2017).

² Règlement sur la santé et la sécurité du travail, chapitre S-2.1, r. 13. Tiré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cr/S-2.1,%20R.%2013.pdf>. Site à jour au 10 septembre 2018.

Les oxydes de manganèse (Mn), plutôt communs dans les fumées de soudage, méritent une attention particulière en raison notamment du risque d'atteinte neurologique majeure, de type manganisme. La VEMP du Mn a d'ailleurs été réduite à 0,20 mg/m³ alors qu'elle était de 1 mg/m³ auparavant (Gazette officielle du Québec, 2012). Le manganisme, dont les symptômes ressemblent à ceux de la maladie de Parkinson, est également communément appelé parkinsonisme (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012; Institut National de Recherche Scientifique, 2012). Il semblerait que la progression du parkinsonisme chez des soudeurs exposés aux fumées d'oxyde de Mn soit dépendante de la dose (Racette *et al.*, 2017). Par ailleurs, des auteurs suggèrent une possible atteinte des fonctions cognitives en raison d'une réduction des performances de la mémoire chez des travailleurs ayant déjà œuvré dans des sites de soudage industriel (Al-Lozi, 2017). Enfin, des concentrations chroniques aussi faibles que 0,01 mg/m³ de Mn pourraient également induire des effets neurocomportementaux chez les travailleurs, incluant des tremblements (Park, 2013).

Tableau 1. Principaux polluants particuliers et gazeux contenus dans les fumées de soudage

Polluant	Source principale			Exemple de risque	VEMP ou valeur plafond	
	Métal de base	Métal d'apport	Autre(s)			
Oxyde d'aluminium	Pièces en aluminium ou d'alliage (p. ex. : cuivre, magnésium)	Électrode contenant de l'aluminium		Pneumoconiose (aluminose) - Fièvre du soudeur	5 mg/m ³	
Oxyde de béryllium	Matériaux contenant du béryllium (p. ex. : alliage de cuivre, contacts électriques, structures d'avions)			Cancer du poumon - Pneumopathie chronique (béryllose)	0,00015 mg/m ³	
Oxyde de cadmium	Pièces cadmiées, alliage de zinc ou matériaux plaqués	Métal d'apport à base d'étain et d'argent	Brasage avec argent-cadmium	Cancer du poumon et de la prostate - Atteinte rénale	0,025 mg/m ³	
Oxyde de cobalt	Alliage de nickel, acier inoxydable	Électrode contenant du cobalt	Brasage avec carbure de tungstène	Fibrose pulmonaire - Irritation cutanée	0,02 mg/m ³	
Particulaire	Composés du chrome hexavalent (VI)	Acier inoxydable, alliage d'aluminium	Électrode enrobée d'acier inoxydable ou fourrée contenant du chrome	Revêtements à base de chromate de zinc, peinture, plaquage	Cancer du poumon - Irritation des muqueuses respiratoires - Ulcérations cutanées	0,01 mg/m ³
	Oxyde de fer	Pièces en acier doux (faible teneur en carbone) et en fer	Électrode en fer		Pneumoconiose (sidérose)	5 mg/m ³
	Oxyde de manganèse	Acier doux, fonte et alliage non ferreux (aluminium, cuivre, nickel ou magnésium)	Électrode et/ou métal d'apport contenant du Mn Alliage de rechargement		Neurotoxicité (manganisme) Alvéolite caustique - Maladie pulmonaire chronique	0,2 mg/m ³ (avec la notation « poussière totale »)
	Oxyde de nickel	Acier galvanisé ou inoxydable et alliage de nickel	Baguette de soudage contenant du nickel		Cancer du poumon et des cavités nasales - Bronchites	1 mg/m ³
	Autres oxydes (p. ex. : oxyde de plomb, de cuivre, de zinc)	Métaux contenant ces éléments (p. ex. : alliage de cuivre, acier galvanisé) - Revêtements (peinture au plomb, au zinc)	Cuivre : Enrobage d'électrode Plomb, zinc : métal d'apport en alliage d'étain	Brasage avec alliage d'étain	Oxydes de plomb : neurotoxicité, atteintes rénales Oxydes de cuivre et de zinc : fièvre du fondeur	Cuivre : 0,2 mg/m ³ Plomb : 0,05 mg/m ³ Zinc : 10 mg/m ³ en poussières totales
	Formaldéhyde	Traces de solvants, de graisse, de vernis ou peinture avec liants et pigments			Cancer du nasopharynx et leucémie - Irritation oculaire - Asthme	Valeur plafond : 3 mg/m ³
	Monoxyde de carbone	Combustion des polymères contenus dans les peintures		Soudure sous gaz actif avec du dioxyde de carbone ou un mélange gazeux – Combustion avec apport insuffisant en air (oxygaz)	Asphyxie	40 mg/m ³
	Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO ₂)	Revêtement de polyuréthane		Oxydation de l'azote de l'air proche de la flamme ou de l'arc électrique	Atteinte pulmonaire (pouvant aller jusqu'à l'emphysème)	NO : 31 mg/m ³ NO ₂ : 5,6 mg/m ³
Gazeux	Ozone	Soudage sous gaz protecteur de matériaux tels l'aluminium et les alliages aluminium-silicium		Action des ultraviolets dégagés par le soudage à l'arc sur l'oxygène de l'air	Lésion pulmonaire - Irritation oculaire - Atteinte rénale	Valeur plafond : 0,2 mg/m ³
	Phosgène (COCl ₂)	Traces d'agents dégraissants chlorés (p. ex. : perchloro-éthylène)			Irritation oculaire - Fibrose pulmonaire	0,40 mg/m ³

Références : CNESST, 2019 ; INRS, 2012

De plus, 20 à 60 % des particules contenues dans les fumées de soudage ont un diamètre à l'échelle nanométrique, soit inférieur à 0,1 µm ou 100 nm, et sont de ce fait des particules ultrafines (PUF) (Elihn et Berg, 2009). Les diamètres des particules générées lors du soudage d'acier doux par le procédé MIG, une variante du GMAW, varient généralement entre 28 et 107 nm (Stanislawska *et al.*, 2017). Bien que les particules émises aient tendance à former des agglomérats, la taille de ces derniers peut demeurer à l'échelle nanométrique, par exemple, durant le soudage d'acier inoxydable par le procédé MIG (Institut National de Recherche Scientifique, 2010). Des chercheurs ont par ailleurs démontré que plus de 50 % des PUF dans la fraction 15-20 nm se déposaient dans les alvéoles pulmonaires où s'effectuent les échanges gazeux (Witschger et Fabriès, 2005).

Cette déposition pulmonaire plus élevée s'accompagne notamment d'un pouvoir de translocation systémique et d'une faculté d'adsorption de contaminants chimiques. Une substance potentiellement toxique, inhalée sous forme de PUF, pourrait ainsi être autrement plus toxique que si elle se présentait sous forme de particules de dimensions plus élevées (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 2016 ; Kendall et Holgate, 2012). De telles propriétés induiraient un plus grand potentiel toxique pour les PUF, notamment des risques de pathologies pulmonaires et cardiovasculaires plus élevés. Des études ont ainsi rapporté une augmentation des risques de maladies respiratoires, dont une hausse de l'incidence de l'asthme professionnel et un déclin de la fonction respiratoire, ainsi que des risques de maladies cardiovasculaires chez les soudeurs (Antonini, J.M., Lewis, Roberts et Whaley, 2003; Ibfelt, Bonde et Hansen, 2010; Szram, Schofield, Cosgrove et Cullinan, 2013).

De plus, les PUF inhalées ont la faculté de se déposer sur la muqueuse nasale, puis de pénétrer directement dans le tissu cérébral, via le nerf et le bulbe olfactifs, et de s'y accumuler, augmentant ainsi les risques de lésions neurologiques (Wang *et al.*, 2008). Cette voie olfactive n'a toutefois été mise en évidence que chez l'animal. Par le biais d'une modélisation numérique de l'appareil respiratoire supérieur humain (cavité nasale, larynx, trachée et première bifurcation de l'arbre bronchial), Tian, Inthavong, Lidén, Shang et Tu (2016) ont toutefois démontré que des agglomérats de PUF contenues dans les fumées de soudage se déposaient sur la muqueuse nasale, bien qu'ils ne représentent qu'une faible fraction comprise entre 0,1 à 1 %. Néanmoins, les particules de moins de 20 nm de diamètre ainsi que les agglomérats plus compacts jouissent d'une plus grande déposition (Tian *et al.*, 2016).

La protection des travailleurs aux fumées produites lors du soudage à l'arc électrique est d'autant plus nécessaire que :

1. Le nombre de travailleurs québécois exerçant des activités de soudage est élevé, gravitant autour de 24 000 au cours des dernières années (Emploi Québec, 2016).
2. La VEMP actuelle des fumées de Mn (0,2 mg/m³) est rapidement atteinte lors des activités de soudage (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail/CNESST, 2019).
3. Les risques pour la santé des travailleurs demeurent élevés.

Les expositions aux fumées de soudage varient principalement selon le procédé employé, le matériel de soudage, la ventilation, le niveau de confinement du travailleur et l'utilisation de matériel de protection individuelle. La réduction des quantités de fumées apparaît ainsi cruciale pour protéger les travailleurs qui exercent des opérations de soudage, notamment à l'arc électrique très répandu en milieu de travail.

Actuellement, la protection des travailleurs contre les fumées de soudage combine des dispositifs de captage à la source, la ventilation générale ainsi que des protections respiratoires individuelles. Le captage à la source est exigé par le [Règlement sur la santé et la sécurité du travail](#) (RSST) afin de protéger adéquatement la zone respiratoire des travailleurs. Il inclut notamment les pistolets à captation intégrée, la buse amovible, les microcapteurs ou encore les bras de captation à ventilateur centrifuge, selon le type de travaux à effectuer et de pièces à souder (MultiPrévention ASP, 2017a, 2017b). Les systèmes de ventilation générale ne sont que complémentaires à la captation à la source, car ils ne protègent pas adéquatement la zone respiratoire (Godin, 2014). Selon le RSST, les appareils de protection respiratoire deviennent obligatoires lorsque les concentrations tant des fumées de soudage que des contaminants particuliers qu'elles contiennent dépassent, au niveau de la zone respiratoire, leur VEMP respective³.

L'évaluation et la compréhension de l'effet de la modification des paramètres de soudage à l'arc électrique pour la réduction de l'exposition des travailleurs revêtent donc une grande importance. Ces paramètres, dont la plupart peuvent être liés entre eux, incluent le type de procédé, les variables électriques, les caractéristiques et le type de l'électrode, la manière d'exécuter les travaux, le type de courant, la stabilité de l'arc électrique (liée à l'intensité et à la tension du courant), le débit du gaz protecteur, la position du pistolet de soudage, le diamètre et la composition de l'électrode et du flux pour un même procédé (Institut National de Recherche Scientifique, 2010; MultiPrévention ASP, 2016).

³ Règlement sur la santé et la sécurité du travail, chapitre S-2.1, r. 13. Tiré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cr/S-2.1,%20R.%2013.pdf>.

2. OBJECTIF DE RECHERCHE

L'objectif de cette recherche est de documenter l'état des connaissances relatives à l'influence des paramètres de soudage sur les concentrations de fumées et leurs composantes métalliques générées lors des opérations de soudage à l'arc électrique. La compréhension de l'influence de ces paramètres offre une opportunité ayant pour but ultime de réduire l'exposition des travailleurs aux fumées de soudage.

3. MÉTHODOLOGIE

La revue de la littérature a été de type systématique. Cette méthode utilise une stratégie rigoureuse, reproductible et basée sur un protocole strict afin de réduire la possibilité de biais. Elle identifie toutes les preuves publiées sur un sujet en particulier, dans le but d'en avoir une vue d'ensemble objective et transparente (Hemingway et Brereton, 2009).

3.1 Critères d'éligibilité

Afin de répondre à l'objectif visé, une question clé de recherche a tout d'abord été formulée selon le format PICO : P, pour Population/Participants/Processus d'intérêt, I pour Intervention ou meilleure pratique à évaluer, C pour groupe comparateur ou contrôle, et O pour *Outcome* ou incidences d'intérêt (Hastings et Fisher, 2014). Seuls les critères P, I et O sont pertinents dans le contexte de la présente revue systématique :

P : Opérations de soudage à l'arc électrique;

I : Modification d'un ou de plusieurs paramètres de soudage à l'arc électrique;

O : Influence du ou des paramètres de soudage modifiés sur la génération de fumées de soudage (réduction, augmentation, absence de variation).

La question de recherche proposée a donc été la suivante :

Durant les opérations de soudage à l'arc électrique [P], la modification d'un ou de plusieurs paramètres de soudage [I] est-elle susceptible d'influencer la génération de fumées [O]?

Le processus d'éligibilité des études, permettant de savoir si elles sont à même de répondre à la question PICO, a donc consisté à sélectionner des critères d'inclusion et d'exclusion lesquels sont présentés dans le tableau 2. Parmi les critères d'inclusion, notons le type d'étude, à savoir terrain ou expérimental. En effet, il n'a pas été jugé utile de circonscrire les conditions de réalisation du critère P, « opérations de soudage à l'arc électrique », afin d'étendre la question PICO à l'ensemble des situations ayant permis d'évaluer l'influence des paramètres de soudage sur la génération des fumées, que ces évaluations aient été menées en milieu de travail ou dans des conditions expérimentales. L'objectif ultime de ces évaluations, nonobstant leur condition de réalisation, demeure la réduction de l'exposition des travailleurs aux fumées générées lors des opérations de soudage à l'arc électrique.

3.2 Sources documentaires et stratégie de recherche

Afin de mener une recension des écrits aussi exhaustive que possible, 10 bases de données bibliographiques ont été sondées pour y recenser les publications scientifiques ayant fait l'objet d'une évaluation par les pairs. Pour la revue de la littérature grise, 12 sources en ligne, incluant des sites Web institutionnels et ceux de groupements professionnels ainsi que le moteur de recherche Google Scholar, ont été interrogées sur une période allant de la fin du mois de janvier 2000 au début du mois de février 2018. Les sources documentaires consultées sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 2. Critères d'inclusion et d'exclusion utilisés dans les études

Critère d'inclusion	Critère d'exclusion
<p>Études ayant évalué l'impact de la modification d'un ou de plusieurs paramètres de soudage sur la production de fumées lors d'opération de soudage à l'arc électrique.</p>	<p>Études ayant évalué le processus de génération des fumées lors d'opérations de soudage à l'arc électrique par un ou divers procédés.</p>
<p>Revue de la littérature scientifique ayant eu pour objectif de compiler les études ayant évalué l'impact des paramètres de soudage sur la production des fumées lors d'opérations de soudage à l'arc électrique, afin de ne pas négliger des études non recensées par la recherche documentaire.</p>	<p>Études axées sur les risques généraux ou particuliers des fumées de soudage pour la santé des travailleurs.</p> <p>Études et documents techniques visant à présenter ou à améliorer un procédé de soudage ou à étudier la propriété des matériaux de base sans allusion aux fumées générées.</p>
<p>Études menées dans des conditions expérimentales ou sur le terrain (milieu de travail).</p>	<p>Études axées sur l'évaluation et/ou le développement des méthodes de protection des travailleurs vis-à-vis des fumées de soudage (appareils de protection respiratoire, ventilation ou autres procédés de collecte de fumées).</p>
<p>Méthodologie désignant minimalement :</p> <ul style="list-style-type: none">- le ou les procédé(s) de soudage à l'arc électrique ainsi que du ou des métaux de base;- le ou les paramètres étudié(s) avant modification (p. ex. : tension standard de 25 V) et après modification (p. ex. : tension de 30 V) ou bien l'ensemble des différents procédés et/ou gaz de protection testés durant l'étude;- le ou les contaminants mesuré(s) (p. ex. : fumées totales, Mn, PUF)	<p>Études axées sur l'amélioration de la protection des travailleurs pour des procédés autres que le soudage à l'arc (p. ex. : brasage, coupage).</p>
<p>Échantillonnages, dans la même étude, des fumées et/ou contaminants générés avant et après modification du ou des paramètre(s) de soudage.</p>	
<p>Comparaison des valeurs numériques des indicateurs mesurés avant et après modification du ou des paramètre(s) de soudage (p. ex. : taux de formation de fumées avec une tension de 25 V, taux de formation de fumées avec une tension de 30 V).</p>	
<p>Articles publiés dans des revues dotées d'un comité de révision par les pairs</p>	
<p>Rapports publiés par un organisme doté d'un programme de qualité avec révision par des pairs.</p>	
<p>Études publiées en français ou en anglais.</p>	

Tableau 3. Sources documentaires consultées

Base de données bibliographiques	Source internet
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Embase ▪ Medline ▪ Pubmed ▪ Global Health ▪ Scopus ▪ Web of Science ▪ Engineering Village (GEOBASE, Inspec, Compendex) ▪ NIOSHTIC-2 ▪ Current Contents ▪ ProQuest (<i>Dissertations & Theses Global</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Centre canadien d'hygiène et de sécurité du travail (CCHST) ▪ European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA) ▪ Health and Safety Executive (HSE) ▪ Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) ▪ Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS-France) ▪ Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) ▪ National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ▪ Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ▪ Institut de soudage du Québec ▪ The Canadian Welding Association (CWA) ▪ The American Welding Society (AWS) ▪ Google Scholar

La consultation de la littérature grise permet d'éviter le biais de publications, un type de biais de divulgation, en ayant accès à un corpus de références de grande valeur (publications gouvernementales, rapports scientifiques, études et publications industrielles, avis d'experts, etc.) venant ainsi compléter judicieusement la recherche dans les bases de données bibliographiques. La consultation à titre complémentaire du moteur de recherche Google Scholar, permet de rechercher des publications scientifiques ou techniques pouvant ne pas encore avoir été indexées dans les bases de données bibliographiques.

