

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CONTRÔLE DES RECHARGEMENTS DE RAILS

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR THE UT-INSPECTION OF RAIL REPAIRS

Ph. Brédif¹, J. Plu², Ph. Pouligny² and C. Poidevin¹

¹CEA LIST, Centre de Saclay, point courrier 120, F-91191 Gif-sur-Yvette cedex, France ;

²SNCF, Direction de l'Ingénierie, France

philippe.bredif@cea.fr

Résumé

La SNCF utilise la technique du soudage à l'arc en voie pour remettre en état les rails présentant une altération de la table de roulement (opérations de rechargement). La présence de petites porosités dans le métal déposé peut entraîner des phénomènes de fissuration et mettre en cause l'intégrité du rail. Ce papier présente une méthode de contrôle par ultrasons développée pour détecter, dénombrer et classer par taille des défauts d'origine gazeuse de dimensions supérieures ou égales à 300 µm pouvant être présents dans un rechargement. Cette méthode repose sur la mise en œuvre d'un transducteur multi-éléments associé à un traitement de données spécifique. Il est ainsi possible de réaliser un contrôle complet du rechargement tout en limitant le déplacement mécanique du transducteur suivant l'axe du rail. Le balayage dans le plan perpendiculaire est assuré par des enchainements de commutations électroniques et de balayages angulaires. Le transducteur présente de plus une articulation en son centre pour conserver des conditions de couplage favorables sur des géométries de rail différentes de la géométrie nominale. Un traitement de données basé sur la simulation du champ ultrasonore par le logiciel CIVA a été développé. Enfin, la capacité de la méthode à détecter, localiser et classer correctement les inclusions suivant plusieurs niveaux de tailles a été évaluée expérimentalement en laboratoire sur des coupons de rail réels.

Abstract

French national railways (SNCF) proceeds to operations of repairs on rails damaged on the surface. Gas inclusions present in repairs may induce cracking, which could affect the rail integrity. This paper presents a NDT phased-array method developed to detect and characterize small gas inclusions in the volume of the repair. The method is based on the implementation of a contact phased-array transducer associated with a specific processing. The transducer is articulated in order to conform as much as possible to the non-nominal rail sections. The phased-array probe allows to limit mechanical displacements to only one axis, along the longitudinal plane of the rail. The zone coverage in the plane perpendicular to the axis of the rail is performed through electronic commutation and beam steering. The data analysis is done using CIVA software. A processing based on ultrasonic field computation was developed. The method was experimentally assessed in laboratory on real repairs. Experiments proved the ability of the method to detect, locate and classify gas inclusions according to several ranges of sizes.

INTRODUCTION

Des réparations mettant en œuvre la technique de soudage à l'arc sont réalisées par la SNCF sur des rails présentant une altération de la table de roulement. Cette réparation, appelée opération de rechargement, consiste tout d'abord à meuler la zone endommagée puis à y déposer un métal d'apport (une à plusieurs couches, de 2 à 12 mm de profondeur). Suivant les conditions atmosphériques, des inclusions gazeuses peuvent apparaître dans ces rechargements et, par la suite, être à l'origine de fissurations (Figure 1).

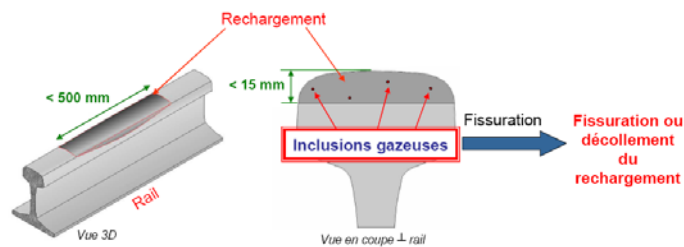


FIGURE 1. Illustration du contexte de l'étude.

