

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
29 novembre 2007 (29.11.2007)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2007/135267 A2

(51) Classification internationale des brevets :
G06T 17/20 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2007/000801

(22) Date de dépôt international : 11 mai 2007 (11.05.2007)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :

0604225 12 mai 2006 (12.05.2006) FR

(71) Déposant (*pour tous les États désignés sauf US*) :
SOCIÉTÉ D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES DE

**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS
ET MÉTIERS (SERAM)** [FR/FR]; 151 Boulevard de
l'Hôpital, F-75013 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

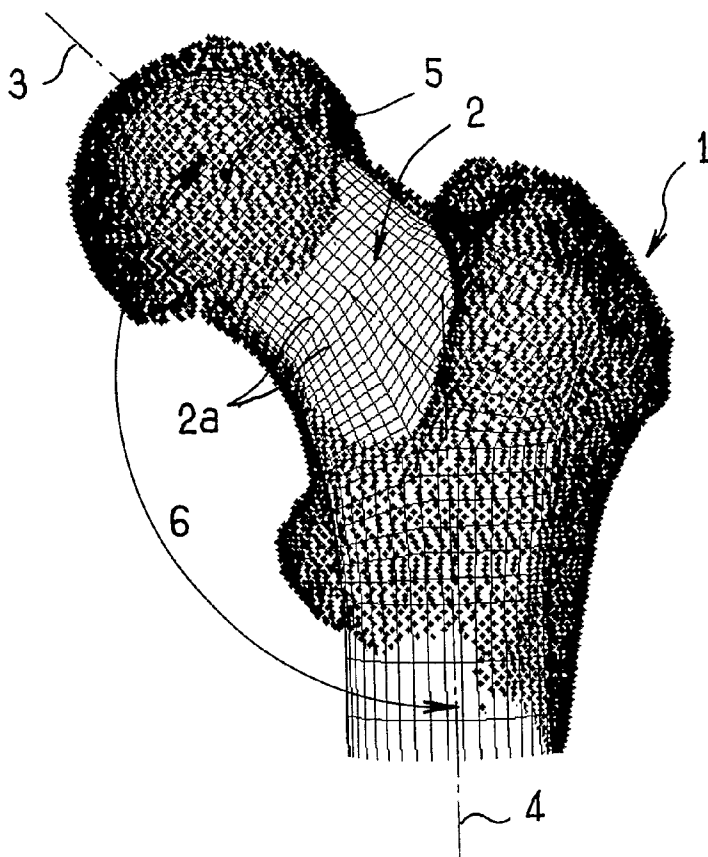
(75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) :
DUCHEMIN, Laure [FR/FR]; 14 Allée Albert Thomas,
F-91300 Massy (FR). **LAPORTE, Sébastien** [FR/FR]; 14
Allée Albert Thomas, F-91300 Massy (FR). **MITTON,
David** [FR/FR]; 27B, rue Anatole France, F-94270 Le
Kremlin-Bicêtre (FR). **SKALLI, Wafa** [FR/FR]; Tour
Helsinki, 70 avenue d'Ivry, F-75013 Paris (FR).

(74) Mandataires : **ROBERT, Jean-Pierre** etc.; c/o CABI-
NET BOETTCHER, 22 rue du Général Foy, F-75008 Paris
(FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD OF PRODUCING A FINITE ELEMENT MODEL OF A SINGULAR BODY OF COMPLEX SHAPE AND COMPLEX STRUCTURE

(54) Titre : PROCÉDE DE RÉALISATION D'UN MODÈLE PAR ÉLÉMENTS FINIS D'UN CORPS SINGULIER DE FORME ET DE STRUCTURE COMPLEXES



(57) Abstract: Method of producing a finite element model of a singular body of complex shape whose exterior surface is known through a cluster (1) of points which analytically or algebraically describes this surface in a determined reference frame, characterized in that it consists in: - a) using a generic and parameterizable finite element model, produced on the basis of simple geometric volumes representative of the family to which the singular body belongs, - b) adapting this model as a function of the parameters descriptive of the singular body to be modelled - c) tailoring this parameterized and generic finite element model (2) in this reference frame and matching the surface nodes (2a) of this parameterized model with points of the known exterior surface (1) of the body by projecting these nodes onto this surface in a direction normal to the surface of the generic model - d) using the nodes (2a) of the surface (7) as control points of a spatial interpolation procedure for customizing the internal finite elements of the generic model (2).