La stratégie de recherche s'est construite autour des concepts majeurs de « soudage, fumées, réduction et production ». Afin d'augmenter la sensibilité de la stratégie de recherche, et ainsi de repérer le plus grand nombre de références potentiellement pertinentes, les mots-clés « paramètre de soudage », « arc » et « arc électrique » n'ont pas été retenus. L'étendue de la période couverte par la recherche (de janvier 2000 à janvier 2018) pouvait certes limiter la précision de celle-ci, toutefois réduire cette période risquait de compromettre la sensibilité de la stratégie et ainsi de négliger des références pertinentes.

Deux principales combinaisons de mots-clés, en français et en anglais, ont été soumises aux bases de données avec activation de la troncature par l'utilisation d'un astérisque et l'usage d'opérateurs booléens lorsque possible. Afin de tenir compte des particularités propres à chaque source bibliographique, ces mots-clés ont été utilisés selon deux combinaisons différentes :

Soudage ET fumée* ET (réduction OU réduire OU diminu* OU mitig* OU contrôle* OU minimis*)/ Welding AND fume* AND (reduc* OR control* OR abatement OR mitig* OR minimiz* OR diminution OR diminish*)

OU/OR

Soudage ET fumée* ET (production OU produite* OU génération OU généré* OU émis*)
/Welding AND fume* AND (production OR produced OR generat* OR emission OR emit*)

Un exemple détaillé des résultats obtenus en interrogeant le moteur de recherche Embase est présenté à l'annexe A.

3.3 Processus de sélection des études

L'ensemble des références extraites des bases de données bibliographiques et des sources en ligne ont été exportées automatiquement ou générées manuellement dans une librairie du logiciel de gestion des références bibliographiques EndNote. Après élimination des doublons, deux membres de l'équipe de recherche, soit le chercheur principal et l'agente de recherche, ont agi en tant que réviseurs afin d'effectuer une première sélection par examen du titre et/ou du résumé, et ce, de manière indépendante.

Lors de cette étape, ont été exclues les références publiées dans une autre langue que le français ou l'anglais, puis celles dont ni le titre ni le résumé (lorsque disponible) ne répondaient à au moins un des critères d'inclusion restants. Cette approche plus inclusive permet d'éviter d'exclure des références potentiellement pertinentes. Les décisions de sélection prises par chacun des réviseurs ont été notées et confrontées. Les quelques désaccords survenus dans cette sélection ont été résolus de manière consensuelle par discussion. Il n'a pas été jugé utile de faire appel à une troisième partie.

Les références restantes ont ensuite fait l'objet d'une évaluation pour éligibilité par l'examen du texte complet pour ne retenir que celles qui répondaient à la totalité des critères. Lorsque les références n'étaient pas disponibles, un appel au service de prêt entre bibliothèques de l'Université de Montréal a été lancé. Lorsqu'à la différence du titre et du résumé, le texte intégral d'une référence était rédigé dans une autre langue que l'anglais ou le français, celle-ci était automatiquement rejetée. Les deux réviseurs n'ont pas fait face à des informations manquantes et, de ce fait, n'ont pas eu à contacter les auteurs ni à exclure des références pour cette raison.

Afin d'entreprendre un processus décisionnel fluide et fiable lors des étapes de sélection par titre/résumé puis par texte intégral, un test a été préalablement effectué par les deux réviseurs à partir d'un nombre réduit de références de manière à vérifier que l'interprétation des critères d'inclusion était homogène et que leur application demeurait constante. Ce travail de sélection mené indépendamment par les deux réviseurs a permis d'assurer non seulement la transparence du processus de sélection, mais également la reproductibilité des résultats en limitant le risque d'exclure indûment des références pertinentes et en minimisant de possibles erreurs d'appréciation ou de manque d'objectivité. Le processus d'examen du texte complet a résulté en une liste de références ou études retenues.

Les articles, les documents-synthèses, les affiches présentées lors de conférences, les chapitres de livre ou les thèses qui décrivent la même étude et qui en rapportent partiellement ou intégralement les résultats n'ont été inclus qu'une seule fois dans la référence.

3.4 Compilation des données

L'ensemble des informations pertinentes contenues dans les études retenues ont été extraites et compilées dans une grille d'analyse sous forme de fichier Excel. Ce fichier d'extraction contenait les éléments de données suivants :

- *Références* : numéro attribué, auteur(s), année de publication, type de référence (article scientifique, thèse, conférence, etc.), nom/volume/numéro de la revue, institutions, université, etc.
- *Type d'étude* : expérimental ou terrain.
- *Données techniques* :
 - type de procédé de soudage à l'arc électrique;
 - composition du gaz de protection, lorsque disponible;
 - métal ou métaux de base sur le(s)quel(s) le soudage a été réalisé (acier doux, au carbone, faiblement ou fortement allié, inoxydable, alliage aluminium avec magnésium);
 - matériel d'apport (composition fil-électrode ou baguette) ou référence du fournisseur du ou des électrode(s), lorsque disponible.
- *Paramètre(s) de soudage étudié(s)* : p. ex. : procédé de soudage et/ou gaz de protection et/ou voltage et/ou intensité et/ou diamètre de l'électrode.
- *Situation du ou des paramètre(s) avant et après modification dans la même étude* : p. ex. : tension de 25 V avant et tension de 30 V après, gaz de protection en argon pur avant et gaz de protection avec argon et % variable de dioxyde de carbone après.
- *Paramètres d'échantillonnage* :
 - le ou les contaminant(s) ciblé(s) (fumées totales, Mn, Cr, PUF, etc.).
 - le ou les indicateur(s) mesuré(s) (p. ex. : taux de génération de fumées en mg/min, fraction de Mn en µg/g de fumées totales, concentration en nombre de particules/cm³, diamètre des particules).
- *Résultats obtenus* : variation des indicateurs mesurés après modification du ou des paramètre(s) de soudage (↑ « augmentation », ↓ « diminution », = « sans effet »).

À l'instar de la sélection des études, l'extraction des données a été effectuée de manière indépendante par le chercheur principal et l'agente de recherche. Les données extraites par chacun ont été notées et confrontées. Les quelques désaccords survenus dans ce processus ont également été résolus de manière consensuelle par discussion. Il n'a donc pas été jugé utile de faire appel à une troisième partie.

3.5 Synthèse descriptive des résultats

La synthèse des résultats a été réalisée en deux temps : a) en rapportant tout d'abord ceux obtenus après modification d'un ou de plusieurs paramètres autres que le procédé de soudage, et ce, pour un même procédé, b) en rapportant ceux obtenus après modification du procédé de soudage. Les résultats rapportés sont de nature purement qualitative exprimant la variation du ou des indicateurs mesurés après modification du paramètre évalué, et ce, en utilisant les termes « diminution », « augmentation » ou « sans effet », comme indiqué précédemment. L'hétérogénéité des contaminants et des indicateurs mesurés dans les études retenues n'a pas permis de confronter leurs résultats quantitatifs.

3.6 Évaluation de la qualité des études retenues

Cette évaluation permet d'asseoir la validité des résultats obtenus dans les études retenues. Les critères de qualité des études sont variables, car ils dépendent souvent de la discipline ou du domaine d'application. L'outil d'évaluation le plus adapté est choisi selon, notamment, sa pertinence vis-à-vis de l'objectif de la recherche, mais également des études finalement incluses sur le plan du nombre et des aspects méthodologiques (Martin, Renaud et Dagenais, 2013).

Au regard de l'hétérogénéité de la méthodologie et des modalités de présentation des résultats des études incluses, il n'a pas été jugé pertinent d'établir une échelle de cotation de qualité sous forme de valeurs individuelles ou de scores. Toutefois, le processus de sélection des études a été considéré comme étant une évaluation en soi de la qualité des références recensées. En effet, seules celles satisfaisant à l'ensemble des critères d'inclusion ont été retenues dans cette recherche afin de répondre à la question PICO et ainsi atteindre l'objectif fixé. Cette sélection a été le fruit d'un travail d'équipe mené dans un souci de transparence et d'objectivité.

4. RÉSULTATS

4.1 Résultats de la recherche documentaire

4.1.1 Diagramme de flux

La figure 2 présente le diagramme de flux qui permet d'approfondir les étapes de la sélection des références. Un nombre total de 1764 références a été recensé dans l'ensemble des sources documentaires consultées (tableau 3). Après suppression des doublons, 220 références ont été examinées sur la base du titre et/ou du résumé pour aboutir à 108 références éligibles. Après examen du texte intégral, 47 études ont été retenues.

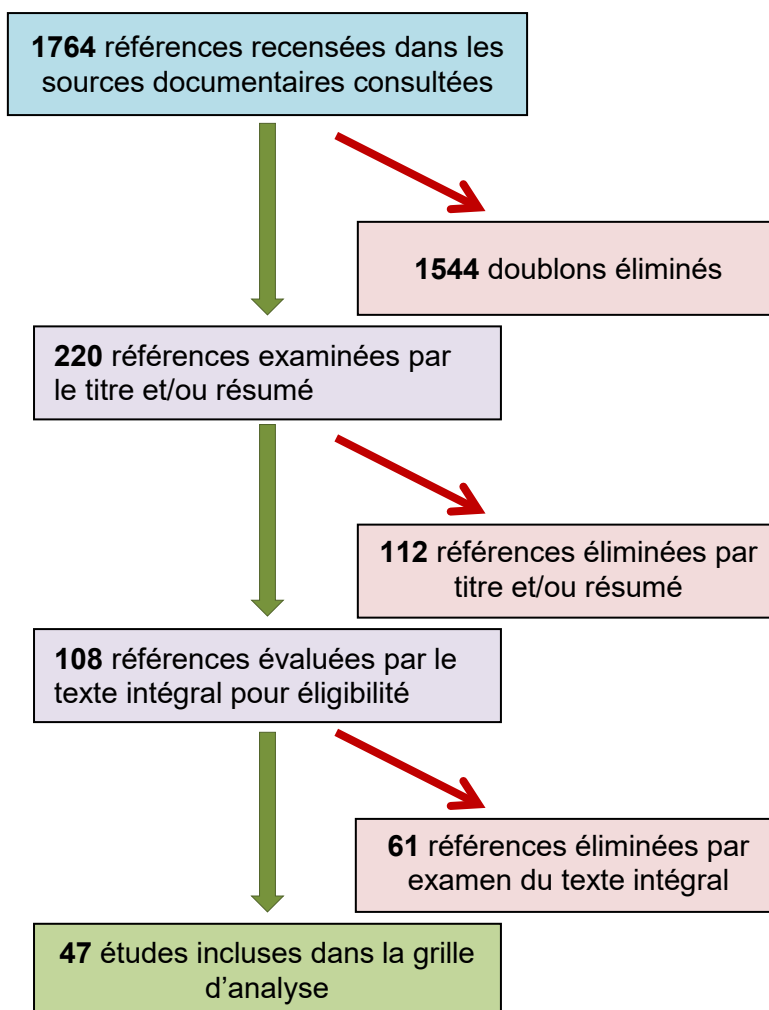


Figure 2. Processus de sélection des études.

4.1.2 Portrait général des études retenues

Le tableau 4 présente le portrait général des 47 études retenues dans le contexte de cette recherche, et ce, selon trois caractéristiques : le type d'évaluation (expérimental ou terrain), le procédé de soudage et la nature du métal de base. Sur les 47 études, seules quatre d'entre elles ont été menées dans des conditions réelles (de terrain). Une étude a été réalisée à la fois en milieu expérimental et sur le terrain.

Tableau 4 . Portrait général des 47 études retenues

		Nombre d'études
Type d'évaluation	Expérimental	44
	Terrain	4
Procédé de soudage	GMAW ¹	35
	SMAW ²	14
	FCAW ³	9
	GTAW ⁴	5
	MCAW ⁵	1
	SAW ⁶	0
Nature du métal de base	Acier doux, au carbone, à faible teneur de carbone, faiblement ou fortement allié	36
	Acier inoxydable	15
	Alliage aluminium avec magnésium	1
	Aluminium	1

1. GMAW, Gas Metal Arc Welding, soudage à l'arc sous gaz protecteur avec fil plein.
2. SMAW, Shielded Metal Arc Welding, soudage à l'arc avec électrode enrobée.
3. FCAW, Flux Core Arc Welding, soudage à l'arc électrique avec fil fourré.
4. GTAW, Gas Tungsten Arc Welding, soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène.
5. MCAW, Metal-Cored Arc Welding, soudage à l'arc avec fil fourré de poudres métalliques.
6. SAW, Submerged Arc Welding, soudure à l'arc submergé.

En raison du fort volume de données, il n'a pas été possible de présenter l'intégralité de la grille d'analyse sous forme de fichier Excel dans ce rapport. Toutefois, un exemple d'extraction de données est fourni pour une des études retenues dans l'annexe B.

Concernant les objectifs des études retenues, 39 se sont intéressées à l'évaluation des paramètres de soudage pour un ou plusieurs procédés, tandis que 10 ont évalué et comparé les procédés eux-mêmes. À noter que le total des études est supérieur à 47, car sur les 10 études ayant comparé différents procédés, 2 ont également évalué différents paramètres de soudage pour un même procédé.

Au total, 21 paramètres de soudage, incluant le procédé de soudage, ont été évalués par les 47 études retenues. Lorsqu'un même élément possédait différentes caractéristiques, chacune d'entre elles a été considérée comme étant un paramètre distinct. Par exemple, la composition de l'électrode et la composition du fourrage de l'électrode ainsi que l'épaisseur du flux sont autant de paramètres. Cela est aussi valable pour le gaz de protection (composition, ajout d'un additif, etc.) et des paramètres électriques (tension du courant, intensité du courant, vitesse du fil, apport thermique, etc.). Plusieurs des études incluses ont évalué plus d'un paramètre de soudage. La liste des 47 études comportant le ou les paramètres évalués par chacune d'elles est présentée sous forme de tableau dans l'annexe C. Le tableau 5 présente le nombre de situations d'évaluation pour chacun de ces paramètres, ainsi que la nature de l'évaluation (expérimentale ou terrain).

Tableau 5. Nombre de situations d'évaluation pour les 21 paramètres de soudage ciblés par les études retenues

Paramètre évalué		Nombre de situations d'évaluation		
		Étude expérimentale	Étude terrain	Total
Gaz de protection	Composition	15	0	15
	Double arrivée de gaz	1	0	1
Électrode	Composition et/ou type	6	0	6
	Composition de l'enrobage	4	0	4
	Composition du fourrage	1	0	3
	Épaisseur du flux	3	0	3
	Composition du flux	1	0	1
	Diamètre	1	0	1
Tension du courant		11	0	11
Mode de transfert		6	1	7
Procédé de soudage		7	3	10
Intensité du courant		9	0	9
Vitesse du fil		4	0	4
Type de courant ¹		2	0	2
Diamètre des gouttes ²		2	0	2
Apport thermique ³		2	0	2
Métal de base		2	0	2
Stabilité du transfert de métal		1	0	1
Type d'alimentation électrique		1	0	1
Temps d'arc		1	0	1
Puissance électrique ⁴		1	0	1
TOTAL		81	4	85

¹ Continu (CC) ou alternatif (CA)

² Gouttes transférées de l'électrode au métal de base avant leur détachement

³ en kJ/mm

⁴ en kJ/min

Une situation d'évaluation est réalisée chaque fois qu'un paramètre est ciblé par une étude, sans tenir compte du fait qu'il ait pu être en réalité modifié et ainsi évalué plusieurs fois dans cette même étude. Par exemple, pour une étude ayant évalué 12 mélanges de gaz de protection, bien que le paramètre « gaz de protection » ait été finalement évalué plusieurs fois, cela ne donne qu'une seule situation d'évaluation. Les 21 paramètres de soudage ont ainsi comptabilisé 85 situations d'évaluation. Ce nombre dépasse le nombre d'études retenues, car la plupart ont ciblé plus d'un paramètre de soudage et, pour un même paramètre, des caractéristiques différentes. À titre d'exemple, l'étude de Sham et Liu (2013) ayant évalué l'intensité du courant, la composition de l'électrode, le diamètre de l'électrode ainsi que l'épaisseur du flux pour le procédé SMAW a réalisé quatre situations d'évaluation différentes.

