

---

# Le Système EOS

## Nouvelle Imagerie Ostéo-Articulaire basse dose en position debout

---

J DUBOUSSET\*, G CHARPAK\*\*, I  
DORION\*\*, W SKALLI\*\*\*, F LAVASTE\*\*\*, J  
DEGUISE\*\*\*\*, G KALIFA\*\*\*\*\*, S  
FEREY\*\*\*\*\*

\* Hôpital ST VINCENT DE PAUL – Service de Chirurgie Orthopédique - Paris

\*\* Biospace

\*\*\* Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers- Paris

\*\*\*\* Laboratoire de Recherche en Imagerie Orthopédique – Montréal

\*\*\*\*\* Hôpital ST VINCENT DE PAUL – Service de Radiologie-Paris

Correspondance :

J Dubousset

Service de chirurgie orthopédique

Hôpital St Vincent de Paul

74-82 avenue Denfert-Rochereau

75674 Paris Cedex 14

---

### Résumé

La collaboration étroite de plusieurs disciplines (physique des rayonnements, biomécanique, radiologie et orthopédie de l'enfant) a permis la mise au point d'un nouvel appareil d'imagerie dénommé EOS dont les principales caractéristiques sont :

- La réduction considérable des doses de rayons X (de 8 à 10 fois moins pour la radiologie bidimensionnelle, de 800 à 1000 fois moins pour la tomodensitométrie tridimensionnelle) grâce au détecteur gazeux inventé par Georges CHARPAK, qui lui a valu le prix Nobel.

- L'étude du patient en position debout obtenant des clichés simultanés de face et de profil du sommet de la tête jusqu'à la plante des pieds.

- La possibilité de reconstruction 3D de tous les niveaux ostéo-articulaires vérifiée aussi précise que celle obtenue par tomodensitométrie conventionnelle. L'examen est effectué en position fonctionnelle debout ou assise, ce qui n'était pas possible avec les appareils de tomodensitométrie actuellement tous réalisés en position couchée. La reconstruction 3D peut être obtenue dans des délais acceptables de 15 à 30 minutes pour un rachis complet.

EOS permettra des études de la pathologie ostéo-articulaire jusqu'à jamais réalisées (en particulier du rachis et des membres inférieurs) avec un examen d'ensemble de l'individu au lieu des segments fragmentés donnés jusqu'à présent par les moyens actuels, radiographies conventionnelles ou tomodensitométrie.

**Mots-clés :** Radiographie basse dose / Reconstruction 3D / Station érigée

---

### Introduction

L'invention de Georges CHARPAK (prix Nobel de physique 1992) permet d'obtenir des radiographies de bonne qualité en économisant considérablement les doses des radiations grâce aux détecteurs gazeux. Cela a conduit une équipe multidisciplinaire comprenant ingénieurs physiciens, ingénieurs biomécaniciens et cliniciens radiologues et orthopédistes à mettre au point et utiliser un nouvel appareil d'imagerie médicale dénommé EOS.

Cet appareil comporte une double innovation, puisqu'il permet d'obtenir des images en 2D, mais aussi en 3D en

### Abstract

#### EOS System – New Imaging 2D and 3D for Musculo-Skeletal Physiology and Pathology with low radiation dose and standing position

Very precise combined work between multidisciplinary partners (radiation engineers in physics, engineers in biomechanics, medical radiologists and orthopedic pediatric surgeons) lead to the concept and development of a new low dose radiation device named EOS. This device allows 3 main advantages :

- Thanks to the gaseous detectors for X Rays designed by Georges CHARPAK (Nobel Price 1992) the reduction of doses necessary to obtain a good image of the skeletal system is important : 8 to 10 times less for 2D imaging, and 800 to 1000 times less for 3D reconstruction from CT scan cuts.

- The accuracy of 3D reconstruction obtained is as good as a 3D reconstruction from CT scan cuts.

- In addition, the patient gets its imaging in standing functional position thanks to the X-rays obtained from head to feet simultaneously AP and lateral. This is a big advantage compared to CT scan used only in lying position.

