

# Approche de la scoliose par modèle 3D

ANNE-PASCALE MAQUINGHEN (1), DANIEL CHOPIN (2)

La scoliose est une déformation complexe de l'ensemble des structures du tronc. Les approches traditionnelles (cliniques et radiographiques) peuvent désormais être complétées d'une ingénierie informatisée accessible au chirurgien orthopédique, lui permettant de mieux comprendre les caractéristiques du cas présent, et ainsi d'y répondre de façon ciblée.

## MOTS-CLÉS

Biomécanique  
Chirurgie  
Modèle géométrique 3D  
Rachis  
SADÉPO  
Scoliose

La scoliose est plus qu'une déviation latérale du rachis puisqu'il s'agit d'une déformation spatiale de la colonne qui rompt l'équilibre rachidien [1]. Ses origines sont variées et plus ou moins connues [2]. Les causes connues sont en rapport à des malformations congénitales, à des lésions osseuses ou ligamentaires, etc. Lorsque l'origine de la scoliose est inconnue, elle est dite idiopathique et représente entre 70 % [3] et 80 % [4] des scoliozes rencontrées.

Celle-ci évolue durant trois périodes possibles : l'enfance, l'adolescence et l'âge adulte, plutôt vers 60 ans ; les scoliozes sont alors dites, respectivement, infantiles, de l'adolescent ou enfin de l'adulte. L'aggravation de la déformation scoliozique entraîne celle de la cage thoracique et a pour conséquences des problèmes cardio-vasculaires graves et une diminution de la capacité respiratoire vitale [5, 6]. La scoliose se manifeste par des phénomènes géométriques à considérer dans son traitement :

- rotation intervertébrale : déviation des apophyses transverses ;
- torsion du rachis, mouvements combinés des vertèbres entre elles ;
- modification de la forme des vertèbres : cunéiformisation et vrille ;
- déformation de l'arc neural ;
- verticalisation des côtes ;

(1) Maître de conférences, Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines, Université de Valenciennes, Le Mont-Houy, 59313 Valenciennes Cedex 9, France.

(2) Chirurgien, Chef de service. Institut Calot, Groupe Hopale, Berck-sur-Mer.

Correspondance : Anne-Pascale Maquinghen

E-mail : Anne-Pascale.Maquinghen@univ-valenciennes.fr

Article issu du XXXIII<sup>e</sup> Congrès du GKTS, les 18-19/03/2005

Relu le : - 1<sup>o</sup> relecteur : 09/01/2006

- 2<sup>o</sup> relecteur : 13/01/2006

Accepté le : 16/01/2006

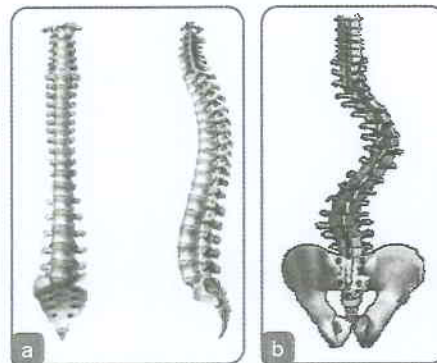


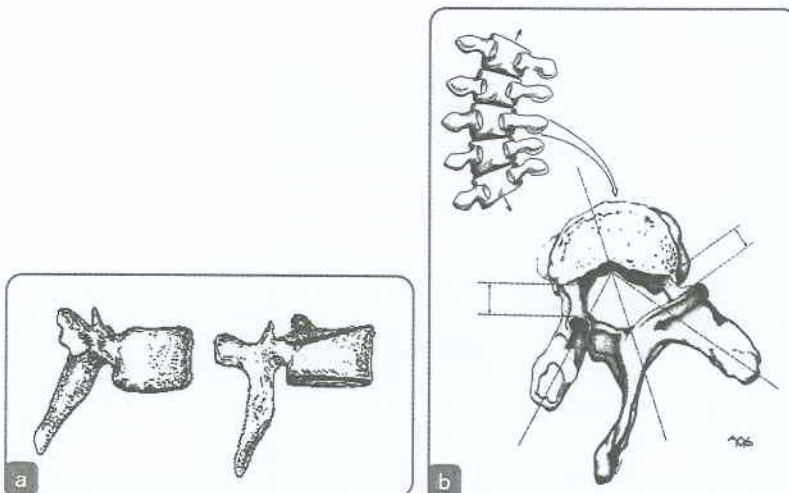
Figure 1. a) Courbures physiologiques, vues frontale et latérale. b) Courbures scolioziques, vue frontale.

