

# Technique de Contrôle de la Soudure par la Méthode d'Ultrason Multi-éléments

Amar Bakdid

Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique.  
Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Université  
Mohamed Premier.  
Oujda, Maroc.  
mestegmar.omar@gmail.com

Bachir El kihel

Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique.  
Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Université  
Mohamed Premier.  
Oujda, Maroc.  
belkihel@yahoo.fr

Fabienne Delaunois

Laboratoire de Métallurgie, Polytechnique.  
Mons, Belgique  
fabienne.delaunois@umons.ac.be

Abdtkarim Nougaoui

Laboratoire de Dynamique et d'Optique des Matériaux,  
Département de Physique, Faculté des Sciences,  
Université Mohamed Premier, 60000  
Oujda, Maroc.  
a\_nougaoui@yahoo.fr

**Résumé**— Dans le domaine du contrôle non destructif des matériaux, la technologie ultrasonore multiéléments offre de nombreux avantages : meilleures sensibilités et précision grâce à la focalisation du faisceau, imagerie, traçabilité ou encore rapidité d'exécution d'un contrôle.

La technique multiélément consiste à utiliser des traducteurs divisés en plusieurs petits traducteurs élémentaires avec un écart de temps (retard) qui va permettre de créer un faisceau par interférences constructives.

Dans le contrôle des soudures, le contrôle par technique "Phased Array" présente l'avantage de supprimer le mouvement de va et vient traditionnel du traducteur. Cette technique permet de positionner et dimensionner les défauts dans les matériaux. L'objectif de ce travail est la détection des défauts d'une soudure en utilisant la technique du contrôle ultrasonore à l'aide d'un traducteur multiéléments. Dans le résultat obtenu nous sommes arrivés à déterminer les types de défauts.

Mots clés - *Contrôle non destructif, multiéléments, détection, soudure.*

## I. INTRODUCTION

Le contrôle des soudures par technique ultrasonore multiéléments est de plus en plus industriellement utilisé. La mise en œuvre de ce contrôle est à la fois plus simple et plus complexe [1].

Dans le cadre de cette étude, la technique ultrasonore multiéléments a été appliquée au contrôle d'une soudure de type écart V afin d'évaluer les potentialités de cette technologie en termes de réduction des temps de contrôle, d'améliorer la qualité des résultats et de faciliter d'interprétation.

L'objectif est de mettre en évidence la détection des défauts d'une soudure en appliquant la technologie du contrôle ultrasonore multiéléments.

Le travail présenté dans cet article se divise en cinq sections. La première section est consacrée à une introduction. La seconde section, présente une généralité sur les ultrasons multiéléments. Les techniques multiéléments sont exposés dans la troisième section. L'étude expérimentale de cette étude est le contenu de la quatrième section. Enfin, La dernière section présente une conclusion de ce travail.

## II. GENERALITES SUR LES ULTRASONS MULTIELEMENTS

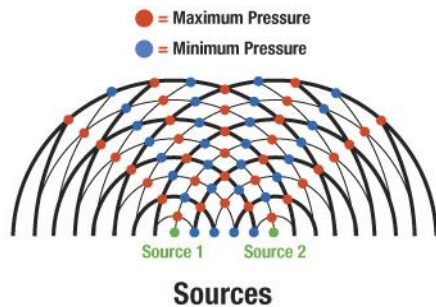
### A. Bref historique de l'inspection par ultrasons multiéléments

Au cours de leurs vingt premières années de commercialisation, les appareils à ultrasons fonctionnaient uniquement avec des sondes mono-élément comprenant un seul cristal piézo-électrique pour l'émission et la réception des ondes acoustiques, des sondes à émission-réception séparées équipées de cristaux différents pour l'émission et la réception des ondes ultrasonores et des systèmes à transmission directe utilisant deux sondes mono-élément en tandem. Ces approches sont toujours utilisées dans la majorité d'appareils à ultrasons commerciaux destinés à la recherche de défauts et à la mesure d'épaisseur dans le domaine de l'industrie. Toutefois, les appareils à ultrasons multiéléments deviennent de plus en plus utilisés dans le domaine CND par ultrasons [2].

