



(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2020/02/21
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2020/08/27
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2022/01/11
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2021/08/16
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: EP 2020/054684
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2020/169833
(30) Priorité/Priority: 2019/02/22 (FR FR1901852)

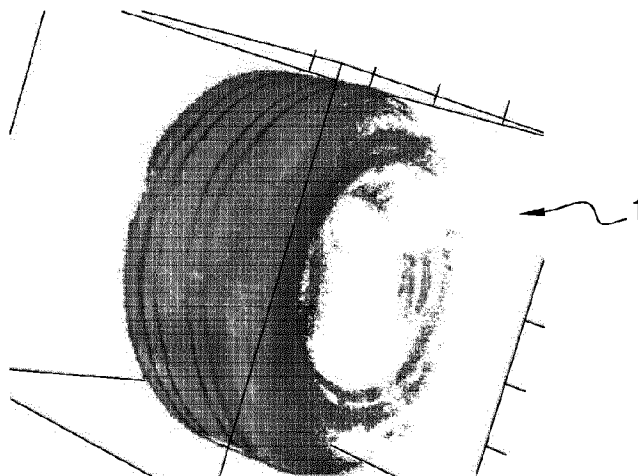
(51) Cl.Int./Int.Cl. *G01M 17/02* (2006.01),
G06T 19/20 (2011.01), *G06T 7/00* (2017.01),
G06T 7/37 (2017.01), *G06T 7/90* (2017.01)

(72) Inventeurs/Inventors:
FANTON, NICOLAS, FR;
PERIGORD, ADRIEN, FR;
COUTURIER, EMMANUEL, FR;
VIJAYAKUMARAN, MAJURIAN, FR;
LIPARI, NICOLAS, FR

(73) Propriétaire/Owner:
SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE, FR

(74) Agent: LAVERY, DE BILLY, LLP

(54) Titre : PROCÉDE DE DETECTION D'UNE DÉGRADATION D'UN PNEUMATIQUE D'UNE ROUE
(54) Title: METHOD FOR DETECTING A DEGRADATION OF A WHEEL TYRE



(57) Abrégé/Abstract:

Procédé de détection d'une dégradation d'un pneumatique réel d'une roue, comprenant les étapes de : - acquérir au moins un premier objet en trois dimensions (1) représentatif d'une forme du pneumatique réel, en utilisant un appareil électronique comprenant au moins un capteur tridimensionnel, le premier objet en trois dimensions étant formé par un ensemble de points capturés; - déterminer, à partir de l'ensemble de points capturés, une position du point central du pneumatique réel; - recalculer le premier objet en trois dimensions pour obtenir un deuxième objet en trois dimensions; - réaliser une transformation du deuxième objet en trois dimensions pour obtenir un ou plusieurs objets en deux dimensions; - analyser le ou les objets en deux dimensions pour détecter la dégradation du pneumatique réel.



(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international(10) Numéro de publication internationale
WO 2020/169833 A1(43) Date de la publication internationale
27 août 2020 (27.08.2020)

WIPO | PCT

(51) Classification internationale des brevets :

G01M 17/02 (2006.01) G06T 7/90 (2017.01)
G06T 7/00 (2017.01) G06T 19/20 (2011.01)
G06T 7/37 (2017.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP2020/054684

(22) Date de dépôt international :

21 février 2020 (21.02.2020)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

FR1901852 22 février 2019 (22.02.2019) FR

(71) Déposant : SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE

[FR/FR] ; 72-76 Rue Henry Farman, 75015 PARIS (FR).

(72) Inventeurs : FANTON, Nicolas ; c/o SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE, 72-76 rue Henry Farman, 75015 PARIS (FR). PERIGORD, Adrien ; c/o SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE, 72-76 rue Henry Farman, 75015

PARIS (FR). COUTURIER, Emmanuel ; c/o SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE, 72-76 rue Henry Farman, 75015 PARIS (FR). VIJAYAKUMARAN, Majurian ; c/o SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE, 72-76 rue Henry Farman, 75015 PARIS (FR). LIPARI, Nicolas ; c/o SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE, 72-76 rue Henry Farman, 75015 PARIS (FR).

(74) Mandataire : LAVAUD, Thomas et al. ; CABINET BOETTCHER, 16 rue Médéric, 75017 PARIS (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) :

AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: METHOD FOR DETECTING A DEGRADATION OF A WHEEL TYRE

(54) Titre : PROCEDE DE DETECTION D'UNE DEGRADATION D'UN PNEUMATIQUE D'UNE ROUE

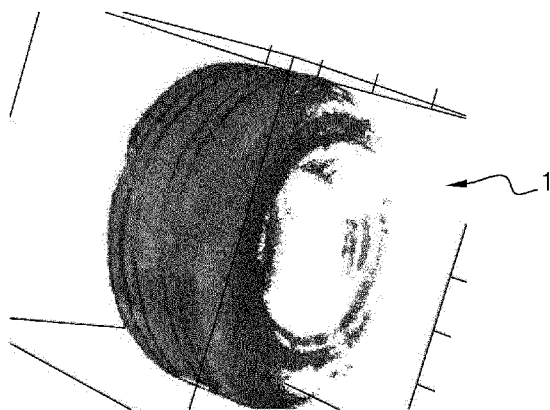


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method for detecting a degradation of an actual tyre of a wheel, comprising the steps of: - acquiring at least one first three-dimensional object (1) representing a shape of the actual tyre, using an electronic apparatus comprising at least one three-dimensional sensor, the first three-dimensional object being formed by a set of captured points; - determining, from the set of captured points, a position of the central point of the actual tyre; - resetting the first three-dimensional object in order to obtain a second three-dimensional object; - transforming the second three-dimensional object in order to obtain one or more two-dimensional objects; - analysing the one or more two-dimensional objects in order to detect the degradation of the actual tyre.

(57) Abrégé : Procédé de détection d'une dégradation d'un pneumatique réel d'une roue, comprenant les étapes de : - acquérir au moins un premier objet en trois dimensions (1) représentatif d'une forme du pneumatique réel, en utilisant un appareil électronique comprenant au moins un capteur tridimensionnel, le premier objet en trois dimensions étant formé par un ensemble de points capturés; - déterminer, à partir de l'ensemble de points capturés, une position du point central du pneumatique réel; - recalculer le premier objet en trois dimensions pour obtenir un deuxième objet en trois dimensions; - réaliser une transformation du deuxième objet en trois dimensions pour obtenir un ou plusieurs objets en deux dimensions; - analyser le ou les objets en deux dimensions pour détecter la dégradation du pneumatique réel.



WO 2020/169833 A1

WO 2020/169833 A1

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

PROCEDE DE DETECTION D'UNE DEGRADATION D'UN PNEUMATIQUE D'UNE ROUE

L'invention concerne le domaine des procédés de détection d'une dégradation d'un pneumatique d'une roue.

5

ARRIERE PLAN DE L'INVENTION

Les pneumatiques des roues d'avion sont soumis à de très fortes contraintes, en particulier au cours des phases de décollage et d'atterrissage. Au décollage, les pneumatiques subissent à la fois la charge de l'avion et la vitesse de décollage, et s'échauffent brièvement mais de manière importante. A l'atterrissage, au moment où les roues de l'avion touchent le sol, les pneumatiques passent en un temps très court d'une vitesse nulle à une vitesse très élevée.

Ces phénomènes ont tendance à user les pneumatiques. Or, la détérioration d'un pneumatique peut provoquer un glissement excessif, une friction excessive, voire même un éclatement dudit pneumatique. Il est donc fondamental, pour des raisons de sécurité, de pouvoir estimer de manière précise et fiable l'usure des pneumatiques pour assurer qu'elle demeure à un niveau acceptable.

Lorsque le niveau d'usure d'un pneumatique atteint un certain seuil, le pneumatique est renvoyé en usine pour être rechapé. Généralement, ce sont les fabricants de pneumatiques qui gèrent pour les compagnies aériennes l'approvisionnement et la maintenance des pneumatiques. Le nombre de pneumatiques utilisés par les compagnies aériennes est très élevé, de sorte qu'il est important, pour les fabricants de pneumatiques, que les pneumatiques soient retirés au bon moment, ni trop tôt, pour ne pas immobiliser inutilement des pneumatiques opérationnels, ni

trop tard, pour que l'usure des pneumatiques ne devienne pas excessive.

Ainsi, une estimation précise et fiable du niveau d'usure des pneumatiques est nécessaire pour la sécurité de l'avion et est avantageuse d'un point de vue économique.

Actuellement, deux méthodes principales sont utilisées par les opérateurs au sol pour évaluer l'usure d'un pneumatique.

Une première méthode consiste à estimer visuellement le niveau d'usure et les dégradations du pneumatique.

Une deuxième méthode consiste à réaliser manuellement des mesures de profondeur des sculptures et des témoins d'usure du pneumatique.

Ces deux méthodes engendrent un grand nombre d'erreurs.

Les estimations et les mesures réalisées sont subjectives et dépendent beaucoup de l'opérateur au sol qui les réalise. Il a donc été envisagé de faire faire ces mesures par plusieurs opérateurs au sol, mais cette solution est coûteuse et fastidieuse.

Par ailleurs, ces méthodes permettent uniquement de détecter un niveau d'usure nécessitant un remplacement du pneumatique, mais ne permettent pas d'anticiper le remplacement dudit pneumatique.

OBJET DE L'INVENTION

L'invention a pour objet, d'une part, de détecter de manière fiable une dégradation d'un pneumatique (telle qu'une usure excessive), et d'autre part, d'améliorer la maintenance d'un grand nombre de pneumatiques.

RESUME DE L'INVENTION

En vue de la réalisation de ce but, on propose un procédé de détection d'une dégradation d'un pneumatique réel d'une roue, comprenant les étapes de :

- 5 - acquérir au moins un premier objet en trois dimensions représentatif d'une forme du pneumatique réel, en utilisant un appareil électronique comprenant au moins un capteur tridimensionnel, le premier objet en trois dimensions étant formé par un ensemble de points capturés ;
- 10 - déterminer, à partir de l'ensemble de points capturés, une position d'un point central du pneumatique réel ;
- recalcr le premier objet en trois dimensions par rapport à un pneumatique théorique, de dimensions et d'orientation connues, pour obtenir un deuxième objet en trois dimensions formant un pneumatique recalé ;
- 15 - réaliser une transformation du deuxième objet en trois dimensions pour obtenir un ou plusieurs objets en deux dimensions ;
- analyser le ou les objets en deux dimensions pour détecter la dégradation du pneumatique réel.

20 Le procédé de détection selon l'invention permet donc de détecter une dégradation du pneumatique réel de manière automatique et donc objective et fiable.

Le procédé de détection permet aussi d'acquérir et de conserver des données relatives à l'état d'un grand nombre
25 de pneumatiques réels. L'acquisition des données est à la fois simple et rapide, puisqu'il suffit d'approcher l'appareil électronique du pneumatique réel pour réaliser la détection.

Le procédé de détection permet donc de mettre en œuvre des
30 opérations de maintenance prédictive sur un très grand nombre de pneumatiques réels, et, en particulier, permet

d'anticiper une dégradation et un remplacement des pneumatiques réels.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel la détermination de la position du point central du pneumatique réel comprend les étapes, pour chaque point capturé, de définir un vecteur normal à une surface du premier objet en trois dimensions qui passe par ledit point capturé, et d'estimer une position du point central du pneumatique réel à partir des vecteurs normaux.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel l'estimation de la position du point central est un processus itératif au cours duquel, à chaque itération, on supprime des points capturés qui n'appartiennent pas au pneumatique réel, on conserve des points capturés qui appartiennent au pneumatique réel, et on affine l'estimation de la position du point central en utilisant les vecteurs normaux des points capturés appartenant au pneumatique réel.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel la détermination de la position du point central du pneumatique réel met en œuvre une méthode de partitionnement de données pour distinguer des premiers points capturés appartenant au pneumatique réel et des deuxièmes points capturés appartenant au sol.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel le recalage utilise un algorithme de recalage basé sur des transformations euclidiennes.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel le recalage utilise en outre un algorithme *ICP*.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui
5 qui vient d'être décrit, dans lequel la transformation comprend les étapes de couper le deuxième objet en trois dimensions selon des plans perpendiculaires à un axe de rotation du pneumatique recalé pour obtenir une pluralité de tranches en trois dimensions de faible épaisseur, et
10 d'assimiler chaque tranche en trois dimensions à une tranche en deux dimensions d'épaisseur nulle, le ou les objets en deux dimensions comprenant les tranches en deux dimensions.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui
15 qui vient d'être décrit, comprenant les étapes de calculer, pour chaque tranche en deux dimensions, un rayon $r_i(\alpha)$ de la tranche en deux dimensions, qui est fonction d'un angle α autour de l'axe de rotation du pneumatique recalé.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui
20 qui vient d'être décrit, dans lequel on calcule, pour chaque tranche en deux dimensions, un rayon moyen de la tranche en deux dimensions $T2d_i$, et dans lequel on étudie la variation du rayon moyen en fonction de i (qui est l'indice de la tranche $T2d_i$).

