

Exposition aux fumées et aux champs magnétiques en soudage : fondamentaux et évolutions à venir

LES AUTEURS : Fabrice Scandella⁽¹⁾, Alex Gutschmidt⁽¹⁾,
Eric Nguede⁽¹⁾ et Laurent Jubin⁽²⁾
(1) Institut de Soudure ; (2) CETIM

PRÉAMBULE

Cet article reprend, entre autres, une grande partie du contenu d'un webinaire qui a eu lieu le 2 février 2023. Si vous souhaitez accéder à une rediffusion, vous pouvez contacter le service Membres Industriels : +33(0)149903609 ou reseau.membres@isgroupe.com

1. INTRODUCTION

Après un bref rappel des éléments essentiels à connaître pour les deux sujets, celui qui est considéré à ce jour comme le plus prégnant est abordé en premier : les fumées de soudage.

1.1 Les fumées de soudage

Ce sujet d'hygiène-sécurité est étudié par l'Institut de Soudure depuis des décennies, notamment au travers des actions menées conjointement avec le CETIM pour la Commission interprofessionnelle Soudage (CIS). Divers articles paraissent d'ailleurs régulièrement dans le magazine *STC*.

Le but ici était aussi de faire un état des lieux des changements à venir concernant la réglementation relative à l'exposition du personnel aux fumées de soudage. La tendance est, comme toujours, à la baisse du niveau d'exposition pour certaines substances et il est utile de savoir ce que cela peut engendrer en pratique dans les ateliers.

1.2 Les champs magnétiques

Le sujet des champs magnétiques est plus récent (en tout cas dans le domaine du soudage) et des travaux ont été initiés ces dernières années suite à la publication de la directive européenne CEM 2013/35/CE.

L'objectif était surtout de présenter les résultats d'une étude débutée en 2019 qui concernait l'exposition des soudeurs et des opérateurs aux champs magnétiques en soudage à l'arc. Les résultats permettent de savoir, en première approche, quelles sont les variables opératoires pouvant conduire à dépasser les valeurs déclenchant l'action et de prendre, le cas échéant, des mesures préventives.

2. FUMÉES DE SOUDAGE

2.1 Ce qu'il faut savoir

Le sujet de la nocivité des fumées de soudage est très ancien et a fait l'objet d'une multitude d'études. Même si certains composés présents dans les fumées sont moins nocifs que d'autres, le fait que les poussières soient très fines conduit à encombrer les alvéoles des poumons et il convient de protéger le personnel.

2.1.1 Origine et composition des fumées de soudage

En soudage par fusion, des températures extrêmement élevées sont atteintes, bien au-delà du point de fusion des matériaux que l'on soude, cf. Figure 1. Cela

entraîne des réactions chimiques ou physiques qui vont générer des poussières et des gaz. Les fumées proviennent essentiellement ^[1,2]

- Du produit d'apport : environ 95 % de la quantité totale de fumée ;
- De revêtements éventuellement présents à la surface des pièces à souder (générant de 10 à 60 % plus de fumée) ;
- Des pollutions à la surface des pièces (rouille, huile...) s'il y en a beaucoup (environ + 35% de fumée)

... et minoritairement des matériaux de base. Le mécanisme de formation des fumées de soudage implique de la vaporisation, de l'oxydation et de la condensation. La quantité de fumée augmente avec l'intensité de soudage. À noter également, comme l'illustre la Figure 2 dans le cas du procédé MIG-MAG, la quantité de fumées émises augmente avec les projections. De ce fait, il faut éviter le mode de transfert globulaire.

De manière plus générale, certains fils-électrodes et l'utilisation de générateurs d'ancienne génération (à thyristors) peuvent tous deux conduire à un taux d'émission de fumées plus important si l'arc électrique est moins stable. Cette relation fumées/projections est visible en pratique, cf. Figure 3.

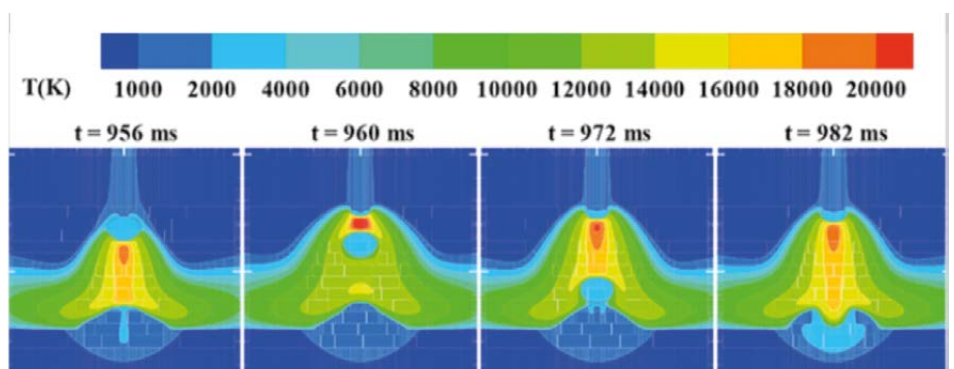


Figure 1 : Exemples de répartition de la chaleur sous la torche dans le cas du soudage MIG-MAG, à quatre moments pendant le transfert du métal depuis l'extrémité du fil jusque dans le bain^[3]