- From this simultaneous AP and lateral X-rays of the whole body thanks to the 3D bone external envelop technique, the engineers in biomechanics allowed to obtain 3D reconstruction at every level of osteo-articular system and especially for spine in standing position within an acceptable period of time (15 to 30 minutes).

EOS (in spite of the evolution of standing MRI) allows more precise bone reconstruction in orthopedics especially at the level of spine, pelvis and lower limbs, giving new consideration for physiology, physio-pathology and therapeutics.

**Keywords:** Low dose radiation / 3D reconstruction / standing position

---

position debout de l'ensemble du squelette de la tête aux pieds, grâce à des nouvelles techniques de reconstruction 3D développées conjointement entre le Laboratoire de Biomécanique de l'E.N.S.A.M. (Ecole Nationale des Arts et Métiers) à Paris LBM-CNRS UMR 8005 (Laboratoire de Biomécanique associé au Centre National de la Recherche Scientifique) à Paris et le Laboratoire de recherches en Imagerie et Orthopédie (LIO) à Montréal (4).

Il en découle de multiples applications, aussi bien en physiologie qu'en pathologie ostéo-articulaire qui amènent un nouveau champ d'investigations et d'applications. L'avantage majeur du système est la diminution considérable des doses de Rx dont on connaît les risques (1) allant d'un facteur de réduction 10 pour les radios conventionnelles 2D à un facteur de 800 à 1000 pour les reconstructions 3D obtenues jusqu'alors grâce aux tomodesistométries qui avaient en outre l'inconvénient de ne pouvoir être utilisées qu'en position couchée.

## Bases physiques – Les premiers appareils et l'évolution jusqu'au modèle actuel

En 1996, Georges CHARPAK et la société Biospace Instruments ont mené une première évaluation de l'intérêt des inventions de Georges CHARPAK dans le domaine de la radiologie médicale. Les détecteurs gazeux qui lui ont valu le Prix Nobel de Physique (1992) permettent en effet la conversion, dans un gaz sous pression tel que le Xénon, de photons X en électrons. Ces électrons sont amplifiés par effet d'avalanche, c'est-à-dire une multiplication du nombre des électrons dans le champ électrique et détectés par une chaîne électronique adaptée (2).

Un prototype de première génération a été installé en 1995 à ST VINCENT DE PAUL, dans le service de radiologie pédiatrique du Professeur KALIFA. Plus de 1000 examens radiologiques ont été réalisés. L'évaluation clinique a été menée sous contrôle du CEDIT (Centre d'Évaluation des Innovations Technologiques) pendant 18 mois, sur un échantillon de 200 enfants et adolescents, dans le cadre d'un protocole soumis au C.C.P.P.R.B. (Comité Consultatif de la Protection des Personnes lors des recherches Biologiques) de COCHIN – PORT ROYAL portant sur la dosimétrie, la qualité d'image et l'évaluation clinique de clichés pulmonaires, du bassin et du rachis fréquemment effectués de manière répétitive chez l'enfant. Les facteurs de réduction de doses mesurés lors de ces essais par comparaison aux films classiques étaient de 4 à 20, selon les localisations (3).

On constatait d'autre part :

- Une résolution encore faible (1mm)
- Une lenteur de la prise d'image (8 à 10 secondes pour un rachis)

De nouvelles technologies de détecteurs ont ouvert la voie à des résolutions de l'ordre de 250µm parfaitement adaptées à l'imagerie de l'os. Ils permettent en outre d'obtenir des images de très grande dynamique, ou profondeur, c'est-à-dire possédant un nombre de niveaux de gris discernables très important : 30 à 50 000, contre de l'ordre d'une centaine de niveaux avec le film classique. L'affichage sur un écran digital permet de sélectionner la gamme de niveaux de gris d'intérêt pour la lecture. Ces détecteurs sont enfin insensibles au rayonnement diffusé et sensibles à un photon X unique : ils permettent donc l'acquisition d'images de grande qualité radiologique, au prix d'une irradiation patient très faible.

En parallèle, les équipes du LBM et du LIO ont dévelop-

pé ensemble de nouvelles méthodes de reconstruction tridimensionnelle précise de vertèbres, puis progressivement des autres éléments du squelette, à partir de seulement deux radiographies prises sous deux incidences.