On propose de plus un procédé de détection tel que celui
25 qui vient d'être décrit, dans lequel on détecte, à partir de la variation du rayon moyen, une dégradation anormale qui est une usure asymétrique ou un aplatissement ou une bosse ou une crevasse ou la présence d'un corps étranger
30 sur une bande de roulement du pneumatique réel.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel on détecte la position de rainures sur la bande de roulement et on évalue une profondeur de chaque rainure, la profondeur des rainures étant utilisée pour détecter une dégradation trop importante ou anormale, et la position des rainures étant utilisée pour localiser la dégradation trop importante ou anormale.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel l'appareil électronique comprend en outre un capteur photographique agencé pour acquérir une couleur associée à chaque point capturé, dans lequel la transformation est une projection en deux dimensions appliquée sur le deuxième objet en trois dimensions, et dans lequel le ou les objets en deux dimensions comprennent une image en deux dimensions d'une bande de roulement du pneumatique recalé obtenue par ladite projection en deux dimensions.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel l'analyse de l'image en deux dimensions comprend l'étape d'analyser une évolution d'un gradient de couleur de l'image en deux dimensions.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel l'analyse de l'évolution du gradient de couleur est utilisée pour détecter une dégradation anormale qui est une usure excessive conduisant à l'apparition d'une trame métallique du pneumatique réel, ou qui est un dégagement de chaleur ou une contamination.

On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel l'analyse de l'image en deux dimensions comprend l'étape d'appliquer sur l'image en deux dimensions une transformée de *Hough*.

5 On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel la transformée de *Hough* permet de détecter une dégradation anormale qui est un aplatissement ou une bosse ou une crevasse ou la présence d'un corps étranger sur la bande de roulement.

10 On propose de plus un procédé de détection tel que celui qui vient d'être décrit, dans lequel l'analyse de l'image en deux dimensions comprend l'étape de mettre en œuvre un apprentissage, basé sur des réseaux de neurones convolutifs, des images du pneumatique réel en bon état
15 ainsi que des images des différentes dégradations recherchées.

L'invention sera mieux comprise à la lumière de la description qui suit d'un mode de mise en œuvre particulier non limitatif de l'invention.

20 **BREVE DESCRIPTION DES DESSINS**

Il sera fait référence aux dessins annexés, parmi lesquels :

[Fig. 1] la figure 1 représente un premier objet en trois dimensions représentatif de la forme d'un pneumatique
25 réel ;

[Fig. 2] la figure 2 illustre, dans un repère en deux dimensions, une méthode utilisée pour estimer la position d'un point central du pneumatique réel ;

[Fig. 3] la figure 3 représente des point capturés et une
30 première estimation de la position du point central ;

[Fig. 4] la figure 4 représente, sous la forme d'un histogramme, une répartition de distances entre les points capturés et la première estimation de la position du point central ;

5 [Fig. 5] la figure 5 représente les point capturés et une estimation finale de la position du point central ;

[Fig. 6] la figure 6 représente, sous la forme d'un histogramme, une répartition de distances entre les points capturés et l'estimation finale de la position du point central ;

10 [Fig. 7] la figure 7 illustre la mise en œuvre d'une méthode de partitionnement de données ;

[Fig. 8] la figure 8 représente, avant recalage, le pneumatique réel et un pneumatique théorique ;

15 [Fig. 9] la figure 9 représente, après recalage, un deuxième objet en trois dimensions obtenu par recalage du premier objet en trois dimensions et formant un pneumatique recalé ;

[Fig. 10] la figure 10 représente des tranches en trois dimensions et des tranches en deux dimensions d'un pneumatique recalé ;

[Fig. 11] la figure 11 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel, présentant une usure normale ;

25 [Fig. 12] la figure 12 est un graphique comprenant une courbe représentant la variation, selon l'axe de rotation, du rayon moyen du pneumatique recalé correspondant au pneumatique réel de la figure 11 ;

[Fig. 13] la figure 13 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel qui présente une usure asymétrique ;

30 [Fig. 14] la figure 14 est un graphique comprenant une courbe représentant la variation, selon l'axe de rotation,

du rayon moyen du pneumatique recalé correspondant au pneumatique réel de la figure 13 ;

[Fig. 15] la figure 15 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel, sur laquelle des crevasses sont formées ;

[Fig. 16] la figure 16 est un graphique comprenant une courbe représentant la variation, selon l'axe de rotation, du rayon moyen du pneumatique recalé correspondant au pneumatique réel de la figure 15 ;

[Fig. 17] la figure 17 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel, qui présente un aplatissement ;

[Fig. 18] la figure 18 est un graphique comprenant une courbe représentant la variation, selon l'axe de rotation, du rayon moyen du pneumatique recalé correspondant au pneumatique réel de la figure 17 ;

[Fig. 19] la figure 19 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel, dans laquelle un clou est enfoncé ;

[Fig. 20] la figure 20 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel, dans laquelle un clou était enfoncé, puis est ressorti en laissant un trou ;

[Fig. 21] la figure 21 est un graphique comprenant une courbe représentant la variation, selon l'axe de rotation, du rayon moyen du pneumatique recalé correspondant au pneumatique réel de la figure 20 ;

[Fig. 22] la figure 22 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel, sur laquelle on voit deux rainures et un trou ;

[Fig. 23] la figure 23 représente l'application d'une transformée de *Hough* sur une image en deux dimensions correspondant à la figure 22 ;

[Fig. 24] la figure 24 représente la bande de roulement d'un pneumatique réel, sur laquelle la trame métallique du pneumatique réel est apparente ;

5 [Fig. 25] la figure 25 représente les gradients de couleur de la figure 24 ;

[Fig. 26] la figure 26 représente l'application d'une transformée de *Hough* sur une image en deux dimensions issue d'un pneumatique réel ayant une bande roulement sur laquelle est formé un aplatissement ;

10 [Fig. 27] la figure 27 représente une bande de roulement d'un pneumatique réel contaminé ;

[Fig. 28] la figure 28 représente l'évolution du gradient de couleur d'une image en deux dimensions correspondant à un pneumatique réel non contaminé ;

15 [Fig. 29] la figure 29 représente les gradients de couleur d'une image en deux dimensions correspondant à un pneumatique réel contaminé ;

[Fig. 30] la figure 30 représente la mise en œuvre d'un filtre de détection de contours dans l'espace HSV, mis en œuvre sur une image en deux dimensions obtenue à partir de la bande de roulement de la figure 19 ;

20 [Fig. 31] la figure 31 représente des étapes d'un apprentissage basé sur des réseaux de neurones et mis en œuvre sur des images en deux dimensions ;

25 [Fig. 32] la figure 32 est une matrice de détection de contours.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

Le procédé de détection selon l'invention est ici mis en œuvre pour détecter une dégradation d'un pneumatique réel d'une roue d'un avion. Par « pneumatique réel », on entend le véritable pneumatique monté sur la roue, et non un

30

pneumatique « virtuel » comme le sont le pneumatique théorique et le pneumatique recalé dont on parlera plus bas.

5 En référence à la figure 1, le procédé de détection comprend tout d'abord l'étape d'acquérir au moins un premier objet en trois dimensions 1, représentatif de la forme du pneumatique réel, en utilisant un appareil électronique comprenant un capteur tridimensionnel et un capteur photographique.

10 L'appareil électronique est par exemple un *smartphone* qui est approché du pneumatique réel par un opérateur au sol. Le capteur tridimensionnel est par exemple une caméra stéréo adaptée à mettre en œuvre une fonction de scanner en trois dimensions. Le premier objet en trois dimensions 15 1 est par exemple une image en trois dimensions.

Le premier objet en trois dimensions 1 est formé par un ensemble de points capturés (ou « nuage » de points capturés).

20 Le *smartphone* acquiert et enregistre le premier objet en trois dimensions 1.

On note que tout type de capteur tridimensionnel, permettant d'obtenir un objet en trois dimensions formés de points et représentatif de la forme du pneumatique réel, pourrait être utilisé. On note aussi que l'appareil 25 électronique peut bien sûr ne pas être un *smartphone*. Une caméra 3D reliée à un ordinateur pourrait par exemple être utilisée.

Le capteur photographique, quant à lui, permet d'acquérir une couleur associée à chaque point capturé.

30 Chaque point capturé est composé de coordonnées cartésiennes en trois dimensions (x ; y ; z). Les points

capturés représentent la partie scannée du pneumatique réel.

L'enregistrement présente une densité de points capturés suffisamment élevée pour que l'on soit en mesure de
5 réaliser des calculs précis à partir de ces points capturés. La densité est ici de 60 points capturés/cm² en moyenne.

On utilise pour ce qui suit un référentiel fixe, ici un système de coordonnées cylindriques, dans lequel on impose
10 que l'axe de rotation du pneumatique réel corresponde à une droite de coordonnées :

$$(r ; \theta ; z) = (0 ; 0 ; z)$$

On détermine, à partir de l'ensemble de points capturés, la position du point central du pneumatique réel. La
15 position du point central du pneumatique réel va permettre d'extraire le pneumatique réel du premier objet en trois dimensions 1, et donc de supprimer du premier objet en trois dimensions 1 l'environnement du pneumatique réel. L'environnement comprend en particulier le sol sur lequel
20 le pneumatique réel repose.

Dans un premier mode de réalisation, la position du pneumatique réel est définie à partir d'une estimation de la position d'un point central du pneumatique réel. Le point central du pneumatique réel est un point situé « au
25 centre » du pneumatique réel. Le point central est situé à l'intersection de l'axe de rotation du pneumatique réel et d'un plan de symétrie du pneumatique réel perpendiculaire à l'axe de rotation.

L'estimation de la position du point central est réalisée
30 de la manière suivante.

Les points capturés de l'enregistrement sont situés sur une surface du pneumatique réel ou bien sur une surface du sol. Chaque point capturé forme donc un sommet positionné sur une surface. L'enregistrement fourni par le capteur

5 tridimensionnel produit les coordonnées (x ; y ; z) de chaque sommet dans un repère cartésien à taille réel. Le centre de ce repère cartésien est déterminé par le capteur tridimensionnel.

Pour simplifier les calculs, les points capturés, ou

10 sommets, sont normés en [0 ; 1] pour avoir un référentiel intrinsèque aux données. On conserve ainsi une échelle commune pour tous les points capturés, et on facilite la définition de normes utilisées dans les calculs qui suivent.

15 Pour produire des sommets normés, on réalise le calcul suivant :

$P_{\text{norm}} := (P - \min(P)) / |\max(P)|,$

où :

- P_{norm} est l'ensemble des sommets normés de coordonnées

20 (x_{pnorm} ; y_{pnorm} ; z_{pnorm}), qui sont normés en [0 ; 1] ;

- P est l'ensemble des sommets non normés, de coordonnées (x_p ; y_p ; z_p) ;
- $\min(P)$ est la valeur minimale de x_p ; y_p ; z_p ;
- $\max(P)$ est la valeur maximale de x_p ; y_p ; z_p.

25 Le capteur tridimensionnel permet également de déterminer les vecteurs normaux à la surface (du pneumatique réel ou du sol) en chaque sommet. Chaque vecteur normal a une norme égale à 1.

On utilise les sommets normés ainsi que les vecteurs

30 normaux pour évaluer la position du point central.

En référence à la figure 2, le cercle 2 est une approximation d'une vue en coupe, dans un plan perpendiculaire à un axe de rotation du pneumatique réel, de la bande de roulement du pneumatique réel. Le cercle 2 délimite donc la surface du pneumatique réel au niveau de la bande de roulement. Le cercle 2 a un centre 3.

De même, les lignes 4 délimitent la surface du sol.

Chaque vecteur normal n_i à la surface du pneumatique réel, qui passe par un point capturé P_i situé sur le cercle 2, pointe par définition vers l'opposé du centre 3 dudit cercle 2. L'opposé du vecteur normal $-n_i$ pointe donc vers le centre 3 du cercle 2, qui est une estimation de la position du point central.

Par contre, les vecteurs normaux à la surface du sol, qui passent par des points capturés P_i situés sur les lignes 4, pointent dans des directions différentes.

On calcule donc la position $P_i - n_i/2$ pour chaque point capturé P_i .

Ces positions sont comprises dans une première zone 5 proche du point central 3 pour les points capturés P_i qui sont situés sur la bande de roulement (c'est-à-dire sur le cercle 2 de la figure 2) et qui sont largement majoritaires.

Pour les points capturés « parasites » P_i appartenant au sol sur lequel repose le pneumatique réel, ces positions sont comprises dans une deuxième zone 6 éloignée du point central 3.

Le point central estimé 3 est la moyenne géométrique des points situés dans la première zone 5 et la deuxième zone 6, et ce, à chaque itération.

On estime la position du point central en utilisant un processus itératif au cours duquel, à chaque itération, on supprime des points capturés qui n'appartiennent pas au pneumatique réel (et qui comprennent donc les points capturés appartenant au sol), on conserve les points capturés qui appartiennent au pneumatique réel, et on affine l'estimation de la position du point central en utilisant les vecteurs normaux des points capturés appartenant au pneumatique réel.

En référence à la figure 3, on obtient une première estimation P_{c1} de la position du point central à partir des vecteurs normaux :

$$\begin{aligned} P_{c1} &= (\sum P_i - \sum \vec{n}_i / 2) / N_{\text{points}} \\ &= (\sum (P_i - \vec{n}_i / 2)) / N_{\text{points}}. \end{aligned}$$

où N_{points} est le nombre de points capturés considérés.

On calcule alors les distances entre chacun des points capturés et la première estimation P_{c1} de la position du point central.

En supposant que l'opérateur au sol, en utilisant le *smartphone*, acquiert principalement le pneumatique réel, et que le pneumatique réel présente une forme sphérique, on obtient une concentration de points capturés sur un rayon donné.

Ceci est bien visible sur la figure 4. Le pic de la portion d'histogramme 7 correspond à la bande de roulement du pneumatique réel, alors que la portion d'histogramme 8 correspond à l'environnement du pneumatique réel et en particulier aux points capturés situés sur le sol.