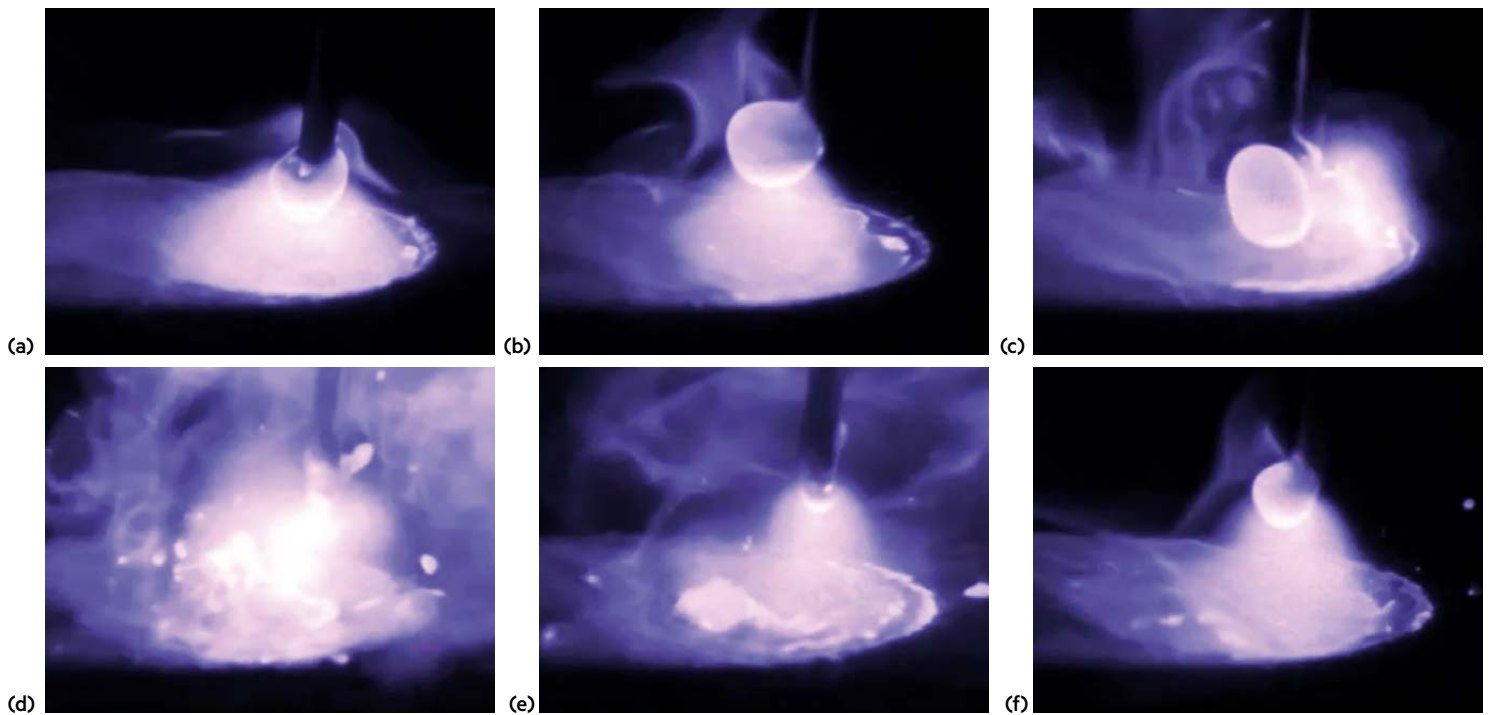


Figure 2 : Séquence d'images montrant le mode de transfert globulaire : (a) la goutte de métal se forme au bout du fil, (b) grossit et (c) finit par se détacher avant (d) d'exploser au contact avec le bain, ce qui produit énormément de projections et de fumée, puis (e,f) une nouvelle goutte se forme. Images issues d'une vidéo rapide du CCWJ, université d'Alberta.



Figure 3 : Soudage MAG robotisé. On peut constater le lien projections/fumées. Doc. IS.

Les fumées de soudage sont des agglomérats de particules fines (de diamètre 100 nm et moins, cf. Figure 4) et par définition, ce sont des nanomatériaux.

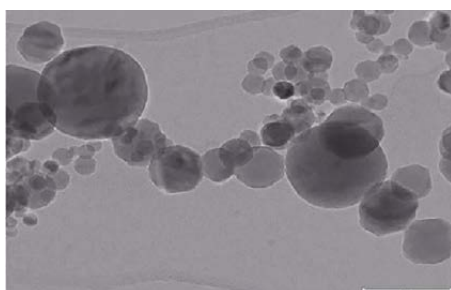


Figure 4 : Fumée de soudage observée par microscopie électronique à balayage : les tailles de particules sont très diverses et forment souvent des chaînes.^[4]

Le CIRC a classé les fumées de soudage en cancérogène avéré. Du point de vue de la composition chimique, on forme

des oxydes complexes (de type spinelles : $Fe_{5-x}M_xO_4$ avec $M = Ca, Ti, Ni, Mn, Cr, Cu$, etc.), de la silice amorphe ou des silicates amorphes, ainsi que des fluorures s'il y a des composés fluorés dans les produits d'apport (ex. CaF_2). La toxicité de la fumée dépend des éléments présents et de leur concentration. La composition de la fumée produite varie cependant peu en fonction des paramètres de soudage.

2.1.2 Effet du procédé et du produit d'apport

Comme mentionné précédemment, la stabilité de l'arc électrique conditionne en grande partie le taux d'émission de fumée. C'est pourquoi le procédé TIG (et par extension le plasma) est très peu émissif, cf. Figure 5. L'électrode est non fusible et l'apport de métal, s'il y en a, est séparé de l'arc électrique.

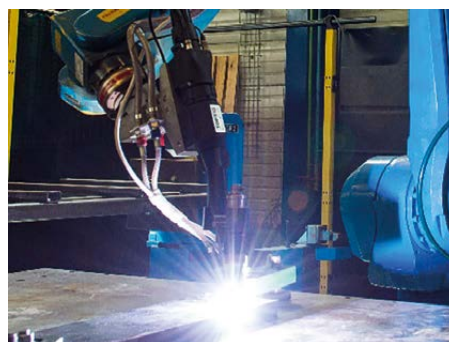


Figure 5 : Soudage TIG robotisé. Le taux d'émission de fumées est si faible qu'elles sont invisibles. Doc. IS.

Comme le montre la Figure 6(a), en soudage MAG, le taux d'émission de fumée augmente progressivement avec l'intensité de soudage, avec « l'anomalie » provenant du mode de transfert globulaire. En plus de l'intensité et du mode de transfert, la tension de l'arc modifie également le taux d'émission de fumées : pour tout fil-électrode, il y a une valeur optimale générant moins de fumée, par exemple aux alentours de 35 V dans le cas de la Figure 6(b). Bien entendu, la valeur va varier d'un produit d'apport à un autre suivant ses caractéristiques intrinsèques. Pour cet exemple, si l'on compare les variations de tension et d'intensité pour différents réglages de tension entre 30 et 36 V, celles-ci sont les plus faibles pour une tension moyenne de 35 V, ce qui se traduit par un arc électrique extrêmement stable et de ce fait moins de fumée. Malheureusement, 35 V est un réglage de tension d'arc élevé et largement au-delà des valeurs usuelles en soudage MAG manuel, avec comme effet un apport supplémentaire de chaleur peu souhaitable pour les conditions de travail du soudeur. La composition chimique du gaz a également une influence : plus il est oxydant et plus le taux d'émission augmente... du moins en théorie, car les différences sont généralement peu marquées par exemple entre un mélange M20 ou M21 et parfois les résultats peuvent être surprenants.^[5]

