

**PROCEDE, DISPOSITIF ET PROGRAMME D'ORDINATEUR POUR DETERMINER LA
PERFORMANCE D'UN PROCEDE DE SOUDAGE A L'AIDE DE TRAITEMENTS
NUMERIQUES D'UNE IMAGE DE LA PIECE SOUDEE**

5

La présente invention concerne un procédé de détermination de la performance d'un procédé de soudage réalisé sur au moins une pièce métallique, notamment un procédé de soudage à l'arc électrique ou de soudage laser, ainsi qu'un dispositif apte et destiné à la mise en œuvre dudit procédé.

10

Il est connu que la présence de projections de métal fondu à la surface d'un assemblage soudé est un indicateur de l'efficacité du procédé de soudage et de la qualité de la soudure résultante. C'est le cas notamment en soudage à l'arc, en particulier en soudage MIG, pour « Metal Inert Gas », ou MAG, pour « Metal Active Gas ». Ces procédés utilisent un arc électrique établi entre l'extrémité d'un fil

15 métallique fusible et les pièces métalliques à souder pour fondre le métal constitutif des pièces à souder ainsi que le métal constitutif du fil fusible, i. e le métal d'apport, ce qui génère un bain de métal liquide formé du métal des pièces à souder et du métal du fil fusible fondu et transféré dans l'arc électrique.

20

Afin de contrôler le détachement de la goutte au bout du fil et son transfert vers le bain fondu, on utilise des générateurs de courant électroniques dans lesquels les paramètres opératoires de soudage, notamment intensité du courant, tension d'arc, vitesse de fil, ... sont programmés pour évoluer d'une manière prédéfinie, ce qui permet de travailler dans un régime de transfert adapté au procédé de soudage à mettre en œuvre. Un mauvais paramétrage peut conduire à un régime de transfert instable se

25 traduisant par la génération de nombreuses projections de métal fondu.

30

De même en soudage laser, que le soudage soit autogène ou avec apport de matière, on peut corréler la qualité et la productivité du procédé à la quantité de projections métalliques. En effet, lors du soudage, un orifice de pénétration et un bain de métal en fusion se forment dans la zone irradiée avec le faisceau laser. Du métal liquide est repoussé vers le haut. En cas d'instabilité de ce liquide au sommet du capillaire de soudage (keyhole en anglais), de la matière est éjectée de la zone de soudage créant des projections sur et autour de la soudure qui ont pour conséquences des surépaisseurs et des manques de matière sur le cordon de soudure.

Les projections indiquent une baisse de productivité engendrée par la perte de métal d'apport, de la baisse de puissance et/ou de vitesse de soudage qu'elles imposent et du temps supplémentaire de nettoyage des pièces soudées.

Il existe différentes techniques pour caractériser les projections générées au cours d'un procédé de soudage. Ces techniques reposent le plus souvent sur une observation en temps réel, c'est-à-dire pendant que le soudage est réalisé, des projections générées au cours du soudage. Par exemple, on peut utiliser des enregistrements réalisés au moyen d'une caméra rapide pour suivre les trajectoires des projections et les comptabiliser.

On connaît ainsi des documents US20120152916A et CN109332928A des dispositifs de détermination de la qualité de soudage qui effectue un comptage des projections sur une image enregistrée pendant le soudage par une caméra rapide.

Par ailleurs, on connaît de WO2019103772A1 une méthode de détection et de prédiction de défauts de soudage utilisant des résultats de simulations de soudage et des réseaux neuronaux.

On connaît également des techniques reposant sur l'analyse d'enregistrements sonores réalisés au cours du soudage.

La plupart des techniques existantes reposent donc sur une analyse dynamique des projections et nécessitent des équipements relativement complexes qui doivent être installées sur le lieu de soudage, ce qui peut s'avérer prohibitif pour des installations de production à échelle industrielle et encore plus pour des petites structures dont les capacités d'investissement sont moindres. En outre, cela implique l'utilisation de logiciels très complexes conduisant à un coût élevé pour l'installation finale.

Le problème à résoudre est dès lors de proposer un procédé de détermination de la performance d'un procédé de soudage qui soit de mise en œuvre relativement simple et offre une plus grande flexibilité d'utilisation que dans l'art antérieur.

La solution selon l'invention est alors un procédé de détermination de la performance d'un procédé de soudage réalisé sur au moins une pièce métallique, notamment un procédé de soudage à l'arc électrique ou de soudage laser, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

a) acquisition par un dispositif de prise d'image d'au moins une image initiale d'au moins une portion de surface de ladite pièce préalablement soudée comprenant un cordon de soudure,

b) réalisation d'un premier traitement numérique sur l'image initiale de manière à localiser, dans ladite image initiale, des projections présumées,

c) introduction d'un ou plusieurs extraits de l'image initiale comprenant chacun une projection présumée, en entrée d'au moins un réseau neuronal, en particulier un
5 réseau neuronal à convolution, de façon à classer les projections présumées en projections confirmées ou non-confirmées,

d) réalisation d'un deuxième traitement numérique sur l'image initiale comprenant les projections classées confirmées à l'étape c) de manière à déterminer au moins un paramètre représentatif de la quantité de projections confirmées choisi parmi :

