

Modifications radiographiques du plan sagittal dans la scoliose idiopathique de l'adolescent après arthrodèse par voie postérieure. Résultats de l'étude prospective monocentrique d'une cohorte de 154 patients

Jacques Christophe Vidal

▶ **To cite this version:**

Jacques Christophe Vidal. Modifications radiographiques du plan sagittal dans la scoliose idiopathique de l'adolescent après arthrodèse par voie postérieure. Résultats de l'étude prospective monocentrique d'une cohorte de 154 patients. Médecine humaine et pathologie. 2012. dumas-01474150

HAL Id: dumas-01474150

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01474150

Submitted on 22 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'Etat de docteur en médecine. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 122.4

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 335.2-L 335.10

UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES

Faculté de Médecine PARIS DESCARTES

Année 2012 N° 183

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT

DE

DOCTEUR EN MÉDECINE

Modifications radiographiques du plan sagittal dans la scoliose idiopathique de l'adolescent après arthrodèse par voie postérieure. Résultats de l'étude prospective monocentrique d'une cohorte de 154 patients

Présentée et soutenue publiquement

le 23 octobre 2012

Par

Christophe Jacques VIDAL

Né le 5 juillet 1981 à Domont (95)

Dirigée par M. Le Docteur Brice Ilharreborde

Jury :

M. Le Professeur Keyvan Mazda …….. Président
M. Le Professeur Eric Vandenbussche
M. Le Professeur Didier Hannouche
M. Le Docteur Marc-Antoine Rousseau
M. Le Docteur Stéphane Wolff

Except where otherwise noted, this work is licensed under
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/

Remerciement

A Monsieur le Professeur Mazda.
Faire partie de vos élèves est un honneur.

A Monsieur le Docteur Brice Ilharreborde.
Ta clarté d'esprit en toutes choses est précieuse.

A Monsieur le Professeur Vandenbussche.
Ta rigueur a été –et restera- formatrice dans mon appréhension de la chirurgie.

A Monsieur le Docteur Stéphane Wolff.
Ta brillante modestie est un exemple à suivre.

A Monsieur le Professeur Hannouche.
La curiosité dont tu fais preuve est un moteur que tu sais partager.

A Monsieur le Docteur Rousseau.
Je te remercie de m'avoir fait la faveur de faire partie du Jury.

A mes Maîtres d'Internat :
Monsieur le Professeur Judet, Monsieur le Professeur Garreau de Loubresse, Monsieur le Professeur Augereau, Monsieur le Professeur Sedel, Monsieur le Professeur Nizard, Monsieur le Professeur Guigui, Monsieur le Professeur Penneçot, Monsieur le Professeur Mazel, Madame le Docteur Jouffroy.

A mes chefs :
Cindy et Estelle (Dupondt), Anna, Philippe, Jean-Marc et Pascal.
Raphaël, Boubker, François, Lan, Gilles, Jacques et Anne.
Les docteurs Guingand, de Thomasson, Terracher, Balabaud et Conso.
Cyril, Thibaut, Damien, Etienne, Olivier.
Fred Z et Fred D.
Xavier, Charles, Thomas, Marc, Romain.
Fabrice, Julien, Dorrick et Raphaël.

Aux trappistes : Gildas, Frédéric et Guillaume.

A mes collègues, souvent dans le stress, souvent dans l'urgence, mais toujours dans le rire : Benoît, Thibaut, Jean-David, Nawal, Sébastien, Charlotte, Gautier, Anne-Laure, Virginie, Dany et Mohamed, Jean-Charles, Olivier, Jean, William, Florence, Idriss, Stéphane, Adrien, Guillaume et Antoine.

A l'équipe de Robert Debré : de la surveillante à l'aide soignant, du manip radio de nuit aux secrétaires et des urgences à l'hôpital de jour. Sans oublier l'équipe des panseuses et des urgentistes (Emilie, Mahmoud, Ravuth et Patrice).

A ma femme, Lucie.

A ma fille, Alice.

A mes parents.

A Laure et Jean-Louis.

Aux Thyebault, Guidat, Ciliberti, Pouplot, Doumergue, Viaris, Sevestre, Mignotte , Quenin, François, Poncet, Bokobza, Giammattei, Cavazza, Bernateau-Dayre et Susset.

Au Moogly's.

A Bastien.

A la Bidoche.

Aux Boula Matari.

A l'équipe du B2OA.

A Malik.

Aux Salles de Garde et à ceux qui les font vivre.

TABLE DES MATIÈRES

I. INTRODUCTION....11

1) Définition de la scoliose idiopathique de l'adolescent....12

2) Le plan sagittal dans la scoliose idiopathique de l'adolescent....13

3) Définition des objectifs de l'étude....17

a) Type d'étude, définition des besoins....17

b) Validation outil de mesure et repères anatomiques....17

i. Dans le plan frontal

ii. Dans le plan sagittal

iii. Distances sagittales

c) Analyse épidémiologique....21

d) Modifications après arthrodèse par voie postérieure....21

II. VALIDATION DE L'OUTIL DE MESURE....23

1) Matériel et méthodes....24

a) Patients....24

b) Sujets sains....24

c) Analyse radiologique....24

d) Analyse statistique....25

2) Résultats....26

a) Résultats démographiques....26

b) Résultats radiographiques....28

3) Discussion....31

a) Choix des repères....31

i. Les angles de Cobb sagittaux lombaires et thoraciques

ii. Les angles de Cobb sagittaux cervicaux

iii. Repère constitué par les conduits auditifs externes

b) Stéréoradiographie biplanaire basse dose (EOS).....33

c) Logiciel d'analyse d'imagerie.....33

d) Analyse statistique.....33

e) Influence de l'instrumentation postérieure sur la reproductibilité.....34

f) Valeurs moyennes des paramètres sagittaux chez le sujet sain.....34

g) Limites de l'étude de reproductibilité.....34

4) Conclusion.....35

III. ANALYSE EPIDEMIOLOGIQUE ET MODIFICATIONS DE L'EQUILIBRE SAGITTAL APRES ARTHRODESE PAR VOIE POSTERIEURE DANS LA SCOLIOSE IDIOPATHIQUE DE L'ADOLESCENT.....36