[Suite sur la page suivante]

WO 2007/135267 A2



(81) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,

FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— relative au droit du déposant de revendiquer la priorité de la demande antérieure (règle 4.17.iii)

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) **Abrége :** Procédé de réalisation d'un modèle par éléments finis d'un corps singulier de forme complexe dont la surface extérieure est connue par un nuage (1) de points qui décrit analytiquement ou algébriquement cette surface dans un repère déterminé, caractérisé en ce qu'il consiste à : -a) utiliser un modèle par éléments finis générique et paramétrable, réalisé à partir de volumes géométriques simples et représentatif de la famille à laquelle appartient le corps singulier, -b) adapter ce modèle en fonction des paramètres descriptifs du corps singulier à modéliser, -c) ajuster dans ce repère ce modèle par éléments finis générique (2) paramétré et faire correspondre les nœuds (2a) de surface de ce modèle paramétré à des points de la surface extérieure (1) connue du corps par projection de ces nœuds sur cette surface selon une direction normale à la surface du modèle générique, -d) utiliser les nœuds (2a) de surface (7) comme points de contrôle d'une méthode d'interpolation spatiale pour personnaliser les éléments finis internes du modèle générique (2).

**Procédé de réalisation d'un modèle par éléments finis
d'un corps singulier de forme et
de structure complexes**

La présente invention concerne un procédé de réalisation d'un modèle par éléments finis d'un corps singulier de forme et de structure complexes comme le sont certains des os du corps humain ou animal.

ARRIERE PLAN DE L'INVENTION

La modélisation par éléments finis d'un corps de forme complexe est une technique aujourd'hui éprouvée. Elle permet une simulation prédictive du comportement d'un corps, d'un objet ou d'un organe... sous certaines conditions de charges représentatives de celles qu'il rencontre soit lors de son utilisation ou de son fonctionnement normal, soit dans des situations exceptionnelles.

Les domaines d'utilisation de cette simulation sont très étendus, allant de la chirurgie assistée par ordinateur (interventions orthopédiques réparatrices de désordres dus à un accident ou à une affection &éventuellement accompagnée de pose d'implant) à la médecine préventive (notamment la prédiction du comportement d'un élément osseux atteint d'ostéoporose) en passant par l'étude et l'analyse du comportement du corps humain ou animal soumis à diverses conditions normales ou anormales telles que des chocs résultant de collisions en voiture ou lors de la pratique d'une activité sportive... .

L'élaboration d'un modèle s'effectue à partir de relevés réalisés sur le corps à modéliser par radiographie, photographie, palpation, tomographie... numérisées ou toute technique équivalente permettant d'obtenir des données sur la forme extérieure du corps et sur sa structure interne.

La fonction prédictive de la modélisation sera d'autant plus précise que le nombre d'éléments sera élevé et que le maillage (découpage par éléments finis accouplés) sera satisfaisant en ce qui concerne la forme de chaque maille.

Le maillage d'un corps réel demande un temps d'élaboration d'autant plus important que le corps est complexe et que le modèle se veut précis. Par ailleurs, un modèle précis demande également un temps de traitement important « en fonctionnement », c'est-à-dire un temps de calcul long pour obtenir une image réaliste de son comportement et de sa déformée sous telle ou telle charge mécanique. Ainsi donc, l'état de la technique dans ce domaine comprend des modèles élaborés pour des simulations de comportement rapides mais trop grossières ou précises mais beaucoup trop lentes.

Or la demande de ce type de modèles personnalisés est, d'une part de plus en plus grande et, d'autre part, de plus en plus exigeante en termes de temps de réponse. C'est le cas, notamment dans le domaine médical et particulièrement le domaine orthopédique où la chirurgie assistée par ordinateur est de plus en plus pratiquée. On citera par ailleurs une demande existant en médecine préventive pour simuler le comportement d'un fémur sous telle ou telle contrainte et en déduire le degré de risque notamment de rupture encouru par le sujet.

OBJET DE L'INVENTION

La présente invention entend apporter une solution au problème aujourd'hui mal résolu de l'élaboration d'un modèle personnalisé, c'est-à-dire prenant en compte de manière fine la singularité d'un corps appartenant à une famille de corps semblables, tout en étant apte ensuite à ne consommer qu'un temps de calcul minimal lors de son exploitation en phase de simulation.

RESUME DE L'INVENTION

A cet effet, l'invention a donc pour objet un procédé de réalisation d'un modèle par éléments finis d'un corps unique de forme complexe dont la surface extérieure est connue par un nuage de points qui décrit analytiquement ou algébriquement ladite surface dans un repère déterminé, qui consiste à

- a) utiliser un modèle par éléments finis générique et paramétrable, réalisé à partir de volumes géométriques simples,

- b) adapter ce modèle en fonction des paramètres descriptifs du corps singulier à modéliser,

- c) ajuster dans le repère susdit la position et le paramétrage du modèle susdit et à faire correspondre les nœuds de surface de ce modèle générique paramétré à des points de la surface extérieure connue du corps par projection de ces nœuds sur cette surface selon une direction normale à la surface du modèle générique,

- d) utiliser les nœuds de surface comme points de contrôle d'une méthode d'interpolation spatiale pour personnaliser les éléments finis internes du modèle générique.