- 10 - la surface d'une ou plusieurs projections confirmées,
- la surface totale des projections confirmées, définie comme la somme de la surface de chaque projection confirmée,
- le nombre de projections confirmées,
- le nombre de projections confirmées par unité de surface,
- 15 - la densité de projections, définie comme la surface totale des projections confirmées divisée par la surface totale de l'image initiale,
- la moyenne des distances entre chaque projection confirmée et le cordon de soudure,

e) détermination de la performance de soudage à partir du au moins un paramètre
20 déterminé à l'étape d).

Selon le cas, l'invention peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- le dispositif de prise d'image est agencé dans un système informatique choisi parmi : un téléphone intelligent, une tablette, un ordinateur portable.
- 25 - le procédé comprend, préalablement à l'étape a), une étape de calibration du dispositif de prise d'image comprenant l'acquisition de plusieurs images d'un même motif bidimensionnel avec le dispositif de prise d'image positionné pour chaque image à une distance prédéterminée distincte du motif bidimensionnel, ledit motif étant ensuite positionné sur ladite au moins
- 30 une portion de surface de la pièce de façon à être inclus dans l'image initiale acquise à l'étape a).
- le procédé met en œuvre au moins un traitement statistique relatif audit au moins un paramètre représentatif de la performance de soudage, notamment un traitement statistique relatif à la surface des projections

- confirmées comprenant la détermination d'au moins l'une parmi : la surface moyenne des projections confirmées, la surface minimale et/ou la surface maximale des projections confirmées, la déviation standard de la surface des projections confirmées, au moins une population en nombre de
- 5 projections confirmées ayant une surface supérieure à un seuil bas prédéterminé et/ou inférieure à un seuil haut prédéterminé.
- on acquiert plusieurs images initiales à des temps successifs et on compare les valeurs du paramètre représentatif de la quantité de projections confirmées déterminé pour chacune des images initiales afin de détecter
 - 10 une éventuelle variation dudit paramètre.
 - ladite au moins une image initiale est acquise avec le dispositif de prise d'image positionné à une distance comprise entre 10 et 40 cm, de préférence entre 20 et 30 cm, au-dessus de la soudure.
 - le premier traitement numérique réalisé à l'étape b) sur l'image initiale
 - 15 comprend les sous-étapes suivantes : i) filtrage de l'image initiale de façon à opérer une différenciation entre les projections métalliques et un arrière-plan de l'image initiale, ii) suppression de l'arrière-plan de l'image initiale, iii) binarisation de l'image filtrée issue de l'étape i), notamment par seuillage basé sur l'intensité, de façon à former une image binaire à deux valeurs de
 - 20 pixels, avec, optionnellement, inversion des valeurs des pixels de l'image binaire, iv) sélection d'une des deux valeurs de pixels de façon à définir dans l'image binaire des zones d'intérêt formées par les pixels de la valeur sélectionnée, avec, optionnellement, dilatation desdites zones d'intérêt, v) marquage des zones d'intérêt sur l'image binaire et transposition dudit
 - 25 marquage sur l'image initiale de façon à y localiser des projections présumées.
 - préalablement à l'étape c), on attribue une position à chacune des projections présumées localisées à l'étape b), notamment une position définie par des coordonnées bidimensionnelles, et on compare deux à deux
 - 30 chacune desdites positions, une des deux projections présumées étant ignorée lorsque la distance entre les positions comparées est inférieure à une valeur prédéterminée.
 - à l'étape c), le réseau neuronal comporte plusieurs couches de convolution, de préférence trois couches de convolution, au moins une couche

entièrement connectée et au moins une couche de regroupement, de préférence une couche de regroupement est intercalée entre deux couches de convolution.

- 5 - à l'étape c), les projections présumées sont classées en projections confirmées ou non-confirmées selon des critères de décision définis par un apprentissage préalable du réseau neuronal, ledit apprentissage étant réalisé au moyen d'un ensemble d'images d'apprentissage comprenant plusieurs sous-ensembles choisis parmi : un sous-ensemble d'images d'apprentissage comprenant chacune au moins une projection métallique,
10 un sous-ensemble d'images d'apprentissage exemptes de projections métalliques, un sous-ensemble d'images d'apprentissage comprenant chacune au moins un défaut autre qu'une projection tel une rayure, une réflexion parasite, un sous-ensemble d'images d'apprentissage comprenant chacune au moins une portion de soudure, lesdits sous-ensembles
15 comprenant de préférence chacun au moins 1000 images d'apprentissage, de préférence encore au moins 2000 images d'apprentissage.
- à l'étape c), on associe aux extraits de l'image initiale en entrée du réseau neuronal au moins une information de contexte choisie parmi : le matériau de la pièce métallique, le gaz de soudage, la configuration de joint soudé, le
20 régime de transfert de métal, la tension du courant de soudage, l'intensité du courant de soudage, la vitesse de dévidage de fil.
- le procédé comprend, préalablement à l'étape b), une étape de pré-traitement de l'image initiale par application d'au moins un masque configuré pour supprimer de l'image initiale des caractéristiques autres que des
25 projections, par exemple des rayures, des réflexions parasites.
- le procédé comprend une étape de transmission à distance de l'image initiale via un réseau de communication, de préférence un réseau de type Internet, du dispositif de prise d'image vers un serveur distant, les étapes b) à e) étant réalisée par un système électronique de traitement localisée dans
30 le serveur distant.