1) Matériels et méthodes.....37

a) Patients.....37

b) Stratégie chirurgicale.....38

c) Imagerie.....40

d) Analyse statistique.....40

2) Résultats.....40

a) Résultats démographiques.....40

b) Modifications du plan frontal.....41

c) Répartition des incidences pelviennes et de l'équilibre sagittal global selon le type de courbure frontale préopératoire.....43

d) Corrélations incidence pelvienne/paramètres sagittaux et équilibre sagittal global/paramètres sagittaux.....45

i. incidence pelvienne et paramètres sagittaux

ii. équilibre sagittal global et paramètres sagittaux

iii. Les trois types de déséquilibres préopératoires

iv. Les trois groupes d'incidences pelviennes

v. Incidence pelvienne et cyphose thoracique : les déterminants de l'équilibre sagittal préopératoire

e) Modifications après arthrodèse par voie postérieure.....54

i. Modifications de l'équilibre global

ii. Explications des modifications de l'équilibre global

iii. Analyse de la zone jonctionnelle proximale

iv. Correction de la cyphose thoracique globale (T1T12) en fonction du niveau supérieur d'arthrodèse

f) Analyse des échecs de la rééquilibration du plan sagittal.....78

IV. DISCUSSION.....83

1) Imagerie.....84

a) EOS.....84

b) Position lors de l'acquisition.....85

2) Validation de l'outil de mesure.....85

a) Pertinence de la validation.....85

b) Logiciel d'imagerie.....85

c) Utilisation des repères des conduits auditifs externes 86

d) Segmentation du rachis cervical.....87

3) Analyse de la cohorte.....88

a) Caractéristiques de la cohorte.....88

b) Classement des patients.....89

i. Equilibre sagittal global

ii. Incidence pelvienne

4) Résultats de l'analyse préopératoire.....90

a) Répartition des incidences pelviennes et des mesures de l'équilibre sagittal global selon le type de courbure frontale préopératoire.....90

i. incidence pelvienne et courbure frontale

ii. équilibre sagittal global et courbure frontale

b) Corrélation incidence pelvienne et paramètres sagittaux.....91

i. incidence pelvienne et lordose lombaire

ii. incidence pelvienne et équilibre sagittal global

iii. incidence pelvienne et autres paramètres sagittaux

c) Equilibre sagittal global (distance CAEH) et paramètres sagittaux.....92

d) Les trois groupes d'équilibre sagittal global préopératoire.....93

e) Les trois groupes d'incidences pelviennes.....93

f) Incidence pelvienne et cyphose thoracique préopératoires: les déterminants du déséquilibre sagittal.....94

5) Résultats de l'analyse postopératoire.....94

a) Correction du plan frontal.....95

b) Modifications de l'équilibre sagittal global après arthrodèse par voie postérieure.....95

i. Selon les groupes d'équilibre global préopératoire

ii. Selon les groupes d'incidences pelviennes

c) Analyse des modifications segmentaires après chirurgie.....96

i. Rachis cervical

ii. Rachis thoracique haut (T1T4)

iii. Rachis thoracique bas (T4T12)

iv. Rachis lombaire

v. zone jonctionnelle supérieure

vi. Correction de la cyphose thoracique globale (T1T12) en fonction du niveau supérieur d'arthrodèse

6) Implications : influence sur la prise en charge chirurgicale des adolescents atteints de scoliose idiopathique.....99