On supprime alors les points capturés qui n'appartiennent pas au pic de la portion d'histogramme 7, et on effectue un nouveau calcul du point central. On limite de la sorte

l'ensemble de points capturés à une zone englobant le rayon ayant la plus grande fréquence d'apparition.

On obtient alors une deuxième estimation de la position du point central PC_2 .

- 5 On réitère ce processus jusqu'à obtenir la relation suivante entre l'estimation courante PC_n de la position du point central et l'estimation PC_{n-1} obtenue à l'itération précédente :

$$||PC_n - PC_{n-1}|| < \varepsilon,$$

- 10 où ε est une seuil d'arrêt prédéfini, par exemple égal à 0.001 mètre.

On obtient finalement l'estimation finale PC_f de la position du point central, visible sur la figure 5.

- 15 En référence à la figure 6, on distingue bien, à partir des distances entre les points capturés et l'estimation finale PC_f de la position du point central, la portion d'histogramme 9 qui correspond au pneumatique réel et la portion d'histogramme 10 qui correspond au sol.

- 20 On isole alors les points capturés appartenant au pneumatique réel des points capturés appartenant à l'environnement du pneumatique réel (notamment au sol), et on conserve uniquement les points capturés appartenant au pneumatique réel.

- 25 En partant de la forme sphérique du pneumatique réel et en utilisant l'estimation finale PC_f de la position du point central, il est possible de définir la position de la bande de roulement. On part du principe que tous les points capturés de la bande de roulement sont situés à une distance fixe R du point central.

- 30 On obtient donc la position du pneumatique réel.

Dans un deuxième mode de réalisation, en référence à la figure 7, la détermination de la position du pneumatique réel met en œuvre une méthode de partitionnement de données pour distinguer des premiers points capturés 11 appartenant
5 au pneumatique réel et des deuxièmes points capturés 12 appartenant au sol.

Le partitionnement de données (ou *data clustering*, en anglais) est une méthode d'analyse qui permet de diviser un ensemble de données en plusieurs sous-ensembles
10 partageant des caractéristiques communes.

Dans le cas de la détection de la position et de l'orientation du pneumatique réel dans l'ensemble de points capturés, on part du postulat que la partie du pneumatique réel en contact avec le sol ne pourra pas être enregistrée.
15 Cela implique une forme de « coupure » entre les premiers points capturés 11 et les deuxièmes points capturés 12.

On utilise ici un algorithme DBSCAN (pour *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) pour réaliser le partitionnement de données.

20 Comme on peut le voir sur la figure 7, on distingue parfaitement les premiers points capturés 11 appartenant au pneumatique réel et les deuxièmes points capturés 12 appartenant au sol: on détermine ainsi de manière efficace la position du pneumatique réel.

25 En référence aux figures 8 et 9, une fois que la position du pneumatique réel 13 a été estimée, on recale le premier objet en trois dimensions 13 par rapport à un pneumatique théorique 14 pour obtenir un deuxième objet en trois dimensions 15 formant un pneumatique recalé. Le deuxième
30 objet en trois dimensions 15 est formé par un ensemble de points recalés.

Pour cela, on procède tout d'abord à un échantillonnage pour réduire le nombre de points capturés.

Puis, en se basant uniquement sur une partie de la bande de roulement et sur une partie des flancs du pneumatique réel, on applique un algorithme de recalage par rapport à un nuage de points théoriques correspondant au pneumatique théorique 14.

Le recalage permet de connaître l'axe de rotation du pneumatique réel. Le pneumatique théorique 14 est créé spécialement pour le recalage. Le pneumatique théorique 14 a en particulier des dimensions et une orientation connues. On utilise notamment comme données d'entrée l'axe de rotation ainsi que le point central du pneumatique théorique 14.

Le recalage utilise un algorithme de recalage basé sur des transformations euclidiennes.

On réalise des transformations euclidiennes (rotation, translation) vers un référentiel connu, qui ne transforment pas l'objet. Les transformations euclidiennes sont définies par :

$T(v) = R v + t$, où :

- v est un vecteur de l'objet ;
- R est une transformation orthogonale ;
- t est un vecteur de translation.

Le recalage consiste à trouver la transformation qui permettra de minimiser la différence entre le nuage de points capturés et le nuage de points théoriques. On utilise ici un algorithme de type ICP (pour *Iterative Corresponding Point*).

On décrit maintenant les traitements mis en œuvre sur le deuxième objet en trois dimensions 15 formant le pneumatique recalé.

5 Ces traitements consistent à réaliser une transformation du deuxième objet en trois dimensions 15 formant le pneumatique recalé pour obtenir un ou plusieurs objets en deux dimensions, puis à analyser le ou les objets en deux dimensions pour détecter une dégradation du pneumatique réel.

10 En référence à la figure 10, dans un premier mode de réalisation, la transformation consiste tout d'abord à couper le deuxième objet en trois dimensions 15 selon des plans perpendiculaires à un axe de rotation Z du pneumatique recalé pour obtenir un nombre n de tranches en trois dimensions $T3d_1...T3d_i...T3d_n$ de faible épaisseur. L'épaisseur e de chaque tranche en trois dimensions $T3d_i$ est de l'ordre du millimètre.

On obtient un nombre n de tranches en trois dimensions $T3d_i$ qui, empilées selon l'axe de rotation Z du pneumatique recalé, forment le pneumatique recalé.

20 La somme des épaisseurs de toutes les tranches en trois dimensions $T3d_i$ est donc égale à la largeur de la bande de roulement du pneumatique recalé.

L'épaisseur de chaque tranche en trois dimensions $T3d_i$ est très faible par rapport au rayon du pneumatique recalé.

25 On assimile donc chaque tranche en trois dimensions $T3d_i$ à une tranche en deux dimensions $T2d_i$, $1 \leq i \leq n$, d'épaisseur nulle. Les objets en deux dimensions, résultats de la transformation, comprennent donc les tranches en deux dimensions $T2d_i$.

30

Chaque tranche en deux dimensions $T2d_i$ a pour forme générale un cercle, dans le cas où le *smartphone* a acquis la totalité de la circonférence du pneumatique réel, ou une portion angulaire de cercle, dans le cas où le *smartphone* a acquis
5 uniquement une portion angulaire de la circonférence du pneumatique réel.

On calcule alors, pour chaque tranche en deux dimensions $T2d_i$, un rayon $r_i(\alpha)$ de la tranche en deux dimensions $T2d_i$. Le rayon $r_i(\alpha)$ est fonction d'un angle α autour de l'axe
10 de rotation z . Le rayon $r_i(\alpha)$ n'est pas nécessairement constant en fonction de l'angle α , car l'usure du pneumatique réel n'est pas nécessairement uniforme sur toute la circonférence de la tranche en deux dimensions $T2d_i$.

15 On étudie alors la variation du rayon $r_i(\alpha)$ en faisant varier i pour détecter une différence de rayon du pneumatique recalé selon l'axe de rotation Z (c'est-à-dire selon la largeur de la bande de roulement), et donc pour détecter une dégradation du pneumatique réel.

20 L'écart selon i entre les rayons $r_i(\alpha)$ doit alors présenter des variations régulières, représentatives de la présence des structures du pneumatique réel, dont on pourra alors quantifier la profondeur.

On doit ainsi percevoir la présence des rainures de la
25 bande de roulement du pneumatique réel, qui permettent actuellement d'évaluer visuellement l'usure du pneumatique réel.

Bien sûr, cette analyse peut être faite avec α constant, ou bien en faisant varier l'angle α dans un intervalle
30 angulaire défini.

On peut aussi, pour chaque tranche en deux dimensions $T2d_i$, calculer le rayon moyen r_i de chaque tranche en deux dimensions $T2d_i$. On étudie alors la variation du rayon moyen r_i en fonction de i , c'est-à-dire selon l'axe de rotation z .

On étudie aussi la variation du rayon $r_i(\alpha)$ selon l'angle α , pour détecter des variations angulaires du rayon du pneumatique recalé et donc pour détecter une dégradation du pneumatique réel.

Pour une tranche en deux dimensions $T2d_i$ donnée, le rayon $r_i(\alpha)$ doit normalement présenter une très faible variation en fonction de l'angle α , ce qui indique une usure régulière.

Si ce n'est pas le cas, les coordonnées $(r ; \theta ; z)$ des points capturés permettent d'informer de la présence, de la forme et de la profondeur d'une anomalie.

On analyse donc un ou plusieurs paramètres parmi la variation du rayon $r_i(\alpha)$ en fonction de i , la variation du rayon $r_i(\alpha)$ en fonction de α , et la variation du rayon moyen r_i en fonction de i . L'étude de ces variations de rayon permet de déterminer un changement inattendu, tel qu'une diminution ponctuelle ou continue de ce rayon.

On voit sur la figure 11 une bande de roulement 20 d'un pneumatique réel 21, qui présente une usure normale. On distingue les quatre rainures 22 qui sont usées de manière symétrique et régulière autour de l'axe de rotation du pneumatique réel 21.

La courbe 23 de la figure 12 représente la variation en fonction de la valeur de i du rayon moyen r_i du pneumatique recalé correspondant au pneumatique réel 21 de la figure 11.

On distingue sur la courbe 23 quatre portions de courbe 24 correspondant à un rayon moyen r_1 réduit, qui chacune correspondent à l'une des quatre rainures 22 présentes sur la bande de roulement 20 du pneumatique réel 21 (sur le
5 graphique, les rainures 22 sont représentées par des traits en gras qui indiquent la position desdites rainures 22 dans la largeur de la bande de roulement 20).

On peut donc détecter la position des rainures 22 sur la bande de roulement 20 et évaluer la profondeur de chaque
10 rainure 22.

L'évaluation de la profondeur de chaque rainure 22 peut permettre de détecter la présence d'une dégradation sur la bande de roulement 20.

La détection de la position des rainures 22 permet de
15 positionner la dégradation sur la bande de roulement 20.

Ici, la bande de roulement 20 ne présente pas de dégradation anormale. L'usure du pneumatique réel 21 est normale et symétrique, et les rainures 22 ont chacune une profondeur à peu près constante.

20 On distingue sur la figure 13 une bande de roulement 26 d'un pneumatique réel 27, qui présente une usure anormale, asymétrique, mal répartie sur la bande de roulement 26.

On voit sur la courbe 28 du graphique de la figure 14 que la rainure 29 et la rainure 30 ont une profondeur très
25 faible par rapport aux autres rainures. Le rayon moyen du pneumatique recalé varie très peu au niveau de ces rainures, ce qui est le signe d'une usure excessive et non symétrique, puisqu'elle concerne deux rainures situées d'un même côté de la bande de roulement 26.

On voit sur la figure 15 que des crevasses 32 sont formées sur la bande de roulement 33 d'un pneumatique réel 34, entre la rainure 35 et la rainure 36.

On voit sur la courbe 38 de la figure 16 que le rayon moyen
5 diminue dans la portion de courbe 37 entre les deux rainures 35 et 36, ce qui est représentatif de la présence de la crevasse.

Des variations nettes ou répétées du rayon moyen peuvent en effet indiquer une surface présentant des anomalies de
10 type crevasse, bosse, excroissance anormale, déchirure, chevron, craquelure, etc.

On voit sur la figure 17 la présence d'un aplatissement (*flat spot*) 40 présent sur la bande de roulement 41 d'un
15 pneumatique réel 42. Cet aplatissement 40 résulte d'un freinage sans rotation du pneumatique réel 42.

L'aplatissement 40 est perceptible sur la courbe 45 du graphique de la figure 18. La portion de courbe 46 comprend, sur une zone relativement plate, une succession
20 de pics et de creux de faible amplitude, représentative de la présence de l'aplatissement.

On ne distingue pas de portion de courbe de rayon moyen réduit : les rainures 47 ne sont pas détectées à cause de l'aplatissement 40.

En référence à la figure 19, il est aussi possible de
25 détecter la présence d'un corps étranger dans la couche supérieure de la bande de roulement 50 d'un pneumatique réel 51. Le corps étranger est par exemple un clou 52 enfoncé dans la bande de roulement 50. On détecte la présence du clou 52 en repérant une modification ponctuelle
30 du rayon moyen du pneumatique recalé dans un intervalle donné :

$[(r ; \theta ; z) ; (r+\delta_1 ; \theta+\delta_2 ; z+\delta_3)],$

où $[\delta_1, \delta_2, \delta_3]$ représentent les dimensions de la partie émergente du clou 52.

On note qu'il serait également possible d'utiliser des données de couleurs pour déterminer une différence ponctuelle, qui dépasserait un certain seuil, dans le cas où le corps étranger présenterait une couleur ou une luminosité significativement différentes du caoutchouc du pneumatique réel.

Il serait aussi envisageable d'utiliser un capteur spécifique, par exemple un capteur à ultrasons, pour détecter un changement de matière représentatif de la présence d'un corps étranger ou bien de l'apparition d'une trame métallique du pneumatique.

On pourrait aussi détecter une anomalie grâce à l'analyse d'un gradient de chaleur si l'on utilise une caméra thermique adaptée, éventuellement intégrée dans le *smartphone*.

On voit sur la figure 20 une bande de roulement 54 d'un pneumatique réel 55, dans laquelle un clou s'est enfoncé, a formé un trou 56, puis a été extrait de la bande de roulement 54.

On voit sur la courbe 57 du graphique de la figure 21 que le rayon moyen du pneumatique recalé diminue fortement dans la portion de courbe 58 entre les deux rainures 59, ce qui est représentatif de la présence du trou formé par le clou. On a donc vu que, dans un premier mode de réalisation, la transformation du deuxième objet en trois dimensions du pneumatique recalé produit des objets en deux dimensions qui sont des tranches en deux dimensions $T2d_i$ du pneumatique recalé.