En outre, l'invention concerne un dispositif de détermination de la performance d'un procédé de soudage configuré pour mettre en œuvre un procédé selon l'invention, ledit dispositif comprenant :

- un dispositif de prise d'image configuré pour acquérir ladite image initiale,

- une mémoire pour le stockage de l'image initiale,
- un système de traitement électronique ayant accès à ladite mémoire, ledit système de traitement électronique étant configuré pour réaliser le premier traitement numérique et le deuxième traitement numérique sur l'image initiale,
- 5 - au moins un réseau neuronal, en particulier un réseau neuronal à convolution, configuré pour recevoir en entrée des extraits de l'image initiale et classer des projections présumées en projections confirmées ou non-confirmées,
- une logique électronique configurée pour déterminer la performance du procédé de soudage à partir du au moins un paramètre représentatif de la quantité de
- 10 projections déterminé par le deuxième traitement numérique.

Selon un autre aspect, l'invention a trait à un produit programme d'ordinateur téléchargeable depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur et/ou exécutable par un processeur, caractérisé en ce qu'il comprend des instructions de code de programme pour la mise en œuvre d'un procédé

15 selon l'invention.

L'invention va maintenant être mieux comprise grâce à la description détaillée suivante faite en référence aux figures annexées parmi lesquelles :

- Fig. 1 schématise une étape d'acquisition d'une image initiale selon un mode de réalisation de l'invention,
- 20 Fig. 2 schématise des étapes du procédé selon un mode de réalisation de l'invention,
- Fig. 3 représente des étapes d'un premier traitement numérique d'image selon un mode de réalisation de l'invention,
- Fig. 4 représente des étapes d'un premier traitement numérique d'image selon un autre mode de réalisation de l'invention,
- 25 Fig. 5 représente des étapes de traitement d'un extrait de l'image initiale par un réseau neuronal selon un mode de réalisation de l'invention,
- Fig. 6 représente un apprentissage du réseau neuronal selon un mode de réalisation de l'invention,
- Fig. 7 montre des exemples d'images initiales sur lesquelles sont localisées des
- 30 projections confirmées.

La Figure 1 illustre l'acquisition d'une image initiale 2 d'une portion de surface de pièces métalliques soudées l'une à l'autre au niveau d'une soudure 1. Selon l'invention, on acquiert l'image initiale 2 une fois le soudage des pièces terminé, c'est-à-dire après l'obtention d'un cordon de soudure 1 correspondant à la zone de

resolidification du métal constitutif des pièces soudées et du métal d'apport le cas échéant. Dit autrement, on réalise d'abord le soudage de ladite au moins une pièce et, seulement après que le soudage a été terminé, on acquiert l'image initiale 2. Les projections s'entendent donc des projections présentes à la surface des pièces.

5 Contrairement aux techniques où l'observation des projections est effectuée en temps réel, c'est-à-dire pendant que le soudage est réalisé, l'invention met en œuvre une analyse d'une image des projections situées sur la surface de la pièce après que celle-ci ait terminé d'être soudée. Cela nécessite des équipements d'analyse, notamment dispositif de prise d'image, logiciels, ... moins complexes. L'analyse de
10 l'image est réalisée a posteriori, ce qui évite de devoir installer les dispositifs d'acquisition et de traitement d'image sur le lieu de soudage, dont les capacités d'investissement sont moindres. En outre, cela implique l'utilisation de logiciels très complexes conduisant à un coût élevé pour l'installation finale. Le procédé selon l'invention est ainsi de mise en œuvre plus simple et plus flexible. En particulier, des
15 dispositifs de prise d'image plus simple qu'une caméra rapide peuvent être utilisés.

De préférence, le dispositif de prise d'image 3 est un téléphone intelligent, ou « smartphone » en langue anglaise, étant entendu que d'autres types de systèmes informatiques portables sont envisageables tels une tablette, un ordinateur portable, une montre connectée.

20 De préférence, l'image initiale 2 est acquise avec le dispositif de prise d'image 3 positionné à une distance comprise entre 10 et 40 cm, de préférence entre 20 et 30 cm, au-dessus de la soudure 1. La distance de prise d'image est définie par un compromis entre résolution de l'image 2 et taille de la portion de surface analysée. Notons que la distance de prise d'image correspond à la distance entre l'objectif du
25 dispositif et la surface de la pièce.

