

RÉDUCTION DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE DES SOUDEUSES HAUTE FRÉQUENCE DE CONCEPTION ANCIENNE A L'AIDE D'UN PATIN DE MASSE

- Soudage
- Haute fréquence
- Conception
- Champ électromagnétique
- Mesure
- Courant induit

► Raymond KLEIN, INRS, département Ingénierie des équipements de travail

REDUCING ELECTROMAGNETIC RADIATION FROM HIGH-FREQUENCY WELDING MACHINES OF OLD DESIGN USING A GROUNDING PAD

High-frequency welding machines or presses based on the dielectric loss principle are used for manufacturing insulating polymer products. These manual welding operations are essentially performed on welding machines designed for large pieces. They require constant presence of one or even two operators, who, on machines of old design, are exposed to an electric field exceeding the limits recommended by European Directive 2004/40/CE. On the other hand, measurements taken on new machines fitted with a so-called "grounding pad" device showed that the level of operator exposure remains below the recommended limit values. A similar device was installed on old machines during overhaul. The purpose of this paper is to detail the conditions to be met for achieving acceptable electric field reduction performance with a "grounding pad", irrespective of the welding machine usage conditions.

- Welding
- High frequency
- Design
- Electromagnetic field
- Measurement
- Induced current

Les soudeuses ou presses haute fréquence fonctionnant sur le principe des pertes diélectriques sont utilisées dans la fabrication de produits à base de polymères isolants. Ces opérations de soudage sont essentiellement manuelles sur les soudeuses destinées aux grandes pièces. Elles nécessitent la présence constante d'un, voire deux, opérateurs qui, sur les machines de conception ancienne, sont exposés à un niveau de champ électrique supérieur aux limites recommandées par la directive européenne 2004/40/CE. Par contre, les mesures effectuées aux postes de travail de machines neuves équipées d'un dispositif appelé « patin de masse » ont montré que le niveau d'exposition des opérateurs se situait en dessous des valeurs limites préconisées. Un dispositif analogue a été installé sur des machines anciennes en cours de rénovation. L'objectif de cet article est de préciser les conditions à remplir pour obtenir avec un « patin de masse » une performance de réduction du champ électrique acceptable quelles que soient les conditions d'utilisation de la soudeuse.

DES SOUDEUSES ANCIENNES TRÈS RAYONNANTES

Les soudeuses haute fréquence fonctionnant sur le principe des pertes diélectriques, communément appelées presses haute fréquence (HF), sont utilisées dans la fabrication de produits à base de polymères isolants (emballages, articles de papeterie, de loisirs, de sport...). En France, on estime leur nombre entre 4 000 et 5 000 unités. Il s'agit d'un générateur transformant l'énergie primaire du secteur 50 Hz en

énergie haute fréquence à 27,12 MHz. Cette énergie est dissipée sous forme de chaleur dans le matériau soumis simultanément à une pression, ce qui permet le soudage [1 - 3]. Ce procédé a l'avantage de ne nécessiter aucun produit d'apport. Cependant, un rayonnement électromagnétique, résultant de leur principe de fonctionnement, est émis par ces soudeuses notamment par l'applicateur d'énergie HF, communément appelé électrode.

Les opérations de soudage, manuelles sur certains types de soudeuses, nécessitent la présence constante d'un voire deux opérateurs affectés à la machine

comme le montre la *Figure 1*. Si des précautions ne sont pas prises, les nombreux mesurages effectués par les Centres de mesures physiques (CMP) des CARSAT et l'INRS [4] ont montré que le champ électrique peut exposer l'opérateur au poste de travail à des niveaux dépassant les valeurs déclenchant l'action fixées par la directive « agents physiques – champs électromagnétiques » [5] (cf. *Tableau 1*). Des valeurs d'intensité de champ de plusieurs centaines de V/m sont encore couramment relevées. Mais la plupart des soudeuses de conception ancienne actuellement en service ne disposent d'aucun moyen technique de réduction du niveau d'émission électromagnétique.

Rappelons qu'en matière de santé et de sécurité, la directive « *Utilisation des équipements de travail* » stipule que l'employeur doit prendre les mesures appropriées pour minimiser les risques [6]. Rappelons également que la réduction de l'émissivité des soudeuses conduit à prévenir les dysfonctionnements de systèmes électroniques de machines, généralement situées dans l'environnement immédiat de la soudeuse, qui peuvent subir des perturbations électromagnétiques, rayonnées ou injectées dans les câbles. Ces dysfonctionnements peuvent se traduire par des mouvements intempestifs, voire dangereux des machines concernées [7].

Le champ électrique constitue la composante dominante du champ électromagnétique émis par la soudeuse. Il est essentiellement dû au champ électrique intense créé par l'électrode dans la portion du matériau à souder comprise entre son côté inférieur et la table. Ce champ est nécessaire pour l'obtention d'une soudure correcte, l'énergie calorifique développée étant proportionnelle au carré de l'intensité du champ électrique. Les courants HF circulant dans les parties métalliques de la soudeuse constituent la seconde cause d'émission du champ électromagnétique la transformant ainsi partiellement en une source d'émission.

La solution répondant le mieux à ce problème de prévention consisterait à renouveler le parc de machines anciennes par des machines de conception récente. Mais il est fréquent de rencontrer des machines de 20 à 30 ans d'âge qui continuent à répondre aux besoins de leurs utilisateurs car elles sont fiables et aisément maintenables. Ces derniers préfèrent les conserver plutôt que de réinvestir.

FIGURE 1

Poste de travail sur une soudeuse à bâches de conception ancienne

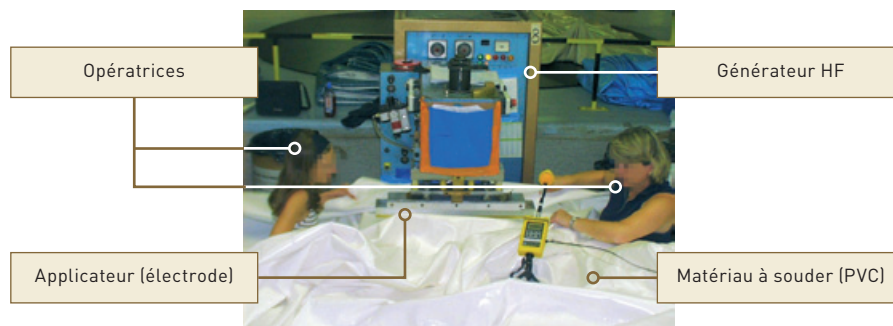


TABLEAU 1

Valeurs d'action à 27,12 MHz fixées par la directive 2004/40/CE

Valeurs d'action à 27,12 MHz	
Intensité de champ électrique E*	61 V/m
Densité de puissance surfacique S _{EQ} * (onde plane**)	40 W/m ²
Courant dans les extrémités I _L *	100 mA
Courant de contact I _c	40 mA

*Ces trois grandeurs d'exposition sont à mesurer sur une période de 6 minutes et sont pondérées par le temps si la durée d'exposition est inférieure à cette période.

**La longueur d'onde (≈ 10 m) est telle que les mesures au poste de travail se font en zone proche dans laquelle l'onde plane n'est pas formée.

Le champ émis par les soudeuses traitant des produits de petites dimensions peut être considérablement réduit à l'aide de blindages métalliques entièrement fermés confinant le rayonnement électrique dans un volume contenant à la fois l'électrode et le produit soudé. Ces blindages, aisément réalisables, se rencontrent sur les soudeuses de ce type, qu'elles soient de conception ancienne ou récente [8, 9].

Cependant, un confinement électromagnétique « parfait » n'est pas réalisable pour des soudeuses traitant des produits de grandes dimensions tels que des bâches, des liners de piscine, des tentes... Ces dernières, quand elles sont de conception récente, sont dotées d'une solution alternative de réduction du champ appelée « patin de masse » ; il s'agit d'une plaque appliquée sur la table favorisant le retour du courant vers le générateur. Les mesures ont montré l'efficacité de ce dispositif à réduire le niveau d'émission des soudeuses neuves, donc le niveau d'exposition de l'opérateur. Ces résultats ont amené certains rénovateurs de presses HF anciennes à installer de façon empirique un patin de masse sur ces machines. L'objectif de cet article est d'en comprendre le fonctionnement et de préci-

ser les conditions à remplir pour obtenir une performance acceptable de réduction quelles que soient les conditions d'utilisation de la presse HF.

