

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ PROCÉDE DE MESURE DE LA CORROSION D'UNE PIÈCE ET APPLICATION AU
CONTROLE DE LA RESISTANCE MECANIQUE D'UNE PIÈCE CORRODEE.

②② Date de dépôt : 16.04.18.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *DASSAULT AVIATION Société
anonyme — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 18.10.19 Bulletin 19/42.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 12.01.24 Bulletin 24/02.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : RAZIER THOMAS.

⑦③ Titulaire(s) : DASSAULT AVIATION Société
anonyme.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET LAVOIX Société par
actions simplifiée.



Procédé de mesure de la corrosion d'une pièce et application au contrôle de la résistance mécanique d'une pièce corrodée

La présente invention concerne un procédé et un dispositif de mesure de la corrosion d'une pièce. Elle concerne également un procédé de contrôle de la résistance mécanique d'une pièce corrodée dans lequel la corrosion de la pièce est mesurée.

Malgré l'emploi de plus en plus fréquent de matériaux composites, les métaux restent majoritairement employés dans les avions actuels. Or, les pièces métalliques sont régulièrement confrontées à des problèmes de corrosion qui ont pour conséquence de réduire l'épaisseur travaillante de leurs parois et, en conséquence, d'affaiblir leur résistance mécanique.

Pour éviter ces problèmes de corrosion, les pièces métalliques des avions sont le plus souvent recouvertes de couches protectrices, typiquement de peinture. Cependant, il arrive que ces couches protectrices soient dégradées, mettant à nu le métal, qui est alors susceptible d'être corrodé. Or, si cette corrosion est importante, c'est la tenue mécanique globale de l'avion qui peut être impactée.

Les avions sont ainsi soumis à des visites périodiques ayant notamment pour objectif de surveiller l'absence de corrosion de ses pièces métalliques et, en cas de corrosion sur une pièce, de contrôler que cette corrosion n'affecte pas de manière trop importante la résistance mécanique de ladite pièce.

Ce contrôle est le plus souvent effectué manuellement, par application contre les parois des pièces concernées, dans les zones corrodées, d'une sonde à ultrasons qui mesure l'épaisseur de la paroi entre la face contre laquelle la sonde est apposée et la face opposée. Cette mesure doit être réalisée en de multiples points très rapprochés les uns des autres, de sorte à identifier des lignes de niveau le long desquelles l'épaisseur est sensiblement constante, ces lignes de niveau étant ensuite tracées sur la pièce : cela en fait une tâche très fastidieuse, longue et pénible pour l'opérateur en charge de celle-ci, surtout qu'elle doit le plus souvent être réalisée dans des zones difficiles d'accès, l'opérateur devant se contorsionner pour les atteindre.

En outre, cette mesure est sujette à de possibles erreurs, l'épaisseur mesurée dépendant de l'inclinaison de la sonde par rapport à la paroi : ainsi, si la sonde n'est pas disposée rigoureusement perpendiculairement à la paroi dont l'épaisseur est mesurée, la sonde mesure une épaisseur supérieure à l'épaisseur réelle. Or, outre la difficulté pour un opérateur humain de disposer une telle sonde strictement perpendiculairement à la paroi dont l'épaisseur est mesurée, les déformations liées à la corrosion des pièces empêchent régulièrement un positionnement de la sonde scrupuleusement perpendiculaire à la paroi.

D'autres problèmes surviennent au niveau du traitement fait ultérieurement de ces mesures.

Les mesures effectuées sont transmises au bureau de calcul en charge de les analyser sous forme de photographies des pièces concernées laissant apparaître les lignes de niveau tracées par l'opérateur, ainsi que des cotes d'épaisseur et des mesures de dimensions. Elles sont intégrées à un rapport dont la forme peut varier selon l'opérateur ayant réalisé la mesure. Ce rapport doit alors être étudié, toujours manuellement, par les ingénieurs du bureau de calcul, ce qui représente à nouveau une tâche particulièrement longue et fastidieuse.

Ce n'est finalement qu'une fois que les ingénieurs du bureau de calcul auront réussi à interpréter le rapport de mesure et à convertir les informations contenues dans ce dernier sous forme de modèle éléments finis de la pièce corrodée, et qu'ils auront simulé la résistance mécanique de ce modèle éléments finis, qu'une décision pourra être prise quant à la conformité de la résistance mécanique de la pièce corrodée avec l'usage attendu de cette pièce.

Ces contraintes conduisent à des durées de traitement de plusieurs dizaines de jour pour des pièces de seulement 1 m².

Un objectif de l'invention est de raccourcir la durée de traitement nécessaire à la vérification de la conformité de la résistance mécanique de telles pièces corrodées vis-à-vis de l'usage attendu de ces pièces. Un autre objectif est d'accélérer et rendre moins fastidieuses la prise des mesures d'épaisseur des pièces corrodées, ainsi que l'interprétation de ces mesures. Un autre objectif encore est de renforcer la fiabilité des mesures et de l'analyse qui en est faite.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé de mesure de la corrosion d'une pièce, comprenant les étapes suivantes :

- fourniture d'une pièce corrodée,
- fourniture d'une maquette numérique de la pièce originale correspondante,
- acquisition d'un nuage de points d'au moins une surface de ladite pièce corrodée par balayage de ladite surface avec un scanner tridimensionnel,
- identification d'au moins une zone saine dans au moins une paroi de la pièce corrodée,
- acquisition d'au moins une mesure d'épaisseur de la paroi dans ladite zone saine au moyen d'un dispositif de mesure d'épaisseur non destructif,
- création d'une modélisation tridimensionnelle de la pièce corrodée à partir au moins du nuage de points et de la ou chaque mesure d'épaisseur, et

- comparaison automatique de la modélisation tridimensionnelle avec la maquette numérique, avec relevé des écarts d'épaisseur entre la modélisation tridimensionnelle et la maquette numérique.

Selon des modes de réalisation particuliers de l'invention, le procédé de mesure présente également l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toute(s) combinaison(s) techniquement possible(s) :

- le dispositif de mesure d'épaisseur non destructif est constitué par une sonde à ultrasons ;

- l'acquisition de la mesure d'épaisseur comprend l'application du dispositif de mesure d'épaisseur non destructif contre une surface de la paroi qui est balayée avec le scanner tridimensionnel ;

- le scanner tridimensionnel est constitué par un scanner sans contact, en particulier un scanner sans contact actif, par exemple un scanner à triangulation laser ;

- le procédé de mesure comprend, préalablement à la comparaison de la modélisation tridimensionnelle avec la maquette numérique, le recalage de la modélisation tridimensionnelle relativement à la maquette numérique ;

- la maquette numérique est fournie avec un référentiel associé comprenant une origine et trois axes principaux le recalage de la modélisation tridimensionnelle comprenant les sous-étapes suivantes :

- identification, dans la modélisation tridimensionnelle, d'un point de référence correspondant au point d'origine du référentiel,

- repérage, dans la modélisation tridimensionnelle, de trois directions correspondant chacune à un axe principal du référentiel, et

- positionnement du point de référence en coïncidence avec l'origine du référentiel, et alignement de chaque direction avec l'axe principal du référentiel correspondant ;

- le recalage de la modélisation tridimensionnelle comprend les sous-étapes suivantes :

- identification, dans la modélisation tridimensionnelle, d'une pluralité de zones caractéristiques, dont au moins une zone caractéristique non parallèle à au moins deux autres desdites zones caractéristiques,

- reconnaissance, dans la maquette numérique, pour chaque zone caractéristique identifiée, d'une région de la maquette numérique correspondante, et

- mise en coïncidence de chaque zone caractéristique identifiée avec la région de la maquette numérique correspondante ;

- le recalage de la modélisation tridimensionnelle comprend le découpage de la modélisation tridimensionnelle en plusieurs sous-ensembles, les étapes d'identification, de reconnaissance et de mise en coïncidence étant réalisées pour chaque sous-ensemble ;

- 5 - la création de la modélisation tridimensionnelle comprend la création, à partir du nuage de points acquis par le scanner tridimensionnel, d'un maillage surfacique simplifié de la face scannée de la pièce corrodée, et l'étape d'identification des zones caractéristiques comprend la détection des faces du maillage surfacique simplifié présentant au moins un côté de longueur supérieure à une longueur prédéterminée, suivie, pour plusieurs groupes de faces adjacentes ainsi détectées, de la réunion de ces faces adjacentes pour former une zone caractéristique ;

- la pièce corrodée est une pièce d'aéronef ;

L'invention a également pour objet un procédé de contrôle de la résistance mécanique d'une pièce corrodée, comprenant les étapes suivantes :

- 15 - mesure de la corrosion de la pièce corrodée au moyen d'un procédé de mesure tel que défini ci-dessus, et
- vérification de la conformité de la résistance mécanique de la pièce corrodée avec l'usage attendu de cette pièce à partir des écarts d'épaisseur relevés entre la modélisation tridimensionnelle et la maquette numérique.
- 20

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, ce procédé de contrôle présente également la caractéristique suivante :

- la vérification de la conformité de la résistance mécanique comprend les étapes suivantes :

- 25 - fourniture d'un modèle éléments finis de la pièce originale,
- modification du modèle éléments finis en fonction des écarts d'épaisseurs relevés, et
- simulation de la résistance mécanique du modèle éléments finis modifié.

30 L'invention a encore pour objet un dispositif de mesure de la corrosion d'une pièce, comprenant:

- une mémoire dans laquelle est stockée une maquette numérique de la pièce originale correspondante,
- un scanner tridimensionnel adapté pour l'acquisition d'un nuage de points d'au moins une surface de ladite pièce corrodée,
- 35 - un dispositif de mesure d'épaisseur non destructif adapté pour l'acquisition d'au moins une mesure d'épaisseur de paroi de la pièce corrodée,

- un modélisateur configuré pour créer une modélisation tridimensionnelle de la pièce corrodée à partir au moins du nuage de points et de la ou chaque mesure d'épaisseur, et
- un comparateur configuré pour comparer la modélisation tridimensionnelle avec la maquette numérique, et relever des écarts d'épaisseur entre la modélisation tridimensionnelle et la maquette numérique.

