



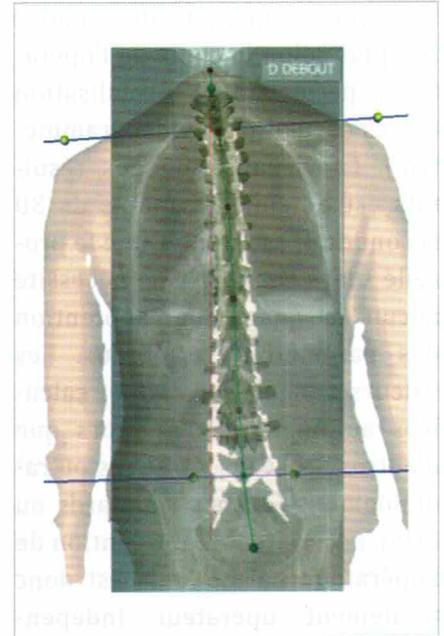
IV. PHOTOGRAMMÉTRIE ET VIDÉOGRAMMÉTRIE 3D ET 4D : Une technologie non irradiante au service du rhumatologue et de ses patients

PAR ZBIGNIEW KULIBERDA, SCHILTIGHEIM - MASSEUR KINÉSITHÉRAPEUTE DIPLÔMÉ D'ÉTAT ET
OSTÉOPATHE - DIRECTEUR DE LA RECHERCHE DE LA SOCIÉTÉ ETIOSYSTEMS - INVENTEUR DE L'ÉVALUATION
POSTURO-FONCTIONNELLE

ET LAURENCE BELLAICHE, PARIS - RADIOLOGUE DE L'APPAREIL LOCOMOTEUR ET DU SPORT - IMAGERIE
MÉDICALE PARIS CENTRE, BACHAUMONT - CONSULTANT DES ÉQUIPES DE FRANCE OLYMPIQUES, FFT, FFR,
OPÉRA DE PARIS, ARSENAL FC

Par ses travaux sur les principes de perspective et de géométrie descriptive, Leonardo Da Vinci posa les fondements théoriques de la photogrammétrie ou stéréovision (imagerie optique 3D)¹. De mécaniques et mathématiques, les procédures de travail photogrammétrique furent transformées dans des systèmes électroniques et numériques avec la naissance de l'ordinateur. Les dernières décennies, grâce au développement technologique et à l'augmentation de la puissance des ordinateurs, voient la photogrammétrie numérique trouver de nombreuses applications de visualisation en 3D dans des domaines aussi variés que la géographie, l'architecture ou la criminologie. Mais le XXI^e siècle voit également l'essor de la photogrammétrie dans le domaine médical. Son application en anthropométrie permet ainsi la détection, la surveillance et la prévention des pathologies de contraintes, de la même manière que le sonar sous-marin découvert par Paul Langevin pendant la 1^{re} Guerre Mondiale avait amené au développement de l'imagerie échographique dans les années 50.

Des outils présents sur le marché, Spinal Mouse, Biomod, Kinéod, COMOT, Optronic Torsograph, ISIS2, Sam 3D..., seul le Diers Formetric est totalement non opérateur dépendant, comme le déclare le Pr Raimondi^{2,3} créateur d'un outil de mesure des rotations vertébrales : « ... contrairement à d'autres, cette technologie n'est pas destinée à remplacer la radiographie mais, qu'en plus des nombreux paramètres fondamentaux qu'elle est capable d'acquérir, a définitivement rendu obsolètes tous les outils utilisés à ce jour. Elle nous permet de quantifier les évaluations; de les répéter sans l'utilisation d'instruments divers, n'a pas d'effet nocif et fournit une bonne approximation des coordonnées vertébrales. Non opérateur dépendante, cette technologie peut être extrêmement utile dans le dépistage ou l'évaluation post chirurgicale prothétique par exemple et facilite la compilation de statistiques... ».