Cette méthode présente l'avantage considérable d'élaborer un modèle par éléments finis de n'importe quel corps de manière rapide et de disposer d'un modèle personnalisé dont le comportement lors de son traitement par application de charges mécaniques extérieures, sera précis donc représentatif de la réalité. Le modèle générique est élaboré à partir des connaissances approfondies de la famille des corps à modéliser qui permet d'en extraire les caractéristiques communes. Par exemple, pour une extrémité proximale de fémur, la forme du modèle générique aura nécessairement l'allure générale de deux cylindres sécants sous un angle de l'ordre de 130° , l'un correspondant à la diaphyse et l'autre au col, ce dernier présentant une sphère d'extrémité tandis qu'une partie de tran-

sition entre les deux cylindres sera réduite à une association de troncs de cônes (dont les bases ne sont pas strictement circulaires) avec une excroissance latérale pour amorcer le grand trochanter.

Les paramètres descriptifs (longueur du col, diamètre de la sphère, valeur de l'angle col/diaphyse,...) ainsi que les données relatives à la forme extérieure (le nuage de points) du corps singulier que constitue l'extrémité proximale du fémur d'un sujet déterminé peuvent être extraites de « mesures » faites par du matériel courant notamment de radiographie et disponibles aisément pour chaque praticien.

La procédure de projection pour obtenir la forme singulière à partir de la forme du modèle générique paramétré peut être itérative et comporter des opérations de lissage et des opérations de nouvelle projection successives pour raffiner le résultat.

Dans le cas d'un os, on distingue entre la partie externe (corticale) et la partie interne (spongieuse) si bien que le corps à modéliser se présente comme possédant une coque extérieure délimitée ainsi par une surface externe connue par un premier nuage de points et une surface interne connue par un second nuage de points, le procédé de l'invention consistant alors, entre les étapes c) et d) ci-dessus, à faire correspondre les nœuds extérieurs d'une sous-couche d'éléments finis du modèle générique à des points de la surface interne par projection de ces nœuds sur cette surface selon une direction normale à la surface extérieure de la dite sous-couche et à raffiner cette mise en correspondance par une procédure de lissages et projections successifs combinés à une prise en compte du lien existant entre chaque nœud ainsi projeté et ceux de la surface externe auxquels il est relié et à procéder à l'étape d) ci-dessus en utilisant les nœuds projetés sur la surface interne comme points de

contrôle. Le choix du nombre de couches d'éléments finis affectées à la représentation de l'os cortical est laissé à l'initiative de l'opérateur.

De manière avantageuse, la densité de maillage d'au moins un volume géométrique simple mais de préférence de tous les volumes, est également paramétrable. On peut ainsi privilégier certaines zones du modèle personnalisé (par exemple le col du fémur si on souhaite s'intéresser à sa rupture ou le grand trochanter si on veut simuler précisément les répercussions d'une chute latérale sur cette partie de l'os) afin d'obtenir une plus grande précision de la simulation pour ce qui les concerne.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description donnée ci-après d'un exemple de mise en œuvre du procédé appliqué au fémur humain.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

Il sera fait référence aux dessins annexés parmi lesquels :

- la figure 1 est un schéma illustrant la phase initiale du procédé de l'invention,
- la figure 2 et la figure 3 illustrent respectivement les surfaces extérieures et intérieures de l'os cortical d'une tête fémur, obtenues par application du procédé de selon l'invention,
- les figures 4 à 7 sont diverses vues illustrant et définissant le modèle générique d'une tête de fémur pour la mise en œuvre du procédé de l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

A la figure 1, la référence 1 représente (partiellement pour des besoins de clarté de la figure) un nuage de points qui correspond, dans un repère donné, à la surface extérieure de la tête de fémur d'un sujet. L'acquisition de ces données est le résultat de relevés

et traitement informatiques qui sont connus en eux-mêmes. Ce nuage de points décrit soit de manière analytique soit de manière algébrique ladite surface extérieure et ce de façon conventionnelle, la totalité de cette surface extérieure dans le repère en question.

Dans ce repère, on représenté un modèle générique 2, au sens de l'invention d'une tête de fémur de sorte que les axes 3 du col et 4 de la diaphyse, respectivement de l'os réel et du modèle générique, par exemple soient confondus de même que le soient les centres 5 de la sphère du modèle et du condyle d'articulation du fémur au bassin et les angles 6 du modèle et du fémur du sujet.

Le modèle générique est un modèle par éléments finis qui sera mieux décrit en regard des figures 4 à 7 et dont on aperçoit les nœuds 2a appartenant à sa surface extérieure.

Après avoir placé le modèle générique 2 dans le repère du nuage de points 1, en l'ayant paramétré si nécessaire, soit au préalable, soit au moment de son rapprochement avec le nuage de points, ce dernier pouvant contenir certains des paramètres descriptif utiles au paramétrage, le procédé d'élaboration du modèle personnalisé comprend l'étape de projeter les nœuds 2a sur la surface définie par le nuage de points 1 selon une direction de projection normale à la surface extérieure contenant les nœuds 2a. La procédure mise en œuvre peut être itérative et comporter des opérations de lissage et des opérations de nouvelle projection successives pour raffiner le résultat. Les méthodes mises en œuvre à ce stade sont connues de l'homme de métier.