Le principe de l'interaction constructive et destructive des ondes a été démontré par le savant anglais Thomas Young en

1802 dans une expérience remarquable où il a utilisé deux sources ponctuelles de lumière pour créer des interférences. En effet, il a démontré que les ondes qui sont combinées en phase se renforcent mutuellement, tandis que les vagues qui sont combinées hors phase s'annulent (fig. 1).

Fig. 1 . phénomène d'interférence pour deux source ponctuelle.



Le déphasage, ou phasage, est un moyen de contrôler ces interactions en phasant dans le temps des fronts d'ondes de deux ou plusieurs sources. Il peut être utilisé pour infléchir, orienter ou concentrer l'énergie d'un front d'onde. Dans les années 1960, les chercheurs ont commencé à concevoir des systèmes à ultrasons multiéléments qui utilisaient des sondes à multiples points sources qui généraient des faisceaux acoustiques basés sur ces modèles d'interférence contrôlée. Au début des années 1970, les premiers systèmes multiéléments commerciaux de diagnostic médical généraient des faisceaux dirigés qui créaient des images en coupe transversale du corps humain (fig. 2).

Fig. 2 . Echographie médicale.



L'utilisation des systèmes à ultrasons multiéléments a été confinée principalement au domaine médical, surtout parce que la composition et la structure prévisibles du corps humain rendent la conception des appareils et l'interprétation des images relativement faciles. Les applications industrielles, par contre, représentent un défi beaucoup plus grand en raison des propriétés acoustiques très variables des métaux, des composites, des céramiques, des plastiques et de la fibre de verre, ainsi que de l'énorme variété d'épaisseurs et de formes rencontrées dans le cadre des inspections industrielles. Le

premier système multiélément industriel, commercialisé durant les années 1980, était de très grande taille et nécessitait un transfert des données vers un ordinateur pour le traitement et la présentation des images. Ces systèmes ont été le plus souvent utilisés pour l'inspection des centrales électriques en fonctionnement. Cette technologie a surtout été développée dans l'industrie du nucléaire, où l'évaluation critique favorise beaucoup l'utilisation des technologies de pointe pour améliorer les probabilités de détection. D'autres applications ont également été développées pour l'inspection des grands arbres forgés et des composants des turbines basse pression.

### B. Réseau multiéléments

Un réseau multiéléments est un assemblage organisé d'une grande quantité d'éléments identiques. La forme la plus simple de réseau ultrasons de contrôle non destructif est une série de sondes mono-éléments disposées de manière à augmenter la couverture ou la vitesse de l'inspection.

### C. Caractéristique des sondes multiéléments

Fig. 3 . ensemble des sondes multiéléments typiques.



Les sondes à ultrasons multiéléments sont classées en fonction des paramètres de base suivants :

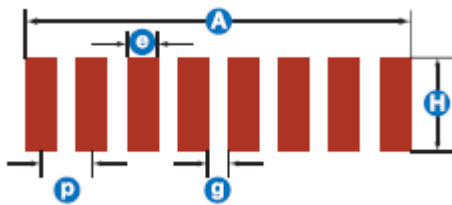
- **Type** : La plupart des sondes multiéléments sont du type sonde d'angle et sont conçues pour être utilisées avec un sabot en plastique ou une semelle droite (sabot droit) en plastique, ou avec une ligne de retard. Des sondes de contact direct et d'immersion sont également offertes.
- **Fréquence** : La plupart du temps, la recherche de défauts par ultrasons se fait à des fréquences de 2 MHz à 10 MHz, alors la plupart des sondes multiéléments se situent dans cette fourchette. Des sondes avec des fréquences supérieure et inférieure à cette fourchette sont également offertes.
- **Nombre d'éléments** : Les sondes à ultrasons multiéléments ont le plus souvent de 16 à 128 éléments, mais certaines en ont jusqu'à 256. Un grand nombre d'éléments améliore les capacités de focalisation et de déflexion, et peut même agrandir la zone de couverture. Chaque élément est excité individuellement de façon à créer le front d'onde souhaité. Ainsi, la dimension de ces éléments est souvent appelée direction active ou de déflexion.
- **Taille des éléments** : Au fur et à mesure que la largeur des éléments diminue, les capacités de déflexion du

faisceau s'améliorent. Or, pour agrandir la zone de couverture il faut utiliser une sonde avec un plus grand nombre d'éléments, ce qui vient augmenter le prix.

