

Notes techniques

COMMENT MESURER LE CHAMP MAGNÉTIQUE AUX POSTES DE TRAVAIL DES MACHINES À SOUDER PAR RÉSISTANCE ?

PHILIPPE DEMARET
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

GUY LE
BERRE,
ROLAND
HÉNOFF
Carsat
Bretagne,
département
Risques
professionnels,
Centre de
mesures
physiques
de l'Ouest
(CIMPO)

Afin de maîtriser les risques liés au champ magnétique émis par les machines à souder par résistance, la réglementation prévoit que l'employeur réduise et donc évalue l'exposition de ses salariés. Cet article présente une méthode de métrologie pour aider à l'évaluation de ce risque ainsi que les résultats de mesures réalisées aux postes de travail de plus de 100 machines.

Utilisé pour souder sans métal d'apport des pièces métalliques entre elles, le soudage par résistance (cf. Encadré 1) s'accompagne de l'émission de champ électrique et magnétique aux alentours du poste de travail. Alors que le champ électrique émis au poste de travail de ce type d'équipement est généralement négligeable eu égard aux valeurs déclenchant l'action définies par la directive européenne 2013/35/UE, l'intensité du champ magnétique dépasse souvent les valeurs déclenchant l'action (VA). Des précautions sont donc à

prendre pour protéger les salariés. Pour les champs dont la fréquence est inférieure à 0,1 MHz, le risque est avant tout dû à des effets non-thermiques, tels que la stimulation du système nerveux central et périphérique ainsi que des effets sensoriels. Pour des champs dont la fréquence est supérieure à 0,1 MHz, le risque est principalement thermique. Face à ces risques, le Parlement européen a adopté en 2013 une directive fixant des valeurs déclenchant l'action dans le domaine des champs électromagnétiques [1], dont la transposition dans le droit des états membres est attendue au 1^{er} juillet 2016

RÉSUMÉ

Un équipement sur deux susceptible d'émettre des champs magnétiques est une soudeuse par résistance. Ces machines exposent les opérateurs à des champs magnétiques élevés pouvant dépasser les valeurs déclenchant l'action définies par la directive européenne 2013/45/UE. La réglementation impose aux employeurs d'évaluer le risque dû aux rayonnements électromagnétiques (ou de le mesurer) et de

prendre les actions nécessaires pour le réduire. La mesure des champs magnétiques émis par les équipements de soudage par résistance permet de mieux appréhender ce dernier mais reste délicate de par la nature impulsive du signal. Une méthode de métrologie pour aider à l'évaluation de ce risque ainsi que des résultats de mesures réalisées aux postes de travail de plus de 100 machines sont présentés.

How can the magnetic fields at resistance welding machine workstations be measured?

One in every two machines that emit electric and magnetic fields is a resistance welder. Resistance welding machines expose their operators to high magnetic fields which may exceed the exposure action values defined by European Directive 2013/45/EU. The regulations require that employers measure or assess the risk of electromagnetic radiation and take the necessary

actions to reduce it. Measuring magnetic fields emitted by resistance welding equipment enables that risk to be better understood but is difficult because of the impulsive nature of the signal. This article reports on a measurement method for assessing the risk and gives the results of measurements taken at the workstations of more than 100 machines.

au plus tard. Concrètement, cette directive oblige les employeurs à évaluer entre autres, les intensités de champ magnétique aux postes de travail des machines rayonnantes et notamment des machines à souder par résistance. Or, cette mesure peut présenter des difficultés. En effet, en raison de son caractère impulsionnel, ce champ magnétique est composé d'une fréquence fondamentale et de nombreuses fréquences harmoniques. Afin d'aider les entreprises concernées à agir, cet article décrit une méthode permettant cette évaluation. Il présente également les résultats obtenus lors d'une étude visant à évaluer l'exposition de travailleurs sur différents équipements de soudage par résistance.

Pour rappel, toutes les machines de soudage disposent d'une commande électronique destinée à régler les cycles de soudage, la durée du passage du courant et son intensité. Un cycle de soudage se déroule généralement en cinq étapes: phase d'accostage, préchauffage, soudage, recuit et phase de forgeage. Les paramètres du soudage sont essentiellement le diamètre des électrodes, l'effort de serrage, l'intensité du courant de soudage et le temps du cycle de soudage. Ce type d'équipement se rencontre fréquemment dans les entreprises françaises. Une enquête réalisée à la demande de l'INRS estime à environ 100000 leur nombre en France [2].