Selon des modes de réalisation particuliers de l'invention, le dispositif de mesure présente également l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toute(s) combinaison(s) techniquement possible(s) :

- le dispositif de mesure d'épaisseur non destructif est constitué par une sonde à ultrasons ;

- le scanner tridimensionnel est constitué par un scanner sans contact, en particulier un scanner sans contact actif, par exemple un scanner à triangulation laser ;

- le dispositif de mesure comprend un système de recalage configuré pour recalcr la modélisation tridimensionnelle relativement à la maquette numérique préalablement à la comparaison, par le comparateur, de la modélisation tridimensionnelle avec la maquette numérique ;

- la maquette numérique est fournie avec un référentiel associé comprenant une origine et trois axes principaux, et le système de recalage est configuré pour :

- identifier, dans la modélisation tridimensionnelle, un point de référence correspondant au point d'origine du référentiel,

- o repérer, dans la modélisation tridimensionnelle, trois directions correspondant chacune à un axe principal du référentiel,

- o positionner le point de référence en coïncidence avec l'origine du référentiel, et

- o aligner de chaque direction avec l'axe principal du référentiel correspondant ;

- le système de recalage est configuré pour découper la modélisation tridimensionnelle en plusieurs sous-ensembles et, pour chaque sous-ensemble :

- identifier, dans ledit sous-ensemble, une pluralité de zones caractéristiques, dont au moins une zone caractéristique non parallèle à au moins deux autres desdites zones caractéristiques,

- reconnaître, dans la maquette numérique, pour chaque zone caractéristique identifiée, une région correspondante de la maquette, et

- mettre en coïncidence chaque zone caractéristique avec la région correspondante ; et

- le modélisateur comprend un module pour créer un maillage surfacique simplifié de la face scannée de la pièce corrodée à partir du nuage de points acquis par le scanner tridimensionnel, et le système de recalage est configuré pour effectuer automatiquement l'identification des zones caractéristiques par détection des faces du maillage surfacique simplifié qui présentent au moins un côté de longueur supérieure à une longueur prédéterminée.

L'invention a enfin pour objet un système de contrôle de la résistance mécanique d'une pièce corrodée, comprenant un dispositif de mesure tel que défini ci-dessus, et un dispositif de vérification de la conformité de la résistance mécanique de la pièce corrodée avec l'usage attendu de cette pièce à partir des écarts d'épaisseur relevés entre la modélisation tridimensionnelle et la maquette numérique.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, ce système de contrôle présente également la caractéristique suivante :

- le dispositif de vérification comprend une mémoire stockant un modèle éléments finis de la pièce originale, un module d'adaptation configuré pour modifier le modèle éléments finis en fonction des écarts d'épaisseurs relevés, et un simulateur configuré pour simuler la résistance mécanique du modèle éléments finis modifié.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés, dans lesquels :

- la Figure 1 est un schéma d'un système de contrôle selon l'invention,
- la Figure 2 est une vue en perspective d'un exemple de pièce corrodée destinée à être contrôlée au moyen du système de contrôle de la Figure 1,
- la Figure 3 est une vue en perspective d'une maquette numérique de la pièce originale correspondant à la pièce corrodée de la Figure 2,
- la Figure 4 est une vue en perspective d'une modélisation tridimensionnelle d'une face accessible de la pièce corrodée de la Figure 2,
- la Figure 5 est un schéma illustrant une partie d'un maillage surfacique de la modélisation tridimensionnelle de la Figure 4,
- la Figure 6 est un schéma illustrant une partie d'un maillage surfacique obtenu par scannage d'une face visible de la pièce corrodée de la Figure 2 et duquel est déduit le maillage surfacique de la Figure 5,
- la Figure 7 est un diagramme en blocs présentant un procédé de contrôle mis en œuvre au moyen du système de contrôle de la Figure 1,
- la Figure 8 est un diagramme en blocs présentant une étape de mesure de corrosion appartenant au procédé de la Figure 7, et

- la Figure 9 est un diagramme en blocs présentant une sous-étape de recalage appartenant à l'étape de mesure de corrosion de la Figure 8.

Le système de contrôle 10 représenté sur la Figure 1 comprend un dispositif de mesure 12 pour mesurer la corrosion d'une pièce corrodée 14 (Figure 2), et un dispositif de vérification 16 pour vérifier la conformité de la résistance mécanique de la pièce corrodée 14 avec l'usage attendu de cette pièce.

La pièce corrodée 14 est typiquement une pièce d'aéronef. Elle est montée sur un aéronef (non représenté).

En référence à la Figure 2, la pièce corrodée 14 comprend une pluralité de parois 20, 22, 24, 26 chacune constituées de métal, par exemple d'aluminium.

Ces parois 20, 22, 24, 26 comprennent ici une paroi supérieure 20, une paroi inférieure 22, une paroi de raccordement 24 faisant la jonction entre la paroi supérieure 20 et la paroi inférieure 22, et une pluralité de parois de renfort 26.

Les parois supérieure, inférieure et de raccordement 20, 22, 24 se présentent chacune sous forme d'une plaque. Les parois supérieure et inférieure 20, 22 sont sensiblement parallèles l'une à l'autre, la paroi de raccordement 24 étant orthogonale auxdites parois 20, 22. Les parois supérieure et inférieure 20, 22 sont en particulier disposées de part et d'autre du plan défini par la paroi de raccordement 24.

Par « plaque » on entend ici et dans la suite un morceau plein et de faible épaisseur, sans que ladite épaisseur soit nécessairement constante et sans que les faces dudit morceau soient nécessairement planes.

Chaque paroi de renfort 26 se présente sous forme d'une nervure faisant saillie depuis la paroi inférieure 22, sensiblement perpendiculairement à cette dernière, et s'étendant depuis la paroi de raccordement 24 en étant sensiblement perpendiculaire à celle-ci.

Chaque paroi 20, 22, 24, 26 présente au moins une face visible 30 accessible à un opérateur. Les parois supérieure, inférieure et de raccordement 20, 22, 24 présentent également une face cachée (non représentée), inaccessible à un opérateur sans démontage de l'aéronef.

Chaque paroi 20, 22, 24, 26 comprend au moins une zone saine 32 dépourvue de corrosion. Dans chaque zone saine 32, l'épaisseur de la paroi 20, 22, 24, 26 est égale à l'épaisseur d'origine de la paroi 20, 22, 24, 26 en cette zone 32, c'est-à-dire à l'épaisseur que la paroi 20, 22, 24, 26 présentait lorsque la pièce 14 a été fabriquée.

Dans chaque zone saine 32, la face visible 30 de la paroi 20, 22, 24, 26 présente au moins une zone à faible courbure 34. En particulier, pour chaque zone saine 32 d'une

paroi 20, 22, 24, 26, l'intégralité de la face visible 30 contenue dans ladite zone saine 32 constitue une zone à faible courbure 34.

Par « à faible courbure », on comprend ici et dans la suite que les surfaces qualifiées comme telles ont un rayon de courbure supérieur à 100 mm.

5 Certaines des parois 20, 22, 24, 26 comprennent également au moins une région corrodée 36. Dans l'exemple représenté, les parois 20, 22, 24, 26 comprenant une telle région corrodée 36 sont constituées par les parois inférieure 22, de raccordement 24 et de renfort 26. La paroi supérieure 20 est ainsi dépourvue de région corrodée 36.

10 Certaines régions corrodées 36 s'étendent ici continûment sur plusieurs des parois 22, 24, 26.

Dans chaque région corrodée 36, l'épaisseur de la paroi 22, 24, 26 est réduite par rapport à l'épaisseur d'origine de la paroi 22, 24, 26 en cette région 36. Chaque région corrodée 36 correspond à une zone en creux 38 formée dans une face visible 30 de la paroi 22, 24, 26, cette zone en creux 38 étant en retrait vers l'intérieur de la paroi 22, 24, 15 26 par rapport au plan défini par les zones à faible courbure 34 de la face visible 30.

La face cachée de chaque paroi 20, 22, 24 est à faible courbure et s'étend sensiblement parallèlement aux zones à faible courbure 34 de la face visible 30.

De retour à la Figure 1, le dispositif de mesure 12 est installé dans un centre 40 de maintenance pour aéronef. Le dispositif de vérification 16 est quant à lui installé dans un 20 bureau de calcul 42.

Le dispositif de mesure 12 comprend une unité de traitement d'informations 44, un scanner tridimensionnel 46, un dispositif de mesure d'épaisseur non destructif 48, une interface homme-machine 49, un modélisateur 50, un système de recalage 52, et un comparateur 54.

25 L'unité de traitement d'informations 44 comprend un processeur 56 et une mémoire 58 stockant au moins un logiciel adapté pour être exécuté par le processeur 56.

La mémoire 58 stocke également une maquette numérique 60 (Figure 3) de la pièce originale correspondant à la pièce corrodée 14. Cette maquette numérique 60 présente la pièce 14 telle qu'elle était dans son état d'origine, c'est-à-dire lorsqu'elle a été 30 fabriquée.

La maquette numérique 60 est une maquette tridimensionnelle produite typiquement au moyen d'un logiciel de conception assistée par ordinateur.

En référence à la Figure 3, la maquette numérique 60 comprend une pluralité de parois 61, 62, 64, 66 correspondant chacune à une paroi 20, 22, 24, 26 respective de la 35 pièce 14. Par « correspondant », on comprend que chaque paroi 61, 62, 64, 66 présente

une forme globale et un positionnement, relativement aux autres parois 61, 62, 64, 66, identiques à ceux de la paroi 20, 22, 24, 26 correspondante.

Ainsi, les parois 61, 62, 64, 66 comprennent ici une paroi supérieure 61, une paroi inférieure 62, une paroi de raccordement 64 faisant la jonction entre la paroi supérieure 61 et la paroi inférieure 62, et une pluralité de parois de renfort 66, les parois supérieure, inférieure et de raccordement 61, 62, 64 se présentant chacune sous forme d'une plaque, les parois supérieure et inférieure 61, 62 étant sensiblement parallèles l'une à l'autre, la paroi de raccordement 64 étant orthogonale auxdites parois 61, 62, les parois supérieure et inférieure 61, 62 étant en particulier disposées de part et d'autre du plan défini par la plaque de raccordement 64, et chaque paroi de renfort 66 se présentant sous forme d'une nervure faisant saillie depuis la paroi inférieure 62, sensiblement perpendiculairement à cette dernière, et s'étendant depuis la paroi de raccordement 64 en étant sensiblement perpendiculaire à celle-ci.