LE PRINCIPE TECHNOLOGIQUE⁴⁻²¹

Ce procédé optique, caractérisé par l'utilisation de franges de Moiré projetées sur le dos d'un patient, repose sur la capture des déformations par une caméra vidéo dont le temps d'exposition est du 50^e de seconde. Il est ainsi possible de réaliser une série d'images permettant l'enregistrement d'une séquence de mouvements. Importées dans un logiciel de photogrammétrie, ces images vidéo permettront la reconstruction en 3 dimensions de la surface

du dos du patient utilisant environ 7 500 points avec une précision de l'ordre de 0,2 mm. L'analyse de formes caractéristiques telles que les voussures et les dépressions du dos permet d'identifier les repères anatomiques en utilisant les principes mathématiques de la géométrie différentielle.

En plus des points de référence anatomiques, l'analyse mathématique des différents reliefs et des asymétries gauche-droite permet de déterminer une ligne de symétrie qui partage le dos humain en deux moitiés⁴.

Chez la personne ne présentant pas de déformations vertébrales dans le plan frontal, cette ligne est verticale ou avec de très faibles écarts et correspond étroitement à la ligne des épineuses. Dans la scoliose, la ligne de symétrie suit la ligne des épineuses avec une excellente corrélation²².

La reconstruction en trois dimensions de la colonne vertébrale est possible grâce aux études de Turner-Smith¹⁸ et Drerup²⁰. Ainsi, dans le plan frontal et dans le plan sagittal, la reconstruction niveau par niveau de la ligne du centre des corps vertébraux est directement comparable aux images radiologiques.

LA MISE EN ŒUVRE

Le patient se tient debout en position naturelle de repos, dos nu, nuque et pli interfessier visibles. Son regard est horizontal, sa respiration libre. Un enregistrement de 6 secondes permettra d'obtenir une visualisation de son organisation posturale moyenne (photogrammétrie).



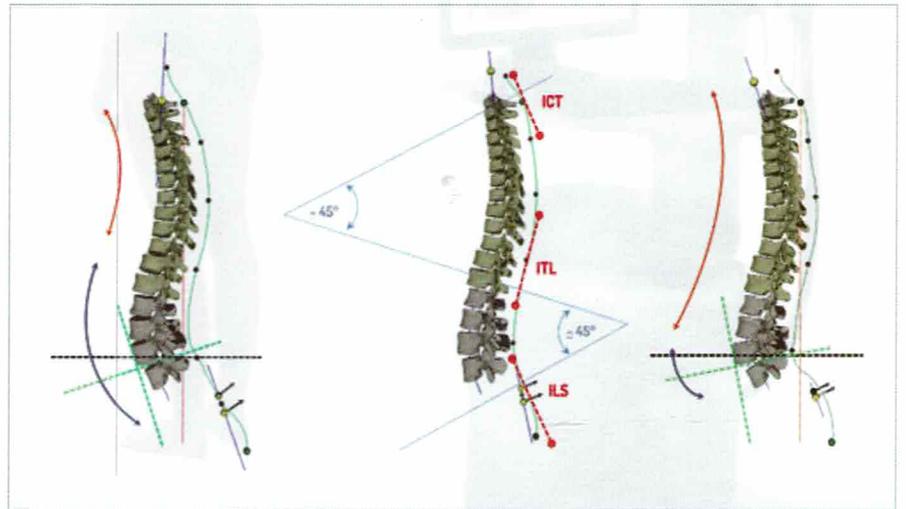
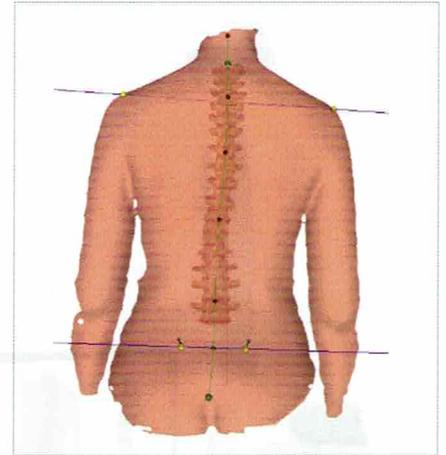
Un enregistrement de 30 secondes (ou plus selon le choix de l'opérateur) permettra la visualisation de ses oscillations (vidéogrammétrie). La visualisation des résultats est obtenue en moins de 30 secondes. Il est à noter que le procédé Diers Formetric ne nécessite aucun marquage pour l'obtention des paramètres vertébraux. Les valeurs angulaires sont calculées automatiquement alors que d'autres procédés, optiques ou radiologiques (clichés standards ou EOS), nécessitent l'intervention de l'opérateur. La méthode est donc totalement opérateur indépendante.