Une méthode d'inspection ultrasonore a été développée dans le but de localiser, dénombrer et dimensionner les inclusions gazeuses présentes dans les rechargements. L'objectif est de détecter des défauts d'une taille supérieure ou égale à $300\ \mu\text{m}$ (limite normative d'acceptation des défauts [2]) et de dresser la cartographie des zones du rechargement où la concentration des défauts est plus importante. La principale difficulté d'une telle inspection provient d'une part de la dimension très petite des défauts recherchés et d'autre part, de la géométrie du rail inspecté qui peut varier suivant son état d'usure. Ceci implique pour le traducteur de pouvoir s'adapter autant que possible à la géométrie du rail tout en générant un faisceau ultrasonore cohérent dans celui-ci. Ce papier présente tout d'abord la méthode ainsi que l'instrumentation développées. Une méthode de traitement des données est ensuite décrite et appliquée afin d'en évaluer les performances sur un rechargement réalisé en conditions optimales (à l'abri, par un opérateur confirmé) dit « rechargement type ».

PRESENTATION DE LA METHODE D'INSPECTION ULTRASONORE

La méthode d'inspection est basée sur l'utilisation d'un traducteur multi-éléments linéaire. Celui-ci est déplacé uniquement suivant l'axe du rail pendant qu'un balayage électronique est réalisé dans le plan perpendiculaire du rail (figure 2).

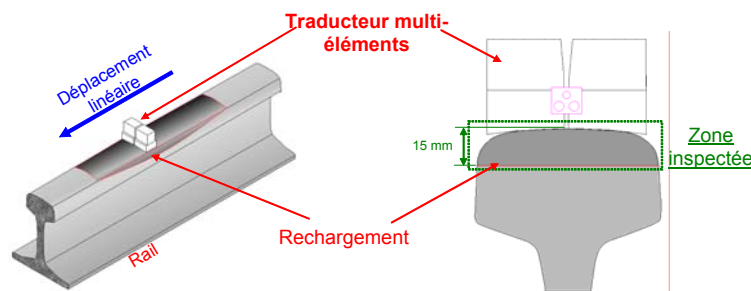


FIGURE 2. Principe de la méthode.

Le traducteur multi-éléments de contact, spécifiquement développé pour cette application (Figure 3), présente une mise en forme cylindrique afin de focaliser naturellement les ultrasons dans le plan perpendiculaire du rail, la focalisation dans le plan incident étant assurée par l'application de lois de retards. Dans le but de s'adapter au mieux à la surface des rails présentant une géométrie dégradée, le traducteur présente une flexibilité partielle assurée par une articulation centrale, améliorant ainsi le couplage entre le sabot et la surface d'inspection.

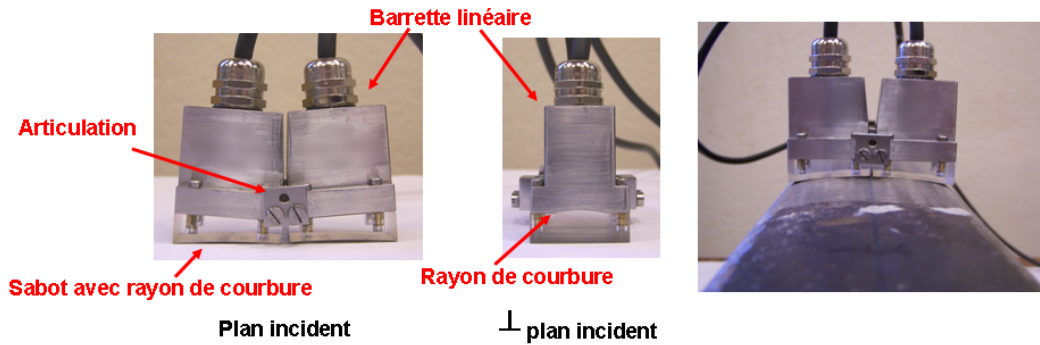


FIGURE 3. Traducteur multi-éléments linéaire.

Plusieurs configurations de contrôle ont été définies à l'aide des outils de simulation du logiciel CIVA afin d'inspecter les différentes régions du champignon du rail. Le traducteur génère ainsi successivement des ondes longitudinales à 0° sous la table de roulement, des ondes longitudinales réfractées pour inspecter les premiers millimètres du rechargement et un balayage angulaire sous chacun des congés latéraux. La sonde est ensuite déplacée le long du rail tout en répétant ces trois configurations d'inspection (Figure 4). La mise en œuvre expérimentale de ce traducteur a été réalisée avec un système d'acquisition M2M.