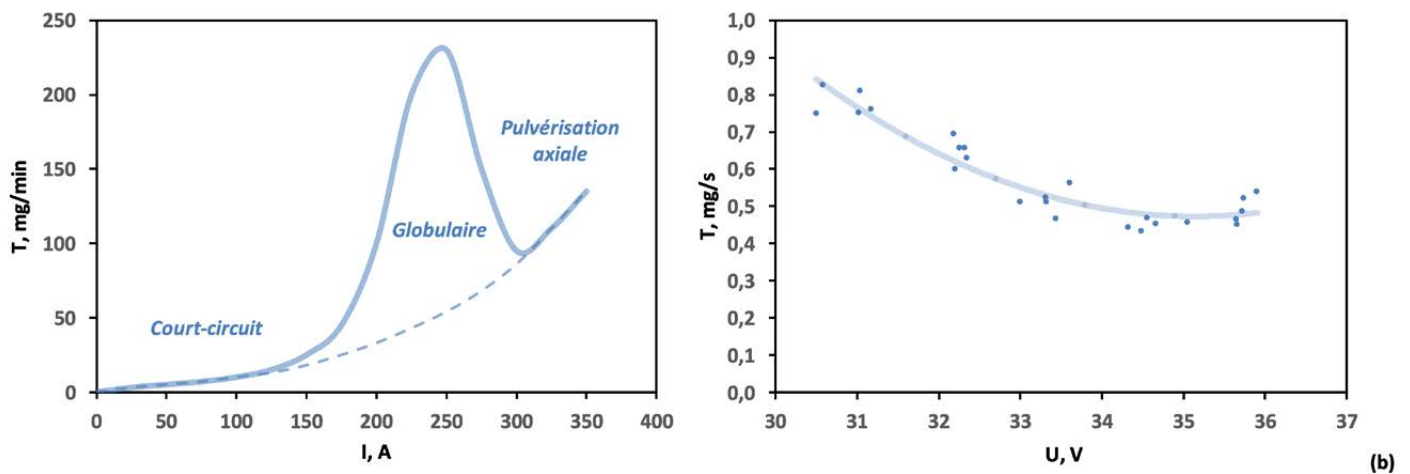


Figure 6 : (a) Taux d'émission de fumée en fonction de l'intensité de soudage (trait plein) - cas du procédé MAG avec un fil-électrode G3Si1 et un mélange Ar - 18% CO₂ - adapté de [6]; (b) taux d'émission de fumée en fonction de la tension d'arc, pour une intensité moyenne de 310 A (± 8%) - fil massif G4Si1 de diamètre 1,2 mm - adapté de [7].

Le choix du produit d'apport a également un effet sur le taux d'émission de fumées : non seulement le type (fil/baguettes massif, fil fourré, électrode enrobée, etc.) mais aussi la composition du fourrage et de l'enrobage dans le cas de ces deux derniers. Pour les électrodes enrobées, suivant les applications, on peut utiliser des enrobages rutile, basique, rutile-basique ou cellulosique et cela va influencer significativement le taux d'émission et la nature des fumées.^[8,9] Il en est de même pour les fils fourrés, qui peuvent contenir presque exclusivement des charges minérales ou au contraire métalliques, ou les deux. Cela conditionne également le taux d'émission des fumées, ne serait-ce que par la modification du mode de transfert de métal.^[10] On sélectionne cependant rarement un produit d'apport en fonction de la quantité de fumée produite : les critères de choix sont liés aux propriétés mécaniques des soudures, à la facilité de mise en œuvre, etc.

Tout comme pour les électrodes enrobées, la composition chimique des fumées produites en soudage avec fil fourré peut varier en fonction de leur élaboration, en particulier avec l'utilisation de liants (Na₂SiO₃ ou K₂Si₂O₇), qui vont provoquer la formation de chrome hexavalent s'il y a du chrome dans le produit d'apport. On comprend ainsi qu'il n'est pas possible de donner une valeur typique de taux d'émission de fumées en soudage MIG-MAG ou à l'électrode enrobée, compte tenu des variables en jeu.

Les procédés de soudage par fusion « spéciaux » tels que le laser ne sont pas abordés ici. Pour ce dernier, par

exemple, il est rare d'utiliser un produit d'apport, mais il y a tout de même une certaine quantité de fumées produite par la vaporisation des éléments chimiques constituant les matériaux de base et surtout des revêtements éventuellement présents en surface des pièces, tels que du zinc. Ce procédé étant presque toujours mis en œuvre par une machine dans un environnement clos, une aspiration dans la zone de travail permet de protéger le personnel de l'exposition, à condition d'être bien conçue et correctement dimensionnée.

2.1.3 La valeur limite d'exposition

La norme NF EN ISO 15011-4 définit une

Tableau 1 : Valeurs limites d'exposition sur 8 heures pour divers éléments chimiques ou composés que l'on peut retrouver dans les fumées et gaz produits en soudage à l'arc.

Élément ou composé chimique	VLEP sur 8 h (mg/m ³)
Aluminium (fumées)	5
Al ₂ O ₃	10
NO ₂	0,96
NO	2,5
Cr ^{VI}	0,001
Cu (fumées)	0,2
TiO ₂	10
Fe ₂ O ₃	5
Fluorures	2,5
Mn ₃ O ₄	1
CO	23
Ni, NiO, Ni ₂ O ₃	0,1
O ₃	0,2
Zn (oxyde, fumées)	5

VLE (valeur limite d'exposition) additive des éléments, qui permet de connaître la toxicité de la fumée puisqu'elle tient compte des éléments chimiques présents et de leur concentration. Comme le montre le Tableau 1, la VLEP (VLE professionnelle) des éléments ou composés chimiques sont très différentes et sont le reflet de leur toxicité. On peut notamment constater la valeur très faible du chrome hexavalent, qui se traduira par la mise en place de solutions de prévention drastiques s'il est présent.

La composition de la fumée produite varie peu en fonction des conditions de soudage. La tendance est (toujours) à la baisse de la VLE de certains composés et les valeurs données dans le Tableau 1 sont à jour à la date de publication de l'article, mais certaines évolueront à plus ou moins court terme.

2.2 Evolutions réglementaires à venir et leurs effets

Comme cela a été évoqué, la tendance est à la réduction progressive de certaines VLEP. Voici quelques repères pour la France, les valeurs n'étant pas harmonisées au niveau européen :

- En 2012 : la VLEP sur 8 h du Cr^{VI} est passée de 0,05 à 0,001 mg/m³;
- En 2019 : la VLEP sur 8 h du Mn est passée de 1 à 0,05 mg/m³;
- En 2021, la VLE des poussières est passée de 5 à 3,5 mg/m³.

Les modifications à venir, toujours pour la France, sont les suivantes :

- Après 2023, la VLE des poussières passera de 3,5 à 0,9 mg/m³ et la VLEP sur 8 h du Ni sera divisée par 10 (de 1 à 0,1 mg/m³) ;
- Pour finir, après 2025, la VLEP sur 8 h du Ni passera de 0,1 à 0,01 mg/m³.

Tableau 2 : Composition chimique de fumées de soudage pour divers produits d'apport et procédés. Adapté de [11].

Nature du consommable	Teneur typique en éléments dans les fumées (% par masse)							
	Fe	Mn	Cr	Cr ^{VI}	Ni	Cu	Al	O
Acier C-Mn faiblement allié (fil MAG massif)	60	8	-	-	-	0,2	-	Bal.
Acier C-Mn faiblement allié à 2,25 %Cr (fil fourré de flux ou électrode enrobée)	60	8	1	0,05	-	0,2	-	Bal.
Acier inoxydable (fil fourré de poudre métallique ou fil massif)	40	10	10	-	4	0,2	-	Bal.
Acier inoxydable (fil fourré de flux ou électrode enrobée) - peu de Cr ^{VI}	40	10	10	0,2	4	0,2	-	Bal.
Acier inoxydable (fil fourré de flux ou électrode enrobée) - beaucoup de Cr ^{VI}	40	10	10	3	4	0,2	-	Bal.
Alliage d'aluminium sans Mn (fil MIG massif)	-	0	-	-	-	-	50	Bal.
Alliage d'aluminium avec du Mn (fil MIG massif)	-	2	-	-	-	-	50	Bal.