RAPPEL SUR LA DIRECTIVE « CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES »

Cette directive préconise des valeurs limites d'exposition et des valeurs d'action en fonction de la fréquence. Les valeurs limites à ne pas dépasser sont fondées sur les résultats des travaux de l'ICNIRP [10]. La notion de valeurs d'action a été édictée de façon à pouvoir mesurer aisément les facteurs physiques d'exposition à l'extérieur du corps humain à savoir : l'intensité de champ électrique, la densité de puissance surfacique, le courant aux extrémités des membres résultant du courant induit dans le corps de l'opérateur et le courant de contact lorsque l'opérateur touche une partie de la machine.

FIGURE 2

Machine neuve équipée d'un patin de masse (réalisation Matrelec)



FIGURE 3

Deux machines anciennes identiques, sans patin et après installation d'un patin (réalisation Pénicot/Forsstrom)

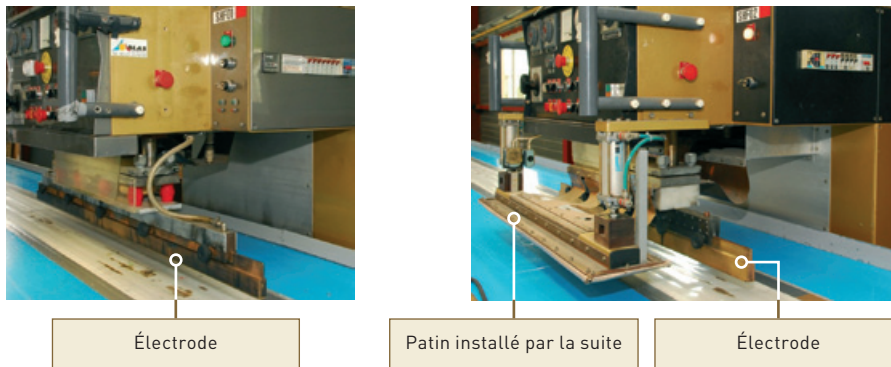


TABLEAU II

Intensités de champ électrique avant et après installation de patins

	Intensité de champ électrique non pondéré par le temps (V/m)	
	Avant installation du patin	Après installation du patin
Soudeuse N°1	137	36
Soudeuse N°2	500	90

COMPARAISON DES INTENSITÉS DE CHAMP MESURÉES SUR SOUDEUSES SANS ET AVEC PATIN DE MASSE

MACHINES NEUVES

Les mesurages d'exposition aux champs électromagnétiques effectués par les CARSAT et l'INRS aux postes de travail de machines neuves et puissantes ont permis de constater d'une part, qu'elles étaient systématiquement équipées de patin de masse et d'autre part, que les valeurs d'action (cf. *Tableau I*) n'étaient plus dépassées. La

Figure 2 présente une soudeuse neuve équipée d'un patin de masse.

Des mesures effectuées à un poste de travail ont montré qu'une machine neuve d'une puissance nominale de 20 kW fonctionnant à 1/2 régime exposait l'opérateur à une intensité maximale de champ électrique de 104 V/m. Pour ce poste, la pondération par le facteur temps (moyennage sur 6 minutes) applicable donnait une valeur d'exposition de 29V/m, ce qui est inférieur à la valeur d'action de 61 V/m.

MACHINES ANCIENNES

La *Figure 3* montre deux soudeuses quasi identiques, l'une sans patin, l'autre après l'installation d'un patin dont la

constitution et le principe de fonctionnement sont décrits dans le chapitre 3.

Des mesures ont également été effectuées aux postes de travail de soudeuses dépourvues de patin de masse à l'origine et qui en ont été équipées par la suite [11]. Les résultats des mesures ont montré l'efficacité réelle de ce dispositif comme le montre le *Tableau II*.

L'installation du patin de masse a eu également pour effet de supprimer les dysfonctionnements d'une découpeuse de toile pilotée par un système électronique implantée à une dizaine de mètres de la soudeuse. Cette constatation montre que le patin de masse permet également de réduire l'intensité de champ électrique lointain.

MACHINE DE LABORATOIRE

Une étude a été effectuée en laboratoire en utilisant une soudeuse de conception ancienne, représentative de celles rencontrées en exploitation. Cette machine a été équipée d'un patin de masse dont on a fait varier certaines de ces caractéristiques. Les résultats des mesures ont montré une réelle efficacité en matière de réduction de l'émission électromagnétique. L'intensité de champ électrique a pu être réduite de 300 V/m à 20 V/m pour une configuration précise, ce qui montre le potentiel de réduction apportée par un patin de masse. La *Figure 4* montre la soudeuse du laboratoire équipée avec un patin de masse.

En conclusion, la performance de réduction de l'émission électromagnétique obtenue par les patins de masse équipant les machines neuves ou installés par la suite sur des machines anciennes conduit à préconiser l'installation de ce dispositif sur les machines anciennes quand leurs utilisateurs ne prévoient pas de les remplacer par des machines neuves.

DESCRIPTION D'UN PATIN DE MASSE

ÉLÉMENTS MÉCANIQUES

Le patin de masse est constitué d'une plaque métallique en aluminium ou en cuivre dont la longueur est, dans

la plupart des cas, égale à celle de l'électrode et la largeur d'environ 15 à 20 cm. Ces dimensions sont déterminées de façon à obtenir une valeur de capacité électrique patin/table suffisamment grande pour éviter un échauffement du matériau sous le patin. L'épaisseur de la plaque n'a pas grande importance sur le plan électromagnétique. La plaque peut être entièrement rigide ou être constituée par un clinquant souple lui-même fixé sur un support rigide. Dans ce dernier cas, un matériau souple tel que de la mousse est intercalé entre le support rigide et le clinquant.

Cette plaque métallique est disposée parallèlement à l'électrode de la soudeuse à quelques cm de cette dernière. Cette distance a peu d'importance sur le plan électromagnétique. Pendant la phase de soudage, la plaque est appliquée directement sur la table de la soudeuse ou dans la plupart des cas, sur le matériau par deux vérins pneumatiques. Le dessous de la plaque est entièrement recouvert d'un matériau diélectrique qui sert à la fois à fixer la valeur de la capacité patin/table et à éviter que la plaque métallique ne dégrade le matériau à souder.

L'appellation « patin de masse » est due à la constitution du dispositif (semelle rectangulaire rigide ou souple) que l'on applique sur la table métallique de la soudeuse (masse).

La *Figure 5* schématise les éléments d'un patin de masse.

La *Figure 6* illustre deux exemples de réalisation d'un patin.

La *Figure 7* montre les deux vérins pneumatiques exerçant une poussée verticale sur la plaque rigide pour la maintenir appliquée sur le matériau à souder. Bien que la poussée ne soit pas aussi importante que celle requise pour actionner l'électrode, le patin doit être suffisamment robuste.

LIAISONS ÉLECTRIQUES

La plaque métallique rigide ou le clinquant souple disposé sous le patin (cf. *Figure 5*) sont reliés au circuit HF de la soudeuse en des points fixes par des clinquants assurant les liaisons électriques entre le patin et le circuit de retour HF (cf. *Figure 8*). Ces derniers doivent être souples pour tenir compte du mouvement de montée et de descente du patin.