Chaque paroi 61, 62, 64, 66 présente en chaque point une épaisseur de paroi égale à l'épaisseur d'origine de la paroi 20, 22, 24, 26 correspondante en ce point.

Chaque paroi 61, 62, 64, 66 présente une première grande face 70 et une deuxième grande face (non représentée) opposées l'une à l'autre. La première grande face 70 de chaque paroi 61, 62, 64 correspond à la face visible 30 de la paroi 20, 22, 24 correspondante, et la deuxième grande face de chaque paroi 61, 62, 64 correspond à la face cachée de la paroi 20, 22, 24 correspondante. Les première et deuxième grandes faces de chaque paroi 66 correspondent toutes les deux à des faces visibles de la paroi 26 correspondante.

Chacune desdites grandes faces est à faible courbure.

La maquette numérique 60 est divisée en une pluralité de sous-parties 72, 74, 76 continues juxtaposées les unes aux autres. Chaque sous-partie 72, 74, 76 inclut une paroi de renfort 66 respective et, de chaque côté de ladite paroi de renfort 66, la moitié de la portion de chacune des parois supérieure 61, inférieure 62 et de raccordement 64 s'étendant entre ladite paroi de renfort 66 et la paroi de renfort 66 suivante.

La maquette numérique 60 est fournie avec un référentiel 78 associé comprenant une origine O et trois axes principaux X, Y, Z.

L'origine O est constituée par un point remarquable de la maquette 60. Ce point remarquable est typiquement constitué par un point d'intersection entre la paroi inférieure 62, la paroi de raccordement 64, et l'une des parois de renfort 66.

Les axes X, Y et Z sont constitués par des axes remarquables de la maquette 60, et sont de préférence choisis de façon à former un repère orthogonal direct. Dans l'exemple représenté, l'axe X est ainsi constitué par l'axe de la ligne de jonction entre la

paroi inférieure 62 et la paroi de raccordement 64, l'axe Y par l'axe de la ligne de jonction entre la paroi inférieure 62 et ladite paroi de renfort 66, et l'axe Z par l'axe de de la ligne de jonction entre la paroi de raccordement 64 et ladite paroi de renfort 66.

De retour à la Figure 1, le scanner tridimensionnel 46 est adapté pour l'acquisition d'un nuage de points de la surface de la pièce corrodée 14 formée par la réunion des faces visibles 30 des différentes parois 20, 22, 24, 26 de cette pièce 14. Le scanner tridimensionnel 46 est par ailleurs configuré pour le transfert de ce nuage de points au modélisateur 50.

A cet effet, le scanner tridimensionnel 46 est constitué par un scanner sans contact, en particulier un scanner sans contact actif, de préférence un scanner à triangulation laser. Le scanner tridimensionnel 46 est avantageusement constitué par un scanner portable, manipulable à la main. Par exemple, le scanner tridimensionnel 46 est constitué par un scanner HandySCAN 700 de la société CREAFORM.

Le dispositif de mesure d'épaisseur non destructif 48 est quant à lui adapté pour l'acquisition de mesures d'épaisseur des parois 20, 22, 24, 26 dans les zones saines 32 desdites parois 20, 22, 24, 26, lorsque ledit dispositif 48 est appliqué contre la face visible 30 d'une de ces parois 20, 22, 24, 26, sans que cette acquisition n'altère les parois 20, 22, 24, 26. A cet effet, le dispositif de mesure d'épaisseur non destructif 48 est ici constitué par une sonde à ultrasons.

Le dispositif de mesure d'épaisseur non destructif 48 est par ailleurs configuré pour le transfert de ces mesures d'épaisseur au modélisateur 50.

L'interface homme-machine 49 est adaptée pour permettre à un opérateur humain d'interagir avec l'unité de traitement d'informations 44. A cet effet, l'interface homme-machine comprend un organe de présentation (non représenté), typiquement un afficheur, et au moins un organe d'entrée (non représenté), par exemple un ensemble clavier-souris et/ou un écran tactile.

Le modélisateur 50, le système de recalage 52 et le comparateur 54 sont typiquement réalisés, comme représentés ici, sous la forme de logiciels stockés dans la mémoire 58 et exécutables par le processeur 56. En variante, le modélisateur 50, le système de recalage 52 et le comparateur 54 sont au moins partiellement réalisés sous la forme de composants logiques programmables.

Le modélisateur 50 est configuré pour créer une modélisation tridimensionnelle 80 (Figure 4) de la pièce corrodée 14 à partir du nuage de points acquis par le scanner tridimensionnel 46 et de chaque mesure d'épaisseur réalisée au moyen de la sonde à ultrasons 48.

En référence à la Figure 4, cette modélisation tridimensionnelle 80 comprend une pluralité de parois 81, 82, 84, 86 correspondant chacune à une paroi 20, 22, 24, 26 respective de la pièce 14. Par « correspondant », on comprend que chaque paroi 81, 82, 84, 86 est constituée par la reconstruction numérique de la paroi 20, 22, 24, 26 correspondante.

Ainsi, les parois 81, 82, 84, 86 comprennent ici une paroi supérieure 81, une paroi inférieure 82, une paroi de raccordement 84 faisant la jonction entre la paroi supérieure 81 et la paroi inférieure 82, et une pluralité de parois de renfort 86, les parois supérieure, inférieure et de raccordement 81, 82, 84 se présentant chacune sous forme d'une plaque, les parois supérieure et inférieure 81, 82 étant sensiblement parallèles l'une à l'autre, la paroi de raccordement 84 étant orthogonale auxdites parois 81, 82, les parois supérieure et inférieure 81, 82 étant en particulier disposées de part et d'autre du plan défini par la plaque de raccordement 84, et chaque paroi de renfort 86 se présentant sous forme d'une nervure faisant saillie depuis la paroi inférieure 82, sensiblement perpendiculairement à cette dernière, et s'étendant depuis la paroi de raccordement 84 en étant sensiblement perpendiculaire à celle-ci.

Chaque paroi 81, 82, 84, 86 présente une première grande face 90 et une deuxième grande face (non représentée) opposées l'une à l'autre.

La première grande face 90 de chaque paroi 81, 82, 84 correspond à la face visible 30 de la paroi 20, 22, 24 correspondante ; elle constitue une face scannée de la paroi 81, 82, 84.

La deuxième grande face de chaque paroi 81, 82, 84 correspond à la face cachée de la paroi 20, 22, 24 correspondante ; elle constitue une face sondée de la paroi 81, 82, 84.

Les première et deuxième grandes faces de chaque paroi 86 correspondent toutes les deux à des faces visibles de la paroi 26 correspondante. Elles constituent chacune une face scannée de la paroi 86.

Chaque paroi 81, 82, 84, 86 présente en tout point une épaisseur sensiblement égale à l'épaisseur de la paroi 20, 22, 24, 26 correspondante en ce même point. En outre, chaque face scannée d'une paroi 81, 82, 84, 86 présente une forme sensiblement identique à celle de la face visible 30 correspondante

Ainsi, chaque face scannée d'une paroi 81, 82, 84, 86 présente au moins une région à faible courbure 94 correspondant à la ou chaque zone à faible courbure 34 de la face visible 30 correspondante. En outre, lorsque la paroi 81, 82, 84, 86 correspond à une paroi 20, 22, 24, 26 corrodée, ladite face scannée présente au moins une région en creux 98 correspondant à la zone en creux 38 formée dans la face visible 30 correspondante.

Aux fins de générer cette modélisation 80, le modélisateur 50 comprend un premier module 130 pour créer un maillage surfacique simplifié 132 (Figure 5) de la face scannée de la pièce corrodée 14 à partir du nuage de points acquis par le scanner tridimensionnel 46, et un deuxième module 134 pour créer la modélisation tridimensionnelle 80 à partir dudit maillage surfacique simplifié 132 et de chaque mesure d'épaisseur réalisée au moyen de la sonde à ultrasons 48.

En référence à la Figure 5, le maillage surfacique simplifié 132 comprend une pluralité de sommets 136 chacun constitué par un point du nuage de points, et une pluralité d'arêtes 137 définissant entre elles des faces 138, chaque arête 137 reliant un sommet 136 du maillage 132 à un autre sommet 136 de sorte que chaque face 138 soit triangulaire.

Aux fins de générer le maillage surfacique simplifié 132, le premier module 130 est configuré pour créer, à partir du nuage de points acquis par le scanner tridimensionnel 46, un maillage surfacique détaillé 140 (Figure 6) de la face scannée, et pour simplifier le maillage surfacique détaillé 140 de sorte à obtenir le maillage surfacique simplifié 132, typiquement par décimation du maillage surfacique détaillé 140 avec une tolérance de déviation fixée à un seuil prédéfini.

En référence à la Figure 6, le maillage surfacique détaillé 140 comprend une pluralité de sommets 142 chacun constitué par un point du nuage de points, chaque point du nuage de points constituant en outre un tel sommet 142. Le maillage 140 comprend également une pluralité d'arêtes 144 définissant entre elles des faces 146, chaque arête 144 reliant un sommet 142 du maillage 140 à un autre sommet 142 de sorte que chaque face 146 soit triangulaire.

Le premier module 130 est typiquement configuré pour créer le maillage surfacique détaillé 140 au moyen de la méthode dite de Delaunay, ou au moyen d'un équivalent de cette méthode.

Pour décimer le maillage 140, le premier module 130 est par exemple configuré pour, pour chaque sommet 142 du maillage 140, mettre en œuvre les étapes les étapes suivantes :

- suppression dudit sommet 142,
- reconstruction d'un nouveau maillage dépourvu dudit sommet 142,
- calcul de la distance du sommet 142 à la face du nouveau maillage la plus proche, et
- validation de la suppression du sommet 142 si la distance calculée est inférieure au seuil prédéfini, ou réintroduction du sommet 142 si la distance calculée est supérieure au seuil prédéfini.