7) Limites de l'analyse du plan sagittal.....101

V. CONCLUSION.....102

Références bibliographiques.....107

Annexes : documents CNIL.....121

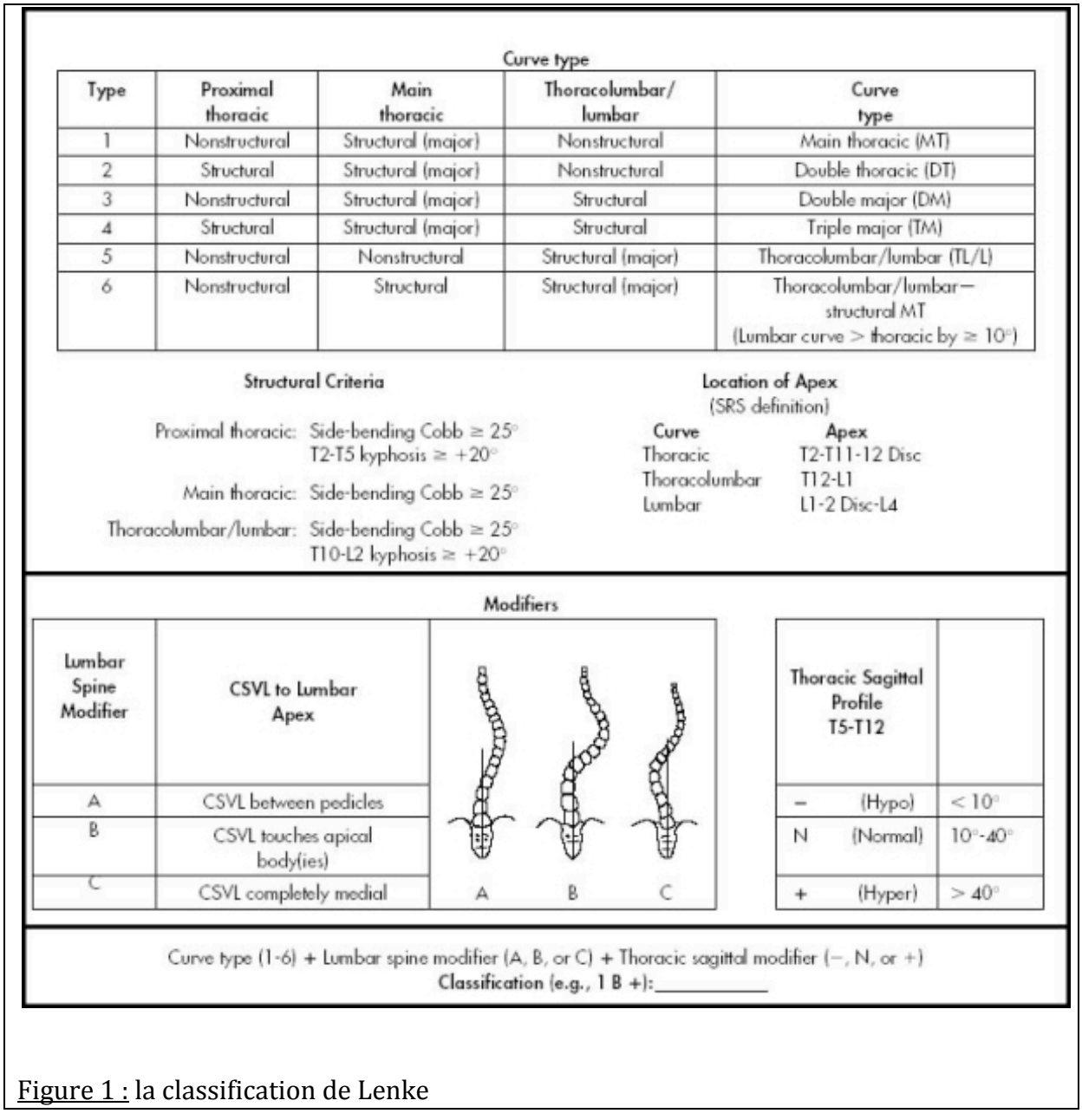
I. INTRODUCTION

1) Définition de la scoliose idiopathique de l'adolescent

La scoliose idiopathique de l'adolescent (SIA) est définie suivant la Scoliosis Research Society par une déformation de la colonne vertébrale de plus de 10° dans le plan frontal et axial (composante rotatoire) découverte entre l'âge de 10 et 18 ans n'ayant pas d'étiologie malformative, neurologique ou neuromusculaire ni congénitale (www.srs.org). Elle est appelée idiopathique en raison de l'absence d'étiologie uniciste à ce jour. Une composante génétique et une participation environnementale sont retrouvées (1 à 3). Il s'agit d'une pathologie dont la fréquence varie de 0.5% à 2% chez les 8-15 ans en France selon la Haute Autorité de Santé (4) et dont le pronostic est essentiellement fonctionnel avec l'apparition à l'âge adulte de douleurs rachidiennes souvent invalidantes (5) en rapport avec le déséquilibre sagittal et frontal, et/ou d'un préjudice esthétique dans les déformations importantes (6). Sur le plan anatomique, la SIA provoque une déformation tridimensionnelle complexe de la région rachidienne concernée aux composantes frontale, sagittale et rotatoire accompagnées de modifications compensatrices des régions adjacentes (7, 8). L'évolutivité de la maladie est en relation avec la croissance de l'adolescent (9, 10). En effet, bien que le primum movens ne soit pas identifié, il est établi que l'application d'une déformation segmentaire rachidienne sur une vertèbre en croissance évolue vers une auto-aggravation de la déformation en raison des contraintes asymétriques appliquées aux corps vertébraux (11). L'effet Hueter-Volkmann ou effet Delpech décrit ainsi l'évolution de ces déformations à l'échelle de chaque corps vertébral (11, 12, 13). L'évolution de la SIA non traitée est le plus souvent défavorable avec une aggravation des courbures dans les trois plans de l'espace précédant la structuralisation et l'enraidissement (14, 15). La fin de la croissance signe un ralentissement majeur de l'évolution des courbures (16), dont les corps vertébraux et les disques seront désormais soumis aux remaniements dégénératifs accélérés par des contraintes non physiologiques en rapport avec le déséquilibre frontal et/ou sagittal fixé (17, 18). L'atteinte de l'étage lombaire dans le plan frontal ou sagittal est un facteur de mauvais pronostic à l'âge adulte (19). A l'étage cervical, il a été montré une forte association entre cyphose cervicale, cervicalgies basses et dégénérescence précoce des étages adjacents aux fusions cervicales antérieures en cyphose (20, 21). De la même façon, le rachis cervical du sujet scoliotique en hypocyphose thoracique (native ou induite par la chirurgie) est soumis à une dégénérescence radiologique et clinique accélérée (22, 23).

2) Le plan sagittal dans la scoliose idiopathique de l'adolescent

De nombreuses études ont caractérisé les différents types de courbures dans le plan frontal et ont abouti à plusieurs classifications, la plus utilisée étant aujourd'hui celle définie par L. Lenke et al. (24). Cette dernière repose essentiellement sur le démembrement de la ou des courbures frontales. Le plan sagittal occupe dans cette classification une place accessoire sous forme d'un modificateur (figure 1) alors que l'on sait que le profil est constamment atteint dans les scolioses thoraciques (25, 26).



Curve type

Type	Proximal thoracic	Main thoracic	Thoracolumbar/ lumbar	Curve type
1	Nonstructural	Structural (major)	Nonstructural	Main thoracic (MT)
2	Structural	Structural (major)	Nonstructural	Double thoracic (DT)
3	Nonstructural	Structural (major)	Structural	Double major (DM)
4	Structural	Structural (major)	Structural	Triple major (TM)
5	Nonstructural	Nonstructural	Structural (major)	Thoracolumbar/lumbar (TL/L)
6	Nonstructural	Structural	Structural (major)	Thoracolumbar/lumbar— structural MT (Lumbar curve > thoracic by ≥ 10°)

Structural Criteria

Proximal thoracic: Side-bending Cobb ≥ 25°
T2-T5 kyphosis ≥ +20°

Main thoracic: Side-bending Cobb ≥ 25°

Thoracolumbar/lumbar: Side-bending Cobb ≥ 25°
T10-L2 kyphosis ≥ +20°

Location of Apex
(SRS definition)

Curve	Apex
Thoracic	T2-T11-12 Disc
Thoracolumbar	T12-L1
Lumbar	L1-2 Disc-L4

Modifiers

Lumbar Spine Modifier	CSVL to Lumbar Apex
A	CSVL between pedicles
B	CSVL touches apical body(ies)
C	CSVL completely medial

A B C

Thoracic Sagittal Profile T5-T12		
−	(Hypo)	< 10°
N	(Normal)	10°-40°
+	(Hyper)	> 40°

Curve type (1-6) + Lumbar spine modifier (A, B, or C) + Thoracic sagittal modifier (−, N, or +)
Classification (e.g., 1 B +):_____

Figure 1 : la classification de Lenke

La prise en charge thérapeutique chirurgicale s'est longtemps concentrée sur la correction du plan frontal. Les améliorations techniques permettent aujourd'hui

d'obtenir une correction des courbures de plus de 60% quelle que soit la stratégie d'instrumentation utilisée (27, 28).

Les montages initialement employés ont permis de progresser rapidement dans la correction frontale au prix de modifications sagittales qui ont été rapportées précocement (29, 30, 31). En effet, les instrumentations postérieures avec montages thoraciques sur crochets ne corrigent pas l'hypocyphose thoracique tandis que les vis pédiculaires sur toute la hauteur de l'arthrodèse aggravent l'hypocyphose thoracique (31, 32, 33, 34). Ceci peut amener à une situation de déséquilibre global postopératoire dans le plan sagittal qui est un facteur de mauvais résultat fonctionnel et mécanique à long terme (17, 35). Les montages antérieurs et antéro-latéraux ont aussi montré leurs limites en termes de correction du plan sagittal (36).

Les stratégies chirurgicales associant par voie postérieure les vis pédiculaires lombaires, clamps universels thoraciques et pince pédiculo-suslamaire supérieure (montage dit « hybride », voir figures 2 à 4) visent à aboutir à une correction frontale comparable aux autres techniques (37) tout en restaurant une cyphose thoracique physiologique et un équilibre sagittal global satisfaisant. Le mécanisme de la réduction des courbures frontales et sagittales des montages hybrides repose sur la translation postéro-médiale des étages thoraciques et la translation antéro-médiale des étages lombaires (38).