FIGURE 4

Poste de travail sur une soudeuse à bâches de conception ancienne

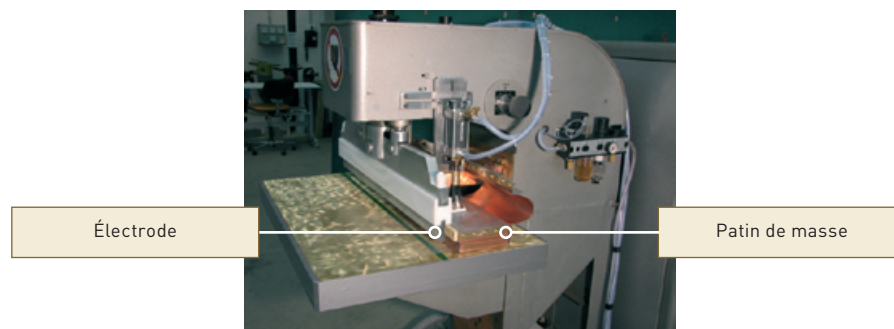


FIGURE 5

Schémas relatifs à la constitution d'un patin de masse

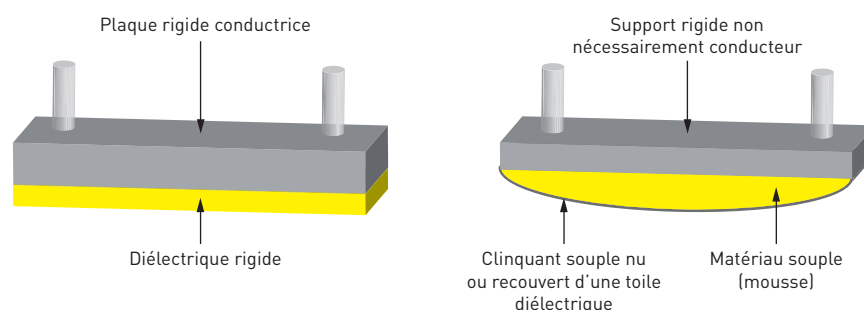


FIGURE 6

Exemples de réalisation de patin de masse (réalisation HFTI à gauche et Intec à droite)

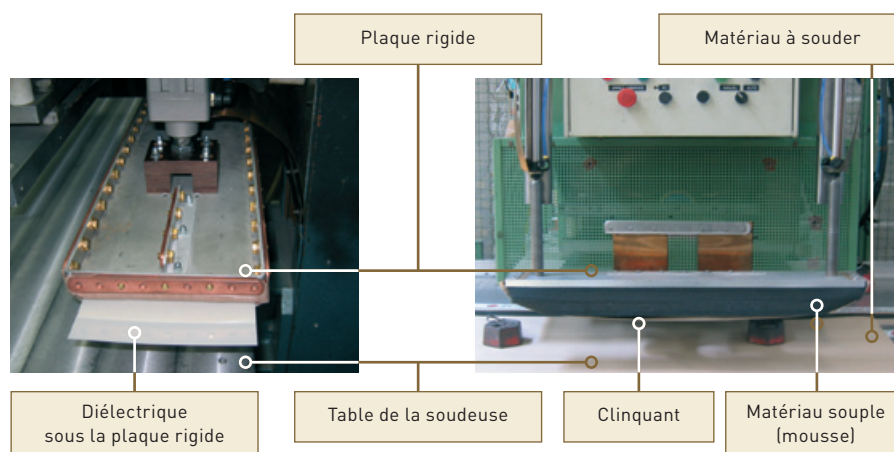


FIGURE 7

Vérins actionnant le patin de masse

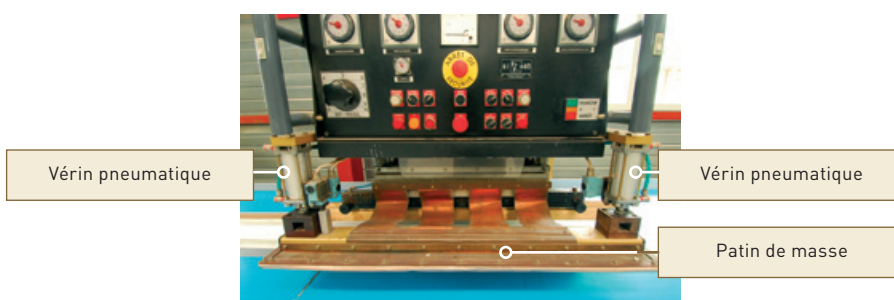
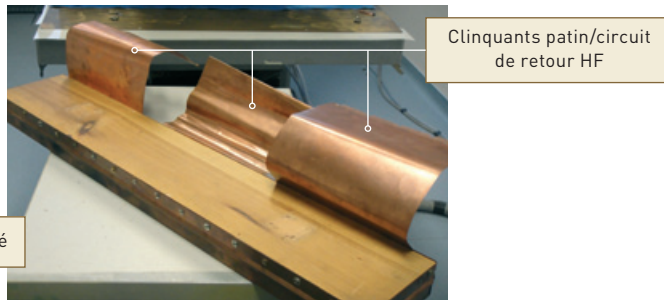


FIGURE 8

Liaisons électriques entre le patin et le circuit de retour HF

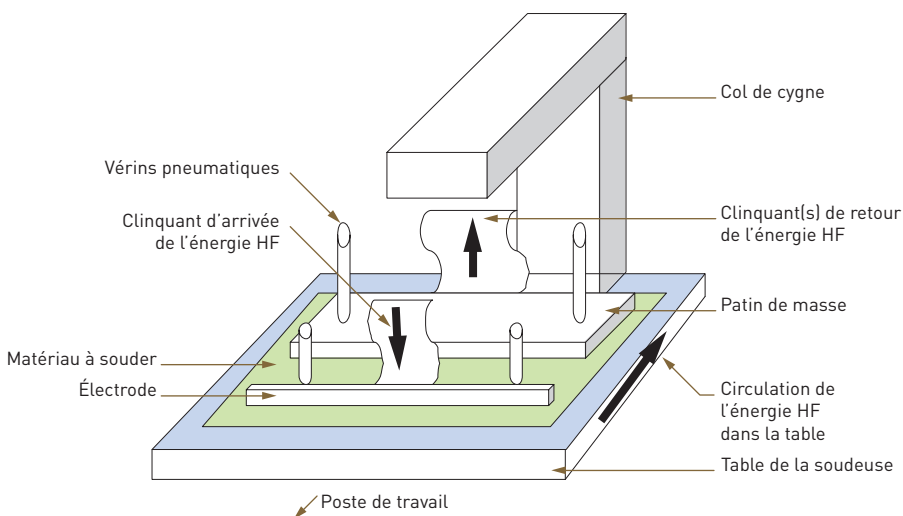


Patin de masse démonté

Clinquants patin/circuit de retour HF

FIGURE 9

Schéma d'implantation à l'arrière de l'électrode du patin de masse sur la soudeuse



Vérins pneumatiques

Clinquant d'arrivée de l'énergie HF

Matériau à souder

Électrode

Col de cygne

Clinquant(s) de retour de l'énergie HF

Patin de masse

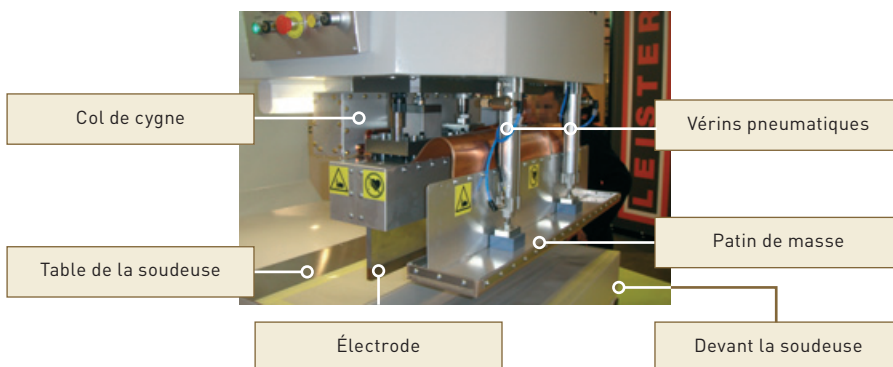
Circulation de l'énergie HF dans la table

Table de la soudeuse

Poste de travail

FIGURE 10

Patin de masse implanté sur le devant de la soudeuse



Col de cygne

Vérins pneumatiques

Table de la soudeuse

Patin de masse

Électrode

Devant la soudeuse

IMPLANTATION MÉCANIQUE SUR LA SOUDEUSE

Le patin est implanté parallèlement à l'électrode et généralement entre cette dernière et le col de cygne comme le montrent les *Figures 4 et 9*. Cette disposition permet de visualiser correctement le soudage du

matériau lorsque l'opérateur se trouve devant la table de la soudeuse.