Bien entendu, les valeurs limites d'exposition sont encore susceptibles d'évoluer pour ces éléments chimiques ou d'autres composés. Les baisses de VLE à venir auront un effet plus ou moins marqué sur les solutions de prévention à mettre en place :

- Dans certains cas, la contrainte réglementaire est déjà si forte que cela ne change rien. Un bon exemple est le soudage d'aciers inoxydables avec des consommables générant une quantité significative de Cr^{VI}
- Dans d'autre cas, la VLE peut être divisée par environ 10, ce qui se traduit par la mise en place de moyens de prévention supplémentaires.
- Pour illustrer cela, différents cas ont été considérés pour le calcul de la VLE additive à partir des données du Tableau 2. Les résultats sont présentés dans la Figure 7. On voit que certaines combinaisons de produit d'apport et de procédé de soudage ont subi une

baisse importante de la VLE additive en 2012 et d'autres en 2019. Des abaissements auront encore lieu cette année, mais pour la plupart des cas considérés, les diminutions les plus importantes ont déjà eu lieu.

Heureusement, les solutions de prévention sont nombreuses et les conditions de travail ont considérablement évolué, comme l'illustre la Figure 8. Parmi les solutions, on peut citer les nombreux systèmes d'aspiration (générale, hotte, gabarit, torche, cf. Figure 9) que l'on peut compléter si besoin avec des EPI spécifiques (cagoules à ventilation assistée ou à adduction d'air). Il n'y a cependant pas de solution de prévention universelle, il faut adapter les moyens à chaque poste de travail sans oublier qu'il ne faut pas protéger uniquement les soudeurs, mais tout le personnel présent dans un atelier de production.



Figure 8 : Le soudage, tel qu'il était mis en œuvre dans les années 40 (ici à l'électrode enrobée) et de nos jours (cas du procédé MIG-MAG). Documents Flickr et Soudage Outillage, respectivement.^[12,13]

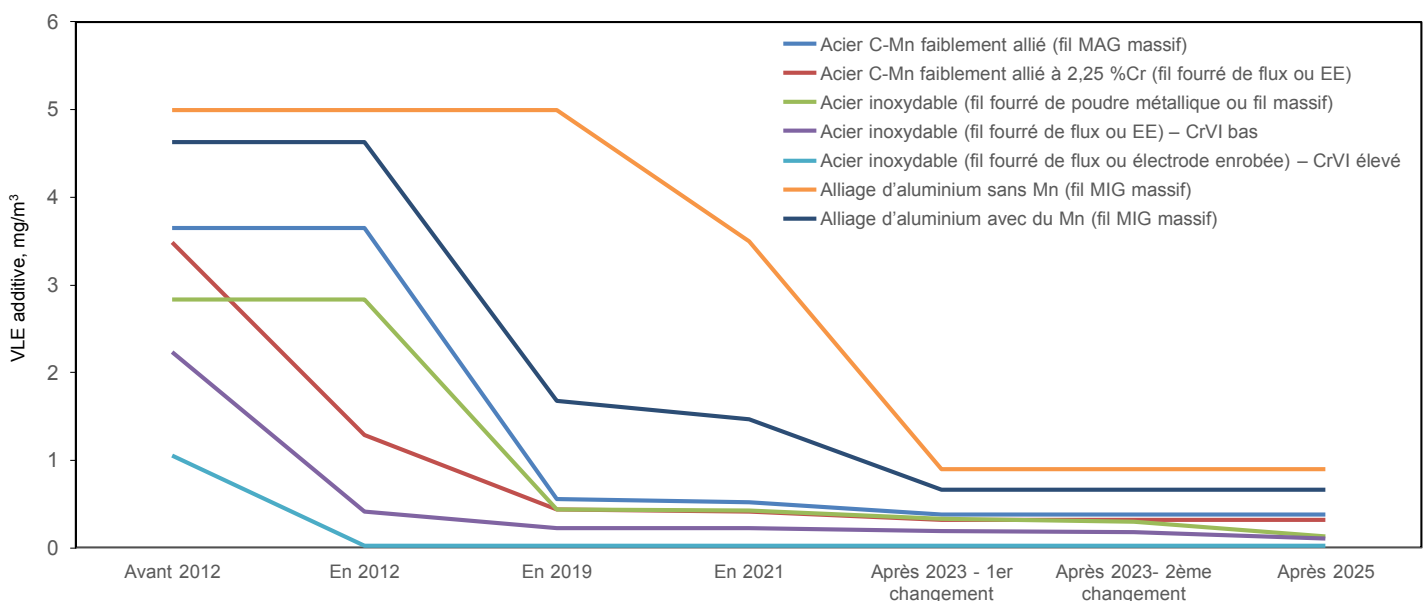


Figure 7 : Evolution passée et à venir de la VLE additive pour divers produits d'apport et procédés sur la base des données du Tableau 2. Adapté de [11].



Figure 9 : Exemple de torche aspirante avec différentes buses. Document ESAB.

3. CHAMPS MAGNÉTIQUES

3.1 Ce qu'il faut savoir

En soudage, les tensions mises en œuvre sont trop faibles pour générer un champ électrique significatif, donc seul le champ magnétique nécessite d'être considéré.

3.1.1 Contexte réglementaire

En 2013, la directive européenne CEM 2013/35/UE a défini les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques :^[14]

- Les VLE fixées dans la directive ne concernent que les effets directs à court terme de l'exposition aux champs électromagnétiques (effets immédiats et instantanés) : elles ne concernent donc pas les effets à long terme ;
- Il s'agit d'une directive sociale, elle s'applique aux employeurs ;
- Elle ne concerne pas que le soudage, mais un très large éventail d'équipements industriels, tels que le chauffage par induction, la démagnétisation, le contrôle par magnétoscopie, etc.

Comme pour les fumées de soudage, des VLE ont été établies sur la base de considérations biophysiques et biologiques. Pour les champs magnétiques, elles tiennent compte notamment des effets directs aigus et à court terme, scientifiquement bien établis. Il y a des VLE pour l'ensemble du corps, les membres, la tête et le tronc. Le problème, c'est qu'en pratique, on ne peut pas mesurer des VLE, d'où l'utilisation de valeurs déclenchant l'action (VA) :

- Les VA sont des grandeurs mesurables conservatives : en respectant les VA, on respecte les VLE ;
- On distingue les « VA basses » qui protègent les travailleurs des effets sensoriels et les « VA hautes » qui protègent les travailleurs des effets sur la santé ;
- On peut dépasser les VA à condition de ne pas dépasser les VLE.

Comme le montre la Figure 10, les VA sont moins contraignantes pour les membres (les valeurs admissibles de champ magnétique sont plus élevées pour les mains), mais toutes les VA décroissent rapidement avec l'augmentation de la fréquence du champ.

Les effets considérés sont :

- Les effets biophysiques directs (thermiques, tels que l'échauffement des tissus, la stimulation des muscles, des nerfs ou des organes sensoriels pouvant éventuellement occasionner des vertiges ou phosphènes ou encore des courants induits dans les membres) ;
- Les effets indirects (interférences avec des dispositifs médicaux implantés actifs ou passifs, risques de projec-

tion d'objets ferromagnétiques dans des champs magnétiques statiques et incendies ou explosions résultant de l'inflammation de matériaux par des étincelles causées par des champs induits, des courants de contact ou des décharges d'étincelles).