La démarche générale consiste à positionner approximativement dans l'espace un élément de forme proche (appelé élément générique). Cet élément permet de déterminer des contours radiographiques virtuels. La forme et la position sont alors modifiées jusqu'à ce que les contours virtuels se superposent au mieux avec les contours réels relevés sur la radiographie.

A la demande de l'équipe clinique orthopédique et radiologique de ST VINCENT DE PAUL, Georges CHARPAK et la Société Biospace Instruments ont ainsi lancé en 2000 le développement d'un instrument de radiologie utilisant ces nouvelles technologies dans le contexte particulier de l'orthopédie, donnant une capacité d'imagerie « tête aux pieds », en position debout. L'appareil comprend un détecteur linéaire de largeur 45 cm balayé verticalement en 10 à 20 secondes pour assurer une couverture totale de 170 cm (en hauteur) par 45 cm (en largeur), ouvrant ainsi la voie à une analyse radiographique globale du patient. Deux ensembles orthogonaux composés chacun d'une source de rayon X et d'un détecteur, unis physiquement, permettent la prise de vue simultanée des clichés face et profil.

L'appareil EOS, opérationnel depuis 2003, permet ainsi la prise de deux clichés « tête aux pieds », digitaux et à faible irradiation. Ces clichés sont utilisables tant pour l'examen de zones anatomiques peu denses (zone cervicale par exemple) que pour l'examen de zones très atténuées (zone lombaire par exemple) grâce à la très grande performance du détecteur en termes de dynamique.

## La validation radiographique et la dosimétrie

Elles ont été effectuées à la fois pour les clichés 2D et les reconstructions 3D, de manière à les comparer aux appareils d'imagerie conventionnelle radiographique et de tomodesistométrie.

Quarante cinq enfants ont été étudiés sur leurs examens répétitifs nécessaires en orthopédie pédiatrique et les résultats obtenus ont été les suivants :

\* L'irradiation pour les examens classiques face et profil du rachis étaient réduits de 8 à 10 fois par rapport à la radiologie conventionnelle actuelle, comme en témoigne le tableau suivant, au niveau de la peau par exemple.

	KVp		Dose de peau (µGy)		Facteur de Réduction	
	Film	EOS	Film	EOS	Film	EOS
Face (moyenne)	71	69	1196	127	9,4	
Profil (moyen)	83	84	1618	192	8,4	

Fig 1. : Paramètres radiographiques utilisés et dosimétrie au niveau de la peau

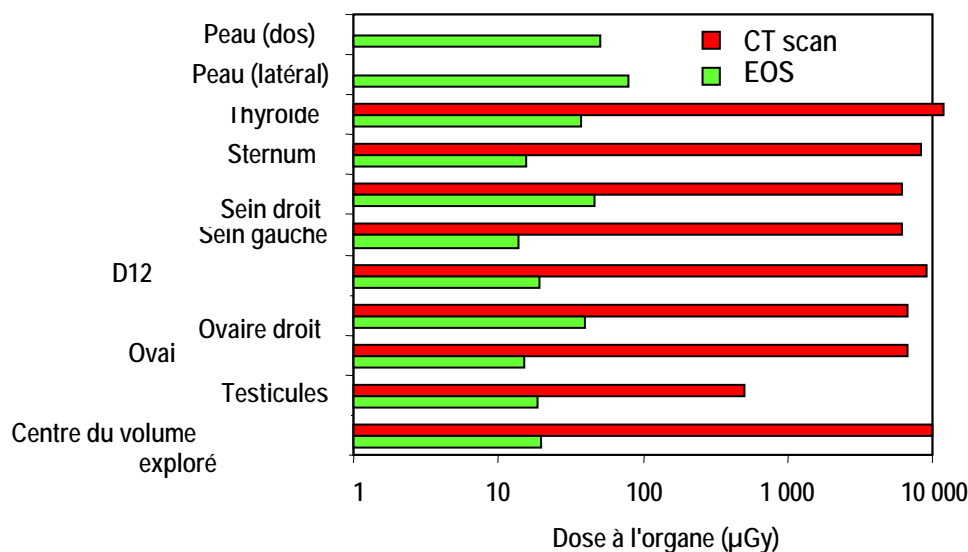


Fig 2.

