

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 156 203

②1 N° d'enregistrement national : **23 13363**

⑤1 Int Cl⁸ : **G 01 N 29/44 (2024.01), G 01 N 29/04**

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 30.11.23.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 06.06.25 Bulletin 25/23.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *FRAMATOME Société par actions simplifiée (SAS) — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : ANAGNOSTOPOULOS Eleftherios, SAILLANT Jean-François, BLEUZE Alexandre et CHAFAI Yassine.

⑦3 Titulaire(s) : *FRAMATOME Société par actions simplifiée (SAS).*

⑦4 Mandataire(s) : Lavoix.

⑤4 Méthode de détermination d'une loi de retards, méthode d'inspection, dispositif et produit-programme d'ordinateur associés.

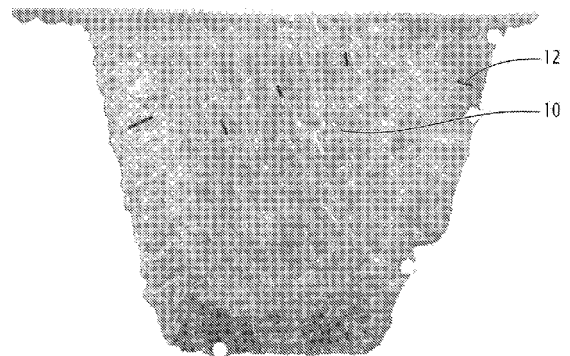
⑤7 Méthode de détermination d'une loi de retards, méthode d'inspection, dispositif et produit-programme d'ordinateur associés

L'invention concerne une méthode de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure (10), comprenant les étapes suivantes :

- fourniture d'informations sur la soudure (10) comprenant l'agencement de grains de la soudure et une orientation respective desdits grains,
- modélisation de la soudure (10) par un modèle numérique basé sur les informations fournies,
- positionnement d'un défaut dans le modèle numérique en un emplacement souhaité,
- simulation dans le modèle numérique d'une propagation d'une onde ultrasonore depuis une localisation à travers la soudure (10) jusqu'au défaut et d'une onde réfléchie résultant,
- détermination des temps de vol de l'onde réfléchie résultant, et
- application d'un retournement temporel sur les temps de vol pour déterminer une loi de retards adaptée.

L'invention concerne aussi une méthode d'inspection, un dispositif et un produit-programme d'ordinateur associés.

Figure pour l'abrégé: Fig 1



FR 3 156 203 - A1



Description

Titre de l'invention : Méthode de détermination d'une loi de retards, méthode d'inspection, dispositif et produit-programme d'ordinateur associés

- [0001] La présente invention concerne une méthode de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure.
- [0002] Il est connu d'utiliser une sonde ultrasonore multiélément pour l'inspection d'une soudure.
- [0003] Il est commun d'appliquer une loi de retards pour l'émission du faisceau ultrasonore par la sonde pour focaliser le faisceau en un emplacement de détection et pour compenser la perte d'énergie acoustique due au phénomène de diffusion.
- [0004] Cependant, le calcul de ces lois de retard sont basées sur un matériau isotrope.
- [0005] Or, une soudure n'est pas une structure isotrope.
- [0006] L'utilisation d'une telle loi de retard entraîne une moins bonne focalisation du faisceau à l'emplacement souhaité et une baisse du ratio signal sur bruit, ce qui complique l'éventuelle détection de défaut dans la soudure audit emplacement.
- [0007] Une alternative est d'utiliser une autre technologie de contrôle non destructif, par exemple par radiographie. Cependant, une telle méthode est plus coûteuse à mettre en œuvre.
- [0008] Le but de l'invention est alors de proposer une méthode de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure, adaptée à la soudure.
- [0009] A cet effet, l'invention a pour objet une méthode de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure par une sonde multiélément, plus particulièrement du circuit primaire d'une centrale nucléaire, la soudure présentant des grains, la méthode comprenant les étapes suivantes :
- [0010] - fourniture d'informations sur la soudure, les informations comprenant l'agencement d'au moins une partie des grains de la soudure et une orientation respective desdits grains,
- [0011] - modélisation de la soudure sous la forme d'un modèle numérique, le modèle numérique étant basé sur les informations fournies,
- [0012] - positionnement d'un défaut dans le modèle numérique en un emplacement souhaité de focalisation,
- [0013] - simulation dans le modèle numérique d'une propagation d'une onde ultrasonore depuis une localisation à travers la soudure jusqu'au défaut à l'emplacement souhaité et d'une onde réfléchié résultant,
- [0014] - détermination des temps de vol de l'onde réfléchié résultant, et

- [0015] - application d'un retournement temporel sur les temps de vol pour déterminer une loi de retards adaptée pour focaliser une onde ultrasonore depuis la sonde multiélément à l'emplacement souhaité depuis la localisation.
- [0016] Le fait de modéliser la soudure à partir d'informations la concernant et de déterminer la loi de retards à partir de ce modèle permet de prendre en compte la microstructure de la soudure, et notamment l'orientation des grains de la soudure.
- [0017] Suivant d'autres aspects avantageux de l'invention, la méthode comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :
- [0018] - les informations sur la soudure sont relatives à une section de la soudure perpendiculairement à une direction d'extension de la soudure, le modèle numérique étant un modèle bidimensionnel,
- [0019] - la méthode comprend une étape d'obtention des informations sur la soudure comprenant l'application d'une attaque chimique sur une maquette de la soudure, l'observation de l'orientation respective de l'au moins une partie des grains de la maquette de la soudure et la mémorisation des orientations respectives,
- [0020] - le modèle numérique de la soudure comprend un nombre fini d'éléments,
- [0021] - les étapes de positionnement d'un défaut, de simulation, de détermination et d'application sont réitérées en considérant successivement différents emplacements souhaités pour au moins une localisation respective,
- [0022] - la méthode comprend une étape de validation du modèle numérique entre l'étape de modélisation et l'étape de positionnement, l'étape de validation comprenant la simulation de la propagation d'au moins une onde ultrasonore dans le modèle numérique et la comparaison de la déviation de l'onde ultrasonore simulée avec une déviation obtenue expérimentalement sur la soudure,
- [0023] - le défaut est un trou percé latéralement dans le modèle numérique, et/ou
- [0024] - la loi de retards adaptée comprend un instant d'émission pour chaque élément de la sonde multiélément, l'instant d'émission étant égal à la soustraction à un moment donné le temps de vol de l'onde réfléchi reçu à l'emplacement dudit élément de la sonde multiélément.
- [0025] L'invention concerne également une méthode d'inspection ultrasonore d'une soudure, utilisant une sonde ultrasonore multiélément, la sonde ultrasonore multiélément émettant une onde ultrasonore avec la loi de retards adaptée déterminée par la méthode de détermination telle que décrit précédemment.
- [0026] La méthode d'inspection est susceptible de présenter la caractéristique suivante : la sonde ultrasonore multiélément émet successivement une onde ultrasonore avec chaque loi de retards adaptée pour chaque emplacement souhaité considéré.
- [0027] L'invention concerne également un dispositif électronique de détermination d'une loi