Le seuil prédéfini est de préférence compris entre 0,01 et 0,05 mm. Il est par exemple sensiblement égal à 0,01 mm.

Cette simplification du maillage surfacique 140 permet de créer une modélisation tridimensionnelle 80 allégée et, ainsi, d'accélérer les traitements ultérieurs basés sur cette modélisation 80. En variante, le premier module 130 n'est pas configuré pour simplifier le maillage surfacique détaillé 140, et c'est alors directement ce maillage surfacique 140 qui est utilisé par le deuxième module 134 pour créer la modélisation tridimensionnelle 80.

Le premier module 130 est par exemple constitué par le logiciel VXELEMENTS™ de la société CREAFORM.

Le deuxième module 134 est configuré pour construire les faces scannées des parois 81, 82, 84, 86 à partir du maillage surfacique 132. Il est en particulier configuré pour que le maillage surfacique 132 constitue les faces scannées des parois 81, 82, 84, 86.

Le deuxième module 134 est également configuré pour construire les faces sondées des parois 81, 82, 84 à partir des mesures de sonde. A cet effet, le deuxième module 134 est configuré pour, pour chacune des parois 81, 82, 84, positionner une surface à faible courbure parallèle à la face scannée de ladite paroi 81, 82, 84 et décalée relativement à ladite face scannée d'une distance égale à la moyenne des mesures d'épaisseur prises sur la paroi 20, 22, 24 correspondante avec la sonde 48, cette surface constituant la face sondée de ladite paroi 81, 82, 84.

Le deuxième module 134 est finalement configuré pour former la modélisation 80 de sorte qu'elle soit constituée par la réunion des faces scannées et sondées ainsi construites.

A cet effet, le deuxième module 134 est typiquement constitué par un logiciel d'ajout d'une épaisseur virtuelle à un maillage surfacique, comme par exemple la fonction épaisseur virtuelle du logiciel PolyWorks™ de la société INNOVMETRIC.

Le système de recalage 52 est configuré pour recalcr la modélisation tridimensionnelle 80 relativement à la maquette numérique 60. A cet effet, le système de recalage 52 est typiquement constitué par un logiciel de recalage de modèles tridimensionnels, comme par exemple la fonction alignement du logiciel PolyWorks™ de la société INNOVMETRIC.

En particulier, le système de recalage 52 est configuré pour :

- identifier dans la modélisation tridimensionnelle 80 un point de référence R,
- repérer, dans la modélisation tridimensionnelle 80, trois directions A, B, C,

- positionner le point de référence R en coïncidence avec l'origine O du référentiel 78, et
- aligner de chaque direction A, B, C avec l'axe principal X, Y, Z du référentiel 78 correspondant.

5 A cet effet, le système de recalage 52 est configuré présenter à un opérateur humain, via l'interface homme-machine 49, la modélisation tridimensionnelle 80, et permettre à l'opérateur humain de positionner dans la modélisation tridimensionnelle 80, toujours via l'interface homme-machine 49, trois plans sécants. Le système de recalage 52 est encore configuré identifier le point de référence R comme étant constitué par le
10 point d'intersection entre les trois plans sécants, et pour repérer chaque intersection de l'un des plans sécants avec un autre de ces plans sécants et identifier cette intersection comme constituant l'une des directions A, B, C.

 Le système de recalage 52 est également configuré pour réaliser automatiquement le repositionnement du point de référence R et le réalignement des
15 directions A, B, C, au moyen d'une classique fonction de recalage par système de références, comme celle incluse dans le logiciel PolyWorks™.

 Le système de recalage 52 est également configuré pour découper la modélisation tridimensionnelle 80 en plusieurs sous-ensembles 102, 104, 106 correspondant chacun à une sous-partie 72, 74, 76 respective de la maquette 60, de sorte que chaque sous-
20 ensemble 102, 104, 106 inclue une paroi de renfort 86 respective et, de chaque côté de ladite paroi de renfort 86, la moitié de la portion de chacune des parois supérieure 81, inférieure 82 et de raccordement 84 s'étendant entre ladite paroi de renfort 86 et la paroi de renfort 86 suivante. Le système de recalage 52 est encore configuré pour, pour chaque sous-ensemble 102, 104, 106 :

- 25 - identifier, dans ledit sous-ensemble 102, 104, 106, une pluralité de zones caractéristiques 108 à faible courbure, dont au moins une zone caractéristique 108 non parallèle à au moins deux autres desdites zones caractéristiques 108,
- reconnaître, pour chaque zone caractéristique 108 identifiée, une région correspondante 110 (Figure 3) dans la sous-partie 72, 74, 76 correspondante
30 de la maquette numérique 60, et
- mettre en coïncidence chaque zone caractéristique 108 identifiée avec la région correspondante 110.

 Les zones caractéristiques 108 sont au moins au nombre de trois par sous-ensemble 102, 104, 106, chaque zone caractéristique 108 étant incluse dans une face
35 scannée d'une paroi 81, 82, 84, 86 respective du sous-ensemble 102, 104, 106. Ainsi, le système de recalage 52 est configuré pour extraire, pour au moins une face scannée d'au

moins trois des parois 81, 82, 84, 86 du sous-ensemble 102, 104, 106, une zone caractéristique 108 de ladite face scannée.

Chaque zone caractéristique 108 appartient à une région à faible courbure 94 d'une face scannée de l'une des parois 81, 82, 84, 86.

5 Lorsque cela est possible, c'est-à-dire lorsque les faces scannées de la paroi inférieure 82, de la paroi de raccordement 84, et de la paroi de renfort 86 comprennent chacune une région à faible courbure 94, les zones caractéristiques 108 sont de préférence au moins au nombre de quatre, une première zone caractéristique 108 étant incluse dans la face scannée de la paroi inférieure 82, une deuxième zone caractéristique 108 étant incluse dans la face scannée de la paroi de raccordement 84, et les troisième et quatrième zones caractéristiques 108 étant chacune incluse dans une face scannée respective de la paroi de renfort 86.

15 Le système de recalage 52 est configuré pour effectuer automatiquement cette identification des zones caractéristiques 108 par sélection des arêtes 137 du maillage 132 ayant une longueur supérieure à une longueur prédéterminée, suivie de la sélection des faces 138 liées aux arêtes 137 sélectionnées. Ladite longueur prédéterminée est ici supérieure ou égale à 10 fois la résolution d'acquisition du scanner, et est par exemple supérieure ou égale à 5 mm.

20 En variante, le système de recalage 52 est configuré pour effectuer automatiquement cette identification des zones caractéristiques 108 au moyen d'une classique fonction de reconnaissance d'éléments canoniques, comme celle incluse dans le logiciel PolyWorks™ précité.

25 Le système de recalage 52 est encore configuré pour réaliser automatiquement la mise en coïncidence des zones caractéristiques 108 avec les régions correspondantes 110 au moyen d'une classique fonction d'alignement par contraintes, comme celle incluse dans ledit logiciel PolyWorks™.

30 Le comparateur 54 est configuré pour comparer automatiquement la modélisation tridimensionnelle 80 avec la maquette numérique 60, une fois la modélisation tridimensionnelle 80 recalée, et relever les écarts d'épaisseur entre la modélisation tridimensionnelle 80 et la maquette numérique 60. A cet effet, le comparateur 54 est typiquement constitué par un logiciel de métrologie de modèles tridimensionnels, comme par exemple la fonction cartographie d'écarts du logiciel PolyWorks™ de la société INNOVMETRIC.

35 De retour à la Figure 1, le dispositif de mesure 12 comprend également un organe 112 de communication avec le dispositif de vérification 16, apte à communiquer au dispositif de vérification 16 les écarts d'épaisseur relevés entre la modélisation

tridimensionnelle 80 et la maquette numérique 60. L'organe de communication 112 est typiquement adapté pour envoyer ces écarts d'épaisseur par Internet.

Le dispositif de vérification 16 est adapté pour vérifier la conformité de la résistance mécanique de la pièce corrodée 14 avec l'usage attendu de cette pièce 14 à partir des écarts d'épaisseur relevés entre la modélisation tridimensionnelle 80 et la maquette numérique 60.

A cet effet, le dispositif de vérification 16 comprend un organe 114 de communication avec le dispositif de mesure 12, une unité de traitement d'informations 116, un module d'adaptation 118, un simulateur 120, et un organe de présentation 121.

L'organe de communication 114 est apte à recevoir du dispositif de mesure les écarts d'épaisseur relevés entre la modélisation tridimensionnelle 80 et la maquette numérique 60. A cet effet, l'organe de communication 114 est compatible avec l'organe de communication 112 du dispositif de mesure 12.

L'unité de traitement d'informations 116 comprend un processeur 122 et une mémoire 124 stockant au moins un logiciel adapté pour être exécuté par le processeur 122.

La mémoire 124 stocke également un modèle éléments finis 126 de la pièce originale correspondant à la pièce 14.

Le module d'adaptation 118 et le simulateur 120 sont typiquement réalisés, comme représentés ici, sous la forme de logiciels stockés dans la mémoire 124 et exécutables par le processeur 122. En variante, le module d'adaptation 118 et le simulateur 120 sont au moins partiellement réalisés sous la forme de composants logiques programmables.

Le module d'adaptation 118 est configuré pour modifier le modèle éléments finis 126 en fonction des écarts d'épaisseurs relevés par le comparateur 54 du dispositif de mesure 12. A cet effet, le module d'adaptation 118 est configuré pour déduire des écarts d'épaisseurs relevés par le comparateur 54, pour chaque maille du modèle éléments finis 126, un écart d'épaisseur moyen au niveau de ladite maille, et pour modifier le modèle éléments finis 126 en appliquant à cette maille ledit écart d'épaisseur moyen.

Le simulateur 120 est quant à lui configuré pour simuler la résistance mécanique du modèle éléments finis modifié par le module 118. A cet effet, le simulateur 120 est constitué par un simulateur de contraintes classique qui est appliqué audit modèle éléments finis modifié.