Figure 2 : Scoliose idiopathique de l'adolescent thoracique droite, clichés préopératoires

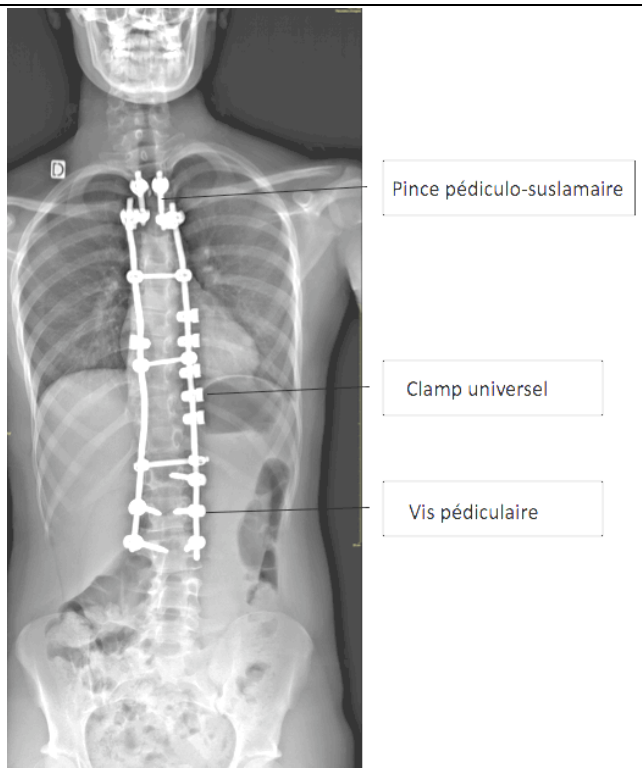


Figure 3 : face postopératoire tardive à 2 ans de la chirurgie. Instrumentation postérieure par montage hybride.

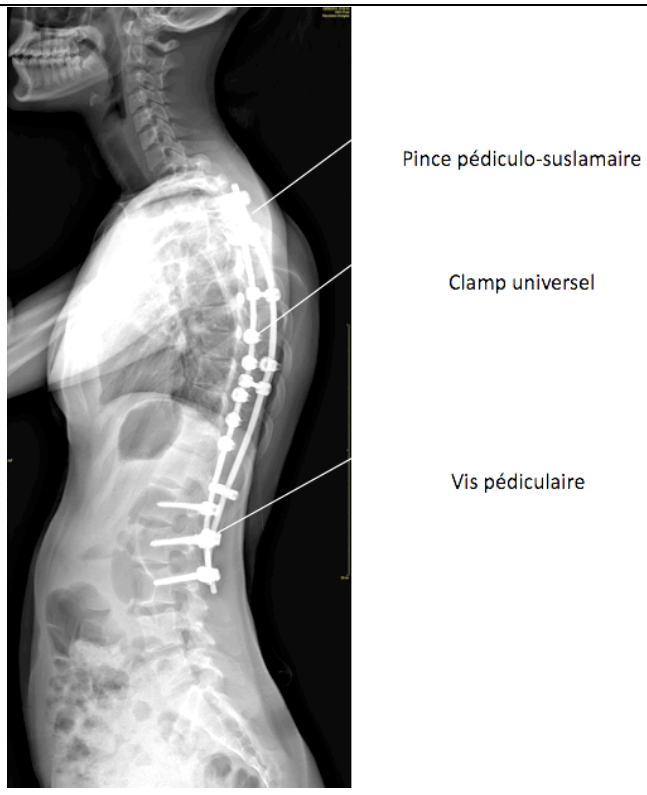


Figure 4 : profil postopératoire tardif à 2 ans de la chirurgie. Instrumentation postérieure par montage hybride.

A l'instar de ce qui a été décrit chez l'adulte, les courbures physiologiques du plan sagittal semblent régies par un paramètre fixe constitué par le bassin (39, 40, 41). Les paramètres pelviens évoluent au cours de la croissance jusqu'à la fin de l'adolescence (42, 43, 44, 45). Le plan sagittal du rachis évolue également avec la croissance et la station debout, en réponse aux forces de gravité qui lui sont appliquées (46, 47). L'anatomie du bassin définit de façon individuelle et fixée le rachis le plus distal (rachis lombaire) et il existe une relation linéaire entre les paramètres pelviens et la lordose lombaire chez l'adulte (46, 48). Il est licite de penser que le rachis de l'adolescent scoliotique est soumis à des lois de même ordre et les études qui tentent de caractériser ces relations sont peu nombreuses (15, 49, 50).

Conceptuellement, le rachis, qu'il soit statique ou en mouvement, est sur le plan sagittal une structure dynamique oscillant autour de sa position d'équilibre entre deux points fixes que sont le bassin et le crâne (51, 52, 53). Le rachis équilibré assure un regard horizontal et des conduits auditifs externes à l'aplomb du centre de rotation des hanches (53).

L'équilibre sagittal global du rachis est habituellement mesuré dans la littérature par la distance « C7 plumb line » qui correspond à la distance entre la verticale issue du centre du plateau inférieur de C7 et le bord antérieur de S1 (54). Cette approche est incomplète car elle n'intègre pas le rachis cervical dans son appréciation de l'équilibre sagittal global. Or les déformations sagittales de la scoliose idiopathique de l'adolescent aux niveaux thoracique (55) et/ou lombaire ont un retentissement sur l'équilibre global et affectent les patients dans le sens d'un déséquilibre antérieur ou postérieur que le rachis cervical, mobile et le plus souvent non déformé (sauf en cas de courbures proximales type Lenke 2 et 4 sévères) tente de compenser en ce cyphosant ou se lordosant (56, 57).

Sur le plan pathologique, il a été décrit chez le sujet scoliotique opéré et non opéré des modifications dégénératives précoces de la charnière cervico-thoracique que l'on peut mettre en rapport avec des anomalies de répartition des contraintes à cet étage, sus-jacent au rachis thoracique peu mobile dans le plan sagittal (58, 59, 60)

Il apparaît donc légitime d'apprécier l'équilibre sagittal global par une mesure intégrant le rachis cervical. Dans ce but, nous avons défini un repère radiologique sagittal simple : le milieu de la ligne réunissant les deux conduits auditifs externes. Nous avons

également scindé le rachis cervical et thoracique de façon à caractériser l'ensemble du plan sagittal cervico-thoracique en pré- et postopératoire.