Des guides de bonnes pratiques sont disponibles pour se documenter sur le sujet.^[15,16] En France, la transposition de la directive européenne CEM 2013/35/UE s'est faite sous la forme d'un décret (n°2016-1074), lequel reprend les valeurs déclenchant l'action de la directive européenne et apporte plusieurs modifications au code du travail. Il est entré en application début 2017.

3.1.2 Les données disponibles

Pour ce qui est des procédés de soudage, les évaluations ont rapidement porté sur un groupe de procédés des plus émissifs, le soudage par résistance (SPR). En effet, ce qui caractérise les procédés de SPR (par points, à la molette, etc.), ce sont :

- Des niveaux d'intensité très élevés : un champ magnétique apparaît lorsqu'un courant circule dans un conducteur et il augmente avec le courant ;
- Des valeurs de transition di/dt élevés : des variations importantes de courant sur des temps très courts vont générer un champ magnétique intense.

Avec des valeurs de courant typiquement de plusieurs dizaines de kA et un temps de cycle de l'ordre de la seconde en SPR

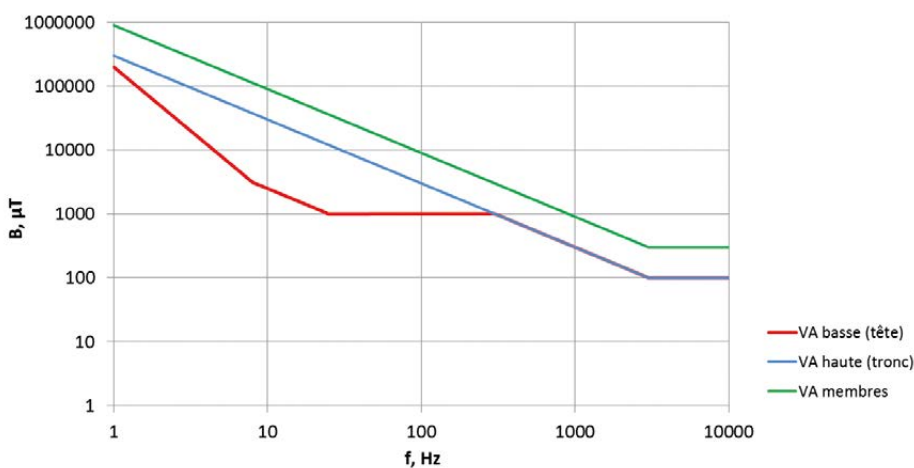


Figure 10 : Valeurs déclenchant l'action (VA) pour la tête, le tronc et les membres, en fonction de la fréquence du champ (échelle log/log).

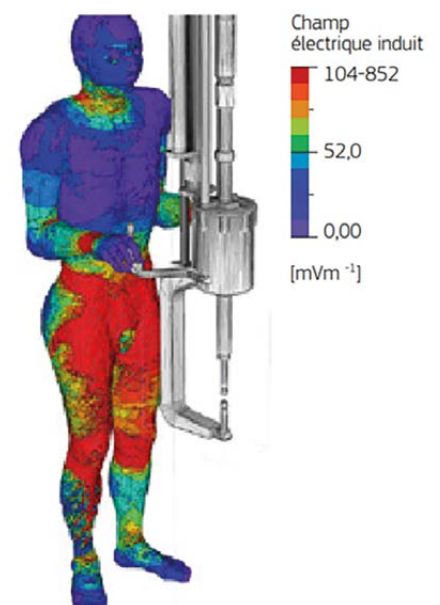


Figure 11 : Répartition spatiale des champs électriques induits dans un modèle humain en SPR par points.^[16]

par points, le champ magnétique peut dépasser des valeurs règlementaires si un opérateur est proche de la source d'émission du champ magnétique. La Figure 11 illustre un exemple en SPR par points manuel. Pour ce procédé, le retour d'expérience du terrain révèle que :

- Les VA sont dépassées dans environ un cas sur deux ;
- La solution est d'éloigner suffisamment le personnel de la source principale de rayonnement (pince ou transformateur) par le réaménagement du poste de travail.

Des solutions peu contraignantes peuvent donc être trouvées, sans oublier que l'automatisation ou la robotisation sont aussi des solutions très efficaces pour limiter l'exposition des travailleurs en délimitant la zone de travail, car l'intensité des champs magnétiques décroît rapidement avec la distance. D'autres procédés sont potentiellement très émissifs :

- Le soudage de goujons ;
- Le soudage par induction ;
- Le soudage à l'arc avec des courants alternatifs ou pulsés à haute fréquence.



Figure 12 : Tuyauteur réalisant une soudure TIG en position verticale montante. Doc. IS^[16]

3.1.3 Les bonnes pratiques

Un certain nombre de règles (bonnes pratiques) permettent de limiter l'exposition :

- Ne pas placer le faisceau de câbles sur les épaules (proche de la tête) ;
- Ne pas enrouler les câbles autour d'une partie du corps ;

- Rapprocher les câbles aller et retour et les attacher sur la plus grande longueur possible ;
- Maintenir les câbles du même côté du corps ;
- Raccorder le câble de retour le plus près possible du plan de joint ;
- Maintenir la tête et le tronc/torse le plus loin possible du circuit électrique de soudage ;
- Ne pas travailler à proximité, assis ou penché sur le générateur de courant de soudage.

L'ensemble de ces règles peuvent être respectées dans la plupart des situations, mais parfois, cela peut être très difficile. Un bon exemple est celui du tuyauteur qui doit réaliser des assemblages en position verticale montante, cf. Figure 12.

LA SUITE EN LIGNE



Pour lire la suite de cet article, rendez-vous sur le site internet de la revue, dans sa rubrique "Études et recherche" (accès réservé aux abonnés)