de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure présentant des grains, le dispositif électronique étant adapté à :

- [0028] - recevoir des informations sur la soudure, les informations comprenant l'agencement d'au moins une partie des grains de la soudure et une orientation respective desdits grains,
- [0029] - modéliser la soudure sous la forme d'un modèle numérique, le modèle numérique étant basé sur l'orientation des grains de la soudure,
- [0030] - positionner un défaut dans le modèle numérique en un emplacement souhaité de focalisation,
- [0031] - simuler dans le modèle numérique une propagation d'une onde ultrasonore depuis une localisation à travers la soudure jusqu'au défaut à l'emplacement souhaité et d'une onde réfléchie résultant,
- [0032] - déterminer les temps de vol de l'onde réfléchie résultant, et
- [0033] - appliquer un retournement temporel sur les temps de vol pour déterminer une loi de retards adaptée pour focaliser une onde ultrasonore depuis la sonde multiélément à l'emplacement souhaité depuis la localisation.
- [0034] L'invention concerne en outre un produit-programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'une méthode telle que décrit précédemment.
- [0035] L'invention concerne également un programme d'ordinateur comportant des instructions logicielles qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, mettent en œuvre une méthode de détermination d'une loi de retards tel que définie ci-dessus.
- [0036] L'invention apparaîtra plus clairement à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins dans lesquels :
- [0037] [Fig.1] la [Fig.1] est une vue en coupe d'une soudure à inspecter selon un exemple,
- [0038] [Fig.2] la [Fig.2] est une représentation schématique d'un premier exemple de méthode de détermination selon l'invention,
- [0039] [Fig.3] la [Fig.3] est une représentation schématique d'un deuxième exemple de méthode de détermination selon l'invention,
- [0040] [Fig.4] la [Fig.4] est une vue schématique d'une maquette de la soudure de la [Fig.1],
- [0041] [Fig.5] la [Fig.5] est une représentation schématique d'un modèle numérique de la soudure de la [Fig.1] avec un défaut et une sonde multiélément, selon un mode de réalisation de l'invention, et
- [0042] [Fig.6] la [Fig.6] est un exemple d'amélioration de la focalisation de l'onde ultrasonore en appliquant les lois de retard adaptées.
- [0043] Un exemple d'une coupe de soudure 10 à inspecter est représenté sur la [Fig.1], à titre d'illustration uniquement.
- [0044] La soudure 10 est, par exemple, une soudure entre deux pièces d'une tuyauterie.

- [0045] La soudure 10 est, par exemple, une soudure du circuit primaire d'une centrale nucléaire.
- [0046] La soudure 10 présente une direction d'extension.
- [0047] La vue en coupe de la [Fig.1] est prise perpendiculairement à la direction d'extension.
- [0048] La soudure 10 présente une surface sur laquelle est susceptible d'être agencée une sonde ultrasonore multiélément.
- [0049] La soudure 10 présente des grains, chaque grain ayant une orientation respective.
- [0050] Sur la [Fig.1], sont représentées des orientations respectives 12 des grains en plusieurs emplacements de la soudure 10.
- [0051] Une méthode de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure par une sonde multiélément, en particulier telle que décrite précédemment, va maintenant être décrite en regard des figures 2 et 3.
- [0052] Un mode de réalisation simplifié de la méthode de détermination est représenté sur la [Fig.3]. Un mode de réalisation enrichi de la méthode de détermination est représenté sur la [Fig.4].
- [0053] La sonde multiélément est une sonde ultrasonore comprenant une pluralité d'éléments, chaque élément étant adapté pour émettre et recevoir une onde ultrasonore.
- [0054] La pluralité d'éléments est, par exemple, sous la forme d'une matrice rectangulaire répartie sur un plan, une matrice linéaire, ou d'anneaux concentriques.
- [0055] La méthode de détermination comprend les étapes suivantes :
- [0056] - fourniture 102, 202 d'informations sur la soudure,
- [0057] - modélisation 104 ; 204 de la soudure sous la forme d'un modèle numérique,
- [0058] - positionnement 106 ; 206 d'un défaut dans le modèle numérique en un emplacement souhaité de focalisation,
- [0059] - simulation 108 ; 208 dans le modèle numérique d'une propagation d'une onde ultrasonore depuis une localisation d'une sonde multiélément à travers la soudure jusqu'au défaut à l'emplacement souhaité et d'une onde réfléchie résultant,
- [0060] - détermination 110 ; 210 des temps de vol de l'onde réfléchie, et
- [0061] - application 112 ; 212 d'un retournement temporel sur les temps de vol pour déterminer une loi de retards adaptée pour focaliser une onde ultrasonore depuis la sonde multiélément à l'emplacement souhaité depuis la localisation.
- [0062] Dans un mode de réalisation particulier, la méthode comprend en outre une étape d'obtention 200 des informations sur la soudure avant l'étape de fourniture 102, 202.
- [0063] L'étape d'obtention 200 comprend, par exemple, l'application d'une attaque chimique sur une maquette 250 de la soudure, dont un exemple est représenté à la [Fig.4], plus particulièrement sur un plan d'observation de la maquette de la soudure 10 perpendiculaire à la direction X de la maquette correspondant à la direction

d'extension de la soudure, l'observation de l'orientation respective de grains de la maquette de la soudure 10, en particulier de l'ensemble des grains du plan d'observation, et la mémorisation des orientations respectives.