Le gaz de protection et les caractéristiques de l'électrode ont été les paramètres les plus étudiés (environ 19 % des situations d'évaluation pour chacun), suivis de la tension de courant et des procédés de soudage (respectivement 13 % et 8 % des situations d'évaluation).

Les situations d'évaluation par paramètre et par procédé de soudage sont présentées au tableau 6. Le procédé de soudage GMAW a fait l'objet d'une analyse sur 15 paramètres alors que 8 et 7 paramètres l'ont été pour le SMAW et le FCAW respectivement. Les procédés GTAW et MCAW n'ont bénéficié que de l'analyse de deux paramètres chacun. Sans compter les analyses ayant porté sur les procédés de soudage eux-mêmes, plus de 65 % des situations d'évaluation étaient en lien avec le GMAW (49/75), suivi du SMAW (14/75), du FCAW (8/75) et finalement du GTAW et du MCAW (2/75 pour chacun).

Tableau 6. Situations d'évaluation par paramètre de soudage et par procédé

Paramètre évalué		Procédé de soudage					TOTAL
		GMAW	SMAW	FCAW	GTAW	MCAW	
Gaz de protection	Composition	13	0	0	1	1	15
	Double arrivée de gaz	1	0	0	0	0	1
Électrode	Composition et/ou type	3	2	0	0	1	6
	Composition de l'enrobage	0	4	0	0	0	4
	Composition du fourrage	1	0	0	0	0	1
	Épaisseur du flux	0	2	1	0	0	3
	Composition du flux	0	0	1	0	0	1
	Diamètre	0	1	0	0	0	1
Tension du courant		10	0	1	0	0	11
Mode de transfert		6	0	1	0	0	7
Intensité du courant		4	2	2	1	0	9
Vitesse du fil		3	0	1	0	0	4
Type de courant ¹		1	1	0	0	0	2
Diamètre des gouttes ²		2	0	0	0	0	2
Apport thermique ³		1	1	0	0	0	2
Métal de base		2	0	0	0	0	2
Stabilité du transfert de métal		1	0	0	0	0	1
Type d'alimentation électrique		0	1	0	0	0	1
Temps d'arc		1	0	0	0	0	1
Puissance électrique ⁴		0	0	1	0	0	1
TOTAL		49	14	8	2	2	75

¹Continu (DC) ou alternatif (AC)

²Gouttes transférées de l'électrode au métal de base avant leur détachement

³en kJ/mm

⁴en kJ/min

4.2 Résultats rapportés par type de procédé de soudage

4.2.1 GMAW (Gas Metal Arc Welding)

Au total, 28 études retenues se sont intéressées à l'évaluation des paramètres de soudage du GMAW (tableau 7). Dans cette sous-section rapportant les résultats obtenus par type de procédé de soudage, une situation d'évaluation est réalisée chaque fois qu'un paramètre a été ciblé pour un procédé donné, sans tenir compte du fait qu'il ait pu être en réalité modifié et ainsi évalué plusieurs fois pour ce même procédé et dans une même étude.

Quarante-neuf situations d'évaluation ont été ainsi rapportées pour ce procédé. Le gaz de protection a été le paramètre le plus étudié (près de 29 % des situations), suivi du mode de tension de courant et du mode de transfert (respectivement 20 % et 12 % des situations).

Tableau 7. Paramètres de soudage évalués avec le procédé GMAW

Paramètre de soudage évalué		Nombre de situations d'évaluation
Gaz de Protection	Composition	13
	Double arrivée de gaz	1
Tension de courant		10
Mode de transfert		6
Électrode	Composition du fourrage	1
	Composition et/ou type	3
Intensité du courant		4
Vitesse du fil		3
Diamètre des gouttes		2
Métal de base		2
Apport thermique		1
Stabilité du transfert de métal		1
Type de courant		1
Temps d'arc		1
TOTAL		49

Le tableau 8 présente les résultats saillants rapportés après modification du gaz de protection durant le soudage au GMAW. L'influence de ce paramètre sur les fumées générées est liée non seulement à sa composition, au type de mélange (binaire ou tertiaire), mais également à d'autres paramètres de soudage comme le mode de transfert, le type de métal de base ou le type de courant.

Tableau 8. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du gaz de protection

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Carpenter et al., 2017	Acier doux	Ar + 5 % CO ₂ Ar + 5 % CO ₂ + 2 % O ₂ Ar + 5 % CO ₂ + 5 % O ₂	Ar + 10 % CO ₂ Ar + 18 % CO ₂	Taux de formation de fumées (g/min) Diamètre des particules	↑
		Mélanges de gaz sans oxygène ²	Mélange de gaz avec oxygène (Ar + O ₂ et Ar + CO ₂ + O ₂) ²	Fraction des particules de diamètres <40 et <60 nm	↑
		Ar + 5 % CO ₂ + 2 % O ₂ ²	Ar + 5 % CO ₂ + 5 % O ₂ ²	Taux de formation de fumées (g/min)	↓
		Mélange sans He	Mélange avec He (Ar + Ar + He + CO ₂)	Taux de formation de fumées (g/min)	↓
Carpenter et al., 2009	Acier ordinaire au carbone	Ar + CO ₂ / Ar + CO ₂ + O ₂	100 % CO ₂	Taux de formation de fumées (g/min)	↑
		Ar + 20 % He + 6 % CO ₂	Ar + 30 % He + 10 % CO ₂	Taux de formation de fumées (g/min)	=
De Meneses et al., 2016	Acier au carbone	Ar + 5 % CO ₂	100 % CO ₂	% en volume de CO et de CO ₂	↑
Dennis et al., 2002a	Acier inoxydable	100 % Ar	Ar + 0,03 % NO Ar + 0,03 % C ₂ H ₄	Cr(VI)	↓
		Une seule arrivée de gaz (Ar + NO ou MISON™)	Double arrivée de gaz, une primaire : Ar + 5 % CO ₂ + 2 % O ₂ (Argoshield) et une secondaire : MISON™	Ozone Cr(VI)	↓ =
Gomes et al., 2014	Acier doux	100 % CO ₂	Ar + 18 % CO ₂	PUF (ADSA* en µm ² /cm ³ .s)	↓
	Acier inoxydable	Ar + 5 % He + 2 % CO ₂ + 2 % N ₂ / Ar + 5 % CO ₂	Ar + 18 % He + 1 % CO ₂	PUF (ADSA en µm ² /cm ³ .s)	↑
Keane et al., 2009	Acier au carbone	Mélange Ar + CO ₂ (gaz actif) (mode court-circuit)	Mélange Ar + He (gaz inerte) (mode court-circuit)	Taux de génération de Cr(VI) en µg/min Taux de génération de Cr(VI) en µg de Cr(VI) par m de fil de soudage Concentration de Cr(VI) en µg/g de fumées totales	↓
Matuziak et Wycislik, 2010	Acier inoxydable	Ar + 2 % O ₂ (facteur d'oxygénation moyen à élevé)	Ar + 2,5 % CO ₂ (facteur d'oxygénation faible)	Taux d'émission de fumées (mg/s)	↑
		100 % Ar	Ar + 2 % O ₂ Ar + 2,5 % CO ₂	% en masse de Cr(VI) dans les fumées totales % en masse de Ni dans les fumées totales	↓ ↓

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Matuziak <i>et al.</i> , 2016	Acier inoxydable	100 % Ar Ar + 2,5 % CO ₂ Ar + 5 % CO ₂ / Ar + 18 % CO ₂ / Ar + 5 % CO ₂ + 5 % O ₂	Ar + 2 % O ₂	Taux d'émission de fumées (mg/s)	↓
		100 % Ar / Ar + 2 % O ₂ (MAG/MIG sur acier austénitique*)	Ar + 2,5 % CO ₂ (MAG/MIG sur acier austénitique*)	% en masse de Cr(VI) dans les fumées totales	↓
		Ar + 2 % O ₂ / Ar + 2,5 % CO ₂ / Ar + 5 % CO ₂ + 5 % O ₂ (MAG/MIG sur acier ferritique ⁽²⁾)	Ar + 18 % CO ₂ (MAG/MIG sur acier ferritique ³)		
		Ar + 2,5 % CO ₂ / Ar + 2 % O ₂ (variante CMT™ sur acier austénitique)	100 % Ar (variante CMT™ sur acier austénitique)	% en masse de Cr(VI) dans les fumées totales	↓
		Ar + 18 % CO ₂ / Ar + 5 % CO ₂ + 5 % O ₂ / Ar + 2,5 % CO ₂ (variante CMT™ sur acier ferritique)	Ar + 2 % O ₂ (variante CMT™ sur acier ferritique)		
Pacheco <i>et al.</i> , 2017	Acier inoxydable	100 % Ar Ar + 18 % He + 1 % CO ₂ Ar + He + 2 % CO ₂ + N ₂	Ar + 18 % CO ₂	Concentration de fumées totales en mg/m ³	↑
				PUF (ADSA en µm ² /cm ³)	↑
Pires <i>et al.</i> , 2010	Acier ordinaire à faible teneur en carbone	Ar + 5 % CO ₂ + 4 % O ₂ Ar + 8 % CO ₂	Ar + 18 % CO ₂ + 5 % O ₂	Taux de génération de fumées (mg/s)	↑
		Ar + 8 % CO ₂	Ar + 8 % CO ₂ + 0,03 % NO	Taux de génération de fumées (mg/s) Concentration de NO en ppm	↑
Pires <i>et al.</i> , 2006	Acier doux	Ar + 2 % CO ₂ Ar + 3 % CO ₂ + 1 % O ₂	Ar + 18 % CO ₂ Ar + 5 % CO ₂ + 4 % O ₂	Taux de formation de fumées (g/min)	↑
		Ar + 2 % CO ₂	Ar + 18 % CO ₂	Diamètre des particules	
		Ar + 5 % O ₂	Ar + 8 % O ₂	% en masse de Mn dans les fumées totales	↓ ↑
Topham <i>et al.</i> , 2012	Acier doux	Ar + 25 % CO ₂	Ar + CO ₂ + 6,3 % de tétraméthylsilane (TMS)	Diamètre des particules	↑
			Ar + CO ₂ + 4,2 % de tétraméthylsilane (TMS)	Concentration de Cr(VI) en mg/m ³	↓
Zimmer <i>et al.</i> , 2002	Acier doux	90 % Ar + 10 % CO ₂ / 80 % Ar + 20 % CO ₂	100 % CO ₂	PUF (particules/cm ³)	↑

*ADSA, *alveolar deposited surface area* ou surface spécifique moyenne des particules pouvant se déposer dans les alvéoles pulmonaires

¹Résultat : ↑ augmentation, ↓ diminution, = sans effet

²Uniquement avec GMAW avec contrôle automatique de la tension du courant

³Les aciers austénitique et ferritique sont tous deux des aciers inoxydables, mais différent par leur composition (le premier contenant de l'austénite, le deuxième de la ferrite) et par leur résistance à la corrosion, l'austénitique étant le plus résistant.

Ainsi, l'augmentation de la fraction de gaz CO₂ dans un mélange de gaz de protection induit ce qui suit :

- Une augmentation des quantités de fumées générées (Carpenter, Monaghan, Cuiuri et Norrish, 2017; Carpenter, Monaghan et Norrish, 2009; Matusiak et Wycislik, 2010; Pacheco, Gomes, Miranda et Quintino, 2017; Pires et al., 2010; Pires, Quintino, Miranda et Gomes, 2006).
- Une augmentation des concentrations de gaz CO et CO₂ dans les fumées totales (de Meneses, Leal et Scotti, 2016).
- Un effet variable sur les PUF. Un gaz contenant 100 % de CO₂ génère moins de PUF qu'un gaz Ar + 18 % CO₂ sur acier doux, alors qu'un gaz plus riche en CO₂ sur acier inoxydable en augmente au contraire les concentrations (Gomes, Miranda, Carvalho et Quintino, 2014). Un gaz 100 % CO₂ génère toutefois plus de PUF qu'un gaz Ar + (2 ou 5 ou 10 ou 20 %) CO₂ (Gomes et al., 2014; Zimmer, Baron et Biswas, 2002).
- Une réduction des concentrations de Ni (Matusiak et Wycislik, 2010) et de Mn (Pires et al., 2006)
- Un effet variable sur le Cr(VI), selon la catégorie d'acier inoxydable et la variante de GMAW. Ainsi, en augmentant la fraction de CO₂, les concentrations de Cr(VI) diminuent durant le procédé MAG/MIG sur les aciers austénitique et ferritique alors qu'elles augmentent avec la variante CMT™ sur les mêmes métaux de base (Matusiak, Wycislik et Wycislik, 2016).

L'influence de l'O₂ dans le gaz de protection est variable selon certains autres paramètres et selon les indicateurs mesurés :

- Un mélange de gaz contenant un faible % de CO₂ et enrichi en O₂ (p. ex. : Ar + 5 % CO₂ + 2 % O₂ ou Ar + 5 % CO₂ + 5 % O₂) (Carpenter *et al.*, 2017) ou bien l'ajout d'O₂ à de l'Ar pur (Ar + 2 % O₂) (Matusiak et Wycislik, 2010) contribue à une réduction des fumées totales générées. Toutefois, dans un mélange tertiaire Ar + 5 % CO₂ + O₂, l'augmentation d'O₂ entraîne soit une élévation des quantités de fumées lorsque la tension de courant est constante soit, à l'inverse, une réduction des fumées lorsque le contrôle de la tension du courant est automatique (Carpenter *et al.*, 2017).
- L'enrichissement des gaz de protection en O₂ peut réduire les concentrations de Cr(VI) (Matusiak et Wycislik, 2010; Matusiak *et al.*, 2016), de Ni (Matusiak et Wycislik, 2010) et de Mn (Pires *et al.*, 2006).
- Un mélange de gaz avec O₂ peut toutefois augmenter les concentrations de PUF, notamment dans le soudage au GMAW en contrôle automatique de tension (Carpenter *et al.*, 2017).
- Les mélanges de gaz avec He génèrent moins de fumées que celles sans He (Carpenter *et al.*, 2017). Une variation des fractions de He et de CO₂ dans ces mélanges n'a toutefois aucun effet sur les quantités de fumées générées (Carpenter *et al.*, 2009). Cependant,

l'augmentation de la proportion de He contribue à la hausse des PUF (Gomes *et al.*, 2014). Un mélange de gaz inerte Ar + He réduit les concentrations de Cr(VI), quel que soit l'indicateur mesuré, et ce, en mode court-circuit (Keane, M. *et al.*, 2009).

- Un gaz constitué uniquement de Ar peut augmenter les quantités de fumées (Matusiak *et al.*, 2016) et celles de Ni (Matusiak et Wycislik, 2010). Son impact sur le Cr(VI) varie également selon la catégorie d'acier inoxydable et les dérivés du procédé GMAW. Ainsi, les concentrations de Cr(VI) augmentent durant le procédé MAG/MIG sur les aciers austénitique et ferritique alors qu'elles diminuent avec la variante CMT™ sur l'acier austénitique, et ce, avec 100 % Ar (Matusiak *et al.*, 2016).
- L'effet d'agents réducteurs est variable. Ajouté à un mélange Ar + 8 % CO₂, le NO augmente non seulement les quantités de fumées, mais également la concentration de NO dans celles-ci (Pires *et al.*, 2010). L'addition d'une deuxième arrivée de gaz protecteur contenant du NO à une première arrivée contenant un mélange Ar + CO₂ (technique dite *double shred torch*) contribue quant à elle à la réduction des émissions d'O₃ sans toutefois affecter les émissions de Cr(VI) (Dennis *et al.*, 2002a).