Avantageusement, on réalise, préalablement à l'acquisition de l'image initiale 2, une calibration du dispositif de prise d'image 3 utilisant au moins une image d'un même motif bidimensionnel 6 prise avec le dispositif de prise d'image 3. Le motif 6 présente des dimensions réelles connues et est placé à une distance prédéterminée connue du
30 dispositif 3, ce qui permet d'associer à un pixel une dimension réelle.

De préférence, on utilise plusieurs images d'un même motif bidimensionnel 6 prises avec le dispositif de prise d'image 3. Pour chaque image, le motif 6 est positionné à une distance prédéterminée distincte du dispositif 3. Ce motif 6 comprend des éléments caractéristiques de dimensions connues, par exemple un quadrillage

régulier à deux valeurs de pixels. On utilise de préférence au moins 2, voire au moins 5 images du motifs 6 prises à des distances différentes, ceci afin d'éviter toute erreur de calibration. A l'étape a), le motif 6 est positionné sur la portion de surface de pièce de façon à être inclus dans l'image initiale 2.

5 Grâce à la calibration, il est possible de corréler les dimensions des pixels de l'image initiale aux dimensions réelles afin de calculer les dimensions réelles des projections, sans qu'il ne soit nécessaire de contrôler précisément la distance de prise d'image, ce qui est utile notamment dans le cas où le dispositif 3 est dans un téléphone tenu par un opérateur.

10 On réalise ensuite un premier traitement numérique sur l'image initiale 2 de manière à localiser dans l'image initiale 2 des projections présumées 21.

Ces projections sont dites présumées car des défauts présents à la surface des pièces, par exemple des rayures, des réflexions parasites, peuvent être confondus avec des projections lors du premier traitement d'image.

15 On peut voir sur la Figure 2 un schéma des étapes du procédé selon un mode de réalisation de l'invention. Afin de différencier les projections se trouvant sur les pièces d'autres imperfections, le procédé selon l'invention utilise au moins un réseau neuronal 5, en particulier un réseau neuronal à convolution, recevant, en 100, comme données d'entrée un ou plusieurs extraits 20 de l'image initiale 2 comprenant chacun
20 une projection présumée 21. De préférence, chaque extrait 20 ne comporte qu'une seule projection. Le réseau neuronal 5 est configuré pour réaliser une classification, en 200, des projections présumées de chaque extrait 20 en projections confirmées 21C ou non-confirmées 21N. De préférence, le réseau neuronal fonctionne sur plusieurs extraits 20 entrés successivement dans le réseau.

25 De façon connue, les réseaux neuronaux artificiels constituent des modèles de calculs imitant le fonctionnement des réseaux de neurones biologiques. Les réseaux de neurones artificiels comprennent des neurones interconnectés entre eux par des synapses, qui sont classiquement implémentées par des mémoires numériques. Les synapses peuvent être également implémentées par des composants résistifs dont la
30 conductance varie en fonction de la tension appliquée à leurs bornes.

Les réseaux neuronaux à convolution sont un modèle particulier de réseau de neuronaux artificiels. Ils ont été décrits initialement dans l'article de K. Fukushima, « Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern

reconnaissance unaffected by shift in position. Biological Cybernetics, 36(4): 193-202, 1980. ISSN 0340-1200. doi: 10.1007/BF00344251 ».

Les réseaux neuronaux à convolution (désignés en langue anglo-saxonne par les expressions "convolutional neural networks", ou "deep (convolutional) neural networks" ou encore "ConvNets") sont des réseaux de neurones sans rétro-action («
5 feedforward »), inspirés par les systèmes visuels biologiques.

Les réseaux neuronaux à convolution (CNN) sont utilisés notamment dans des systèmes de classifications d'images pour accélérer la classification. Appliqués à la reconnaissance d'images, ces réseaux permettent un classement des représentations
10 intermédiaires d'objets dans les images qui sont plus petites et généralisables pour des objets similaires, ce qui facilite leur reconnaissance.

De préférence, les projections présumées sont classées en projections confirmées ou non-confirmées selon des critères de décision définis par un apprentissage, i. e. un entraînement, préalable du réseau neuronal 5. Lors de cet
15 apprentissage, dont un exemple est schématisé en figure 6, on apprend au réseau neuronal à catégoriser automatiquement un extrait d'image parmi un nombre fini de catégories, aussi appelées classes. Dans le cas de la présente invention, la classification a lieu selon au moins deux classes, une classe « projection confirmée » 21C et une classe « projection non-confirmée » 21N couvrant les occurrences sur
20 l'image 2 autres que des projections. La classe « projection non-confirmée » peut éventuellement être affinée en plusieurs sous-classes, par exemple une sous-classe « rayure », une sous-classe « réflexion », une sous-classe « ombre », ...