De plus, la mesure barométrique des appuis podaux effectuée simultanément aux calculs de nombreux paramètres vertébraux, permet une appréciation la plus complète possible de la répartition des charges et des contraintes en jeu lors de certains déséquilibres.

LA VISUALISATION

Dans le plan frontal, les images obtenues montrent par exemple la position des ceintures, la déviation latérale ou le(s) angle(s) de scoliose avec la répartition des charges correspondante. Dans le plan sagittal, outre les paramètres habituels comme les flèches cervicales et lombaires, l'angle de cyphose et de torsion du bassin, c'est l'aspect sagittal global de la colonne vertébrale qui, avec sa répartition de charge, permet d'évaluer la résistance à la compression de la colonne (Loi d'Euler) et d'appréhender les contraintes vertébrales de cisaillement en fonction de la ligne gravitaire²³⁻²⁷.

C'est dans le plan horizontal que le procédé prend toute sa valeur par la mesure des rotations vertébrales étagées², de la torsion du tronc et des ceintures avec leur répercussion positionnelle et angulaire au niveau podal. Enfin, les enregistrements effectués permettent d'appréhender le cône d'économie²⁵ et les phénomènes oscillatoires responsables de l'augmentation des contraintes.



LES APPLICATIONS MÉDICALES

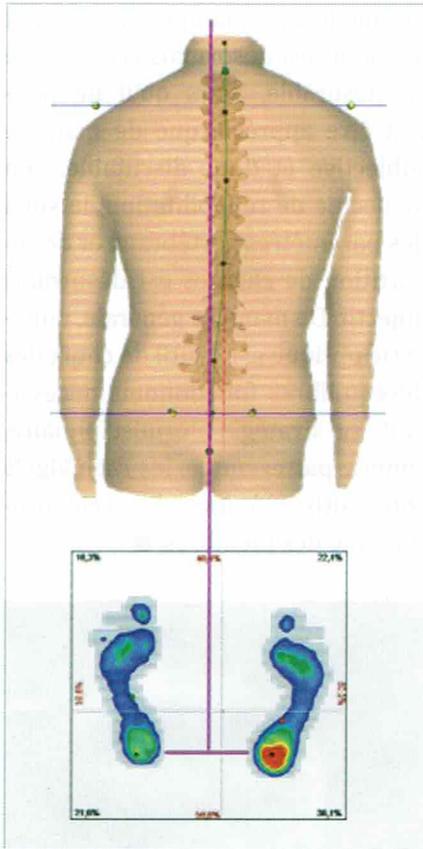
Si photogrammétrie et vidéogrammétrie s'avèrent un complément des plus utiles, elles ne peuvent en aucun cas se substituer à l'imagerie conventionnelle (Radiographies, IRM, Scanner) nécessaire au diagnostic des troubles structurels (arthrose, hernie discale, étroitesse canalaire...) ou des pathologies (tumeurs, maladies rhumatismales, fractures-tassements...).

Elle a sa place dans la stratégie thérapeutique visant à diminuer les contraintes additionnelles aux pathologies existantes et prend tout son sens dans les pathologies non spécifiques ou idiopathiques.