3) Définition des objectifs de l'étude

a) Type d'étude, définition des besoins.

Notre but était de réaliser une étude la plus complète possible du plan sagittal du rachis scoliotique. Cette analyse devait inclure les modifications du plan sagittal apportées par la prise en charge chirurgicale à court et long terme.

Après avis favorable du Comité d'Ethique de notre établissement, nous avons travaillé sur une cohorte rétrospective monocentrique d'adolescents présentant une scoliose idiopathique pris en charge par trois opérateurs suivant les mêmes indications et les mêmes techniques opératoires. Il s'agit d'une étude d'imagerie reposant sur l'analyse de clichés de rachis entier de face et de profil grand format basse dose (système EOS, Biospace, Paris, France). Ce système d'imagerie offre l'avantage de permettre une acquisition synchrone de face et de profil du rachis entier avec une irradiation des patients inférieure de 10 fois aux radiographies traditionnelles (61), autorisant un suivi d'imagerie rapproché tel qu'il est préconisé dans la scoliose idiopathique de l'adolescent. Tous les clichés ont été analysés numériquement sur le logiciel Kodak Carestream (Kodac inc., Rochester, USA), outil simple, non spécifique à l'étude du rachis pédiatrique, facile d'accès et répandu. La base de données ainsi obtenue a été déclarée à la Commission Nationale Informatique et Libertés (documents en annexe).

b) Validation outil de mesure et repères anatomiques

De façon à obtenir des résultats interprétables, il nous a paru important de réaliser dans un premier temps une validation méthodologique des repères anatomiques et de l'outil de mesure utilisés.

Les angles et distances mesurés dans ce travail sont les suivants :

i. Dans le plan frontal (figure 5)

-angle de Cobb de la courbure principale : angle formé entre la droite tangente au plateau supérieur de la vertèbre la plus inclinée en crânial et la droite tangente au plateau inférieur de la vertèbre la plus inclinée en caudal

-vertèbre sommet : vertèbre de la courbure principale la plus translatée latéralement

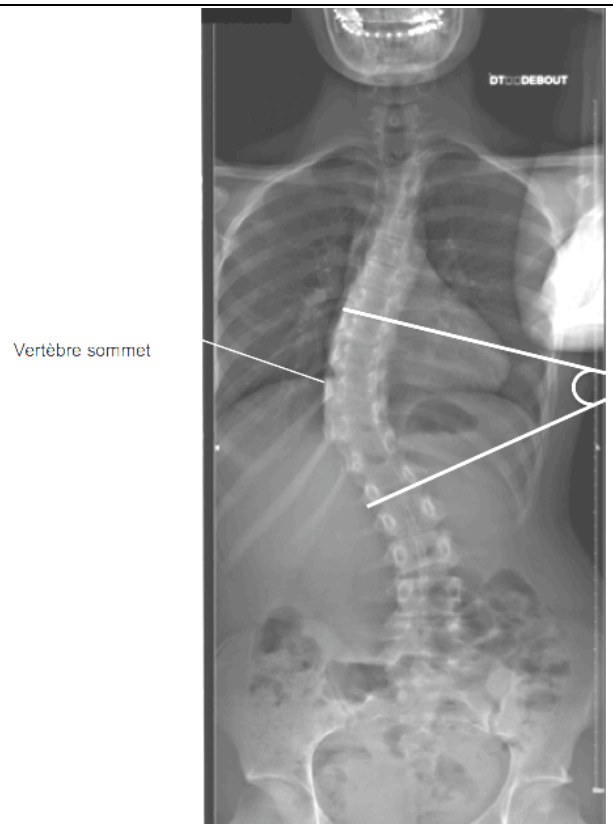


Figure 5 : angle de Cobb frontal et vertèbre sommet.

ii. Dans le plan sagittal (figures 6 à 9)

-Angle C1C3 : angle formé entre la tangente unissant la partie supérieure du processus antérieur et la partie supérieure du processus postérieur de la vertèbre C1 et la tangente au plateau inférieur de C3

-Angle C3C7 : angle formé entre la tangente au plateau supérieur de C3 et la tangente au plateau inférieur de C7

-Angle C2C6 : angle formé entre la tangente au plateau inférieur de C2 et plateau inférieur de C6

-Angle T1T4 (cyphose thoracique supérieure): angle formé entre la tangente au plateau supérieur de T1 et la tangente au plateau inférieur de T4

-Angle T4T12 (cyphose thoracique inférieure): angle formé entre la tangente au plateau supérieur de T4 et la tangente au plateau inférieur de T12

-Angle T1T12 (cyphose thoracique) : angle formé entre la tangente au plateau supérieur de T1 et la tangente au plateau inférieur de T12

-Angle L1L5 (lordose lombaire) : angle formé entre la tangente au plateau supérieur de L1 et la tangente au plateau inférieur de L5

-Incidence pelvienne (IP) : angle formé entre la droite passant par le milieu du segment unissant les deux têtes fémorales et le milieu du plateau supérieur de S1 et la droite perpendiculaire au plateau supérieur de S1 passant par le milieu de celui-ci

-Version pelvienne (VP) : angle formé entre la verticale et la droite passant par le milieu du segment unissant les deux têtes fémorales et le milieu du plateau supérieur de S1

-Pente sacrée (PS) : angle formé entre l'horizontale et la droite tangente au plateau supérieur de S1

IP, VP et PS sont appelés les paramètres pelviens et sont unis par la loi géométrique suivante : **IP = PS + VP**

Les paramètres pelviens sont représentés dans la figure suivante (figure 6) :

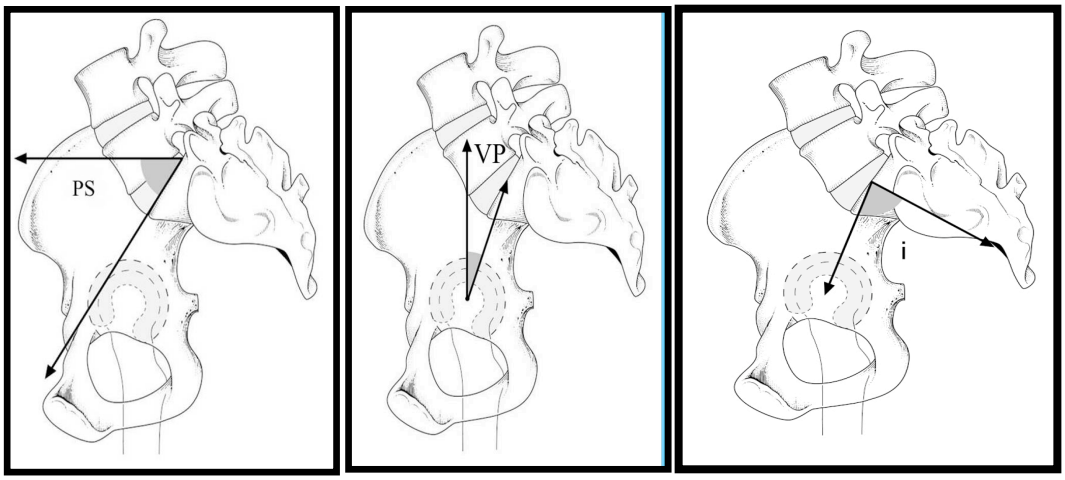


Figure 6 : les paramètres pelviens

iii. Distances sagittales

-C7 plumb line (C7PL) : distance entre l'angle postéro-supérieur du corps vertébral de S1 et la verticale issue du milieu du plateau inférieur de la vertèbre C7