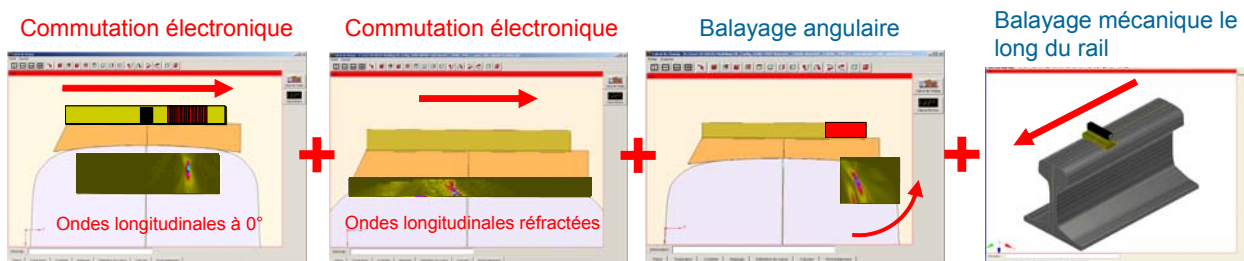


FIGURE 4. Configurations de contrôle.

EVALUATION DE LA METHODE D'INSPECTION SUR UN RECHARGEMENT TYPE

Inspection de la zone sous la table de roulement

La figure 5 montre plusieurs exemples de vues Cscan et Bscan provenant d'une acquisition réalisée sous la table de roulement. On observe que des inclusions gazeuses sont détectées dans tout le volume de la région inspectée.

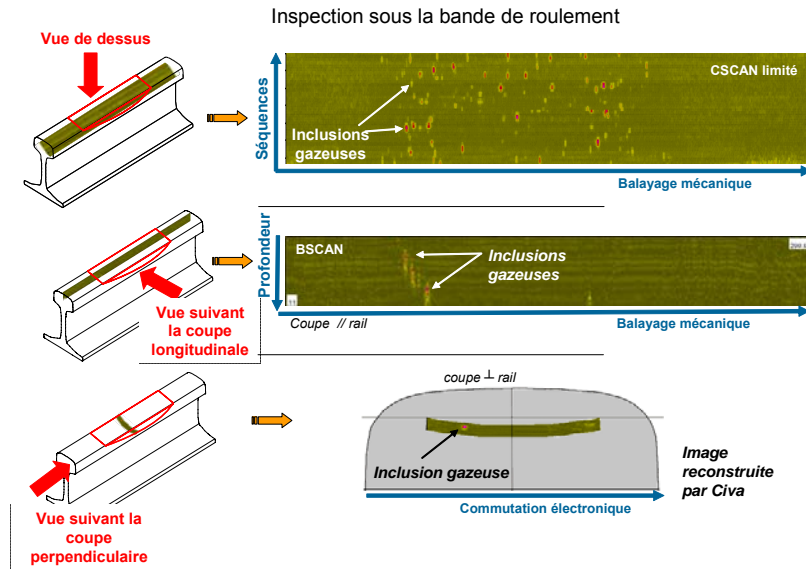


FIGURE 5. Acquisition sous la table de roulement.

Inspection des premiers millimètres sous la table de roulement

L'inspection des premiers millimètres sous la table de roulement est réalisée par des ondes longitudinales réfractées avec un angle suffisamment important pour minimiser la zone morte induite par l'écho d'interface.

La Figure 6 montre deux Bscans provenant de la même acquisition, le premier suivant l'axe du rail, le second perpendiculaire à ce même axe. Ces résultats montrent la capacité de la méthode à détecter des défauts à partir d'un millimètre sous la surface de contrôle, ce qui constitue une réelle avancée dans le domaine de l'inspection des rails.