La figure 3 illustre le résultat obtenu. Les nœuds 2a sont situés sur la surface 7 qui correspond à la surface définie initialement par le nuage de points 1. La poursuite de l'élaboration du modèle personnalisé consiste ensuite à appliquer une méthode d'interpolation

spatiale et notamment celle dénommée « krigeage » en utilisant les nœuds de surface comme points de contrôle lors de l'application de la méthode. Cette méthode permet d'adapter de manière connue la forme de chaque élément fini de la structure du modèle générique pour qu'il soit représentatif au mieux de la structure du corps réel.

Dans le cas particulier d'un os tel que le fémur, on peut avantageusement prendre en compte la structure particulière qu'il présente. En effet, l'os comporte une partie externe corticale qui constitue comme une coque et une partie interne qui est l'os spongieux et dont les propriétés mécaniques sont très différentes de celles de la partie externe. On sait, par des méthodes de tomographie numérisées, relever la frontière entre l'os cortical et l'os spongieux. Cette frontière est une surface qui est définie dans un repère déterminé par un nuage de points à l'instar du nuage de points 1 de la figure 1. Un raffinement du procédé de l'invention pour cette application à une structure qui, comme l'os, présente une coque externe enfermant un matériau interne, consiste à choisir dans le modèle générique 2 une sous-couche d'éléments finis et de procéder à la projection des nœuds 2b de surface de cette sous-couche sur la surface interne de la couche corticale selon la même méthode que celle exposée ci-avant. La figure 3 illustre la surface 8 formée par l'ensemble des nœuds 2b projetés sur la surface interne de l'os cortical du sujet dont la surface externe du fémur est modélisée par la surface 7 de la figure 2. Là où les couches d'éléments finis (au choix de l'opérateur) comprises entre les deux surfaces et la personnalisation de la modélisation se poursuit par krigeage de la structure interne du modèle générique en prenant pour points de contrôle pour sa mise en œuvre, les projections des nœuds 2b contenues dans la surface 8.

Le procédé selon l'invention trouve des applica-

tions intéressantes lorsqu'il s'agit de modéliser une population importante d'objets d'une même famille, présentant tous une même allure extérieure mais étant tous singuliers dans leur définition géométrique et mécanique fine. Bien entendu, une fois cette personnalisation réalisée, il faut affecter à chaque élément fini de la structure des valeurs représentatives de ses caractéristiques mécaniques telle que sa densité, son module de Young, son coefficient de Poisson... elles-mêmes relevées sur le sujet, afin que ce modèle puisse valablement simuler le comportement de l'objet réel qu'il représente lorsqu'il lui est appliqué des charges particulières, elles-mêmes simulant les sollicitations réelles auxquelles est soumis l'objet, par exemple le fémur lors de la marche ou d'une chute.

La qualité du modèle personnalisé obtenu conformément à l'invention tient pour une part importante à la conception du modèle générique.

L'invention a donc également pour objet particulier le modèle générique de la tête de fémur qui est apte à la modélisation rapide de n'importe quelle tête de fémur, le modèle personnalisé ainsi obtenu étant lui-même de nature à être traité par le calcul dans des temps compatibles avec une simulation en temps réel.

Le modèle générique du fémur objet de l'invention est représenté aux figures 4 à 7. On comprend au vu de ces figures que le fémur est ramené à un ensemble de volumes simples qui sont eux-mêmes une sorte de volume générique de chaque partie principale du fémur, à la manière d'une racine que l'on peut faire évoluer en volume de manière simple par des transformations mathématiques rapides à traiter par un calculateur (ordinateur et logiciel) prévu à cet effet.

Ainsi, on distinguera un premier volume 10, cylindrique qui se trouve au niveau de la partie diaphy-

saire de l'os. Ce volume est surmonté par un volume semblable à un tronc de cône 11, d'axe sensiblement confondu avec l'axe du cylindre 10, raccordé au cylindre 10 et limité en partie supérieure par deux plans 11a et 11b. Le tronc de cône 11 est quant à lui surmonté par un autre tronc de cône 12, coupé en partie inférieure par deux plans 12a et 12b, le plan 12a étant confondu avec le plan 11a tandis que le plan 12b est éloigné du plan 11b. La petite base 12c du tronc de cône 12 est prolongée par une partie cylindrique 13 qui constitue le volume générateur du col du fémur. Ce volume est coiffé d'une demi sphère 14 de centre 5. Le cylindre 14 est d'axe 3 tandis que le cylindre 10 a pour axe 4. Les deux axes sont concourants dans le volume 12 et forment entre eux l'angle 6 défini à la figure 1.

Entre les plans 11b et 12b, le modèle générique représenté comporte un volume 15 dont on peut dire qu'il est engendré (géométriquement) par le rabattement de la section 11b sur la section 12b en déformant son contour extérieur pour le faire passer par un point 15a dont on connaît l'éloignement a d'avec la ligne d'intersection des sections 11a et 11b. Ce volume 15 constitue donc la « bosse » générique du grand trochanter. Le point 15a de son contour est sensiblement situé dans le plan des axes 3 et 4 à peu près sur la bissectrice de l'angle 6.