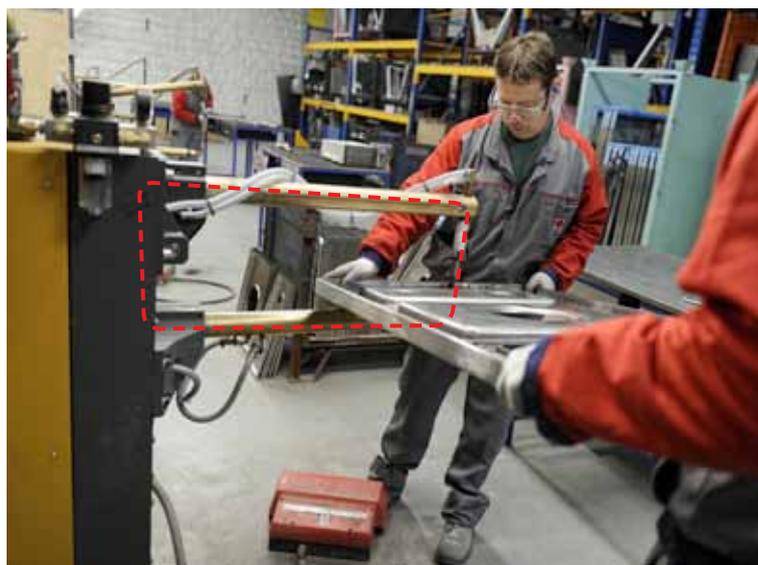
La fréquence du signal est de 50 Hz pour les soudeuses les plus anciennes. Elle est comprise entre 1 et 4 kHz pour les plus récentes (réduction de l'encombrement et du poids du générateur). Quel que soit le type de générateur utilisé, le réglage de l'intensité du courant de soudage est réalisé au moyen d'un circuit électronique qui hache le courant sinusoïdal d'origine. Le champ magnétique émis lors du passage de ce courant dans les conducteurs présente par conséquent une fréquence fondamentale égale à celle de ce courant originel et contient de nombreux harmoniques. Le niveau de champ dépend logiquement de la taille de la boucle de courant (cf. Figures 1 à 3 : pointillés rouges). Il décroît très fortement lorsqu'on s'éloigne du centre de la boucle.

Les machines de soudage par résistance peuvent être classées en trois catégories:

- machine à souder sur châssis (cf. Figure 1),
- pinces à transformateur intégré (cf. Figure 2),
- pinces à transformateur déporté (cf. Figure 3).

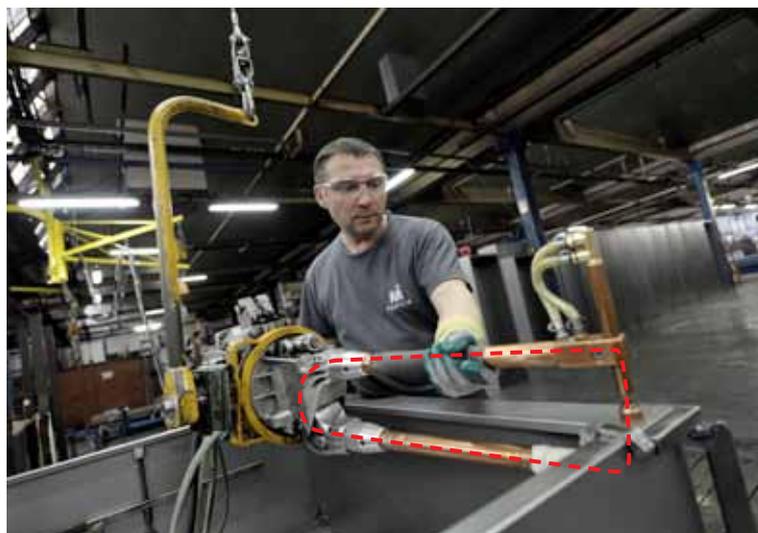
Afin d'évaluer l'exposition des travailleurs au champ magnétique émis par ces équipements de soudage par résistance, la norme européenne EN 50505 d'avril 2008 [3] décrit une méthode qui prend en compte la variation de la valeur de l'induction magnétique en fonction de la fréquence ainsi que le déphasage entre les harmoniques et la fréquence fondamentale.