L'apprentissage est réalisé au moyen d'un ensemble d'images d'apprentissage 20A qui comprennent plusieurs exemples de chaque classe ou sous-classe, comme
25 illustré sur la Figure 6. Ainsi, les images d'apprentissage comprennent plusieurs sous-ensembles choisis parmi : un sous-ensemble d'images d'apprentissage comprenant chacune au moins une projection métallique, en (a), un sous-ensemble d'images d'apprentissage exemptes de projections métalliques, un sous-ensemble d'images d'apprentissage comprenant chacune au moins un défaut autre qu'une projection tel
30 une rayure, en (b), une réflexion parasite, un sous-ensemble d'images d'apprentissage comprenant chacune au moins une portion de soudure, en (c), lesdits sous-ensembles comprenant de préférence chacun au moins 1000 images d'apprentissage, de préférence encore au moins 2000 images d'apprentissage.

De préférence, les images d'apprentissage comprennent chacune au moins une portion de surface d'un échantillon déjà soudé. Les échantillons comprennent différents types de soudure obtenus par différents procédés, notamment soudage à l'arc, en particulier MIG ou MAG, soudage laser, soudage hybride laser-arc, ... et selon 5 différentes configurations de soudage, notamment en bord à bord, en angle, ... afin d'entraîner le réseau neuronal de la façon la plus exhaustive possible et qu'il puisse identifier des projections sur la plupart des soudures réalisées au niveau industriel.

Après le classement des projections, on réalise un deuxième traitement numérique sur l'image initiale 2 sur laquelle ont été localisées les projections 21C 10 confirmées. Le deuxième traitement numérique est configuré pour déterminer à partir de l'image initiale 2 au moins un paramètre représentatif de la quantité de projections confirmées choisi parmi la surface d'une ou plusieurs projections confirmées 21C, la surface totale des projections confirmées 21C, définie comme la somme de la surface de chaque projection confirmée 21C, le nombre de projections confirmées 21C, le 15 nombre de projections confirmées 21C par unité de surface, le poids total des projections confirmées 21C, la densité des projections, définie comme la surface totale des projections confirmées 21C divisée par la surface totale S_2 de l'image initiale 2, la moyenne des distances entre chaque projection confirmée 21C et le cordon de soudure 1.

20 De préférence, S_2 est la surface totale réelle de l'image initiale 2 acquise à l'étape a), pouvant s'exprimer en cm^2 ou mm^2 .

De préférence, en considérant un cordon de soudure 1 s'étendant suivant un axe longitudinal parallèle à la direction de soudage et positionné au centre du cordon, la distance entre une projection et le cordon est définie comme la distance la plus 25 courte séparant ladite projection de l'axe longitudinal.

La performance du procédé de soudage est déterminée à partir du au moins un paramètre représentatif de la quantité de projections confirmées.

Notons que la performance du procédé de soudage peut s'évaluer en termes de critères de qualité du cordon de soudure résultant du procédé, notamment de 30 considérations morphologiques telles que l'aspect de surface du cordon et/ou de la surface de la pièce autour du cordon, la profondeur de pénétration et/ou en termes de critères d'efficacité de soudage telles que la vitesse de soudage, le bon ajustement des paramètres opératoires de soudage, le taux de dépôt, exprimé en masse de métal

fondus resolidifiés par unité de temps (kg/heure), le taux de production, exprimé en masse de métal fondu resolidifié par unité de longueur de cordon (kg/m).

En particulier, l'évaluation de la performance d'un procédé de soudage peut s'entendre de l'évaluation d'un ou plusieurs des aspects suivants : l'évaluation du réglage des paramètres opératoires de soudage, lesquels paramètres comprenant notamment le régime de transfert de métal, la tension du courant de soudage, l'intensité du courant de soudage, la vitesse de dévidage de fil, l'évaluation de la qualité de la soudure résultante, l'évaluation du montage de soudage, i. e. positionnement des pièces, de la torche de soudage.

Etant entendu que l'invention peut s'appliquer à l'évaluation de la performance de tout procédé de soudage par fusion pouvant produire des projections, tel que le soudage à l'arc ou le soudage laser, avec faisceau laser seul ou combiné à un arc électrique. L'invention peut notamment s'appliquer à un procédé de soudage utilisé pour la fabrication additive par projection de poudre (procédé LMD pour Laser Metal Deposition en anglais) ou par fusion laser sur lit de poudre (procédé SLM pour Selective Laser Melting en anglais).

Avantageusement, on utilise, en tant que paramètre représentatif de la quantité de projections, surface totale des projections confirmées 21C et/ou la densité de projections définie comme la surface totale des projections confirmées 21C divisée par la surface totale S_2 de l'image initiale 2. L'utilisation d'un paramètre lié à la surface de projection permet une quantification encore plus précise de la quantité de projections produites. En particulier, la densité de projections et/ou la surface totale de projections permet d'évaluer encore plus efficacement des critères d'efficacité de soudage tels le taux de dépôt ou le taux de production du procédé. Ces indicateurs sont aussi révélateurs de la matière perdue dans les projections et qui n'est pas apportée au cordon.