L'organe de présentation 121 est configuré pour présenter à un contrôleur humain des résultats de la simulation conduite par le simulateur 120. A cet effet, l'organe de

présentation 121 est typiquement constitué par un afficheur, les résultats de la simulation étant présentés sous forme graphique par ledit afficheur.

Un procédé 200 de contrôle de la résistance mécanique de la pièce corrodée 14, mis en œuvre au moyen du système de contrôle 10, va maintenant être décrit, en
5 référence aux Figures 7 à 9.

Ce procédé 200 débute par une première étape 210 de mesure de la corrosion de la pièce 14.

Comme visible sur la Figure 8, cette étape de mesure 210 comprend tout d'abord la fourniture 212 de la pièce 14, puis la fourniture 214 du dispositif de mesure 12 et, avec
10 lui de la maquette numérique 60.

Ensuite, lors d'une sous-étape 216, le dispositif de mesure 12 acquiert un nuage de points de chaque surface visible 30 de chaque paroi 20, 22, 24, 26 de la pièce 14 grâce au balayage desdites surfaces visibles 30 par un opérateur humain avec le scanner tridimensionnel 46. Optionnellement, cette sous-étape 216 est précédée d'une sous-étape
15 218 de calibration du scanner tridimensionnel 46 et d'une sous-étape 220 de repérage, par le scanner 46, de cibles (non représentées) positionnées sur la pièce 14 de sorte à permettre au scanner de calculer sa position par rapport à la pièce 14 par triangulation laser.

Puis, lors d'une sous-étape 222, l'opérateur identifie au moins une zone saine 32 de chacune des parois 20, 22, 24 ayant une face cachée. Cette sous-étape 222 est suivie
20 d'une sous-étape 224 d'acquisition d'au moins une mesure d'épaisseur de chaque paroi 20, 22, 24 dans la ou chaque zone saine 32 ; au cours de cette sous-étape 224, l'opérateur applique la sonde ultrason 48 contre la face visible 30 de ladite paroi 20, 22, 24, au niveau la ou chaque zone saine 32 qu'il a préalablement identifiée, et enclenche
25 l'acquisition de la mesure d'épaisseur par la sonde ultrason 48.

Ensuite, lors d'une sous-étape 226, le modélisateur 50 crée la modélisation tridimensionnelle 80 à partir du nuage de points acquis avec le scanner 46 et de chaque mesure d'épaisseur acquise avec la sonde 48.

Cette sous-étape 226 comprend une première sous-étape 226A de création de
30 chaque face scannée de la modélisation 80 par reconstruction tridimensionnelle à partir du nuage de points, suivie d'une deuxième sous-étape 226B de création de chaque face sondée de la modélisation 80 à partir des mesures d'épaisseur prises sur la paroi 20, 22, 24 correspondante avec la sonde 48.

Lors de la sous-étape 226A, le premier module 130 crée, à partir du nuage de
35 points acquis par le scanner tridimensionnel 46, le maillage surfacique détaillé 140, puis simplifie ce maillage surfacique détaillé 140, typiquement par décimation du maillage

surfacique détaillé 140 avec une tolérance de déviation fixée à un seuil prédéfini, de sorte à obtenir le maillage surfacique simplifié 132.

5 Lors de la sous-étape 226B, le deuxième module 134 positionne, pour chacune des parois 81, 82, 84, une surface à faible courbure parallèle à la face scannée de ladite paroi 81, 82, 84 et décalée relativement à ladite face scannée d'une distance égale à la moyenne des mesures d'épaisseur prises sur la paroi 20, 22, 24 correspondante avec la sonde 48, cette surface constituant la face sondée de ladite paroi 81, 82, 84.

Puis, lors d'une sous-étape 230, le système de recalage 52 recale la modélisation tridimensionnelle 80 relativement à la maquette numérique 60.

10 Comme visible sur la Figure 9, cette étape de recalage 230 comprend tout d'abord une sous-étape 231 de présentation de la modélisation tridimensionnelle 80 via l'interface homme-machine 49.

15 Ensuite, lors d'une sous-étape 232, un opérateur humain positionne trois plans sécants dans la modélisation tridimensionnelle 80 qui lui est présentée. L'opérateur humain dispose ces plans de sorte qu'un premier plan affleure la face scannée de la paroi inférieure 82, un deuxième plan affleure la face scannée de la paroi de raccordement 84, et le troisième plan affleure l'une des faces scannées d'une paroi de renfort 86 spécifique.

20 Puis, lors d'une sous-étape d'identification 233, le système de recalage 52 identifie, dans la modélisation tridimensionnelle 80, le point de référence R comme étant constitué par le point d'intersection entre les trois plans sécants positionnés par l'opérateur.

25 Ensuite, lors d'une sous-étape de repérage 234, le système de recalage 52 repère dans la modélisation tridimensionnelle 80 une première direction A définie par l'intersection entre les premier et deuxième plans positionnés par l'opérateur, une deuxième direction B définie par l'intersection entre les premier et troisième plans positionnés par l'opérateur, et une troisième direction C définie par l'intersection entre les deuxième et troisième plans positionnés par l'opérateur.

30 A la sous-étape 234 font encore suite une sous-étape 236 de positionnement du point de référence R en coïncidence avec l'origine O du référentiel 78 de la maquette 60, et une sous-étape 238 d'alignement de chacune des directions A, B, C avec l'axe principal X, Y, Z du référentiel 78 correspondant. Ces sous-étapes 236, 238 sont réalisées automatiquement par le système de recalage 52.

35 Puis, lors d'une sous-étape 240, le système de recalage 52 découpe la modélisation tridimensionnelle 80 en sous-ensembles 102, 104, 106 correspondant chacun à une sous-partie 72, 74, 76 respective de la maquette 60. Ensuite, pour chacun de ces sous-ensembles 102, 104, 106, sont réalisées les sous-étapes suivantes :

- une sous-étape 242 d'identification, par le système de recalage 52, dans le sous-ensemble 102, 104, 106, d'une pluralité de zones caractéristiques 108 à faible courbure, dont au moins une zone caractéristique 108 non parallèle à au moins deux autres desdites zones caractéristiques 108, lesdites zones caractéristiques 108 étant chacune incluse dans une face scannée d'une paroi 81, 82, 84, 86 respective du sous-ensemble 102, 104, 106 ;
- une sous-étape 244 de reconnaissance automatique, par le système de recalage 52, pour chaque zone caractéristique 108, d'une région correspondante 110 (Figure 3) dans la sous-partie 72, 74, 76 correspondante de la maquette 60 ; et
- une sous-étape 246 de mise en coïncidence automatique, par le système de recalage 52, de chaque zone caractéristique 108 identifiée avec ladite région correspondante 110.

La sous-étape 242 comprend la détection des faces 138 du maillage 132 présentant au moins un côté de longueur supérieure à la longueur prédéterminée, suivie, pour au moins trois groupes de faces 138 adjacentes ainsi détectées, de la réunion de ces faces 138 adjacentes pour former une zone caractéristique 108.

La détection des faces 138 est constituée par la recherche des arêtes 137 du maillage 132 ayant une longueur supérieure à la longueur prédéterminée, suivie de la sélection des faces 138 liées aux arêtes 137 ainsi découvertes.

Grâce au découpage préalable de la modélisation tridimensionnelle 80 en sous-ensembles 102, 104, 106, ces sous-étapes 242, 244, et 246 sont significativement accélérées.

De retour à la Figure 8, la sous-étape 230 est suivie d'une sous-étape 248 de comparaison de la modélisation tridimensionnelle 80 avec la maquette numérique 60, au cours de laquelle les écarts d'épaisseur entre la modélisation tridimensionnelle 80 et la maquette numérique 60 sont relevés automatiquement par le comparateur 54, pour chaque point de la modélisation tridimensionnelle 80. On obtient ainsi une mesure des pertes d'épaisseur des parois 20, 22, 24, 26 dans les régions corrodées 36 de ces parois 20, 22, 24, 26, ainsi que la localisation de ces pertes d'épaisseur.

De retour à la Figure 7, l'étape 210 est suivie d'une étape 250 de transmission des écarts d'épaisseur, au cours de laquelle les écarts d'épaisseur ainsi relevés sont transmis au dispositif de vérification 16, au moyen des organes de communication 112 et 114.

Puis, lors d'une étape 260, le dispositif de vérification 16 vérifie, à partir des écarts d'épaisseur relevés entre la modélisation tridimensionnelle 80 et la maquette numérique

60, la conformité de la résistance mécanique de la pièce corrodée 14 avec l'usage attendu de cette pièce 14.

5 Cette étape 260 comprend tout d'abord la fourniture 262, par la mémoire 124, du modèle éléments finis 126 de la pièce originale, puis la modification 264, par le module d'adaptation 118, de ce modèle éléments finis 126 en fonction des écarts d'épaisseurs relevés. Enfin, la résistance mécanique du modèle éléments finis 126 modifié est simulée par le simulateur 120 au cours d'une sous-étape 266.

10 Pour finir, les résultats de la simulation sont présentés par l'organe de présentation 121 au cours d'une étape 270. Un contrôleur humain peut alors aisément déterminer, à partir de ces résultats, si la pièce 14 nécessite ou non une réparation et, si une réparation est nécessaire, le type de réparation applicable.

15 Grâce à l'invention décrite ci-dessus, la durée de traitement nécessaire à la vérification de la conformité de la résistance mécanique de pièces corrodées telles que la pièce 14 est considérablement raccourcie. Ce gain de temps permet de réduire d'autant la durée d'immobilisation de l'aéronef, et donc de diminuer significativement la perte d'exploitation associée.

20 En outre, l'invention permet d'améliorer les conditions de travail des opérateurs chargés des mesures, puisque ceux-ci peuvent désormais réaliser en quelques minutes seulement des opérations qui leur prenaient auparavant plusieurs jours. Leur productivité en est améliorée d'autant.

Enfin, la fiabilité des mesures et de leur analyse est considérablement améliorée, ces mesures étant réalisée de manière beaucoup plus précise avant d'être transmises sans perte d'informations et sous un format leur permettant d'être traitées de manière standardisée.