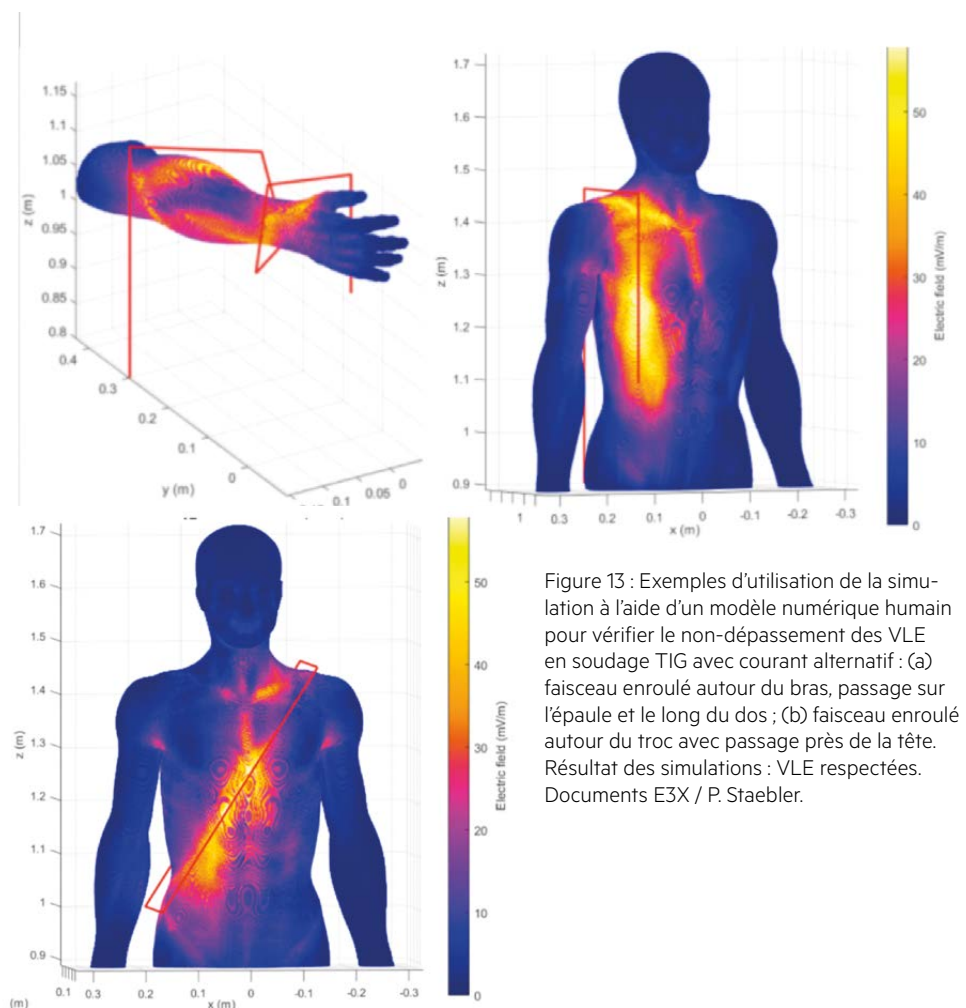


Figure 13 : Exemples d'utilisation de la simulation à l'aide d'un modèle numérique humain pour vérifier le non-dépassement des VLE en soudage TIG avec courant alternatif : (a) faisceau enroulé autour du bras, passage sur l'épaule et le long du dos ; (b) faisceau enroulé autour du troc avec passage près de la tête. Résultat des simulations : VLE respectées. Documents E3X / P. Staebler.

Suite de l'article

Exposition aux fumées et aux champs magnétiques en soudage : fondamentaux et évolutions à venir

LES AUTEURS : Auteurs : Fabrice Scandella⁽¹⁾, Alex Gutschmidt⁽¹⁾, Eric Nguede⁽¹⁾ et Laurent Jubin⁽²⁾

(1) Institut de Soudure ; (2) CETIM

Celui-ci enroule le faisceau autour d'un bras pour mieux contrôler la position de la torche dans les trois dimensions et pouvoir « travailler » le bain en réalisant un mouvement complexe de balayage de la torche avec une main, tout en assurant l'apport de produit d'apport avec l'autre main. Ce n'est pas par choix, mais par nécessité. On peut noter qu'il respecte les autres règles et se protège d'autres risques :

- Câbles électriques éloignés du corps ;
- Câble de retour proche du chanfrein ;
- EPI : vêtements et gants adaptés, cagoule à adduction d'air (ce qui est rarement indispensable dans le cas du soudage TIG)

3.1.4 Que faire en cas de dépassement des VA ?

Les valeurs réglementaires sont les VLE et en cas de dépassement des VA, on peut faire appel à la simulation pour vérifier que l'on ne dépasse pas les VLE. La Figure 13 montre deux situations pour lesquelles les mesures ont montré que les VA étaient dépassées.

Les simulations ont cependant démontré que les VLE ne l'étaient pas. Dans ce cas, le poste de travail et son aménagement sont donc conformes d'un point de vue

règlementaire, même si la disposition du faisceau de câbles va à l'encontre des bonnes pratiques citées précédemment. On aurait également pu repasser sous les niveaux de VA en réaménageant le poste de travail pour éloigner le faisceau de la tête et du tronc du soudeur.

3.2 Résultats d'une étude récente

3.2.1 Introduction

Du fait du manque de données relatives à l'exposition du personnel aux champs magnétiques dans le cas du soudage à l'arc, il a été jugé utile, pour les industriels mettant en œuvre ces procédés, de dresser un panorama assez large des VA en soudage à l'arc.^[17,18] Il est bien entendu impossible de couvrir tous les cas de figure, mais on peut au moins avoir une idée des niveaux atteints. Cette étude a été financée par la CIS, avec l'appui technique de la CARSAT Bretagne, de l'INRS (site de Nancy) et de la société E3X.

Tableau 3 : Vue synthétique des cas étudiés pour réaliser un panorama de l'exposition aux champs magnétiques en soudage.

Numéro du procédé	Technologie de générateur	Variables
111	Onduleur	Electrode basique Ø 2,5 et 4 mm, électrode rutile Ø 4 mm
121	Redresseur thyristorisé	Intensité : 450, 650 et 900 A
135	Hacheur, commutateur et onduleur	Différentes valeurs de U et I (modes de transfert : court-circuit, globulaire et pulvérisation axiale), courant continu et pulsé
136	Onduleur	Fils rutile et basique, deux niveaux de tension et d'intensité
141	Onduleur	Nature du courant : continu, alternatif, pulsé conventionnel et « superpulsé » à 15 kHz Plusieurs niveaux d'intensité

3.2.2 Travaux réalisés

Plus de 150 mesures ont été faites simultanément avec différents appareils ou sondes, pour identifier les technologies et les paramètres de soudage susceptibles de générer des champs magnétiques intenses. L'étude est relativement complète, puisqu'elle couvre :

- Les procédés TIG, MAG, électrode enrobée et sous flux en poudre ;
- Différentes générations de postes à souder ;
- Divers produits d'apport (nature et diamètre) et réglages d'intensité.

Des informations plus détaillées sont données dans le Tableau 3. A chaque fois, une mesure du courant été réalisée à haute fréquence d'échantillonnage avec un oscilloscope pour disposer également du signal $i=f(t)$.

La plupart des mesures ont été réalisées au contact avec le câble : cela est utile pour comparer la valeur obtenue à la VA membres (le champ magnétique généré est le même que celui dans la torche que tiendrait le soudeur). Des mesures de distance minimale à respecter ont également

été réalisées pour le cas de personnel présentant des risques particuliers, cf. Figure 14.

De nombreux appareils de mesure et des logiciels ont été utilisés : champ-mètres équipés de différentes sondes, ordinateur avec carte d'acquisition et logiciel de traitement des données dédié, cf. Figure 15. A noter :

- La mesure de l'exposition aux champs magnétiques doit être réalisée avec un champ-mètre adapté au soudage (tous les appareils ne le permettent pas) ;



Figure 14 : Mesure en cours sur une machine de soudage sous flux en poudre. Doc. IS.