L'ajout d'un additif tel le tétraméthylsilane (TMS) à un mélange Ar + CO₂ contribue, quant à elle, à réduire les concentrations de Cr(VI) tout en augmentant le diamètre des particules générées (Topham *et al.*, 2012).

Le tableau 9 présente les résultats saillants rapportés avec le procédé GMAW après modification de la tension du courant. Il en ressort que les quantités de fumées générées sont étroitement liées à la tension du courant. Néanmoins, l'influence de ce paramètre sur les PUF peut également dépendre d'autres paramètres de soudage.

L'augmentation de la tension du courant entraîne globalement une plus grande génération de fumées (Carpenter *et al.*, 2017; Carpenter *et al.*, 2009; de Meneses, Gomes et Scotti, 2014; Scotti et de Meneses, 2014; Sterjovski, Norrish et Monaghan, 2010). Trois études ont rapporté une augmentation des PUF avec une tension du courant plus élevée (Antonini, J. M. *et al.*, 2011; Hovde et Raynor, 2007; Sriram *et al.*, 2015). À l'inverse, dans les études de Carpenter *et al.* (2017) et de Sterjovski *et al.* (2010), l'augmentation de la tension de courant entraîne une diminution des émissions de PUF. Dans le cas de Carpenter *et al.* (2017), ce résultat n'a toutefois été constaté qu'avec le procédé GMAW avec contrôle automatique de la tension utilisant un mélange de gaz avec O₂ et non pas avec le même procédé avec mélange de gaz sans O₂ ou encore avec le procédé GMAW en mode de tension constante 32 V.

L'influence de la tension du courant sur certains contaminants, comme le Mn et le Cr, est également variable. Une tension plus élevée peut ainsi soit augmenter les concentrations de Mn total (Antonini, J. M. *et al.*, 2011; Hovde et Raynor, 2007) soit réduire à la fois les concentrations de Mn total et de sa fraction Mn soluble (Sriram *et al.*, 2015). Les concentrations de Cr total sont également soit plus élevées (Sriram *et al.*, 2015) soit plus faibles lorsque la tension est augmentée (Antonini, J. M. *et al.*, 2011). Les fractions de CO et de CO₂ dans les fumées totales ne semblent pas être influencées par l'augmentation de la tension (de Meneses *et al.*, 2016).

Tableau 9. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification de la tension du courant

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Antonini <i>et al.</i> , 2011	Acier au carbone	25 V	30 V	PUF (particule/cm ³)	↑
				% en masse de Mn et de Cu dans les fumées totales	↑
				% en masse de Fe, Cr, Ni dans les fumées totales	↓
Carpenter <i>et al.</i> , 2017	Acier doux	Tension constante 32 V	Contrôle automatique de la tension (tension et longueur d'arc plus réduites)	Taux de formation de fumées (g/min)	↓
				Diamètre des particules	↓ (gaz protecteur avec O ₂)
Carpenter <i>et al.</i> , 2009	Acier ordinaire au carbone	32 V	36 V	Taux de formation de fumées (g/min)	↑ (avec 100 % CO ₂)
De Meneses <i>et al.</i> , 2016	Acier au carbone	21 V	26 V	% en volume de CO et de CO ₂	=
De Meneses <i>et al.</i> , 2014	Acier au carbone	17 V	25 V	Taux de génération de fumées (g/min)	↑
Hovde et Raynor, 2007	Acier doux	16 V	23,5 V	Particules totales (p/cm ³)	↑
				PUF (p/cm ³)	↑
				Concentration de Mn et Fe (mg/m ³)	↑
Pires <i>et al.</i> , 2006	Acier doux	15 V	35 V	Taux de formation de fumées (g/min)	↑
Scotti et de Meneses, 2014	Acier au carbone	17 V (longueur d'arc court)	25 V (longueur d'arc augmentée)	Taux de génération de fumées (g/min)	↑
Sriram <i>et al.</i> , 2015	Acier au carbone	25 V	30 V	PUF (fraction dans les partic. totales)	↑
				% masse de Mn dans les métaux totaux	↓
				Fraction soluble de Mn	↓
				% masse de Cr et Fe dans les métaux totaux	↑
Sterjovski <i>et al.</i> , 2010	Acier ordinaire au carbone	20-26 V	30-36 V	Concentration des fumées totales (mg/m ³)	↑
		30-36 V	20-26 V	Diamètre des particules	↑
				PUF (fraction dans les particules totales)	↑

¹Résultat : ↑ augmentation, ↓ diminution

L'augmentation de la tension du courant entraîne globalement une plus grande génération de fumées (Carpenter *et al.*, 2017; Carpenter *et al.*, 2009; de Meneses *et al.*, 2014; Scotti et de Meneses, 2014; Sterjovski *et al.*, 2010). Trois études ont rapporté une augmentation des PUF avec une tension du courant plus élevée (Antonini, J. M. *et al.*, 2011; Hovde et Raynor, 2007; Sriram *et al.*, 2015). À l'inverse, dans les études de Carpenter *et al.* (2017) et de Sterjovski *et al.* (2010), l'augmentation de la tension de courant entraîne une diminution des émissions de PUF. Dans le cas de Carpenter *et al.* (2017), ce résultat n'a toutefois été constaté qu'avec le procédé GMAW avec contrôle automatique de la tension utilisant un mélange de gaz avec O₂ et non pas avec le même procédé avec mélange de gaz sans O₂ ou encore avec le procédé GMAW en mode de tension constante 32 V.

L'influence de la tension du courant sur certains contaminants, comme le Mn et le Cr, est également variable. Une tension plus élevée peut ainsi soit augmenter les concentrations de Mn total (Antonini, J. M. *et al.*, 2011; Hovde et Raynor, 2007) soit réduire à la fois les concentrations de Mn total et de sa fraction Mn soluble (Sriram *et al.*, 2015). Les concentrations de Cr total sont également soit plus élevées (Sriram *et al.*, 2015) soit plus faibles lorsque la tension est augmentée (Antonini, J. M. *et al.*, 2011). Les fractions de CO et de CO₂ dans les fumées totales ne semblent pas être influencées par l'augmentation de la tension (de Meneses *et al.*, 2016).

Le tableau 10 présente les principaux résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du mode de transfert. Le mode de transfert en pulvérisation pulsée (GMAW-P) réduit globalement les quantités de fumées générées (Keane, M., Stone et Chen, 2010; Keane, M. *et al.*, 2009; Wallace, Landon, *et al.*, 2001) et celles d'O₃ (Keane, M. *et al.*, 2010; Keane, M. *et al.*, 2009) comparativement aux modes de transfert en court-circuit et en pulvérisation axiale.

L'influence du mode pulsé sur les concentrations de Mn dépend de l'indicateur considéré. Ainsi, le GMAW-P augmente la fraction de Mn dans les fumées totales comparativement aux deux autres modes (Keane, M. *et al.*, 2010). L'influence du mode de transfert sur le Cr(VI) est variable, car elle dépend du gaz de protection associé à chacun des modes. Ainsi, le GMAW en mode pulsé avec Ar + O₂ réduit le taux de génération du Cr(VI) comparativement aux modes en pulvérisation axiale et en court-circuit, tous deux avec un mélange Ar + CO₂ (Keane, M. *et al.*, 2010). Toutefois, le mode en court-circuit avec gaz inerte (Ar + He) émet moins de Cr(VI) comparativement aux autres modes, quel que soit leur gaz de protection (Keane, M. *et al.*, 2009).

L'influence du mode pulvérisation axiale sur les quantités de fumées générées en comparaison au mode en court-circuit dépend également du gaz de protection. Ainsi, le mode en pulvérisation axiale génère moins de fumées que le mode court-circuit lorsque le gaz est de type 100 % Ar ou Ar + faible fraction de CO₂ + He. À l'inverse, un mode en pulvérisation axiale génère plus de fumées que le mode en court-circuit lorsque le gaz de protection contient une fraction élevée de CO₂, en l'occurrence Ar + 18 % CO₂ (Pacheco *et al.*, 2017).

Tableau 10. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du mode de transfert

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Gomez <i>et al.</i> , 2014	Acier doux ou acier inoxydable	Modes globulaire et en court-circuit (Ar + 5 % CO ₂ / Ar + 10 % CO ₂ / Ar + 5 % He + 2 % CO ₂ + 2 % N ₂)	Mode en pulvérisation axiale (Ar + 5 % CO ₂ / Ar + 10 % CO ₂ / Ar + 5 % He + 2 % CO ₂ + 2 % N ₂)	PUF (ADSA ² en µm ² /cm ³ .s)	↑
	Acier inoxydable	Modes court-circuit et pulvérisation axiale (Ar + 18 % He + 1 % CO ₂)	Mode globulaire (Ar + 18 % He + 1 % CO ₂)	PUF (ADSA en µm ² /cm ³ .s)	↑
Keane <i>et al.</i> , 2009	Acier inoxydable	Modes court-circuit et en pulvérisation axiale	Mode en pulvérisation pulsée (GMAW-P) (Ar + O ₂) ³	Taux de génération de fumée (mg/min)	↓
		GMAW-P et pulvérisation axiale	Mode en court-circuit (Ar + He)	Concentration d'O ₃ en ppm	↓
Keane <i>et al.</i> , 2010	Acier inoxydable	Modes en court-circuit et en pulvérisation axiale (Ar + CO ₂)	(GMAW-P) (Ar + O ₂)	Taux de génération de fumée (mg/min)	↓
				Taux de génération de Mn total en µg de Mn/min et en µg de Mn/fil de soudage	↓
				% en masse de Mn dans les fumées totales	↑
				Taux de génération de Cr(VI) en µg de Cr(VI)/m de fil de soudage	↓
				Concentration d'O ₃ en ppb	↓
Pacheco <i>et al.</i> , 2010	Acier inoxydable	Mode en court-circuit (100 % Ar / Ar + 1 % CO ₂ + 18 % He/ Ar + 2 % CO ₂ + 5 % He+ 2 % N ₂)	Mode en pulvérisation axiale (même gaz de protection)	Concentrations des fumées totales en mg/m ³	↓
				PUF (ADSA en µm ² /cm ³)	↑
		Mode en court-circuit (Ar + 18 % CO ₂)	Mode en pulvérisation axiale (Ar + 18 % CO ₂)	Concentrations des fumées totales en mg/m ³	↑
				PUF (ADSA en µm ² /cm ³)	↑
Wallace, Landon, <i>et al.</i> , 2001	Acier à faible teneur en carbone	Modes en court-circuit, globulaire et en pulvérisation axiale	(GMAW-P)	Concentrations des fumées totales en mg/m ³	↓
Zimmer <i>et al.</i> , 2002	Acier doux	Mode globulaire (Ar + CO ₂)	Mode en pulvérisation axiale (Ar + CO ₂)	PUF (particules/cm ³)	↑

¹Résultat : ↑ augmentation ; ↓ diminution.

²ADSA, *alveolar deposited surface area* ou surface spécifique moyenne des particules pouvant se déposer dans les alvéoles pulmonaires.

³Deux paramètres ont été modifiés en réalité : le mode de transfert et le gaz de protection. Chaque mode avait donc un mélange de gaz particulier.

Le mode en pulvérisation axiale génère généralement plus de PUF que le mode en court-circuit (Gomes *et al.*, 2014; Pacheco *et al.*, 2017; Zimmer *et al.*, 2002). Toutefois, l'influence du mode de transfert sur la génération des PUF peut également dépendre du type de mélange des gaz protecteurs et/ou du métal de base. Ainsi, les modes en pulvérisation globulaire et en court-circuit produisent beaucoup plus de PUF que le mode en pulvérisation axiale lorsque le soudage est réalisé uniquement sur acier inoxydable avec un mélange riche en He (Ar +18 % He+1 % CO₂) (Gomes *et al.*, 2014).

Le tableau 11 présente les résultats saillants rapportés durant le soudage au GMAW, mais après modification de certaines caractéristiques de l'électrode (composition et/ou type, composition du fourrage). Ces différents paramètres ont un effet certain sur la génération des fumées.

Tableau 11. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification de l'électrode

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Gheonea <i>et al.</i> , 2015	Acier doux	Fil-électrode rutilique fourré de flux à basse émission de fumée	Fil-électrode fourré de poudres métalliques à basse émission de fumées	Concentration et diamètres des microparticules	↓
Mihailescu <i>et al.</i> , 2015	Acier faiblement allié à haute résistance	Fil-électrode plein ordinaire, fil-électrode ordinaire fourré en rutil ou de poudres métalliques (Ar + 18 % CO ₂)	Fil-électrode fourré de poudres métalliques à basse émission de fumées (Ar + 18% CO ₂)	Concentration en ppm de CO	↓
Mihailescu <i>et al.</i> , 2017	Acier faiblement allié à haute résistance	Fils-électrodes ordinaires fourrés en rutil et fil-électrode fourré basique (100 %CO ₂)	Fil-électrode plein et fil-électrode fourré en rutil à basse émission de fumée (100 %CO ₂)	Concentration en ppm de CO	↓
Pires <i>et al.</i> , 2010	Acier ordinaire à faible teneur en carbone	Électrodes pleines (0,1 % de carbone) avec ou sans revêtement de Cu	Électrode "verte" (0,05% de carbone) fourrée	Taux de génération de fumées en mg de fumées/kg de dépôt de métal d'apport	↓
		Électrodes pleines (0,1 % de carbone) sans revêtement de Cu	Électrodes pleines (0,1 % de carbone) avec revêtement de Cu		=

¹Résultat : ↑ augmentation ; ↓ diminution ; = sans effet.

Ainsi, un fil-électrode fourré de type basse émission de fumées (*low fume*) génère moins de CO comparativement à un fil-électrode fourré ordinaire, quelle que soit la composition du fourrage (rutil ou poudres métalliques) (Mihailescu, Danuț, Gheonea et Scutelnicu, 2015; Mihailescu, D., Gheonea, Scutelnicu et Mircea, 2017). Toutefois, un fourrage de poudres métalliques émet plus de microparticules (ou particules de diamètres <1 μm) qu'un fourrage en rutil pour les électrodes à basse émission (Gheonea, Mihailescu et Scutelnicu, 2015). Les électrodes fourrées dites « vertes » à faible teneur de carbone génèrent moins de fumées que les

électrodes pleines enrichies en carbone avec ou sans revêtement de Cu. La génération de fumées d'une électrode pleine revêtue de Cu est toutefois similaire à celle d'une électrode pleine et nue (Pires *et al.*, 2010).

Le tableau 12 présente les résultats saillants rapportés durant le soudage au GMAW, mais après modification de l'intensité du courant. Une réduction de l'intensité du courant entraîne invariablement une diminution des fumées générées (Pires *et al.*, 2010; Pires *et al.*, 2006; Scotti et de Meneses, 2014) ainsi que du Cr total, du Cr(VI), du Ni et du Fe (Matusiak et Wycislik, 2010).

Tableau 12. Résultats rapportés durant le procédé GMAW après modification de l'intensité du courant

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Matuziak et Wycislik, 2010	Acier inoxydable	250 A	150 A	Taux d'émission de fumées (mg/s)	↓
				% en masse de Cr(VI), Cr total, Ni, et Fe dans les fumées totales	↓
Pires <i>et al.</i> , 2006	Acier doux	280 A	150 A	Taux de formation de fumées (mg/min)	↓
Pires <i>et al.</i> , 2010	Acier ordinaire à faible teneur en carbone	300 A	74 A	Taux de formation de fumée (mg/s)	↓
		80 A	36 A		
Scotti et de Meneses, 2014	Acier au carbone	400 A	250 A	Taux de génération de fumées (g/min)	↓

¹Résultat : ↓ diminution

Le tableau 13 présente les résultats saillants rapportés durant le soudage au GMAW, mais après la modification de la vitesse du fil. Sur acier doux, l'augmentation de la vitesse du fil n'a aucune répercussion sur les concentrations de particules totales, de PUF, de Mn et de Fe (Hovde et Raynor, 2007). Sur acier faiblement allié de forte résistance, les concentrations de CO ainsi que de microparticules sont plus élevées lorsque la vitesse du fil est augmentée, quel que soit le type de gaz protecteur (Mihailescu, Danuț *et al.*, 2015; Mihailescu, D. *et al.*, 2017).

Le tableau 14 présente les résultats saillants après modification du diamètre des gouttes transférées au métal de base avant leur détachement, et ce, durant le soudage au GMAW. Seule une étude a conclu que la diminution du diamètre des gouttes entraînait une réduction des fumées totales générées (Bosworth et Deam, 2000).