De façon alternative ou complémentaire, on peut utiliser le nombre de projections par unité de surface, qui peut être déterminé comme le nombre de projections confirmées 21C divisé par la surface totale S_2 de l'image initiale 2.

L'utilisation de ces indicateurs conduit à une détermination objective de la performance de soudage, qui peut fournir une indication en absolu, mais aussi en relatif grâce à la comparaison rendue possible des paramètres entre différentes images initiales 2. Ces images initiales 2 peuvent être acquises suite à des soudages réalisés dans un même atelier de soudage ou poste de soudage à des temps

différents, sur différents postes de soudage ou dans différents ateliers de soudage. On peut aussi comparer le ou les paramètres représentatifs de la performance déterminés grâce au procédé de l'invention à des valeurs de référence qui peuvent être déterminées par mise en œuvre du procédé de l'invention sur une image initiale
5 obtenue dans des conditions de soudage optimales.

Le procédé selon l'invention peut en outre mettre en œuvre au moins un traitement statistique relatif audit au moins un paramètre représentatif de la performance de soudage, notamment un traitement statistique relatif à la surface des projections confirmées comprenant la détermination d'au moins l'une parmi : la surface
10 moyenne des projections, la surface minimale et/ou la surface maximale que présentent les projections, la déviation standard de la surface des projections, au moins une population en nombre de projections ayant une surface supérieure à un seuil bas prédéterminé et/ou inférieure à un seuil haut prédéterminé. La mise en œuvre d'un traitement statistique permet d'améliorer encore l'efficacité et la précision de
15 détection des projections.

Il est aussi envisageable de définir une ou plusieurs règles de corrélation entre le au moins un paramètre et plusieurs états qualitatifs prédéterminés stockés dans une base de données 10 auxquels on aura attribué au préalable une valeur ou une plage de valeurs du paramètre.

20 La qualité de la soudure peut être déterminée par une logique électronique 9 apte à recevoir et traiter le paramètre.

De préférence, les premier et deuxième traitements numériques sont réalisés par une unité de traitement électronique 8. Le système de traitement numérique 8 et la logique électronique 9 comprennent chacun au moins l'un parmi : un
25 microcontrôleur, un microprocesseur, un ordinateur, une mémoire. Les dispositifs 8 et 9 peuvent éventuellement être confondus en un même ensemble de traitement numérique configuré pour réaliser les différentes étapes de traitement d'images et de données du procédé selon l'invention.

Avantageusement, le système de traitement numérique 8, la logique
30 électronique 9 et/ou la base de données 10 sont localisés sur un serveur distant 7 auquel le dispositif de prise d'image 3 envoie les images 2 acquises, comme montré sur la figure 1. On peut également mettre en œuvre les étapes d'apprentissage, de classification et/ou de pré-traitement sur le serveur distant 7

Le fait d'opérer le traitement des images et données collectées à distance du dispositif de prise d'image 3 permet de pouvoir effectuer des traitements d'images et des calculs à partir d'un grand nombre de données collectées, sans que cela ne complexifie ou n'oblige à surdimensionner le dispositif de prise d'image 3 utilisé par
5 l'opérateur.

De préférence, le dispositif de prise d'image 3 échange avec le serveur distant 7 via un réseau de communication de type internet. Le dispositif de prise d'image 3 peut utiliser des protocoles de communication à distance sans fil, par exemple 3G, 4G, Wifi.

10 Le dispositif de prise d'image 3 comprend avantageusement un système informatique utilisant une application logicielle pour l'acquisition, le traitement et/ou la transmission d'images et de données vers le serveur distant 7. L'application peut être conçue pour fonctionner avec des systèmes informatiques d'appareils mobiles (iOS et Android) ou fixes (Windows et Mac).

15 Une fois l'information sur la performance de soudage obtenue, celle-ci peut être retransmise à l'opérateur ayant réalisé la soudure et/ou l'acquisition de l'image initiale 2 par transmission du serveur distant 7 vers le dispositif de prise d'image 3. L'information peut aussi être transmise à distance à un autre utilisateur, par exemple un responsable d'atelier de soudage dans lequel les soudures sont réalisées. Les
20 données collectées (images, qualités, paramètres de soudage) peuvent aussi être stockées dans une base de données, éventuellement avec horodatage des données, en vue d'une utilisation ultérieure, par exemple pour effectuer des statistiques, une surveillance de l'évolution temporelle d'au moins un paramètre représentatif de la performance de soudage afin de détecter une éventuelle dérive du paramètre et/ou
25 une analyse prédictive du comportement du poste de soudage fondée sur la surveillance dudit paramètre.

Selon un mode de réalisation particulier, le procédé comprend l'acquisition de plusieurs images initiales 2 à des temps successifs. Lesdites images 2 peuvent par exemple être acquises à des temps séparés d'une durée allant d'un jour jusqu'à une
30 ou plusieurs semaines, voire un ou plusieurs mois, et jusqu'à une année. Une comparaison des valeurs du paramètre représentatif de la quantité de projections confirmées 21C déterminé pour chacune des images initiales 2 est opérée afin de détecter une éventuelle variation dudit paramètre, qui peut être représentative d'une défaillance de l'opérateur et /ou de l'équipement de soudage.