- On peut utiliser deux types de sondes : compacte (3 cm²), qui est adaptée à la mesure du champ magnétique proche de la source d'émission et qui est conforme aux exigences

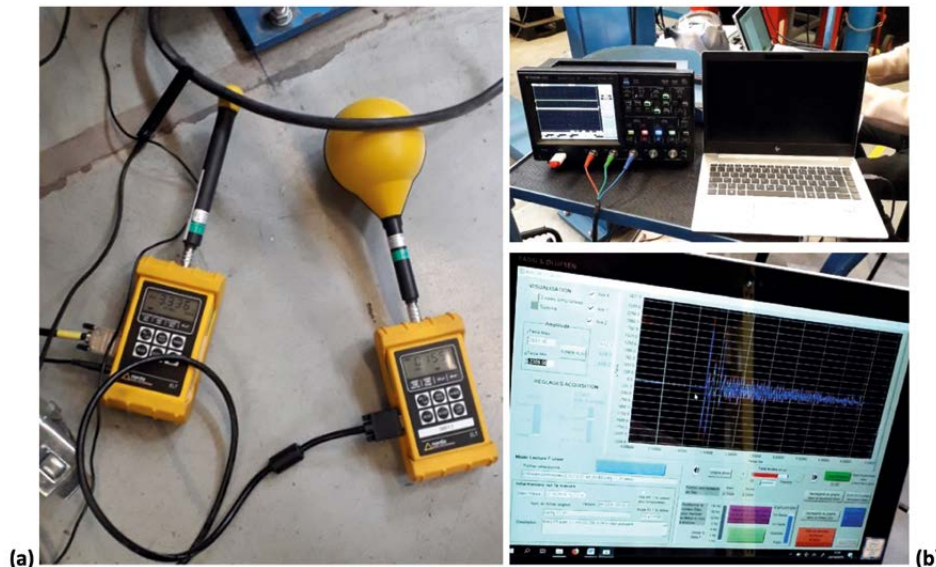


Figure 15 : Equipements et logiciels destinés à étudier les champs magnétiques en soudage : (a) champ-mètres équipés de deux sondes différentes ; (b) oscilloscope et ordinateur d'acquisition et de traitement des données (carte et logiciel dédiés). Note : pour réaliser uniquement des mesures en atelier, un champ-mètre et une sonde suffisent.

des normes IEC 62822-2, NF EN IEC 62822-3 et NF EN 62233 ou de plus grandes dimensions (100 cm²), qui donne des résultats plus précis en s'éloignant de la source d'émission.

Les résultats donnés ci-après sont des indices d'exposition (IE) par rapport à la VA membres :

- Si $IE < 1$, aucun problème, on est loin de dépasser les VLE ;
- Si $IE > 1$, les VA sont dépassées, mais pas forcément les VLE, il faut soit réaménager le poste de travail ou faire appel à la simulation numérique pour s'en assurer.

Attention, on ne peut pas transposer ces résultats :

- Ils permettent seulement de se faire une idée des niveaux d'exposition potentiels ;
- Il faut faire des mesures au cas-par-cas sur chaque poste de travail ;
- Si la configuration du poste de travail change, les résultats peuvent être différents.

3.2.3 Résultats principaux

La Figure 16 présente les résultats obtenus, chaque point étant le résultat d'une mesure ou la moyenne de plusieurs mesures successives :

- Dans le cas du procédé TIG, cf. Figure 16(a), l'IE est très faible en courant continu ou pulsé et sous ou légèrement supérieur à 1 en courant alternatif ;

- Toujours dans le cas du procédé TIG en courant alternatif, cf. Figure 16(b), l'IE est fonction de la distance : il est un peu supérieur à la VA à moins de 2 cm du câble ;
- Dans le cas du procédé EE, cf. Figure 16(c), l'IE est très faible en courant continu et proche ou très légèrement au-dessus de la VA en courant alternatif ;
- Pour le procédé MAG, cf. Figures 16(d), l'IE est très bas dans le cas de générateurs « classiques » en courant continu et sous la VA avec des générateurs « modernes » de type onduleur en courant continu ou pulsé ;
- Toujours pour le procédé MAG, l'IE varie en fonction du mode de transfert, cf. Figures 16(e) : il est très faible avec un arc relativement stable ou très stable (court-circuit ou pulvérisation axiale) et plus élevé en mode globulaire, mais dans tous les cas sous la VA ;
- Dans le cas du procédé de soudage sous flux en poudre (en courant continu), cf. Figure 16(f), l'IE augmente progressivement avec la puissance (donc essentiellement avec l'intensité) de soudage mais reste sous la VA même à forte intensité de soudage (1 kA).

Ces résultats montrent qu'en soudage à l'arc, l'exposition aux champs magnétiques est faible : souvent très en-dessous de la VA membres et seulement parfois un peu supérieure, donc a priori en-dessous de la VLE membres comme tend à le montrer la simulation numérique. Pour les procédés de soudage à l'arc, le retour d'expérience en simulation montre que les VLE sont respectées 9 fois sur 10. Les générateurs de courant MIG-MAG modernes testés émettent des champs magnétiques un peu plus intenses que les générateurs plus anciens, ce qui s'explique par les formes d'ondes mises en œuvre. Cela montre aussi que des fabricants ont anticipé la réglementation en mettant sur le marché des générateurs permettant de la respecter.

Dans presque tous les cas, les bonnes pratiques au poste de travail évitent les situations d'exposition pouvant poser des problèmes. Il faut les respecter dès que cela est possible, donc dans la grande majorité des cas. Il faut tout de même porter une attention particulière aux personnes