Le tableau 15 présente les principaux résultats durant le soudage au GMAW, mais après modification du métal de base. Les fumées générées sur acier inoxydable sont moins concentrées en Mn sous toutes ses formes comparativement à celles émises par l'acier doux (Andrews, Keane, Hanley, Feng et Ashley, 2015). Toutefois, les concentrations de PUF y sont plus élevées (Gomes *et al.*, 2014).

Tableau 13. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification de la vitesse du fil

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Hovde et Raynor, 2007	Acier doux	3,94-4,45 m/min	11,81-12,32 m/min	Concentration de particules totales en mg/m ³	=
				PUF (p/cm ³)	=
				Concentration de Mn et Fe en mg/m ³	=
Mihailescu <i>et al.</i> , 2015	Acier faiblement allié à forte résistance	5,0 m/min (82 % Ar + 18 % CO ₂ ou Corgon 18)	6,0 m/min (Corgon 18)	Concentration de CO en ppm	↑
				Concentration de microparticules en mg/m ³	↑
Mihailescu <i>et al.</i> , 2017	Acier faiblement allié à forte résistance	5,0 m/min (100 % CO ₂)	6,0 m/min (100 % CO ₂)	Concentration de CO en ppm	↑
				Concentration de microparticules en mg/m ³	↑

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution; = sans effet

Tableau 14. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du diamètre des gouttes transférées au métal de base

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Bosworth et Deam, 2000	Acier au carbone	2,91 mm	1,13 mm	Taux de formation de fumées (g/h)	↓
Scotti et de Meneses, 2014	Acier au carbone	0,3 mm	1,5-1,8 mm	Taux de génération de fumées (g/min)	Résultats non concluants selon les auteurs

¹Résultat : ↓ diminution

Tableau 15. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification du métal de base

Référence	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Andrews <i>et al.</i> , 2015	Acier doux au carbone	Acier inoxydable	Fraction de Mn total en mg/g de fumées générées	↓
			Fractions soluble et insoluble du Mn	
			Fractions Mn (III) et Mn (IV)	
Gomes <i>et al.</i> , 2014	Acier doux	Acier inoxydable	PUF (ADSA ² en µm ² /cm ³ .s)	↑

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution

²ADSA, *alveolar deposited surface area* ou surface spécifique moyenne des particules pouvant se déposer dans les alvéoles pulmonaires

Le tableau 16 présente les résultats durant le soudage au GMAW, mais après modification d'autres paramètres de soudage (stabilité du transfert de métal, temps d'arc, apport thermique et type de courant). L'état de la stabilité du transfert du métal n'a aucun effet sur la composition des particules générées ni sur leur diamètre et leur morphologie (de Meneses *et al.*, 2014). L'augmentation du temps d'arc entraîne toutefois de plus grandes quantités de fumées (Scotti et de Meneses, 2014).

Un apport thermique plus élevé induit également plus de fumées totales, de Mn et de Cr tout en augmentant le diamètre des particules (Srinivasan et Balasubramanian, 2011a). Le passage d'un courant continu à un courant alternatif permet non seulement de réduire les quantités de fumées générées mais également celles de Mn total (Tong, Nakata, Tanaka, Ushio et Mita, 2005).

Tableau 16. Résultats rapportés avec le procédé GMAW après modification d'autres paramètres

Référence	Paramètre évalué	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
De Meneses <i>et al.</i> , 2014	Stabilité de transfert du métal	Acier ordinaire au carbone	Faible stabilité de transfert de métal (niveau d'éclaboussures élevé)	Haute stabilité de transfert de métal (niveau d'éclaboussures faible)	Composition, diamètre et morphologie des particules	=
Scotti et de Meneses, 2014	Temps d'arc	Acier au carbone	0,0064-0,0074 s	0,0357-0,0374 s	Taux de génération de fumées (mg/min)	↑
Srinivasan et Balasubramanian, 2011a	Apport thermique	Acier inoxydable	1,32 kJ/mm	0,96 kJ/mm	Taux de génération de fumées (mg/min)	↑
					% en masse de Mn, Cr,	↑
					Diamètre des particules	↑
Tong <i>et al.</i> , 2005	Type de courant	Alliage Al-Mg	Continu (DC)	Alternatif (AC)	Concentration des fumées totales (mg/m ³) Fraction de Mn dans les fumées totales en % masse	↓

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution; = sans effet

4.2.2 SMAW (Shielded Metal Arc Welding - soudage à l'arc avec électrode enrobée)

Huit études ont évalué différents paramètres pour le SMAW. Ces paramètres ainsi que le nombre de situations d'évaluation sont présentés au tableau 17. Quatorze situations

d'évaluation ont été rapportées pour le SMAW. L'électrode a été le paramètre majoritairement étudié (près de 64 % des situations), suivie de paramètres ayant trait à différentes caractéristiques du courant (intensité et type de courant, apport thermique, type d'alimentation électrique).

Tableau 17. Paramètres de soudage évalués avec le procédé SMAW

Paramètre de soudage évalué		Nombre de situations d'évaluation
Électrode	Composition de l'enrobage	4
	Composition	2
	Épaisseur du flux	2
	Diamètre de l'âme métallique	1
Intensité du courant		2
Type de courant		1
Type d'alimentation électrique		1
Apport thermique		1
TOTAL		14

Le tableau 18 présente les résultats saillants rapportés après modification de l'électrode durant le soudage au SMAW. Dans l'ensemble, la modification des caractéristiques de l'électrode impacte sur la génération des fumées. Les constats suivants émergent :

Concernant la composition de l'enrobage

Le nanoenrobage de l'électrode, avec une couche de nanoparticules de TiO_2 ou de Al_2O_3 entre le flux et l'âme métallique de l'électrode, induit une diminution de la génération de fumées tandis qu'un triple nanorevêtement associant nanoparticules de TiO_2 , d' Al_2O_3 et de ZnO réduit considérablement les concentrations de Cr(VI), de Mn, de Ni et de Cr total (Mohan, Sivapirakasam, Kurnar et Surianarayanan, 2015; Sivapirakasam, Mohan, Kumar et Surianarayanan, 2015; Vishnu, Sivapirakasam, Kk, Albert et Chakraborty, 2018). L'usage d'un enrobage en rutile acide à la place d'un enrobage en rutile basique n'a aucun effet sur la génération de Cr (Matusiak et Wycislik, 2010).

Concernant la composition et/ou le diamètre de l'électrode

Une électrode en acier inoxydable génère plus de Mn et de Cr qu'une électrode en acier doux, mais ses fumées sont moins concentrées en Fe et en Si (Chan, Gunter et Sutherland, 2002). À l'inverse, les quantités de fumées générées augmentent lorsque la teneur en Mn ou le diamètre de l'âme métallique sont plus élevés (Sham et Liu, 2013).

Concernant l'épaisseur de l'enrobage

Quelle que soit la composition de l'âme métallique de l'électrode (acier doux par rapport à acier inoxydable), un enrobage plus épais entraîne également la génération de plus de fumées (Sham et Liu, 2013; Sowards, Lippold, Dickinson et Ramirez, 2008).

Tableau 18. Résultats rapportés avec le procédé SMAW après modification de l'électrode

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Chan <i>et al.</i> , 2002	Acier à faible teneur en carbone	Électrode en acier doux	Électrode en acier inoxydable	% en masse de Mn et Cr	↑
				% en masse de Fe et Si	↓
Matuziak et Wycislik, 2010	Acier inoxydable	Électrode avec enrobage rutile basique	Électrode avec enrobage rutile ou enrobage rutile-acide	% en masse de Cr total, Cr(VI) et Ni	=
Mohan <i>et al.</i> , 2015	Acier à faible teneur en carbone	Électrode enrobée uniquement de flux	Électrode avec nanoenrobage au TiO ₂ entre la couche de flux et l'âme métallique	Concentration des fumées totales (mg/m ³)	↓
Sham et Liu, 2013	Acier faiblement allié	Électrode en acier de carbone contenant 0,6 % en masse de Mn	Électrode en acier de carbone contenant 1,6 % en masse de Mn	Taux de formation des fumées (g/min)	=
		Électrode en acier de carbone contenant 0,6 % en masse de Mn	Électrode en acier inoxydable contenant 12 à 14 % en masse de Mn	Taux de formation des fumées (g/min)	↑
		Électrode de plus faible diamètre (âme métallique de 1/8 pouces soit 3,175 mm)	Électrode de plus grand diamètre (âme métallique de 5/32 pouces soit 3,97 mm)	Taux de formation des fumées (g/min)	↑
		Flux épais (ratio de revêtement de 0,67) ²	Flux mince (ratio de revêtement de 0,60) ²	Taux de formation des fumées (g/min)	↓
Sivapirakasam <i>et al.</i> , 2015	Acier ordinaire à faible teneur en carbone	Électrode enrobée uniquement de flux	Électrode avec nanoenrobage aluminium (Al ₂ O ₃) de l'âme métallique entre la couche de flux et l'âme métallique	Concentration des fumées totales (mg/m ³)	↓

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Sowards <i>et al.</i> , 2008	Acier doux et inoxydable	Électrode en acier doux avec enrobage mince en cellulose sodium ou enrobage mince basique (à basse température)	Électrode en acier inoxydable avec enrobage épais basique neutre (à basse température)	Taux de génération de fumées (g/min)	↓
Vishnu <i>et al.</i> , 2018	Acier inoxydable	Électrode enrobée uniquement de flux	Électrode avec triple nanoenrobage (Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZnO) entre la couche de flux et l'âme métallique	Taux de formation de fumées (g/min)	↓
				Concentration de Cr(VI) en mg/m ³	↓
				Concentration de Mn, Ni et Cr total en mg/m ³	↓

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution; = sans effet

²Le ratio de revêtement équivaut à l'épaisseur totale de l'enrobage formé par le flux divisée par le diamètre de l'âme métallique (Sham et Liu, 2013)

Le tableau 19 présente les résultats saillants rapportés durant le soudage au SMAW, mais après modification de l'intensité du courant. À l'instar du GMAW, une intensité de courant plus basse induit une réduction des quantités de fumées totales générées (Sham et Liu, 2013) ainsi que des concentrations de particules totales (Chan *et al.*, 2002).

Le tableau 20 présente les résultats saillants rapportés durant le soudage au SMAW, mais après modification d'autres paramètres (type de courant, type d'alimentation électrique et apport thermique). Ainsi le passage d'un courant continu à un courant alternatif réduit les quantités de fumées générées (Chan *et al.*, 2002) tandis que le choix d'un onduleur comme type d'alimentation du courant à la place d'un redresseur d'iode induit non seulement une réduction des fumées, mais également une réduction des concentrations de Mn, de Ni et de CrO₃ (Ilyaschenko, Chinakhov, Ivanov et Sadikov, 2017). L'augmentation de l'apport thermique s'accompagne également de celle des fumées générées (Sowards *et al.*, 2008).

Tableau 19. Résultats rapportés avec le procédé SMAW après modification de l'intensité du courant

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Chan <i>et al.</i> , 2002	Acier à faible teneur en carbone	90 A	120 A	Taux de formation des fumées (g/min)	↑
				Concentration des particules totales p/cm ³	↑
Sham et Liu, 2013	Acier faiblement allié	110 A	210 A	Taux de formation des fumées (g/min)	↑

¹Résultat : ↑ augmentation

Tableau 20. Résultats rapportés avec le procédé SMAW après modification d'autres paramètres

Référence	Paramètre évalué	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Chan <i>et al.</i> , 2002	Type de courant	Acier à faible teneur en carbone	Continu (DC)	Alternatif (AC)	Taux de formation de fumées (g/min)	↓
Il'yaschenko <i>et al.</i> , 2017	Type d'alimentation électrique	Acier fortement allié	Redresseur à diode	Onduleur	Taux d'émission de fumées (g/min)	↓
					Taux d'émission spécifique de Mn, Ni et CrO ₃ en g/kg de fumées générées	
Sowards <i>et al.</i> , 2008	Apport thermique	Acier doux ou acier inoxydable	0,44-0,62 kJ/mm	0,68-0,75 kJ/mm	Taux de génération de fumées (g/min)	↑
					Concentration des particules en nombre et en masse	=

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution; = sans effet

4.2.3 FCAW (Flux Cored Arc Welding)

Seules quatre études retenues ont évalué différents paramètres de soudage pour le procédé FCAW. Ces paramètres ainsi que le nombre de situations d'évaluation sont présentés au tableau 21. Huit situations d'évaluation ont été rapportées dont la moitié ciblait l'électrode et l'intensité du courant.

Tableau 21. Paramètres de soudage évalués avec le procédé FCAW

Paramètre de soudage évalué		Nombre de situations d'évaluation
Électrode	Composition du flux	1
	Épaisseur du flux	1
Intensité du courant		2
Tension de courant		1
Mode de transfert		1
Vitesse du fil		1
Puissance électrique		1
TOTAL		8

Les tableaux 22, 23 et 24 présentent les résultats saillants rapportés durant le procédé FCAW, mais après modification des caractéristiques de l'électrode, de l'intensité du courant et d'autres

paramètres, respectivement. L'ensemble des paramètres évalués ont eu un effet sur les fumées générées, que ce soit sur le plan des fumées totales ou des concentrations de contaminants spécifiques, notamment le Cr(VI). Des résultats rapportés émergent les constants suivants :

- La substitution du K par le Li dans le flux induit une diminution des fumées totales et de Cr(VI) (Dennis, French, Hewitt, Mortazavi et Redding, 2002b). À l'inverse, l'épaississement du flux entraîne une augmentation des fumées totales (Yamamoto, Yamazaki, Suzuki et Koshiishi, 2010);
- L'augmentation de l'intensité du courant génère plus de fumées (Yamamoto *et al.*, 2010; Yoon, Paik et Kim, 2003) comme pour le GMAW et le SMAW;
- Le passage d'un mode de courant constant à un mode STT™ (Surface Tension Transfer) réduit les fumées générées (Srinivasan et Balasubramanian, 2011b);
- L'effet de la vitesse du fil est lié au paramètre mode de transfert. Ainsi une augmentation de la vitesse du fil n'entraîne une hausse de la quantité de fumées générées que lorsque le mode de courant constant est appliqué (Srinivasan et Balasubramanian, 2011b);
- L'augmentation de la puissance électrique induit une élévation tant des fumées totales générées que des concentrations en Cr(VI) (Yoon *et al.*, 2003).

Tableau 22. Résultats rapportés avec le procédé FCAW après modification de l'électrode

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Dennis <i>et al.</i> , 2002b	Acier doux	Électrode tubulaire creuse remplie de flux contenant du potassium (K)	Électrode tubulaire creuse remplie de flux contenant du lithium (Li)	Taux de génération de fumées (g/h)	↓
				% en masse de Cr(VI) dans les fumées totales	
Yamamoto <i>et al.</i> , 2010	Acier doux	Flux rutile peu abondant (15 %)	Flux rutile abondant (26 %)	Taux d'émission de fumées (mg/min)	↑

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution

Tableau 23. Résultats rapportés avec le procédé FCAW après modification de l'intensité du courant

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Yamamoto <i>et al.</i> , 2010	Acier doux	150 A	250 A	Taux d'émission de fumées (mg/min)	↑
Yoon <i>et al.</i> , 2003	Acier inoxydable	116-125 A	226,8-236,5 A	Taux de génération de fumées (mg/min)	↑

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution

Tableau 24. Résultats rapportés avec le procédé FCAW après modification d'autres paramètres de soudage

Référence	Paramètre évalué	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Dennis <i>et al.</i> , 2002b	Tension du courant	Acier doux	15 V	32,5 V	Taux de formation de fumées (g/min)	↑
					% en masse de Cr(VI) dans les fumées totales générées	↓ (flux contenant du lithium)
						↑ (flux contenant du potassium)
Srinivasan et Balasubramanian, 2011b	Mode de transfert	Acier faiblement allié à haute résistance	Mode en courant constant	Mode en court-circuit STT™ *	Taux de formation de fumées (g/min)	↓
	Vitesse du fil		5 m/min	10 m/min	Taux de formation de fumées (g/min)	↑ (mode en courant constant) ↓ (mode en court-circuit STT™)
Yoon <i>et al.</i> , 2003	Puissance électrique	Acier inoxydable	154-165,5 kJ/min	409,2-423,3 kJ/min	Taux de génération de fumées (g/min) Concentration de Cr(VI) en mg/m ³	↑

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution

*STT™ : *Surface Tension Transfer*

4.2.4 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding - soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène)

Seules deux études retenues et autant de situations d'évaluation ont traité du procédé GTAW. Le tableau 25 présente les résultats rapportés après modification de l'intensité du courant et du gaz de protection.