Dans un deuxième mode de réalisation, la transformation est une projection en deux dimensions de l'objet en trois dimensions 15. Les objets en deux dimensions comprennent une image en deux dimensions d'une bande de roulement du pneumatique recalé obtenue par ladite projection en deux dimensions.

Les objets en deux dimensions comprennent aussi une image en deux dimensions du flanc droit et une image en deux dimensions du flanc gauche du pneumatique recalé. Pour obtenir les images des flancs, aucune projection en deux dimensions n'est nécessaire du fait de la forme des flancs. Pour réaliser la projection en deux dimensions, on utilise les coordonnées cylindriques et les formules suivantes :

$$x = R.(\lambda - \lambda_0)$$

$$15 \quad y = R.(\tan(\phi))$$

λ correspond à un point courant de la projection et λ_0 correspond à un point fixé comme origine du repère.

Comme cela a été dit plus tôt, on dispose par ailleurs des couleurs associées aux points capturés de l'ensemble de points capturés acquis et enregistré par le *smartphone*.

L'analyse des images en deux dimensions consiste à analyser une évolution d'un gradient de couleur de l'image en deux dimensions et/ou à appliquer sur l'image en deux dimensions une transformée de *Hough*.

25 L'analyse de l'évolution du gradient de couleur permet de détecter une dégradation anormale qui a pour résultat une évolution anormale des couleurs de la bande de roulement, alors que la transformée de *Hough* permet de détecter des contours et donc une dégradation anormale qui a pour résultat un relief anormal sur la bande de roulement.

On voit sur la figure 22 une bande de roulement 60 d'un pneumatique réel 61, sur laquelle on aperçoit deux rainures 62 et un trou 63. On applique la projection en deux dimensions sur le deuxième objet en trois dimensions pour
5 obtenir une image en deux dimensions de la bande de roulement. On applique alors sur cette image la transformée de *Hough* pour obtenir l'image de la figure 23.

On considère que chaque rainure est délimitée par deux lignes dans un plan en deux dimensions, chaque ligne
10 correspondant à un bord de ladite rainure. La transformée de *Hough* permet ainsi de détecter les rainures 62, délimitées chacune par deux lignes 64, ainsi que le trou 63.

On voit sur la figure 24 une bande de roulement 66 d'un pneumatique réel 67, sur laquelle la trame métallique 68 du pneumatique réel 67 est apparente. La trame métallique 68 est apparente à cause d'une usure excessive du
15 pneumatique réel 67. L'usure excessive est par exemple due à un dégagement de chaleur excessif sur une partie du pneumatique réel 67 résultant d'un problème de freinage, d'une piste mouillée ou gelée, etc.
20

On représente sur la figure 25 l'évolution du gradient de couleur sur l'image en deux dimensions.

On repère une zone 69 dans laquelle on observe des
25 différences de couleur anormales, qui sont ici significative de l'apparition de la trame métallique 68.

En référence à la figure 26, une bande de roulement peut comporter un aplatissement. L'aplatissement est caractérisé par une forme circulaire sur la bande de
30 roulement.

On produit l'image en deux dimensions de la bande de roulement, on traite l'image en deux dimensions pour retirer le bruit pouvant gêner la détection, puis on applique la transformée de *Hough* sur cette image en deux dimensions. On utilise ici plus précisément un algorithme de type CHT (pour *Circle Hough Transform*).

La transformée de *Hough* permet d'obtenir une forme représentative de l'aplatissement.

En référence à la figure 27, la bande de roulement 71 d'un pneumatique réel 72 peut aussi être dégradée par une usure liée à un dégagement de chaleur ou à une contamination par un liquide corrosif (huile, liquide de frein, etc.).

Dans le cas de dommages de ce type, on utilise l'évolution du gradient de couleur pour repérer les zones qui présentent une granularité anormale. Le pneumatique réel 72 étant constitué d'une unique matière, on peut partir de l'hypothèse que, si le pneumatique réel 72 est dans un état normal, on observera un gradient de couleur simple, lié uniquement à des facteurs extérieurs comme l'exposition au soleil. Au contraire, la présence d'une rupture dans la linéarité du gradient de couleur, tout comme la présence de zones présentant des couleurs différentes de celles du reste du pneumatique réel et non liées à une exposition lumineuse extérieure, sont les signes d'une dégradation de la couche de caoutchouc de la bande de roulement 71.

On observe sur la figure 28 l'évolution du gradient de couleur dans un cas où le pneumatique réel n'est pas contaminé. On observe sur la figure 29 l'évolution du gradient de couleur dans un cas où le pneumatique réel est contaminé.

Les différences entre ces deux figures montrent bien que l'évolution du gradient de couleur est un paramètre pertinent pour détecter une contamination d'un pneumatique réel.

5 En référence à la figure 30, en utilisant un filtre de détection de contours dans l'espace HSV (*Hue Saturation Value*), il est possible de détecter un corps étranger dans le pneumatique réel, tout comme une rainure du pneumatique réel.

10 La forme 75 correspond au clou 52 de la figure 19, alors que la forme 76 correspond à la rainure située juste à gauche du clou 52 sur la figure 19.

L'analyse des images en deux dimensions, obtenues par projection en deux dimensions du deuxième objet en trois dimensions 15 du pneumatique recalé, peut aussi consister à mettre en œuvre un apprentissage, basé sur des réseaux de neurones, des images du pneumatique réel en bon état ainsi que des images des différentes dégradations recherchées.

20

On utilise une base de données comprenant un nombre très important de données constituées d'images en deux dimensions similaires, acquises à partir d'un très grand nombre de pneumatiques réels.

25 Comme les projections en deux dimensions sont standardisées, on peut effectuer des comparaisons efficaces entre les images en deux dimensions, en éliminant les différences dues à l'acquisition de ces données (et donc non pertinentes pour l'analyse).

Les données doivent être classifiées manuellement en plusieurs catégories distinctes au cours d'une étape préliminaire.

On utilise les réseaux de neurones convolutifs (CNN ou
5 *ConvNets*) pour élaborer l'algorithme de prédiction.

En référence à la figure 31, pour une image en deux dimensions donnée, l'apprentissage comprend tout d'abord l'étape d'effectuer une convolution de l'image en deux dimensions avec une matrice prédéfinie (étape E1). On
10 utilise ici la matrice de détection de contour de la figure 32.

Puis, on applique une fonction de correction.

On utilise par exemple une fonction de type ReLu (pour *REctified Linear Unit*) :

15 $f(x) = \max(0, x),$

ou bien une fonction tangente hyperbolique :

$f(x) = \tanh(x),$

ou bien une fonction tangente hyperbolique saturante :

$f(x) = |\tanh(x)|,$

20 ou bien une fonction sigmoïde :

$f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}.$

Puis, on met en œuvre une opération de *pooling* (ou mise en commun) pour réduire la taille de l'image en deux dimensions (étape E2).

25 Il est alors possible de traiter chacune des zones de l'image en deux dimensions de manière individuelle via un neurone artificiel (étape E3).

La dernière étape (étape E4) consiste à appliquer la formule *Softmax* :

30 [Math. 2]

$$P_j = \frac{e^{o_j}}{\sum_k e^{o_k}}$$

On convertit ainsi les calques d'entrée du réseau de neurones à une probabilité de distribution. Il est alors possible de classifier les données des images en deux dimensions et de détecter les dégradations anormales sur les images en deux dimensions.

On peut aussi mettre en œuvre un apprentissage basé sur des réseaux de neurones directement sur les deuxièmes objets en trois dimensions du pneumatique recalé.

Dans une première étape, à nouveau, les données doivent être classifiées manuellement en plusieurs catégories distinctes.

Pour élaborer l'algorithme de prédiction, on utilise également les réseaux de neurones convolutifs (CNN ou *ConvNets*).

On note ici que, suite à la détection d'une dégradation d'un pneumatique réel, on génère un message d'alerte. Le message d'alerte est émis par le *smartphone* à destination de l'opérateur au sol, ou bien est transféré depuis le *smartphone* à un serveur qui centralise les messages d'alerte provenant d'un grand nombre de pneumatiques réels (par exemple de tous les pneumatiques réels utilisés par une compagnie aérienne).

Le message d'alerte contient un moyen d'identification du pneumatique concerné (par exemple une référence du pneumatique ou sa position sur l'avion) ainsi que, éventuellement, le type de la dégradation et sa position sur le pneumatique.

On enregistre l'ensemble de points capturés ainsi que les résultats des analyses réalisées, qui pourront être

utilisés à des fins de vérifications et d'analyses de données à grande échelle. Ces analyses peuvent mettre en lumière des corrélations entre une détérioration excessive de pneumatiques et des pistes particulières, des situations
5 particulières de décollage, d'atterrissage ou de taxiage, un climat particulier, le pilotage de l'avion par certains pilotes, etc.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits mais englobe toute variante entrant
10 dans le champ de l'invention telle que définie par les revendications.

REVENDICATIONS

1. Procédé de détection d'une dégradation d'un pneumatique réel d'une roue qui repose sur un sol, comprenant les étapes de :

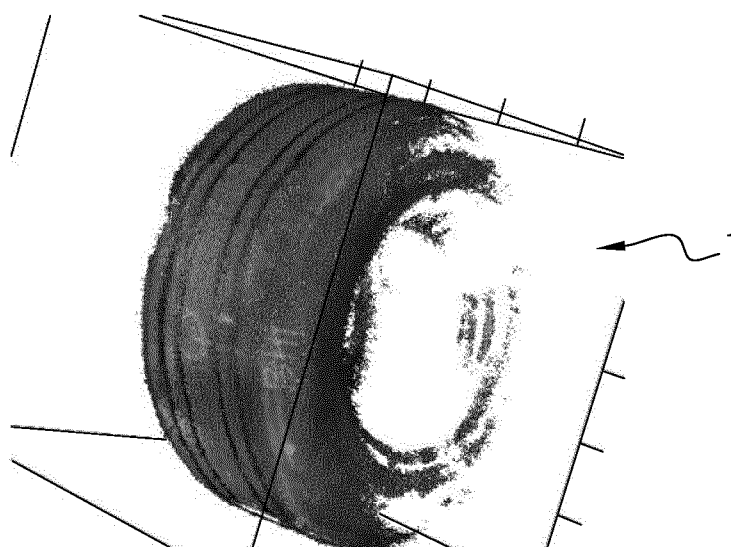
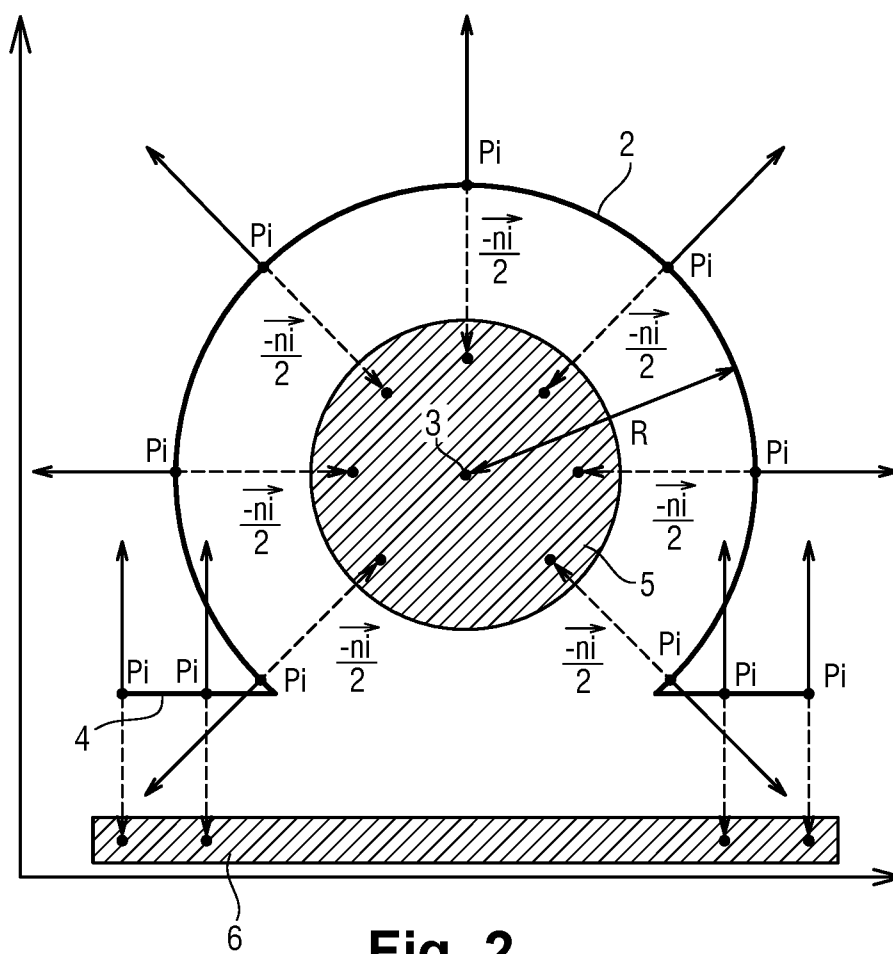
- 5 - acquérir au moins un premier objet en trois dimensions (1) représentatif d'une forme du pneumatique réel (21 ; 27 ; 34), en utilisant un appareil électronique comprenant au moins un capteur tridimensionnel, le premier objet en trois dimensions étant formé par un ensemble de points capturés ;
 - 10 - distinguer des points capturés appartenant au pneumatique réel et des points capturés appartenant au sol, et déterminer, à partir des points capturés appartenant au pneumatique réel, une position d'un point central du pneumatique réel ;
 - 15 - recalculer le premier objet en trois dimensions par rapport à un pneumatique théorique (14), de dimensions et d'orientation connues, pour obtenir un deuxième objet en trois dimensions (15) formant un pneumatique recalé, le recalage consistant à trouver une transformation
 - 20 permettant de minimiser une différence entre l'ensemble de points capturés et un nuage de points théorique correspondant au pneumatique théorique ;
 - réaliser une transformation du deuxième objet en trois dimensions (15) pour obtenir un ou plusieurs objets en deux
 - 25 dimensions ; et
 - analyser le ou les objets en deux dimensions pour détecter la dégradation du pneumatique réel.
2. Procédé de détection selon la revendication 1, comprenant les étapes, pour chaque point capturé (P_i), de
- 30 définir un vecteur normal à une surface du premier objet en trois dimensions qui passe par ledit point capturé (P_i), et d'estimer la position du point central du pneumatique réel à partir des vecteurs normaux.