La comparaison EOS / TDM avec reconstruction tridimensionnelle montre que la diminution de la dose absorbée va d'un facteur 100 pour les organes génitaux à plus de 600, voire 800, pour la thyroïde.

Le tableau de la figure 2 est particulièrement explicite.

La **Reconstruction tridimensionnelle** : elle est obtenue grâce aux images radiographiques calibrées données par le système EOS, du fait de la liaison physique entre les ensembles sources détecteurs, la position dans l'espace des capteurs et des sources de rayons X est parfaitement connue : l'environnement radiographique est donc pré-calibré.

La projection de la pièce osseuse radiographiée est comparée à celle d'un objet virtuel dit objet générique qui en a approximativement la forme. Cet objet est défini par les coordonnées d'un nuage de points répartis à sa surface (400 à 9000 points en fonction de la complexité de l'objet). Il peut être obtenu à partir d'une pièce anatomique d'une reconstruction TDM 3D ou d'un modèle statistique.

Les informations extraites de l'image radiographique permettent d'identifier des repères ponctuels (par exemple centre géométrique de la tête fémorale), ou des contours (par exemple contours associés à la projection des condyles fémoraux). Certains repères sont identifiables simultanément sur les deux images radiographiques (stéréo-correspondants) et sont associés à un repère anatomique spécifique, d'autres peuvent seulement être associés à une région, la localisation précise dans la région dépendant de l'orientation de l'objet.

Par exemple :

*La reconstruction d'une extrémité distale de fémur* commence par le repérage des contours de l'os sur les images radiographiques dans les deux plans orthogonaux. Ces contours ne sont pas nécessairement stéréo correspondants. Ils sont ensuite comparés à ceux d'un fémur virtuel projeté sur ces mêmes images. Le fémur virtuel va être déformé, d'abord par une succession de translations, rotations, homothéties, puis par une déformation non linéaire

jusqu'à obtenir une superposition des contours réels et virtuels.

## Pour la reconstruction des vertèbres d'un rachis scoliotique

On commence par pointer semi automatiquement 4 repères anatomiques par corps vertébral, sur les images radiographiques des deux plans orthogonaux. Ceci permet de quantifier pour chaque corps vertébral, son volume de confinement dans l'espace, l'inclinaison latérale et sagittale de la vertèbre et de définir la ligne vertébrale qui joint les centres des corps vertébraux. De plus, la rotation vertébrale axiale est estimée à partir des connaissances anatomopathologiques des courbures rachidiennes. Un modèle théorique issu de mesures directes sur 1628 vertèbres sèches et de reconstruction 3D de 96 rachis est alors construit, puis rétro-projeté sur l'image radiographique. Semi automatiquement on réoriente l'objet virtuel pour corriger la rotation vertébrale axiale et on rectifie la position des repères rétro-projetés jusqu'à obtenir une bonne adéquation entre les contours réels et les contours virtuels de l'objet modélisé.

L'automatisation complète de ce processus est en cours.

## Validation de la reconstruction 3D

La validation des reconstructions a été effectuée pour des vertèbres, des fémurs et des tibias, d'abord in vitro sur pièces sèches, puis in vivo. Dans chaque cas les reconstructions 3D sont effectuées d'une part à partir de coupes TDM millimétriques (2mm pour des vertèbres scoliotiques) considérée comme la référence, et d'autre part à partir de la simple paire de radiographies fournie par EOS. L'erreur moyenne est de 0,9 mm, et 95% des erreurs sont inférieures à 2,4 mm. In vivo, et même dans le cas d'os très déformés (scoliose sévère et genoux arthrosiques), l'erreur moyenne reste inférieure à 1,5 mm, c'est-à-dire tout à fait identique à ce que donne la TDM comparée aux mesures directes effectuées sur les pièces anatomiques.