Certaines soudeuses de grandes dimensions sont équipées d'un patin de masse implanté sur le devant de l'électrode faute de place entre le col de cygne et l'électrode (*cf. Figure 10*).

INTÉGRATION DU PATIN DANS LE CYCLE DE FONCTIONNEMENT DE LA SOUDEUSE

Après avoir positionné le matériau à souder, l'opérateur déclenche le cycle de soudage qui comprend les phases suivantes :

- descente de l'électrode et appui sur le matériau,

- descente et appui du patin par les deux vérins pneumatiques. La pression exercée est nettement plus faible que celle exercée par l'électrode. Le patin est généralement en contact avec le matériau à souder. Il peut être en contact avec le métal constituant la table,

- soudage du matériau. L'énergie HF est appliquée pendant 5 à 15 secondes environ après une légère temporisation en fin de descente,

- remontée du patin de masse puis de l'électrode.

Le réglage de la soudeuse est effectué avec le patin appliqué ce qui nécessite son application manuelle ou automatique pour l'obtention d'une soudure correcte. Sur les machines neuves, l'application de l'énergie HF est asservie à la descente complète du patin.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

CIRCUITS DE RETOUR DU COURANT HF DANS LES MASSES MÉTALLIQUES AVANT L'IMPLANTATION D'UN PATIN

Le schéma de la *Figure 11* montre les différentes voies de retour du courant HF généré par l'électrode et la masse électrique formée par la table métallique. Cette dernière est solidaire du bâti constitué lui-même de l'ensemble des masses métalliques.

MODIFICATION DE LA RÉPARTITION DES COURANTS HF CIRCULANT DANS LES MASSES MÉTALLIQUES

La *Figure 12* schématise la circulation du courant HF entre l'électrode et le patin de masse.

Les mesures effectuées en laboratoire (*cf. Figure 13*) ont montré que l'intensité du champ émis était minimale à

la résonance du circuit formé par la capacité C_p de l'ensemble patin-table et de l'inductance L_p du clinquant de retour, c'est-à-dire lorsque le produit $L_p C_p \omega^2$ se rapproche de 1. Dans ce cas, l'impédance du circuit est minimale et ce dernier est parcouru par un courant HF d'intensité maximale. Comme le clinquant du patin est relié directement au circuit de retour de l'énergie HF vers le générateur, un maximum de courant emprunte donc le trajet le plus court, ce qui lui évite de circuler dans les autres parties métalliques de la soudeuse. Dans la plupart des cas, cette condition n'est pas strictement remplie car la capacité par le patin/table n'est pas constante et dépend des caractéristiques du matériau soudé intercalé entre les plans du patin et de la table.

La Figure 13 montre la variation mesurée de l'intensité de champ rayonné en fonction de la capacité C_p patin/table pour deux patins de largeur 12 et 17 cm reliés au circuit de retour par trois clinquants identiques. La variation de la capacité a été obtenue en retranchant ou en ajoutant des couches de diélectrique sous le patin. L'inductance du clinquant a été obtenue par calcul ($L_p = 0,06/3 \mu\text{H}$), la capacité patin/table a été mesurée avec un capacimètre.

RÉDUCTION DE L'INTENSITÉ DU CHAMP ÉLECTRIQUE ÉMIS PAR LA SOUDEUSE

Le patin de masse ne pouvant pas réduire l'intensité de champ électrique émis par l'électrode, il n'agit donc pas directement sur la source principale d'émission. Son rôle est de créer un champ électrique en opposition de phase avec celui émis par l'électrode et d'amplitude suffisante.

Le schéma de la Figure 14 montre que si le courant de retour I_M par les masses métalliques est négligeable devant les courants I_E et I_P traversant les clinquants électrode et patin, ces derniers sont pratiquement égaux et il a été aisément vérifié que les tensions U_E et U_P référencées par rapport à la table de la soudeuse, sont en opposition de phase. Les mesures effectuées en laboratoire ont vérifié que les tensions électrode/table U_E et patin /table U_P étaient du même ordre de grandeur et étaient effectivement en opposition de phase.

Ce déphasage varie peu en fonction de la capacité patin/table C_p lorsque L_p

FIGURE 11

Masses métalliques et voies de retour du courant HF

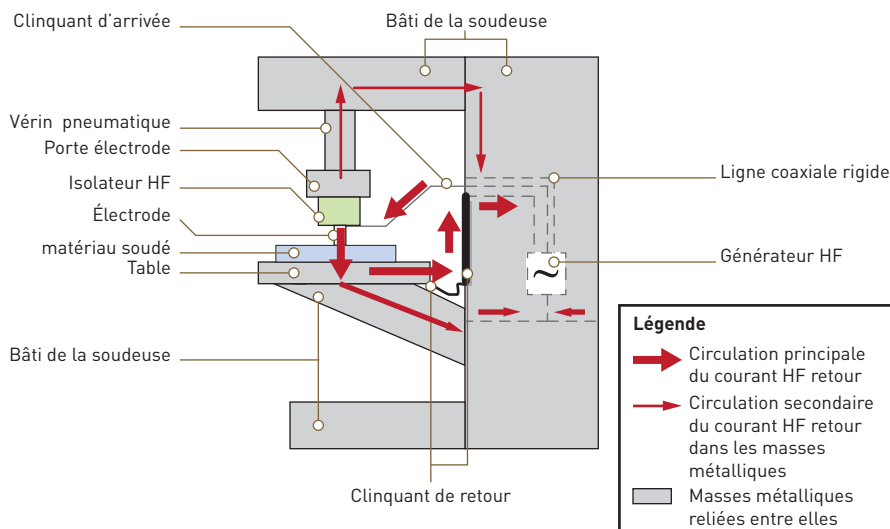


FIGURE 12

Circulation du courant HF entre l'électrode et le patin de masse

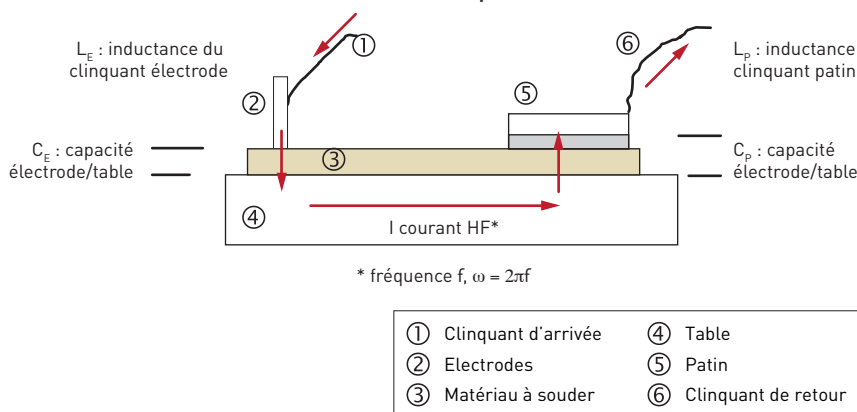
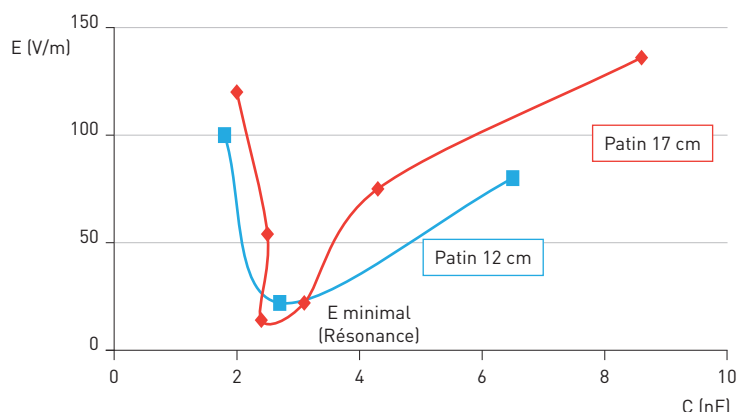


FIGURE 13

Variation de l'intensité de champ électrique rayonné en fonction de la capacité patin/table



est faible, c'est-à-dire lorsque le patin de masse est relié au circuit de retour par 3 clinquants. Il n'a pas été possible de vérifier et de mesurer le déphasage effectif entre les champs électriques émis par l'électrode et le patin de masse car nous ne disposons pas de l'instru-

mentation nécessaire. Cependant, il a été vérifié que le patin avait la possibilité d'émettre un champ électrique du même ordre de grandeur que celui émis par l'électrode en l'alimentant directement par le générateur et en déposant l'électrode.