La lombalgie non spécifique est l'exemple parfait auquel photogrammétrie et vidéogrammétrie apportent des éléments concrets à la stratégie de soins.

Un angle de scoliose englobant la charnière dorso-lombaire mesuré sur un cliché radiologique coronal peut être en réalité une déviation thoraco-lombaire dont le traitement ne sera pas le même. La visualisation globale de l'aspect d'une colonne vertébrale et de la répartition de charge correspondante peut modifier considérablement l'approche thérapeutique.

L'harmonie des courbures sagittales est prépondérante et la



pathologies déformantes du rachis comme la scoliose idiopathique. Une scoliose asymptomatique mais déséquilibrée nécessitera probablement un traitement pour limiter les désagréments à venir, alors que si elle est équilibrée, une surveillance attentive sera de mise.

DISCUSSION

prescription d'actes de renforcement par exemple ne peut être la même si l'équilibre sagittal global est perturbé. Cette notion d'équilibre de répartition des contraintes est essentielle dans le cadre de

En rhumatologie, la stratégie de soins repose sur l'examen clinique, la biologie et l'imagerie médicale. En matière d'imagerie, les progrès dans la dernière décennie ont apporté des visualisations du rachis de moins en moins segmentaires. Le système EOS permet ainsi une reconstruction 3D, mais elle est encore peu accessible et reste irradiante. Si le système EOS s'avère pertinent dans le cadre chirurgical, son inté-

Position Naturelle		Position Radiologie Standard	
<p>Angle de Scoliose : 35°</p> <p>Angle de Scoliose : 35°</p> <p>Angle cyphotique ICT - ITL : 75° Angle lordosique ITL - ILS : 55°</p>	<p>Regard <u>horizontal</u></p> <p>Sujet <u>détendu</u></p> <p>Respiration <u>naturelle</u></p>	<p>Angle de Scoliose : 27°</p> <p>Angle de Scoliose : 26°</p> <p>Angle cyphotique ICT - ITL : 73° Angle lordosique ITL - ILS : 53°</p>	<p>Plaque <u>thoracique</u></p> <p>Mention <u>relevé</u></p> <p><u>Apnée</u></p>





rêt en médecine fonctionnelle reste discutable. Malgré l'irradiation low dose, un résultat exploitable n'est souvent obtenu qu'après plusieurs acquisitions du fait des oscillations naturelles du patient. Les mesures réalisées en EOS restent opérateur dépendantes. De plus, pour des raisons de visualisation sagittale correcte du système vertébral, le patient place ses mains en position « *clavicule* » ou « *malaire* », ce qui modifie la répartition des charges. Ainsi, en pathologie fonctionnelle, photogrammétrie et vidéogrammétrie (imagerie optique 3D et 4D) présentent l'avantage incontestable de mesurer des paramètres vertébraux en position debout naturelle tout en tenant compte des phénomènes oscillatoires. Il en est de même dans le cadre des pathologies déformantes du rachis. Une télémétrie n'est pas réalisée en position naturelle, ce qui a pour conséquence de modifier les valeurs angulaires, dont la mesure est déjà opérateur dépendante.

Les études comparatives, imagerie optique 3D vs Rx, montrent qu'il existe une différence de l'angle de scoliose entre l'acquisition optique et l'angle de Cobb radiologique, comme il existe une différence de l'angle de scoliose entre une acquisition optique en position naturelle et une acquisition optique en position radiologique.