Les deux paramètres évalués ont un effet certain sur la génération de fumées. Ainsi, à l'instar des procédés GMAW, SMAW et FCAW, la réduction de l'intensité du courant entraîne une diminution des quantités de fumées totales générées ainsi que de la fraction en masse de certains contaminants, dont le Cr(VI) (Matusiak et Wycislik, 2010). L'ajout d'un additif (l'orthosilicate de tétraéthyle ou TEOS) au gaz de protection inerte (100 % Ar) réduit non

seulement les concentrations de Cr total et de Cr(VI), mais également celles des nitrates (Topham *et al.*, 2010).

Tableau 25. Résultats rapportés avec le procédé GTAW après modification de l'intensité du courant et du gaz de protection

Référence	Paramètre évalué	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Matuziak et Wycislil, 2010	Intensité du courant	Acier inoxydable	140 A	80 A	Taux d'émission de fumées (mg/s)	↓
					% en masse de Cr(VI), Cr total, Ni, et Fe dans les fumées totales	↓
Topham <i>et al.</i> , 2010	Gaz de protection	Acier doux	100 % Ar	Ar + 3 % d'orthosilicate de tétraéthyle (TEOS)	Ratio moyen CR(VI)/Cr total	↓
					Concentration de NO ₃ (nitrates)	

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution

4.2.5 MCAW (Metal-Cored Arc Welding - soudage à l'arc avec fil fourré de poudres métalliques)

Une seule étude retenue présentant deux situations d'évaluation a traité le MCAW (Dennis *et al.*, 2002b). Le tableau 26 présente les résultats rapportés durant ce procédé, mais après modification du gaz de protection et de la composition de l'électrode.

L'augmentation de CO₂ dans le mélange de gaz de protection entraîne plus de fumées tout en réduisant les concentrations d'O₃. L'influence du gaz de protection sur la concentration du Cr(VI) dépend étroitement de la composition de l'électrode et du type de gaz de protection. Ainsi, une électrode avec 1 % de Zn réduit considérablement la concentration de Cr(VI) comparativement à une électrode sans Zn à condition que le mélange de gaz de protection soit dépourvu d'O₂. À l'inverse, un enrichissement de CO₂ dans le mélange de gaz protecteur réduit la concentration de Cr(VI) lorsque l'électrode est dépourvue de Zn.

Relativement à la composition de l'électrode seule, une électrode avec 1 % de Zn augmente les fumées tout en réduisant les concentrations d'O₃ et de Cr(VI). Une augmentation de la quantité de Zn induit également une augmentation des fumées et une réduction à la fois des concentrations de Cr(VI) et d'O₃.

Tableau 26. Résultats rapportés avec le procédé MCAW, après modification du gaz de protection et de la composition de l'électrode

Référence	Paramètre évalué	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹	
Dennis <i>et al.</i> , 2002b	Gaz de protection	Acier doux	100 % Ar	Ar + 5 % CO ₂	Taux de formation de fumées (g/h)	↑	
			Ar + 5 % CO ₂	Ar + 20 % CO ₂	Taux de formation de fumées (g/h)	↑	
			100 % Ar Ar + 1 % O ₂ Ar + 2 % O ₂	Ar + 2 % CO ₂ Ar + 5 % CO ₂	Concentration d'O ₃ (ppm)	↓	
			Mélange sans oxygène (électrode avec 1 % de Zn)	Mélange avec oxygène (électrode avec 1 % de Zn)	Taux de formation du Cr(VI) (mg/min)	↑	
			100 % Ar Ar + 5 % CO ₂ (électrode sans Zn)	Ar + 20 % CO ₂ (électrode sans Zn)		↓	
	Composition de l'électrode		Électrode sans Zn	Électrode avec 1 % de Zn		Taux de formation de fumées (g/h)	↑
						Concentration d'O ₃ en ppm	↓
						Taux de formation du Cr(VI) (mg/min)	↓ (uniquement pour un mélange de gaz sans oxygène)
			Électrode avec 0,018 % de Zn	Électrode avec 0,9 % de Zn		Taux de formation de fumées (g/h)	↑
						Taux de formation du Cr(VI) (mg/h) et % en masse de Cr(VI) dans les fumées totales	↓
						Concentration de l'ozone en ppm	↓

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution

4.3 Résultats rapportés en évaluant différents types de procédés

Dix études retenues se sont intéressées à l'effet de la modification des procédés de soudage sur la génération de fumées. Le tableau 27 présente les principaux résultats. De ces résultats ressortent les constats généraux suivants :

- Le procédé SMAW génère plus de fumées comparativement aux procédés FCAW, GMAW et GTAW (Keane, M. *et al.*, 2012; Keane, M. *et al.*, 2016; Keane, M. J. *et al.*, 2014; Matusiak *et al.*, 2016; Schoonover, Conroy, Lacey et Plavka, 2011). Les fumées émises sont également plus riches en Mn que celles provenant des procédés GMAW et FCAW (Andrews *et al.*, 2015). Le procédé SMAW génère également plus de Mn et de Cr comparativement au GTAW (Schoonover *et al.*, 2011). Les fumées émises par le SMAW ont une plus faible concentration en masse de particules inhalables et respirables que celles générées par le FCAW et le GMAW, alors que les concentrations de PUF des fumées du SMAW étaient légèrement plus élevées que celles associées au FCAW, mais moins importantes que celles générées par le GMAW (Lehnert *et al.*, 2012);
- En ce qui a trait aux fumées totales générées, le FCAW se situe entre le SMAW et le GMAW (Keane, M. *et al.*, 2012; Keane, M. *et al.*, 2016; Keane, M. J. *et al.*, 2014). Ces fumées sont plus riches en certains contaminants comme le Mn, Fe, Pb, Al, Cu, Ti et Zn lorsqu'il s'agit de soudure d'acier au carbone (Wallace, Shulman et Sheehy, 2001). La fraction de Mn dans les fumées du FCAW est également deux à trois fois supérieure à celle retrouvée dans les fumées du GMAW (Lehnert *et al.*, 2012). Toutefois, les quantités de Cr(VI) dans les fumées du FCAW sont globalement plus faibles comparativement au GMAW et au SMAW (Keane, M. *et al.*, 2016);
- Le procédé GMAW, tous modes confondus, ainsi que ses variantes techniques CMT™, RMD™, STT™ génèrent moins de fumées que le SMAW et le FCAW. Les quantités de fumées en mode pulsé (GMAW-P) et CMT™ sont les plus faibles avec en sus des concentrations réduites en Cr(VI) et en Mn (Keane, M. *et al.*, 2016; Keane, M. J. *et al.*, 2014). Toutefois, le procédé GMAW conventionnel sur acier inoxydable produirait plus de Cr que le FCAW sur acier au carbone et le GTAW sur acier inoxydable (Wallace, Shulman, *et al.*, 2001). De plus, les concentrations de PUF générées par le procédé GMAW sont plus importantes que celles mesurées lors de l'utilisation des procédés SMAW et FCAW (Lehnert *et al.*, 2012);
- Le procédé GTAW produit moins de fumées, de Cr et de Mn comparativement aux procédés GMAW, FCAW et SMAW (Brand, Lenz, Reisingen et Kraus, 2013; Schoonover *et al.*, 2011; Wallace, Shulman, *et al.*, 2001). Toutefois, bien que générant de plus faibles concentrations de particules inhalables et respirables, ce procédé génère des concentrations élevées de PUF (Lehnert *et al.*, 2012), sinon quasi exclusivement (Brand *et al.*, 2013), comparativement aux autres procédés.

Tableau 27. Résultats rapportés après modification des procédés de soudage

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
Andrews <i>et al.</i> , 2015	Acier inoxydable ou acier doux au carbone	GMAW court-circuit sur acier inoxydable; SMAW	FCAW sur acier au carbone	Fraction de Mn en mg/g de fumées générées	↑ (la plus élevée)
		GMAW court-circuit sur acier inoxydable; FCAW	SMAW sur acier au carbone	Fraction de Mn en mg/g de fumées générées	↓ (la plus basse)
				Fraction Mn (III) et Mn (IV)	↑ (la plus élevée)
Brand <i>et al.</i> , 2013	GMAW (MAG) : acier fortement allié; GMAW (MIG) : aluminium; SMAW: acier fortement allié; GTAW (TIG) : aluminium	GMAW (MAG et MIG); SMAW	GTAW	PUF (Fraction des particules de diamètres <100 nm et fraction de particules de diamètres <50 nm)	↑
Keane <i>et al.</i> , 2012	Acier inoxydable	GMAW (court-circuit, pulvérisation axiale); GMAW-P; FCAW	SMAW	Taux de génération de fumées (mg/min)	↑ (les plus élevées)
				Fraction de Cr(VI) mg/kg de fumées totales générées ; taux de génération en µg de Cr(VI) /min et taux de génération de Cr(VI) + en µg/g d'électrode consommée	
		GMAW (court-circuit, pulvérisation axiale); SMAW, FCAW	GMAW-P	Taux de génération de fumées (mg/min)	↓ (les plus basses)
				Taux de génération en µg de Cr(VI) /min	
GMAW (pulvérisation axiale); GMAW-P; SMAW; FCAW	GMAW en mode court-circuit	Fraction de Cr(VI) mg/kg de fumées totales générées	↓ (la plus basse)		
Keane <i>et al.</i> , 2016	Acier inoxydable	SMAW, FCAW	GMAW (court-circuit et pulvérisation axiale); GMAW-P; CMT™; RMD™; STT™;	Taux de génération de fumées en mg/min et taux de génération de fumées en mg/g d'électrode consommée	↓ (les plus basses)
				Fraction de Cr(VI) mg/kg de fumées totales générées ; taux de génération en µg de Cr(VI) /min et taux de génération de Cr(VI) + en µg/g d'électrode consommée	

Référence	Métal de base	Avant modification	Après modification	Indicateur mesuré	Résultat ¹
				Taux de génération de Mn élémentaire, de Fe et de Ni en µg/g d'électrode consommée	
Keane <i>et al.</i> , 2014	Acier doux	GMAW (court-circuit, pulvérisation axiale); GMAW-P; RMD™, STT™, FCAW; SMAW	CMT™	Taux de génération de fumées par g de métal consommé	↓ (les plus basses)
				Taux de génération de Mn, Fe et Ni par g de métal consommé	
Lehnert <i>et al.</i> , 2012 (Terrain)	acier doux, acier inoxydable, et autres (non spécifié)	GMAW, FCAW, SMAW	GTAW	Concentration de particules inhalables et respirables en mg/m ³	↓ (la plus basse)
				PUF (p/cm ³)	↑ (la plus élevée)
Matuziak <i>et al.</i> , 2016	acier inoxydable	GMAW, GTAW	SMAW	Taux d'émission de fumées (mg/s)	↑ (la plus élevée)
Pires <i>et al.</i> , 2010	Acier ordinaire à faible teneur en carbone	GMAW (court-circuit et pulvérisation axiale)	GMAW-P ; CMT™	Taux de formation de fumées (mg/s)	↓ (les plus basses)
				Concentration de CO en ppm	
		GMAW (court-circuit et pulvérisation axiale), GMAW-P	CMT™	Concentration de NO en ppm	↑ (la plus élevée)
Schoonover <i>et al.</i> , 2011 (Terrain)	Acier inoxydable ou acier doux	GMAW, SMAW	GTAW	Concentration des fumées totales (mg/m ³)	↓ (les plus basses)
				Concentration moyenne de Mn et de Cr total (mg/m ³)	
				Concentration de NO ₃ et O ₃ en µg/m ³	=
Wallace, Shulman <i>et al.</i> , 2001 (terrain)	Acier inoxydable et acier au carbone	FCAW sur acier au carbone, GMAW	GTAW	Concentration des fumées totales (mg/m ³)	↓ (les plus basses)
				Concentration de Al, Cr, Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Ti, Zn (mg/m ³)	
		FCAW sur acier au carbone, GTAW	GMAW	Concentration de Cr total (mg/m ³)	↑ (les plus élevées)

¹Résultat : ↑ augmentation; ↓ diminution; = sans effet

5. DISCUSSION

5.1 Sommaire des résultats rapportés par les études retenues

Trois faits saillants ressortent de cette revue systématique :

1. Il existe une très grande hétérogénéité des méthodologies employées pour évaluer les paramètres de soudage, notamment en matière de métal de base, de composition des électrodes, des mélanges des gaz protecteurs et de paramètres électriques;
2. La répartition des procédés de soudage est très inégale, avec une dominance marquée du procédé GMAW. Cette prépondérance est telle que : a) 28 études sur les 47 retenues, soit près de 60 %, ont porté sur l'évaluation de paramètres de soudage pour le procédé GMAW et b) sur les 75 situations d'évaluation axées sur les paramètres de soudage autres que le procédé, 49 ont concerné le procédé GMAW;
3. Il existe une grande disparité des contaminants mesurés et des indicateurs mesurés pour un même contaminant.

Néanmoins, et au-delà de ces trois faits, les résultats ont permis de répondre à la question de recherche et d'atteindre l'objectif fixé. En effet, les études retenues ont permis de mettre en évidence l'effet de plusieurs paramètres de soudage sur les concentrations de fumées et leurs composantes métalliques générées lors des opérations de soudage à l'arc électrique, tout en révélant qu'en l'état actuel des connaissances, l'évaluation de ces effets a été réalisée essentiellement avec le procédé GMAW.

5.1.1 *Sommaire des résultats après modification de certains paramètres de soudage*

Seuls huit paramètres sur 20 (sans compter le paramètre « procédé de soudage ») ont été évalués avec deux à quatre procédés de soudage (tableau 28). L'intensité du courant est le seul paramètre à avoir été investiguée selon 4 procédés. De plus, les modifications apportées à ces paramètres communs ne sont pas nécessairement similaires. S'il est vrai que les évaluations de la tension et de l'intensité du courant ainsi que de la vitesse du fil consistaient à en augmenter les valeurs, les variations apportées aux caractéristiques de l'électrode, hormis l'épaisseur du flux, étaient spécifiques aux procédés donnés. Ainsi la modification de la composition de l'électrode pour le GMAW (électrode à basse émission de fumées contre électrode normale) est totalement différente de celle réalisée pour le MCAW (électrode sans Zn contre électrode avec Zn).

De ce fait, l'agrégation de l'ensemble des résultats est un exercice complexe et délicat. Le sommaire des quelques tendances dégagées ne brosse donc pas un portrait comparatif général de l'effet des paramètres de soudage sur la génération des fumées, car les résultats sont très spécifiques aux procédés (tableau 29). Néanmoins, ce sommaire permet l'identification des procédés et des paramètres les plus influents.

Tableau 28. Paramètres évalués avec plus d'un procédé de soudage

Paramètre évalué		Procédé de soudage				
		GMAW	SMAW	FCAW	GTAW	MCAW
Gaz de protection	Composition					
Électrode	Composition et/ou type					
	Épaisseur du flux					
Tension du courant						
Mode de transfert						
Intensité du courant						
Vitesse du fil						
Type de courant						

Dans l'ensemble, la plupart des résultats rapportés après modification des paramètres de soudage laissent profiler une augmentation ou une réduction de la génération des fumées que cela soit sur le plan des fumées totales et/ou de certains contaminants. Leur influence est donc mise en évidence à cet effet.

Bien que les résultats découlent de la modification de tel ou tel autre paramètre de soudage, il faut cependant considérer que l'influence d'un paramètre peut dépendre de la valeur d'autres paramètres. À titre d'exemple, le mode de transfert dépend non seulement de la tension du courant (de Meneses *et al.*, 2014), mais également de la composition des gaz de protection (Pires *et al.*, 2006). Cette interdépendance entre paramètres de soudage a été particulièrement soulignée par Scotti et de Meneses (2014) qui ont éprouvé beaucoup de difficultés à distinguer l'effet d'un seul paramètre comme celui du diamètre de l'électrode.