3. Procédé de détection selon la revendication 2, dans lequel l'estimation de la position du point central est un processus itératif au cours duquel, à chaque itération, on
5 supprime des points capturés qui n'appartiennent pas au pneumatique réel, on conserve des points capturés qui appartiennent au pneumatique réel, et on affine l'estimation (P_{c1} , P_{cf}) de la position du point central en utilisant les vecteurs normaux des points capturés
10 appartenant au pneumatique réel.
4. Procédé de détection selon la revendication 1, comprenant l'étape de mettre en œuvre une méthode de partitionnement de données pour distinguer les points capturés (11) appartenant au pneumatique réel et les points
15 capturés (12) appartenant au sol.
5. Procédé de détection selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le recalage utilise un algorithme de recalage basé sur des transformations euclidiennes.
- 20 6. Procédé de détection selon la revendication 5, dans lequel le recalage utilise en outre un algorithme *ICP*.
7. Procédé de détection selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel la transformation comprend les étapes de couper le deuxième objet en trois
25 dimensions selon des plans perpendiculaires à un axe de rotation (z) du pneumatique recalé pour obtenir une pluralité de tranches en trois dimensions ($T3d_i$) de faible épaisseur (e), et d'assimiler chaque tranche en trois dimensions ($T3d_i$) à une tranche en deux dimensions ($T2d_i$)
30 d'épaisseur nulle, le ou les objets en deux dimensions comprenant les tranches en deux dimensions.

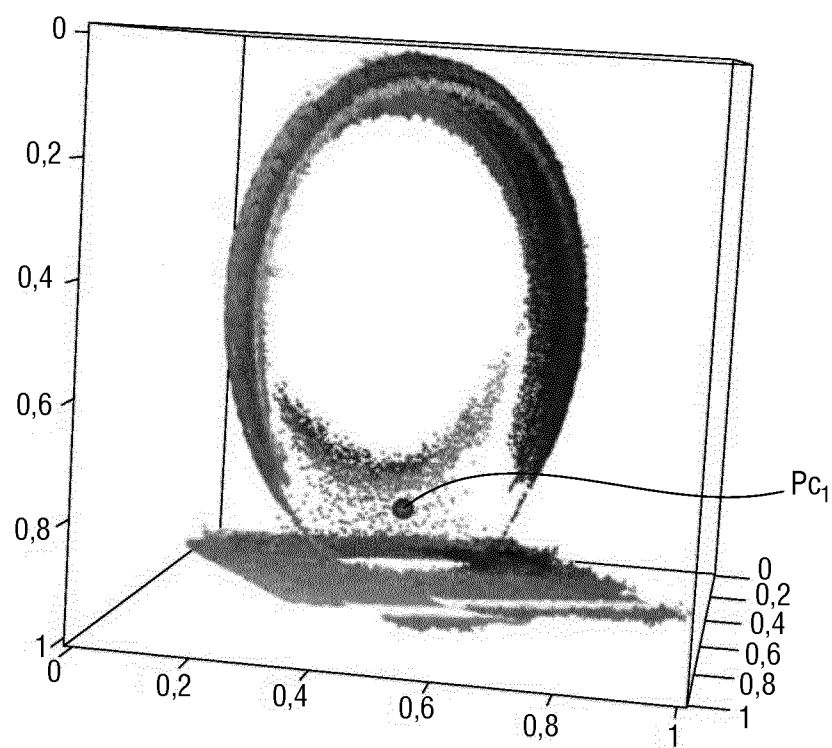
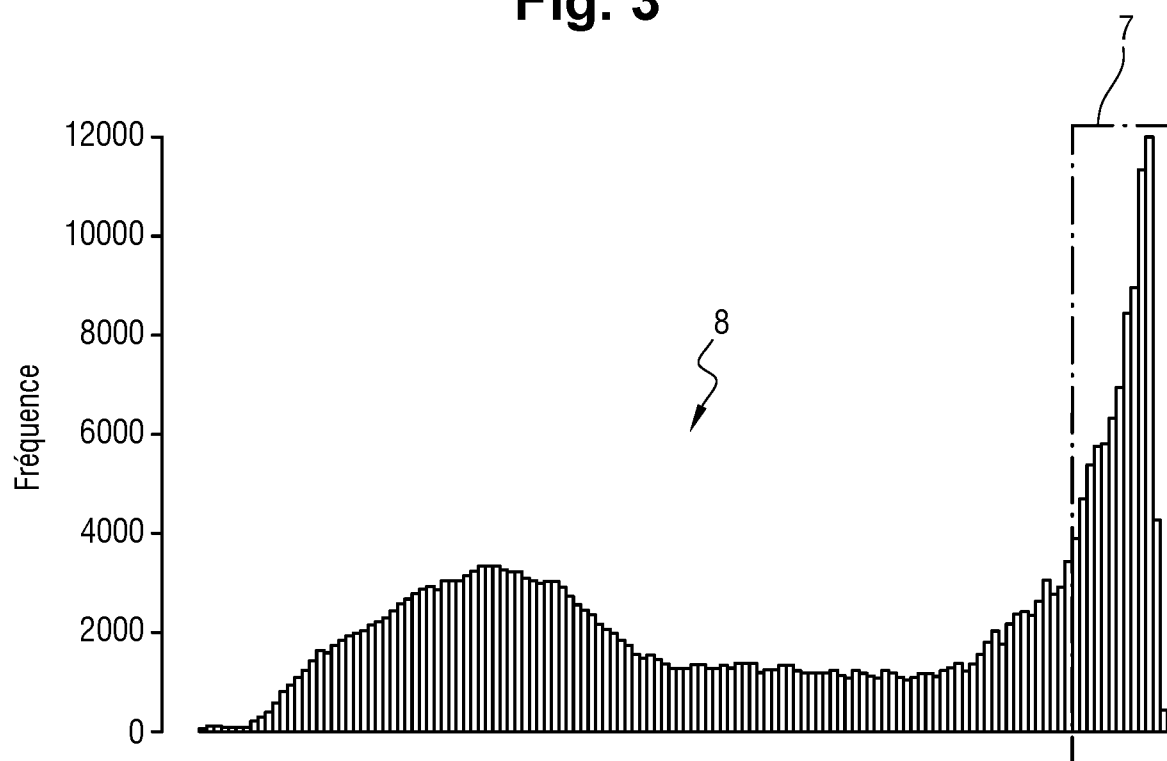
8. Procédé de détection selon la revendication 7, comprenant les étapes de calculer, pour chaque tranche en deux dimensions ($T2d_i$), un rayon $r_i(\alpha)$ de la tranche en deux dimensions ($T2d_i$), qui est fonction d'un angle α autour
5 de l'axe de rotation (z) du pneumatique recalé.
9. Procédé de détection selon la revendication 8, dans lequel on calcule, pour chaque tranche en deux dimensions ($T2d_i$), un rayon moyen (r_i) de la tranche en deux dimensions ($T2d_i$), et dans lequel on étudie la variation du rayon
10 moyen (r_i) en fonction de i , i étant l'indice de la tranche ($T2d_i$).
10. Procédé de détection selon la revendication 9, dans lequel on détecte, à partir de la variation du rayon moyen (r_i), une dégradation anormale qui est une usure
15 asymétrique ou un aplatissement (40) ou une bosse ou une crevasse (32) ou la présence d'un corps étranger (52) sur une bande de roulement du pneumatique réel.
11. Procédé de détection selon la revendication 10, dans lequel on détecte la position de rainures (22) sur la bande
20 de roulement et on évalue une profondeur de chaque rainure, la profondeur des rainures étant utilisée pour détecter une dégradation trop importante ou anormale, et la position des rainures étant utilisée pour localiser la dégradation trop importante ou anormale.
12. Procédé de détection selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel l'appareil électronique comprend en outre un capteur photographique agencé pour
25 acquérir une couleur associée à chaque point capturé, dans lequel la transformation est une projection en deux dimensions appliquée sur le deuxième objet en trois
30 dimensions, et dans lequel le ou les objets en deux dimensions comprennent une image en deux dimensions d'une bande de roulement du pneumatique recalé obtenue par ladite projection en deux dimensions.

13. Procédé de détection selon la revendication 12, dans lequel l'analyse de l'image en deux dimensions comprend l'étape d'analyser une évolution d'un gradient de couleur de l'image en deux dimensions.
- 5 14. Procédé de détection selon la revendication 13, dans lequel l'analyse de l'évolution du gradient de couleur est utilisée pour détecter une dégradation anormale qui est une usure excessive conduisant à l'apparition d'une trame métallique (68) du pneumatique réel, ou qui est un
10 dégagement de chaleur ou une contamination.
15. Procédé de détection selon la revendication 12, dans lequel l'analyse de l'image en deux dimensions comprend l'étape d'appliquer sur l'image en deux dimensions une transformée de *Hough*.
- 15 16. Procédé de détection selon la revendication 15, dans lequel la transformée de *Hough* permet de détecter une dégradation anormale qui est un aplatissement ou une bosse ou une crevasse ou la présence d'un corps étranger sur la bande de roulement.
- 20 17. Procédé de détection selon la revendication 12, dans lequel l'analyse de l'image en deux dimensions comprend l'étape de mettre en œuvre un apprentissage, basé sur des réseaux de neurones convolutifs, des images du pneumatique réel en bon état ainsi que des images des différentes
25 dégradations recherchées.

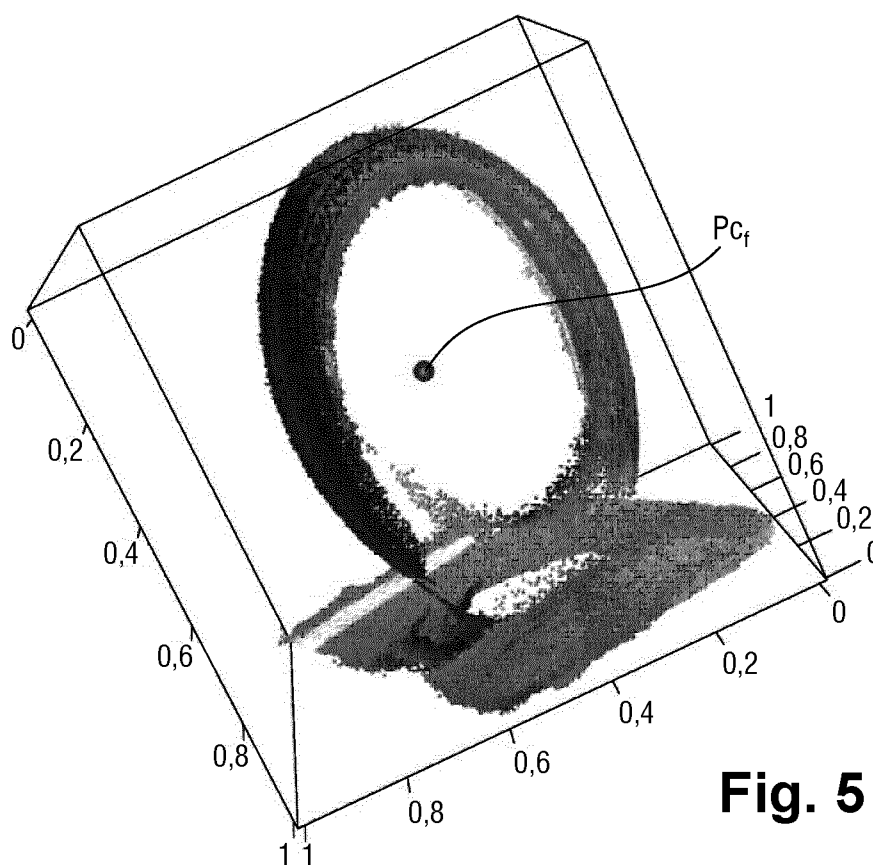
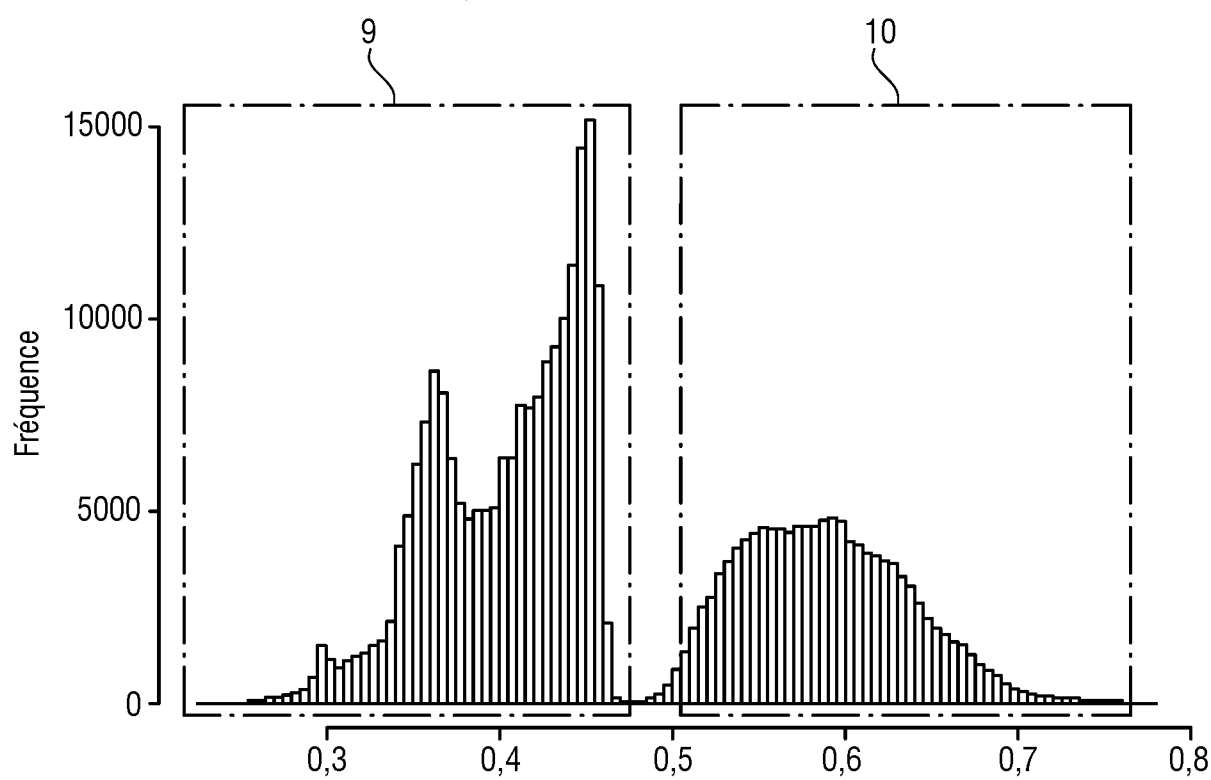
1/14