- basculement du sacrum, du bassin et des têtes fémorales par rapport à l'horizontale ;
- discontinuité de la variation des courbures rachidiennes.

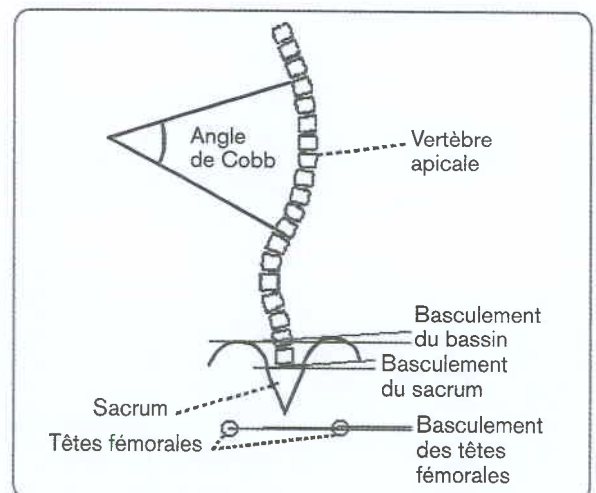
La figure 1 représente l'allure générale de la colonne vertébrale dans les plans frontal et sagittal pour des courbures physiologiques normales et une configuration scoliozique dans le plan frontal.

Il apparaît que la déformation des courbures de la colonne vertébrale provoque des modifications spatiales en translation et en rotation des vertèbres. Il est remarquable aussi que la scoliose provoque des déformations structurales du rachis et des côtes. Au niveau des vertèbres, ces déformations sont la cunéiformisation (figure 2a) et la torsion axiale (figure 2b). Cependant, même si ces caractéristiques sont importantes pour l'évaluation clinique de la scoliose, elles ne peuvent être modifiées par les traitements médicaux actuels, et n'interviennent donc pas dans l'évaluation de la correction de la scoliose.

« La déformation des courbures de la colonne vertébrale provoque des modifications spatiales en translation et en rotation des vertèbres et des déformations structurales des côtes »



**Figure 2.** Déformation structurale d'une vertèbre : **a)** cunéiformisation ; **b)** torsion.



**Figure 3.** Variables géométriques du rachis scoliotique, vue de dos.

## Caractérisation clinique de la scoliose

La déformation est évaluée par observation radiographique lorsque la scoliose est détectée chez un patient. Elle permet de quantifier la progression de la déformation ou sa régression lors d'un traitement. Des variables cliniques sont définies pour caractériser l'amplitude de la déformation et sont identifiées sur des radiographies frontales et sagittales. Elles permettent d'évaluer la scoliose d'un point de vue global par l'observation des courbures du rachis, mais aussi plus localement par l'observation des orientations des vertèbres. De par l'aspect tridimensionnel de la déformation, la caractérisation dans les trois plans de l'espace est nécessaire.

### Plan frontal

L'angle de Cobb [7] est la variable la plus couramment utilisée pour caractériser la courbure scoliotique dans le plan frontal. Cet angle représente l'angulation des courbures engendrées par la déformation. Il est déterminé entre les droites tangentes au plateau supérieur de la vertèbre supérieure et au plateau inférieur de la vertèbre inférieure, ces vertèbres étant les plus inclinées par rapport à l'horizontale. En plus de la valeur de cet angle, les noms des vertèbres supérieure et inférieure sont notés. Un exemple est proposé *figure 3*. Il est à noter que dans la mesure de l'angle de Cobb, la cunéiformisation est prise en compte.

Lors d'une évaluation de correction, une comparaison entre les mesures de l'angle de Cobb avant et après traitement est réalisée.

### Plan sagittal

Dans le plan sagittal, le rachis n'a, à l'heure actuelle, qu'une caractérisation qualitative. Pour un rachis sain, les courbures du rachis sont caractérisées en terme de « profil harmonieux ». Pour les sujets scoliotiques, dans la majorité des cas, une perte des courbures harmo-

nieuses est constatée et définie en termes de « profil plat » ou « dos plat ». Cependant, la scoliose étant une déformation spatiale de la colonne vertébrale, le besoin d'une caractérisation dans le plan sagittal se fait ressentir. Des études sont entreprises par des équipes scientifiques et médicales tels que le Groupe d'Etude de la Scoliose (GES), en France ou la *Scoliosis Research Society* (SRS), aux Etats-Unis. Une notion importante pour le clinicien est celle de l'équilibre du rachis [8]. Cet équilibre, au sens médical, serait lié à la configuration géométrique du rachis. Ainsi, lorsque le clinicien réduit la scoliose, il doit aussi « rééquilibrer » le rachis, c'est-à-dire repositionner la vertèbre C7 à la verticale du milieu du plateau sacré. Duval-Beaupère et ses collaborateurs ont mené une étude de caractérisation géométrique de positionnement du bassin [9].

Les paramètres pelviens tels que l'incidence, la pente sacrée, la version pelvienne, l'épaisseur et le porte à faux sont définis. Quantifiés à partir de radiographies dans le plan sagittal, ils sont illustrés en *figure 4*. Ensuite, une corrélation de ces paramètres avec « l'équilibre » rachidien a permis de déterminer la lordose offrant un profil « économique ». Cette caractérisation du socle pelvien, dans le plan sagittal, peut donner une vision globale du profil du rachis.

### Rotation axiale des vertèbres

La rotation axiale est une autre caractéristique usuelle de la scoliose et est mesurée sur les radiographies frontales. L'axe de rotation est défini par la droite passant par le milieu des plateaux inférieur et supérieur de la vertèbre, orienté selon l'axe vertical.

Pour des courbures saines du rachis, la rotation axiale des vertèbres est nulle. En revanche, la scoliose tourne les apophyses épineuses vers la concavité de la courbure scoliotique (*figure 5*) [2].

Le clinicien utilise couramment la valeur de l'angle de rotation axiale de vertèbres particulières telles que les

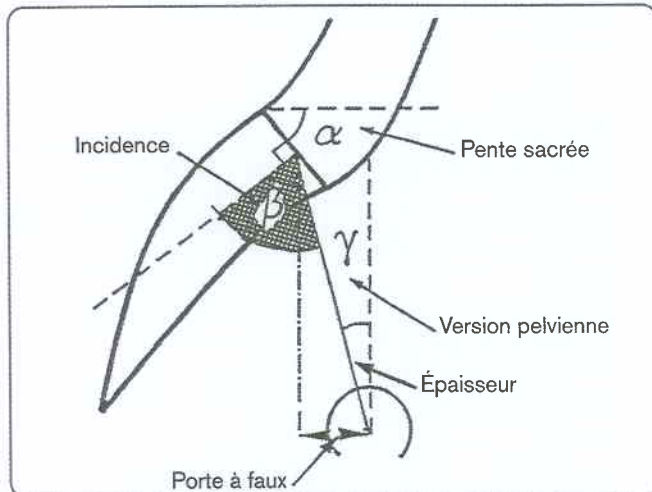


Figure 4. Paramètres pelviens.

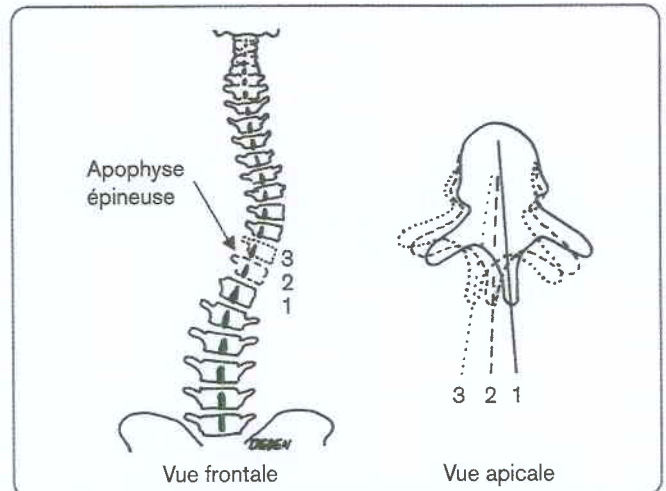


Figure 5. Rotation axiale des vertèbres dans une courbure scoliothique.

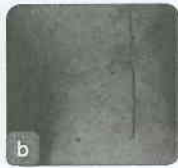


Figure 6a et b.

Points anatomiques digitalisés sur les radiographies.

a) radiographie frontale ;  
b) radiographie sagittale.

vertèbres limites ou apex pour quantifier la gravité de la scoliose et évaluer la correction à effectuer sur le rachis.

La mesure de cet angle est obtenue à partir des radiographies du patient dans le plan frontal. En effet, plusieurs auteurs [1, 10, 11] ont proposé des méthodes d'évaluation de calcul de la rotation axiale des vertèbres à partir de la projection des pédicules. Perdriolle a mis au point une règle permettant une lecture directe de l'angle en la positionnant sur les radiographies frontales en fonction des pédicules et des bords des corps vertébraux.

## Systèmes d'aide à la décision du traitement chirurgical de la scoliose

### Modèle géométrique (Rachis 3D)

Les travaux réalisés ont débuté par la modélisation géométrique 3D du rachis [12]. Jusqu'alors, la déformation rachidienne est évaluée à partir de projections planes que sont les radiographies frontale et latérale du sujet. À partir de ces deux vues, le médecin devait reconstruire mentalement la forme tridimensionnelle de la colonne vertébrale. Avec un modèle géométrique tridimensionnel, cette reconstruction est aisée et la déformation mieux comprise. Les critères de développement du système de reconstruction géométrique étaient d'être simple d'utilisation, peu coûteux en matériel, en temps et en manipulation. Il était réputé nécessaire de quantifier la position et l'orienta-

tion de chacune des vertèbres ainsi que du socle pelvien constitué du sacrum, du bassin et des têtes fémorales.

« La modélisation géométrique du rachis permet de visualiser la forme 3D de la colonne vertébrale selon divers points de vue impossible à obtenir par radiographie »

Des points caractéristiques des vertèbres sont repérés sur des radiographies frontale et latérale du rachis (figure 6) à l'aide d'un pointeur numérique relié à un ordinateur, ou directement sur écran, leurs coordonnées planes sont stockées dans une base de données. Ces points permettent de quantifier la position et l'orientation des vertèbres et d'estimer la déformation du corps vertébral. Une mise en correspondance des données issues des deux vues permet de calculer le modèle vertébral. Celui-ci est un polyèdre irrégulier à 10 sommets. Le socle pelvien est, quant à lui, modélisé par un ensemble de courbes spatiales dont la position des points de contrôle est issue de mesures sur les mêmes radiographies (figure 7).

Malgré des hypothèses simplificatrices, la visualisation graphique du modèle 3D du rachis donne un rendu satisfaisant. L'erreur absolue est inférieure à 9,7 mm pour la position vertébrale, cette valeur maximale a été obtenue dans une situation très défavorable : rachis avec courbure principale supérieure à 90°.

Ce modèle permet de visualiser la forme 3D de la colonne vertébrale selon divers points de vue, les projections les plus pertinentes étant verticales avec une vue frontale, latérale et intermédiaire entre ces deux plans ainsi qu'une projection en vue coronale, vue impossible à obtenir par radiographie.

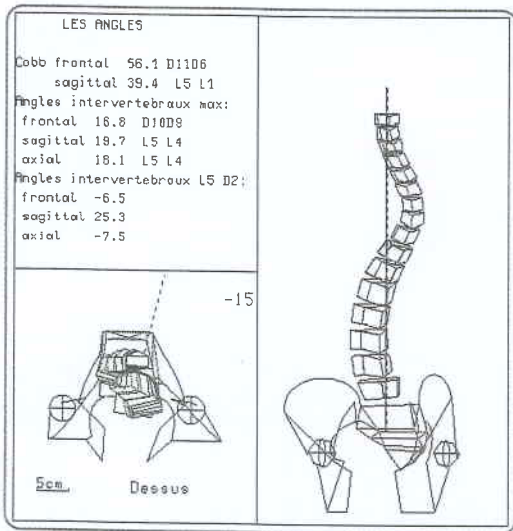


Figure 7. Modèle rachidien.

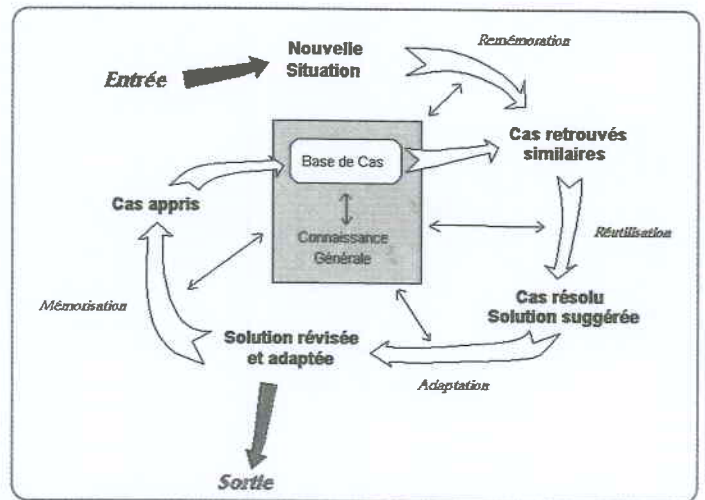


Figure 8. Cycle du Raisonnement à Partir de Cas.

### Aide au choix des niveaux de fusion

La géométrie 3D du rachis apporte des éléments au clinicien sur l'importance de la déformation de la colonne vertébrale. Cependant, elle ne fournit aucune information sur l'évolution de la scoliose ni sur le traitement à effectuer. Afin d'assister le chirurgien dans sa prise de décision sur le traitement orthopédique, Chusseau a développé le logiciel SADÉPO [13]. Il s'agit d'un Système d'Aide à la Décision Pré-Opératoire en chirurgie orthopédique de la scoliose. L'approche est innovante dans le domaine de la scoliose puisqu'elle utilise les méthodes de l'Intelligence Artificielle. Il a modélisé le raisonnement du chirurgien considéré ici comme expert.

« L'Intelligence Artificielle modélise le raisonnement du chirurgien orthopédique en exploitant des relations de correspondance et des relations de dépendance entre différents cas de patients »

Rapidement, il a été remarqué que le chirurgien travaille par analogie. L'analogie exploite des relations de correspondance et des relations de dépendances afin de transposer des connaissances d'un univers à un autre [14]. L'analogie se fonde sur la notion de similitude de termes dans un certain univers, du type : A est à B ce que C est à D [15].

S'appuyant sur le fait que le chirurgien travaille par analogie, SADÉPO utilise le formalisme du Raisonnement à Partir de Cas [16]. Dans ce type de raisonnement, illustré figure 8, lorsqu'un nouveau cas apparaît, le système recherche des cas similaires dans une base de cas ; à partir de ces cas similaires, une solution est proposée pour le cas courant ; cette solution est adaptée puis mémorisée dans la base de cas.

Le résultat du recueil de connaissances et de l'analyse du travail du chirurgien a d'abord permis de modéliser un cas de patient. Dans la présente étude, un cas ca-

ractérise la forme tridimensionnelle du rachis et les données cliniques propres au patient. Une quarantaine de descripteurs est utilisée, ils sont numériques (par exemple des angles), symboliques (par exemple le type de profil) ou binaires (par exemple la présence ou non d'un signe de l'épaule).

L'ensemble des descripteurs a été validé par le chirurgien-expert afin d'assurer la pertinence, l'utilité, la spécificité et la fidélité de chacun, et l'exhaustivité dans la description générale d'un patient scoliotique. La figure 9 illustre une page écran incluant l'ensemble des données utilisées.

La description d'un cas permet ensuite de rechercher des cas similaires dans une base de cas. La similarité entre deux cas de patients est égale à une somme pondérée de la similarité de chaque descripteur. La pondération est le résultat d'une expertise au cours de laquelle l'expert a décrit l'importance d'un descripteur par une valeur relative.

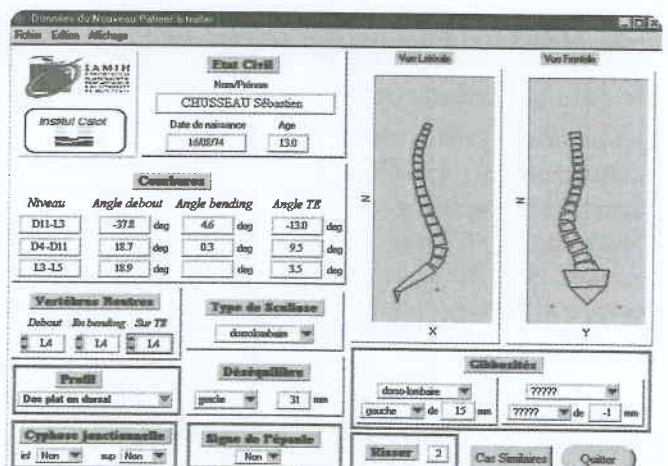


Figure 9. Interface d'affichage des données d'un nouveau cas de patient à traiter.

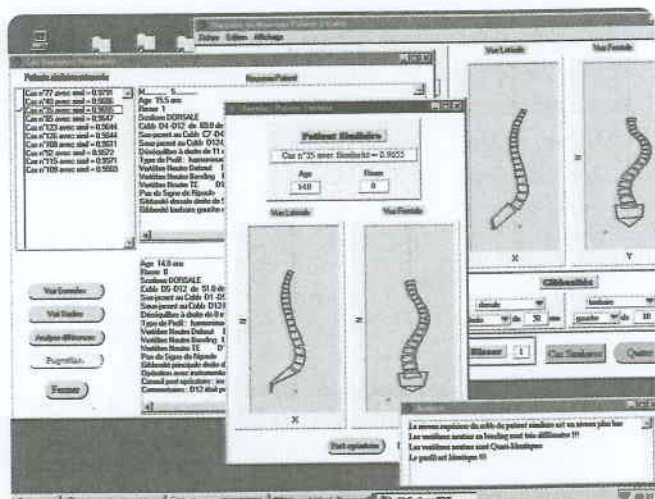


Figure 10. Exemple de fenêtres ouvertes simultanément.

À la fin de la recherche de similarité, une liste de cas de patients similaires est fournie, à laquelle est associé le degré de similarité de chaque cas avec le cas courant à traiter. Cette liste est organisée par similarité décroissante. Il a été décidé d'afficher les cas ayant une similarité supérieure à 0,8 avec un nombre maximum de dix cas.

À partir de cette liste, l'utilisateur peut sélectionner un cas de patient similaire et visualiser sa description soit de façon textuelle, soit de façon graphique. L'affichage textuel contient les valeurs des descripteurs ainsi que l'analyse des similitudes et des dissemblances entre les deux cas.

Dans le cadre de SADÉPO, la proposition d'une ou de solution(s) consiste à présenter au chirurgien-expert le type d'instrumentation et les niveaux vertébraux de fusion. L'adaptation effectuée à ce jour est de type re-copie [17], elle est effectuée par le chirurgien à partir des solutions proposées. Plusieurs types de solutions sont proposés. Ainsi, pour un nouveau patient, les cas de patients similaires retrouvés peuvent comporter des solutions avec abord par voie antérieure ou abord par voie postérieure et, par conséquent, des niveaux de fusion différents. La figure 10 illustre un exemple d'écran avec plusieurs fenêtres ouvertes.

L'apprentissage de SADÉPO consiste à enrichir la base de cas avec le nouveau cas traité et résolu.

Les avantages de SADÉPO est qu'il n'est pas lourd d'utilisation, les résultats sont obtenus sans délais d'attente et la recherche de cas similaires est exhaustive dans la base de cas. Cependant, les solutions apportées par SADÉPO sont limitées aux niveaux supérieur et inférieur de l'arthrodèse ainsi qu'à l'abord de celle-ci. Bien qu'important, il serait nécessaire de poursuivre en fournissant les niveaux intermédiaires d'emplacement de vis et crochets sur le rachis.

## Conclusion

La scoliose, pathologie rachidienne dans l'espace 3D engendre des modifications d'équilibre ainsi que des déformations de la cage thoracique. Des aides préopératoires au traitement chirurgical de la scoliose proposées ont permis la réalisation d'un modèle géométrique 3D du rachis et du bassin. L'étroite collaboration des cognitivistes et du chirurgien expert a permis de formaliser les connaissances du chirurgien dans son raisonnement lors de la prise de décision des niveaux de fusion. Les systèmes proposés facilitent le travail du chirurgien dans la connaissance de la scoliose et de son traitement. ●

## Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement S. Chusseau pour sa contribution active dans la réalisation de ces travaux.

## RÉFÉRENCES

- [1] Perdriolle R. La scoliose. Son étude tridimensionnelle. Paris : Maloine, 1979.
- [2] White III, Panjabi M. Clinical biomechanics of the spine. 2nd edition. JB Lipincott Company, 1990.
- [3] Goel VK, Weinstein James N. Biomechanics of the spine : clinical and surgical perspective. CRC Press, 1990.
- [4] Sirinelli, Boscq M. Hôpital de Clocheville-Tours. Principaux problèmes d'orthopédie courante. [http://www.med.univ-rennes1.fr/cerf/edicerf/PEDIATRIE/15\\_ORTHOP\\_DIE\\_COURLANTE](http://www.med.univ-rennes1.fr/cerf/edicerf/PEDIATRIE/15_ORTHOP_DIE_COURLANTE). ht ml#ADM198 transfert Word vers HTML par le Département d'Information Médicale du CHRU de Pontchaillou, janvier 1996.
- [5] Aaro S, Ohlund C. Scoliosis and pulmonary function. Spine 1984;9:220-2.
- [6] Bergofsky EH, Torino GM, Fiscoiann AP. Cardiorespiratory failure in cyphoscoliosis. Baltimore medicine 1959;38:263-317.
- [7] Cobb JR. Outline for study of scoliosis. Am Acad Orthop Surg Lect 1948;5:261.
- [8] Chopin D. Correction instrumentée des déviations : éléments de l'aplomb post-opératoire. XXIV<sup>ème</sup> Congrès GKTS, Le Touquet, France, 29-30 Mars 1996, 1-3.
- [9] Legaye J, Hecquet J, Marty C, Duval-Beaupère G. Equilibre sagittal du rachis. Relations entre bassin et courbures rachidiennes sagittales en position debout. Rachis 1993;5:215-26.
- [10] Nash L, Moe JH. A study of vertebral rotation. J. Bone Joint Surg 1969;51:223.
- [11] Drerup. Measurement of vertebral rotation from the projection of the pedicles – Surface topography, Edited by J. D. Harris, A. R. Turner-Smith., Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New-York, 1986;85-8.
- [12] Godillon AP. Modélisation géométrique et cinématique 3D du rachis scoliotique pour la réalisation d'un outil d'aide au médecin. Thèse de doctorat d'automatique, Université de Valenciennes, 21 janvier 1991.