- [0064] La maquette de la soudure comprend une soudure 252 entre des pièces 254, 256 similaires aux pièces soudées par la soudure, selon le même procédé de soudage.
- [0065] Les pièces similaires sont, par exemple, des portions des pièces soudées, par exemple un tronçon des pièces soudées selon une découpe perpendiculaire à la direction d'extension de la soudure.
- [0066] Plus particulièrement dans le cas de pièces d'une tuyauterie, la maquette comprend un tronçon d'une portion de tuyauterie.
- [0067] L'application de l'attaque chimique est, par exemple, réalisée sur une face visible 258 de la soudure 252 de la maquette 250.
- [0068] Alternativement ou additionnellement, l'étape d'obtention 200 comprend au moins une étape de découpe de la maquette 250 selon un plan perpendiculaire à la direction X de la maquette correspondant à la direction d'extension de la soudure 10. L'attaque chimique est alors, par exemple, appliquée sur au moins une des faces nouvellement accessibles de la soudure 252.
- [0069] L'attaque chimique permet notamment d'améliorer la visualisation de l'orientation respective des grains de la soudure 10.
- [0070] L'observation de l'orientation respective des grains est, par exemple, réalisée par acquisition d'une image dudit plan et analyse de l'image pour en déduire l'orientation respective des grains de la soudure.
- [0071] Alternativement, l'étape d'obtention 200 comprend la mise en œuvre d'une caractérisation par diffraction des électrons rétrodiffusés dite caractérisation EBSD pour *Electron BackScattered Diffraction* en anglais, dans un microscope électronique à balayage.
- [0072] Puis, l'agencement d'une partie des grains de la soudure, en particulier de l'ensemble des grains du plan d'observation, et l'orientation respective desdits grains sont mémorisés.
- [0073] Lors de l'étape de fourniture 102 ; 202, les informations fournies comprennent l'agencement d'au moins une partie des grains de la soudure, ici de l'ensemble des grains du plan d'observation, et une orientation respective desdits grains.
- [0074] Les informations sur la soudure sont ici relatives à au moins une, ici une, section de la soudure perpendiculairement à la direction d'extension X de la soudure 10, ici au plan d'observation.
- [0075] Les informations sont, par exemple, fournies à un module de réception.
- [0076] Le modèle numérique de la soudure 10 est basé sur les informations fournies.
- [0077] En particulier, le modèle numérique est représentatif de l'agencement d'au moins une

partie des grains de la soudure et l'orientation respective desdits grains.

- [0078] Le modèle numérique est ici généré par un module de modélisation, connecté au module de réception. Le module de réception envoie les informations au module de modélisation.
- [0079] Un exemple de modèle numérique 300 est, par exemple, représenté sur la [Fig.4].
- [0080] Le modèle numérique 300 comprend ici une enveloppe 302, représentant le contour de la soudure, ici dans le plan d'observation.
- [0081] Le modèle numérique 300 comprend un nombre fini n d'éléments 304.
- [0082] Les éléments 304 sont agencés dans l'enveloppe 302.
- [0083] Plus particulièrement, la soudure est divisée en le nombre fini n d'éléments 304, par exemple par quadrillage de l'enveloppe 302.
- [0084] La modélisation est, par exemple, telle que chaque grain de la soudure est modélisé par au moins un élément 304, ici par exemple par au moins quatre, ici quatre, éléments 304.
- [0085] Le nombre d'éléments représentant un grain dépend notamment d'une pluralité de paramètres, comprenant, par exemple, la fréquence de l'onde ultrasonore prévue pour l'inspection ultrasonore décrite, la taille du défaut recherché, et la dimension du grain.
- [0086] A chaque élément 304, est associé une orientation respective représentative.
- [0087] L'orientation respective représentative est représentative de l'orientation respective du ou des grains modélisés au niveau dudit élément.
- [0088] Ici, l'orientation respective représentative des éléments modélisant un grain est, par exemple, l'orientation respective du grain de la soudure.
- [0089] Alternativement, la modélisation est telle que chaque élément 304 modélise une pluralité de grains de la soudure.
- [0090] L'orientation respective représentative de l'élément est, par exemple, égale à l'orientation moyenne de la pluralité de grains modélisés par l'élément.
- [0091] Le modèle numérique 300 est ici un modèle bidimensionnel, plus particulièrement du plan d'observation de la soudure 10.
- [0092] Plus particulièrement, il est considéré ici que le volume de la soudure est une succession de plans identiques, correspondant ici aux informations observées sur le plan d'observation, de sorte que le modèle numérique 300 est représentatif de l'ensemble du volume de la soudure.
- [0093] Alternativement, l'étape d'obtention comprend une étape d'obtention d'informations sur une pluralité de plans d'observation perpendiculaires à la direction d'extension de la soudure, par exemple tel que décrit précédemment sur une maquette.
- [0094] Le modèle numérique 300 est alors, par exemple, un modèle tridimensionnel intégrant les différents plans d'observations.
- [0095] Dans un mode de réalisation, la méthode comprend, en outre, une étape de validation

205 du modèle numérique 300 entre l'étape de modélisation 104, 204 et l'étape de positionnement 106, 206.