Cette méthode s'appuie sur un dispositif de mesure



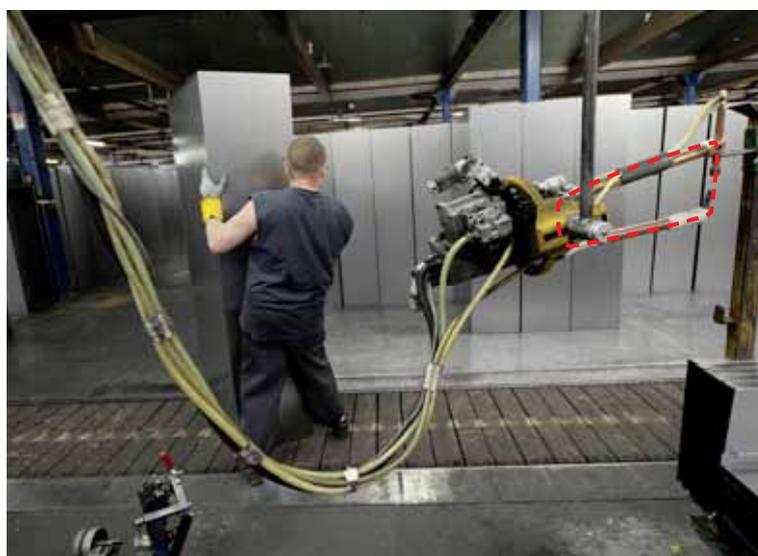
↑ FIGURE I Machine à souder sur châssis

© Patrick Delapierre pour l'INRS



↑ FIGURE II Pince à souder à transformateur intégré

© Gaël Kerbaol/INRS



↑ FIGURE III Pince à souder à transformateur déporté

© Gaël Kerbaol/INRS



MACEM (cf. Encadré 2). À l'aide d'un logiciel dédié, l'opérateur sélectionne une zone temporelle dans laquelle le signal est constant (cf. Figure 4), correspondant à l'une des trois phases de soudage (accostage, soudage et forgeage). La largeur de cette fenêtre dépend de la durée des trains d'impulsions. À partir de cet intervalle, et tel que le définit la norme EN 50505, l'application calcule la moyenne quadratique pour l'ensemble des trois axes et réalise la transformée de Fourier (FFT) du signal sélectionné. Ces calculs permettent d'obtenir l'amplitude et la phase du signal pour chaque composante spectrale.

Dans un second temps, l'opérateur sélectionne les principales composantes fréquentielles à prendre en compte dans le calcul de l'indice d'exposition. Il est préconisé (norme EN 50505) de prendre

en compte toutes les raies dont l'amplitude B_i est supérieure à 3% de $B_i \text{ max}$ (cf. Equation ci-dessous).

Une fois ces calculs effectués, le logiciel détermine un indice d'exposition R selon l'équation suivante:

$$R = [\sum B_i / BL_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \phi_i)] \quad (1)$$

où

- B_i est l'amplitude de l'induction magnétique pour la composante spectrale à la fréquence F_i ;
- BL_i est la valeur déclenchant l'action de l'induction magnétique à la fréquence F_i ;
- f_i est la fréquence de la composante spectrale considérée ($f_i < 10 \text{ MHz}$);
- θ_i est l'angle de phase de la composante spectrale à la fréquence f_i ;
- ϕ_i est l'angle de phase de la fonction de pondération à la fréquence f_i ;
- $\phi_i = \pi/2$ si $f_i \leq 820 \text{ Hz}$ et $\phi_i = 0$ si $f_i > 820 \text{ Hz}$.

Les valeurs réglementaires introduites dans l'application sont les valeurs déclenchant l'action basses fixées par la directive « Champs électromagnétiques » 2013/35/UE. Ces valeurs, relatives aux effets sensoriels, sont les plus sévères.