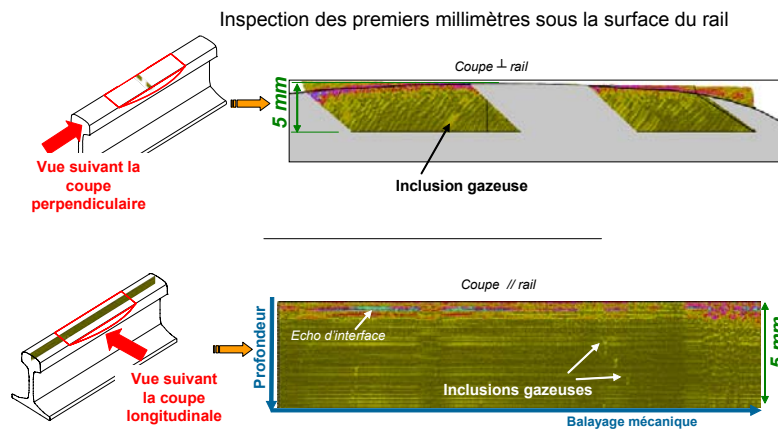


FIGURE 6. Acquisition des premiers millimètres sous la surface du rail.

Acquisition sous les congés latéraux

L'inspection des congés latéraux est réalisée à partir d'un balayage angulaire. Un Cscan ainsi qu'un Bscan dans le plan perpendiculaire sont présentés sur la Figure 7. Des inclusions sont également détectées dans tout le volume inspecté.

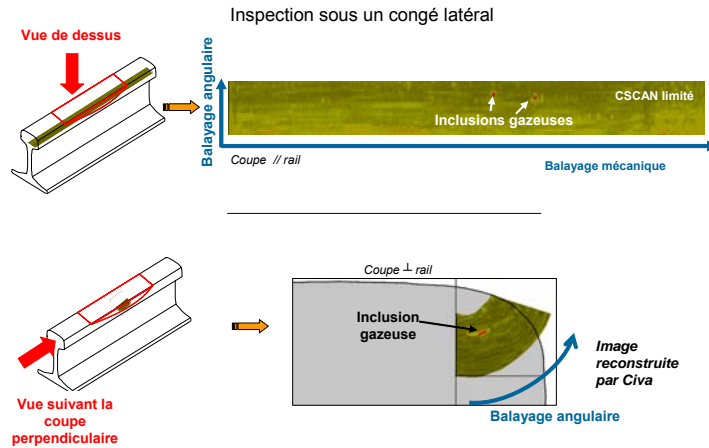


FIGURE 7. Acquisition sous un congé latéral.

TRAITEMENT DE DONNEES

La caractérisation mise en œuvre a pour objectif de localiser les défauts, de les classer suivant leur taille et de déterminer leur concentration par zone.

Compte tenu des dimensions de la tache focale du faisceau ultrasonore et des défauts, il n'est pas possible de dimensionner ces derniers par une méthode telle que la méthode à -6 dB. La technique de dimensionnement employée ici est donc basée sur le fait que l'amplitude des échos de défauts est liée à leur taille, en supposant que leur géométrie est assimilable à une sphère. La corrélation entre la taille et l'amplitude est alors établie en utilisant des défauts étalons de dimensions connues.

Cette méthode de dimensionnement peut être mise en œuvre à condition de pouvoir décorrélérer les variations d'amplitude dues à la taille des défauts de celles dues aux champs ultrasonores (effets de champ). Pour ce faire, une technique de traitement de données a été développée et mise en œuvre afin de corriger le second effet. La première partie de ce traitement consiste à définir une DAC (Depth Amplitude Compensation) propre à chaque tir pour compenser les variations de sensibilité du champ en profondeur. La seconde partie du traitement a pour objet de compenser les variations de sensibilité entre les différents tirs par l'application d'une normalisation.

Principe du traitement

Compte tenu du nombre élevé de tirs et de la géométrie du rail, les déterminations de la DAC et de la normalisation entre les tirs ne peuvent être déterminées expérimentalement. Pour ces raisons, les outils de simulation ont été mis en œuvre.