- [0096] L'étape de validation 205 comprend la simulation de la propagation d'au moins une onde ultrasonore dans le modèle numérique 300 et la comparaison de la déviation de l'onde ultrasonore simulée, correspondant à la courbure de l'onde, avec une déviation obtenue expérimentalement sur la soudure 10 avec une onde similaire et/ou l'énergie acoustique de l'onde simulée avec l'énergie acoustique obtenue expérimentalement sur la soudure 10 avec une onde similaire selon chaque direction.
- [0097] Par exemple, si la déviation simulée ne diffère de la déviation obtenue expérimentalement que d'une valeur inférieure à un seuil, alors le modèle numérique est validé.
- [0098] Sinon, le modèle numérique n'est pas validé.
- [0099] Alors, un nouveau modèle numérique est généré, en particulier par le module de modélisation.
- [0100] Le nouveau modèle numérique présente, par exemple, un nombre d'éléments strictement supérieur au nombre d'éléments du modèle numérique, et/ou le nouveau modèle numérique est, par exemple, basé sur de nouvelles informations fournies.
- [0101] L'étape de validation est, par exemple, mise en œuvre par un module de validation.
- [0102] Le module de validation est connecté au module de modélisation.
- [0103] Le module de modélisation envoie le modèle numérique au module de validation.
- [0104] Le module de validation réceptionne en outre la déviation obtenue expérimentalement.
- [0105] Le module de validation émet, par exemple vers le module de modélisation, un signal de validation si le modèle numérique est validé ou un signal de refus si le modèle numérique n'est pas validé.
- [0106] Lors du positionnement 106, 206, le défaut 306 est positionné en un emplacement souhaité de focalisation sur le modèle numérique 300.
- [0107] Le défaut 306 s'étend, par exemple, sur au moins un élément 304, par exemple ici sur une pluralité d'éléments 304.
- [0108] Le défaut 306 est, par exemple, un trou percé latéralement, c'est-à-dire ici directement au niveau de l'emplacement souhaité de focalisation, comme si le perçage était réalisé depuis un côté du modèle numérique 300, plus particulièrement perpendiculairement au modèle numérique 300 bidimensionnel.
- [0109] L'étape de positionnement est, par exemple, mise en œuvre par un module de positionnement connecté au module de modélisation.
- [0110] Lors de l'étape de simulation, il est simulé l'émission d'une onde ultrasonore depuis une localisation, plus particulièrement présente dans le modèle numérique à la surface de la soudure 10, vers l'emplacement souhaité.
- [0111] La localisation correspond ici, dans le modèle numérique 300, à l'emplacement

prévu de la sonde multiélément 308 sur la surface de la soudure.

- [0112] L'onde ultrasonore simulée présente des caractéristiques, par exemple comprenant fréquence, forme d'onde ou gain, correspondant à l'onde ultrasonore prévue pour l'inspection ultrasonore.
- [0113] Il est en outre simulé la propagation de ladite onde ultrasonore depuis la localisation jusqu'au défaut 306, plus particulièrement par propagation dans les éléments 304.
- [0114] Le défaut 306 réfléchit alors l'onde.
- [0115] Lors de l'étape de simulation, il est simulé la propagation de l'onde réfléchie résultant de la réflexion sur le défaut 306, plus particulièrement par propagation dans les éléments 304.
- [0116] L'étape de simulation est, par exemple, mise en œuvre par un module de simulation connecté au module de positionnement.
- [0117] Lors de l'étape de détermination, le temps de vol de l'onde réfléchie résultant est déterminé pour chacun des emplacements correspondant à la surface de la soudure en regard desquels les éléments de la sonde multiélément sont agencés.
- [0118] Plus particulièrement, pour chacun des emplacements, le temps de vol correspond au temps mis par l'onde ultrasonore simulée depuis son émission jusqu'à la réception de l'onde réfléchie résultant au niveau de la surface.
- [0119] Lesdits temps de vol sont calculés à partir de la simulation de la propagation de l'onde ultrasonore simulée.
- [0120] L'étape de simulation est, par exemple, mise en œuvre par un module de détermination, par exemple par un script Python.
- [0121] Le module de détermination est connecté au module de simulation.
- [0122] Le module de simulation envoie au module de détermination la simulation de la propagation.
- [0123] Puis, lors de l'étape d'application, les temps de vol déterminés sont retournés temporellement.
- [0124] Plus particulièrement, la loi de retards adaptée comprend un instant d'émission pour chaque élément de la sonde.
- [0125] La loi de retards est telle que l'élément de la sonde multiélément pour lequel le temps de vol déterminé est le plus élevé émet en premier, puis l'élément de la sonde multiélément pour lequel le temps de vol déterminé est le deuxième plus élevé émet en deuxième, et ainsi de suite jusqu'à l'élément de la sonde multiélément ayant le temps de vol déterminé le plus faible.
- [0126] Pour chaque élément de la sonde multiélément, l'instant d'émission t_i est égal à la soustraction à un moment donné t_0 le temps de vol t_v de l'onde réfléchi reçu à l'emplacement prévu dudit élément, soit $t_i = t_0 - t_v$.
- [0127] Le moment donné t_0 est identique pour tous les éléments de la sonde multiélément.

- [0128] En effet, dans un solide, une onde ultrasonore se déplace selon l'équation suivante :
- [0129]
$$\rho_s \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \times (\text{grad}(\text{div}(u)) - \mu \times \text{curl}(\text{curl}(u)))$$
- [0130] avec u le déplacement de l'onde, λ et μ les coefficients de Lamé et ρ_s la densité du solide.
- [0131] Or, si $u(t_1)$ est une solution de l'équation ci-dessus, $u(-t_1)$ également, dans la mesure où l'équation ne contient que des opérateurs de dérivation du deuxième ordre.
- [0132] En inversant les temps de vol simulés, cela permet donc de les compenser avec les informations comprises dans le modèle numérique, y compris l'agencement et l'orientation respective des grains.
- [0133] Cela permet de déterminer une loi de retards pour l'emplacement souhaité de focalisation, adaptée à la soudure, et en particulier à l'anisotropie de la soudure.
- [0134] L'étape d'application est, par exemple, mise en œuvre par un module d'application.
- [0135] Le module d'application est connecté au module de détermination.
- [0136] Le module de détermination envoie les temps de vol déterminés au module d'application.
- [0137] Dans un mode de réalisation particulier, les étapes de positionnement d'un défaut, de simulation, de détermination et d'application sont répétées en considérant successivement différents emplacements souhaités pour au moins une localisation, comme cela est représenté à la [Fig.3].
- [0138] Lors de la chaque itération de l'étape de positionnement, le défaut est positionné au niveau de l'emplacement souhaité, les étapes de simulation, de détermination et d'application étant alors mises en œuvre avec ledit défaut.
- [0139] La localisation est, par exemple, identique pour chacune des itérations.
- [0140] Additionnellement ou alternativement, les étapes de positionnement d'un défaut, de simulation, de détermination et d'application sont répétées en considérant successivement différentes localisations, plus particulièrement différents emplacements prévus pour la sonde multiélément 308.
- [0141] Dans le présent mode de réalisation, les étapes de positionnement d'un défaut, de simulation, de détermination et d'application sont répétées en considérant l'ensemble des combinaisons des différents emplacements souhaités et des différentes localisations.
- [0142] Les étapes de positionnement d'un défaut, de simulation, de détermination et d'application sont, par exemple, répétées successivement en considérant successivement chacune des différentes localisations, en considérant successivement pour chaque différente localisation les différents emplacements souhaités.
- [0143] Cela signifie que pour une première localisation, on considère l'ensemble des emplacements souhaités, puis pour une deuxième localisation on considère l'ensemble des

emplacement souhaités, et ainsi de suite jusqu'à la dernière localisation.