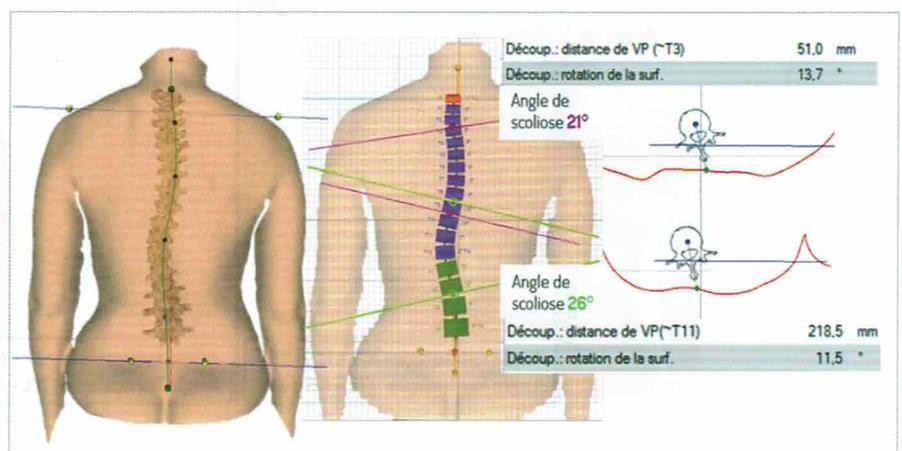
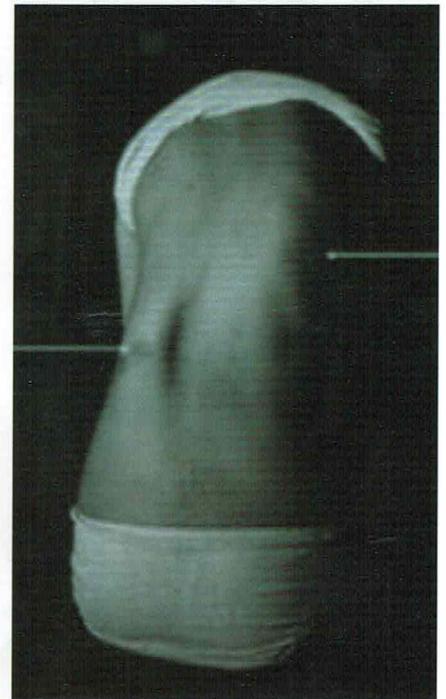
En revanche, les études menées à ce jour s'accordent sur le fait que l'évolution de l'angle de scoliose en acquisition optique photogramétrique est similaire à l'évolution de l'angle de Cobb en radiologie conventionnelle^{29, 30}. Aussi, de par son caractère totalement non irradiant, l'imagerie optique 3D et

4D est devenu l'outil de détection et de suivi du XXI^e siècle des pathologies déformantes, réduisant ainsi considérablement le risque de cancers et leucémies radio-induites chez le jeune patient nécessitant une visualisation fréquente, notamment lors de la période pubertaire.

INTÉRÊT

Il apparaît clairement, qu'outre l'intérêt complémentaire à l'imagerie médicale conventionnelle, l'imagerie optique 3D et 4D (photogrammétrie et vidéogrammétrie) est un outil majeur de la médecine fonctionnelle. Son caractère fiable, non opérateur dépendant et reproductible consolide la mise en place de stratégies de soins dans différents champs médicaux. L'examen clinique fonctionnel, souvent long, fastidieux et très opérateur-dépendant trouve un équivalent rapide, objectif et quantifié rendant même certains tests désuets. Ainsi, le bending-test devient obsolète. Plus besoin d'évaluer la gibbosité d'une scoliose puisque l'imagerie optique 3D mesure les rotations vertébrales étagées, permettant ainsi de différencier scoliose et attitude scoliotique.