La valeur maximale R obtenue détermine l'indice d'exposition à retenir. Celui-ci doit être inférieur à 1 pour satisfaire aux valeurs de référence réglementaires. Si R est supérieur à 1, des mesures



© Gael Kerbaol/INRS

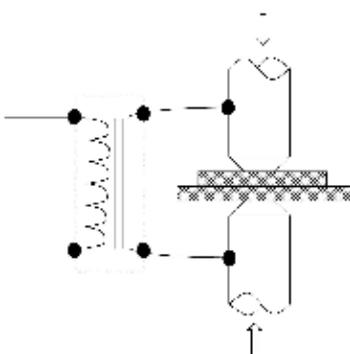
ENCADRÉ 1 LE SOUDAGE PAR RÉSTANCE

Le soudage par résistance est un procédé de soudage sans métal d'apport. Les pièces métalliques à souder sont positionnées l'une sur l'autre puis serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble est ensuite traversé par un courant intense qui provoque une forte élévation de température

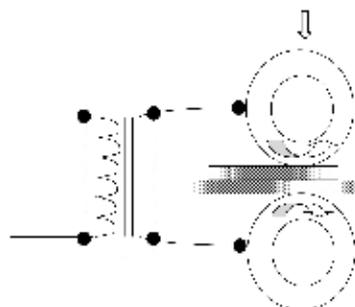
par effet Joule. Pendant le passage du courant électrique, si les deux surfaces en contact sont planes, il se forme à leur interface un noyau de matière en fusion. On distingue trois procédés de soudage par résistance:

- le soudage par points qui permet d'obtenir une soudure par recouvrement discontinue;

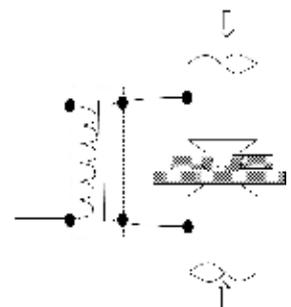
- le soudage à la molette qui permet d'obtenir une soudure par recouvrement continue étanche;
- le soudage par bossage (des bossages ou protubérances sont préparés sur l'une des pièces aux emplacements des points de soudure; les électrodes sont plates).



Soudage par point



Soudage à la molette



Soudage par bossage

ENCADRÉ 2

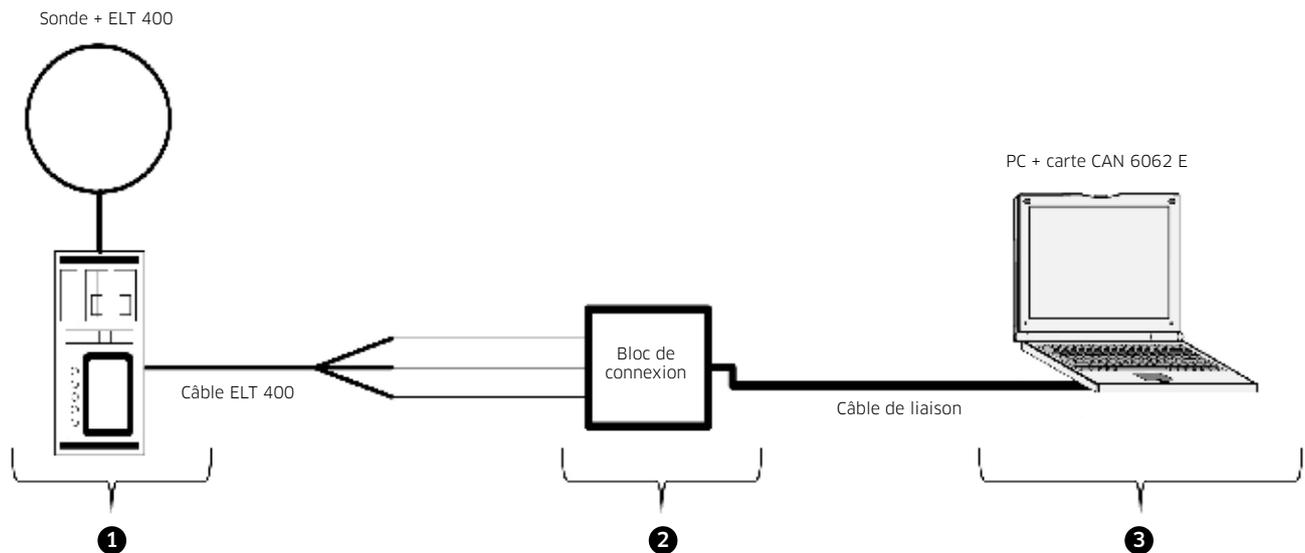
LA CHAÎNE DE MESURE MACEM

La chaîne de mesure MACEM, utilisée pour évaluer l'exposition aux champs magnétiques pulsés a été développée par le Centre interrégional de mesures physiques de l'Ouest. Elle se compose des matériels suivants:

- un champ-mètre de marque Narda, type ELT400 étalonné, équipé d'une sonde « champ magnétique 100 cm²» dont la bande passante s'étend jusqu'à 400 kHz;
- une carte d'acquisition National Instrument référence DAQCard-

6062^E. Celle-ci numérise les trois sorties analogiques du champ-mètre ELT400 à une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz;

- un ordinateur PC portable avec slot PCMCIA équipé du logiciel.