FIGURE 14

Mesure des tensions électrode/table et patin/table

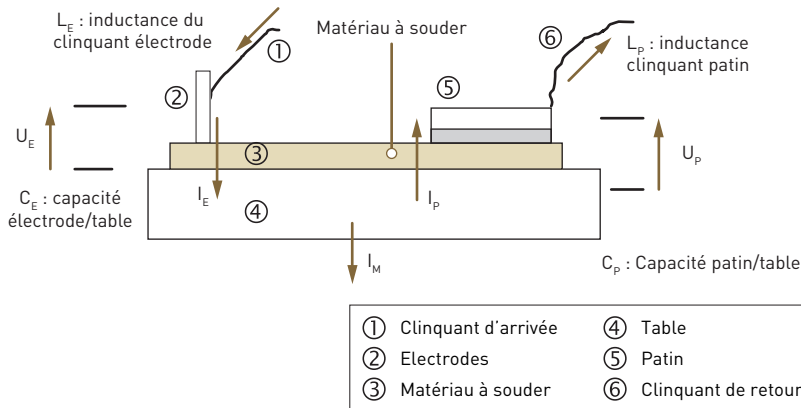


FIGURE 15

Clinquant supplémentaire patin/porte-électrode

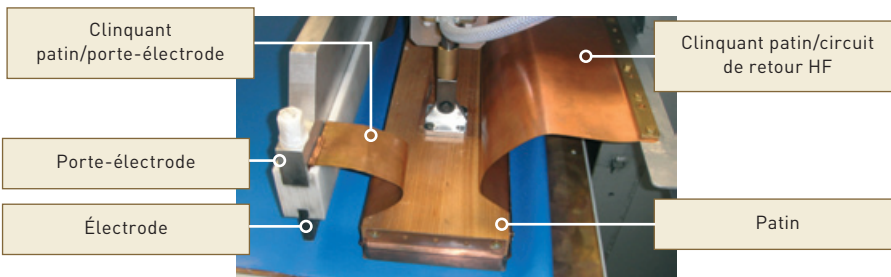
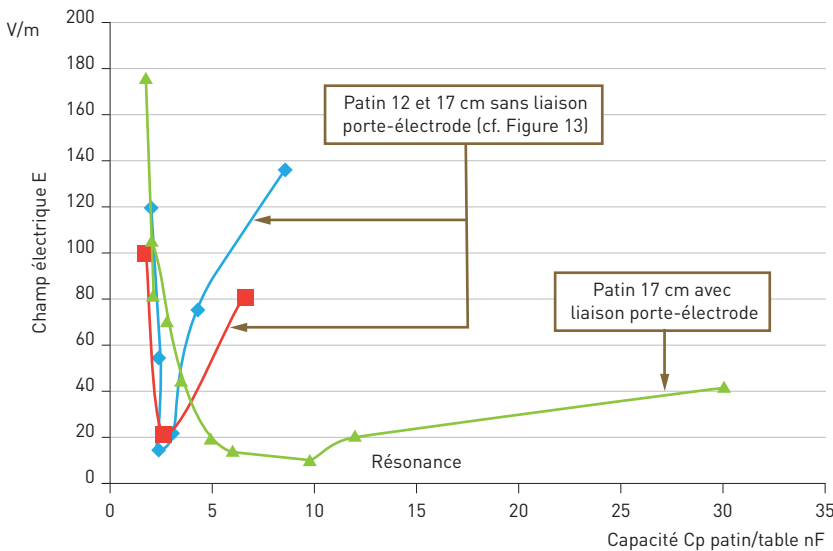


FIGURE 16

Variation de l'intensité de champ électrique rayonné en fonction de la capacité patin/table



OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DU PATIN

LARGEUR DU PATIN

Le champ électrique créé par le patin dans le matériau à souder et qui sert à

réduire l'intensité de champ émis par l'électrode provoque une dissipation thermique. Les schémas des Figures 12 et 14 montrent que le patin traversé par le courant HF peut se comporter comme une électrode. Ce comportement est indésirable car il pourrait conduire à la dégradation du matériau à souder. Il y a donc lieu de réduire l'intensité du champ électrique dans le matériau entre le patin

et la table. L'intensité de ce champ dépend de la tension patin/table U_p et de la distance d_p entre la base métallique du patin et le plan de la table selon la formule $E_p = kU_p/d_p$. Comme la distance patin/table dépend de l'épaisseur peu variable du matériau à souder, la seule solution consiste à réduire la tension patin/table U_p , tout en maintenant une intensité de champ électrique suffisamment grande pour continuer à atténuer celle du champ émis par l'électrode.

Le courant I traversant l'électrode et le patin doit être constant pour une qualité de soudure constante. Le générateur HF est donc équivalent à une source de courant I . La tension U_p est inversement proportionnelle à la capacité C_p du patin ($U_p = I/C_p\omega$), donc à courant I constant, il convient d'augmenter C_p et donc d'augmenter la surface S_p du patin ($C_p = kS_p/d_p$).

Une surface de patin trop faible conduit à un échauffement du matériau non désiré sous le patin de masse. Il faut donc trouver un compromis entre la distance d_p patin/table et la surface du patin pour à la fois créer un champ électrique d'intensité suffisamment élevée pour compenser celui émis par l'électrode et la surface du patin pour éviter un échauffement non désiré du matériau.

Comme le patin a une longueur généralement égale à celle de l'électrode, le seul paramètre que l'on peut optimiser est sa largeur qu'il convient d'augmenter.

Note : Le phénomène de résonance nécessite de diminuer L_p si C_p augmente. La solution consiste à augmenter le nombre de clinquants reliant le patin de masse au circuit de retour HF, ce qui a été fait sur les machines neuves.

LIAISON SUPPLÉMENTAIRE PATIN-PORTE ÉLECTRODE

Le porte-électrode est un élément métallique longiligne parallèle à l'électrode et proche de cette dernière. Il se produit donc un couplage entre ces deux éléments qui amène le porte-électrode à se comporter comme une antenne. En reliant les deux extrémités du patin au porte-électrode comme le montre la Figure 15, il a été constaté une réduction de l'intensité de champ rayonné par la soudeuse semblable à celle décrite ci-dessus.

FIGURE 17

Table isolée du bâti de la soudeuse

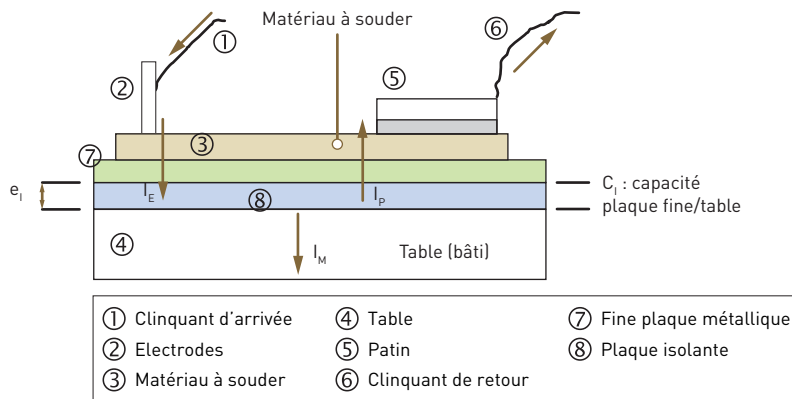


TABLEAU III

Effet des variations des paramètres du patin sur la valeur du champ électrique

Paramètre variable	Grandeur concernée	Résultat
Epaisseur/nature du diélectrique sous le patin	Capacité patin/table (C_p)	Emission électromagnétique minimale à la résonance ($L_p C_p \omega^2 = 1$)
Nombre de clinquants	Inductance liaison patin /masse (self L_p)	Idem
Largeur du patin	Capacité patin/table (C_p)	Idem
Clinquants porte électrode / patin de masse	Tension du porte-électrode / masse (V)	Réduction du niveau d'émission
Distance électrode/table	Impédance patin/électrode (Z)	Peu d'effet réducteur
Table isolée	Circuit de retour du courant HF (I_p)	Effet réducteur seulement si la distance plaque/table est optimisée