#### D. Paramètres dimensionnels d'une sonde multiéléments

Les paramètres dimensionnels d'une sonde multiéléments sont habituellement définis comme suit :

Fig. 4 . paramètres dimensionnels d'une sonde multiéléments.



- A : ouverture totale de la sonde.
- H : hauteur de l'élément ou l'élévation.
- p : distance de centre à centre entre deux éléments successifs.
- e : largeur d'un élément individuel.
- g : espacement entre les éléments actifs.

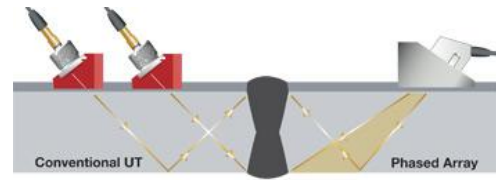
#### E. Sabots multiéléments

En plus de la sonde multiélément elle-même, l'assemblage comporte aussi normalement un sabot en plastique. Les sabots sont utilisés à la fois dans les applications avec ondes longitudinales et ondes transversales, y compris dans l'inspection linéaire par faisceau droit. Les sabots ont essentiellement la même fonction dans les systèmes multiéléments que dans les systèmes de recherche de défauts mono-éléments classiques : ils permettent le couplage de l'énergie acoustique sur la pièce inspectée de telle sorte que le mode d'onde est converti ou réfracté sous l'angle souhaité, conformément à la loi de Snell. Cet effet de réfraction fait également partie du processus de génération de faisceau puisque les systèmes multiéléments utilisent l'orientation du faisceau pour créer des faisceaux à angles multiples à partir d'un seul sabot. Les sabots des sondes à ondes transversales sont très semblables à ceux utilisés avec les sondes à ultrasons conventionnels et, comme les sabots conventionnels, ils existent en plusieurs tailles et styles. Certains d'entre eux comportent des trous d'alimentation en couplant pour les applications de balayage. Un sabot multiélément typique est montré ci-dessous.

Fig. 5. sabot multiéléments typique.



#### F. Avantages des ultrasons multiéléments



Les systèmes à ultrasons multiéléments peuvent être utilisés pour presque tous les types d'inspections effectuées traditionnellement à l'aide d'appareils de recherche de défauts par ultrasons conventionnels. L'inspection des soudures et la recherche des fissures sont les applications les plus importantes. Ces inspections sont effectuées dans de nombreux secteurs, notamment l'aérospatial, la production d'électricité, la pétrochimie, les billettes et les tubes métalliques, les charpentes métalliques et la fabrication générale. Les ultrasons multiéléments peuvent également servir à la vérification efficace de l'épaisseur résiduelle de la paroi dans les applications de contrôle de la corrosion.

Les avantages de la technologie des multiéléments comparativement à la technologie des ultrasons conventionnels viennent de :

- la possibilité d'utiliser plusieurs éléments assemblés dans une seule et même sonde pour orienter, focaliser et balayer les faisceaux.
- La déflexion des faisceaux, communément appelée balayage sectoriel, peut servir à cartographier les composants selon les bons angles. L'inspection de composants de formes complexes peut ainsi être nettement simplifiée.
- La possibilité d'inspecter les soudures sous plusieurs angles avec une seule sonde augmente considérablement les probabilités de détection des anomalies.
- La focalisation électronique permet d'optimiser la forme et la taille du faisceau à l'emplacement où l'on s'attend à trouver une indication, et améliore encore davantage la probabilité de détection.
- La focalisation peut nettement améliorer le ratio signal sur bruit dans les applications difficiles et le balayage électronique d'un grand nombre de groupes d'éléments permet de produire très rapidement des C-scans.