-Plumb line du conduit auditif externe (CAEPL) : distance entre l'angle postéro-supérieur du corps vertébral de S1 et la verticale issue du milieu du segment unissant les deux conduits auditifs externes

-distance conduits auditifs externes-hanches (CAEH) : distance entre la verticale issue du milieu du segment unissant les deux conduits auditifs externes et la verticale issue du milieu du segment unissant les deux têtes fémorales

-distance conduits auditifs externes-C7PL (CAEC7) : distance entre la verticale issue du milieu du segment unissant les deux conduits auditifs externes et la verticale issue du milieu du plateau inférieur de la vertèbre C7

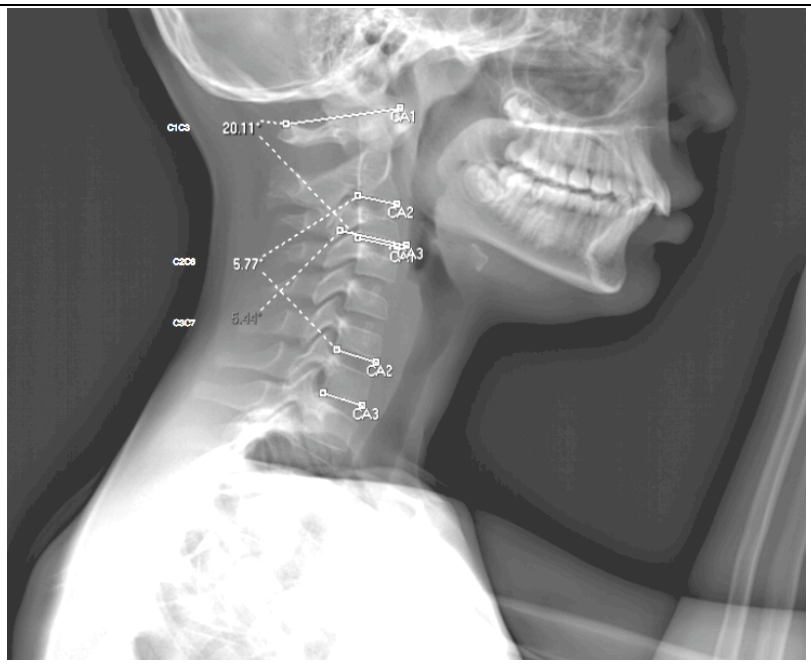


Figure 7: paramètres sagittaux cervicaux.

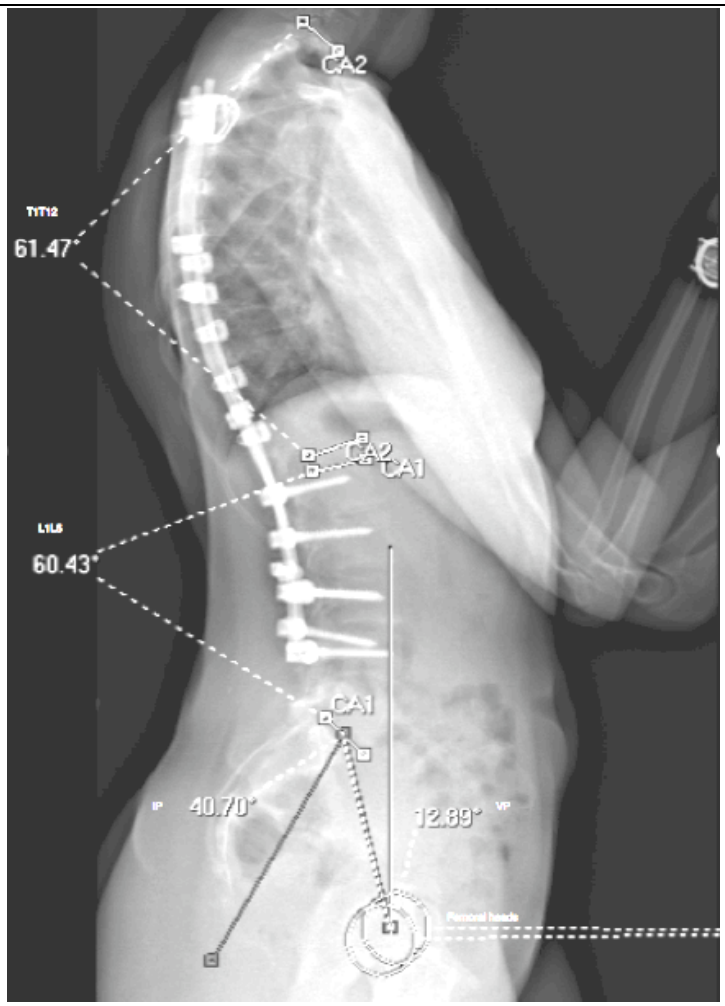


Figure 8: Incidence pelvienne, lordose lombaire et cyphose thoracique totale

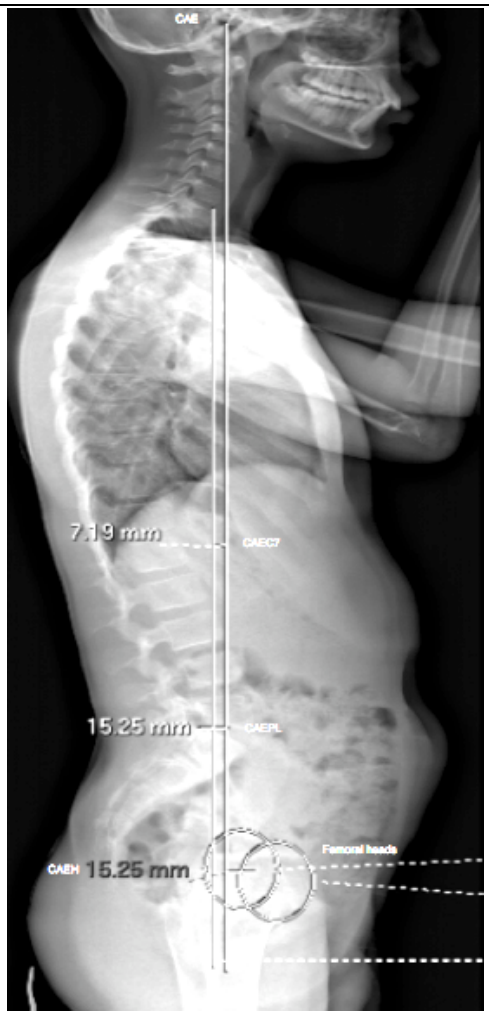


Figure 9: Paramètres d'équilibre sagittal. CAE plumb line (CAEPL), CAEH, CAEC7 et C7 plumb line (C7PL).

c) Analyse épidémiologique

A l'aide des repères décrits, nous avons dans la seconde partie de notre travail réalisé l'analyse descriptive de la répartition des paramètres pelviens (IP) et de l'équilibre sagittal global (CAEH) suivant les types de courbures frontales. Nous avons également cherché à identifier l'existence de corrélations entre les paramètres pelviens et les paramètres sagittaux, et entre l'équilibre sagittal global et les paramètres sagittaux.

d) Modifications après arthrodèse par voie postérieure

Tous les patients inclus dans la cohorte ont été opérés en utilisant la même technique chirurgicale, comme décrit plus haut. Dans la troisième partie de notre travail, les paramètres du plan sagittal ont été recueillis en postopératoire précoce (3 mois) et en postopératoire tardif (2 ans) par l'analyse de l'imagerie.

Les modifications de l'équilibre sagittal global ont été rapportées puis détaillées. L'analyse des modifications des paramètres segmentaires a été réalisée, en mettant l'accent sur les modifications de l'étage cervical et de l'étage thoracique.

L'ensemble de notre travail vise à caractériser les modifications du plan sagittal chez le sujet atteint de scoliose idiopathique de l'adolescent en pré- et postopératoire sdans le but d'identifier précisément les mécanismes d'adaptation et les facteurs de risque de déséquilibre sagittal global.

II. VALIDATION DE L'OUTIL DE MESURE

Dans la première partie de notre étude, nous avons réalisé la validation méthodologique des repères et de l'outil de mesure utilisés.

1) Matériel et méthodes

a) Patients

Après approbation du Comité d'Ethique de notre établissement, 50 patients suivis dans notre institution pour scolioses idiopathiques de l'adolescent de type Lenke 1 et 2 (figure 1) ont été inclus dans cette partie de l'étude. Deux groupes ont été individualisés : vingt-cinq sujets présentant une scoliose non opérée et 25 sujets scoliotiques opérés pour correction/fusion par voie postérieure utilisant des montages hybrides associant vis pédiculaires aux étages lombaires, clamps universels aux étages thoraciques et pince pédiculo-suslamaire à la partie supérieure du montage (figures 3 et 4).

b) Contrôles

Vingt-cinq sujets sains ont été choisis de façon aléatoire dans la base de données d'imagerie de notre établissement.

Tous les sujets ont été appariés par âge et sexe. Les critères d'inclusion étaient un âge compris entre 7 et 18 ans, la disponibilité de stéréoradiographies basse dose de rachis entier en position standardisée. Tous les apparentés du premier degré des sujets contrôle ont eu un examen clinique et un cliché de rachis entier de face et de profil pour le dépistage de la scoliose idiopathique de l'adolescent. Les sujets contrôles présentant une déformation rachidienne dans le plan frontal/sagittal, une anomalie transitionnelle, un antécédent chirurgical rachidien, un spondylolisthésis ou une densité osseuse inhabituelle ont été exclus.

c) Analyse radiologique

Tous les patients ont eu une stéréoradiographie biplanaire basse dose (EOS, EOS Imaging, Paris, France). La position standard debout était définie par un regard horizontal et les poings sur les clavicules de façon à éviter la projection de la superposition des bras sur le rachis (62).

L'acquisition des images ont été réalisées depuis les orbites jusqu'au tiers proximal des fémurs. Les images n'incluant pas le rachis en totalité entre les orbites et les articulations coxofémorales ont été exclues.

La mesure numérique des angles et distances a été menée sur un outil répandu et facile à utiliser (Kodak Carestream, Rochester, NY, USA). Les 75 radiographies EOS étaient analysables, en faisant au besoin varier le contraste ou la luminosité pour identifier au mieux les repères osseux.

Les radiographies de rachis entier ont été analysées à deux reprises en ordre aléatoire avec un intervalle d'une semaine par trois observateurs indépendants : un chirurgien orthopédiste pédiatre sénior, un radiologue pédiatre sénior et un interne de chirurgie orthopédique pédiatrique (au total, 4950 mesures ont été réalisées).

Cinq radiographies de rachis entier ont été utilisées par les trois observateurs comme exercice d'entraînement commun puis exclues de l'étude.

Les observateurs ont recueilli 10 mesures d'angles et de distances (tels que définis plus haut) pour chaque radiographie : C1C3, C3C7, C2C6, T1T12, L1L5, IP, CAEH, C7PL, CAEPL, CAEC7.

d) Analyse statistique

L'analyse statistique a été menée sur le logiciel Prism V5 (GraphPad Software Inc., La Jolla, CA, USA). La corrélation intraobservateur a été mesurée par le coefficient de régression linéaire r de Pearson. Le coefficient de corrélation interobservateur (ICC) a été utilisé pour apprécier la reproductibilité interobservateur, complétée par le test de Bland et Altman par paires pour la détection des erreurs systématiques (63, 64). L'ICC illustre la proportion de variabilité globale due à la variabilité de la mesure entre deux observateurs.

La comparaison des coefficients r de Pearson au sein de chaque groupe de patient (soit sujets sains, SIA non opérées, SIA opérées) a été menée en utilisant le test t de Student. Le seuil de significativité retenu était de $p<0.05$.

Comme décrit par Rosner (65), une valeur d'ICC inférieure à 0.40 signifie une faible reproductibilité ; des valeurs comprises entre 0.40 et 0.75 indiquent une assez bonne reproductibilité ; des valeurs d'ICC supérieures à 0.75 signifient une excellente reproductibilité.

Le test de Bland et Altman permet d'avoir une approche graphique du biais existant entre les données issues des analyses de deux opérateurs et autorise la détection de différences spécifiques (l'accord entre deux observateurs dépendant de l'importance de la distance mesurée ou de la valeur de l'angle) qui ne sont pas mises en évidence par l'ICC.