## Le constat final de toutes ces validations est donc :

La réduction considérable des doses d'irradiation obtenues avec le système EOS. La validation de la précision surfacique de la reconstruction 3D tout à fait comparable à celle de la TDM.

La qualité des images obtenues est tout à fait comparable à celle d'une radiographie classique quel que soit le niveau étudié de la tête aux pieds. De plus, la possibilité de jouer sur le fenêtrage des images a pour EOS les mêmes caractéristiques que celles de la radiographie numérisée évitant une nouvelle irradiation en cas d'erreur technique.

Enfin, l'analyse des tissus de contrastes différents (os, muscles, poumons, ligaments) sera peut-être une autre possibilité grâce à la double énergie utilisant un premier passage avec 70 KV et un second avec 120 KV.

## Applications pratiques existantes et potentielles

Les premières applications pratiques sont les mêmes indications que celles de la radiographie conventionnelle pour ce qui est du système squelettique avec les 3 avantages majeurs dont on a déjà parlé.

- La diminution des doses d'irradiation
- La non nécessité de refaire des clichés lorsqu'on ne visualise pas bien une région
- L'étude se fait en station debout tout à fait fonctionnelle, pour le squelette entier des pieds à la tête

Cela représente déjà des éléments tout à fait intéressants pour les examens radiologiques répétitifs des affections rachidiennes opérées ou non chez l'enfant, l'adolescent ou l'adulte : bilans squelettiques du bassin et des membres inférieurs chez l'enfant, clichés thoraciques de dépistage.

Les secondes applications pratiques découlent de la possibilité d'obtenir des reconstructions tridimensionnelles aussi fiables que celles obtenues avec la tomographie avec les 2 avantages majeurs :

- La diminution considérable des doses d'irradiation (de 800 à 1000 fois inférieures)
- La réalisation de l'examen en position debout ou assise, donc fonctionnelle et la reconstruction peut être faite, là encore, de la tête aux pieds avec une précision identique à celle de la TDM qui, elle, n'est effectuées qu'en position couchée et sur un segment limité du squelette.

Ces éléments sont d'importance majeure pour :

## La pathologie rachidienne

L'exploration globale du corps permet de déceler et de mesurer les compensations qui se produisent au niveau non seulement du rachis mais de l'ensemble du corps dans l'équilibre postural et la fonction de l'individu. Une plate forme de force peut être intégrée au système EOS, permettant de connaître la ligne de gravité passant par le centre du polygone de sustentation, et de la rapporter aux

données précédentes. La modélisation de l'enveloppe cutanée commence à être réalisée. Les principales indications rachidiennes sont à l'heure actuelle :

- Le suivi évolutif des affections rachidiennes au cours de la croissance et du vieillissement du rachis
- L'établissement des bilans pré-opératoires, en tenant compte des éléments extra rachidiens (tête, bassin, hanches, genoux), tout autant que du rachis lui-même, en particulier pour le plan horizontal difficile à appréhender sur les radiographies conventionnelles et qui est parfaitement démontré par la reconstruction volumétrique 3D, par exemple vue d'en haut.
- La surveillance post-opératoire, notamment de l'équilibre global et des compensations immédiates ou à long terme où le rôle de la situation spatiale du bassin paraît primordial.
- Le contrôle des actions des corsets orthopédiques. Ceci grâce à la reconstruction du squelette thoracique qui permet de visualiser dans l'espace la position des appuis et leurs conséquences bénéfiques ou néfastes sur la cage thoracique, de même que l'effet sur le bassin et l'ensemble rachidien depuis la vertèbre céphalique jusqu'à la vertèbre pelvienne.
- La mesure de la capacité thoracique et du volume thoracique pouvant permettre grâce à cette mesure simple et peu irradiante d'éviter certains examens par TDM thoracique à coupes jointes, beaucoup plus irradiantes pour l'évaluation des volumes pulmonaires au cours de la croissance et détecter les effets favorables ou néfastes des divers appareillages.
- L'estimation et la mesure de la déformation rachidienne de façon beaucoup plus réaliste que les mesures et pourcentages de corrections donnés par le simple angle de Cobb rachidien qui en réalité ne mesure que l'effondrement rachidien projeté dans un seul plan et non la réalité de la déformation rachidienne.