### III. LES TECHNIQUES MULTIELEMENTS

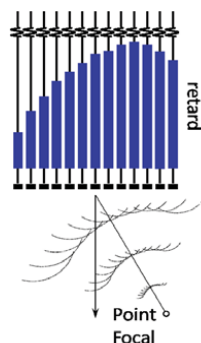
Les premières techniques à ultrasons multiéléments dans le domaine du contrôle industriel ont été introduites dans les années 80. Depuis quelques années, elles connaissent un essor important dans ce domaine [4,5], la levée de barrière technique (par exemple la réduction des modes de vibration parasites ou la réduction du couplage inter-éléments [6]), et les progrès des systèmes d'acquisition étant deux éléments y contribuant [3].

#### 1) Techniques d'acquisitions multiéléments

Les applications classiques des multiéléments font intervenir, d'une part, la commutation électronique, et d'autre part, l'application de retards électroniques (techniques « phased array ») permettant ainsi de maîtriser les caractéristiques focales du faisceau ultrasonore :

- **Le balayage électronique (ou par commutation)** consiste à déplacer spatialement un faisceau en activant séquentiellement un élément ou un groupe d'éléments. Il permet de remplacer électroniquement un axe de balayage (et/ou d'incrément) mécanique et de réaliser des acquisitions à grande vitesse.
- **La focalisation électronique** (fig. 6) consiste à appliquer aux différents éléments des retards destinés à compenser les différences de temps de parcours des ultrasons entre un point de focalisation et chaque élément. Signalons aussi la technique de Focalisation Dynamique en Réception ou Dynamic Depth Focusing (DDF) au cours de laquelle une loi de focalisation est utilisée en émission et plusieurs en réception. Pour chaque loi de retard appliquée en réception, seule une petite fenêtre temporelle du signal centrée sur la profondeur de focalisation correspondante est conservée. Le signal « complet » est obtenu par concaténation de ces portions de signaux. Cette technique a pour but de maximiser la détection sur une plage de profondeur plus étendue.

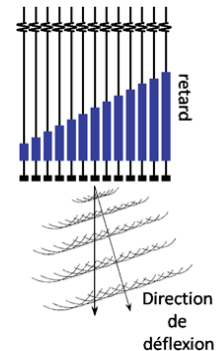
Fig. 6 . focalisation.



- **La déflexion électronique** (fig. 7) utilise comme la focalisation électronique des lois de retard. Ces dernières sont dans ce cas calculées pour dévier le

faisceau à un angle donné. On appelle balayage angulaire ou balayage sectoriel l'opération qui consiste à appliquer successivement différentes lois de retard correspondantes à différents angles de sorte à insonifier un secteur angulaire de la pièce.

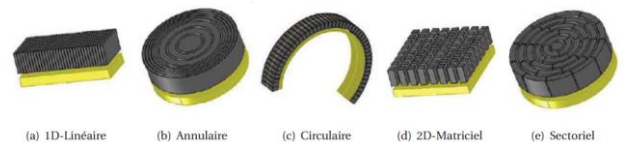
Fig. 7 . déflexion.



#### 2) Types du transducteur multiéléments

Il existe plusieurs types de transducteurs multiéléments, les plus courants sont ceux organisés en réseau :

Fig. 8 . différent types de transducteurs multiéléments.



- linéaire (fig.8(a)), les éléments sont alignés selon un axe. Ces transducteurs ne permettent, en général, que d'effectuer des contrôles dans le plan azimutal du transducteur.
- annulaire (fig.8(b)) les éléments sont des anneaux concentriques. Ces transducteurs permettent de focaliser le faisceau à différentes profondeurs le long d'un axe. La surface des anneaux est dans la plupart des cas constante, ce qui implique une largeur différente pour chaque anneau.
- circulaire (fig.8(c)) les éléments sont placés sur une couronne. Ces transducteurs sont généralement utilisés pour le contrôle de tube (par l'intérieur ou l'extérieur).
- matriciel, les éléments sont placés dans les deux dimensions, comme par exemple sous forme de damier (fig.8(d)) ou d'anneaux sectorisés (fig.8(e)). Ces transducteurs permettent d'effectuer des contrôles en 3D.