Tableau 29. Sommaire des principaux résultats rapportés après modification de paramètres de soudage

Modification apportée aux paramètres de soudage		Effet ¹ sur certains contaminants ou indicateurs mesurés						
		Fumée totale	Diamètre des particules	PUF	Mn	Cr(VI)	CO/CO ₂	O ₃
Composition du gaz	Plus de CO ₂	↑		V		V	↑	
	Plus d'O ₂	V		↑		↓		
	Gaz inerte	↓				↓		
	Ajout de NO	↑				↓		↓
	Ajout d'additif		↑			↓		
Électrode	Électrode « verte » à faible teneur de carbone	↓						
	Électrode à forte teneur en Zn	↑				↓		↓
	Électrode avec fourrage métallique		↓					
	Électrode avec nanoenrobage	↓			↓	↓		
	Enrobage en rutile acide					=		
	Électrode en acier inoxydable				↑	↑		
	Électrode à forte teneur en Mn	↑						
	Électrode de plus grand diamètre	↑						
	Flux au Li	↓				↓		
Flux plus épais	↑							
Augmentation de la tension de courant		↑		V	V	V		
Augmentation de l'intensité du courant		↑				V		
Passage au mode de transfert pulsé (GMAW-P)		↓			V			↓
Passage au mode en pulvérisation axiale				↑				
Augmentation de la vitesse du fil		V	↓				↑	
Passage au courant alternatif (AC)		↓			↓			
Apport thermique plus élevé		↑	↑		↑			
Métal de base en acier inoxydable				↑	↓			
Puissance électrique élevée		↑						
Temps d'arc plus allongé		↑						
Diamètre de la goutte plus élevé		↑						
Plus grande stabilité du transfert de métal			=					
Alimentation électrique fournie par un onduleur		↓			↓			

¹Impact : ↑ augmentation; ↓ diminution; = sans effet ; V effet variable

5.1.2 Sommaire des résultats après évaluation des différents types de procédés

Seuls quatre procédés ont été évalués et comparés (le GMAW, le SMAW, le FCAW et le GTAW), alors qu'aucune étude retenue n'a comparé la génération des fumées du MCAW avec celle d'autres procédés. Il existe une grande disparité des résultats rapportés après modification des procédés de soudage au niveau des types de contaminants mesurés, ce qui impose une certaine précaution quant à l'interprétation de l'effet d'un procédé sur la génération de fumées. Le sommaire des résultats rapportés après modification des procédés de soudage est donc présenté par indicateur mesuré. Les procédés sont ainsi hiérarchisés par ordre décroissant de la valeur du ou des contaminant(s) mesuré(s).

En ce qui a trait à la **quantité de fumées générées**, le classement des procédés de soudage est le suivant :

SMAW > FCAW > GMAW > GTAW

Le procédé SMAW est celui qui génère le plus de fumées tandis que le procédé GTAW est celui qui en produit le moins. Au regard du GMAW, le GMAW-P, en mode pulsé, et le CMT™, variante technique du GMAW en court-circuit, génèrent quant à eux moins de fumées, de Mn et de Cr(VI) que le procédé GMAW conventionnel.

En ce qui a trait à la **quantité de PUF générées**, le classement des procédés devient le suivant :

GTAW > GMAW > SMAW > FCAW

Bien qu'émettant plus de fumées, le SMAW ne génère que peu de PUF en comparaison aux procédés GMAW et GTAW. Ce dernier, bien que qualifié de « technique propre » (Brand *et al.*, 2013), est pourtant celui qui émet le plus de PUF.

Finalement, le classement des procédés de soudage en fonction des **quantités de Mn total** dans les fumées totales générées diffère totalement des précédents :

FCAW > GMAW > SMAW > GTAW

Comme on peut le noter, c'est le procédé FCAW qui génère le plus de Mn. On peut cependant émettre l'hypothèse que les particules de Mn ne devraient pas être ultrafines puisque ce procédé émet le moins de PUF. Avec le procédé GMAW, le GMAW-P, en mode pulsé, et le CMT™, variante technique du GMAW en court-circuit, génèrent moins de Mn que le procédé GMAW conventionnel.

Néanmoins, une seule étude (Andrews *et al.*, 2015) a davantage affiné les résultats relatifs à la génération de Mn dans les fumées de soudage lors de l'évaluation de différents procédés. En s'intéressant à un indicateur particulier, en l'occurrence la fraction de Mn(III) et Mn(IV), les résultats obtenus modulent grandement l'impact du SMAW sur ce contaminant. Ainsi, ce procédé génère effectivement moins de Mn total dans les fumées comparativement au procédé GMAW et FCAW. Toutefois la fraction Mn(III) y est la plus élevée. Or, celle-ci est considérée

comme étant la plus cytotoxique des formes chimiques de Mn (Chen, Tsao, Zhao et Zheng, 2001).

5.2 Limites de la recherche

La revue de la littérature systématique réalisée pour comprendre l'influence des paramètres de soudage à l'arc électrique sur les concentrations de fumées présente deux limites importantes touchant à la fois les types d'études réalisées et résultats.

5.2.1 Limites des études retenues

Nombre limité d'évaluations menées dans des conditions réelles de travail (études-terrains)

Une des limites les plus importantes réside dans le peu d'études réalisées sur le terrain, soit quatre sur les 47 études retenues. Sur ces quatre études, trois ont porté sur la comparaison des procédés et une seule a évalué l'effet du mode de transfert sur la génération de fumées durant le GMAW. Or, les niveaux de fumées mesurés dans un contexte expérimental ne reflètent pas nécessairement ceux provenant des activités de soudage habituellement exercées dans un milieu de travail. En effet, les résultats d'échantillonnage de l'air dans un environnement fermé, où tous les paramètres sont contrôlés, peuvent être difficilement considérés comme étant représentatifs de ceux pouvant être obtenus en conditions réelles de travail.

Prépondérance du procédé GMAW

Comme indiqué précédemment, 35 études sur 47 ont considéré le GMAW, soit pour en évaluer des paramètres (28) soit pour le comparer avec d'autres procédés (8). De plus, la grande majorité des paramètres évalués (75 %) l'a été pour ce procédé. Cette prédominance pourrait s'expliquer par le fait que le GMAW est actuellement le procédé le plus utilisé dans le secteur industriel (Godin, 2014). De ce fait, les études retenues se caractérisent par un manque certain de représentativité, d'autant plus qu'aucune d'elles n'a considéré le procédé SAW ou comparé le MCAW aux autres procédés.

Des paramètres de soudage peu ou pas étudiés

Peu d'études se sont intéressées au type de métal de base, au type de courant ou encore au diamètre des gouttes. Le nanoenrobage des électrodes, bien que prometteur, n'a également pas été suffisamment traité, d'autant plus que les trois études qui ont procédé à son évaluation relèvent pratiquement de la même équipe de recherche (Mohan *et al.*, 2015; Sivapirakasam *et al.*, 2015; Vishnu *et al.*, 2018). Plusieurs autres paramètres reliés aux activités de soudage n'ont pas été considérés dans les études retenues bien que pouvant potentiellement influencer les niveaux de fumées générées. C'est le cas, par exemple, de la qualité du tube contact, pièce se situant à l'extrémité du pistolet de soudage et à travers laquelle le fil-électrode circule. Ce tube permet de transférer le courant électrique au fil et sa détérioration peut produire un arc électrique erratique, entraînant des projections et des niveaux de fumées plus élevés. Le tube contact doit donc être bien ajusté par rapport à la buse de gaz du pistolet de soudage afin de maintenir son efficacité à transférer le courant électrique au fil. L'angle d'attaque du pistolet de soudage ainsi que la distance entre l'extrémité de l'électrode et la pièce à souder sont

également deux autres paramètres susceptibles d'influencer la stabilité de l'arc et ainsi la quantité de fumées générées (MultiPrévention ASP, 2016).

5.2.2 Limites des résultats

Malgré la grande diversité des contaminants considérés, tous n'ont pas été systématiquement évalués par les études retenues alors que les auteurs ont souligné leur importance spécifique dans l'interprétation de l'effet des paramètres de soudage sur la génération des fumées et ainsi sur l'exposition des travailleurs.

Parmi ces contaminants, citons le Mn et les PUF. Si 35 études sur les 47 incluses ont mesuré les fumées totales, les particules de Mn n'ont été échantillonnées que dans 13 d'entre elles, alors que les concentrations de PUF n'ont été mesurées que dans 7 études. De plus, seules deux études, Sriram *et al.* (2015) et Andrews *et al.* (2015), se sont intéressées à la fraction soluble du Mn, considérée comme ayant un plus grand potentiel de translocation cellulaire et d'accumulation dans le cerveau.

6. CONCLUSION

Cette recherche a permis d'observer que de nombreux paramètres de soudage influent sur la génération des fumées en les réduisant ou en les augmentant, que ce soit en matière de fumées totales, de métaux ou de PUF. Les paramètres évalués incluent notamment le type de procédé, la composition du gaz de protection, les différentes caractéristiques de l'électrode (composition, diamètre, type d'enrobage ou de flux, etc.), les paramètres électriques (p. ex. : tension et intensité du courant) ainsi que le mode de transfert.

Les émissions de fumées totales, de PUF et de Mn sont certainement des facteurs majeurs en raison de leurs concentrations élevées observées dans de nombreux milieux de travail et de leur risque potentiel pour la santé. Sous cet angle, les résultats obtenus avec le GMAW sont loin d'être concluants quant au potentiel de réduction des fumées et de certains contaminants générés bien que ce procédé soit le plus utilisé, ce qui justifierait qu'il ait été examiné dans 35 des 47 études retenues.

En effet, ce procédé n'est pas le plus performant en matière de génération de fumées, de Mn et de PUF. Sachant que ce sont les PUF (pouvant contenir du Mn) qui pénètrent profondément dans le système respiratoire (région alvéolaire) et qui peuvent également atteindre la région cervicale par la voie neuro-olfactive, présentant ainsi un potentiel de risque pour la santé plus grand, le procédé GMAW n'a pas démontré une performance supérieure à celle des autres procédés d'autant plus que le FCAW s'est, au contraire, illustré comme étant celui générant le moins de PUF.

Enfin, pratiquement toutes les évaluations ont été menées dans des conditions contrôlées en laboratoire. Or, celles-ci ne reflètent pas la réalité du terrain, ce qui limite considérablement leur portée. Il est donc difficile de statuer sur les paramètres de soudage, incluant les types de procédés, de manière concluante sans que d'autres études soient réalisées en entreprises et qu'elles considèrent de façon détaillée tant le Mn que les PUF.

BIBLIOGRAPHIE

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). Toxicological profile for Manganese. Tiré de <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp151.pdf>
- Al-Lozi, A., Searles Nielsen, S., Hershey, T., Birke, A., Checkoway, H., Criswell, S. R., . . . Racette, M. D. (2017). Cognitive control dysfunction in workers exposed to manganese-containing welding fume. *American Journal of Industrial Medicine*, 60(2), 181-188. doi: 10.1002/ajim.22675
- Andrews, R. N., Keane, M., Hanley, K. W., Feng, H. A. et Ashley, K. (2015). Manganese speciation of laboratory-generated welding fumes. *Analytical Methods*, 7(15), 6403-6410. doi: 10.1039/C5AY01147G
- Antonini, J. M., Keane, M., Chen, B. T., Stone, S., Roberts, J. R., Schwegler-Berry, D., . . . Sriram, K. (2011). Alterations in welding process voltage affect the generation of ultrafine particles, fume composition, and pulmonary toxicity. *Nanotoxicology*, 5(4), 700-710. doi: 10.3109/17435390.2010.550695
- Antonini, J. M., Lewis, A. B., Roberts, J. R. et Whaley, D. A. (2003). Pulmonary effects of welding fumes: Review of worker and experimental animal studies. *American Journal of Industrial Medicine*, 43(4), 350-360.
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2016). Santé et pollution atmosphérique : comprendre où en est la recherche. Tiré de <https://www.anses.fr/fr/system/files/CDLR-mg-SantePollutionAir7.pdf>
- Bosworth, M. R. et Deam, R. T. (2000). Influence of GMAW droplet size on fume formation rate. *Journal of Physics D (Applied Physics)*, 33(20), 2605-2610. doi: 10.1088/0022-3727/33/20/313
- Brand, P., Lenz, K., Reisgen, U. et Kraus, T. (2013). Number size distribution of fine and ultrafine fume particles from various welding processes. *Annals of Occupational Hygiene*, 57(3), 305-313. doi: 10.1093/annhyg/mes070
- Carpenter, K. R., Monaghan, B. J., Cuiuri, D. et Norrish, J. (2017). Optimising the welding conditions to determine the influence of shielding gas on fume formation rate and particle size distribution for gas metal arc welding. *Welding in the World*, 61(3), 473-481. doi: 10.1007/s40194-017-0438-9
- Carpenter, K. R., Monaghan, B. J. et Norrish, J. (2009). *Influence of shielding gas on fume formation rate for gas metal arc welding (GMAW) of plain carbon steel*. Tiré de <https://pdfs.semanticscholar.org/afea/43c0895311b56a6e510c9397ee43358871f1.pdf>
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2017). Soudage : procédés de soudage et dangers associés. Tiré de http://www.cchst.ca/oshanswers/safety_haz/welding/overview.html
- Centre de formation CWB. (2006). *Équipements et procédés de soudage*. Laval, QC : Bureau Canadien de Soudage.
- Chan, W., Gunter, K. L. et Sutherland, J. W. (2002). *An experimental study of the fume particulate produced by the shielded metal arc welding process*. Communication présentée à NAMRC XXX, West Lafayette, ID (p. 1-8).
- Chen, J.-Y., Tsao, G. C., Zhao, Q. et Zheng, W. (2001). Differential cytotoxicity of Mn (II) and Mn (III): special reference to mitochondrial [Fe-S] containing enzymes. *Journal of Toxicology and Applied Pharmacology*, 175(2), 160.

- Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail/CNESST. (2019). Répertoire toxicologique. Tiré de <https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/repertoire-toxicologique.aspx>
- De Meneses, V. A., Gomes, J. F. P. et Scotti, A. (2014). The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(7), 1388-1397. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.02.012
- De Meneses, V. A., Leal, V. S. et Scotti, A. (2016). Influence of metal transfer stability and shielding gas composition on CO and CO₂ emissions during short-circuiting MIG/MAG welding. *Soldagem & Inspecao*, 21(3), 253-268. doi: 10.1590/0104-9224/si2103.02
- Dennis, J. H., French, M. J., Hewitt, P. J., Mortazavi, S. B. et Redding, C. A. J. (2002a). Control of exposure to hexavalent chromium and ozone in gas metal arc welding of stainless steels by use of a secondary shield gas. *Annals of Occupational Hygiene*, 46(1), 43-48. doi: 10.1093/annhyg/mef019
- Dennis, J. H., French, M. J., Hewitt, P. J., Mortazavi, S. B. et Redding, C. A. J. (2002b). Control of occupational exposure to hexavalent chromium and ozone in tubular wire arc-welding processes by replacement of potassium by lithium or by addition of zinc. *Annals of Occupational Hygiene*, 46(1), 33-42. doi: 10.1093/annhyg/mef024
- Elihn, K. et Berg, P. (2009). Ultrafine particle characteristics in seven industrial plants. *The Annals of Occupational Hygiene*, 53(5), 475-484.
- Emploi Québec. (2016). Soudeurs/soudeuses et opérateurs/opératrices de machines à souder et à braser (CNP 7237). Tiré de http://imt.emploiquebec.gouv.qc.ca/mtg/inter/noncache/contenu/asp/mtg941_accueil_fran_01.asp
- Gazette officielle du Québec. (2012). Règlement modifiant le Règlement sur la santé et la sécurité du travail. Tiré de <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=1&file=58509.pdf>
- Gheonea, M. C., Mihailescu, D. et Scutelnicu, E. (2015). Influence of shielding gas and wire type on the microparticles size generated during MAG welding process. *Applied Mechanics and Materials*, 809-810, 461-466. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.461
- Godin, C. (2014). *Prévention pour le soudage et le coupage. : guide*. Tiré de <https://docplayer.fr/2258172-Prevention-pour-le-soudage-et-le-coupage-guide-deuxieme-edition-caroline-godin-pantone-541-trame-40-cmyk-100-57-0-38-trame-40-23-0-15.html>
- Gomes, J. F., Miranda, R., Carvalho, P. et Quintino, M. (2014). The effect of metal transfer modes and shielding gas composition on the emission of ultrafine particles in MAG steel welding. *Soldagem Inspeção*, 19(2), 168-176.
- Guha, N., Loomis, D., Guyton, K. Z., Grosse, Y., El Ghissassi, F., Bouvard, V., . . . Straif, K. (2017). Carcinogenicity of welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. *The Lancet Oncology*, 18(5), 581-582.
- Hastings, C. et Fisher, C. A. (2014). Searching for proof: Creating and using an actionable PICO question. *Nursing Management*, 45(8), 9-12.
- Hemingway, P. et Brereton, N. (2009). What is a systematic review? Tiré de <http://www.bandolier.org.uk/painres/download/whatis/Syst-review.pdf>