[0144] Cela permet notamment de couvrir l'ensemble de la zone formée par la soudure.

[0145] L'itération est, par exemple, mise en œuvre par un module d'itération, par exemple par un script Python.

[0146] Le module d'itération est connecté au module de positionnement.

[0147] Cela permet de déterminer une loi de retards adaptée pour chacun des emplacements de la soudure, et ainsi de pouvoir mettre en œuvre une inspection complète de la soudure en mettant en œuvre successivement les différentes lois de retards déterminées.

[0148] Bien que, dans la [Fig.3], la méthode avec les itérations successives soient représentées avec les étapes de validation 205 et d'obtention 200, dans des modes de réalisation particuliers, la méthode comprend les itérations successives, mais pas les étapes de validation 205 et d'obtention 200, ou uniquement l'étape de validation 205, ou uniquement l'étape d'obtention 200.

[0149] Alternativement, dans des modes de réalisation particuliers, la méthode comprend les étapes de validation 205 et d'obtention 200, et non les itérations successives, ou l'étape de validation 205 uniquement, ou l'étape d'obtention 200 uniquement.

[0150] L'invention concerne en outre un dispositif électronique de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure telle que décrite précédemment, et apte à mettre en œuvre la méthode de détermination décrite précédemment.

[0151] Le dispositif électronique de détermination comprend le module de réception, le module de modélisation, le module de positionnement, le module de simulation, le module de détermination et le module d'application.

[0152] En complément facultatif, le dispositif électronique de détermination comprend le module de validation et/ou le module d'itération.

[0153] Le dispositif électronique de détermination comprend une unité de traitement d'informations formée par exemple d'une mémoire et d'un processeur associé à la mémoire.

[0154] Le module de réception, le module de modélisation, le module de positionnement, le module de simulation, le module de détermination et le module d'application, ainsi qu'en complément facultatif le module de validation et/ou le module d'itération, sont réalisés chacun sous forme d'un logiciel, ou d'une brique logicielle, exécutable par le processeur. La mémoire du dispositif électronique de détermination est alors apte à stocker un logiciel pour chacun des modules. Le processeur est alors apte à exécuter chacun des logiciels.

[0155] En variante non représentée, au moins un des modules parmi le module de modélisation, le module de positionnement, le module de simulation, le module de détermination et le module d'application, ainsi qu'en complément facultatif le module de

validation et/ou le module d'itération, est réalisé sous forme d'un composant logique programmable, tel qu'un FPGA (de l'anglais *Field Programmable Gate Array*), ou encore d'un circuit intégré, tel qu'un ASIC (de l'anglais *Application Specific Integrated Circuit*).

- [0156] Lorsque le dispositif électronique de détermination est réalisé sous forme d'un ou plusieurs logiciels, c'est-à-dire sous forme d'un programme d'ordinateur, également appelé produit programme d'ordinateur, il est en outre apte à être enregistré sur un support, non représenté, lisible par ordinateur. Le support lisible par ordinateur est par exemple un medium apte à mémoriser des instructions électroniques et à être couplé à un bus d'un système informatique. A titre d'exemple, le support lisible est un disque optique, un disque magnéto-optique, une mémoire ROM, une mémoire RAM, tout type de mémoire non-volatile (par exemple FLASH ou NVRAM) ou une carte magnétique. Sur le support lisible est alors mémorisé un programme d'ordinateur comprenant des instructions logicielles.
- [0157] L'invention concerne un outre une méthode d'inspection ultrasonore d'une soudure 10, utilisant une sonde ultrasonore multiélément.
- [0158] La méthode d'inspection comprend la réception par la sonde ultrasonore multiélément de la ou des loi(s) de retards adaptée(s) déterminée(s), avec, pour chaque loi, l'emplacement souhaité et la localisation associés à ladite loi, lors d'une méthode de détermination telle que décrite précédemment mise en œuvre préalablement.
- [0159] La méthode d'inspection comprend l'émission par la sonde ultrasonore multiélément d'une onde ultrasonore avec la ou une des lois de retards adaptées, la sonde ultrasonore multiélément étant agencée conformément à la localisation correspondante, et la réception du faisceau réfléchi correspondant.
- [0160] Plus particulièrement, chaque élément de la sonde multiélément émet une onde ultrasonore à l'instant d'émission de la loi de retards.
- [0161] Le faisceau ultrasonore, formé de l'ensemble des ondes ultrasonores, est alors particulièrement focalisé à l'emplacement souhaité de focalisation, y compris lorsque la soudure est particulièrement anisotrope.
- [0162] En cas de défaut, celui-ci réfléchit le faisceau ultrasonore, ce qui est reçu par la sonde multiélément.
- [0163] Le faisceau réfléchi reçu présente un ratio signal sur bruit augmenté.
- [0164] Dans un mode de réalisation particulier, la sonde ultrasonore multiélément émet successivement une onde ultrasonore avec une loi de retards adaptée pour chacun des emplacements de la soudure au moins dans un plan, en particulier avec chacune des lois de retards adaptées déterminées lors des itérations, avec la localisation adaptée de la sonde multiélément.
- [0165] Plus particulièrement ici, la sonde ultrasonore multiélément émet successivement une

onde ultrasonore avec une loi de retards adaptée pour chacun des emplacements de la soudure sur l'ensemble du volume de la soudure, en considérant pour chaque emplacement de la soudure l'emplacement au sein de la section de la soudure perpendiculaire à la direction d'extension.

[0166] Cela permet ainsi de réaliser une inspection complète de la soudure, d'une qualité améliorée.

[0167] Dans le cas où les étapes de positionnement d'un défaut, de simulation, de détermination et d'application ont été mises en œuvre pour différentes localisations, alors la méthode d'inspection comprend une pluralité de détections, chaque détection comprenant l'émission par la sonde ultrasonore multiélément d'une onde ultrasonore avec la ou une des lois de retards adaptées, la sonde ultrasonore multiélément étant agencée conformément à une des localisations, et la réception du faisceau réfléchi correspondant. Les détections sont mises en œuvre avec les différentes localisations de la sonde ultrasonore multiélément.

[0168] Cela permet, par exemple, d'améliorer la couverture de la soudure, notamment pour une soudure complexe dans le cas d'une déviation de l'onde, notamment par son épaisseur et/ou la structure des grains.

[0169] Un exemple d'amélioration de la focalisation de l'onde ultrasonore obtenu grâce à l'invention est représenté sur la [Fig.6].

[0170] A gauche, il est simulé la propagation de l'onde ultrasonore depuis la sonde focalisé vers une zone à inspecter (représentée par le rond) en appliquant une loi de retards non adaptée à l'orientation des grains de la soudure.

[0171] A droite, il est simulé la propagation de l'onde ultrasonore depuis la sonde focalisé vers la zone à inspecter en appliquant la loi de retards adaptée à l'orientation des grains de la soudure selon l'invention.

[0172] On remarque que la focalisation de l'onde ultrasonore au niveau de la zone à inspecter est améliorée grâce à l'invention.

Revendications

- [Revendication 1] Méthode de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure (10) par une sonde multiélément, plus particulièrement du circuit primaire d'une centrale nucléaire, la soudure (10) présentant des grains, la méthode de détermination comprenant les étapes suivantes :
- fourniture (102 ; 202) d'informations sur la soudure (10), les informations comprenant l'agencement d'au moins une partie des grains de la soudure et une orientation respective desdits grains,
 - modélisation (104 ; 204) de la soudure (10) sous la forme d'un modèle numérique (300), le modèle numérique (300) étant basé sur les informations fournies,
 - positionnement (106 ; 206) d'un défaut (306) dans le modèle numérique (300) en un emplacement souhaité de focalisation,
 - simulation (108 ; 208) dans le modèle numérique (300) d'une propagation d'une onde ultrasonore depuis une localisation à travers la soudure (10) jusqu'au défaut (306) à l'emplacement souhaité et d'une onde réfléchie résultant,
 - détermination (110 ; 210) des temps de vol de l'onde réfléchie résultant, et
 - application (112 ; 212) d'un retournement temporel sur les temps de vol pour déterminer une loi de retards adaptée pour focaliser une onde ultrasonore depuis la sonde multiélément à l'emplacement souhaité depuis la localisation.
- [Revendication 2] Méthode de détermination selon la revendication 1, dans laquelle les informations sur la soudure sont relatives à une section de la soudure (10) perpendiculairement à une direction d'extension de la soudure (10), le modèle numérique (300) étant un modèle bidimensionnel.
- [Revendication 3] Méthode de détermination selon la revendication 2, comprenant une étape d'obtention (200) des informations sur la soudure comprenant l'application d'une attaque chimique sur une maquette de la soudure, l'observation de l'orientation respective de l'au moins une partie des grains de la maquette de la soudure et la mémorisation des orientations respectives.
- [Revendication 4] Méthode de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans laquelle le modèle numérique (300) de la soudure comprend un nombre fini d'éléments (304).

- [Revendication 5] Méthode de détermination selon la revendication 4, dans laquelle les étapes de positionnement d'un défaut (106 ; 206), de simulation (108 ; 208), de détermination (110 ; 210) et d'application (112 ; 212) sont répétées en considérant successivement différents emplacements souhaités pour au moins une localisation respective.
- [Revendication 6] Méthode de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, comprenant une étape de validation (205) du modèle numérique (300) entre l'étape de modélisation (204) et l'étape de positionnement (206), l'étape de validation (204) comprenant la simulation de la propagation d'au moins une onde ultrasonore dans le modèle numérique (300) et la comparaison de la déviation de l'onde ultrasonore simulée avec une déviation obtenue expérimentalement sur la soudure (10).
- [Revendication 7] Méthode de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle le défaut (306) est un trou percé latéralement dans le modèle numérique (300).
- [Revendication 8] Méthode de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans laquelle la loi de retards adaptée comprend un instant d'émission pour chaque élément de la sonde multiélément, l'instant d'émission étant égal à la soustraction du temps de vol de l'onde réfléchi reçu à l'emplacement dudit élément de la sonde multiélément à un moment donné.
- [Revendication 9] Méthode d'inspection ultrasonore d'une soudure (10), utilisant une sonde ultrasonore multiélément, la sonde ultrasonore multiélément émettant une onde ultrasonore avec la loi de retards adaptée déterminée par la méthode de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.
- [Revendication 10] Méthode d'inspection selon la revendication 9, lorsqu'elle dépend de la revendication 5, dans laquelle la sonde ultrasonore multiélément émet successivement une onde ultrasonore avec chaque loi de retards adaptée pour chaque emplacement souhaité considéré.
- [Revendication 11] Dispositif électronique de détermination d'une loi de retards pour l'inspection ultrasonore d'une soudure présentant des grains, le dispositif électronique étant adapté à :
- recevoir des informations sur la soudure (10), les informations comprenant l'agencement d'au moins une partie des grains de la soudure et une orientation respective desdits grains,
 - modéliser la soudure (10) sous la forme d'un modèle numérique (300), le modèle numérique (300) étant basé sur l'orientation des grains de la

soudure (10),

- positionner un défaut (306) dans le modèle numérique (300) en un emplacement souhaité de focalisation,

- simuler dans le modèle numérique (300) une propagation d'une onde ultrasonore depuis une localisation à travers la soudure jusqu'au défaut à l'emplacement souhaité et d'une onde réfléchie résultant,