#### IV. ETUDE EXPERIMENTAL

##### 1) description du materials utilisés

###### a) l'appariel

Fig . 9. Omni Scan SX.



OMNISCAN SX permet :

- d'excité les éléments d'un traducteur multiéléments avec un retard adéquat.
- recevoir les signaux et les mettre sous forme de différente représentation :
  - A-Scan
  - B-Scan
  - S-scan
  - .....

###### b) Le traducteur multiéléments

Le traducteur multiéléments composé :

- D'une sonde : 5L32-A11



- le nombre d'élément : 32 éléments
- la fréquence : 5MHz
- la largeur : 22 (mm)

- D'un sabot : SA11-N55S

###### c) la pièce

Notre pièce est une soudure contenant deux faces nommées différemment. (L'une nommée OV et l'autre VO).

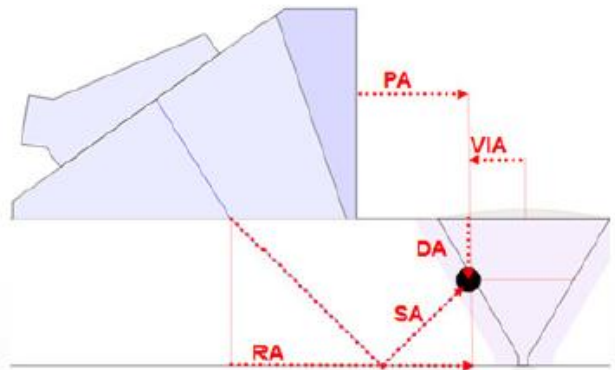
Fig. 10. Profil de la soudure écart type V.



- La nature de la pièce : Acier Doux.
- L'épaisseur de la pièce : 12 (mm)
- Nature de la soudure : V écart

Le schéma ci-dessous montre quelque référence pour dimensionner la position d'un défaut dans une soudure.

Fig. 11. Dimensions pour référencer une position de défaut.



Avec :

- $RA^{\wedge}$  : distance sur la surface de la pièce entre le point d'incidence et l'indication détectée dans la porte A.
- $SA^{\wedge}$  : parcours sonore à partir du point d'incidence jusqu'à l'indication détectée dans la porte A.
- $PA^{\wedge}$  : distance sur la surface de la pièce entre la face avant du sabot(ou de la sonde) et l'indication détectée dans la porte A.
- $DA^{\wedge}$  : profondeur dans la pièce du réflecteur produisant l'indication détectée dans la porte A.
- $VIA^{\wedge}$  : position volumétrique sur l'axe d'index de l'indication détectée dans la porte A.

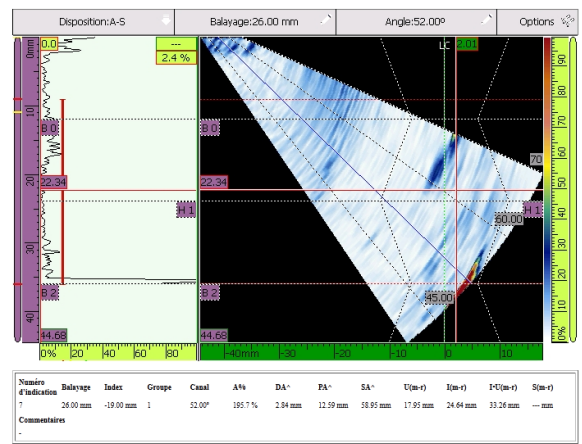
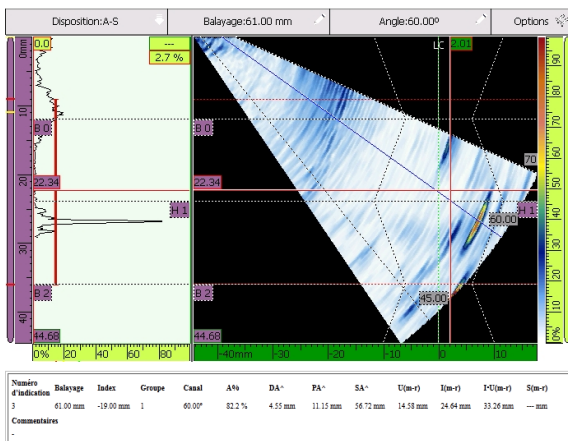
##### 2) Resultats obtenus

L'objectif de ces résultats était de détecter les défauts qui sont situés dans la soudure.