21
REVENDEICATIONS

1.- Procédé (210) de mesure de la corrosion d'une pièce, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- 5 - fourniture (212) d'une pièce corrodée (14),
- fourniture (214) d'une maquette numérique (60) de la pièce originale correspondante,
- acquisition (216) d'un nuage de points d'au moins une surface de ladite pièce corrodée (14) par balayage de ladite surface avec un scanner tridimensionnel
- 10 (46),
- identification (222) d'au moins une zone saine (32) dans au moins une paroi (20, 22, 24, 26) de la pièce corrodée (14),
- acquisition (224) d'au moins une mesure d'épaisseur de la paroi (20, 22, 24, 26) dans ladite zone saine (32) au moyen d'un dispositif de mesure
- 15 d'épaisseur non destructif (48),
- création (226) d'une modélisation tridimensionnelle (80) de la pièce corrodée (14) à partir au moins du nuage de points et de la ou chaque mesure d'épaisseur, et
- comparaison (248) automatique de la modélisation tridimensionnelle (80) avec
- 20 la maquette numérique (60), avec relevé des écarts d'épaisseur entre la modélisation tridimensionnelle (80) et la maquette numérique (60).

2.- Procédé de mesure (210) selon la revendication 1, dans lequel le dispositif de mesure d'épaisseur non destructif (48) est constitué par une sonde à ultrasons.

- 3.- Procédé de mesure (210) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel
- 25 l'acquisition (224) de la mesure d'épaisseur comprend l'application du dispositif de mesure d'épaisseur non destructif (48) contre une surface (30) de la paroi (20, 22, 24, 26) qui est balayée avec le scanner tridimensionnel (46).

- 4.- Procédé de mesure (210) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le scanner tridimensionnel (46) est constitué par un scanner
- 30 sans contact, en particulier un scanner sans contact actif, par exemple un scanner à triangulation laser.

- 5.- Procédé de mesure (210) selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant, préalablement à la comparaison (248) de la modélisation tridimensionnelle (80) avec la maquette numérique (60), le recalage (230) de la
- 35 modélisation tridimensionnelle (80) relativement à la maquette numérique (60).

6.- Procédé de mesure (210) selon la revendication 5, dans lequel la maquette numérique (60) est fournie avec un référentiel (78) associé comprenant une origine (O) et trois axes principaux (X, Y, Z), le recalage de la modélisation tridimensionnelle (80) comprenant les sous-étapes suivantes :

- 5 - identification (232), dans la modélisation tridimensionnelle (80), d'un point de référence (R) correspondant au point d'origine (O) du référentiel (78),
- repérage (234), dans la modélisation tridimensionnelle (80), de trois directions (A, B, C) correspondant chacune à un axe principal (X, Y, Z) du référentiel (78), et
- 10 - positionnement (236) du point de référence (R) en coïncidence avec l'origine (O) du référentiel (78), et alignement (238) de chaque direction (A, B, C) avec l'axe principal (X, Y, Z) du référentiel (78) correspondant.

7.- Procédé de mesure (210) selon la revendication 5 ou 6, dans lequel le recalage (230) de la modélisation tridimensionnelle (80) comprend les sous-étapes suivantes :

- 15 - identification (242), dans la modélisation tridimensionnelle (80), d'une pluralité de zones caractéristiques (108), dont au moins une zone caractéristique (108) non parallèle à au moins deux autres desdites zones caractéristiques (108),
- reconnaissance (244), dans la maquette numérique (80), pour chaque zone caractéristique (108) identifiée, d'une région (110) de la maquette numérique (60) correspondante, et
- 20 - mise en coïncidence (246) de chaque zone caractéristique (108) identifiée avec la région (110) de la maquette numérique (60) correspondante.

8.- Procédé de mesure (210) selon la revendication 7, dans lequel le recalage (230) de la modélisation tridimensionnelle (80) comprend le découpage (240) de la modélisation tridimensionnelle (80) en plusieurs sous-ensembles (102, 104, 106), les étapes d'identification (242), de reconnaissance (244) et de mise en coïncidence (246) étant réalisées pour chaque sous-ensemble (102, 104, 106).

9.- Procédé de mesure (210) selon la revendication 7 ou 8, dans lequel la création (226) de la modélisation tridimensionnelle (80) comprend la création (226A), à partir du nuage de points acquis par le scanner tridimensionnel (46), d'un maillage surfacique simplifié (132) de la face scannée de la pièce corrodée (14), et dans lequel l'étape (242) d'identification des zones caractéristiques (108) comprend la détection des faces (138) du maillage surfacique simplifié (132) présentant au moins un côté de longueur supérieure à une longueur prédéterminée, suivie, pour plusieurs groupes de faces (138) adjacentes ainsi détectées, de la réunion de ces faces (138) adjacentes pour former une zone caractéristique (108).

10.- Procédé de mesure (210) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la pièce corrodée (14) est une pièce d'aéronef.

11.- Procédé (200) de contrôle de la résistance mécanique d'une pièce corrodée (14), comprenant les étapes suivantes :

- 5 - mesure de la corrosion de la pièce corrodée (14) au moyen d'un procédé de mesure (210) selon l'une quelconque des revendications précédentes, et
- vérification (260) de la conformité de la résistance mécanique de la pièce corrodée (14) avec l'usage attendu de cette pièce (14) à partir des écarts d'épaisseur relevés entre la modélisation tridimensionnelle (80) et la maquette numérique (60).

12.- Procédé de contrôle (200) selon la revendication 11, dans lequel la vérification de la conformité de la résistance mécanique (260) comprend les étapes suivantes :

- fourniture (262) d'un modèle éléments finis (126) de la pièce originale,
- 15 - modification (264) du modèle éléments finis (126) en fonction des écarts d'épaisseurs relevés, et
- simulation (266) de la résistance mécanique du modèle éléments finis (126) modifié.

13.- Dispositif (12) de mesure de la corrosion d'une pièce corrodée (14), caractérisé en ce qu'il comprend :

- une mémoire (58) dans laquelle est stockée une maquette numérique (60) de la pièce originale correspondante,
- un scanner tridimensionnel (46) adapté pour l'acquisition d'un nuage de points d'au moins une surface de ladite pièce corrodée (14),
- 25 - un dispositif de mesure d'épaisseur non destructif (48) adapté pour l'acquisition d'au moins une mesure d'épaisseur de paroi de la pièce corrodée (14),
- un modélisateur (50) configuré pour créer une modélisation tridimensionnelle (80) de la pièce corrodée (14) à partir au moins du nuage de points et de la ou
- 30 chaque mesure d'épaisseur, et
- un comparateur (54) configuré pour comparer la modélisation tridimensionnelle (80) avec la maquette numérique (60), et relever des écarts d'épaisseur entre la modélisation tridimensionnelle (80) et la maquette numérique (60).