TABLEAU IV

Intensité du champ magnétique en fonction du champ électrique et de la présence ou non du patin

Intensité de champ électrique (V/m)	Intensité de champ magnétique (A/m)	Présence du patin
16	0,1	Avec
26	0,22	
300	0,2	Sans
214	0,14	

La Figure 16 présente la variation de l'intensité du champ électrique en fonction de la capacité patin/table C_p . La comparaison de l'allure de la courbe avec celle de la Figure 13 montre que la réduction de l'intensité de champ électrique est significative pour des capacités de patin C_p plus élevées. Par conséquent, l'effet réducteur du patin serait moins dépendant des caractéristiques (épaisseur, permittivité diélectrique) du matériau à souder. Ce résultat peut être interprété comme l'effet d'une liaison équipotentielle porte-électrode/circuit de retour de l'énergie HF via le patin.

Cette liaison constitue une inductance s'ajoutant en parallèle à celle reliant le patin au circuit de retour HF. L'inductance qui en résulte constitue un quasi court-circuit HF ne nécessitant pas une condition de résonance série aussi stricte qu'énoncée ci-dessus.

TABLE ISOLÉE DU BÂTI DE LA SOUDEUSE

Les paragraphes précédents ont montré l'intérêt à faire circuler le maximum de courant HF de retour dans le patin de masse. Cet effet s'obtient en

réduisant l'intensité du courant de retour I_M par les masses (cf. Figure 12). On favorise la réduction en insérant entre la table métallique du bâti de la soudeuse et le matériau à souder une fine plaque métallique puis en dessous une plaque d'isolant d'épaisseur e_1 (cf. Figure 17).

L'épaisseur e_1 de la plaque isolante ne doit pas être élevée (environ 5 mm) car l'écart entre la plaque métallique fine et la table de la soudeuse crée à son tour un champ électrique non désiré au poste de travail. Cette épaisseur ne doit pas non plus être trop faible car la capacité entre la plaque fine et la table C_1 serait trop élevée et l'isolation, donc la réduction du courant I_M serait insuffisante.

Le Tableau III synthétise l'effet des variations des paramètres du patin sur le niveau d'émission du champ électrique.

ACTION DU PATIN DE MASSE SUR L'INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Le champ magnétique H est créé par le courant haute fréquence I qui circule du générateur vers l'électrode, de l'électrode vers le patin et du patin par le circuit de retour vers le générateur. Ces éléments créent une boucle de courant dont les dimensions sont variables selon les types de soudeuses. Pour obtenir une qualité de soudure constante, il faut que le courant I traversant le matériau à souder reste le même avec ou sans patin. Le patin de masse ne doit donc pas agir sur l'intensité du courant I nécessaire au soudage. C'est pourquoi le patin de masse n'a aucun effet sur l'intensité du champ magnétique émis par la soudeuse. Ce résultat a été confirmé par des mesures effectuées avec et sans patin à l'aide du champmètre W&G type EMR 200 sonde H. Le Tableau IV donne les intensités du champ magnétique mesurées avec différentes configurations.

FIGURE 18

Vue d'ensemble du patin de masse installé sur une soudeuse ancienne

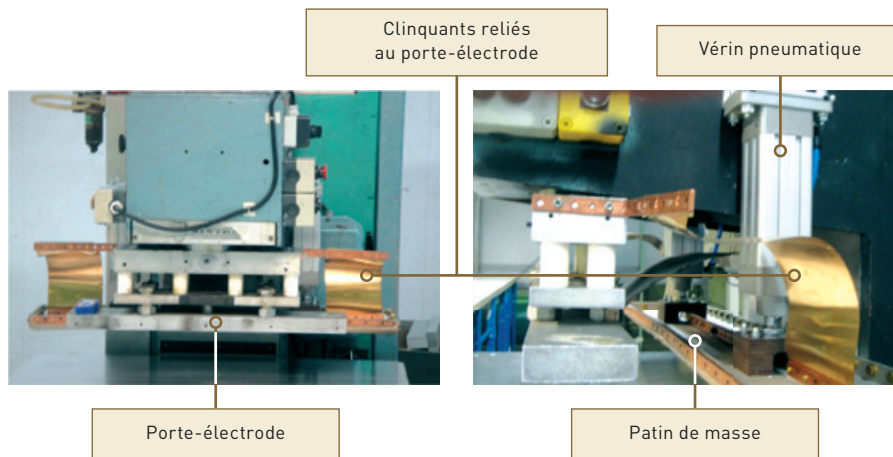


FIGURE 19

Vue d'ensemble du patin de masse installé sur une soudeuse ancienne

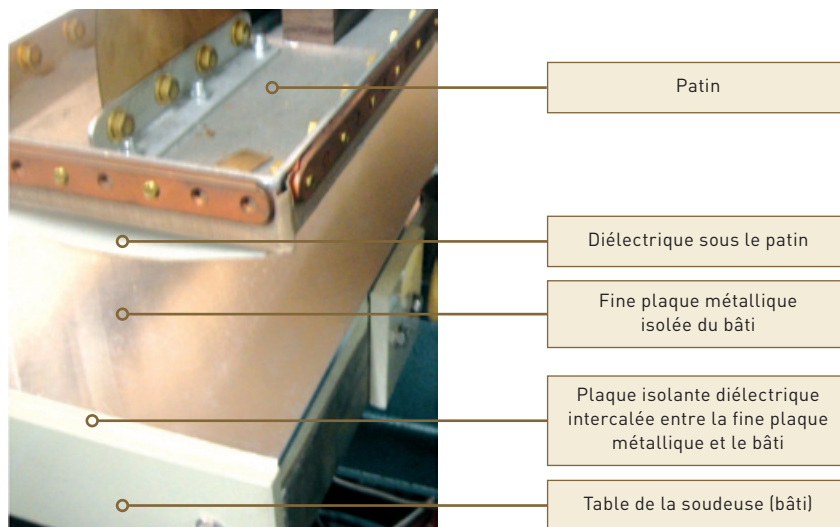
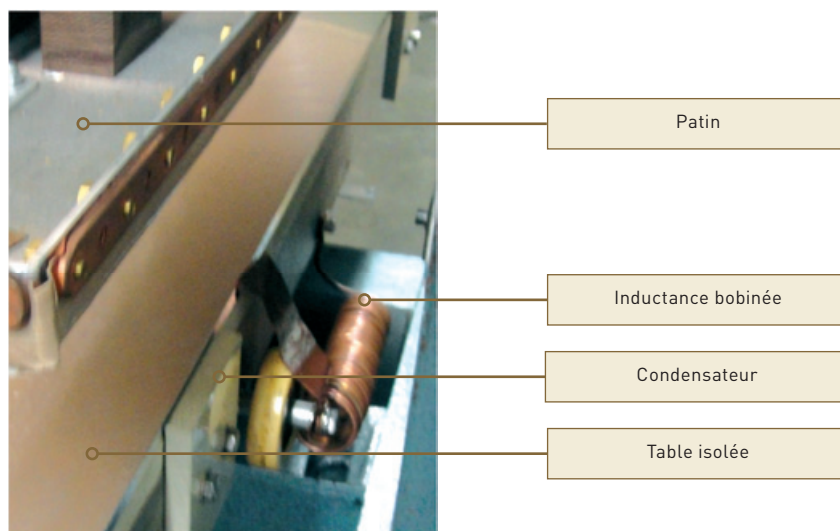


FIGURE 20

Filtre de rétablissement du circuit de détection de flash (réalisation HFTI)



INSTALLATION D'UN PATIN DE MASSE SUR UNE SOUDEUSE ANCIENNE EN EXPLOITATION

Afin de valider le principe du patin de masse et sa préconisation d'installation, une soudeuse en exploitation de conception ancienne (puissance HF 5 kW) a été équipée par la société HFTI conformément aux paragraphes précédents (cf. Figures 18 et 19). Cette machine est utilisée avec des électrodes et des matériaux à souder géométriquement variés, certains de grande taille. Cette soudeuse est donc utilisée dans un contexte de travail variable, ce qui nécessite un patin de masse capable de réduire l'intensité du champ au poste de travail pour un large éventail de situations.