Les figures 5 et 6 illustrent le maillage de ce modèle générique par sa distribution extérieure (figure 5) et par sa distribution intérieure (figure 6). On constate que les mailles réalisées sur ces volumes simples sont de forme régulière ce qui autorise une transformée d'amplitude importante tout en conservant à chaque maille une forme finale appropriée à bien rendre compte du comportement du modèle personnalisé sous l'effet des simulations de contraintes. On notera que la figure 7 illustre les nœuds 2b de la surface de la première sous-couche

d'éléments finis qui seront projetés sur la surface interne de l'os cortical pour former la surface 8 de la figure 3.

On remarquera que dans le cas des figures, la densité des mailles est la plus importante au niveau du cylindre 14 de manière à augmenter la précision du résultat en ce qui concerne le comportement du col du fémur lors des simulations sous charges mécaniques.

Cette densité de maillage est comme dit ci-dessus, paramétrable pour chacun des volumes simples composant le modèle générique. Il en est de même pour un certain nombre de dimensions ou caractéristiques géométriques du modèle générique telles que la distance a du point 15a à l'intersection 11a 11b, la longueur b du cylindre 14, la hauteur c du tronc de cône 12, la hauteur d du tronc de cône 11, le diamètre e de la demi sphère de centre 5, la valeur de l'angle 6, etc.

L'invention a été ci-dessus décrite et expliquée en liaison avec une extrémité de fémur. Le procédé qu'elle concerne s'applique bien entendu à tout corps de forme complexe dont on peut tirer un modèle générique composé de volumes simples (donc de maillage aisé) déformable selon la méthode susdite. En particulier, la plupart des os du squelette humain peut ainsi être modélisée de manière générique paramétrable afin de constituer une bibliothèque de modèles génériques utilisables pour construire le modèle d'un sujet particulier. Ce sera le cas notamment des os longs comme le tibia (péroné) et l'humérus, ou d'autres os comme le bassin, la mâchoire inférieure,...

REVENDEICATIONS

1. Procédé de réalisation d'un modèle par éléments finis d'un corps singulier de forme complexe dont la surface extérieure est connue par un nuage (1) de points qui décrit analytiquement ou algébriquement cette surface dans un repère déterminé, caractérisé en ce qu'il consiste à :

- a) utiliser un modèle par éléments finis générique et paramétrable, réalisé à partir de volumes géométriques simples et représentatif de la famille à laquelle appartient le corps singulier,

- b) adapter ce modèle en fonction des paramètres descriptifs du corps singulier à modéliser,

- c) ajuster dans ce repère la position et/ou le paramétrage de ce modèle par éléments finis générique (2) et faire correspondre les nœuds (2a) de surface de ce modèle paramétré à des points de la surface extérieure (1) connue du corps par projection de ces nœuds sur cette surface selon une direction normale à la surface du modèle générique,

- d) utiliser les nœuds (2a) de surface (7) comme points de contrôle d'une méthode d'interpolation spatiale pour personnaliser les éléments finis internes du modèle générique (2).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte l'étape de raffinement de cette mise en correspondance par une procédure de lissages et projections successifs.

3. Procédé selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel le corps à modéliser comporte une coque extérieure délimitée ainsi par une surface externe connue par un premier nuage de points et une surface interne connue par un second nuage de points, caractérisé en ce qu'il consiste, entre les étapes c) et d), à faire

correspondre les nœuds (2b) extérieurs d'une sous-couche d'éléments finis du modèle générique à des points de la surface interne par projection de ces nœuds sur cette surface selon une direction normale à la surface extérieure de la dite sous-couche et à raffiner cette mise en correspondance par une procédure de lissages et projections successifs combinés à une prise en compte du lien existant entre chaque nœud ainsi projeté et ceux de la surface externe auxquels il est relié et à procéder à l'étape d) ci-dessus en utilisant les nœuds (2b) projetés sur la surface (8) interne comme points de contrôle.

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que au moins l'une des caractéristiques géométriques du modèle générique est paramétrable.