Ainsi pour chaque tir, la courbe DAC a été définie en simulant le champ ultrasonore le long du trajet ultrasonore principal. La courbe Amplitude(temps) obtenue de cette manière le long du trajet permet de définir la DAC. La Figure 8 montre trois exemples de calculs de champ (cf. courbes) le long du trajet principal du faisceau (cf. segment de droite).

Exemple : simulation de 3 tirs

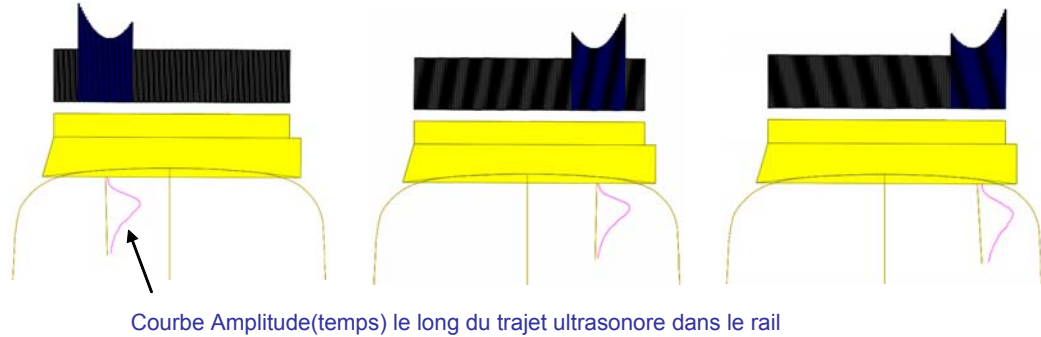


FIGURE 8. Exemples de champs ultrasonores simulés par CIVA.

Les calculs de simulation fournissent de plus les variations de sensibilité existant entre les tirs. Il est alors possible d'en déduire les facteurs de normalisation applicables entre ceux-ci.

Mise en œuvre du traitement de données

La méthode de traitement de données a tout d'abord été mise en œuvre sur une maquette contenant des trous génératrice de 0.5 mm de diamètre. La Figure 9 montre les résultats d'acquisition obtenus sur cette maquette avant et après l'application du traitement. On constate ainsi qu'avant traitement, il existe un écart de 6 dB entre les deux génératrices situées à 9 et 12 mm de profondeur. Après le traitement, cette différence n'est plus que de 1 dB. La relation entre la taille des défauts et l'amplitude des échos peut alors être établie dans toute la zone inspectée.

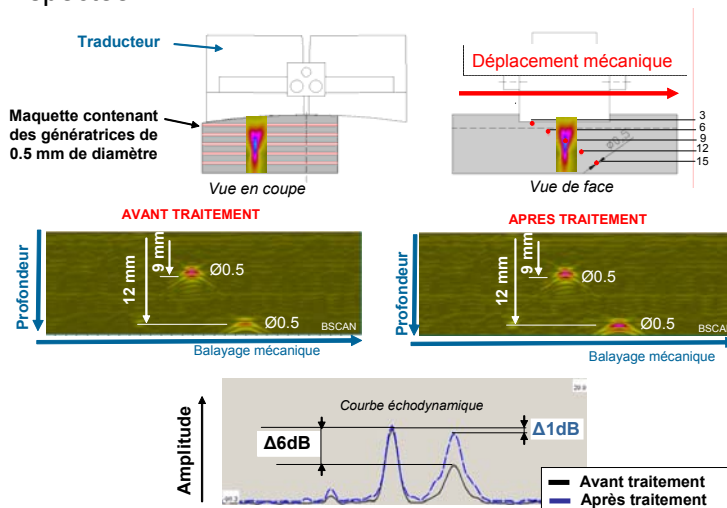


FIGURE 9. Application du traitement sur les trous génératrice

ANALYSE DES ACQUISITIONS

Etalonnage sur des défauts de dimensions connues

La relation entre la taille et l'amplitude des défauts a été établie expérimentalement sur des maquettes contenant des défauts à fond hémisphérique. La Figure 10 montre un exemple de maquette contenant trois trous de 0.3, 0.6 et 0.9 mm. Cette dernière a été utilisée pour déterminer un seuil de discrimination entre les défauts dans la zone située sous la table de roulement. La courbe échodynamique montre, pour un seul tir, l'amplitude des échos provenant des génératrices durant le déplacement mécanique du traducteur. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 1.