Cet ensemble de regards nouveaux sur la pathologie rachidienne amènera à n'en pas douter une évolution dans les indications opératoires et même probablement dans les techniques de corrections.

Il faut enfin signaler que l'association EOS et mesures spatiales 3D réalisée avec des instruments non invasifs (ultrasons ou palpateurs externes) permet d'avoir une idée assez précise de la mobilité rachidienne relative à la ligne de gravité élevée à partir du polygone de sustentation, la superposition de cette ligne de gravité de référence rendant l'utilisation des 2 types d'appareils tout à fait valable et complémentaire.

## Les études sur la morphologie tridimensionnelle en position fonctionnelle debout des divers secteurs et articulations des membres inférieurs.

*Au niveau du genou :* La concordance morphologique entre les études TDM 3D en décubitus et EOS est bonne, mais l'étude en charge autorisée par le système EOS permet une meilleure étude des déformations qu'elles soient d'origine squelettique ou des parties ligamentaires et musculaires. Ceci permet déjà de mieux apprécier dans l'espace les déformations au niveau de l'articulation elle-

même, mais aussi et surtout de replacer ce genou dans l'ensemble du membre (hanche, genou, pied), et aussi dans l'ensemble du corps avec en particulier le retentissement d'un côté sur l'autre, de même que le retentissement des altérations morphologiques et fonctionnelles du squelette des membres inférieurs sur le rachis et vice et versa.

*Au niveau de la hanche* : La vision 3D en charge approche de très près la réalité. Le retentissement des éléments sus (bassin, rachis et tronc) et sous jacents (genou, pied) peut être évalué en 3D ce qui est d'une importance considérable dans l'indication et la réalisation des implantations prothétiques par exemple, de même que pour l'évaluation des résultats.

On connaissait l'étude si difficile *des phénomènes et des anomalies de rotations* des membres inférieurs où les différentes coupes TDM (hanches [tête et col], condyles fémoraux, extrémité supérieure du tibia, cheville, pied) permettant de faire des mesures utiles pour la pathologie et la thérapeutique, au prix d'une certaine irradiation et d'une étude en position couchée.

Il va de soi que grâce au système EOS, non seulement les mêmes renseignements mais d'autres encore, en particulier sur le plan rotatoire 3D beaucoup plus précis à cause des couplages générés par la position debout, seront découverts.

Tout ceci amènera bien sûr à des études sur la pathologie et les *remplacements prothétiques*, hanche, genou, et autres, cette fois-ci étudiés dans l'espace et non sur les projections uniplanaires données par les radiographies, études déjà nettement démarrées au niveau des prothèses de genou ; d'où la création peut-être de nouvelles prothèses, en tout cas de nouveaux critères de contrôle de mise en place et de contrôles de détérioration spatiale à distance.

Enfin point capital, tous ces éléments, reconstructions effectuées à partir de logiciels dûment contrôlés, le sont à partir des 2 radiographies initiales. Par ailleurs, elles peuvent être effectuées des mois ou des années plus tard à partir de cette paire de radiographies orthogonales initiales sans avoir besoin de ré-irradier le malade.

#### Contingences actuelles :

L'appareil EOS existe actuellement en deux prototypes, l'un situé en permanence à l'E.N.S.A.M. à Paris, l'autre qui était à l'Hôpital ST VINCENT DE PAUL est actuellement en Belgique et sera rapatriée dans quelques semaines à la PITIE SALPETRIERE, une troisième est en cours d'installation au Canada.

EOS fonctionne avec un système informatique basé sur PC.

Son installation réclame une salle de radiographies habituelle avec un sol suffisamment stable et renforcé pour supporter le poids de la machine et éviter les vibrations lors du déplacement de ses éléments mobiles au cours de la prise du cliché.

Son coût est de l'ordre de la moitié de celui d'un scanner de dernière génération.

## Conclusion

EOS ouvre une ère nouvelle dans l'orthopédie et l'étude des maladies du squelette en mettant en évidence l'importance des 3 dimensions de l'espace tout en réduisant significativement les effets possiblement nuisibles d'une irradiation excessive.