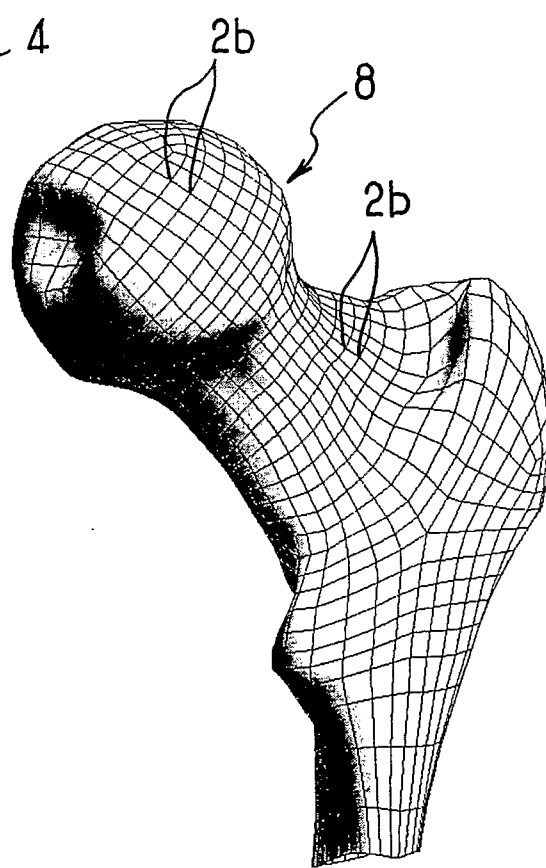
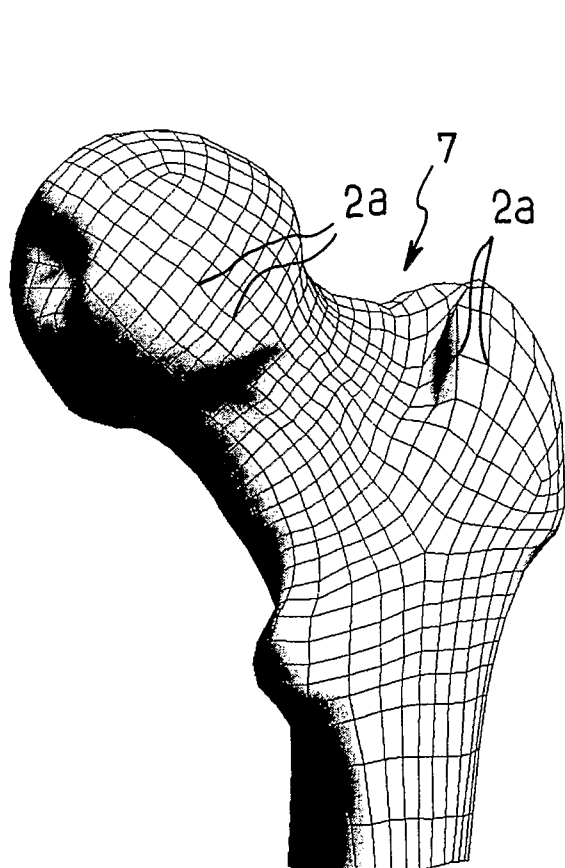
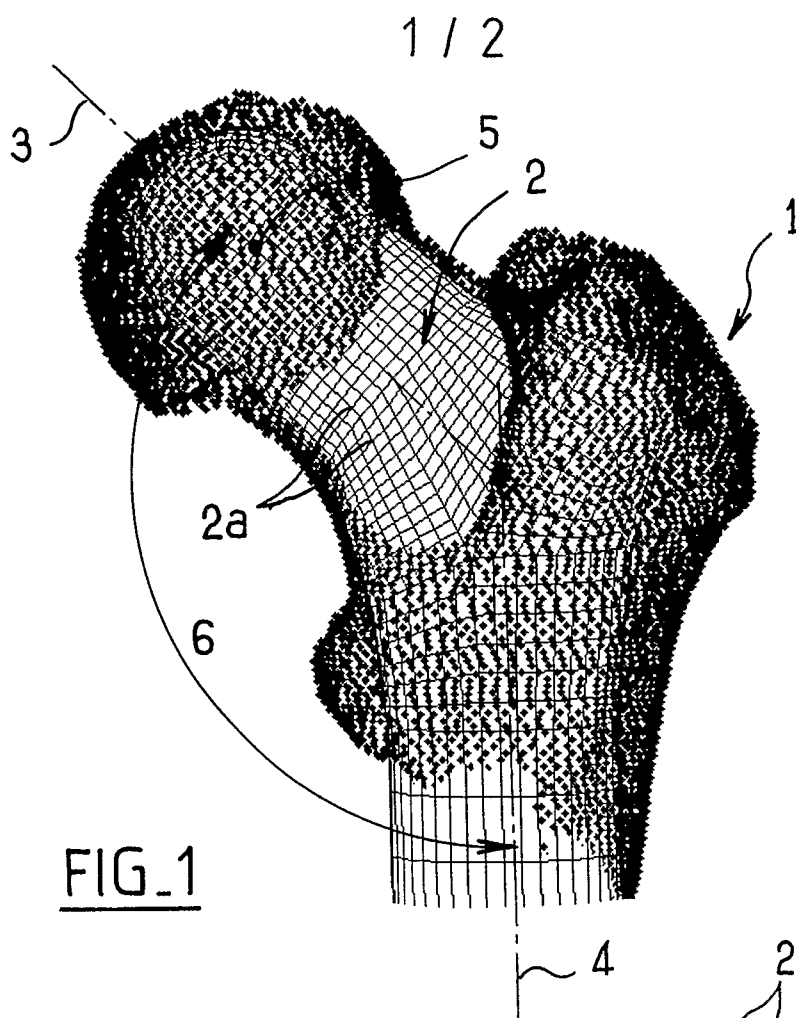
5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la densité de maillage d'au moins un volume géométrique simple est paramétrable.