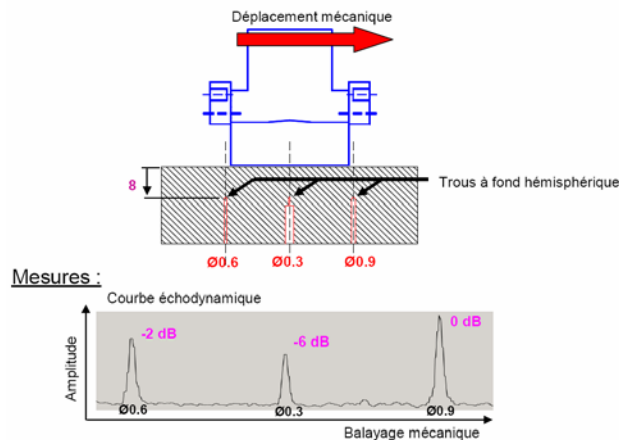


FIGURE 10. Etalonnage sur des défauts connus.

Taille	Ø0.3	Ø0.6	Ø0.9
Amplitude	-6 dB	-2 dB	0 dB

TABLEAU 1. Amplitude des échos en fonction de la taille des défauts.

Deux seuils en amplitude ont alors pu être définis à partir de ces acquisitions, permettant ainsi de classer les défauts suivant trois catégories de tailles :

- les défauts de diamètre supérieur ou égal à 0.6 mm avec une amplitude supérieure ou égale à -2 dB
- les défauts de diamètre compris entre 0.3 et 0.5 mm avec une amplitude comprise entre -6 dB et -2 dB
- les défauts de diamètre inférieur à 0.3 mm avec une amplitude inférieure à -6 dB.

Présentation des outils de segmentation de CIVA

Les outils de segmentation présents dans CIVA permettent d'obtenir plusieurs informations telles que le nombre de défauts détectés, la position de chacun, leur amplitude maximale. Il est également possible de classer les défauts suivant ces différents critères. Le principe de la segmentation repose sur la recherche d'une cohérence spatiale entre les signaux d'une même acquisition afin de les réunir tout d'abord en segments 2D puis en groupes 3D. Ce

traitement est réalisé suivant trois étapes successives illustrées sur la Figure 11. Chaque groupe correspond finalement un défaut détecté dans le rechargement.

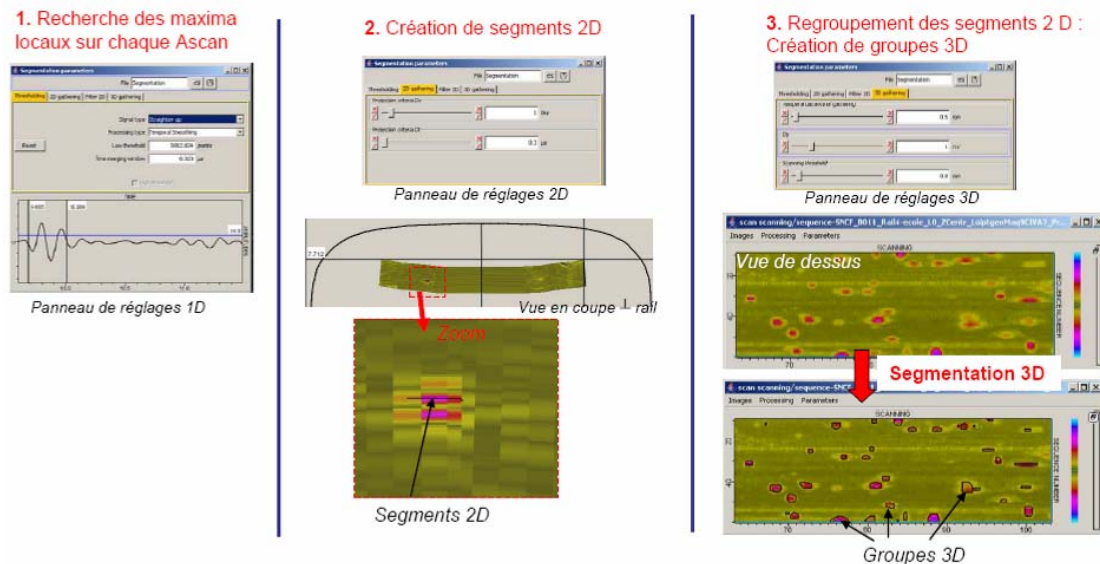


FIGURE 11. Présentation des outils de segmentation.