**Fig. 1****Fig. 2**

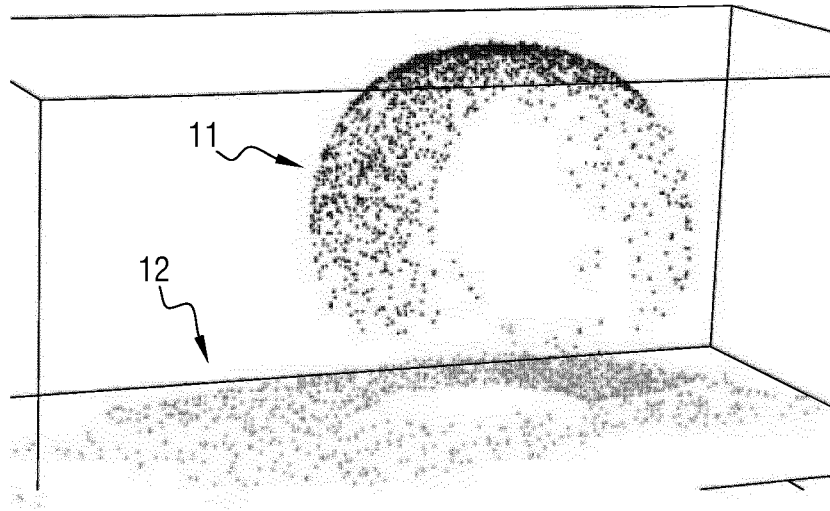
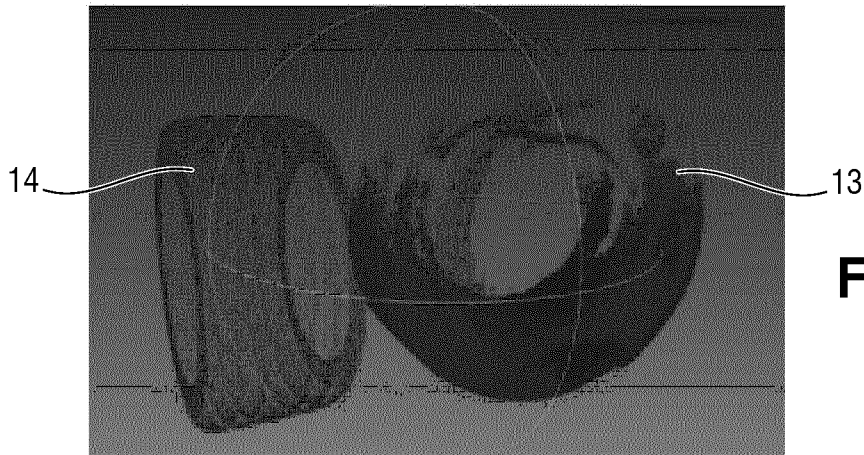
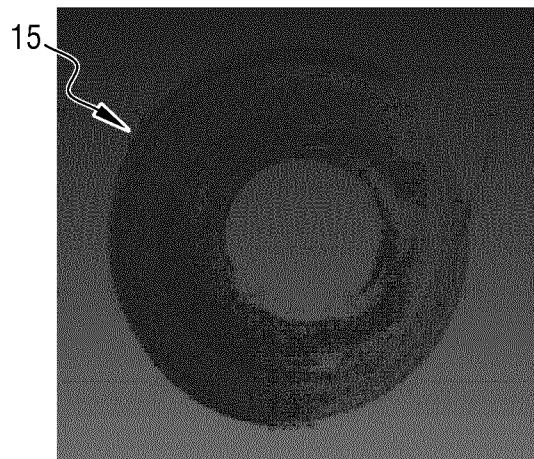
2/14

**Fig. 3****Fig. 4**

3/14

**Fig. 5****Fig. 6**

4/14

**Fig. 7****Fig. 8****Fig. 9**

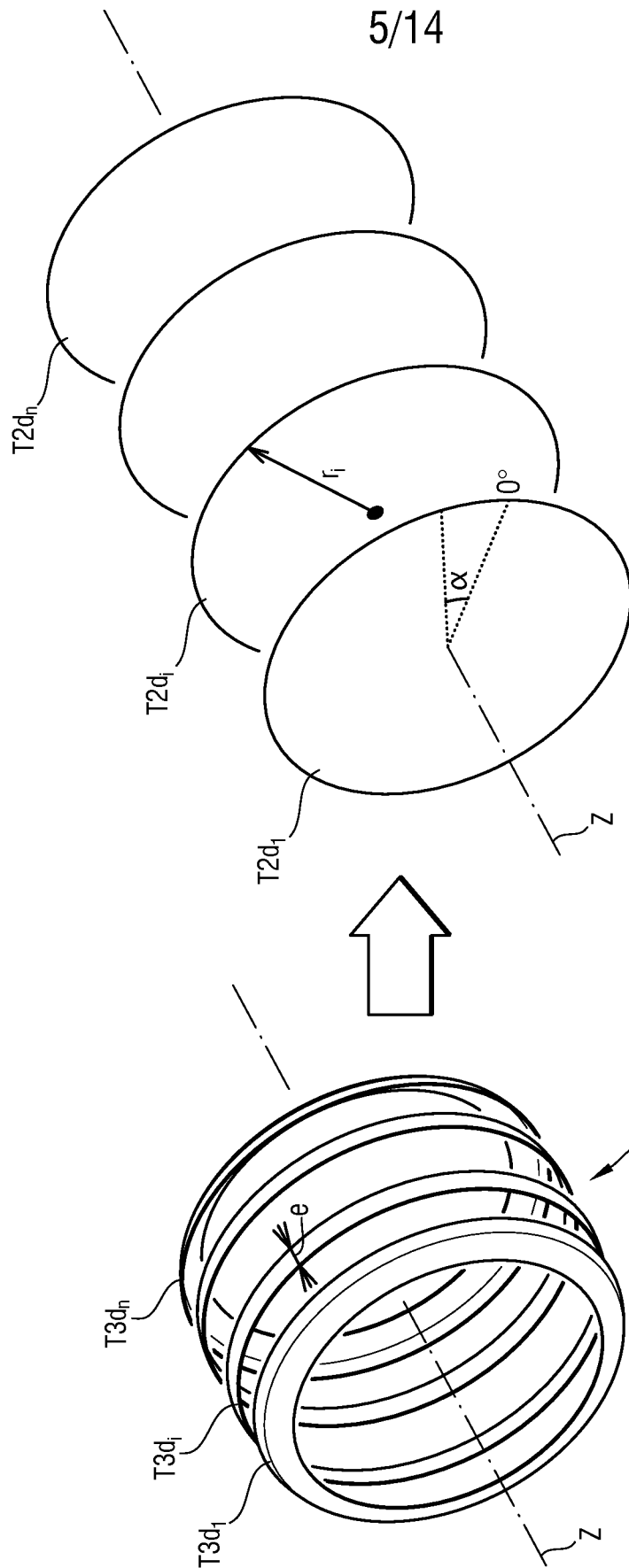
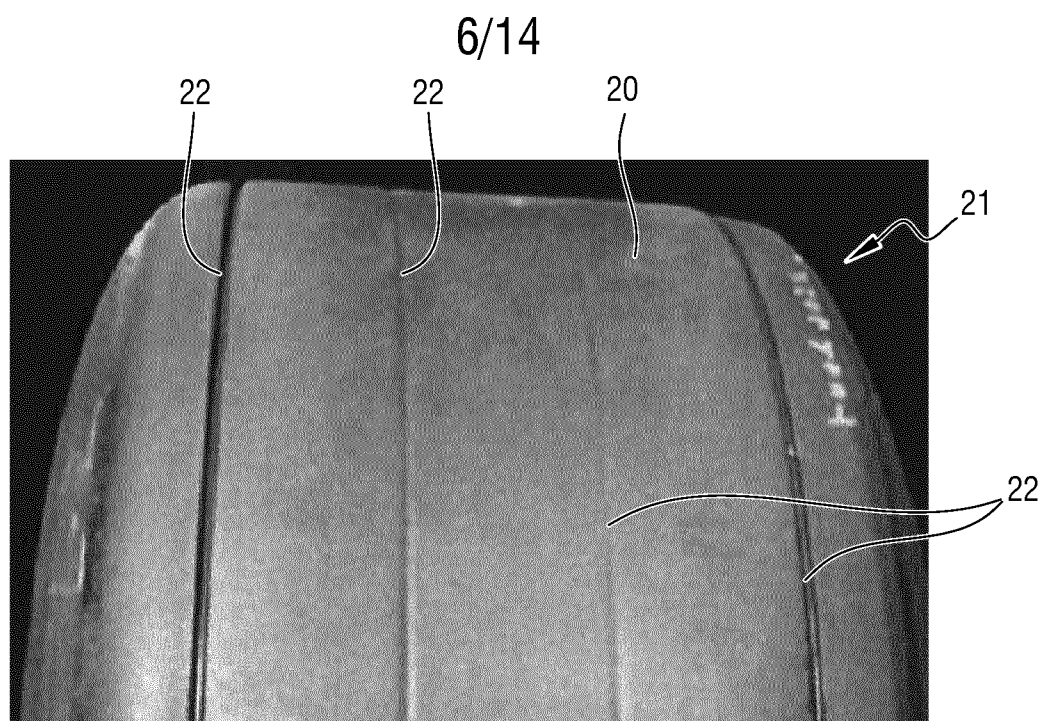
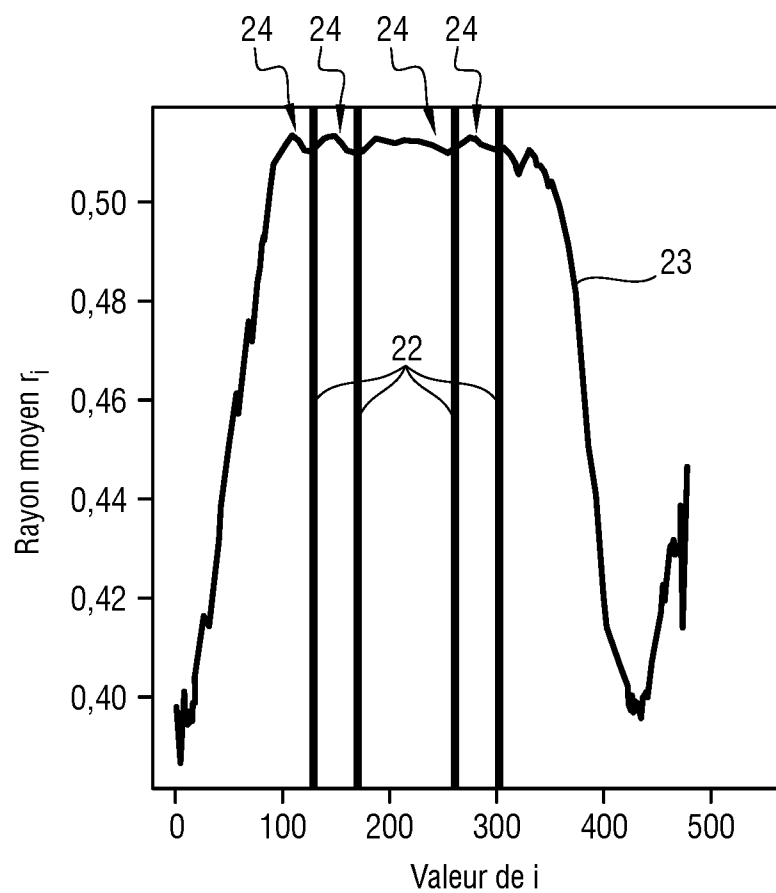
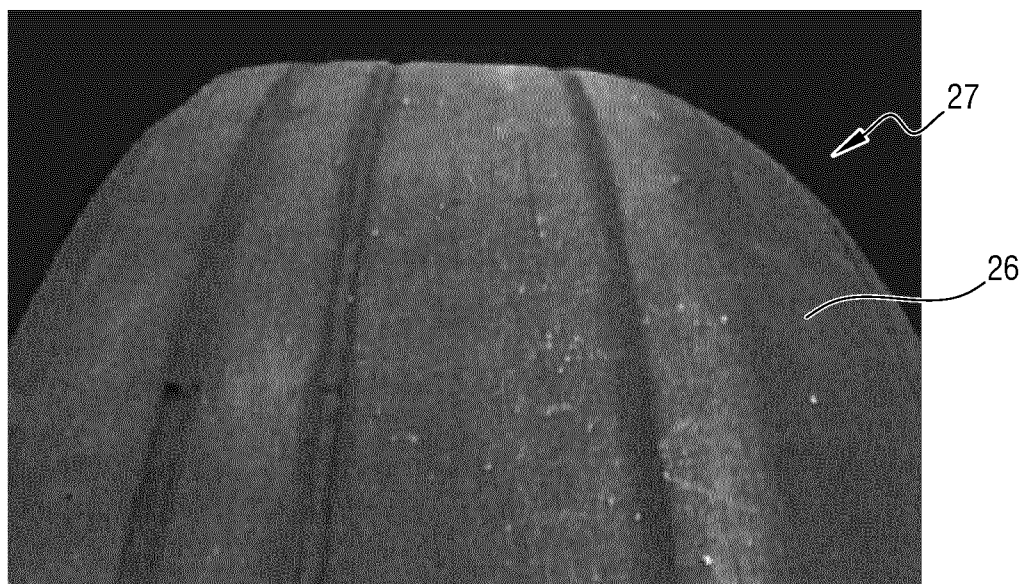
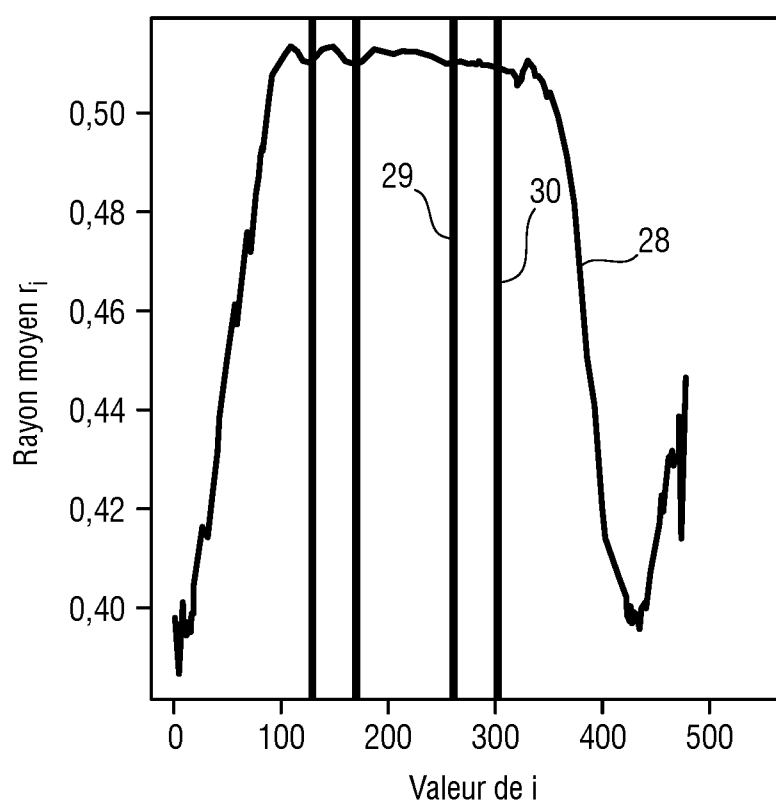