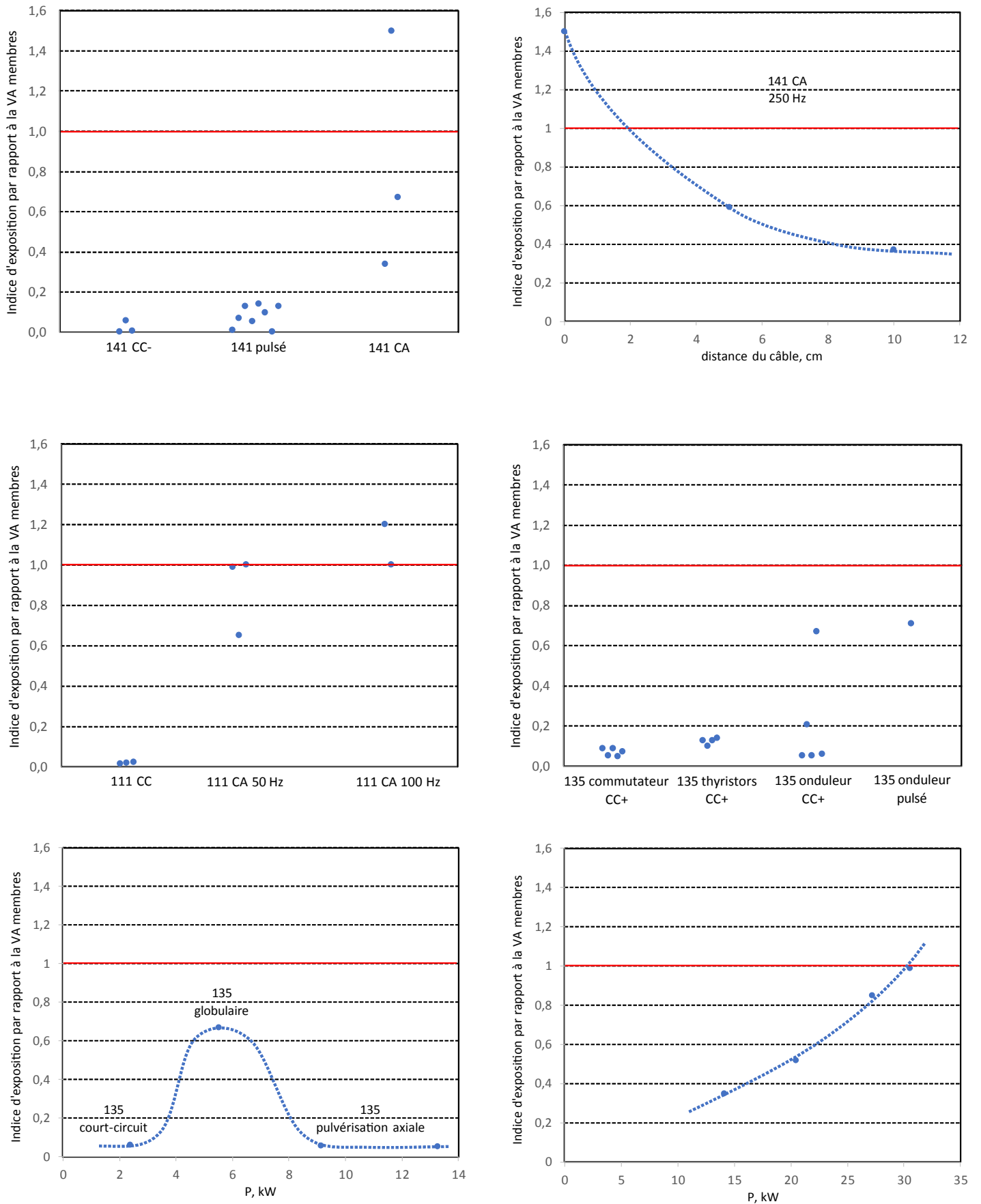


Figure 16: Indice d'exposition par rapport à la VA membres : (a) pour le procédé TIG avec différents courants électriques ; (b) pour le procédé TIG en fonction de la distance par rapport au câble ; (c) en soudage à l'électrode enrobée, en fonction du courant ; (d) en MAG, avec différents générateurs de soudage ; (e) en MAG suivant le mode de transfert et (f) en soudage sous flux en poudre, en fonction du produit intensité x tension. Note : CC- = courant continu, électrode négative ; CA = courant alternatif ; CC et CC+ = courant continu, électrode positive ; P = puissance. Doc. IS.

à risque : dans le cas d'un équipement de soudage à l'arc sous flux en poudre évalué, une distance minimale de 1 m a été trouvée pour le cas des personnes à risques.

Mais bien évidemment, ce résultat n'est pas transposable à tous les équipements du même type. A noter que contrairement aux fumées de soudage, il n'y a pas d'évolutions réglementaires en vue concernant les champs magnétiques.

4. POUR CONCLURE

Le sujet de l'hygiène-sécurité en soudage est complexe. Chaque poste de travail a des spécificités et les moyens de prévention des risques lui sont propres. Si les fumées de soudage restent une préoccupation notamment du fait des contraintes réglementaires de plus en plus fortes, dans la grande majorité des cas, l'exposition des soudeurs aux champs magnétiques est faible dans le cas des procédés usuels de soudage à l'arc. Le respect des bonnes pratiques permet de respecter la réglementation en vigueur.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Monsieur Nicolas Floros de la société Air Liquide pour le partage d'informations réglementaires sur les fumées de soudage, ainsi que Messieurs Guy Le Berre de la CARSAT Bretagne et Patrick Staebler (pstaebler@exposition-cem.com), société E3X, pour leur collaboration dans le domaine des champs magnétiques.

Références

- [1] S. Debiez, « Point sur l'utilisation des peintures primaires en construction soudée », rapport technique CETIM n° 187460 / IS n°29001, 1994, travaux non publiés.
- [2] G. Mertuk et al., « Evaluation de l'influence des huiles évanescents sur la soudabilité MAG - Influence sur le volume et la toxicité des poussières émises », rapport technique CETIM réf. 1J4120 / IS n°39973, 2003, travaux non publiés.
- [3] J. Hu, Z. Rao and H.-L. Tsai, « A Comprehensive Model of the Transport Phenomena in Gas Metal Arc Welding », <http://www.intechopen.com/books/joining-technologies/a-comprehensive-model-of-the-transport-phenomena-in-gas-metal-arc-welding>.
- [4] K. Carpenter, B. Monaghan and J. Norrish, « Influence of shielding gas on fume formation rate for gas metal arc welding (GMAW) of plain carbon steel », Semantic scholar, 2009.
- [5] A. Gutschmidt, « Mesure du taux d'émission de poussières et détermination de la VLE - produits usuels et à bas taux d'émission de fumées », rapport technique CETIM n°71103 / IS réf. 3003-1RGI1-V1, 2015, travaux non publiés.
- [6] F. Bonthoux, « Etude des facteurs influents sur l'émission de fumées et l'efficacité de captage des torches MIG/MAG aspirantes », Soudage et Techniques Connexes, mai-juin 2016, p 41-47.
- [7] E. Nguede, « Influence du cuivrage des fils de soudage MAG sur les taux d'émission de fumées », rapport technique IS réf. 5071-39JFI-V2, 2017, travaux non publiés.
- [8] U. Riedinger et al., « Etudes des problèmes posés par l'émission de fumées au cours du soudage, à l'arc avec des électrodes enrobées », rapport technique CETIM réf. 12Y210 / IS n°7989, 1978, travaux non publiés.
- [9] D. Beaufils et al., « Etudes des problèmes posés par l'émission de fumées au cours du soudage », rapport technique CETIM réf. 12Y373 / IS n°12485, 1982, travaux non publiés.
- [10] D. Beaufils, « Etude des problèmes posés par l'émission des fumées de soudage en procédés semi-automatiques MIG/MAG », rapport technique CETIM n°100010 / IS n°15945, 1984, travaux non publiés.
- [11] Présentation de Nicolas Floros (Air Liquide), « Welding Fumes: A challenge for the welding Industry », EWA Technical Committee Consumables, October 13th, 2022.
- [12] D. Darian Smith, « A young woman arc welding part of an anti-tank gun in a munitions factory in South Australia in 1943 », document Flickr.
- [13] <https://www.soudage-outillage.fr>.
- [14] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:FR:PDF>.
- [15] <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c6440d35-8775-11e5-b8b7-01aa75ed71a1/language-fr/format-PDF/source-278273763>.
- [16] <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e71e-8b3f-8775-11e5-b8b7-01aa75ed71a1/language-fr/format-PDF/source-278273786>.
- [17] A. Gutschmidt, « Panorama des niveaux des champs électromagnétiques par rapport à la directive CEM 2013/35/UE », rapport technique IS réf. 3003-50V8I5-V1, 10/2019, travaux non publiés.
- [18] A. Gutschmidt, « Evaluation des champs électro-magnétiques directive CEM 2013/35/CE (2^{ème} phase) », rapport technique IS réf. 3003-61SX32-V1, projet CETIM n°257906, 2022.