Application des outils d'analyse aux données d'acquisition

La segmentation appliquée sur les acquisitions provenant du rechargement type a permis de dénombrer 226 défauts sous la table de roulement. Après correction des effets de champs par application du traitement de données présenté ci-dessus, il est possible de classer ces défauts dans les trois catégories précédemment définies. On observe alors que 16 défauts ont une taille supérieure ou égale à 0.6 mm, 54 ont une taille comprise entre 0.3 et 0.5 mm et 156 sont inférieurs à 0.3 mm. Des informations associées à chaque défaut sont fournies dans un rapport d'analyse contenant : le numéro d'identification du défaut, son amplitude et sa position dans le rail. Il est également possible d'exporter les défauts segmentés dans une représentation 3D de la pièce.

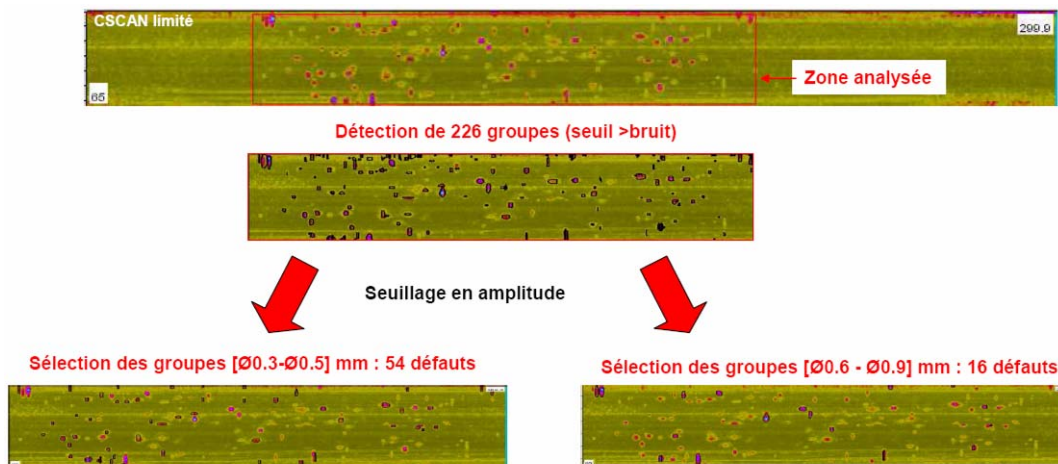


FIGURE 12. Application de la segmentation sur une acquisition.

VALIDATION DE LA METHODE

Comparaison entre des acquisitions UT et RT

Le dimensionnement par ultrasons mis en œuvre dans cette étude a été comparé à des mesures faites sur des résultats de contrôles radiographiques. La Figure 13 montre un exemple de cette comparaison effectuée sur une petite portion du rechargement. On constate que les défauts sont détectés aux mêmes positions sur les deux acquisitions. Il est à noter que l'inspection ultrasonore détecte plus d'indications que l'inspection radiographique.