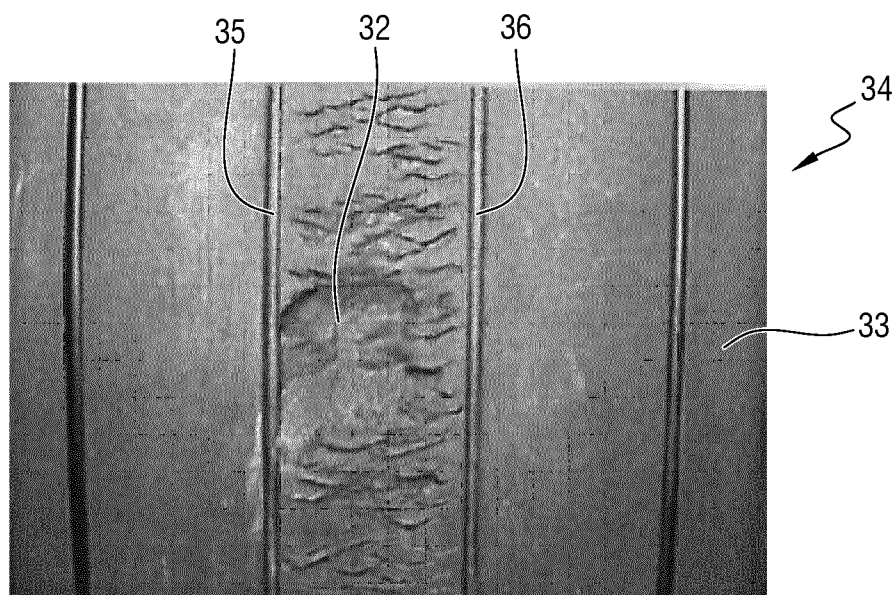
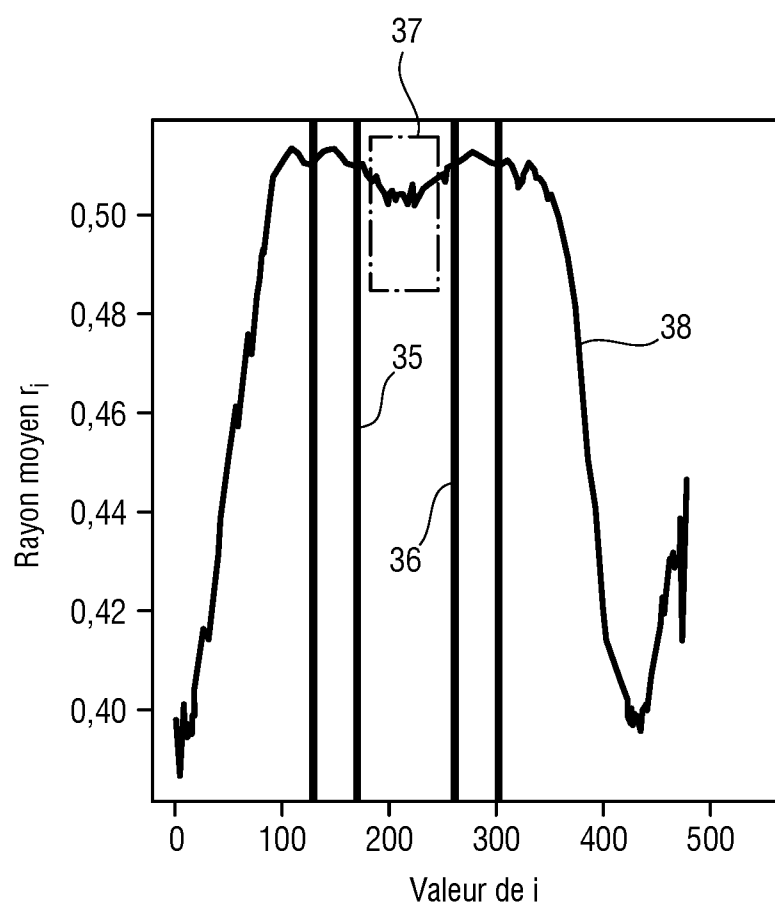
Fig. 10

**Fig. 11****Fig. 12**

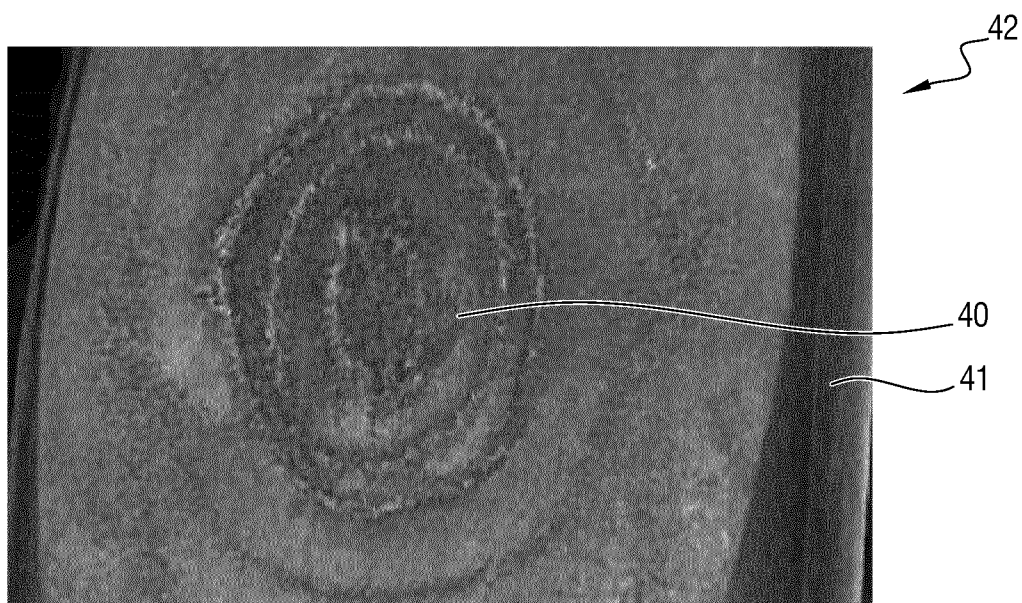
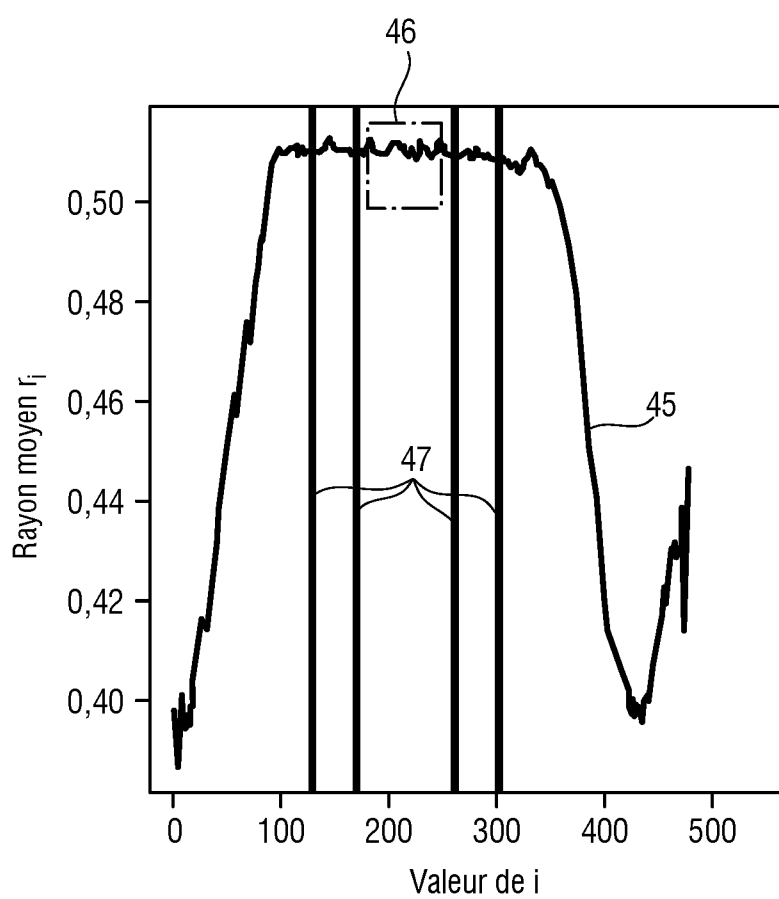
7/14