6 Procédé de réalisation d'un modèle par éléments finis de la partie d'extrémité proximale d'un fémur, selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape a) consiste à utiliser un modèle générique comportant un volume (10), cylindrique avec un axe (4) qui se trouve au niveau de la partie diaphysaire de l'os surmonté par un volume semblable à un tronc de cône (11), d'axe sensiblement confondu avec l'axe (4) du cylindre (10), raccordé au cylindre (10) et limité en partie supérieure par deux plans (11a ; 11b), ledit tronc de cône (11) étant quant à lui surmonté par un autre tronc de cône (12), coupé en partie inférieure par deux plans (12a ; 12b), dont l'un (12a) est confondu avec l'un (11a) des deux plans susdits tandis que l'autre (12b) est éloigné de l'autre (11b) des deux plans susdits, la petite base (12c) de l'autre tronc de cône (12) étant prolongée par une partie cylindrique (13) avec un axe (3) qui cons-

titue le volume générateur du col du fémur, ce volume étant coiffé d'une demi sphère (14) de centre (5), les axes des deux cylindres étant concourants dans le tronc de cône (12) et formant entre eux un angle et un volume (15) dont on peut dire qu'il est engendré (géométriquement) par le rabattement du plan (11b) sur le plan (12b) en déformant le contour extérieur de la section pour la faire passer par un point (15a) éloigné d'avec la ligne d'intersection desdits plans (11a ; 11b) et situé dans le plan desdits axes (3, 4) à peu près sur la bissectrice de l'angle susdit.

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce l'étape a) consiste en outre à paramétrer le modèle générique en agissant sur l'une au moins des valeurs telles que la distance (a) du point (15a) à l'intersection des plans (11a, 11b), la longueur (B) du cylindre (14), la hauteur (c) du tronc de cône (12), la hauteur (d) du tronc de cône (11), le diamètre (e) de la demi sphère de centre (5), la valeur de l'angle susdit ainsi que sur la densité de maillage affectée à chaque volume (10, 11, 12, 13, 14, 15) susdit.

8. Procédé de réalisation d'un modèle selon l'une des revendications 6 et 7 destiné à la prédiction de la rupture du col du fémur, caractérisé en ce que la densité de maillage la plus forte concerne le volume cylindrique (13) du modèle générique formant la partie générique du col à étudier.