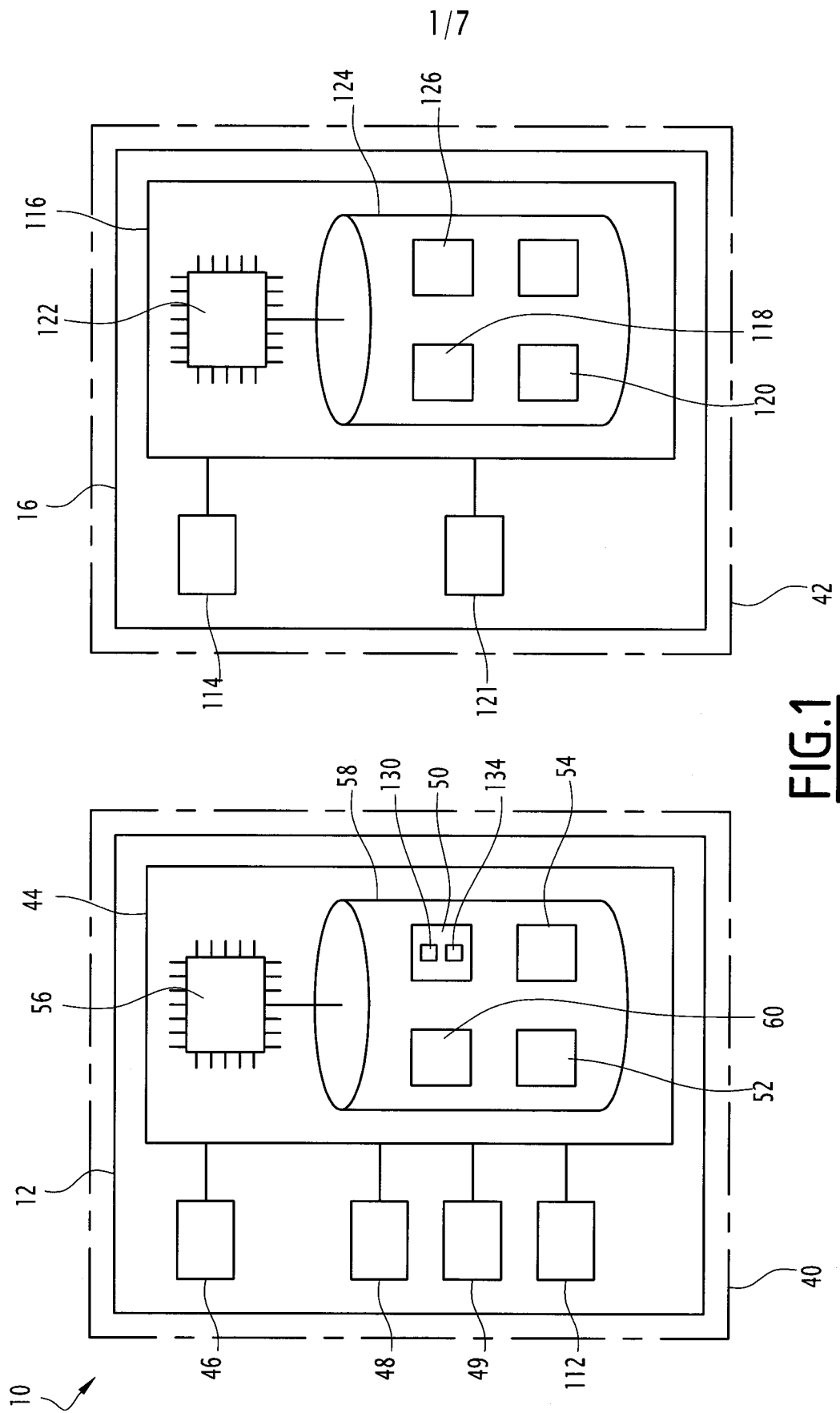
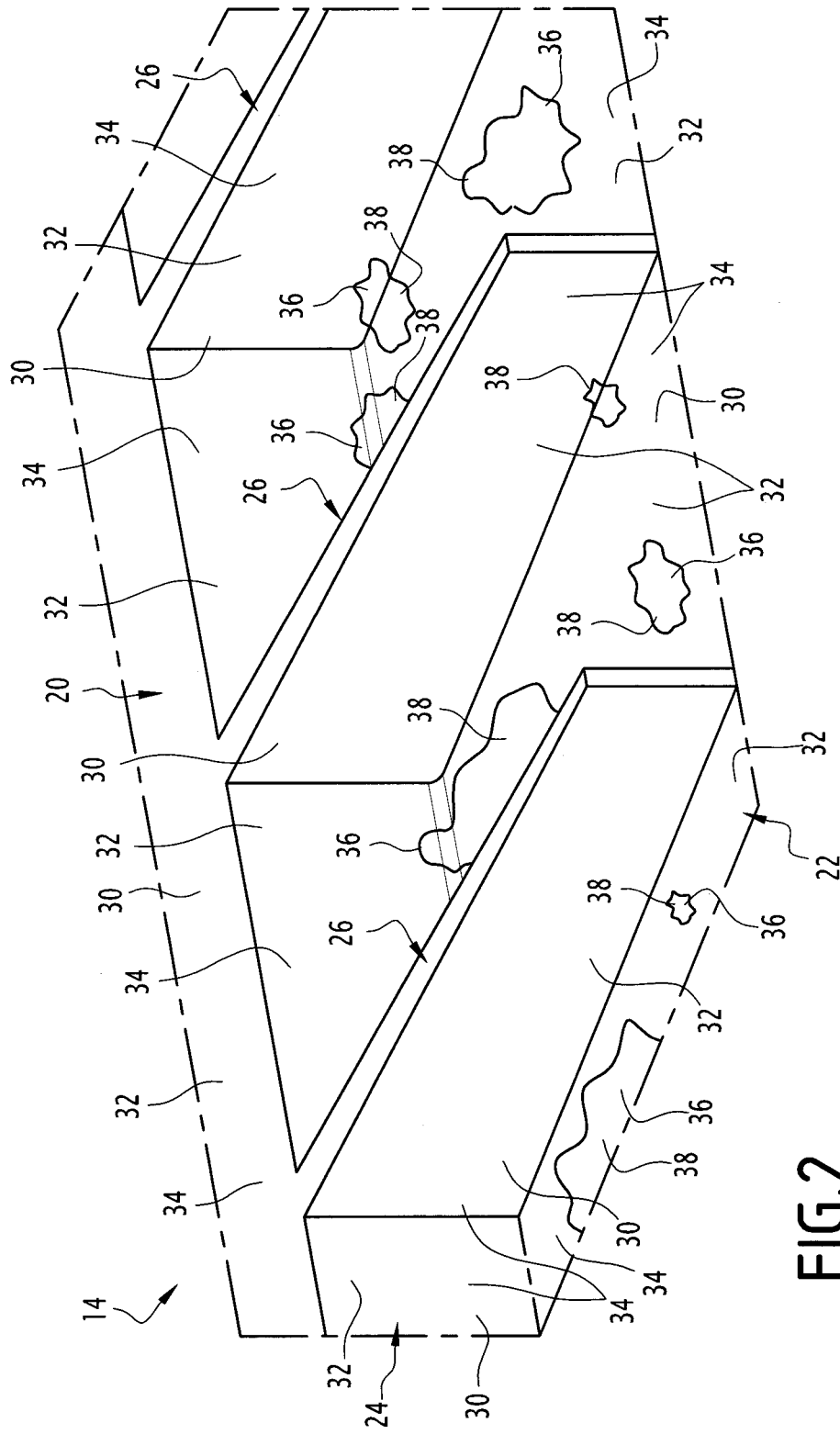