En médecine manipulative, l'effet des soins est désormais visualisable et mesurable, alors qu'il ne pouvait être apprécié que de manière subjective et donc discutable... En médecine de réhabilitation, le suivi des paramètres vertébraux et de répartition de charges est désormais objectif. De manière générale, l'imagerie optique est l'outil de choix des déséquilibres fonctionnels nécessitant une stratégie pluridisciplinaire, comme par exemple, les rachialgies consécutives à une chirurgie prothétique des membres. ■



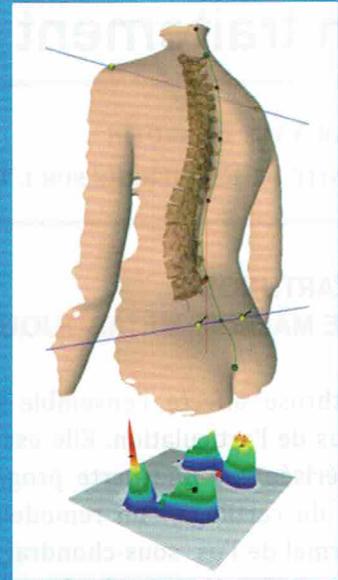


► CONCLUSION

Parmi les avantages de l'imagerie optique 3D et 4D, il en est un dont on parle peu, c'est la simplicité de compréhension des résultats par le patient. Est ainsi levée l'une des difficultés majeures à tout traitement : l'adhésion du patient au traitement et au suivi médical, gage pourtant essentiel de la qualité du résultat des soins.

Les outils du XXI^e siècle permettront probablement d'améliorer nos connaissances de l'appareil locomoteur et d'éclaircir certains termes tels qu'équilibre, déséquilibre, posture, statique et dynamique employés souvent dans la littérature avec un sens subtilement ou totalement différent, ce qui est source de confusion.

Si l'imagerie médicale conventionnelle est un instantané de la réalité structurelle, l'imagerie optique 3D et 4D est une visualisation de l'organisation temporo-spatiale propre à chaque individu. Dans la pratique médicale, cette précision est capitale car elle permet d'envisager la lombalgie comme la manifestation d'un déséquilibre même distant et non uniquement comme une problématique de colonne lombaire. Accepter ce point de vue, c'est aussi accepter de soigner un patient souffrant de lombalgies plutôt que de chercher à combattre un symptôme.



RÉFÉRENCES :