2 / 2

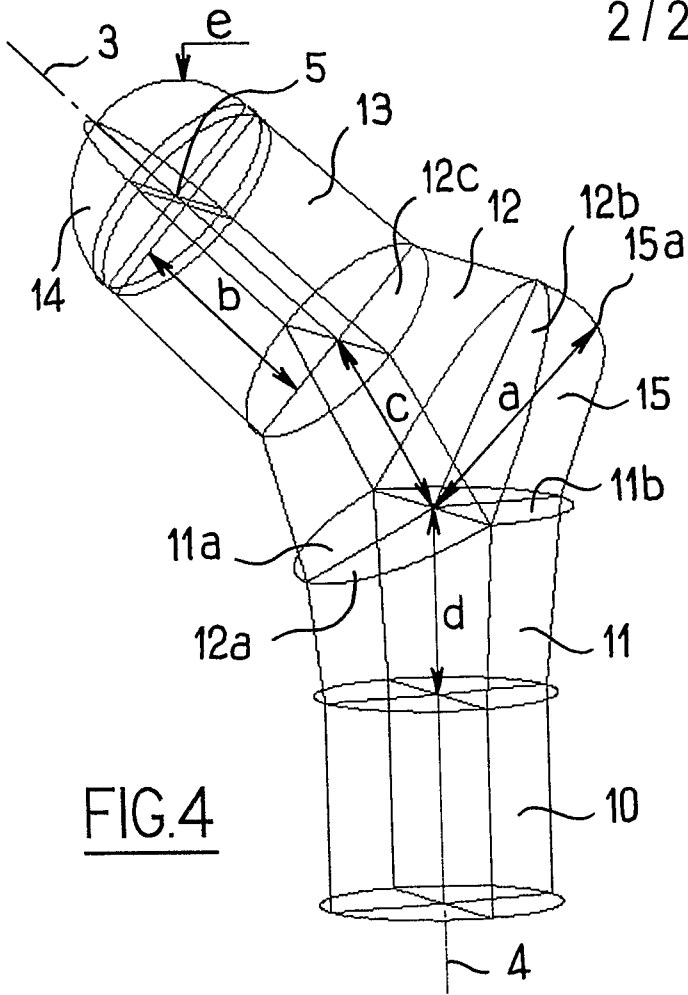


FIG. 4

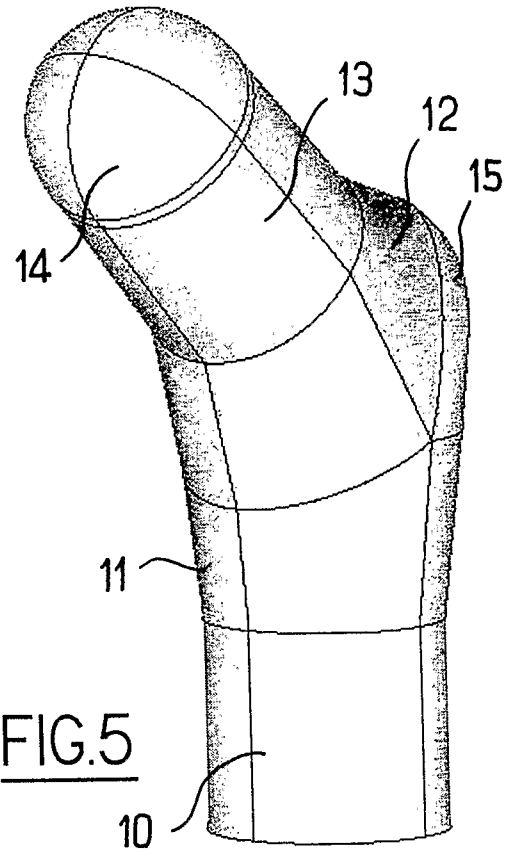


FIG. 5

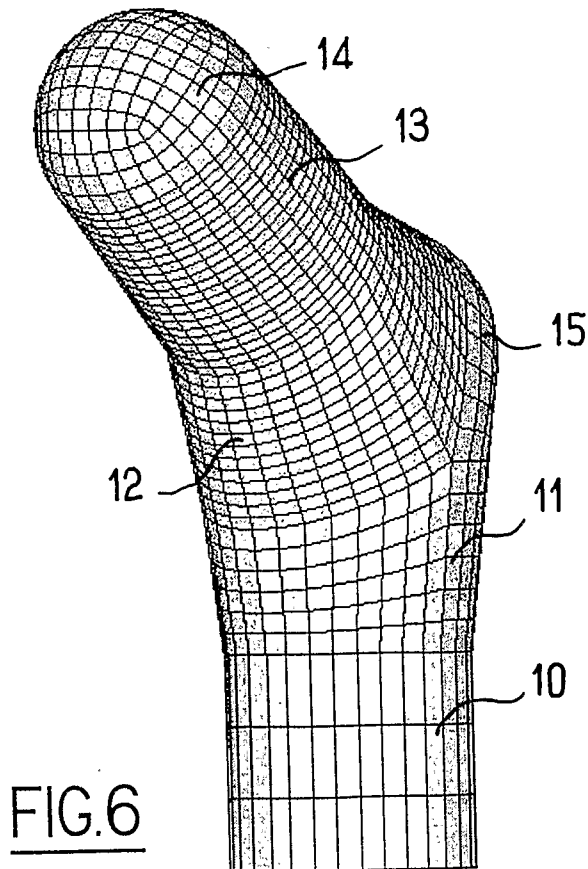


FIG. 6

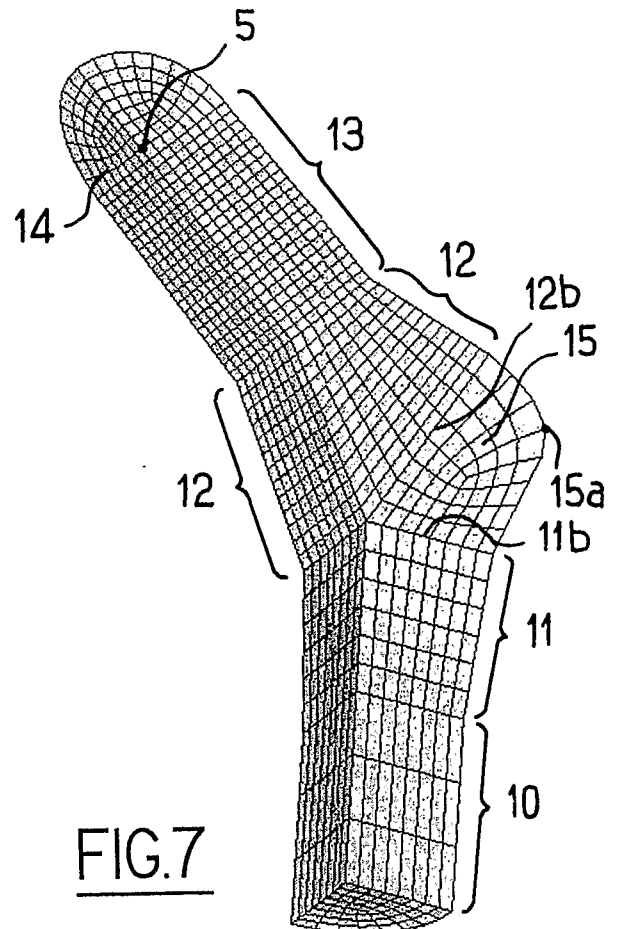


FIG. 7