FIG. 1

**FIG. 2**

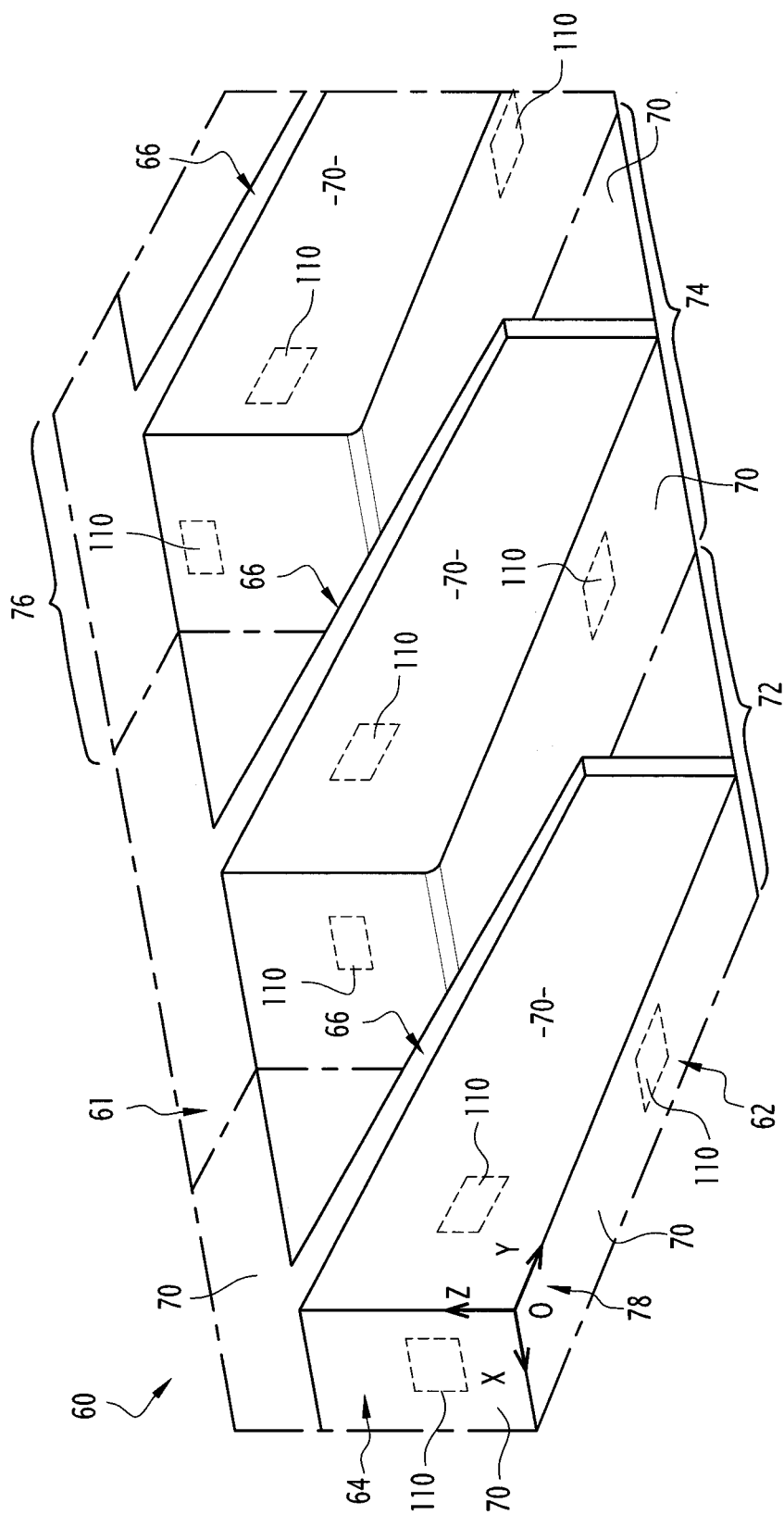


FIG. 3

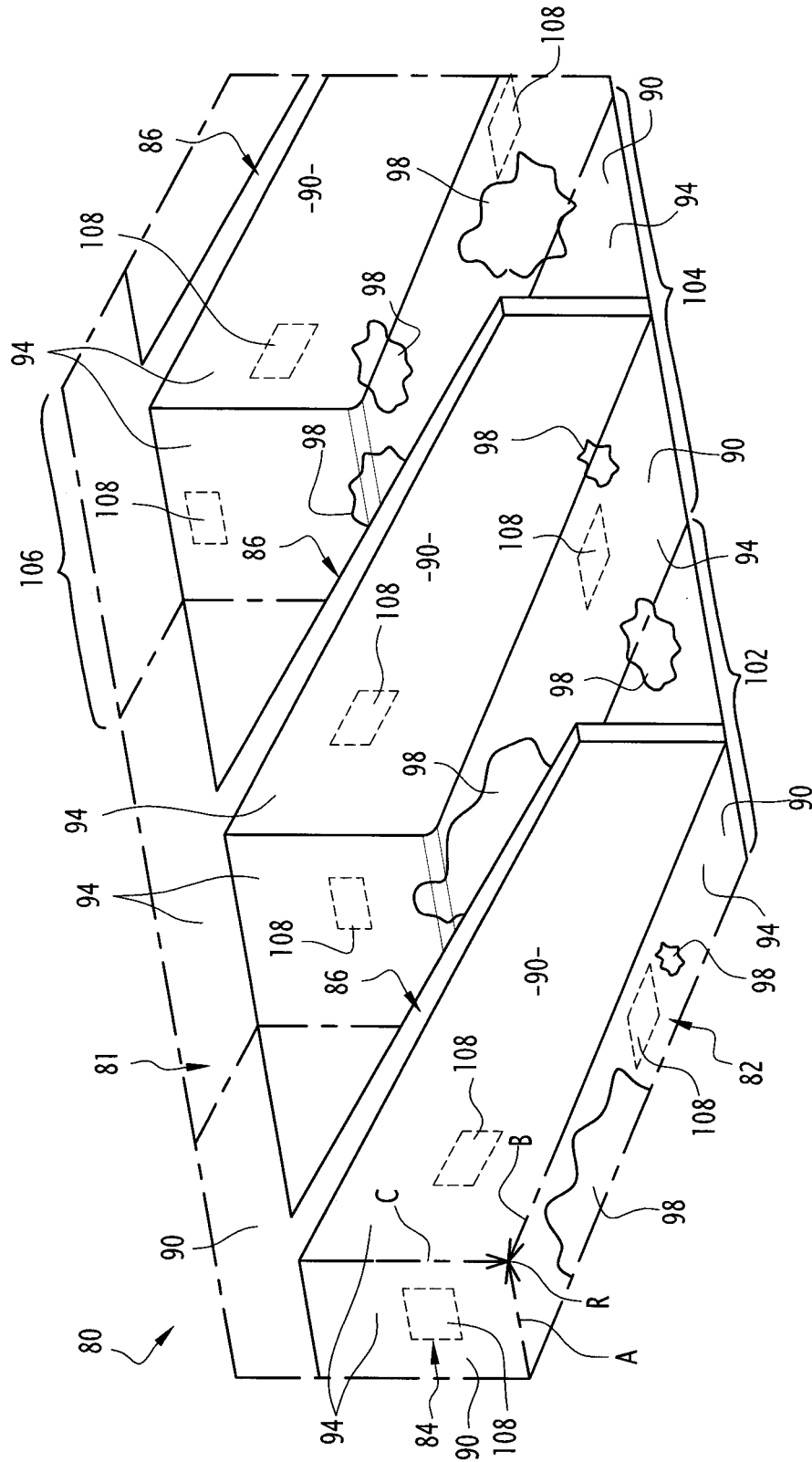


FIG. 4

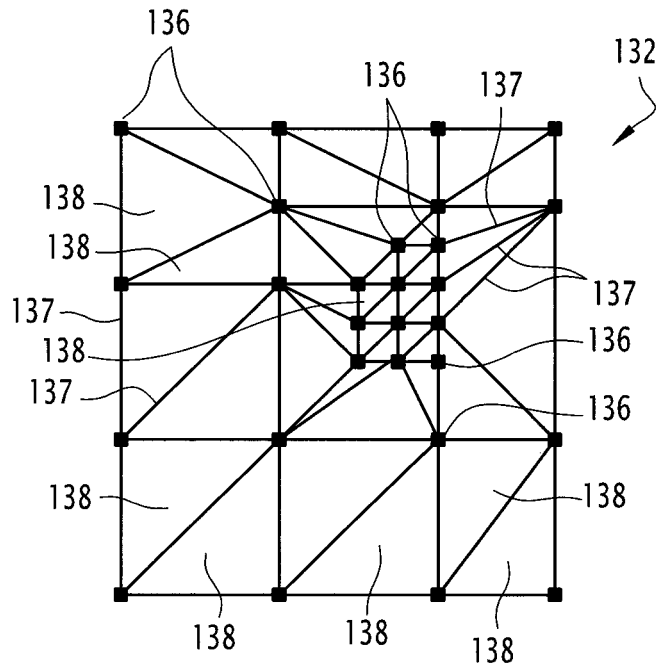


FIG. 5

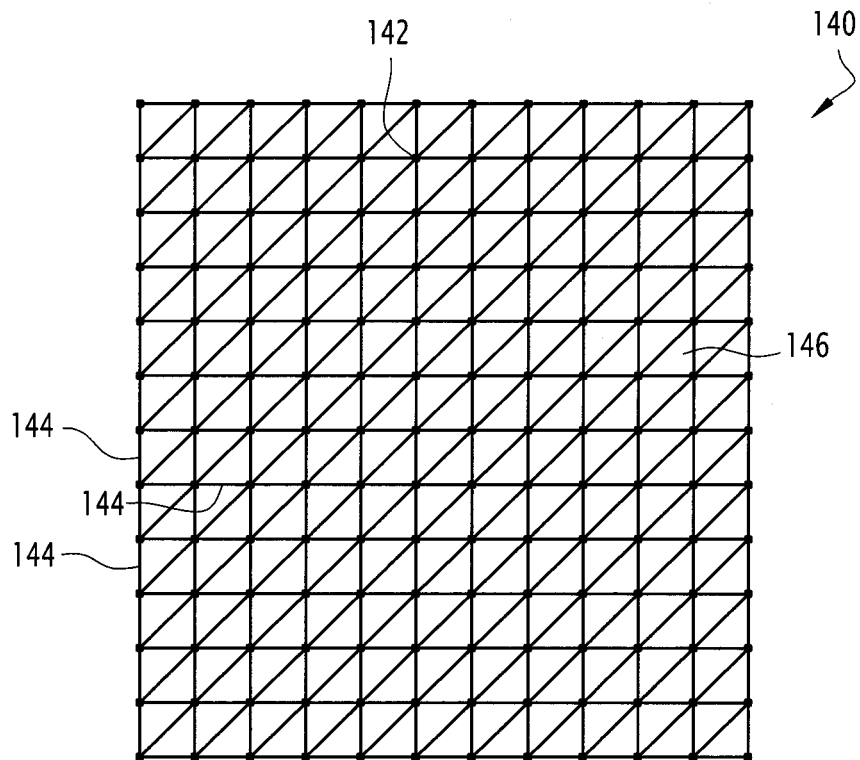
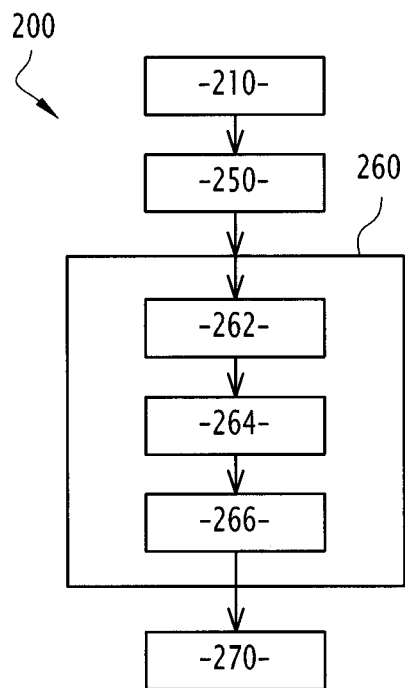
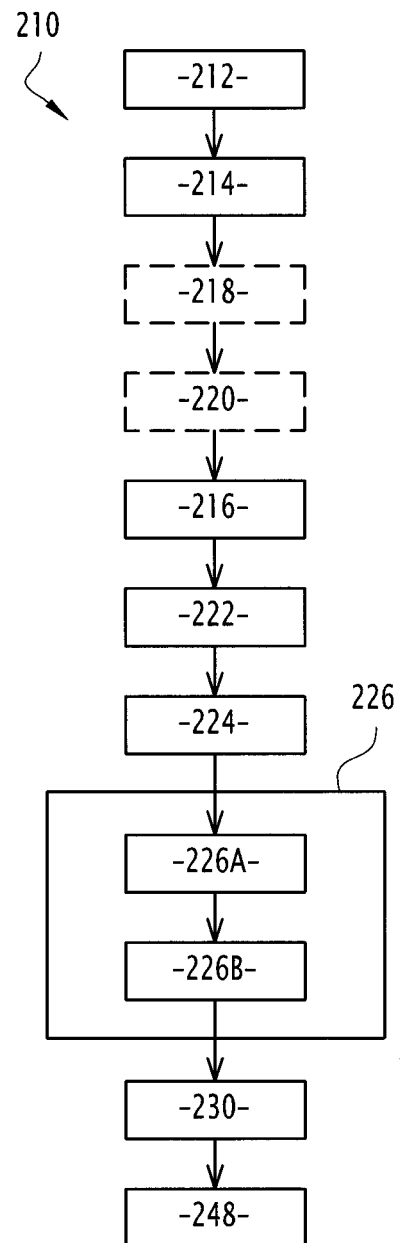


FIG. 6

FIG. 7FIG. 8

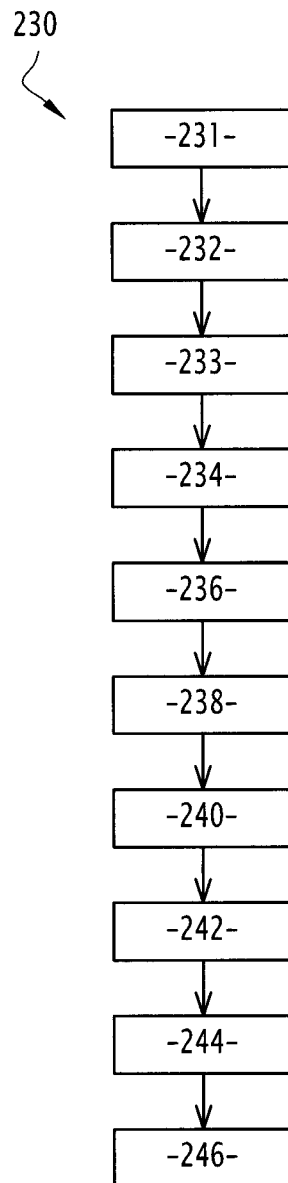


FIG.9

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

WO 2004/074808 A2 (DE MEURECHY GUIDO D K
[BE]) 2 septembre 2004 (2004-09-02)

US 2011/123097 A1 (VAN COPPENOLLE BART
[BE]) 26 mai 2011 (2011-05-26)

Luis Miguel Miranda ET AL:
"Three-Dimensional Laser Scanning Test in
Aircraft Surfaces",
FIG Working Week 2015,
21 mai 2015 (2015-05-21), XP055549684,
Extrait de l'Internet:
URL: http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts07e/TS07E_miranda_paez_7535.pdf
[extrait le 2019-01-30]

EP 2 730 985 A1 (DASSAULT AVIAT [FR])
14 mai 2014 (2014-05-14)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

NEANT

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT