

Vidéogrammétrie Fondements scientifiques



Vidéo Raster Stéréographie
Technologie non irradiante
de visualisation
de l'organisation fonctionnelle
de l'appareil locomoteur

Avant-propos

La réussite d'un traitement, plus que jamais, dépend de la synergie des différents acteurs médicaux et paramédicaux, tous spécialistes dans leur domaine. Toutefois, le plus grand défi reste la maîtrise de la hiérarchisation d'une stratégie de soins.

Ce défi place précisément la visualisation par imagerie etioLAB 4D®, par sa lecture simple des grand aplombs et plus particulièrement de l'équilibre de l'appareil locomoteur, en coordonnateur interdisciplinaire permettant de maintenir ou de restaurer un terrain plus favorable aux thérapies curatives.

La déficience posturo-fonctionnelle, comme de nombreux auteurs l'ont déjà décrite, qu'elle soit conséquence ou origine, est un élément à part entière de la perte de l'équilibre de santé.

Ne pas la prendre en considération revient à tourner le dos au principe de globalité.

Zbigniew Kuliberda

Introduction

De manière générale, nous pouvons considérer que les examens médicaux se divisent en deux grandes catégories :

- l'examen organico-structurel – basé sur la clinique, l'imagerie médicale, la biologie ou nombre d'enregistrements (ECG, EMG, ...) – qui permet un diagnostic par la visualisation d'un état et son traitement symptomatique
- l'examen fonctionnel – basé sur la clinique et de nombreux tests – qui recherche les interactions d'un état et permet le traitement de déséquilibres.

Concernant l'appareil locomoteur, la symptomatologie est souvent liée à la contrainte par modification structurelle (inflammation, usure, traumatisme, ..) ou surcharge fonctionnelle (morphologique, gestuelle, psychologique, ...). Si cet état est bien connu et mesuré précisément, un aspect important de la symptomatologie est toutefois négligé car mal connu : le ou les déséquilibres du système locomoteur responsables de modifications de la répartition des charges articulaires qui, de fait, augmentent les contraintes et sont notamment à l'origine de la récurrence symptomatologique.

L'imagerie médicale segmentaire par rayons ionisants, résonnance magnétique ou ultrasons peut aujourd'hui être complétée par **une imagerie fonctionnelle**, elle globale, par modélisation à partir de capture optique donc totalement non invasive. C'est le cas des pathologies déformantes du rachis, telle la scoliose, qu'il est nécessaire de renseigner par une première image radiologique et dont le suivi peut se faire à une fréquence trimestrielle par imagerie fonctionnelle optique pendant deux ans avant d'effectuer l'exposition ionisante suivante.

«... Le suivi des patients atteint de scoliose idiopathique à l'aide d'outils d'imagerie nécessite à ce jour une exposition au rayonnement encore fréquente. Le constat d'une augmentation du risque de cancer du sein, chez la femme ayant une scoliose par examen radiographique régulier, ne fait que renforcer la voie d'un développement de moyens alternatifs ou complémentaire d'un suivi objectif qui, déjà, a été évoqué dans les années 70.

Grâce à la coopération étroite entre l'Institut de Biomécanique de l'Université de Münster et la Société Diers, la méthode de mesure de stéréo photogrammétrie a été progressivement mise au point et validée. Depuis l'introduction du système DIERS FORMETRIC 1 en 1996, en plus de l'évaluation de la méthode de mesure, de nombreux articles scientifiques ont été publiés au fil des années, ouvrant des perspectives étonnantes au niveau clinique.

Les premiers utilisateurs sont issus du domaine de l'orthopédie, mais au cours des dix-huit dernières années, le spectre d'utilisateurs s'est considérablement élargi. Il est à noter que le caractère non irradiant et la fiabilité de mesure des paramètres de posture accentuent l'intérêt grandissant pour cet outil dans d'autres domaines d'application médicale. ... » (Extrait Carsten Diers).

« ...Le diagnostic des déformations du tronc et de la colonne vertébrale, en particulier dans les cas de cyphose et de scoliose, est principalement basé sur l'apparence du dos. Hors l'examen clinique et l'indispensable examen aux rayons X, les examens de suivi nécessitant des radiographies périodiques sont particulièrement préjudiciables pour les jeunes patients. Ainsi, il existe un intérêt réel dans le développement de méthodes qui pourraient se substituer de manière fiable au suivi radiologique.

Au cours des dernières années, il a été constaté que les mesures de la surface du dos répondent en grande partie à cette exigence (Schulte et al., 2008). La condition est que celles-ci découlent directement d'une analyse mathématique de la silhouette et d'une reconstruction de la colonne vertébrale qui permette une interprétation orthopédique. De plus, d'autres aspects gagnent en importance, comme par exemple, la difficulté à déterminer la rotation vertébrale à partir d'images radiologiques du fait d'erreurs (Drerup 1985), ou l'impossibilité de l'évaluation des aspects cosmétiques, ou encore l'incapacité à fournir des images fonctionnelles (Drerup et al., 2001).

C'est pourquoi, la mesure optique de surface offre des alternatives remarquables et significatives. ... » (Extrait Prof. Dr. rer. nat. Burkhard Drerup, Dr Eberhard Hierholzer)

Depuis la découverte des principes de la perspective et de la photographie, différentes approches pour pouvoir faire des mesures sur des photographies ont été développées. Les fondements théoriques de la photogrammétrie, soit les principes de la perspective et de la géométrie descriptive, étaient déjà étudiés par Leonardo Da Vinci en 1480. Plusieurs découvertes et inventions sur la projection géométrique ont conduit à la création d'outils de travail pour le dessin en perspective et au développement des bases mathématiques régissant la géométrie descriptive. L'essor de la photographie au XIXe siècle a fourni un outil d'enregistrement "automatique" d'une scène, qui sera par la suite utilisé comme support pour le travail photogrammétrique. Les premiers systèmes mécaniques de photogrammétrie datent du début du XXe siècle. C'était le commencement de la photogrammétrie analogique. Par la suite, les principes mathématiques régissant la photogrammétrie ont été étudiés plus précisément, jusqu'au développement d'approches analytiques pour l'orientation des images. La naissance de l'ordinateur et l'évolution technologique ont amené la transformation des procédures de travail photogrammétriques mécaniques et mathématiques dans des systèmes électroniques et numériques. C'était la naissance de la photogrammétrie analytique, aux alentours des années 60.

Finalement, le développement technologique des dernières décennies, l'augmentation de la puissance des ordinateurs et le développement de la photogrammétrie analytique, ont permis le passage à la photogrammétrie numérique (Burtch, 2007). Aujourd'hui, de nombreux programmes permettent de faire des mesures à partir d'images numériques. Ces logiciels se sont simplifiés, permettant l'emploi de la photogrammétrie non seulement dans le domaine de la cartographie et de l'industrie, mais également dans l'architecture, l'archéologie, le génie civil et la criminalistique. Cette évolution a uni la photogrammétrie à la modélisation 3D : à partir du moment où la position d'un point dans l'espace est connue, il peut être représenté dans un modèle 3D numérique.

Le XXIe siècle connaîtra l'utilisation de la photogrammétrie dans le domaine médical pour l'étude anthropométrique humaine à des fins de détection, de surveillance et de prévention des pathologies de contraintes de la même manière que le sonar des sous-marins donna naissance à l'imagerie échographique.

Vidéo Raster Stéréographie

Technologie non irradiante de visualisation de l'organisation fonctionnelle de l'appareil locomoteur

Envisager une approche de l'organisation fonctionnelle de l'appareil locomoteur par l'imagerie demande un support technologique qui permette une visualisation de tout ou partie d'un sujet dans les trois plans de l'espace obtenue à partir d'un enregistrement unique. La photographie classique ne peut répondre à cette exigence puisque les images obtenues sont planes. C'est pourquoi, avec l'avènement du numérique, l'imagerie 3D fait son apparition dès les années 60.

- Hiroshi Takasaki (*Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu-shi, Japon*) publie ses travaux lors de la session d'été de l'Institut de Technologie du Massachusetts en 1970 sur l'imagerie 3D obtenue à l'aide d'un système de topographie par Moiré.
- W. Frobin, et E. Hierholzer (*Dép. Biomécanique Münster RFA*) publient leurs travaux lors d'un symposium de l'OTAN à Paris en 1978 sur l'imagerie 3D obtenue à l'aide d'une méthode stéréophotogrammétrie pour la mesure des surfaces corporelles par trame projetée.
- M. Van Poucke, P. Boone et M. Vercauteren (*University and University Hospital of Gent, Belgique*) collaborent avec l'Institut Oxford Metrics Ltd et publient leurs travaux dans SPIE Vol. 672 en 1978 sur l'imagerie 3D obtenue par éclairage structuré (ISIS).
- M. Takeda et K. Mutoh (*University of Electrocommunications Chofugaoko, Chofu, Tokyo, Japon*) publient leurs travaux dans Optical Society of America en 1983 sur l'imagerie 3D obtenue suivant un procédé profilométrique par transformée de Fourier.
- Enfin, W. Frobin, et E. Hierholzer (*Dép. Biomécanique Münster RFA*) publient leurs travaux dans American Society for Photogrammetry and Remote Sensing en 1991 sur l'imagerie 3D obtenue suivant un procédé de vidéo-raster-stéréographie.

Aussi le prérequis à l'obtention de mesures fiables et reproductibles est l'utilisation de procédés non opérateur dépendant et éprouvés tels que la photogrammétrie et l'analyse numérique en rapport avec les constantes squelettiques.

La raster stéréographie est le procédé d'acquisition optique du relief d'une surface pour lequel l'analyse de la forme du dos, la reconstruction de la géométrie squelettique et le support d'interprétation orthopédique ont été les plus développés. Les résultats, comme pour la scoliose et la cyphose par exemple, montrent une bonne correspondance avec les images radiographiques, de sorte que ces méthodes de mesure, d'analyse et d'évaluation ont été mises au cœur du système Formetric de la société DIERS.

En France, l'imagerie optique prend ses marques progressivement au sein de la médecine fonctionnelle et le marché est doté de constructeurs tels que SAM Instruments, DMS Imaging, Physical Tech et DIERS International. Bien que les acquisitions topographiques proposées reposent sur des méthodes réfléchies ou de photogrammétrie de bonne qualité, le traitement des données morphométriques est quant à lui plus que contestable selon le système utilisé. Pas de repérage anatomique automatique pour les uns, pas de calculs automatiques de paramètres morphologiques pour d'autres, nécessité de clichés radiologiques simultanés ou de mise en position spécifique du sujet pour certains, ...

DIERS International est le seul constructeur qui propose un procédé totalement automatique et qui, de plus, s'est affranchi de la contrainte oscillatoire physiologique de la position debout naturelle en développant l'unique procédé de vidéogrammétrie du marché à ce jour plaçant ainsi les propositions de ses concurrents au rang de colifichet. Si l'imagerie optique 3D a permis des observations d'excellentes qualité, la Vidéo-Raster-Stéréographie qui intègre la dimension temps ouvre l'ère de l'imagerie 4D qui, appliquée à la médecine fonctionnelle répond au critère de reproductibilité de manière non discutable, gage d'un suivi objectif de l'organisation et des thérapies fonctionnelles de l'appareil locomoteur.

Sommaire

11 - Principe de fonctionnement

12 - La raster stéréographie

14 - Le traitement d'images et la reconstruction de la topographie de surface

15 - Le rapport gaussien

15 - Le rapport convexe/concave moyen

16 - La ligne de symétrie et les points de référence

17 - La proposition de reconstruction des rapports vertébraux

19 - La visualisation par DIERS formetric III 4D

20- L'imagerie DIERS formetric III 4D

22- La pertinence orthopédique

22- 2011, Can surface topography replace radiography in the management of patients with scoliosis ? Weiss HR., Seibel S.

23- 2012, Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. Frerich JM. et al

23- 2008, Raster stereography versus radiography in the long-term follow-up of idiopathic scoliosis. Schulte TL. et al

23- 2010, Evaluation of the reproducibility of the formetric 4D measurements for scoliosis. Knott P. et al

23- 2012, Is the surface topography a helpful tool for the management of scoliosis ? Papadopoulos D.

23- 2010, Reproducibility of rasterstereography for kyphotic and lordotic angles, trunk length, and trunk inclination: a reliability study. Mohokum M, Mendoza S, Udo W et al

24- 2013, Intra- and Interday Reliability of Spine Rasterstereography. Guidetti, L., Bonavolontà, et al.

24- 2013, Rasterstereographic evaluation of interobserver and intraobserver reliability in postsurgical adolescent idiopathic scoliosis patients. Schüle, S., Mendoza, S., et al.

24- À retenir

- a. Caractéristiques des populations étudiées (page 24)
- b. Fiabilité des résultats (page 24)
- c. Reproductibilité des résultats (page 25)
- d. Morphologie des vertèbres (page 25)
- e. Respiration et position (page 26)
- f. Variation entre « Angle scoliotique » et « Angle de Cobb » (page 26)
- g. A propos de la rotation vertébrale (page 27)
- h. Entretien avec le Professeur Paolo Raimondi (page 28)
- i. Étude la plus récente. Patrick KNOTT – PhD, USA (page 29)

36 - La visualisation DIERS formetric III 4D par l'image

37 - Fiabilité

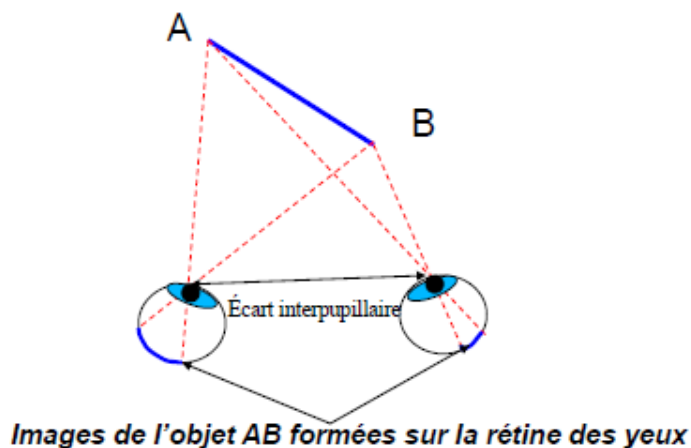
38 - Reproductibilité

40 - Visualisation DIERS formetric III 4D : moyenne posturale et dynamique posturale

44 - Conclusion

Principe de fonctionnement

La vision en relief est possible uniquement avec 2 points de vue. Pour un même objet, 2 images différentes se forment sur la rétine de chaque œil. Les points homologues, A et B, sont associés en temps réel par le cerveau qui utilise les différences, de grandeur et de direction, entre les 2 images et les interprète comme des différences d'éloignement pour créer l'impression de relief et déterminer la position exacte de l'objet AB.



Le principe de fonctionnement des appareils de mesure de photogrammétrie est la triangulation. La plupart des dispositifs de balayage utilisent également cette méthode. Cette technologie a été développée pour la modélisation et la cartographie des reliefs de la terre et s'applique avec un succès croissant à la modélisation des données anthropométriques chez l'humain.

11

L'outil performant du moment : **DIERS formetric III 4D**



CE – Conformité à directive 93/42/EEC Annexe VII
Système de mesure médical / Classe 1M

Caméra industrielle IDS

Capteurs CMOS 1,3 Mégapixels

Fréquence d'acquisition : 25 ou 50 images/sec

Equipement LED

Projecteur de Bandes

Colonne ascensionnelle sur vérin électrique

Logiciel DICAM

Ordinateur exclusivement dédié

Système d'exploitation : Windows

8 Go RAM

Carte graphique dédiée NVidia 2Go

La raster stéréographie

Le dispositif DIERS formetric III 4D permet d'obtenir une imagerie volumique (3D) grâce aux algorithmes du logiciel DICAM dont les données en entrée sont fondées sur la stéréographie qui est l'art de représenter la profondeur d'un objet sur un plan.

Le principe de fonctionnement est étonnamment simple et fait appel à la géométrie descriptive pour la reconstruction du relief tronculaire. Pour obtenir une visualisation en 3D d'un dos, il est nécessaire de disposer de 2 images de celui-ci de 2 points de vue différents.

Les travaux menés dès les années 80 ont montré qu'un dispositif simple permettait la reconstruction 3D par raster stéréographie (Frobin, Hierholzer, 1981).

Un projecteur éclaire la surface à reconstruire de bandes horizontales ce qui constitue l'**image 1**

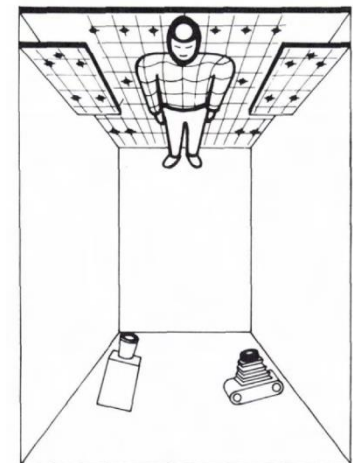
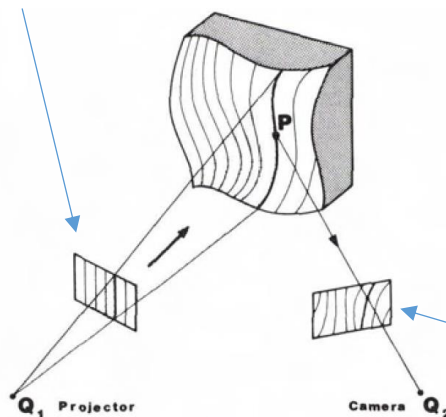
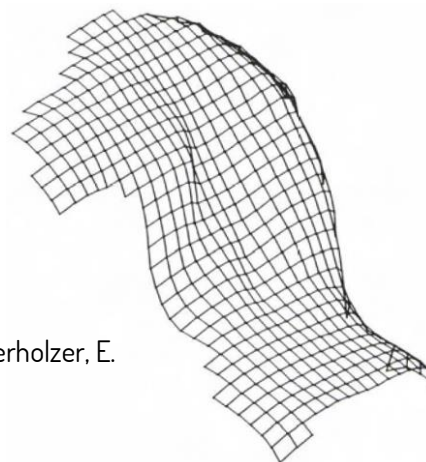


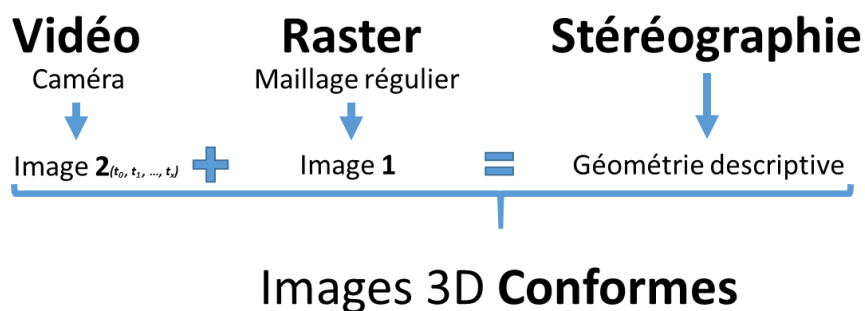
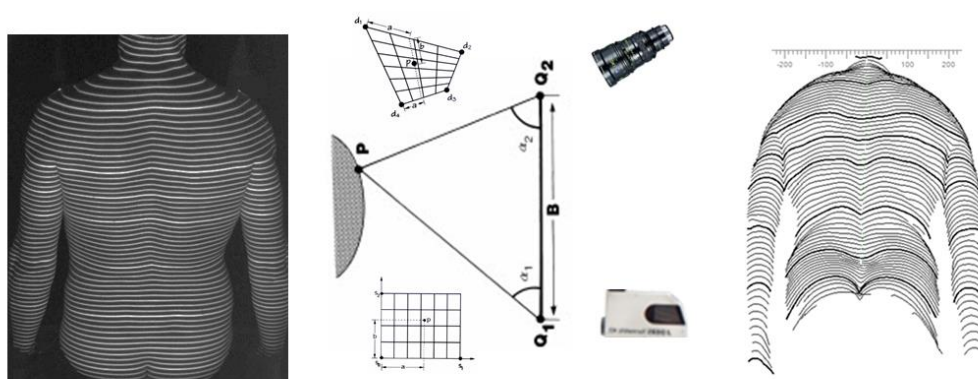
FIG. 2. Basic arrangement for rasterstereography.

Une caméra (ou un appareil photographique) placée sous un angle différent lit la déformation des bandes ce qui constitue l'**image 2**

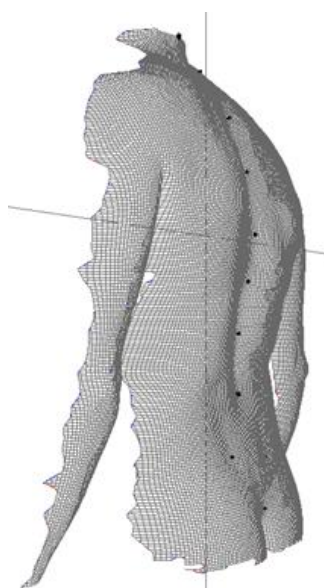


Reconstruction proposée par Frobin, W. et Hierholzer, E. Rasterstereography(1981).

Les évolutions technologiques des années suivantes ont permis le développement de la vidéo-raster-stéréographie placée au cœur du dispositif DIERS formetric III 4D et qui permet les enregistrements des oscillations physiologiques d'une personne en position debout (Frobin, W.; Hierholzer, E. Video rasterstereography 1991).



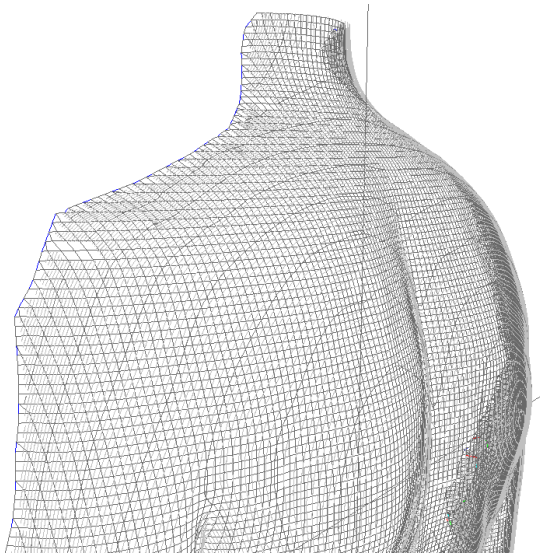
13



Reconstruction actuelle.

Le traitement d'images et la reconstruction de la topographie de surface

Les images vidéo importées dans un logiciel de photogrammétrie et de traitement de l'image permettront la reconstruction en 3 dimensions de la surface du dos utilisant plusieurs milliers de points avec une précision de l'ordre de 0,2mm. Le nombre de points est variable en fonction de la surface à reconstruire et peut atteindre plusieurs dizaines de milliers.



La reconstruction de la surface du dos est comme un modèle produit par une imprimante 3D sur lequel il est possible de mesurer des distances et des angles. Pour mesurer ces paramètres, il est nécessaire de connaître les points de repère anatomiques exacts et d'identifier les points de référence en corrélation avec les structures squelettiques.

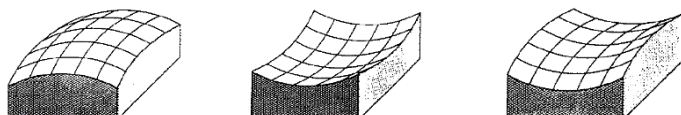
14

L'identification des repères anatomiques est possible grâce à l'utilisation de marqueurs réfléchissants positionnés manuellement sur le dos.

Le principal problème du positionnement des marqueurs, est l'erreur due à la palpation manuelle de l'opérateur. Ce caractère opérateur-dépendant rend la reproductibilité problématique.

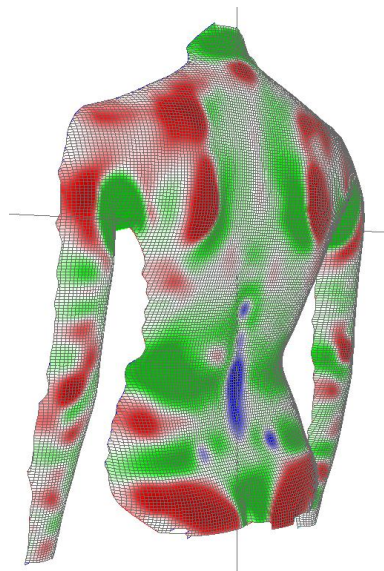
Dans le développement du DIERS formetric III 4D, les concepteurs ont pallié ce problème de positionnement manuel par l'analyse de formes caractéristiques telles que les voussures et les dépressions du dos pour identifier les repères anatomiques en utilisant les principes mathématiques de la géométrie différentielle.

Il y a trois types de courbures de base : **convexe**, **concave** et des zones en forme de **selle de cheval**.



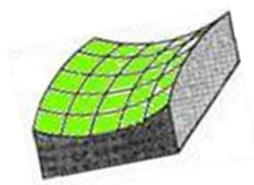
Le rapport gaussien

La figure ci-dessous montre un résultat d'analyse de formes par la géométrie différentielle.
La méthode de calcul des zones de courbure est du type gaussien.



Les points de référence anatomiques ont des courbures caractéristiques qui peuvent être identifiées et localisées sur la surface du dos. Par exemple, on voit sur l'image ci-contre une protubérance vertébrale, zone isolée en rouge (c'est-à-dire convexe) environnée de vert (c'est-à-dire en selle de cheval). C'est de cette manière qu'est établi un rapport entre la surface et le squelette. Des études ont montré que la précision de la localisation de la protubérance de C7 est voisine de 1 mm (Drerup, Hierholzer 1987, Hackenberg et al. 1999).

Zone en forme de selle de cheval.



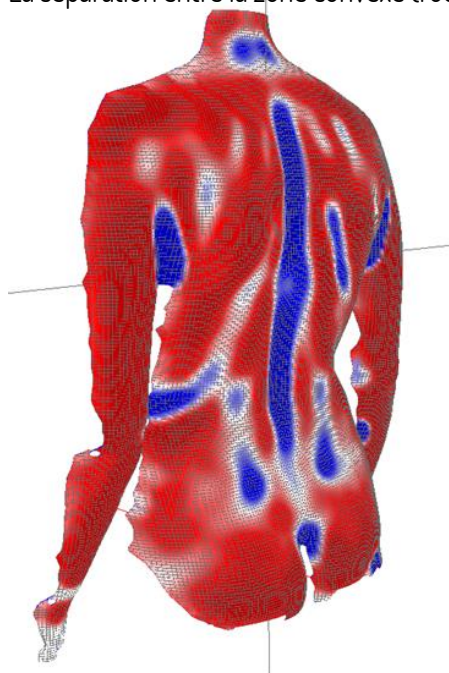
L'intensité de la couleur indique le degré de pente.

15

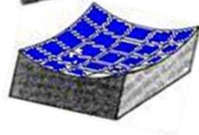
Le rapport convexe/concave moyen

Une version moins complexe de l'analyse de formes affiche seulement deux types de courbures, représentée sur la figure ci-dessous.

La séparation entre la zone convexe (rouge) et concave (bleu) est affichée dans l'intensité des couleurs.



Zone convexe



Zone concave

Les fossettes lombaires (ou fossettes de Michaelis) sont d'autres points de référence ; elles sont le plus souvent bleues, c'est-à-dire concaves et sont étroitement liées au bassin.

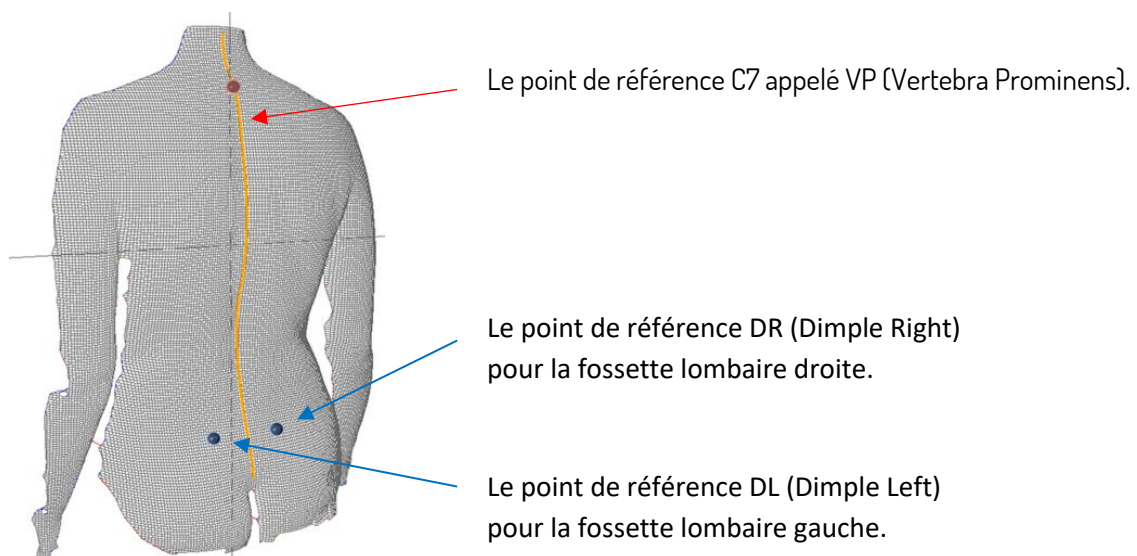
Contrairement à la protubérance en C7, les fossettes lombaires ne sont pas toujours au niveau exact des épines iliaques postéro-supérieures (EIPS). Elles sont souvent décalées latéralement et/ou vers le haut de 0,5 à 1 cm, mais suivent le mouvement du bassin avec une précision moyenne inférieure à 1 mm (Drerup, Hierholzer 1987a). Il est donc possible de déduire avec une grande précision la position du bassin dans tous les plans y compris sa torsion par la position divergente des fossettes lombaires.

La ligne de symétrie et les points de référence

Le dispositif DIERS formetric III 4D offre la possibilité d'un repérage automatique de zones de référence utilisées pour un suivi thérapeutique. La construction mathématique sans référence à un système de coordonnées extérieures est probablement l'une des clés qui différencie ce dispositif des autres. Il nécessite toutefois un respect des étapes de calcul. Aussi, le point de départ est la détermination de la ligne de symétrie. Elle est définie par une ligne formée de points qui divisent chaque niveau du plan horizontal de la surface d'un dos en une moitié droite et une moitié gauche avec un minimum d'asymétrie (Drerup, B. et Hierholzer, E. - Automatic Localization of Anatomical Landmarks 1987).

Étroitement en rapport avec la ligne des épineuses, dans le plan frontal cette ligne est verticale ou avec de très faibles écarts chez la personne ne présentant pas de déformations vertébrales. Dans le cadre de la scoliose, la ligne de symétrie suit la ligne des épineuses avec une excellente corrélation (Frerich JM, Hertzler K., Knott P. and Mardjetko S. 2012).

Pour la localisation automatique des points de référence, l'analyse mathématique tient compte des deux rapports, gaussien et convexe/concave, à proximité de la ligne de symétrie. Une proéminence sur la ligne dans sa partie supérieure, des dépressions de part et d'autre de la ligne dans sa partie inférieure.

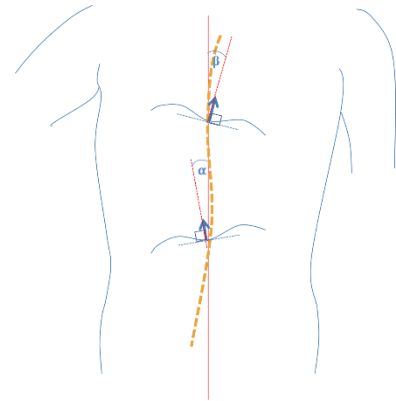


La précision de la localisation des points de référence est de l'ordre du millimètre, ce qui rend possible une comparaison directe avec d'autres procédés de mesures de topographie de surface ou des procédés tels que la tomodensitométrie, l'IRM ou les clichés radiologiques, à condition bien entendu que la position du tronc soit comparable dans les différents protocoles de mesures.

Si la ligne de symétrie a une importance particulière en tant que point de départ du calcul de reconstruction de rapports conformes à la réalité de la surface d'un dos, celle-ci intervient également dans les calculs de la rotation de surface et la reconstruction géométrique en trois dimensions de la colonne vertébrale.

Dans le plan horizontal par exemple, l'écart de la flèche perpendiculaire à l'axe de symétrie avec le plan horizontal constitue l'inclinaison vertébrale. De même, à l'intersection de la ligne de symétrie dans le plan horizontal, l'écart entre le plan sagittal et la flèche perpendiculaire de la mesure de surface constitue la rotation de surface.

Les résultats sont comparables aux mesures radiologiques.



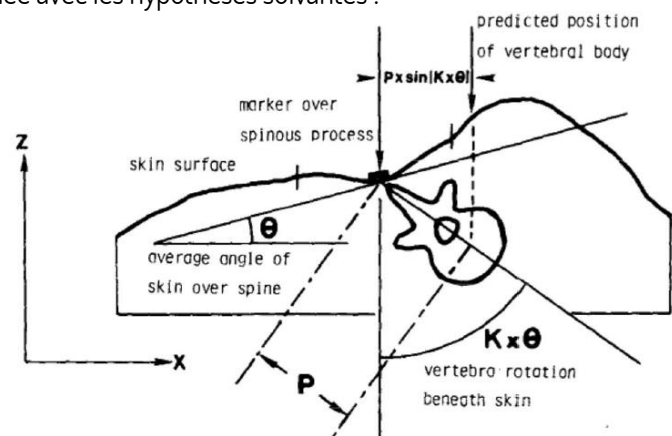
La proposition de reconstruction des rapports vertébraux

La reconstruction en trois dimensions de la colonne vertébrale est possible grâce aux études de Turner-Smith (1988) et Drerup (1993).

17

La position latérale de la ligne des corps vertébraux fut estimée avec les hypothèses suivantes :

- il y a concordance entre la rotation de surface et la rotation de la colonne vertébrale, le facteur K est très proche de 1 (Turner Smith et De Roguin 1984),
- la ligne de symétrie suit la ligne des épineuses,
- les corps vertébraux, pour l'essentiel, ne sont pas déformés par la scoliose,
- la distance P entre le milieu d'un corps vertébral et la surface de la peau est une constante anatomique connue (P varie avec le niveau où est pratiquée la mesure sur la colonne vertébrale et la taille du corps humain mesuré).



Si toutes ces conditions sont réunies alors le centre des corps vertébraux est dans l'intervalle P depuis la surface de la peau et dans le prolongement de la perpendiculaire à la rotation de surface augmentée du facteur K.

Dans leurs travaux Turner-Smith & al montrent qu'il existe une constante chez l'homme de la position du centre du corps vertébral à partir de la surface de la peau obtenue par observation "*on anatomical specimens*".
Cette constante est exprimée par:

$$P = 0,03 \times (H + 3 \times L)$$

Où

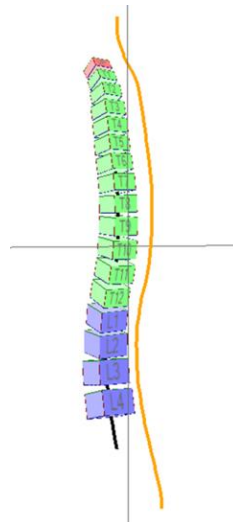
P est la profondeur entre la peau et le centre du corps vertébral

H est la hauteur de la colonne entre C7 et le milieu des EIPS

L est la distance entre C7 et le niveau de calcul de la position du centre du corps vertébral.

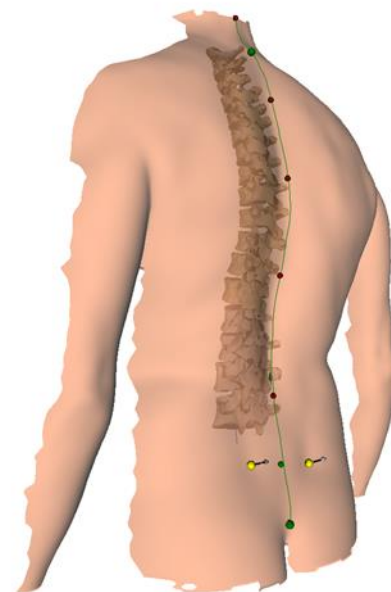
et permet de tracer la **ligne sagittale**
du centre des corps vertébraux à
chaque niveau du plan horizontal

La taille des vertèbres sera déterminée en fonction de la distance entre C7 et L4 pour une proposition de modélisation finale des volumes vertébraux et de leur positionnement dans l'espace.



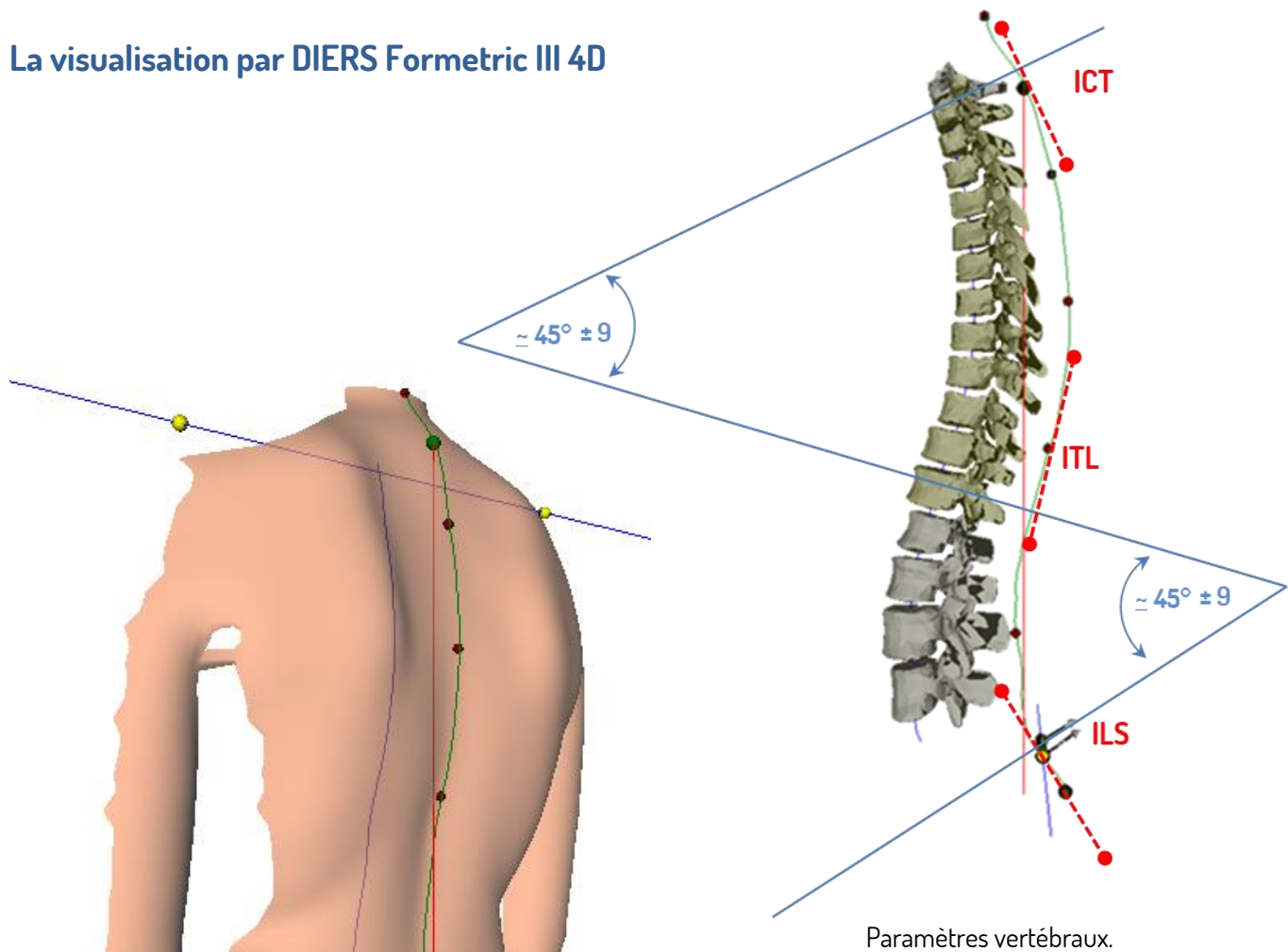
Le logiciel sélectionne les vertèbres types dans une banque de données contenant des milliers d'images de vertèbre en 3D, de radiographies et de clichés Formetric III 4D pour effectuer

une proposition de rapports conformes.

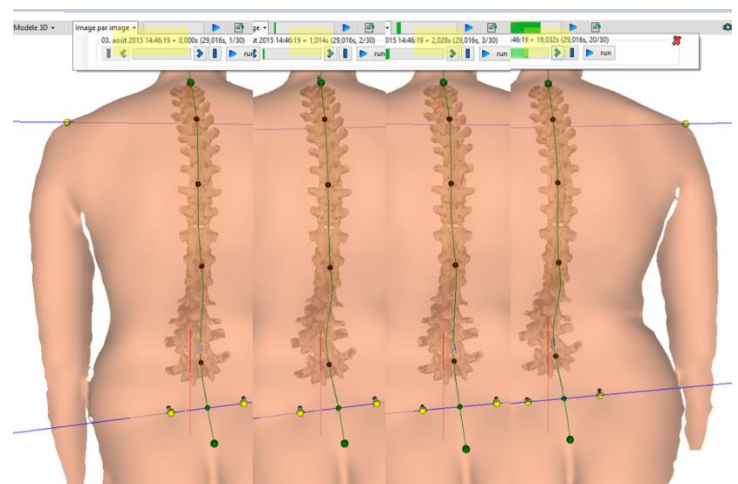
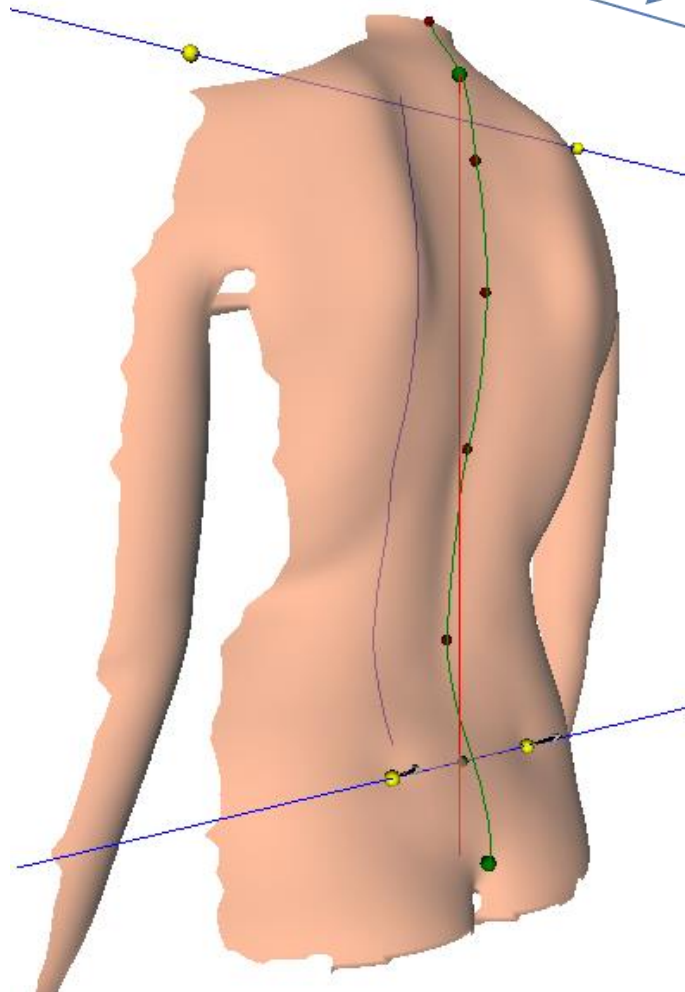


Ainsi dans le plan frontal par exemple, la reconstruction proposée du système vertébrale est directement comparable aux images radiologiques.

La visualisation par DIERS Formetric III 4D



19



L'imagerie DIERS Formetric III 4D

C'est une imagerie issue d'un procédé optique, la raster stéréographie ou photogrammétrie.

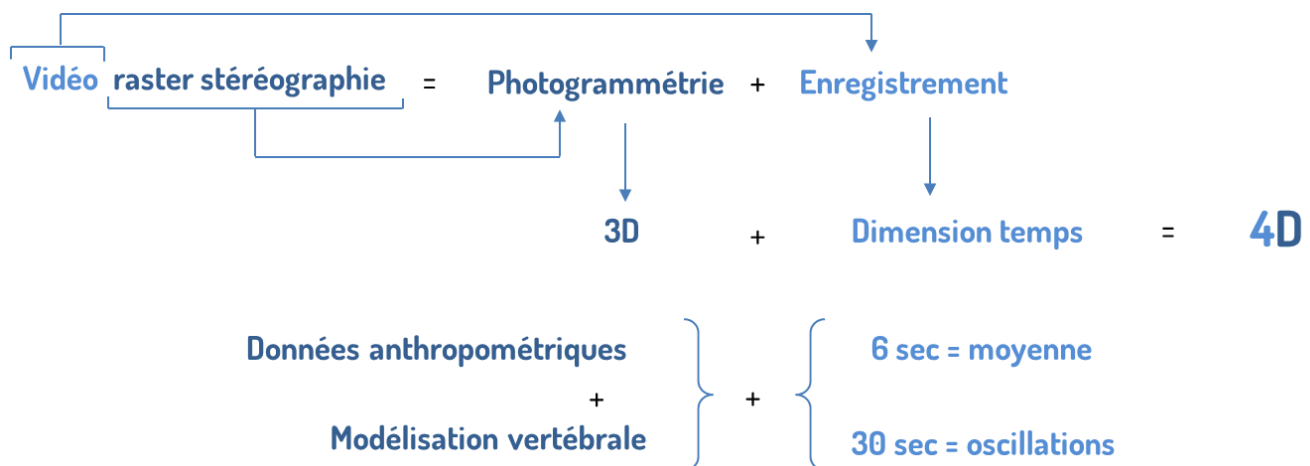
La visualisation de la colonne vertébrale se fait grâce à un modèle de vertèbre ne représentant pas la réalité vertébrale qui est obtenue uniquement par processus rayonnant, ultrasonore ou de résonance magnétique.

Son intérêt est la visualisation de l'organisation du système vertébral autour d'une pathologie et de l'évolution des déséquilibres que celle-ci est susceptible de générer. C'est donc une imagerie fonctionnelle.

Elle est appelée dynamique en raison de la capacité du procédé à calculer une moyenne positionnelle à partir d'enregistrements sur plusieurs secondes, c'est la vidéo raster stéréographie.

Compte tenu du caractère physiologiquement permanent des mouvements et oscillations qui animent tout être humain en position debout à l'arrêt, cette imagerie prend tout son sens et permet l'évaluation de paramètres posturaux plus proche de la réalité par rapport à l'imagerie radiologique qui elle ne représentera qu'une situation d'un instant très bref.

La visualisation DIERS Formetric III 4D est une imagerie complémentaire et de suivi des pathologies déformantes du rachis qui répond aux directives européennes de radioprotection et l'unique imagerie non opérateur dépendante pour les pathologies de contraintes sans atteinte structurelle (rachialgie, troubles musculo-squelettiques, migraines, ...). C'est donc un outil puissant et précieux tant dans le cadre de la détection que de la prévention.



La pertinence orthopédique

Les études comparatives Formetric vs Radiologie menées au début des années 90 à l'Institut Biomécanique de l'Université de Münster ont abouti à la commercialisation du Formetric I 3D en 1996. Les résultats étaient obtenus à partir d'une image unique, donc avec tous les biais liés à ce protocole, en particulier celui aux oscillations animant toute personne en position debout.

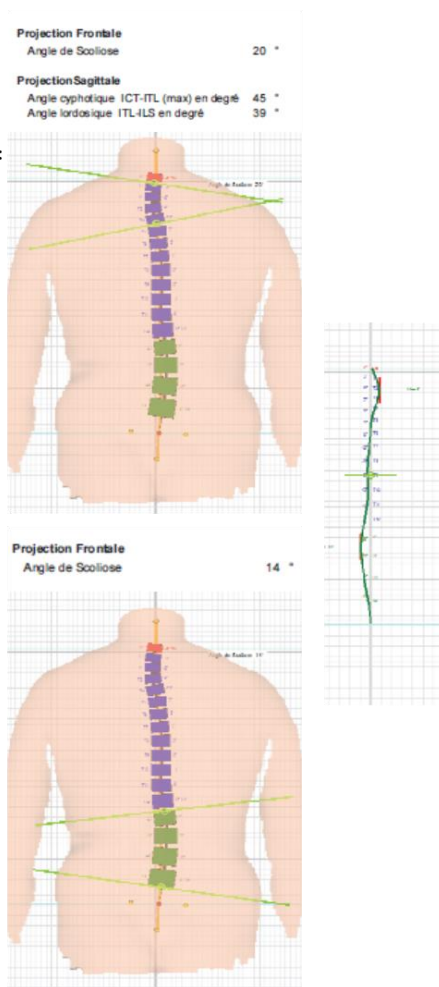
L'évolution majeure portée au système a vu le jour en 2005. Diers International dote le système d'un module « Average » qui tient compte des oscillations de la personne et calcule une moyenne posturale sur 6 secondes. Depuis 2008, de nombreux modules se sont greffés, de sorte que Formetric III 4D est devenu un outil très performant, notamment du fait de sa vitesse de capture passée à 50 images par seconde. C'est aussi pour cette raison qu'en France nous utilisons le terme d'*d'RN®*, Imagerie *Dynamique* du Rachis Numérisisé.

Aussi les résultats des études menées avant le système Average, bien que déjà pertinents, auraient été encore meilleurs. De plus aucun élément positionnel n'est précisé dans les études menées, et si l'on se réfère aux comparatifs ci-dessous, les écarts trouvés peuvent trouver leur explication.

Homme de 34 ans (clichés réalisés en aout 2015)

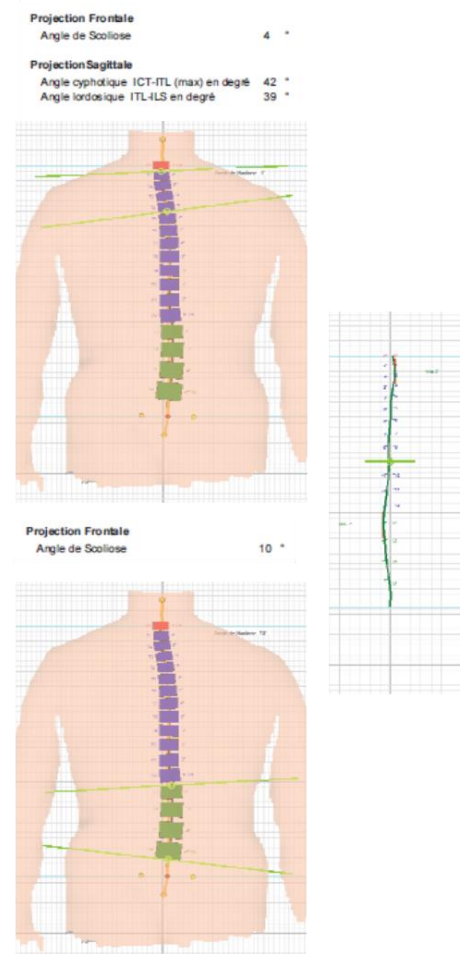
Position naturelle :

- Regard horizontal
- Sujet détendu
- Respiration naturelle



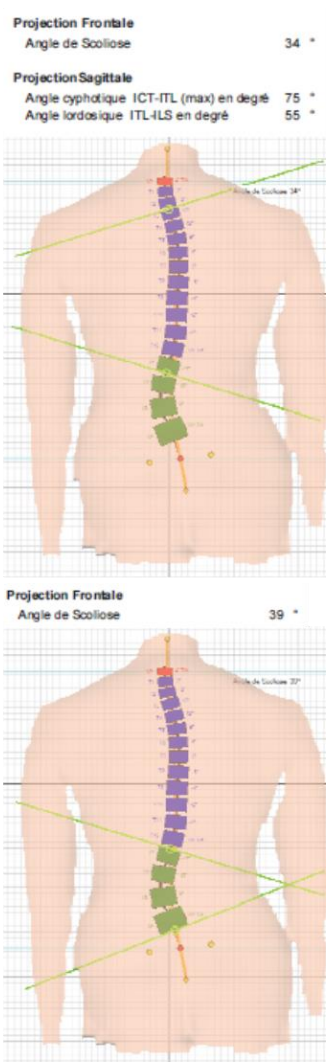
Position radiologie standard :

- Plaque thoracique
- Menton relevé
- Apnée



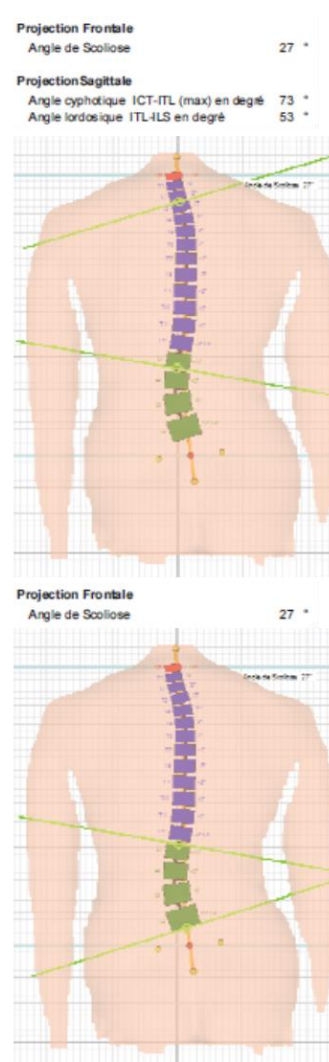
Position naturelle :

- Regard horizontal
- Sujet détendu
- Respiration naturelle



Position radiologie standard :

- Plaque thoracique
- Menton relevé
- Apnée



Femme de 23 ans (clichés réalisés en aout 2015)

En voici quelques extraits visant à évaluer sa fiabilité et sa reproductibilité par rapport à une radiographie classique. Les études ont été réalisées sur des patients présentant une scoliose idiopathique et sur des patients sains.

1. 2011, Can surface topography replace radiography in the management of patients with scoliosis ? Weiss HR., Seibel S. (Orthopedic Rehabilitation Services, Gensingen, Germany)

Conclusion des auteurs :

« L'appareil Formetric 4D semble être un outil intéressant, en particulier pour le suivi d'un patient et la comparaison de différents clichés. Néanmoins, elle ne peut remplacer la radiographie, en particulier dans la mesure où l'appareil crée une image virtuelle de la colonne vertébrale et ne montre donc pas la morphologie osseuse des vertèbres... »

2. 2012, Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. Frerich JM. et al (Rosalind Franklin University of Medicine and Science – Chicago Medical School – Illinois Bone and Joint Institute, USA)

Cette étude se compose de deux études séparées

Conclusion générale de l'article

Les auteurs concluent donc que l'appareil Formetric 4D peut être utilisé de façon fiable dans le suivi des patients atteints de SIA (Scoliose Idiopathique de l'Adolescent)

Cet appareil ne peut pas remplacer complètement la radiographie dans la mesure où il ne permet pas de montrer la morphologie des vertèbres. Néanmoins, l'appareil Formetric 4D devrait remplacer la radiographie dans le cadre de la surveillance des scolioses afin de réduire l'exposition des patients à des radiations ionisantes.

3. 2008, Raster stereography versus radiography in the long-term follow-up of idiopathic scoliosis. Schulte TL. et al (Department of Orthopedics, Münster University Hospital, Germany).

Conclusion des auteurs :

Les mesures des déviations latérales et des rotations de la colonne illustrent la progression de la scoliose montrée par les radiographies. Néanmoins, ces données ne sont pas complètement comparables à l'angle de Cobb.

Les auteurs de l'article recommandent un test avec l'appareil Formetric 4D tous les 3 à 6 mois et un examen radiographique tous les 12 à 18 mois, dans la mesure où le cliché Formetric 4D ne montre pas une rapide évolution de la scoliose. Ainsi on réduit l'exposition aux rayons X des patients.

4. 2010, Evaluation of the reproducibility of the formetric 4D measurements for scoliosis. Knott P. et al (Rosalind Franklin University of Medicine and Science – Chicago Medical School, USA).

Conclusion des auteurs :

L'étude montre que l'appareil Formetric 4D réalise des mesures très fiables et reproductibles d'un examen sur l'autre.

5. 2012, Is the surface topography a helpful tool for the management of scoliosis ? Papadopoulos D. (SPONDYLOS Laser Spine Lab , Athens, Greece).

Conclusion des auteurs :

L'appareil Formetric 4D est un outil précieux pour le diagnostic et le suivi de déformations tridimensionnelles de la colonne vertébrale. La justesse de la mesure de l'angle de Cobb est, d'après les auteurs, excellente, pour les angulations supérieures à 20°.

6. 2010, Reproducibility of rasterstereography for kyphotic and lordotic angles, trunk length, and trunk inclination: a reliability study. Mohokum M, Mendoza S, Udo W, Sitter H, Paletta JR, Skwara A. (Department of Physical Therapy, University Hospital Marburg, Germany).

Conclusion des auteurs :

Cette étude montre une bonne fiabilité de l'appareil en ce qui concerne la reproductibilité inter opérateurs, ou d'un cliché sur l'autre sur un même patient. Le poids du patient n'influence pas la reproductibilité.

7. **2013, Intra- and Interday Reliability of Spine Rasterstereography.** Guidetti, L., Bonavolontà, et al. (Department of Movement, Human and Health Sciences, University of Rome -²Department of Sports Science, Exercise and Health, Trás-os-Montes e Alto Douro University, Vila Real, Portugal).

Conclusion des auteurs :

L'étude montre une bonne, voire très bonne, reproductibilité de l'appareil Formetric 4D, fiabilité variant en fonction du type de paramètres étudiés. L'étude valide donc certains aspects de cet appareil qui pourrait potentiellement remplacer les rayons X dans le cadre du suivi de patients souffrants de déformation spinale, et donc aider à réduire le taux d'irradiation.

8. **2013, Rasterstereographic evaluation of interobserver and intraobserver reliability in postsurgical adolescent idiopathic scoliosis patients.** Schüle, S., Mendoza, S., et al. (Geriatrics Centre Erlangen, Germany).

Conclusion des auteurs :

L'étude confirme que la reproductibilité entre les opérateurs est excellente. Les auteurs en concluent que cet appareil peut être utilisé de façon fiable dans le cadre de l'analyse posturale d'adolescents présentant une scoliose idiopathique.

À retenir

Caractéristiques des populations étudiées

Au total, 856 patients ont participé aux 8 études retenues. Ces études étaient composées de groupe allant 12 à 616 patients. Au total, on compte 567 femmes, 210 hommes, et 79 patients dont le sexe n'était pas indiqué. On compte 110 patients sains et 746 patients diagnostiqués avec une scoliose idiopathique.

Parmi les articles, 3 se sont penchés sur la fiabilité des clichés en les comparant à des radiographies classiques, 4 se sont penchés sur la reproductibilité des clichés (d'un examinateur à l'autre et dans le temps), et 1 a réalisé les deux études à la fois.

Fiabilité des résultats

Dans le cadre de l'évaluation de la fiabilité de l'appareil en comparaison avec une radiographie, les auteurs des articles Raster stereography versus radiography in the long-term follow-up of idiopathic scoliosis et Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis utilisent l'indice de corrélation.

Cet indice permet d'évaluer le lien entre deux variables. Cette corrélation peut être positive et atteindre +1 (on aura une évolution très similaire des deux variables étudiées) ou négative et atteindre -1 (on aura deux variables évoluant en sens inverse). Cet indice peut également être nul et signifie qu'il n'y a pas de lien entre les deux valeurs. Dans les études citées ci-dessus, un indice de corrélation fort (proche de +1), voudra dire que les valeurs trouvées en radiographie et les valeurs trouvées avec le Formetric 4D sont très similaires. Ainsi l'étude Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis trouve un indice de corrélation allant de 0.758 à 0.872. L'étude Raster stereography versus radiography in the long-term follow-up of idiopathic scoliosis trouve un indice de corrélation allant de 0.6 à 0.8.

Ainsi on peut en conclure que les valeurs trouvées en radiographie et celles trouvées avec le Formetric 4D sont très proches.

Reproductibilité des résultats

Dans les études Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis, Reproducibility of rasterstereography for kyphotic and lordotic angles, trunk length, and trunk inclination: a reliability study et Intra- and Interday Reliability of Spine Rasterstereography, les auteurs utilisent le coefficient de Cronbach α . Il s'agit d'un indice statistique, variant entre 0 et 1, qui permet d'évaluer la cohérence interne d'un instrument d'évaluation.

Deux auteurs définissent les intervalles suivants dans le cadre de l'interprétation de ce coefficient : $\alpha > 0.9$: cohérence interne excellente, > 0.8 : bonne cohérence interne, > 0.7 : cohérence interne acceptable, > 0.6 : cohérence questionable, > 0.5 : cohérence faible. (D'après D. George et P. Mallery)

Les études utilisant ce coefficient pour évaluer la fiabilité et la reproductibilité de l'appareil trouvent un coefficient de Cronbach allant de 0.731 au plus bas à 0.996 au plus haut.

La cohérence interne est d'après les auteurs D. George et P. Mallery entre acceptable et excellente.

L'étude Rasterstereographic evaluation of interobserver and intraobserver reliability in postsurgical adolescent idiopathic scoliosis patients utilise l'indice de corrélation, et trouve un indice allant de 0.697 à 0.994 lors de la comparaison entre les trois premiers clichés réalisés.

L'étude Rasterstereographic evaluation of interobserver and intraobserver reliability in postsurgical adolescent idiopathic scoliosis patients, utilise le coefficient de corrélation interclasse. Il s'agit d'une valeur qui tend à évaluer à quel point différents éléments d'un groupe se ressemblent. Ainsi, dans cette étude, il s'agit d'évaluer si les différents clichés réalisés sont similaires entre eux. Cette corrélation peut être positive et atteindre +1 (on aura une évolution très similaire des deux variables étudiées) ou négative et atteindre -1 (on aura deux variables évoluant en sens inverse). Dans l'étude, la corrélation va de 0.918 au plus bas, à 0.988 au plus haut.

Ainsi, on peut en conclure, au vu des articles, que les clichés de l'appareil Formetric 4D sont très reproductibles d'un test à l'autre, et d'un opérateur à l'autre.

Morphologie des vertèbres

L'étude de Weiss HR et Seibel S. (Can surface topography replace radiography in the management of patients with scoliosis? reproche au Formetric 4D de ne pas permettre une visualisation de la morphologie des vertèbres. De ce fait elle ne peut remplacer la radiographie dans le suivi des scolioses.

En effet, le logiciel crée une image virtuelle de la colonne vertébrale du patient en y apposant des vertèbres types.

Ainsi, le Formetric 4D ne peut, en aucun cas, remplacer la radiographie, puisqu'il ne montre pas la morphologie des vertèbres.

C'est pourquoi les auteurs de l'étude « Raster stereography versus radiography in the long-term follow-up of idiopathic scoliosis » recommandent un test avec le Formetric 4D tous les 3 à 6 mois et un examen radiographique tous les 12 à 18 mois, dans la mesure où le cliché Formetric 4D ne montre pas une rapide évolution de la scoliose. Ainsi, on diminue l'exposition des patients aux radiations ionisantes et donc le risque de complications dues à celle-ci.

Respiration et position

Il semble que les mouvements induits par la respiration du patient modifie les résultats, et que les clichés soient plus justes lorsque réalisés en expiration. Le positionnement du patient influencerait également ce résultat, selon que celui-ci est en position détendue ou en auto-grandissement.

Néanmoins, les auteurs des études utilisent le protocole décrit par le constructeur, à savoir « stand in their normal, comfortable posture ». Ainsi le patient doit respirer normalement et se tenir dans une position détendue et confortable et non pas se grandir ou expirer.

Cette « position naturelle et confortable » est différente d'un patient à l'autre, mais elle est, en revanche, toujours la même pour un patient donné.

Variation entre « Angle scoliotique » et « Angle de Cobb »

L'article Comparison of Radiographic and Surface Topography Measurements in Adolescents with Idiopathic Scoliosis parle d'une sous-estimation de la mesure des angles de lordose lombaire en moyenne de 8.12° et d'une surestimation des angles de cyphose thoracique de 7.26° lorsque l'on compare le Formetric 4D aux radiographies.

Néanmoins, il n'est pas nécessaire que les mesures du Formetric 4D et de la radiographie soient exactement les mêmes, dans la mesure où les clichés Formetric 4D sont principalement voués à montrer une évolution lors d'un second cliché.

De plus, la position de d'examen n'est pas la même, puisque lors de l'imagerie etioLAB 4D, le patient est en position normale et détendue, tandis que lors d'une radiographie, celui-ci a la poitrine contre la plaque de radiographie, le menton relevé et se trouve en apnée.
Ainsi, il paraît naturel que les résultats diffèrent de quelques degrés.

26

Conclusion sur la fiabilité et la reproductibilité de l'appareil

Les différentes études mettent en évidence la fiabilité et la reproductibilité des clichés.

En effet, le Formetric 4D permet d'obtenir des mesures précises en millimètres et degrés, comparables à celles obtenues en radiographie, bien que le protocole de réalisation diffère. De plus, les clichés réalisés sont sensiblement les mêmes, quel que soit l'opérateur qui réalise l'examen. Enfin, les clichés sont très similaires d'un cliché à l'autre.

Le seul article qui en vient à une conclusion partiellement négative au sujet du Formetric 4D est l'article des auteurs Weiss HR et Seibel S. (Can surface topography replace radiography in the management of patients with scoliosis ?). Bien qu'ils en concluent que l'appareil Formetric 4D ne peut pas remplacer la radiographie classique, ils reconnaissent qu'il s'agit d'un outil utile.

Enfin, dans la mesure où l'examen est indépendant de l'opérateur et qu'il n'impose pas de position d'examen, il s'agit d'un examen qui permet un vrai suivi de la posture du patient dans le temps.

A propos de la rotation vertébrale

Vertebral rotation in adolescent idiopathic scoliosis calculated by radiograph and back surface analysis-based methods:

Correlation between the Raimondi method and raster stereography

Massimiliano Mangone • Paolo Raimondi • Marco Paoloni • Sabina Pellanera • Alessandra Di Michele • Sara Di Renzo • Mariangela Vanadia • Mauro Dimaggio • Massimiliano Murgia • Valter Santilli

Received: 16 April 2012 / Revised: 7 September 2012 / Accepted: 28 October 2012

Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Abstract

Purpose The aim of the present research is to evaluate the relationship between an X-ray-based method (i.e. the Raimondi method) and raster stereography in the evaluation of vertebral rotation (VR) in a sample of adolescent idiopathic scoliosis (AIS) patients.

Methods

A total of 25 patients (9 males; mean age 14 ± 3 years; mean height 160.7 ± 11.9 cm; mean weight 52.4 ± 10.7 kg) were considered for the present analysis. The mean Cobb angle was $30^\circ \pm 9^\circ$. The evaluation of VR on radiographs was made using the Raimondi method regolo (Marrapese Editore—Demi S.r.l., Rome). Raster stereography was performed by means of Formetric 4D (Diers International GmbH, Schlangenbad, Germany).

Correlations between raster stereographic and radiographic measurement of VR were calculated, both for the whole sample and for thoracic and lumbar spinal segments considered separately, as well as for subgroups of patients with a Cobb angle $\leq 30^\circ$ and $> 30^\circ$ using Spearman's correlation coefficient by rank (r_s).

Results

When applied to the entire spine, measurement of VR by means of the two methods highlighted a significant correlation in the whole group ($r = 0.52$; $p < 0.0001$), as well as in the $\leq 30^\circ$ Cobb ($r = 0.47$; $p = 0.0001$) and $> 30^\circ$ Cobb ($r = 0.42$; $p < 0.0001$) subgroups. A significant correlation was found also when lumbar and thoracic VR were considered as separated groups ($r = 0.30$, $p = 0.024$ and $r = 0.47$, $p = 0.002$, respectively).

Conclusions

Raster stereographic evaluation of VR shows a good correlation with the Raimondi method, thereby confirming the possibility to use this non-invasive method for deformity assessment in AIS patients.

Entretien avec le Professeur Paolo Raimondi. A. Di Michele.

« Quelle est la difficulté de mesurer la rotation vertébrale avec précision ?

...Au cours de diverses expériences menées conjointement avec d'autres opérateurs dans ce domaine, j'ai rarement observé des valeurs sans ambiguïté. J'ai toujours remarqué des différences de 1, 2, 5° (parfois même plus) entre un opérateur et un autre. Cependant, je crois que la différence de 2 ou 3° n'est pas pertinente dans la mesure d'une rotation. ... Le fait, qu'à l'échelle internationale, la méthode Raimondi soit confirmée, discutée, utilisée et critiquée, tout en étant également utilisé en tant que référence pour valider d'autres méthodes est un bon signe de la « fiabilité ». ... j'ai rencontré Perdrille à une conférence il y a de nombreuses années. Il m'a félicité pour l'ingénieux procédé. Ce fut la meilleure critique que je citerais, parce que Perdrille est un maître. En général, la critique est positive, mais il ne faut pas nier le fait que la plupart des opérateurs qui critiquent la méthode, l'utilisent de façon incorrecte ou ne savent pas comment l'utiliser (ce qui bien sûr génère beaucoup d'erreurs). ...

Que pensez-vous des différentes études d'analyse en trois dimensions et du Formetric ?

Je n'ai pas vraiment une opinion tout à fait positive sur l'analyse 3D en général.

De nombreuses études sont faites superficiellement. Certains chercheurs se sont penchés sur l'analyse 3D pour la reconstruction de la colonne à partir de 2 radiographies, latéro-latérales et postéro-antérieures, pour l'identification exacte des marqueurs anatomiques selon divers protocoles, alors qu'une radiographie du plan horizontal de la colonne vertébrale manque, d'autres suggèrent de remplacer les rayons X par l'analyse 3D, ce qui est impossible en raison des déformations vertébrales, des rotations et des valeurs de latéro-flexion qui ne peuvent être évaluées avec suffisamment de précision. ...

Je pense que pour l'analyse de la colonne vertébrale, la technique Formetric, contrairement à d'autres techniques, n'est pas destinée à remplacer la radiographie mais, qu'en plus des nombreux paramètres fondamentaux qu'elle est capable de 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 opératoire 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 Formetric (non pas la spinographie, comme certains l'écrivent) dans ces cas est indispensable pour le médecin comme complément à son évaluation en tant que spécialiste ... Il peut être un complément pour le physiothérapeute (avec d'autres analyses instrumentales) pour évaluer la réadaptation des sujets présentant des altérations de la colonne vertébrale de différents niveaux ... il peut être utile au médecin du sport en évaluation posturale et/ou morphologique ... il peut être utile à tout expert du corps humain. ... Par conséquent, compte tenu des possibilités qu'un tel instrument offre, je ne peux, sur la base de mes modestes compétences, que confirmer une opinion très favorable sur la véracité des mesures vertébrales, la détection de divers niveaux de courbes et leur corrélation avec la rotation vertébrale ...

Dans tout mon travail sur la rotation vertébrale, j'ai toujours dit que toutes les méthodes de mesure vertébrale, y compris la mienne, sont inexactes. Je vais ajouter que peut-être avec les futures techniques de réalité virtuelle il sera possible de déterminer la rotation vertébrale avec un minimum d'erreur. Dans les premiers jours de la technologie d'imagerie intégrée, j'ai eu divers doutes. Finalement, avec les techniques de raster stéréographie, mes doutes se sont estompés. Actuellement, je pense que le Formetric peut être considéré comme "Homo sapiens" dans l'évolution de la détection morphologique, et que dans son évolution future inévitable, il pourrait être considéré comme un « homo sapiens sapiens » de la détection des technologies de mesure anthropométrique humaine ... »

Extraits d'une conversation enregistrée en Octobre 2010. A. Di Michele

Étude la plus récente. Patrick Knott PhD, USA.

Spine Deformity

www.spine-deformity.org



Spine Deformity 4 (2016) 98–103

Multicenter Comparison of 3D Spinal Measurements Using Surface Topography With Those From Conventional Radiography

Patrick Knott, PhD, PA-C^{a,*}, Peter Sturm, MD^b, Baron Lonner, MD^c, Patrick Cahill, MD^{d,1}, Marcel Betsch, MD^{e,2}, Richard McCarthy, MD^f, Michael Kelly, MD^g, Lawrence Lenke, MD^{h,3}, Randal Betz, MD^{i,1}

^aRosalind Franklin University of Medicine and Science, 3333 Green Bay Rd, North Chicago, IL 60064, USA

^bCincinnati Children's Hospital, 3333 Burnet Ave, Cincinnati, OH 45229, USA

^cScoliosis Associates, 820 2nd Ave, New York, NY 10017, USA

^dChildren's Hospital of Philadelphia, Wood Center, Second Floor, 34th and Civic Center Blvd, Philadelphia, PA 19104, USA

^eUniversity of Aachen, Pauwelsstraße 30, Aachen, D-52074, Germany

^fArkansas Children's Hospital, 1 Children's Way, Little Rock, AR 72202, USA

^gWashington University Medical Center, 4901 Forest Park Ave, St. Louis, MO 63108, USA

^hColumbia University Medical Center, Allen Hospital, 5141 Broadway, 3 Field West – 029, New York, NY 10034, USA

ⁱInstitute for Spine and Scoliosis, 3100 Princeton Pike, Lawrenceville, NJ 08648, USA

Received 7 April 2015; revised 7 August 2015; accepted 30 August 2015

Abstract

Introduction: In pediatric spinal deformity the gold standard for curve surveillance remains standing full-column radiographs, but repeated exposure to ionizing radiation motivates us to look for nonradiographic solutions. This study tests a modern system of surface topography (ST) to determine whether it is reliable and reproducible.

Methods: Patients from 6 pediatric spinal deformity clinics were recruited for enrollment. Inclusion criteria were age 8–18; diagnosis of scoliosis measuring ≥ 10 and < 50 degrees or increased kyphosis of ≥ 45 degrees. Standing radiographs and ST scans (DIERS Formetric, DIERS Medical Systems, Chicago, IL) were obtained on all patients and then measured and compared. A single investigator using a validated electronic measurement tool performed all radiographic measurements. Analysis of reproducibility and comparison of ST and radiographs were done.

Author disclosures: PK (grants from DIERS Medical Systems, outside the submitted work), PS (grants from DIERS Medical Systems, outside the submitted work), BL (reports grants from DIERS Medical Systems, personal fees from DePuy Synthes, personal fees from K2M, personal fees from Spine Search, personal fees from Paradigm Spine, grants from Setting Scoliosis Straight Foundation, grants from AO Spine, grants from John and Marcella Fox Fund, grants from OREF, other from *SRS Spine Deformity Journal*, outside the submitted work), PC (reports grants from DIERS Medical Systems, personal fees from DePuy Synthes Spine, personal fees from Ellipse Technologies, personal fees from Globus Medical, personal fees from Medtronic, outside the submitted work), MB (grants from DIERS Medical Systems, outside the submitted work), RM (grants from DIERS Medical Systems, outside the submitted work), MK (grants from DIERS Medical Systems, outside the submitted work), LL (grants from DePuy Synthes Spine, grants from DIERS Medical Systems, outside the submitted work; a patent 6,533,787 with royalties paid, a patent 6,830,571 with royalties paid, a patent 7,655,008 with royalties paid, a patent 7,670,358 with royalties paid, a patent 7,776,072 with royalties paid, a patent 8,727,972 with royalties paid, and a patent 8,361,121 with royalties paid; consultancy fees from DePuy Synthes Spine, K2M, Medtronic; travel reimbursement, “speakers bureaus,” included in contracts; royalties from

Medtronic, Quality Medical Publishing), RB (grants from DIERS Medical Systems, other from Advanced Vertebral Solutions, grants and personal fees from DePuy Synthes Spine, personal fees from Medtronic, other from Mimedx, other from Orthobond, personal fees and other from Abyrx, personal fees and other from SpineGuard, other from Medovex, personal fees from Zimmer, outside the submitted work).

This research project was approved by the IRB committee at Rosalind Franklin University of Medicine and Science, and then subsequently approved by cooperative agreement at each of the participating medical centers.

*Corresponding author. Rosalind Franklin University of Medicine and Science, 3333 Green Bay Road, North Chicago, IL 60064, USA. Tel.: (847) 578-8689; fax: (847) 578-8690.

E-mail address: Patrick.Knott@RosalindFranklin.edu (P. Knott).

¹ Formerly at Shriners Hospital for Children, 3551 N Broad St, Philadelphia, PA 19140, USA.

² Formerly at Heinrich Heine University Hospital, Moorenstraße 5, Düsseldorf, 40225, Germany.

³ Formerly at Washington University Medical Center, 4901 Forest Park Ave, St. Louis, MO 63108, USA.

2212-134X/\$ - see front matter © 2016 Scoliosis Research Society.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jspd.2015.08.008>

Results: A total of 193 patients were enrolled (148 F [77%]). The mean age was 13.25 years (range 8–18). The scoliosis magnitude was as follows: thoracic average 22.7 ± 10 degrees; lumbar average 19.6 ± 9 degrees. The kyphosis magnitude was 54.0 ± 11 degrees. The reproducibility for each ST parameter for 3 repeated scans was strong (interclass correlation = 0.855–0.944). Comparison to radiographic measurements was strong in the thoracic ($r = 0.7$) and moderate in the lumbar curve ($r = 0.5$). There was an average difference of 5.8 degrees in the thoracic spine and 8.8 degrees in the lumbar spine between ST Cobb angle estimates and radiographs. Thoracic kyphosis also had a strong correlation ($r = 0.8$) with radiographs.

Conclusions: Although the results are intended to measure similar aspects of deformity as the traditional Cobb angle, the measurement is not intended to be an exact estimation. The utility of ST is in the reproducible quantification of deformity after the initial radiograph has been taken. This has the potential to make longitudinal assessment of change in deformity without serial radiographs.

© 2016 Scoliosis Research Society.

Keywords: Surface topography; Scoliosis; Reproducibility; Reliability; Curve surveillance

Introduction

Adolescent idiopathic scoliosis (AIS) is a structural spinal deformity in the coronal plane that affects 1%–3% of children in the United States [1]. When the deformity is minor, less than 20° , treatment for this condition typically includes observation and surveillance to assess for curve progression [2]. Bracing and surgery are the treatments indicated for larger curves, though management in these patients also includes radiographic surveillance for evidence of a change in the deformity. The gold standard for diagnosis and subsequent curve surveillance remains standing full-column radiographs of the spine [3].

Radiographic images allows for assessment of the magnitude of the deformity in both the coronal and sagittal planes, and quantifying the spinal curvatures by deriving Cobb angle measurements. The disadvantage of radiographs, however, particularly in young patients, is that repeated exposure to ionizing radiation causes a significant increase in the risk of malignancies later in life [4,5]. The relative risk of breast cancer, for example, is nearly four times greater in these patients [6]. Nash et al. reported in 1979 that the average teenage girl with scoliosis received 22 radiographs over 3 years of surveillance for AIS [7]. The frequency of radiographs has undoubtedly gone down since then, but there are no current studies measuring how many radiographs the average patient receives. The radiation dose for standard x-rays has also improved significantly over the years [8], but nonradiographic methods to image the spine and predict spinal deformity are still needed. Although no patient can avoid radiographs completely, there should be an effort to reduce radiation exposure whenever possible.

Surface topography (ST) has been used as an alternative to plain radiographs, beginning with the use of the inclinometer to measure the rotational deformity associated with scoliosis [9]. Many systems using surface topography have since been developed [10–25], but there has not yet been a system that has gained widespread acceptance, as prior research on ST has shown it to be inconsistent as a method of measuring spinal deformity [18]. The goal of this study was to test a modern system of surface topography

measurement and to determine whether it was reliable and reproducible across multiple users. The correlation between ST-estimated curvature measurements and radiographic Cobb angles were compared to determine the suitability of ST as a replacement for some radiographs during AIS surveillance.

Methods

Patients treated for juvenile idiopathic scoliosis (JIS) or AIS from six North American institutions and one German institution were prospectively enrolled. Inclusion criteria for the analysis of the coronal plane deformity (CD) patients were as follows: age between 8 and 18 years with JIS or AIS measuring $\geq 10^\circ$ and $< 50^\circ$. A second cohort of patients whose primary deformity was kyphotic (KD) were studied. Inclusion criteria for this group were defined as a sagittal Cobb angle measuring $\geq 45^\circ$.

Standing posteroanterior and lateral radiographs were obtained at each visit. There were no additional radiographs taken for the purpose of this research study. Surface topography measurements were obtained using an ST scanner (DIERS Formetric, Diers Medical Systems, Chicago, IL) during the same visit (Fig. 1). The ST scan was taken three times for each patient within a 5-minute period so that repeated scans could be analyzed for reproducibility. To obtain the scan, the patient stands in an upright position at a distance of 2 meters in front of the ST scanner. The scanner projects lines of white light (raster lines) onto the back of standing patients. A digital image of this is obtained by the computer, and surface asymmetry is assessed using computer algorithms. The ST device measures patients over a 6-second interval, taking 2 pictures per second. The 12 images acquired are evaluated and averaged by the machine's software, correcting for any subject movement during the data acquisition period. In the case of obese patients, external markers are placed over the posterior-superior iliac spine, and these markers serve as reference points for the computer algorithm as it determines surface topography. A three-dimensional (3D) image of the spine is created from surface topography results (Fig. 2). Recent literature has shown that the accuracy of the mathematical



Fig. 1. DIERs Formetric system, and resulting 3D spinal reconstruction.

models that correlate topography with internal 3D spinal shape has been improving with the use of more powerful computers and more sophisticated formulas [25,26].

Demographic data collected included gender and age. Radiographic data collected included main thoracic and thoracolumbar/lumbar maximal Cobb angle values. Coronal

alignment was measured by the C7 plumb line and the midsacral line and was expressed in degrees. Sagittal alignment was measured similarly, using C7 and the posterior S1 endplate, and expressed in degrees. Pelvic obliquity, thoracic kyphosis, and lumbar lordosis were measured as well using standard techniques. A single investigator,

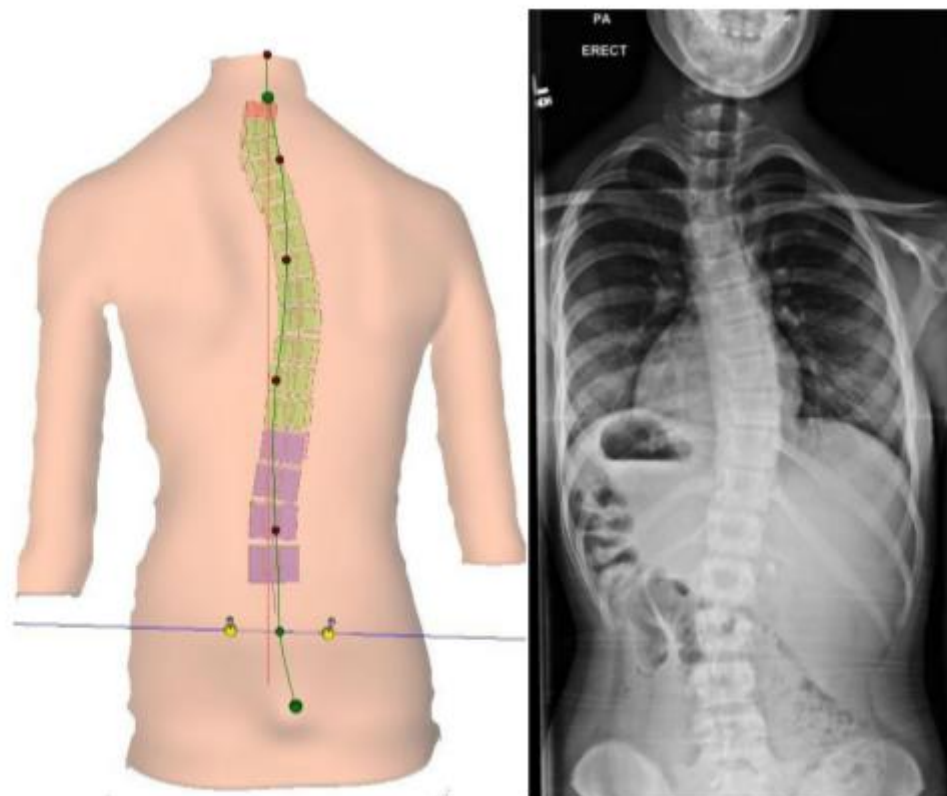


Fig. 2. Example of a 3D reconstruction next to a corresponding x-ray.

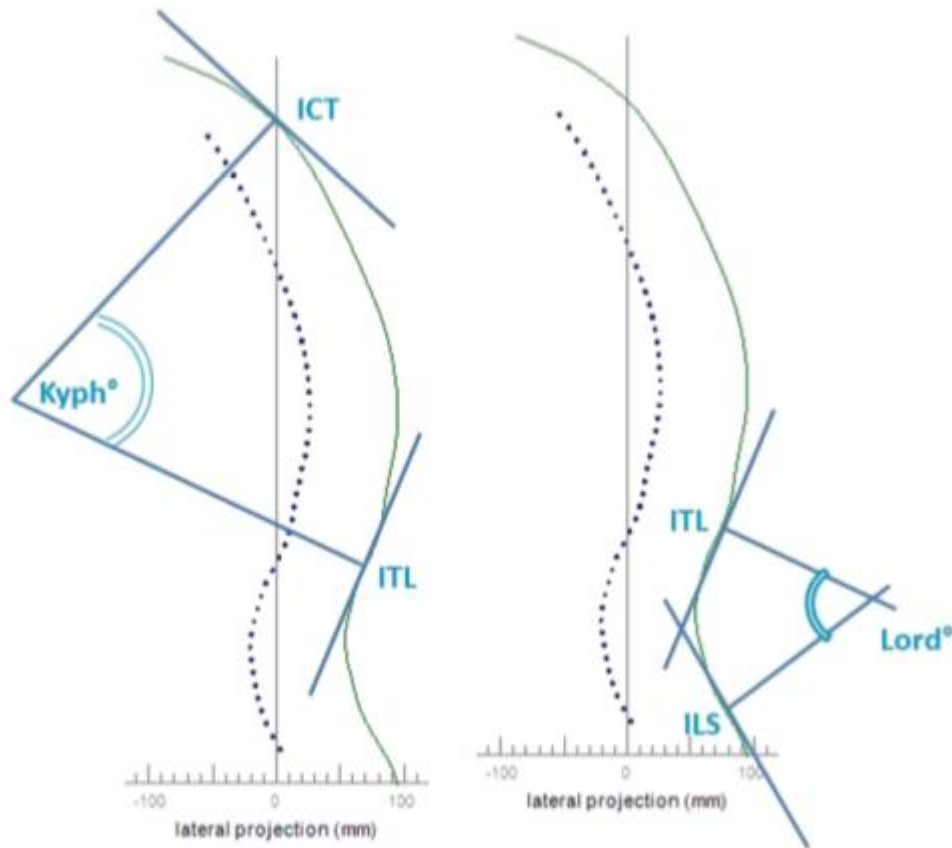


Fig. 3. Measurement of kyphosis and lordosis using surface tangents.

using a validated, electronic measurement tool (Surgimap, Nemaris, Inc, New York, NY), performed all radiographic measurements. Computer-generated approximations of these values were collected from the algorithmic calculations.

ST measurements differ from radiographic ones in technique. Kyphosis and lordosis are measured using the surface tangents of the inflection points of the convex and concave curves (Fig. 3). Coronal vertical axis (CVA), sagittal vertical axis (SVA), and pelvic obliquity are measured using topographical landmarks such as the vertebral prominence of C7 and the dimples of the posterior sacrum. These are all produced automatically by the computer software.

Descriptive data were calculated with mean and standard deviation for continuous variables. Approximated ST measurements were correlated with radiographic measurements using Pearson correlation coefficients. Statistical

calculations were performed using IBM SPSS Statistics Package V21.0. Significance was defined as $p < .05$.

Results

One hundred ninety-three patients were enrolled between 2012 and 2014. There were 170 that met the criteria for the coronal plane group (scoliosis > 10 degrees), 29 that met the criteria for the sagittal plane group (kyphosis > 45 degrees), and 6 that were in both groups. The demographics of each group are listed below in Table 1.

The reliability and comparison to x-ray for each ST parameter are represented in Table 2. The reproducibility for each ST parameter for 3 repeated scans was strong (ICC = 0.855 to 0.944).

Comparison to radiographic measurements was strong in the thoracic ($r = 0.7$) and moderate in the lumbar curve

Table 1
Subject demographics.

Plane of deformity	Number of subjects	Mean age (years)	Age range (years)	Gender (Female), %	Thoracic scoliosis, degree	Lumbar scoliosis, degree	Thoracic kyphosis, degree
Coronal	170	13.25	8–18	81	23.0 $\pm$ 10	19.8 $\pm$ 9	
Sagittal	29	13.54	8–17	59			55.2 $\pm$ 8

Table 2

Results showing the reliability of ST measurements and their comparison to x-ray.

Measurement	Reliability		Comparison to X-ray	
	Average SD, degree	Interclass correlation coefficient	Average difference, degree	Pearson correlation coefficient (ST vs. X-ray)
Thoracic scoliosis curve	±2.5	0.951	±5.8	0.733
Lumbar scoliosis curve	±2.6	0.855	±8.8	0.492
Pelvic obliquity	±1.1	0.894	±2.3	0.223
Coronal vertebral axis	±0.6	0.950	±1.3	0.623
Thoracic kyphosis	±2.1	0.984	±9.3	0.867
Lumbar lordosis	±2.1	0.977	±9.7	0.817
Sagittal vertebral axis	±1.1	0.906	±3.7	0.489

SD, standard deviation; ST, surface topography.

($r = 0.5$). There was an average difference of 5.8 degrees in the thoracic spine and 8.8 degrees in the lumbar spine between ST coronal angle estimates and radiographs. In the thoracic spine, 12% of comparisons differed by more than 10 degrees and 3% of comparisons differed by more than 15 degrees. This can occur with patients who have very flat thoracic spines. In these patients, the computer model for coronal plane deformity can be inaccurate, but can be improved with the use of reflector markers at the curve apex. Markers were not used in this study, however, to improve the outcomes of these patients.

Thoracic kyphosis also had a strong correlation ($r = 0.8$) with radiographs.

Discussion

This multicenter study was conducted to test surface topography in the evaluation of spinal deformity. A similar paper by the lead author was done at a single site with a single examiner and had results that were almost identical [27]. This study utilized six different centers and multiple examiners, demonstrating the reproducibility of the Formetric surface topography scanner across many venues. The average standard deviation of repeated measurements of less than three degrees across all parameters measured meets the requirement for a reliable measurement tool. This implies that longitudinal assessments over time in evaluating patients will yield valuable clinical information. If no significant changes in surface topography are noted in sequential examinations, then a reduction in radiographs should be possible. If changes in surface topography are noted over time, then radiographic confirmation could be performed. This approach will require prospective longitudinal study, which is now in progress.

Although the differences between scoliosis angle and Cobb angle were between 5 and 10 degrees, which is larger

than the measurement error for a radiographic measurement of Cobb angle [28], this does not negate the utility of Formetric surface topography. The measurements quantify similar but not identical aspects of spinal deformity. The Cobb angle is a 2D measurement from a single plane, whereas the scoliosis angle is a 3D quantification of deformity.

Surface topography produces a 3D spinal model and measures kyphosis, lordosis, and scoliosis curves in the plane of greatest deformity. As such, the larger value seen for the scoliosis angle is not surprising. As long as both radiographs and surface topography are done during the initial patient visit, the comparison can be made of the two methods, and if the 3D topography model does not match the radiographs, the clinician will be alerted to this failure of the system. In this study, there were between 10% and 15% of patients where the 3D model for lumbar curvature did not match the radiographs well. This resulted in an overall lower correlation for lumbar curves in the study group.

For measurements that are not so dependent on the exact plane, the differences were much closer. Pelvic obliquity, CVA, and SVA were 2.3, 1.3, and 3.7 degrees different, respectively. This shows that direct measurements obtained from surface topography are more similar to radiographs than calculated Cobb angles are.

In terms of its clinical usefulness, the Formetric surface topography scanner is able to produce a 3D spinal model showing deformity in all planes that is reliable and reproducible in most patients. Ongoing investigation includes a longitudinal analysis to examine the Formetric system's responsiveness to changes in deformity over time. The benefits of this evaluation method in reducing x-ray exposure in children and adolescents are readily apparent. Occasional radiographs will still be required to assess morphology of the vertebrae. The utility of this scanner may be in its use as an initial measurement tool when the need for radiographs is uncertain; for repeated assessments to determine whether or not a deformity has progressed; and in quantifying the magnitude, 3D shape, and rate of progression of a spinal deformity.

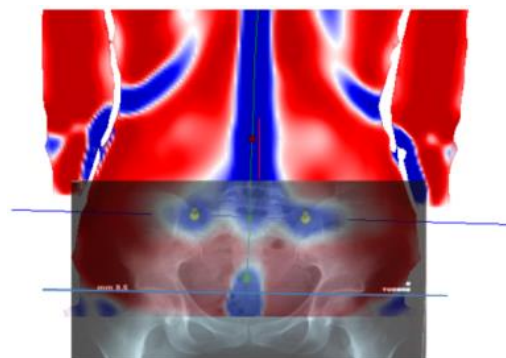
References

- [1] Soucacos PN, Zacharis K, Soultanis K, et al. Risk factors for idiopathic scoliosis: review of a 6-year prospective study. *Orthopedics* 2000;23:833–8.
- [2] Yawn BP, Yawn RA. The estimated cost of school scoliosis screening. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000;25:2387–91.
- [3] Raso VJ, Lou E, Hill DL, et al. Trunk distortion in adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop* 1998;18:222–6.
- [4] Boice Jr JD. Carcinogenesis—a synopsis of human experience with external exposure in medicine. *Health Phys* 1988;55:621–30.
- [5] Morin Doody M, Lonstein JE, Stovall M, et al. Breast cancer mortality after diagnostic radiography: findings from the U.S. Scoliosis Cohort Study. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000;25:2052–63.
- [6] Ronckers CM, Land CE, Miller JS, et al. Cancer mortality among women frequently exposed to radiographic examinations for spinal disorders. *Radiat Res* 2010;174:83–90.

- [7] Nash Jr CL, Gregg EC, Brown RH, Pillai K. Risks of exposure to X-rays in patients undergoing long-term treatment for scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 1979;61:371–4.
- [8] Huda W, Nickoloff EL, Boone JM. Overview of patient dosimetry in diagnostic radiology in the USA for the past 50 years. *Med Phys* 2008;35:5713–28.
- [9] Upadhyay SS, Burwell RG, Webb JK. Hump changes on forward flexion of the lumbar spine in patients with idiopathic scoliosis. A study using ISIS and the Scoliometer in two standard positions. *Spine (Phila Pa 1976)* 1988;13:146–51.
- [10] Pearson JD, Dangerfield PH, Atkinson JT, et al. Measurement of body surface topography using an automated imaging system. *Acta Orthop Belg* 1992;58(Suppl 1):73–9.
- [11] Batouche M, Benlamri R, Kholadi MK. A computer vision system for diagnosing scoliosis using moiré images. *Comput Biol Med* 1996;26:33–53.
- [12] Oxborrow NJ. Assessing the child with scoliosis: the role of surface topography. *Arch Dis Child* 2000;83:453–5.
- [13] Macdonald AM, Griffiths CJ, MacArdle FJ, Gibson MJ. The effect of posture on Quantec measurements. *Stud Health Technol Inform* 2002;91:190–3.
- [14] Hill DL, Berg DC, Raso VI, et al. Evaluation of a laser scanner for surface topography. *Stud Health Technol Inform* 2002;2002:90–4.
- [15] Treuillet S, Lucas Y, Crepin G, et al. SYDESCO: 253 a laser-video scanner for 3D scoliosis evaluations. *Stud Health Technol Inform* 2002;88:70–3.
- [16] Liu XC, Thometz JG, Lyon RM, McGrady L. Effects of trunk position on back surface-contour measured by raster stereophotography. *Am J Orthop* 2002;31:402–6.
- [17] Pazos V, Cheriet F, Song L, et al. Accuracy assessment of human trunk surface 3D reconstructions from an optical digitizing system. *Med Biol Eng Comput* 2005;43:11–5.
- [18] Knott P, Mardjetko S, Nance D, Dunn M. Electromagnetic topographical technique of curve evaluation for adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2006;31:E911–5; discussion E916.
- [19] Goldberg CJ, Grove D, Moore DP, et al. Surface topography and vectors: a new measure for the three dimensional quantification of scoliotic deformity. *Stud Health Technol Inform* 2006;123:449–55.
- [20] Mitchell H, Pritchard S, Hill D. Surface alignment to unmask scoliotic deformity in surface topography. *Stud Health Technol Inform* 2006;123:109–16.
- [21] Zubovic A, Davies N, Berryman F, et al. New method of scoliosis deformity assessment: ISIS2 system. *Stud Health Technol Inform* 2008;140:157–60.
- [22] Shannon TM. Development of an apparatus to evaluate adolescent idiopathic scoliosis by dynamic surface topography. *Stud Health Technol Inform* 2008;140:121–7.
- [23] Berryman F, Pynsent P, Fairbank J. Measuring the rib hump in scoliosis with ISIS2. *Stud Health Technol Inform* 2008;140:65–7.
- [24] Fortin C, Feldman DE, Cherlet F, Labelle H. Validity of a quantitative clinical measurement tool of trunk posture in idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2010;35:E988–94.
- [25] Parent EC, Damaraju S, Hill DL, et al. Identifying the best surface topography parameters for detecting idiopathic scoliosis curve progression. *Stud Health Technol Inform* 2010;158:78–82.
- [26] He JW, Yan ZH, Liu J, et al. Accuracy and repeatability of a new method for measuring scoliosis curvature. *Spine (Phila Pa 1976)* 2009;34:E323–9.
- [27] Frerich JM, Hertzler K, Knott P, Mardjetko S. Comparison of radiographic and surface topography measurements in adolescents with scoliosis. *Open Orthop J* 2012;6:261–5.
- [28] Wu W, Liang L, Du Y, et al. Reliability and reproducibility analysis of the Cobb Angle and assessing sagittal plane by computer-assisted and manual measurement tools. *BMC Musculoskelet Disord* 2014;15:33.

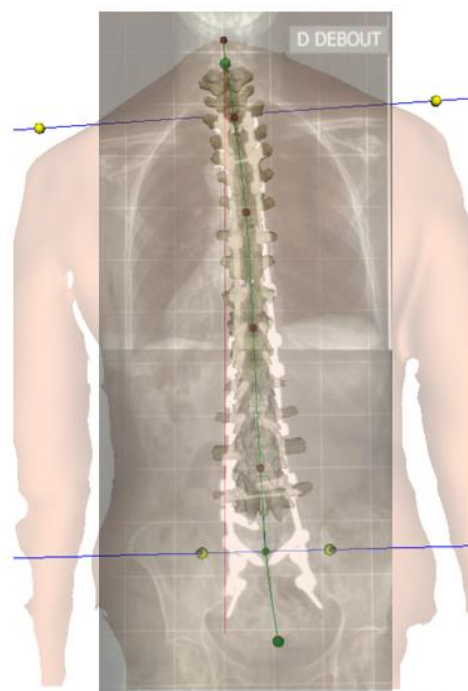
La Visualisation **DIERS Formetric III 4D** par l'image

La fiabilité



La superposition de clichés radiologiques et d'i/RN® montre une fiabilité plus qu'acceptable alors que les conditions d'acquisition sont différentes :

	Rx	etioLAB 4D®
Temps d'acquisition	Quelques millisecondes	Minimum 6 secondes
Position d'acquisition	Imposée	Naturelle



37

De nombreuses études internationales sont disponibles.

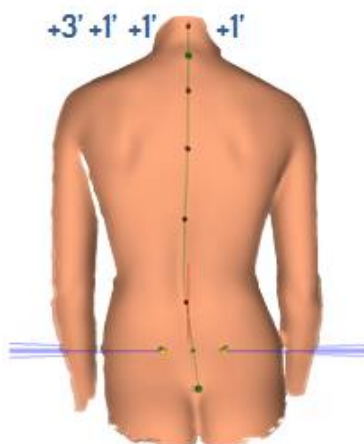
Compilation récente sur :

<http://www.sstsg.org/related-literature.html>

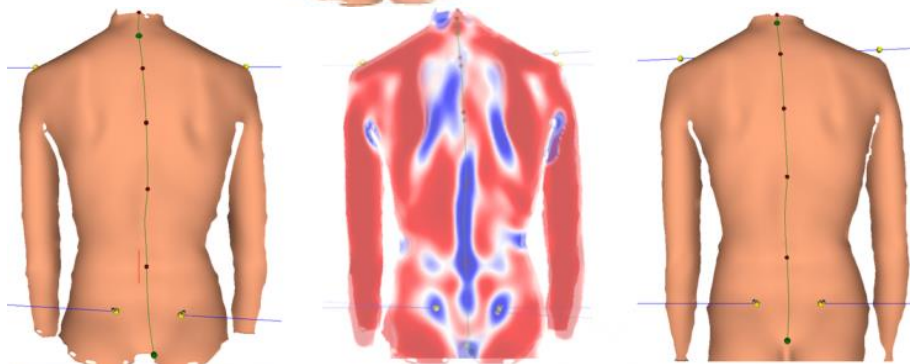
La reproductibilité

Fondamentale pour un suivi objectif, la reproductibilité a été également démontrée dans de nombreuses études (cf. *lien ci-dessus*). Ci-dessous quelques exemples de la superposition des silhouettes acquises à différents instants :

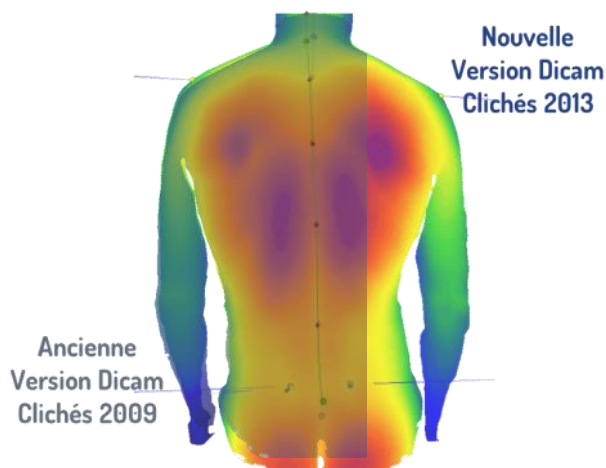
Superposition d'acquisition de 40 msec
avec quelques minutes d'intervalle



Superposition d'acquisitions
de 6 secondes avec 9 mois
d'intervalle

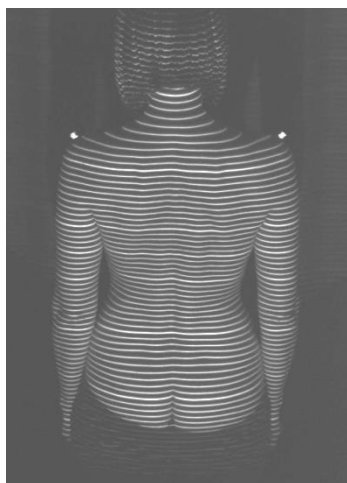


Superposition d'acquisition de 6 secondes
entre 2 versions de Dicam





Le protocole DIERS Formetric III 4D



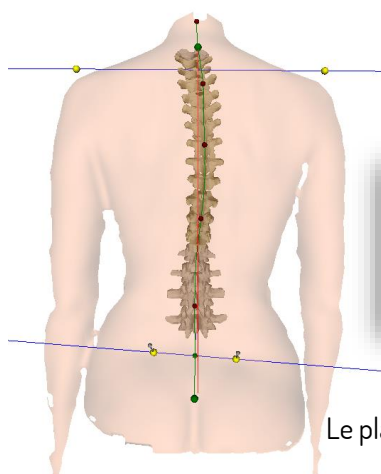
Le sujet se tient debout dans sa position naturelle.
Seuls les genoux doivent être tendus si possible.
La respiration est naturelle.

Deux séries de clichés seront effectuées :

- L'une de 6 secondes pour une visualisation de la moyenne posturale
- L'autre de 30 secondes pour une visualisation de la dynamique posturale (les oscillations)

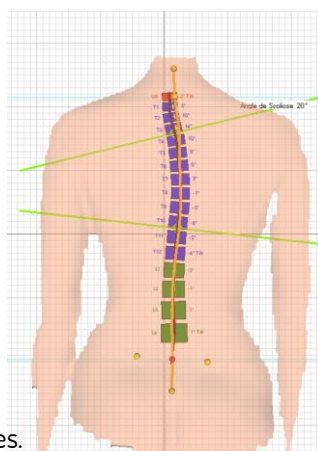
Les mesures obtenues sont calculées quasi instantanément par des algorithmes puissants dans les 3 plans de l'espace.

La moyenne posturale



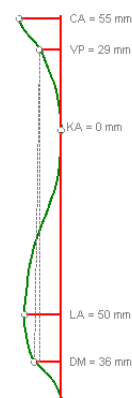
Plan Frontal	Surface	Plan Horizontal	Plan Sagittal	Comparer	Comparer
● Déviation latérale du tronc VP-DM ...	4	mm R			
● Inclinaison du bassin DL-DR en mm	9	mm L			
● Inclinaison des épaules SL-SR en mm	0	mm			
● Position Apex lordosique(Dr. Weiss)	85	L3-L4			

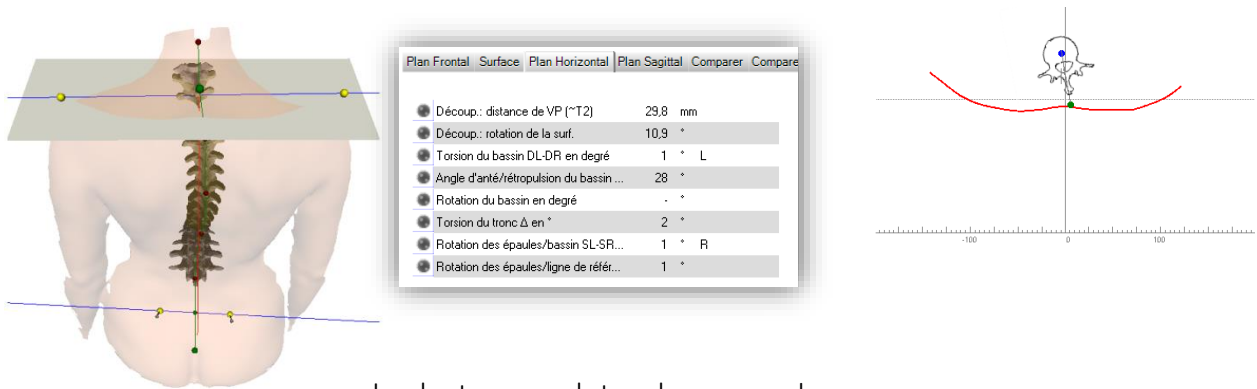
Le plan frontal et quelques-unes de ses mesures.



Longueur du tronc VP-SP mm	462,3	mm
AntéRétroposition du tronc VP-DM en mm	-7,1	mm
Torsion du bassin DL-DR en degré	1	° L
Angle d'antéRétropulsion du bassin en degré	27,9	°
Flèche cervicale en mm	55,4	mm
Flèche lombaire en mm	49,3	mm
Angle cyphotique VP-T12 en degré	49,9	°
Angle lordosique T12-DM en degré	53,4	°

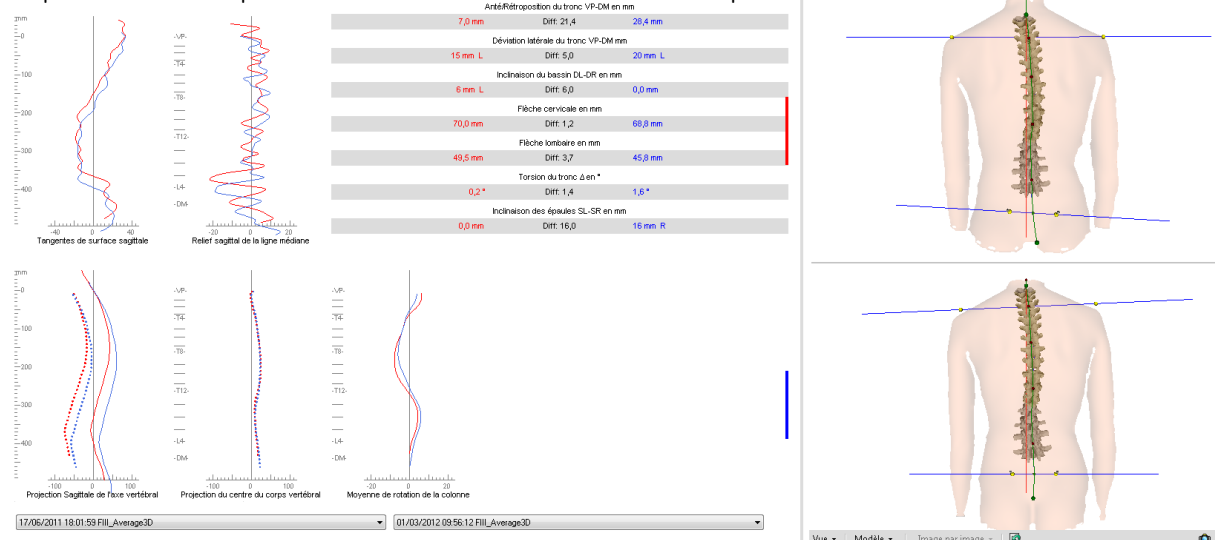
Le plan sagittal et quelques-unes de ses mesures.





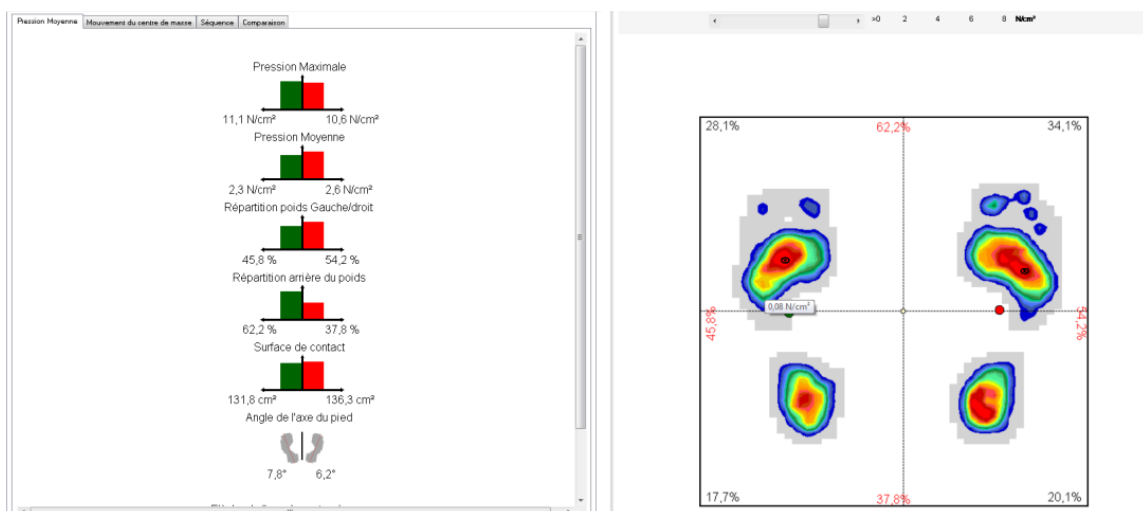
Le plan transversal et quelques-unes de ses mesures.

La possibilité de comparaison est soit immédiate, soit dans le temps.



41

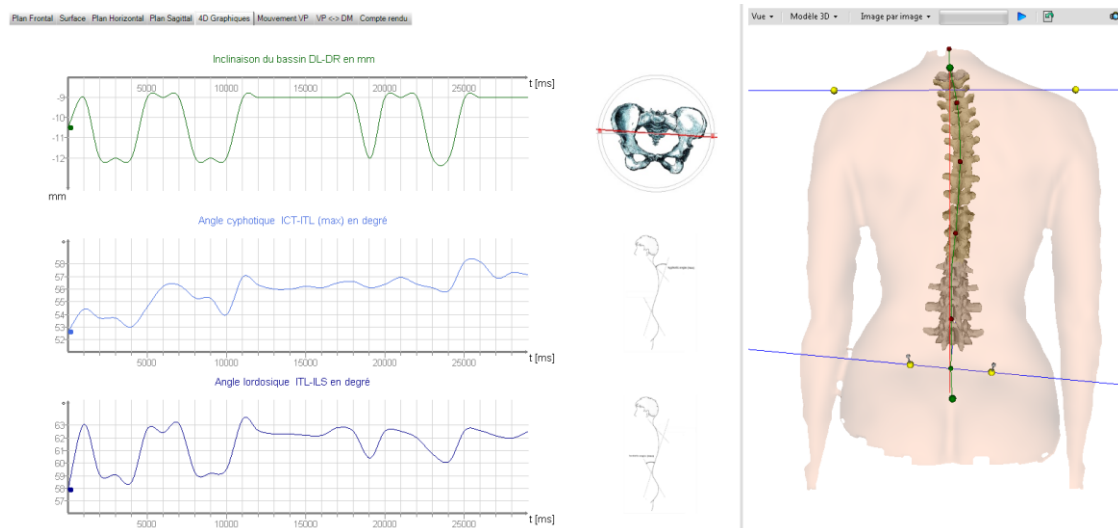
Nous couplons à toutes nos séries des enregistrements podométriques.



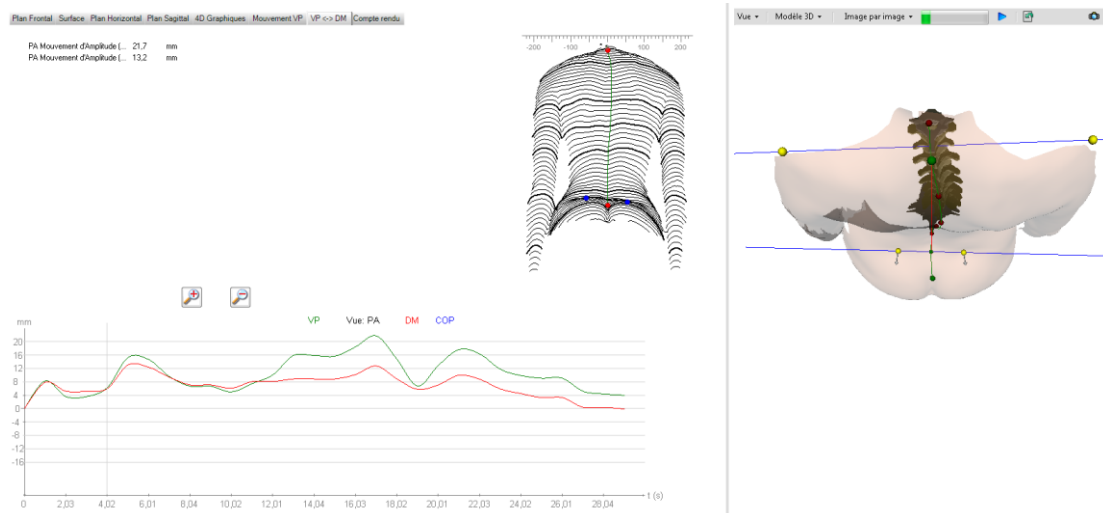
La dynamique posturale

La visualisation des oscillations (insérée dans le dossier électronique individuel sous forme de film au format .avi) permet l'appréciation des ajustements posturaux.

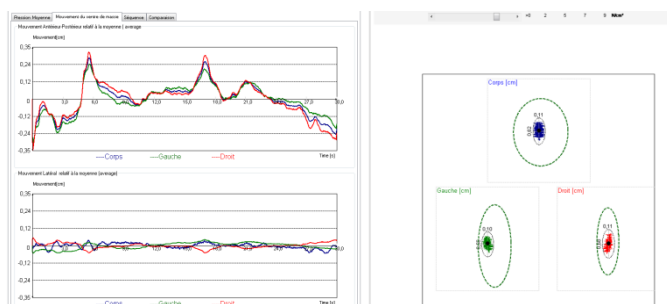
Dans le plan frontal



Dans le plan sagittal



Couplée à la stabilométrie



Conclusion

L'évaluation posturo-fonctionnelle avec visualisation DIERS Formetric III 4D, par sa méthodologie stricte, ouvre une nouvelle voie dans la stratégie médicale. C'est une des lectures de l'équilibre de la santé qui, grâce aux outils modernes, peut être mesuré objectivement avec une reproductibilité fiable. Toutefois, si l'imagerie optique s'avère un complément des plus utiles, elle ne peut 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 une décision thérapeutique visant à diminuer les contraintes additionnelles aux pathologies existantes et prend tout son sens dans le cadre des pathologies non spécifiques ou idiopathiques.

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, nul 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.

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 à son traitement et au suivi médical, gage pourtant essentiel de la qualité du résultat des soins.

Détecter, mieux comprendre, c'est aussi garantir un mieux-être et éviter un engrenage négatif pour l'individu et la collectivité. L'évaluation posturo-fonctionnelle avec visualisation DIERS Formetric III 4D est un examen qui contribue à l'effort de maîtrise du coût social et financier de la santé publique.

Les outils du XXI 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 et qui est source de confusion. Si l'imagerie médicale conventionnelle est un instantané de la réalité structurelle, l'imagerie 4D est une visualisation de l'organisation spatiale propre à chaque individu. Dans la pratique médicale cette précision est capitale car elle permet d'envisager la lombalgie comme une 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.

L'évaluation posturo-fonctionnelle avec visualisation DIERS Formetric III 4D est une solution innovante proposée dans le cadre des actions préventives, correctives et/ou curatives de la médecine d'aujourd'hui et s'inscrit en tant que technologie d'information et de communication pour la médecine de demain.

Bibliographie

- Modélisation 3D automatique: outils de géométrie différentielle par François Goulette Presses des MINES, 1999 Page 9.
- M Mangone, 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.
- Conversation with Paolo Raimondi on vertebral rotation, recorded in October 2010. Faculty of Sports Sciences of the University of Aquila.
- 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
- 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.
- 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
- Takasaki, H. (1970). Moiré topography. Appl Opt. 1970 06 1;9 (6), 1467-1472
- 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
- Xenofoss, S.; Jones, C. (1979). Theoretical aspects and practical applications of moiré topography. Phys. Med Biol. 03; 24(2), 250-261
- Frobin, W.; Hierholzer, E. (1981). Rasterstereography: A photographic method for measurement of body surfaces. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 47, 1717-1724
- 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
- Hierholzer, E.; Lüxmann, G. (1982). Three-dimensional shape analysis of the scoliotic spine using invariant parameters. Journal of applied Biomechanics 15, 595-598
- Drerup, B. (1982). Measurement of kyphosis using moiré topography. Biostereometrics '82 / SPIE 361, 101-110
- 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
- Drerup, B. (1984). Principles of Measurement of Vertebral Rotation from Frontal Projections of Pedicles. Journal of applied Biomechanics 17, 923-935
- Frobin, W.; Hierholzer, E. (1986). Mathematical representation and shape analysis of irregular body surfaces. Biostereometrics '82 / SPIE 361, 132-139
- 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
- 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
- Carr, A.; Jefferson, R.; Turner-Smith, A. (1989). Surface stereophotogrammetry of thoracic kyphosis. Acta Orthop Scand. 04, 60(2), 177-180
- Drerup, B.; Hierholzer, E. (1996). Assessment of scoliotic deformity from back shape asymmetry using an improved mathematical model. Clin. Biomech. 11, 367-383
- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- Graf H, Hecquet J, Dubousset J. Approche tridimensionnelle des déformations rachidiennes. Rev Chir Orthop 1983 ; 69 : 4074-416.
- Guigui P, Levassor N, Rillard 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.

- Vaz G, Rousouly P, Berthonnaud E, Dimnet J. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. Eur Spine J. 2002;11:80-87.
- Schulte TL, Hierholzer E, Boerke A, Lerner T, Liljengvist 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.
- 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.
- Weiss HR., Seibel S. Can surface topography replace radiography in the management of patients with scoliosis ? Hard Tissue 2013 Mar 22;2(2):19.
- Patrick Knott, PhD, PA-Ca, *, Peter Sturm, MD, Baron Lonner, MD, Patrick Cahill, MD,1, Marcel Betsch, MD,2, Richard McCarthy, MD, Michael Kelly, MD, Lawrence Lenke, MD,3, Randal Betz, MD, Multicenter Comparison of 3D Spinal Measurements Using Surface Topography With Those From Conventional Radiography Spine Deformity 4 (2016) 98e103, USA.

Mes notes personnelles

Mes notes personnelles