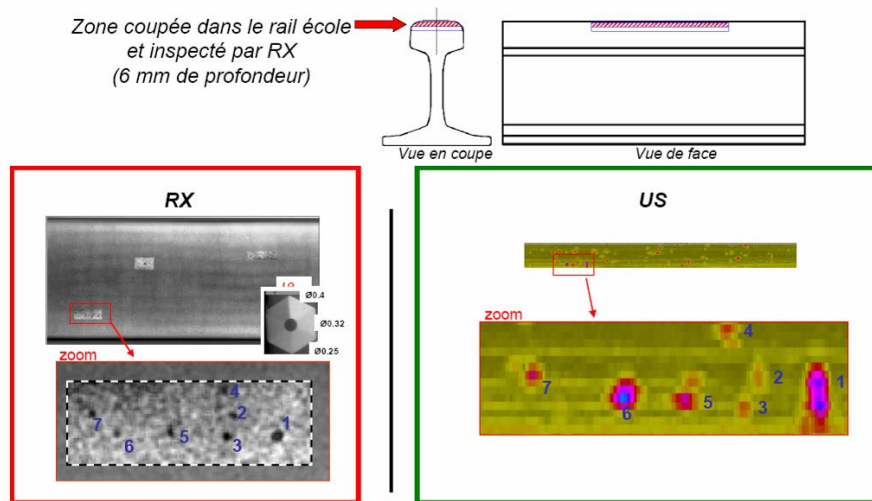


FIGURE 13. Comparaison entre acquisitions RX et US.

Des dimensionnements ont été réalisés dans plusieurs zones du rechargement type à partir des deux types d'acquisition, dont une comparaison est reportée sur la Figure 14. Celle-ci montre un bon accord entre les méthodes ultrasonores et radiographiques, avec pour cet échantillon de données, un seul défaut non classé dans la même catégorie de taille. Ce résultat tend à montrer la validité de la méthode développée. De nouvelles comparaisons entre les acquisitions ultrasonores et radiographiques seront réalisées afin de confirmer ces résultats.

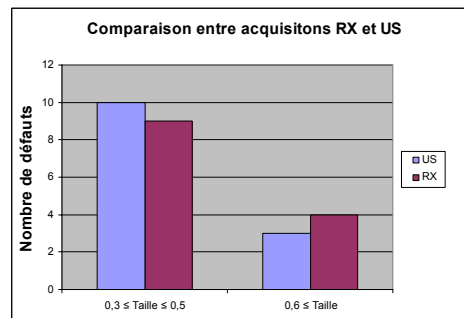


FIGURE 14. Comparaison entre le dimensionnement par RX et par US.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une méthode d'inspection ultrasonore mettant en œuvre un traducteur multi-éléments a été développée afin de caractériser les petites inclusions gazeuses pouvant être présentes dans les rechargements de rails. Cette méthode a été développée à l'aide des outils de simulation du logiciel CIVA. Celle-ci a ensuite été évaluée expérimentalement sur un rechargement type montrant ainsi que des inclusions gazeuses peuvent être détectées dans tout le volume du rechargement.

Une procédure de traitement et d'analyse a également été développée pour localiser, dénombrer et classer les inclusions gazeuses dans trois catégories de taille. Cette méthode de caractérisation est basée sur le principe que la taille d'un défaut est liée à l'amplitude de son écho ultrasonore. Ceci n'est cependant possible qu'après avoir appliqué un traitement permettant de corriger les effets de champ du faisceau ultrasonore.

Des acquisitions ultrasonores ont été réalisées sur un rechargement type puis comparées à des résultats de contrôles radiographiques. Il a ainsi été observé que les inclusions gazeuses étaient détectées aux mêmes positions dans les deux cas et que le dimensionnement des défauts par ces deux méthodes présentait un bon accord. Des outils de segmentation ont finalement été mis en œuvre pour analyser automatiquement les acquisitions ultrasonores. Cet outil permet ainsi de fournir un rapport contenant plusieurs informations tel que le nombre total défauts, la position et l'amplitude de chacun.

Cette étude a permis de démontrer la faisabilité de la méthode en laboratoire. La prochaine étape consistera à développer un prototype incluant le dispositif ultrasonore ainsi qu'une mécanique adaptée afin de confirmer la faisabilité sur site.

REFERENCES

- [1] P. Calmon, S. Mahaut, S. Chatillon and R. Raillon, "CIVA: an expertise platform for simulation and processing NDT data ", Ultrasonics 44 (2006), e975-e979
- [2] EN 15594:2006 : Railways applications – Track – Restoration of rails by electric arc welding