- ◆ 1. Modélisation 3D automatique: outils de géométrie différentielle par François Goulette Presses des MINES, 1999 Page 9. ◆ 2. M Mangione, P Raimondi, M Paoloni. Vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis calculated by radiograph and back surface analysis-based methods: correlation between the Raimondi method and rasterstereography. *Eur Spine J* 2013;22:367-71.
- ◆ 3. Conversation with Paolo Raimondi on vertebral rotation, recorded in October 2010. Faculty of Sports Sciences of the University of Aquila. ◆ 4. W. Frobin, E. Hierholzer: Rasterstereography: A photogrammetric method for measurement of body surfaces. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Nr. 47, 1981, S. 1717-1724 PMC 6853417. ◆ 5. M. Betsch et al.: The rasterstereographic-dynamic analysis of posture in adolescents using a modified Matthiass test, in: *European Spine Journal* Nr. 43, 2005, S. 331-341. ◆ 6. L. Hackenberg et al.: Rasterstereographic back shape analysis in idiopathic scoliosis after posterior correction and fusion, in: *Clinical Biomechanics* Nr. 18, 2003, S. 883-889. ◆ 7. Takasaki, H. (1970). Moiré topography. *Appl Opt.* 1970 06 1;9 (6), 1467-1472. ◆ 8. Frobin, W.; Hierholzer, E. (1978). Rasterstereography: A stereophotogrammetric method for the measurement of body surfaces using a projected grid. *Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers* 166, 39-44. ◆ 9. Xenofoss, S.; Jones, C. (1979). Theoretical aspects and practical applications of moiré topography. *Phys. Med Biol.* 03; 24(2), 250-261. ◆ 10. Frobin, W.; Hierholzer, E. (1981). Rasterstereography: A photographic method for measurement of body surfaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 47, 1717-1724.
- ◆ 11. Frobin, W.; Hierholzer, E. (1982). Calibration and model reconstruction in analytical close-range stereophotogrammetry. Part I: Mathematical fundamentals. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 48, 67-72. ◆ 12. Hierholzer, E.; Lüxmann, G. (1982). Three-dimensional shape analysis of the scoliotic spine using invariant parameters. *Journal of applied Biomechanics* 15, 595-598. ◆ 13. Drerup, B. (1982). Measurement of kyphosis using moiré topography. *Biostereometrics '82 / SPIE* 361, 101-110. ◆ 14. Frobin, W.; Hierholzer, E. (1983). Automatic measurement of body surfaces using rasterstereography. Part II: Analysis of the rasterstereographic line pattern and 3-D surface reconstruction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 50, 1443-1452.
- ◆ 15. Drerup, B. (1984). Principles of Measurement of Vertebral Rotation from Frontal Projections of Pedicles. *Journal of applied Biomechanics* 17, 923-935. ◆ 16. Frobin, W.; Hierholzer, E. (1986). Mathematical representation and shape analysis of irregular body surfaces. *Biostereometrics '82 / SPIE* 361, 132-139. ◆ 17. Drerup, B.; Hierholzer, E. (1987). Movement of the human pelvis and displacement of related anatomical landmarks on the body surface. *Journal of applied Biomechanics* 20, 971-977. ◆ 18. Turner-Smith, A.; Harris, J.; Houghton, G.; Jefferson, R. (1988). A method for analysis of back shape in scoliosis. *Journal of applied Biomechanics* 21 (6), 497- 509. ◆ 19. Carr, A.; Jefferson, R.; Turner-Smith, A. (1989). Surface stereophotogrammetry of thoracic kyphosis. *Acta Orthop Scand.* 04, 60(2), 177-180. ◆ 20. Drerup, B.; Hierholzer, E. (1996). Assessment of scoliotic deformity from back shape asymmetry using an improved mathematical model. *Clin. Biomech.* 11, 367-383. ◆ 21. Liljenqvist, U.; Halm, H.; Hierholzer, E.; Drerup, B.; Weiland, M. (1998). 3- dimensional surface measurement of spinal deformities with video rasterstereography. *Z Orthop Ihre Grenzgeb.* 136(1), 57-64. ◆ 22. Frerich J, Hertzler K, Knott P, Mardjetko S. Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *Open Orthop J.* 2012;6:261-265. ◆ 23. Duval-Beaupère G, Schmitt C, Cosson Ph. A barycentremetric study of the sagittal shape of spine and pelvis. *Ann Biomed Engineer* 1992;20:451-62.
- ◆ 24. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, Marty C. Pelvic Incidence: a fundamental pelvic parameter for three dimensionnal regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* 1998;7:99-103.
- ◆ 25. Graf H, Hecquet J, Duboussset J. Approche tridimensionnelle des déformations rachidiennes. *Rev Chir Orthop* 1983 ; 69 : 4074-416. ◆ 26. Guigui P, Levassor N, Rillardon L, Wodecki P, Cardinne L. Physiological value of pelvic and spinal parameters of sagittal balance: analysis of 250 healthy volunteers. *Rev Chir Orthop* 2003 ; 89 : 496-506. ◆ 27. Vaz G, Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *Eur Spine J.* 2002;11:80-87. ◆ 28. Schulte TL, Hierholzer E, Boerke A, Lerner T, Liljenqvist U, Bullmann V, Hackenberg L. Raster stereography versus radiography in the long-term follow-up of idiopathic scoliosis. *J Spinal Disord Tech.* 2008;21(1):23-28. ◆ 29. Mardjetko S, Knott P, Rollet M, Baute S, Riemenschneider M, Muncie L. Evaluating the reproducibility of the formetric 4D measurements for scoliosis. *Eur Spine J.* 2010;19:241-242. ◆ 30. Weiss HR., Seibel S. Can surface topography replace radiography in the management of patients with scoliosis? *Hard Tissue* 2013 Mar 22;2(2):19.