Les figures 3 et 4 illustrent des étapes possibles d'un premier traitement numérique d'image permettant de localiser des projections 21 présumées sur une image 2. Les inventeurs de la présente invention ont mis en évidence des éléments caractéristiques de projections, en particulier une zone apparaissant plus lumineuse que le reste de l'image 2 et située vers le centre de la projection et une zone périphérique de la projection qui apparaît plus sombre à cause de l'oxydation de surface.

Notons que l'image initiale 2 acquise à l'étape a) est de préférence une image en couleur codée avec un format de codage des couleurs du type rouge, vert, bleu (RVB ou RGB en anglais), chaque pixel de l'image 2 ayant 3 composantes de rouge, vert, bleu qui lui est attribuée. De préférence, l'image initiale 2 est convertie en niveaux de gris avant de lui appliquer le premier traitement numérique. L'étape finale du premier traitement numérique est de marquer les projections présumées sur l'image initiale 2. L'image initiale 2 marquée est de préférence au format RVB. Ce marquage est utilisé pour définir les extraits 20 à entrer dans le réseau neuronal 5

La Figure 3 illustre le cas où les projections sont localisées sur l'image 2 par détection d'un centre lumineux. L'image initiale 2 est d'abord filtrée afin d'en extraire et supprimer un arrière-plan. On s'affranchit ainsi des effets parasites qui seraient dus à une illumination non uniforme de la portion de surface. L'image initiale est transformée en image binaire 22 par seuillage. L'image initiale 2 est sous forme de matrice bidimensionnelle de pixels ayant des valeurs d'intensité données. Le seuillage peut s'effectuer en attribuant une même valeur à tous les pixels dont les valeurs sont supérieures ou inférieures à une valeur seuil, et en attribuant une autre valeur aux pixels restants. Après sélection de zones identifiées comme d'intérêt celles-ci sont repérées et marquées sur l'image binaire 2. Ce marquage est transposé sur l'image initiale 2 (croix blanches), ce qui permet ensuite de repérer les extraits de l'image 2 à introduire dans le réseau neuronal 5.

La Figure 4 illustre le cas où les projections sont localisées sur l'image 2 par détection d'une zone sombre. Le premier traitement numérique comprend une étape additionnelle d'inversion des valeurs de pixels de l'image binaire 22. Le marquage des projections présumées 21 est transposé au final sur l'image initiale 2 (croix noires)

Selon un mode particulier de réalisation, on attribue une position à chacune des projections présumées 21 localisées à l'issue du premier traitement numérique, notamment une position définie par des coordonnées bidimensionnelles, et on

compare deux à deux chacune desdites positions. Lorsque la distance entre les positions comparées est inférieure à une valeur prédéterminée, typiquement inférieure à 20 pixels dans l'image 2, l'une des deux projections présumées dont les positions ont été comparées est ignorée. Cela permet la suppression des doublons dans le cas
5 où des projections présentent à la fois les caractéristiques de centre lumineux et de zone sombre.

Optionnellement, préalablement à l'étape b), une étape de pré-traitement de l'image initiale 2 est réalisée par application d'au moins un masque configuré pour supprimer de l'image initiale 2 au moins une partie des caractéristiques autres que des
10 projections, par exemple des rayures, des réflexions parasites.

La figure 5 illustre une architecture possible d'un réseau neuronal 5 à convolution recevant en entrée un extrait 20 de taille $41 \times 41 \times 3$ pixels. Notons que la taille $41 \times 41 \times 3$ a été choisie car elle correspond à la taille typique d'une projection dans l'image. Le réseau neuronal 5 comprend une première couche de convolution CL1
15 constituées de 8 filtres de taille 5×5 pixels. Cette couche CL1 a pour fonction de calculer la sortie des neurones qui sont connectés à des régions locales dans l'entrée, chacun calculant un produit scalaire entre leurs poids et une région à laquelle ils sont connectés dans le volume d'entrée.

CL1 est suivie d'une première couche de regroupement PL1 de taille 2×2
20 pixels. Elle permet d'effectuer une opération de sous-échantillonnage le long des dimensions spatiales (largeur, hauteur), résultant en un volume tel que $19 \times 19 \times 8$

Suivent deux nouvelles couches de convolution CL2 et CL3 constituées respectivement de 16 filtres de taille 5×5 pixels et de 32 filtres de taille 3×3 pixels.

Une deuxième couche de regroupement PL2 de taille 2×2 pixels est agencée
25 entre CL2 et CL3 pour une opération de sous-échantillonnage. En sortie de CL3, on obtient le volume $8 \times 8 \times 32$, volume qui est reconditionné en une couche de neurones entièrement connectée FCL (pour « fully connected layer » en anglais) de $1 \times 1 \times 2048$ ajoutée à l'architecture et connectée à un étage de décision pour classer les projections présumées. Les couches CL et FCL effectuent des transformations qui sont
30 fonction non seulement des activations du volume d'entrée, mais aussi des paramètres (les poids et les biais des neurones).