Dans notre étude nous avons fait un balayage angulaire des deux faces de la soudure, nous obtenons alors les résultats suivants :

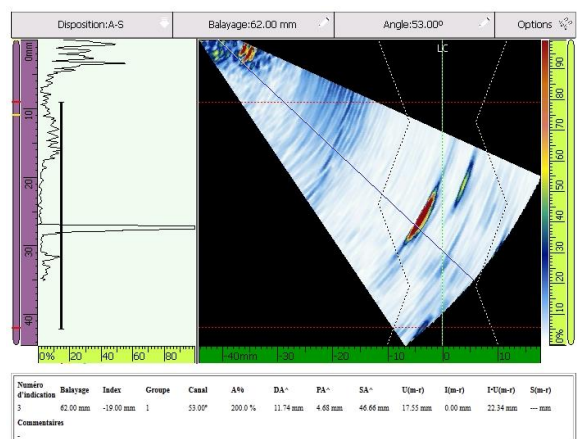
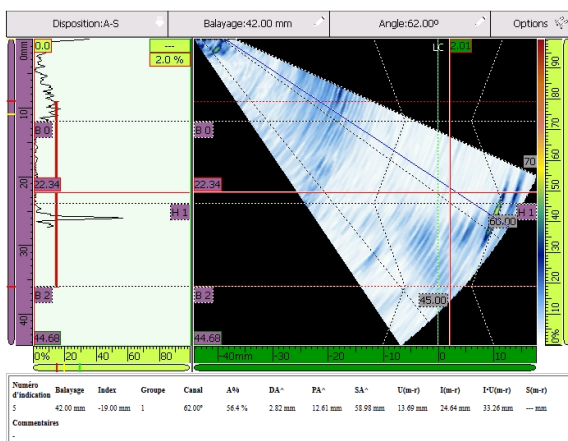
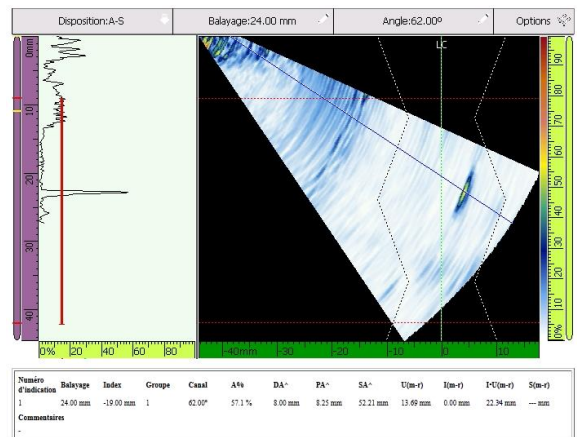
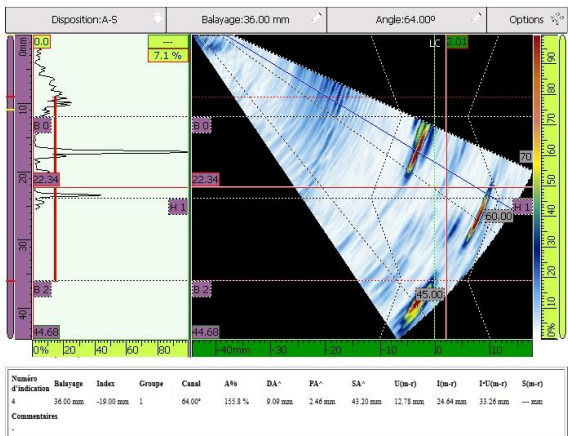
- La partie OV

Fig. 12 . Cartographie A-scan,S-scan de la partie OV du soudure.