**Fig. 13****Fig. 14**

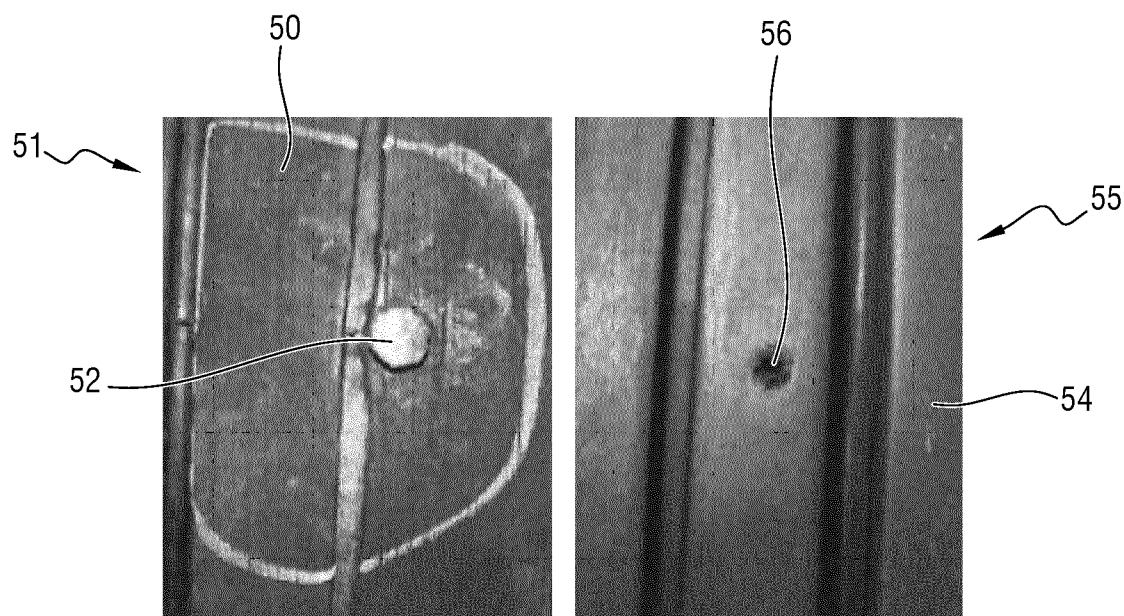
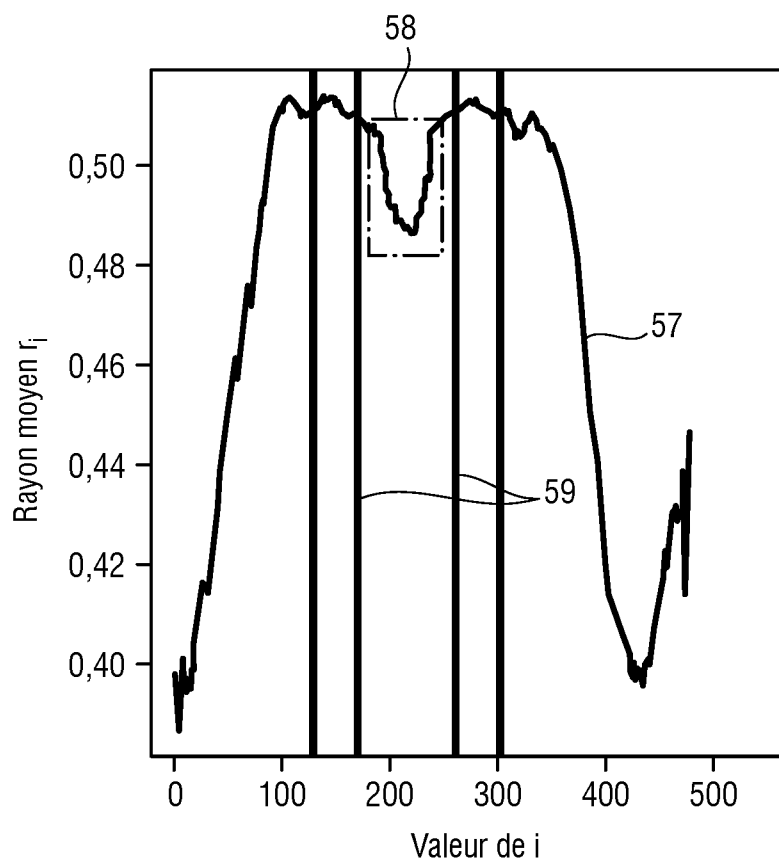
8/14

**Fig. 15****Fig. 16**

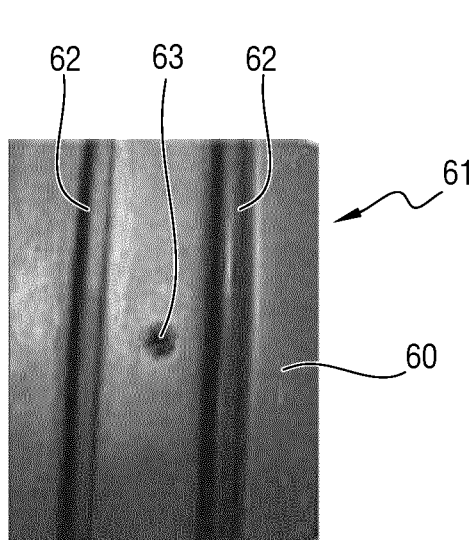
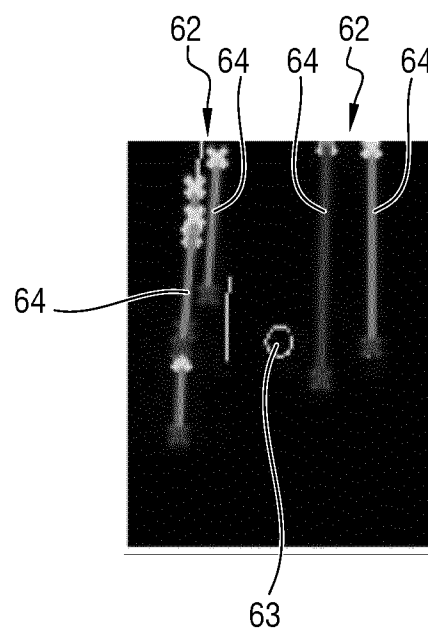
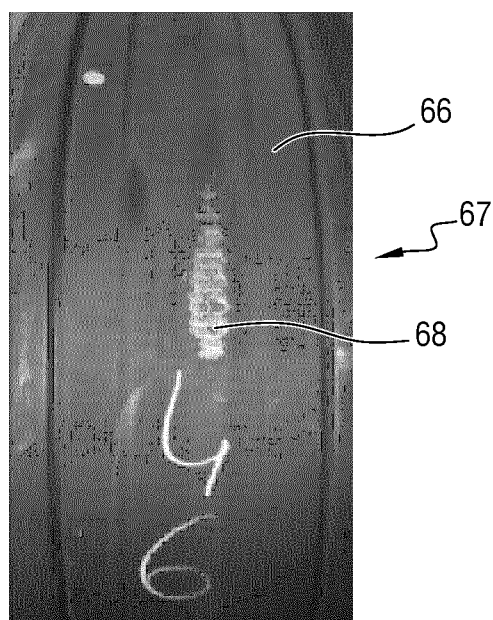
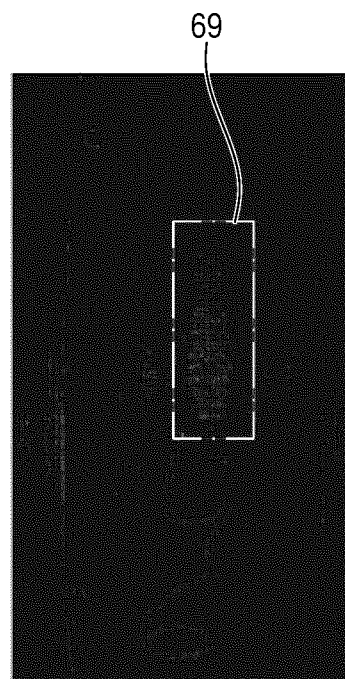
9/14

**Fig. 17****Fig. 18**

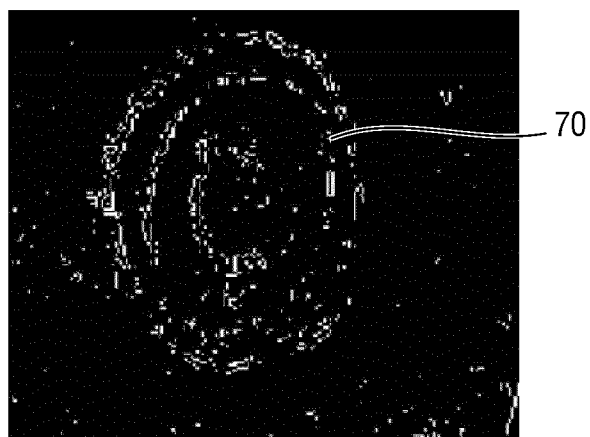
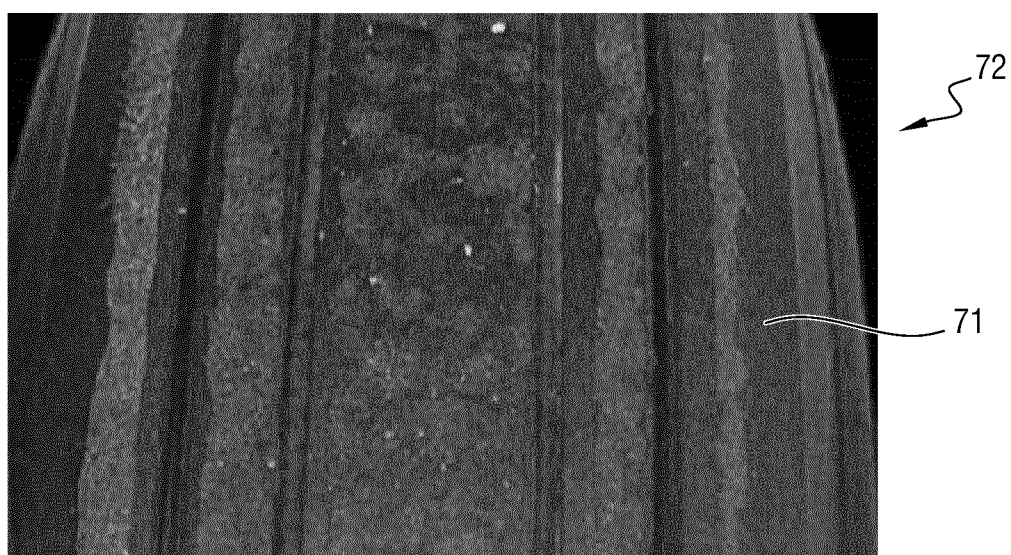
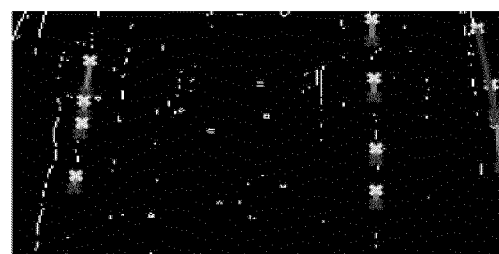
10/14

**Fig. 19****Fig. 20****Fig. 21**

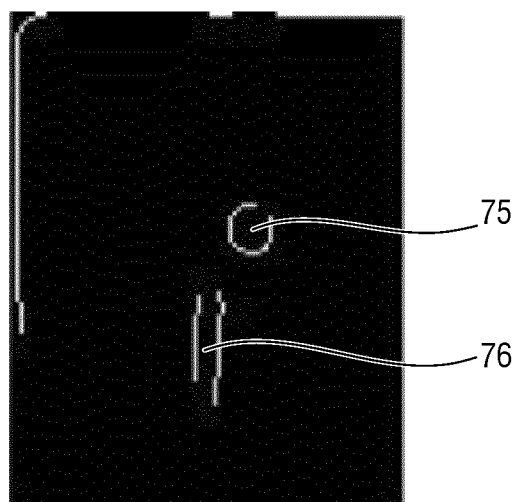
11/14

**Fig. 22****Fig. 23****Fig. 24****Fig. 25**

12/14

**Fig. 26****Fig. 27****Fig. 28****Fig. 29**

13/14

**Fig. 30**

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Fig. 32

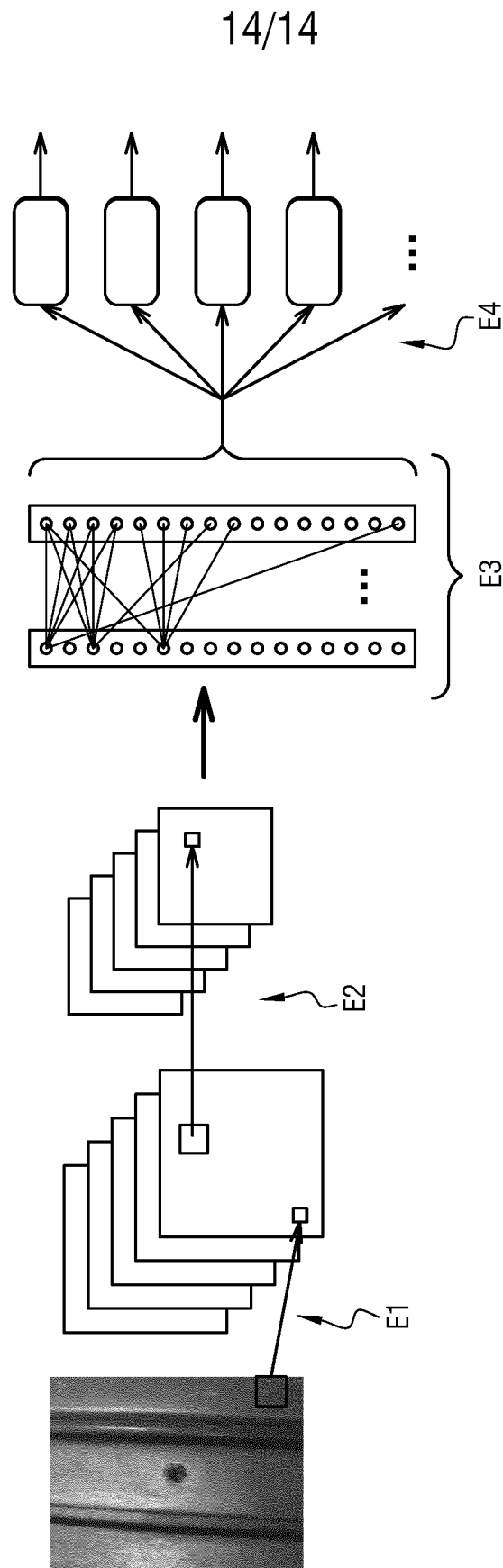


Fig. 31