Notons que de préférence, à l'étape c), le réseau neuronal 5 opère successivement sur une série d'extraits 20 de l'image initiale 2 ayant chacun pour dimensions $N \times M \times 3$ pixels, où M et N sont des nombres entiers compris entre 32 et

224, de préférence entre 32 et 60. Les dimensions des extraits sont choisies en fonction des dimensions des projections, de préférence de sorte qu'il n'y ait qu'une projection se trouvant dans l'extrait 20. Les termes « x 3 » correspond aux 3 couleurs élémentaires rouge, vert et bleu et indique que l'extrait 20 a un format de codage du type RVB, chaque pixel ayant 3 composantes de rouge, vert, bleu qui lui sont attribuées.

Afin de démontrer l'efficacité de la détection des projections utilisée dans le procédé selon l'invention, on a réalisé différentes opérations de soudage sur différents matériaux, dans différentes configurations de joints de soudage, avec différents gaz de protection (voir tableau 1) et différents paramètres opératoires. Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux 2 et 3 ci-dessous.

La distribution du nombre de projections indique la distribution de la population des projections confirmées en fonction de leur surface individuelle S_{21} . $S_{21\text{tot}}$ est la surface totale des projections confirmées calculée à l'étape d) du procédé. S_2 est la surface totale réelle de l'image initiale 2 acquise. La précision de détection est définie comme le rapport entre le nombre de projections confirmées et le nombre réel de projections trouvées à la surface des pièces soudées.

Notons que dans le tableau 2, essai n° 3, la moins bonne précision résulte d'une saturation de l'image 2 à cause d'une réflexion de l'éclairage, ce que l'opérateur peut aisément éviter.

On constate par exemple qu'en l'absence de gaz de protection (tableau 2, essai n°4), la soudure peut être qualifiée de mauvaise au vu de la surface totale et de la densité de projections qui augmente significativement par rapport aux autres essais. On constate également que les régimes de transfert globulaire et de court-circuit génèrent plus de projections que le régime de pulvérisation axiale (tableau 3). La figure 7 montre des images de soudures sur des pièces de dimensions 76 x 152 mm et d'épaisseur 6 mm en régime globulaire (A), de pulvérisation (B) et en court-circuit (C). Les projections confirmées sont marquées par des croix sur les images initiales 2 acquises.

30

Tableau 1

N°	Matériau	Types de joint	Gaz de protection
----	----------	----------------	-------------------

1	Acier au carbone 836	Bord à bord	ARCAL™ Force (Ar +18 % CO ₂)
2	Acier au carbone 836	Recouvrement	ARCAL™ Force (Ar +18 % CO ₂)
3	Acier au carbone 836	Angle, 90°	ARCAL™ Force (Ar +18 % CO ₂)
4	Acier inoxydable 316L	Bord à bord	Sans gaz
5	Acier inoxydable 316L	Bord à bord	ARCAL™ Chrome (Ar +2 % CO ₂)

Tableau 2

N°	Distribution du nombre de projections				S ₂ (mm ²)	Précision de détection	S _{21tot} (mm ²)	Densité (S _{21tot} /S ₂)
	<0.5 mm ²	Entre 0.5 et 1 mm ²	Entre 1 et 3 mm ²	>3 mm ²				
1	191	6	6	3	18225.5	98%	42.7	0.0023
2	20	1	0	0	8021.25	90%	1.633	2.036e-4
3	95	2	1	0	5791.5	88%	19.2	0.0033
4	238	22	29	10	22021.87	98%	138.94	0.0063
5	23	1	3	0	8565.75	95%	6.4	7.472 e-4

Tableau 3

N°	Régime de transfert	Tension (V)	Vitesse fil (pouces/min)	Distribution du nombre de projections				S _{21tot} (mm ²)	Densité (S _{21tot} /S ₂)
				<0.5 mm ²	Entre 0.5 et 1 mm ²	Entre 1 et 3 mm ²	>3 mm ²		
1	Globulaire	29	380	359	10	12	4	66.6	0.0057
2	Pulvérisation	25.5	380	260	5	10	0	37.3	0.0032
3	Court-circuit	19.5	380	372	7	7	1	42	0.0036

Le procédé selon l'invention peut être mis en œuvre après tout procédé de soudage pour évaluer la qualité de soudure, en particulier après un soudage MIG, MAG, laser ou hybride laser-arc. Dans le cadre de l'invention, les pièces métalliques peuvent être soudées en étant positionnées selon différentes configurations, notamment en

5 bord à bord ou bien en angle, c'est-à-dire inclinée l'une par rapport à l'autre de manière à ce que les surfaces supérieures des pièces à souder forment entre elles un angle, en recouvrement et avec tout type de préparation des bords (soyés, droits, chanfreinés,...).