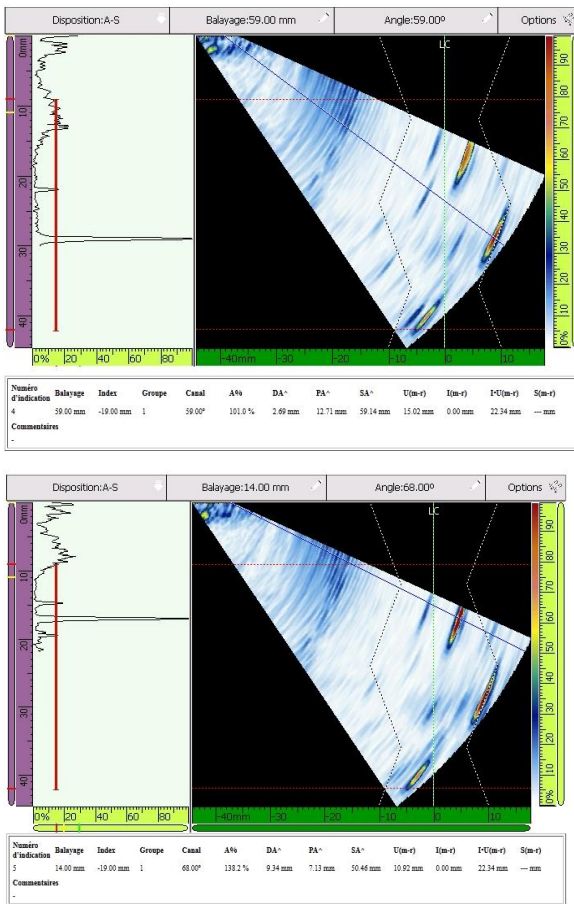
- La partie VO

Fig. 13 . Cartographie A-scan,S-scan de la partie VO du soudure.



## REFERENCES

- [1] Daniel CHAUVEAU, "Nouvelles possibilités offertes par la technique FMC/TFM embarqué dans un équipement multiéléments portable pour l'aide à la caractérisation des défauts de soudures", article, Institut de Soudure Industrie.
- [2] Documentation OLYMPUS, Phased Array testing 'Basic Theory for Industrial Applications'.
- [3] Alex FIDAHOUSSEN, « Développement de la méthode reconstruction ultrasonore pour la localisation et la caractérisation de défauts », Thèse de doctorat, université paris-sud, faculté des sciences d'orsay, 2012.
- [4] S.-J. SONG, H. J. SHIN et Y. H. JANG : Development of an ultrasonic phased array system for nondestructive tests of nuclear power plant components. Nuclear Engineering and Design, 214:151–161, 2002.
- [5] S. MAHAUT, O. ROY, C. BERONI et B. ROTTER : Development of phased array techniques to improve characterization of defect located in a component of complex geometry. Ultrasonics, 40:165–169, 2002.
- [6] J. POGUET, L. CHUPIN, P. GENDREU, S. MAHAUT et O. ROY : Contrôle ultrasonore au moyen de transducteurs multi-éléments : design et applications. The e-Journal of Non destructive Testing & Ultrasonics, 6(8), 2001.



Le résultat du balayage angulaire présenté ci-dessus a été réalisé avec une ouverture de 16 éléments centrée sur la sonde 32 éléments.

D'après les résultats que nous avons obtenus et qui sont présentés dans les images ci-dessus des deux parties de la soudure, nous sommes arrivés à détecter les défauts de la pièce contrôlée.

La nature de ces défauts peut être un bulle d'air et un manque de pénétration.

## V. CONCLUSION

Durant ce travail, nous avons pu contrôler la soudure par le technique ultrasonore multiélément et nous sommes arrivés à détecter les défauts de la pièce contrôlée.

En se basant sur les résultats expérimentaux, nous arrivons à identifier l'origine des défauts, ces défauts sont dus à des bulles d'air et un manque de pénétration.

Enfin, le contrôle par ultrasons multiéléments, nous a permis de contrôler la soudure, de détecter l'entaille des défauts dans toutes les positions et de l'obtenir un diagnostic approfondi.