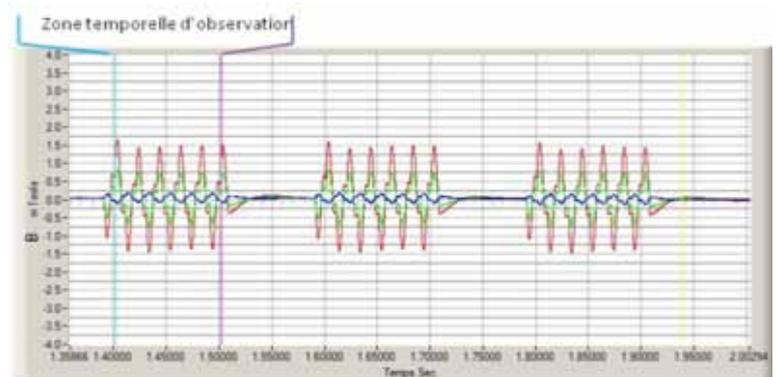
doivent être engagées par l'employeur pour permettre d'éliminer ou de réduire les risques [4, 5]. Au sein de ce dispositif, une carte d'acquisition restitue l'évolution temporelle du niveau d'induction magnétique au point de mesure dans les trois directions de l'espace.

Afin d'obtenir une idée plus précise des risques rencontrés par les salariés en fonction des dispositifs de soudage utilisés, des mesures de champ magnétique (induction) ont été effectuées sur plusieurs postes de travail, au niveau de l'abdomen des opérateurs, avec la chaîne de mesure MACEM par les Centres de mesures physiques des Carsat/CRAM et l'INRS. Au total, 126 soudeuses en production ont été investiguées. Elles se répartissaient de la façon suivante: 34 presses à souder sur châssis, 47 pinces à souder à transformateur déporté et 45 pinces à souder à transformateur intégré. Pour chacune des soudeuses, nous avons calculé l'indice d'exposition R en prenant pour référence les VA définies par la directive européenne 2013/35/UE.

Les résultats des calculs de l'indice d'exposition en fonction du type de soudeuses sont donnés sur les Figures 5, 6 et 7. Le pourcentage de valeurs de l'indice d'exposition supérieures à 1 est respectivement de 32% pour les soudeuses sur châssis

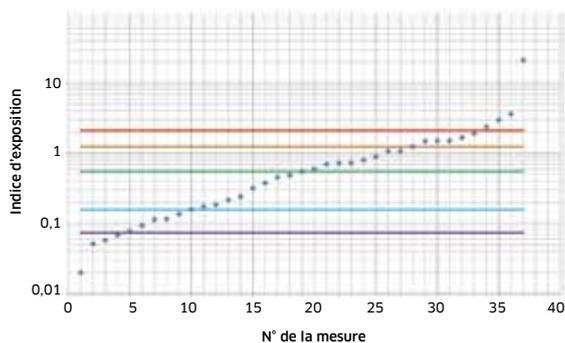
fixe, de 60% pour les soudeuses à transformateur déporté et 62% pour les soudeuses à transformateur intégré. Sur chaque figure, nous avons tracé en violet la droite correspondant à la valeur du 10^e centile, en bleu à la valeur du 25^e centile, en vert à la valeur du 50^e centile (valeur médiane), en orange à la valeur du 75^e centile et en rouge à la valeur du 90^e centile. Les valeurs correspondantes sont rappelées dans les tableaux adjacents aux différentes représentations graphiques.