## Références

1. BERRINGTON de GONZALES A., DARBY S. – Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. *Lancet* 2004; 363: 345-51
2. BABICHEV E.A., BARU S.E., GROSHEV V.R., KHA-BAKHPASHEV A.G., LEONOV V.V., NEUSTROEV V.A., POROSOV V.V., SAVINOV G.A., SHEKHTMAN L.I. – The new effective detector for digital scanning radiography. *Nucl. Instr. Meth.* 2003; 513: 57-60.
3. KALIFA G., CHARPAK G., MACCIA C., FERY-LEMONNIER E., BLOCH J., BOUSSARD J.M., ATTAL M., DUBOUSSET J., ADAMSBAUM C. – Evaluation of a new low-dose digital x-ray device : first dosimetric and clinical results in children. *Pediatr Radiol* 1998; 28: 557-61.
4. DESCHENES S., GODBOUT B., BRANCHAUD D., MITTON D., POMERO V., BLEAU A., SKALLI W., DE GUISE JA. – 3D reconstruction of the human spine from Bi-planar radiographs: using multi-scale wavelets analysis and splines interpolators for semi-automation. *SPIE Medical Imaging*, 2003.
5. LAPORTE S., SKALLI W., DE GUISE JA., LAVASTE F., MITTON D. – A biplanar reconstruction method based on 2D and 3D contours : application to the distal femur. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2003; 6(1): 1-6.
6. LE BRAS A., LAPORTE S., MITTON D., DE GUISE JA., SKALLI W. – 3D detailed reconstruction of vertebrae with low dose digital stereoradiography. *Stud Health Technol Inform* 2002; 91: 286-90.
7. MITTON D., LANDRY C., VERON S., SKALLI W., LAVASTE F., DE GUISE JA. – 3D reconstruction method from biplanar radiography using non stereocorresponding points and elastic deformable meshes. *Med Biol Eng Comput*, 2000; 38(2): 133-9.
8. POMERO V., MITTON D., LAPORTE S., DE GUISE JA., SKALLI W. – Fast accurate stereoradiography 3D-reconstruction of the spine using a combined geometric and statistic model. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2004 ; 19(3) : 240-7.



Fig 3. Vue de l'appareil

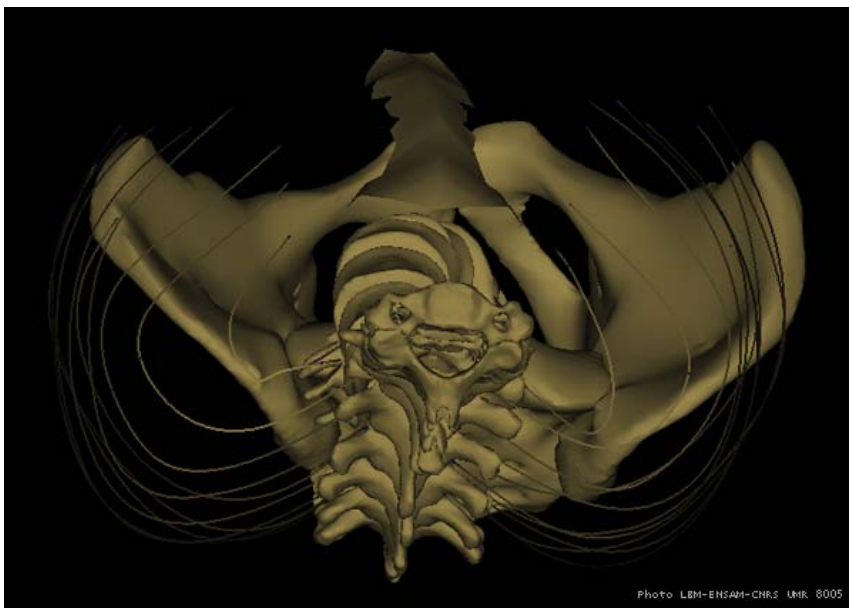


Fig 4. Vue de dessus rachis-bassin



Fig 5. Reconstruction en 3D du squelette