Comme le patin a une longueur généralement égale à celle de l'électrode, le seul paramètre que l'on peut optimiser est sa largeur qu'il convient d'augmenter.

Note : pour protéger le tube du générateur contre les surintensités et ne pas brûler le matériau à souder, les soudeuses sont équipées d'un dispositif anti-flash qui coupe automatiquement la puissance HF dès qu'il y a une détection d'une variation du courant continu circulant entre l'électrode et le bâti. La plaque isolante que l'on a insérée entre le bâti et la plaque métallique fine empêchant la circulation de ce courant, il est nécessaire de rétablir ce circuit en reliant électriquement la plaque au bâti tout en bloquant l'énergie HF. Cela est réalisé à l'aide d'un filtre élémentaire passe-bas composé d'une inductance série bobinée et d'un condensateur parallèle (cf. Figure 20).

MESURE DES PERFORMANCES DE RÉDUCTION DE L'ÉMISSION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

INTENSITÉ DU CHAMP ÉLECTRIQUE

Des mesures d'intensité du champ électrique non pondérée par le facteur temps ont été effectuées par le CMP après l'installation du patin. Des mesures analogues avaient été effectuées avant la rénovation de la presse non équipée avec un patin dont l'intensité de champ électrique non pondérée atteignait 400 V/m au niveau du poste de travail. Dans un but de représentativité de situations réelles, ces mesures ont été effectuées avec deux matériaux à souder différents (PVC 10/10^{ème} et 1100 g), avec quatre électrodes de géométrie différente (cf. Figure 21), avec et sans matériau à souder entre le patin et la table. Le régime de fonctionnement de la soudeuse a été réglé pour obtenir une soudure de qualité acceptable par l'utilisateur. Lors de mesures avec un patin, on a constaté que la puissance HF débitée par le générateur était moins importante que celle nécessaire avant l'installation du patin.

La Figure 22 montre l'emplacement du point de mesure. Le champmètre utilisé était de marque PMM type 8053 A avec sonde EP300S.

Les Tableaux V et VI résument les résultats de mesure en donnant les valeurs extrêmes de l'intensité du champ électrique en fonction de la géométrie de l'électrode, de la nature du matériau à souder et de la présence ou non de matériau entre le patin et la table.

Ces résultats montrent que :

- le patin a un effet réducteur significatif de l'intensité du champ électrique pour toutes les configurations de soudage puisque l'on passe de 400 V/m à moins de 180 V/m non pondéré par le temps. La valeur d'action préconisée par la directive 2004/40/CE est de 61 V/m pondéré par le temps (moyennage sur 6 minutes). Bien que les temps de soudage soient inférieurs à 10 secondes, il est probable que l'intensité du champ électrique pondérée par le temps soit

FIGURE 21

Géométries d'électrodes utilisées pour les mesures d'intensité de champ

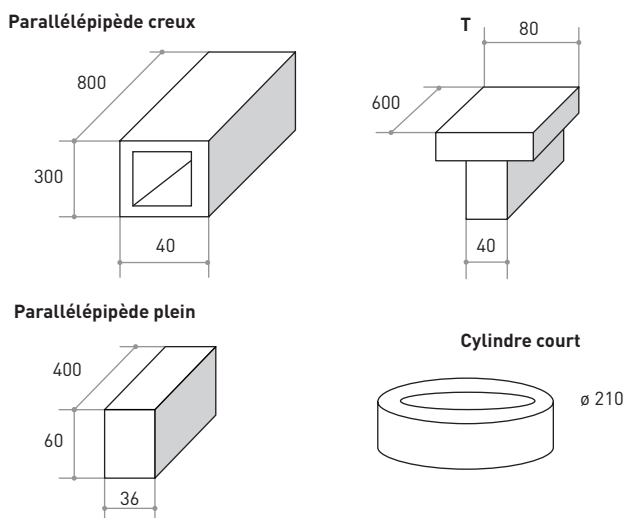


FIGURE 22

Mesure de l'intensité du champ électrique au poste de travail



supérieure d'environ 50 % à cette valeur d'action lors de certaines opérations ;

- cet effet réducteur est plus important lorsque le matériau à souder est présent sous le patin ;

- la nature du matériau soudé et la géométrie de l'électrode ont un effet significatif sur l'intensité du champ électrique émis. Dans cette configuration, il est probable que l'intensité du champ électrique pondérée par le temps soit inférieure à la valeur d'action.

INTENSITÉ DU COURANT INDUIT I_L

Des mesures de courant induit au niveau d'une cheville de l'opérateur ont été effectuées à l'aide du mesureur de marque HOLADAY type H₁ 3702 pour des configurations de soudage exposant le plus l'opérateur au champ électrique.

La Figure 23 montre la configuration habituelle de mesure. Des mesures complémentaires ont été effectuées en intercalant un matériau non conducteur entre les pieds de l'opérateur et le sol afin de mettre en évidence un moyen d'atténuer le courant induit (opérateur « isolé » du sol).

Le Tableau VII donne les résultats de mesures avec les intensités de champ électrique correspondantes pour diverses configurations. La valeur d'action préconisée par la directive est de 100 mA, pondérable par le facteur temps (cf. Tableau I).

Les mesures effectuées sur une soudeuse identique non équipée d'un patin de masse donnent une intensité de courant induit de 420 et 460 mA (opérateur « isolé » et « non isolé » du sol) avec des intensités de champ électrique correspondant supérieures à 300 V/m.

TABLEAU V

Intensité de champ électrique en fonction de la nature du matériau soudé

Matériau soudé avec 4 géométries d'électrodes	Intensité de champ électrique (V/m)	
	Avec matériau à souder sous le patin	Sans matériau à souder sous le patin
PVC 1100 g	56-120	90-180
PVC 10/10 ^{ème}	85-136	105-140

TABLEAU VI

Intensité du champ électrique en fonction de la géométrie d'électrode

Géométrie d'électrode	Intensité de champ électrique (V/m)	
	Avec matériau à souder sous le patin	Sans matériau à souder sous le patin
Parallélépipède creux	110-125	110-150
T	120-136	140-145
Parallélépipède plein	85-110	105-180
Cylindre court	56-97	90-130

FIGURE 23

Mesure du courant induit au niveau d'une cheville



TABLEAU VII

Intensités du courant induit et du champ électrique correspondant

« Isolation » de l'opérateur par rapport au sol	Intensité du courant induit et Intensité du champ électrique correspondante	
	Avec matériau à souder sous le patin	Sans matériau à souder sous le patin
Deux pieds sur le sol	99 mA 140 V/m	91 mA 150 V/m
Deux pieds sur un matériau « isolant »	50 mA 145 V/m	66 mA 155 V/m

Ces résultats montrent que :

■ comme pour l'intensité du champ électrique, le patin de masse a également un effet réducteur significatif sur l'intensité du courant induit dans les extrémités ;

■ le matériau non conducteur sur lequel l'opérateur pose ses pieds entraîne une réduction supplémentaire de l'intensité du courant induit ;

■ pour une configuration donnée par rapport au sol, l'intensité du courant induit est liée à celle du champ électrique auquel est exposé l'opérateur ;

■ la valeur d'action relative au courant induit (100 mA) ne sera jamais dépassée lors d'une exposition maximale (sur une durée de 6 mn) de l'opérateur au champ électrique.