L'examen des résultats montre que la plage de variation de l'indice d'exposition est nettement plus



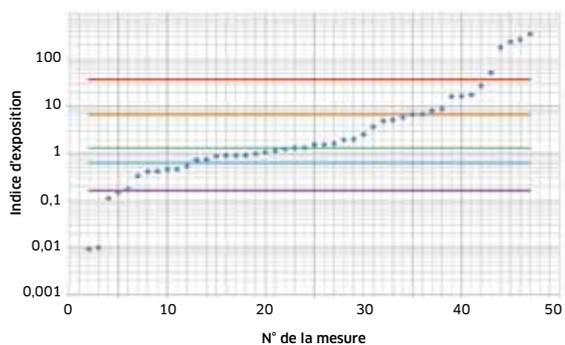
↑ FIGURE IV Analyses temporelles des signaux suivant trois axes

10 ^e centile	0,07
25 ^e centile	0,16
50 ^e centile	0,55
75 ^e centile	1,25
90 ^e centile	2,11



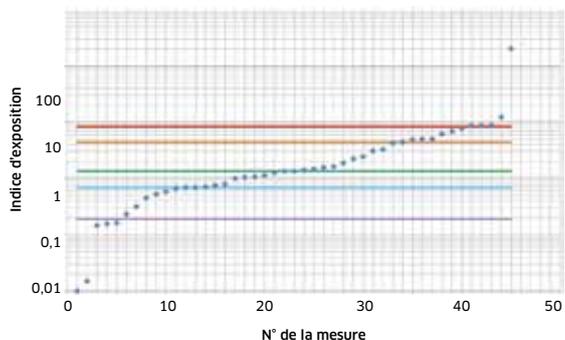
↑ FIGURE V Distribution de l'indice d'exposition aux postes de travail des machines à souder par résistance sur châssis

10 ^e centile	0,2
25 ^e centile	0,6
50 ^e centile	1,3
75 ^e centile	6,7
90 ^e centile	36,8



↑ FIGURE VI Distribution de l'indice d'exposition aux postes de travail des machines à souder à transformateur déporté

10 ^e centile	0,2
25 ^e centile	0,7
50 ^e centile	1,3
75 ^e centile	4,4
90 ^e centile	8,4



↑ FIGURE VII Distribution de l'indice d'exposition aux postes de travail des machines à souder à transformateur intégré

faible sur les machines à souder sur châssis que sur les machines à transformateur déporté ou intégré. Ce résultat est dû à la position mieux maîtrisée de l'opérateur par rapport à la machine (électrodes et boucle de courant).

Cette plage de variation est plus importante sur les pinces manuelles (transformateur intégré ou déporté) que sur les machines fixes du fait d'une très faible distance entre les électrodes, le câble d'alimentation et le corps de l'opérateur.

L'indice d'exposition est très élevé pour un nombre important de situations de travail avec une pince à transformateur déporté puisque le corps de l'opérateur est placé très fréquemment dans la boucle de courant et le câble d'alimentation de la pince est souvent très proche du corps du travailleur. Pour les pinces à transformateur intégré, l'exposition maximale est moindre puisque le corps de l'opérateur n'est plus dans la boucle de courant et les contacts avec le câble exposent moins.

Conseils de prévention

Certaines conditions d'utilisation permettent de diminuer la valeur du champ magnétique aux postes de soudage par résistance. Il est ainsi préférable :

- d'utiliser des transformateurs intégrés récents utilisant des générateurs plus légers travaillant entre 1 et 4 kHz, qui permettent de réduire fortement l'exposition du travailleur ;
- de choisir des pinces à souder équipées de câbles bipolaires à torons torsadés à des câbles unipolaires ;
- d'éviter la présence (totale ou partielle) de l'opérateur dans l'axe de la boucle de soudage ;
- de maintenir toutes les parties du corps de l'opérateur, le plus éloigné possible des électrodes et porte-électrodes. ●

Remerciements

Cette étude a été réalisée en collaboration avec l'ensemble des agents des Centres de mesures physiques des Carsat/CRAM pour la réalisation des mesures en entreprise.

BIBLIOGRAPHIE

[1] DIRECTIVE 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).

[2] DEMARET P., DONATI P. Intégrer

le risque « rayonnements électromagnétiques » dans le document unique d'évaluation des risques professionnels - INRS, Hygiène et sécurité du travail, 225, ND 2350, 2011.

[3] EN 50505 (01/04/2008), Norme de base destinée à l'évaluation de l'exposition

humaine aux champs électromagnétiques émanant du matériel de soudage par résistance et des techniques connexes.

[4] EXPOSITION DES TRAVAILLEURS AUX RISQUES DUS AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES. Guide d'évaluation des risques, INERIS

et INRS, Editions INRS, ED 6136, 2013.

[5] CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES: FICHES PRATIQUES, INRS, ED 4200 à 4217.