- Hovde, C. A. et Raynor, P. C. (2007). Effects of voltage and wire feed speed on weld fume characteristics. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(12), 903-912. doi: 10.1080/15459620701713470
- Ibfelt, E., Bonde, J. P. et Hansen, J. (2010). Exposure to metal welding fume particles and risk for cardiovascular disease in Denmark: A prospective cohort study. *Occupational Environmental Medicine*, 67(11), 772-777.
- Il'yaschenko, D. P., Chinakhov, D. A., Ivanov, K. V. et Sadikov, I. D. (2017). *Improving hygienic characteristics of coated electrodes for welding high-alloy steels*. Communication présentée à Ecology and Safety in the Technosphere Conference: Current problems and solutions, Yurga, Russie. doi: 10.1088/1755-1315/50/1/012047
- Institut National de Recherche Scientifique. (2010). Opérations de soudage à l'arc et de coupage : guide pratique de ventilation n°. 7. Tiré de <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20668>
- Institut National de Recherche Scientifique. (2012). Les fumées de soudage et des techniques annexes : aide-mémoire technique. Tiré de <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206132>
- Keane, M., Siert, A., Stone, S., Chen, B., Slaven, J., Cumpston, A. et Antonini, J. (2012). Selecting processes to minimize hexavalent chromium from stainless steel welding: Eight welding processes/shielding gas combinations were assessed for generation of hexavalent chromium in stainless steel welding fumes. *Welding Journal*, 91(9), 241s-246s.
- Keane, M., Siert, A., Stone, S. et Chen, B. T. (2016). Profiling stainless steel welding processes to reduce fume emissions, hexavalent chromium emissions and operating costs in the workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(1), 1-8. doi: 10.1080/15459624.2015.1072634
- Keane, M., Stone, S. et Chen, B. (2010). Welding fumes from stainless steel gas metal arc processes contain multiple manganese chemical species. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(5), 1133-1140.
- Keane, M., Stone, S., Chen, B., Slaven, J., Schwegler-Berry, D. et Antonini, J. (2009). Hexavalent chromium content in stainless steel welding fumes is dependent on the welding process and shield gas type. *Journal of Environmental Monitoring*, 11(2), 418-424.
- Keane, M. J., Siert, A., Chen, B. T. et Stone, S. G. (2014). Profiling mild steel welding processes to reduce fume emissions and costs in the workplace. *Annals of Occupational Hygiene*, 58(4), 403-412. doi: 10.1093/annhyg/meu007
- Kendall, M. et Holgate, S. (2012). Health impact and toxicological effects of nanomaterials in the lung. *Respirology*, 17(5), 743-758.
- Lehnert, M., Pesch, B., Lotz, A., Pelzer, J., Kendzia, B., Gawrych, K., . . . The Weldox Study Group. (2012). Exposure to inhalable, respirable, and ultrafine particles in welding fume. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(5), 557-567. doi: 10.1093/annhyg/mes025
- MacLeod, J. S., Harris, M. A., Tjepkema, M., Peters, P. A. et Demers, P. A. (2017). Cancer risks among welders and occasional welders in a national population-based cohort study: Canadian census health and environmental cohort. *Safety and Health at Work*, 8(3), 258-266. doi: 10.1016/j.shaw.2016.12.001
- Martin, V., Renaud, J. et Dagenais, P. (2013). Les normes de production des revues systématiques : guide méthodologique. *Institut national d'excellence en santé et en*

- services sociaux*. Tiré de https://www.inesss.qc.ca/fileadmin/doc/INESSS/DocuMetho/INESSS_Normes_production_revues_systematiques.pdf
- Matusiak, J. et Wycislik, A. (2010). The influence of technological conditions on the emission of welding fume due to welding of stainless steels. *Metalurgija*, 49(4), 307-311.
- Matusiak, J., Wycislik, J. et Wycislik, A. (2016). Environmental criteria for shielding gas selection during arc welding of stainless steels. *Solid State Phenomena*, 246, 275-278.
- Mihailescu, D., Gheonea, M. C. et Scutelnicu, E. (2015). Investigation on CO and microparticles concentrations produced in MAG-M welding process. *Applied Mechanics and Materials*, 809-810, 455-460. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.455
- Mihailescu, D., Gheonea, M. C., Scutelnicu, E. et Mircea, O. (2017). Evaluation of carbon monoxide and microparticles concentrations generated during MAG-C welding process. *Tehnicki Vjesnik*, 24(2), 591-598. doi: 10.17559/TV-20150721143151
- Mohan, S., Sivapirakasam, S. P., Kurnar, M. C. S. et Surianarayanan, M. (2015). Welding fumes reduction by coating of nano-TiO₂ on electrodes. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 237-247. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.12.020
- MultiPrévention ASP. (2016). Réduire les fumées et les projections durant le soudage à l'arc électrique (semi-automatique) : fiche technique : contrôle des contaminants. Tiré de <http://multiprevention.org/wp-content/uploads/2016/11/fiche-technique-fumees-projections-soudage.pdf>
- MultiPrévention ASP. (2017a). Capter les fumées à l'aide d'un système bas volume/haute pression : fiche technique : contrôle des contaminants. Tiré de <http://multiprevention.org/wp-content/uploads/2017/02/multiprevention-fiche-technique-systeme-bas-volume-haute-pression.pdf>
- MultiPrévention ASP. (2017b). Choisir un système de captation haut volume/basse pression : fiche technique : contrôle des contaminants. Tiré de <http://multiprevention.org/wp-content/uploads/2017/01/multiprevention-fiche-systeme-captation.pdf>
- Occupational Safety and Health Administration. (2013). Manganese fume (as Mn): Chemical sampling information. Tiré de https://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_2502_00.html
- Pacheco, R. P., Gomes, J. F., Miranda, R. M. et Quintino, M. L. (2017). Evaluation of the amount of nanoparticles emitted in welding fume from stainless steel using different shielding gases. *Inhalation Toxicology*, 29(6), 282-289. doi: 10.1080/08958378.2017.1358778
- Park, R. M. (2013). Neurobehavioral deficits and parkinsonism in occupations with manganese exposure: A review of methodological issues in the epidemiological literature. *Safety health at work*, 4(3), 123-135.
- Pires, I., Quintino, L., Amaral, V. et Rosado, T. (2010). Reduction of fume and gas emissions using innovative gas metal arc welding variants. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(5-8), 557-567. doi: 10.1007/s00170-010-2551-4
- Pires, I., Quintino, L., Miranda, R. M. et Gomes, J. F. P. (2006). Fume emissions during gas metal arc welding. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 88(3), 385-394. doi: 10.1080/02772240600720472
- Praxair Technology Inc. (2019). Procédés de soudage. Tiré de <http://www.praxair.ca/fr-ca/industries/welding-and-metal-fabrication/welding-processes>
- Racette, B. A., Nielsen, S. S., Criswell, S. R., Sheppard, L., Seixas, N., Warden, M. N. et Checkoway, H. (2017). Dose-dependent progression of parkinsonism in manganese-exposed welders. *Neurology*, 88(4), 344-351.

- Schoonover, T., Conroy, L., Lacey, S. et Plavka, J. (2011). Personal exposure to metal fume, NO₂, and O₃ among production welders and non-welders. *Industrial Health*, 49(1), 63-72.
- Scotti, A. et de Meneses, V. A. (2014). Governing parameters affecting fume generation in short-circuit MAG welding. *Welding in the World*, 58(3), 367-376. doi: 10.1007/s40194-014-0122-2
- Selvi, S., Vishvaksean, A. et Rajasekar, E. (2018). Cold metal transfer (CMT) technology: An overview. *Defence Technology*, 14(1), 28-44. doi: 10.1016/j.dt.2017.08.002
- Sham, K. et Liu, S. (2013). Evaluating SMAW electrode fume formation rates. *Welding Journal*, 92(9), 38-41.
- Sivapirakasam, S. P., Mohan, S., Kumar, M. C. S. et Surianarayanan, M. (2015). Welding fume reduction by nano-alumina coating on electrodes: Towards green welding process. *Journal of Cleaner Production*, 108, 131-144. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.132
- Sowards, J., Lippold, J., Dickinson, D. et Ramirez, A. (2008). Characterization of welding fume from SMAW electrodes: Part I. *Welding Journal*, 87(4), 106s-112s.
- Srinivasan, K. et Balasubramanian, V. (2011a). Effect of heat input on fume generation and joint properties of gas metal arc welded austenitic stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 18(10), 72-79. doi: 10.1016/S1006-706X(12)60025-9
- Srinivasan, K. et Balasubramanian, V. (2011b). Effect of surface tension metal transfer on fume formation rate during flux-cored arc welding of HSLA steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(1-4), 125-134. doi: 10.1007/s00170-011-3182-0
- Sriram, K., Lin, G. X., Jefferson, A. M., Stone, S., Afshari, A., Keane, M. J., . . . Antonini, J. M. (2015). Modifying welding process parameters can reduce the neurotoxic potential of manganese-containing welding fumes. *Toxicology*, 328, 168-178. doi: 10.1016/j.tox.2014.12.015
- Stanislawska, M., Halatek, T., Cieslak, M., Kaminska, I., Kuras, R., Janasik, B. et Wasowicz, W. (2017). Coarse, fine and ultrafine particles arising during welding: Analysis of occupational exposure. *Microchemical Journal*, 135, 1-9.
- Sterjovski, Z., Norrish, J. et Monaghan, B. J. (2010). The effect of voltage and metal transfer mode on particulate fume size during the GMAW of plain carbon steel. *Welding in the World*, 54(9), R249-R256. doi: 10.1007/bf03266737
- Szram, J., Schofield, S. J., Cosgrove, M. P. et Cullinan, P. (2013). Welding, longitudinal lung function decline and chronic respiratory symptoms: A systematic review of cohort studies. *European Respiratory Journal*, 42(5), 1186-1193.
- Tian, L., Inthavong, K., Lidén, G., Shang, Y. et Tu, J. (2016). Transport and deposition of welding fume agglomerates in a realistic human nasal airway. *Annals of Occupational Hygiene*, 60(6), 731-747.
- Tong, H., Nakata, K., Tanaka, M., Ushio, M. et Mita, T. (2005). Mechanism of welding fume suppression during AC-pulsed MIG welding of Al-Mg alloys. *Welding International*, 19(7), 509-523. doi: 10.1533/wint.2005.3441
- Topham, N., Jun, W., Kalivoda, M., Huang, J., Kuei-min, Y., Yu-mei, H., . . . Paulson, K. (2012). Control of Cr⁶⁺ emissions from gas metal arc welding using a silica precursor as a shielding gas additive. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(2), 233-241. doi: 10.1093/annhyg/mer103

- Topham, N., Kalivoda, M., Hsu, Y. M., Wu, C. Y., Oh, S. et Cho, K. (2010). Reducing Cr6+ emissions from gas tungsten arc welding using a silica precursor. *Journal of Aerosol Science*, 41(3), 326-330. doi: 10.1016/j.jaerosci.2009.12.002
- Vishnu, B. R., Sivapirakasam, S. P., Kk, S., Albert, S. K. et Chakraborty, G. (2018). Cr6+reduction in welding fumes by nano composite coatings on stainless steel manual metal arc welding electrodes. *Process Safety and Environmental Protection*, 114(1), 334-346. doi: 10.1016/j.psep.2018.01.003
- Wallace, M., Landon, D., Song, R. et Echt, A. (2001). A field evaluation of the effect of pulsed arc welding technique on reducing worker exposures. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 16(2), 93-97. doi: 10.1080/104732201460127
- Wallace, M., Shulman, S. et Sheehy, J. (2001). Comparing exposure levels by type of welding operation and evaluating the effectiveness of fume extraction guns. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 16(8), 771-779.
- Wang, J., Chen, C., Liu, Y., Jiao, F., Li, W., Lao, F., . . . Zhou, G. (2008). Potential neurological lesion after nasal instillation of TiO2 nanoparticles in the anatase and rutile crystal phases. *Toxicology Letters*, 183(1-3), 72-80.
- Witschger, O. et Fabriès, J. F. (2005). Particules ultrafines et santé au travail : 1-caractéristiques et effets potentiels sur la santé. *Hygiène et sécurité du travail*, 199, 21-35.
- Yamamoto, E., Yamazaki, K., Suzuki, K. et Koshiishi, F. (2010). Effect of flux ratio in flux-cored wire on wire melting behaviour and fume emission rate. *Welding in the World*, 54(5-6), R154-R159.
- Yoon, C. S., Paik, N. W. et Kim, J. H. (2003). Fume generation and content of total chromium and hexavalent chromium in flux-cored arc welding. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(8), 671-680. doi: 10.1093/annhyg/meg063
- Zimmer, A. T., Baron, P. A. et Biswas, P. (2002). The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process. *Journal of Aerosol Science*, 33(3), 519-531. doi: 10.1016/S0021-8502%2801%2900189-6

ANNEXE A

Exemple de résultats issus de l'interrogation du moteur de recherche Embase à l'aide des mots-clés

Thématique	Combinaison de mots-clés		Total
	Welding AND fume* AND (reduc* OR control* OR abatement OR mitig* OR minimiz* OR diminution OR diminish*)	Welding AND fume* AND (production OR produced OR generat* OR emission OR emit*)	
Risques ou effets santé	602	255	857
Validation et développement de modèle d'estimation de l'exposition	14	-	14
Protection respiratoire, ventilation et procédés de collecte de fumées	27	15	42
Amélioration de l'évaluation du risque	9	10	19
Technique autre que soudage (brasage, coupage, etc.)	-	3	3
Langue autre que le français ou l'anglais	49	23	72
Développement de méthodes analytiques ou d'échantillonnage	24	24	48
Caractérisation des particules	3	2	5
Retenues	57	88	145
Total	785	420	1205

Numéro	Étude	Type	Paramètre étudié														
			Gaz de protection	Électrode	Tension du courant	Mode de transfert	Procédé de soudage	Intensité du courant	Vitesse du fil	Type de courant	Diamètre des gouttes	Apport thermique	Métal de base	Stabilité du transfert de métal	Alimentation électrique	Temps d'arc	Puissance électrique
34	Sowards <i>et al.</i> , 2008	Exp.															
35	Srinivasan et Balasubramanian, 2011a	Exp.															
36	Srinivasan et Balasubramanian, 2011b	Exp.															
37	Sriram <i>et al.</i> , 2015	Exp.															
38	Sterjovski <i>et al.</i> , 2010	Exp.															
39	Tong <i>et al.</i> , 2005	Exp.															
40	Topham <i>et al.</i> , 2010	Exp.															
41	Topham <i>et al.</i> , 2012	Exp.															
42	Vishnu <i>et al.</i> , 2018	Exp.															
43	Wallace, Landon <i>et al.</i> , 2001	Ter.															
44	Wallace, Shulman <i>et al.</i> , 2001	Ter.															
45	Yamamoto <i>et al.</i> , 2010	Exp.															
46	Yoon <i>et al.</i> , 2003	Exp.															
47	Zimmer <i>et al.</i> , 2002	Exp.															

Exp., expérimentale
Ter., terrain

ANNEXE C

Exemple de fiche d'extraction décrivant les études retenues

Numéro	1
Auteurs	Andrews <i>et al.</i>
Année	2015
Journal, Volume (Numéro), pp.	<i>Analytical Methods</i> , 7, 6403-6410.
Type d'étude	Expérimental
Type de procédé	GMAW court-circuit; SMAW; FCAW
Gaz de protection	GMAW-SS : 90He+ 7,5Ar + 2,5CO ₂ ; GMAW - MCS : 75Ar+25CO ₂ ; FCAW : 75Ar+25CO ₂ ; SMAW : N/A
Métal de base	GMAW-SS : acier inoxydable; GMAW-MCS : acier doux au carbone; FCAW, SMAW : acier doux au carbone
Matériel d'appoint (fil-électrode ou baguette)	GMAW : acier inoxydable ER308LSi 0,045 po. (1,14 mm); FCAW : E308LT0-1; SMAW : E308L (4,8 mm)
Paramètre étudié	Procédé de soudage
Paramètre avant modification	GMAW : court-circuit sur acier inox et acier doux au carbone; SMAW
Paramètre après modification	FCAW
Contaminant	Mn total
Indicateur mesuré	Fraction de Mn en mg/g de fumées générées
Résultat	↑ (la plus élevée)