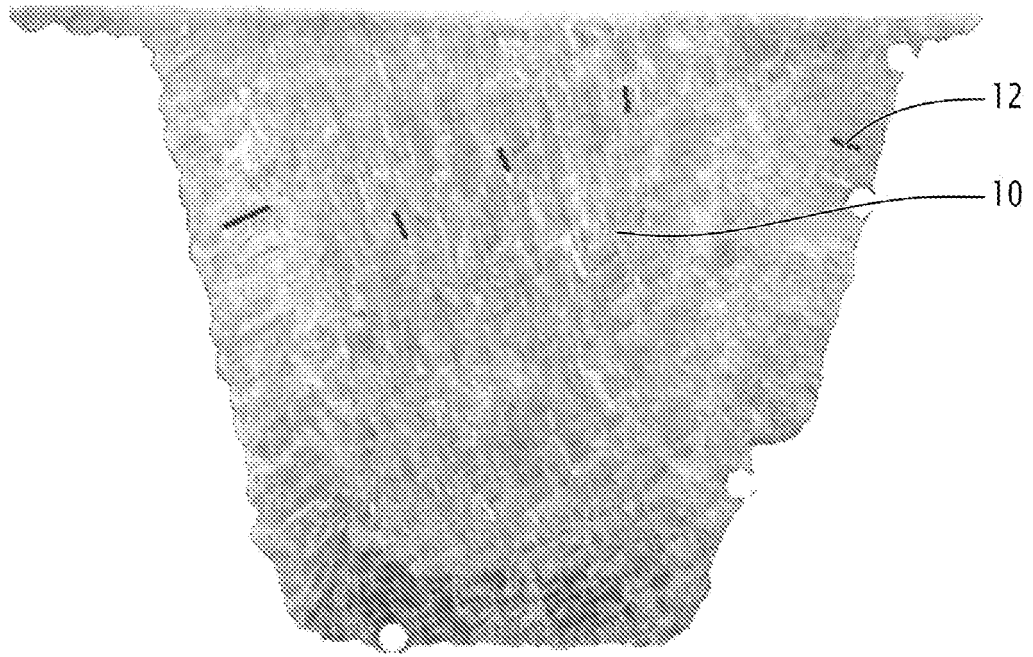
- déterminer les temps de vol de l'onde réfléchie résultant, et

- appliquer un retournement temporel sur les temps de vol pour déterminer une loi de retards adaptée pour focaliser une onde ultrasonore depuis la sonde multiélément à l'emplacement souhaité depuis la localisation.

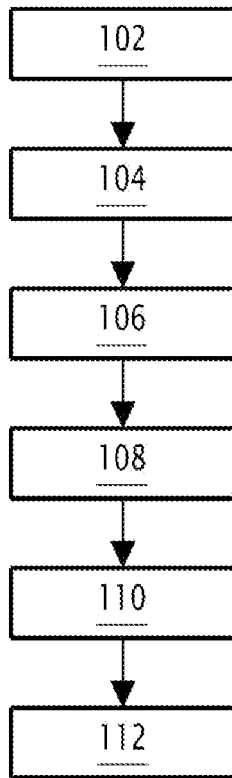
[Revendication 12]

Produit-programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'une méthode selon l'une quelconque des revendications 1 à 10.

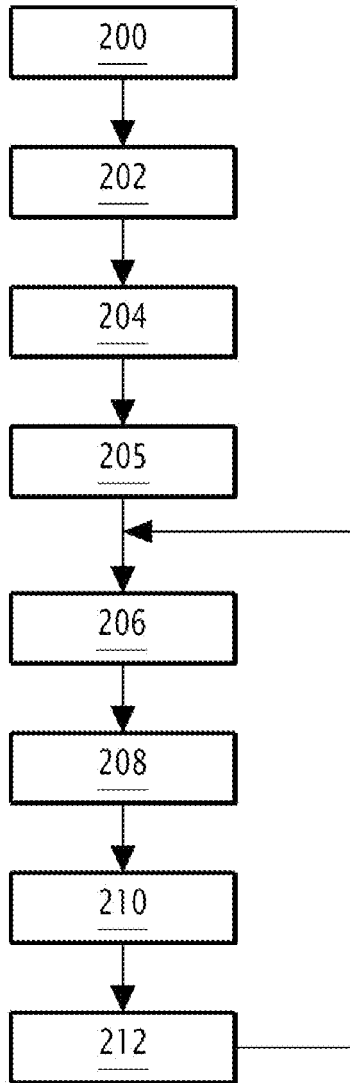
[Fig. 1]



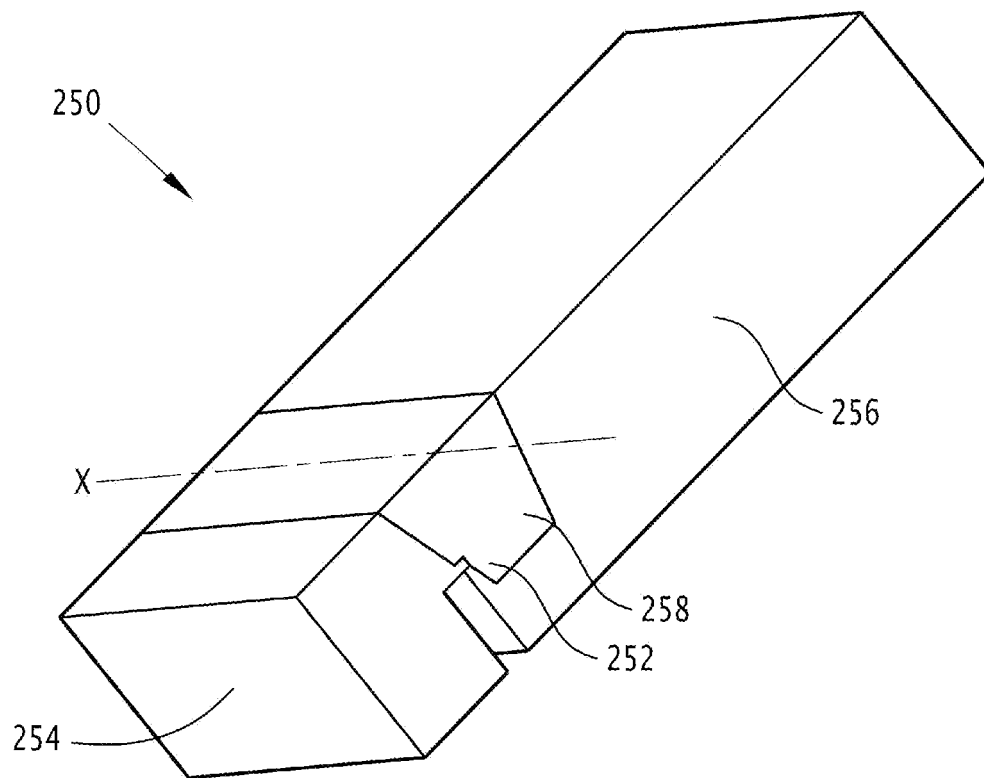
[Fig. 2]