CONTRAINTES TECHNIQUES LIÉES À L'INSTALLATION D'UN PATIN SUR UNE SOUDEUSE EN EXPLOITATION

La première contrainte est bien sûr de ne pas altérer la tâche de soudage de la machine par la présence du patin.

Le patin et ses liaisons sont insérés dans le circuit HF de charge du générateur. Ils en modifient donc l'impédance. Cette insertion peut entraîner la nécessité de régler le couplage par un condensateur à air entre le générateur et le circuit alimentant l'électrode.

La variabilité des configurations d'utilisation de la soudeuse nécessite de trouver un compromis technique concernant le patin afin d'obtenir une qualité de soudure acceptable et une intensité de champ électrique la plus faible possible. Les réglages en cours d'installation ayant pour but de trouver le meilleur compromis nécessitent de pouvoir disposer d'appareils de mesure d'intensité de champ.

Le cycle décrit précédemment nécessite de concevoir un circuit d'automatisme électro-pneumatique s'intégrant dans celui de la soudeuse.

Le dispositif anti-flash évitant les surintensités HF dans le circuit de charge du générateur devra rester opérationnel comme décrit à la *Figure 19*, malgré l'isolation de la table par rapport au bâti de la soudeuse.

Les soudeuses de conception ancienne destinées à être équipées d'un patin de masse ont été mises en service avant la mise en place du marquage CE et sont régies par les textes réglementaires « utilisation ». Elles doivent être conformes aux articles R 4324-1 et R 4324-45 du Code du Travail [12]. L'adjonction d'un patin de masse correspond à une modification de la machine existante, il n'y a pas lieu d'apposer un nouveau marquage ni de rédiger une déclaration de conformité. Mais le responsable de ces modifications, c'est-à-dire le chef d'établissement, doit s'assurer du maintien du niveau de sécurité de la machine en effectuant préalablement une analyse des risques liés à l'adjon-

tion du patin. La notice d'instruction est à modifier pour tenir compte de l'évolution de l'équipement. D'un point de vue préventif, il est toutefois préconisé de faire procéder à une évaluation de l'état de conformité par un organisme agréé.

La *Figure 24* décrit les impossibilités mécaniques d'installation d'un patin sur une soudeuse : l'espace disponible entre le porte-électrode et le col de cygne peut être insuffisant pour intercaler un patin, de même qu'entre certaines électrodes à géométrie spéciale et le col de cygne. Dans certains cas, on pourra installer le patin sur le devant de l'électrode.

Mais la présence d'un patin doit permettre à l'opérateur de conserver une bonne visibilité sur sa tâche et ne doit pas l'amener à adopter des postures contraignantes ou à effectuer des gestes entraînant une fatigue supplémentaire.

Une solution destinée à pallier le manque de place est à l'étude par un rénovateur de soudeuses. Elle consiste à installer plusieurs patins de dimensions réduites au lieu d'un seul.

RISQUES SUPPLÉMENTAIRES

Le patin ne doit pas créer des risques mécaniques ou électriques supplémentaires :

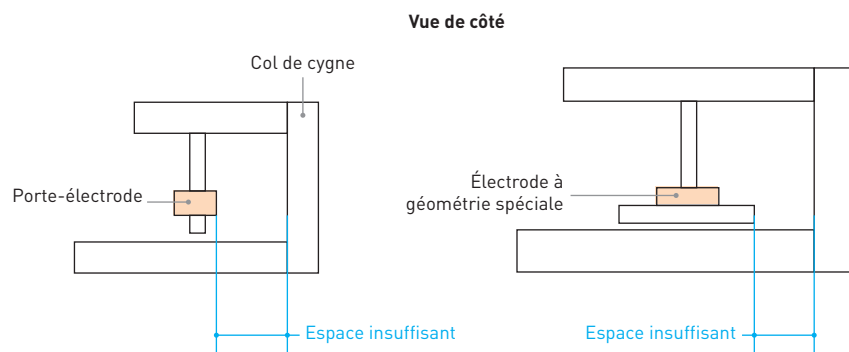
■ la pression exercée par les vérins sur le patin et sa vitesse de descente ne doivent pas être excessives ;

■ le niveau de bruit résultant de la présence de ces vérins doit être maîtrisé.

Le courant de contact que pourrait recevoir l'opérateur en touchant les clinquants du patin de masse ne doit pas

FIGURE 24

Impossibilités physiques d'installation d'un patin sur une soudeuse



dépasser les valeurs limites de la directive 2004/40/CE. C'est pourquoi il est souhaitable de réduire la tension patin/table en lui conférant une capacité élevée.

CONCLUSION

Lorsque la rénovation d'une soudeuse HF de conception ancienne fortement rayonnante est envisagée, il est possible, dans de nombreux cas, de réduire efficacement l'exposition des opérateurs en l'équipant avec un dispositif appelé « patin de masse ». Le patin de masse est simple du point de vue électrique car il se résume à un élément capacitif et à un élément inductif qu'il convient d'accorder judicieusement. Il est également facile à réaliser mécaniquement sous réserve que son installation soit a priori possible, ce qui n'est pas le cas pour toutes les soudeuses où l'espace manque entre l'électrode ou son porte-électrode et le col de cygne.

Bien que ce dispositif de réduction de l'émission électromagnétique soit de conception simple, il est conseillé aux utilisateurs de faire appel à des sociétés spécialisées dans la rénovation des soudeuses HF. Leurs coordonnées peuvent être obtenues en consultant internet ou les CMP des Carsat. Il convient de remettre en état la soudeuse pour envisager l'installation d'un patin qui, s'il réduit l'exposition de l'opérateur au champ électromagnétique, ne devra pas dégrader l'ergonomie et le niveau de sécurité de son poste de travail.

Reçu le : 16/04/2012

Accepté le : 24/04/2012

Remerciements :

L'auteur tient à remercier le Professeur Bernard DEMOULIN de l'Université de Lille pour les explications et les conseils qui lui ont été prodigués au cours de l'étude de ce dispositif en laboratoire. L'auteur tient également à remercier le Centre de mesures physiques de la Carsat Nord Picardie pour l'assistance qu'il lui a apportée lors de la validation en entreprise.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] TOURAINE A. - *Chauffage par pertes diélectriques*. Techniques de l'ingénieur, Fiche D 830, 1994, 5 p.
- [2] THUERY J. - *Les micro-ondes et leurs effets sur la matière*. Techniques et Documentation Lavoisier Paris, ISBN : 2-85206-544-4, 1989, 575 p.
- [3] Champs électromagnétiques. *Les machines utilisant le chauffage par pertes diélectriques* : fiche pratique INRS ED 4205, 2004, 4p.
- [4] DEMARET P., DONATI P. - *Intégrer le risque « rayonnements électromagnétiques » dans le document unique d'évaluation des risques professionnels* - Cahiers de notes documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 2011, HST ND2350 - 225 - II, pp 45-53.
- [5] Directive 2004/40/CE concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques). Journal Officiel de l'UE, L 159, 2004, pp. L184/1-184/9 en cours de modification
- [6] 89/655/CEE - Directive concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs d'équipements de travail. Journal Officiel de l'UE, L 393, 1989, pp. 13-17.
- [7] KLEIN R., CLAUZADE B. - *Effets des perturbations électromagnétiques sur certains équipements - Risques liés aux dysfonctionnements*. Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 1991, 142, ND1811, pp. 5-20.
- [8] GRATON L., LALIBERTE L. - *Le blindage comme moyen de contrôle des radiofréquences des machines industrielles chauffant par pertes diélectriques*. Fiche technique RF-094, IRSST, 1996, 15p.
- [9] *Safety in the use of radiofrequency dielectric heaters and sealers*. Guide pratique N° 71, ILO, Genève, 1998, 71 p.
- [10] *Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques et électromagnétiques, magnétiques* - Traduction du guide ICNIRP, Cahiers de notes documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 2001, HST ND2143 - 182 - 01.
- [11] LARCHER C. - Une solution sur mesure dans l'atelier de confection Travail & Sécurité, Juillet-Août 2006, pp. 16-18.
- [12] Dossier Web « Machines » - INRS, DW 35, 2011. www.inrs.fr accédé le 31 janvier 2012.