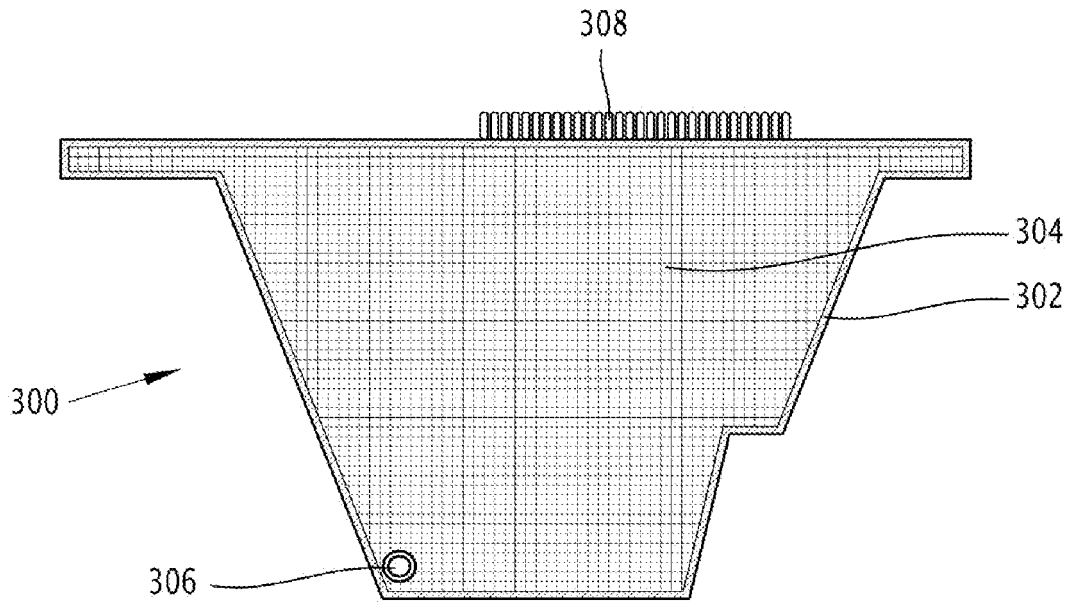
[Fig. 3]



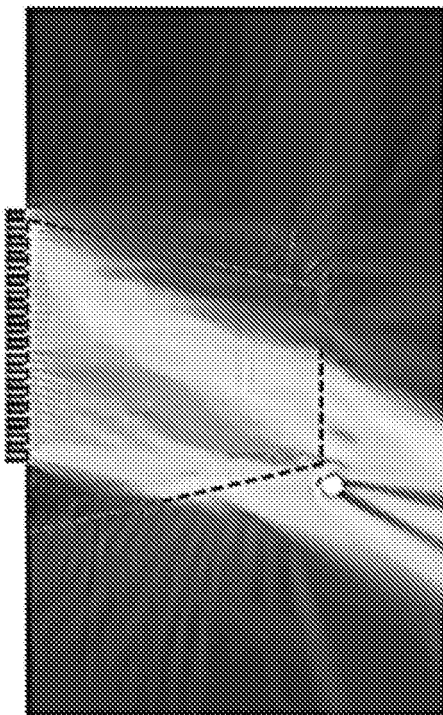
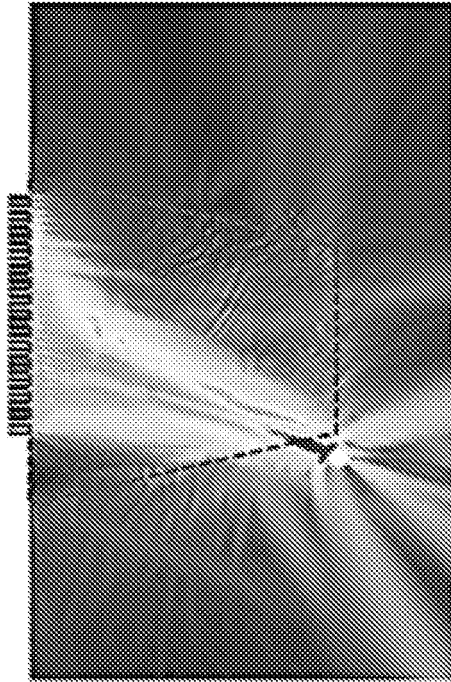
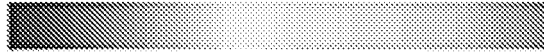
[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]





**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 927777
FR 2313363

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	JING YE ET AL: "Model-based simulation of focused beam fields produced by a phased array ultrasonic transducer in dissimilar metal welds", NDT&E INTERNATIONAL, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 44, no. 3, 11 janvier 2011 (2011-01-11), pages 290-296, XP028147633, ISSN: 0963-8695, DOI: 10.1016/J.NDTEINT.2011.01.003 [extrait le 2011-01-18]	1-8,11, 12	G01N 29/04 G01N 29/44
A	* le document en entier * -----	9,10	
A	FR 3 035 717 A1 (AREVA [FR]) 4 novembre 2016 (2016-11-04) * page 3, ligne 6 - page 8, ligne 7; figures 1-3 * -----	1-12	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G01N
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
26 juin 2024		Trique, Michael	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2313363 FA 927777**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **26 - 06 - 2024**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 3035717 A1	04 - 11 - 2016	CN 107567585 A	09 - 01 - 2018
		EP 3289348 A1	07 - 03 - 2018
		ES 2877585 T3	17 - 11 - 2021
		FR 3035717 A1	04 - 11 - 2016
		WO 2016174172 A1	03 - 11 - 2016