2) Résultats

a) Résultats démographiques (tableau 1)

L'âge moyen du groupe des patients sains était de 12.2 ± 3.2 ans. Le sex ratio était de 17 filles pour 8 garçons. L'âge moyen du groupe des SIA non opérées était de 11.7 ± 1.1 ans. Le sex ratio était de 19 filles pour 6 garçons. L'âge moyen du groupe des SIA opérées était de 12 ± 2.5 ans. Le sex ratio était de 18 filles pour 7 garçons. Il n'existait pas de différence significative entre les trois groupes sur le plan démographique.

		Sujets sains	SIA non opérées	SIA opérées	p
Age (ans)	Moyenne	12.2	11.6	12	n.s.
	Ecart type	3.2	1.1	2.5	n.s.
Sex ratio		17F/8M	19/6M	18F/7M	n.s.

Tableau 1 : Données démographiques. SIA : scoliose idiopathique de l'adolescent. Aucune différence n'a été retrouvée entre les 3 groupes.

Nous avons regroupé les valeurs moyennes obtenues dans le groupe des patients sains dans le tableau 2 :

	Moyenne (écart type)
C1C3°	21.6 (10.8)
C3C7°	6 (7.1)
C2C6°	8.4 (10.9)
T1T12°	35.5 (10.8)
L1L5°	40.4 (11.1)
IP°	53.7 (9.4)
CAEPL mm	19.1 (27.7)
CAEH mm	-1.2 (27.9)
C7PL mm	14.7 (18.8)
CAEC7 mm	5.9 (15.2)

Tableau 2 : valeurs moyennes des paramètres sagittaux chez le sujet sain.

b) Résultats radiographiques

Les reproductibilités inter et intraobservateurs au sein de chaque groupe sont résumées dans le tableau 3.

	Observateur 1			
	Contrôles	n/o SIA	SIA opérées	
r moyenne	0.934	0.901	0.947	
r écart type	0.031	0.078	0.033	n.s.
	Observateur 2			
	Contrôles	n/o SIA	SIA opérées	
r moyenne	0.875	0.853	0.903	
r écart type	0.044	0.108	0.097	n.s.
	Observateur 3			
	Contrôles	n/o SIA	SIA opérées	
r moyenne	0.912	0.893	0.955	
r écart type	0.046	0.079	0.039	n.s.
	Interobservateur			
	Contrôles	n/o SIA	SIA opérées	
r moyenne	0.918	0.938	0.959	
r écart type	0.012	0.044	0.039	n.s.

Tableau 3: Comparaison du coefficient de corrélation intraobservateur (r de Pearson) chez les sujets contrôles, les sujets scoliotiques non opérés (n/o SIA) et les sujets scoliotiques opérés pour chaque observateur et entre les trois observateurs.

Il n'existait pas de différence significative entre les trois groupes sur l'ICC, signifiant que les fiabilités inter et intraobservateur n'étaient pas modifiées par la déformation rachidienne et/ou par la présence de matériel d'ostéosynthèse.

Coefficients de corrélation pour chaque mesure d'angle ou de distance (tableau 4):

	Observateur 1			Observateur 2			Observateur 3			Interobservateur	
	r	95% CI	p	r	IC 95%	p	r	IC 95%	p	ICC	p
C1C3	0.949	0.9356 à 0.9896	$<10^{-4}$	0.932	0.9150 à 0.9861	$<10^{-4}$	0.955	0.9437 à 0.974	$<10^{-4}$	0.954	$<10^{-4}$
C3C7	0.917	0.8962 à 0.9829	$<10^{-4}$	0.879	0.8500 à 0.9748	$<10^{-3}$	0.892	0.8794 à 0.9436	$<10^{-3}$	0.846	$<10^{-3}$
C2C6	0.889	0.8616 à 0.9768	$<10^{-3}$	0.847	0.8106 à 0.9676	$<10^{-4}$	0.871	0.8534 à 0.9222	$<10^{-3}$	0.947	$<10^{-4}$
T1T12	0.910	0.8872 à 0.9813	$<10^{-3}$	0.840	0.8027 à 0.9661	$<10^{-4}$	0.934	0.9121 à 0.9674	$<10^{-4}$	0.803	$<10^{-4}$
L1L5	0.947	0.9341 à 0.9893	$<10^{-4}$	0.911	0.8890 à 0.9817	$<10^{-3}$	0.953	0.9437 à 0.9721	$<10^{-4}$	0.843	$<10^{-3}$
VP	0.962	0.9517 à 0.9922	$<10^{-4}$	0.809	0.7650 à 0.9589	$<10^{-4}$	0.933	0.8568 à 0.9836	$<10^{-4}$	0.937	$<10^{-3}$
IP	0.944	0.8862 à 0.9813	$<10^{-4}$	0.894	0.8067 à 0.9561	$<10^{-3}$	0.922	0.8568 à 0.9846	$<10^{-4}$	0.948	$<10^{-4}$
C7PL	0.998	0.9972 à 0.9996	$<10^{-4}$	0.936	0.9200 à 0.9870	$<10^{-4}$	0.965	0.9457 à 0.9721	$<10^{-4}$	0.991	$<10^{-4}$
CAEPL	0.999	0.9992 à 0.9999	$<10^{-4}$	0.947	0.9336 à 0.9892	$<10^{-4}$	0.964	0.9093 à 0.984	$<10^{-4}$	0.967	$<10^{-4}$
CAEH	0.997	0.9959 à 0.9994	$<10^{-4}$	0.924	0.8879 à 0.97137	$<10^{-4}$	0.965	0.9192 à 0.9866	$<10^{-4}$	0.971	$<10^{-4}$
CAEC7	0.997	0.9959 à 0.9994	$<10^{-4}$	0.953	0.9407 à 0.9904	$<10^{-4}$	0.927	0.8739 à 0.9546	$<10^{-4}$	0.905	$<10^{-3}$
Moyenne	0.955			0.897			0.935			0.919	
Ecart type	*0.038*			*0.046*			*0.029*			*0.059*	

Tableau 4: Reproductibilité intra- (coefficient r de Pearson) et interobservateur (ICC : Intraclass Correlation Coefficient) avec intervalle de confiance (CI). Tous les paramètres ont une excellente fiabilité.

Pour le premier observateur, r s'échelonnait de 0.889 (+/- 2 déviations standard (SD) : 0.8616-0.9768) à 0.999 (0.9992-0.9999), le r le plus élevé était obtenu pour la distance CAEPL et le plus bas était obtenu pour l'angle C2C6.

Pour le second observateur, la valeur de r était comprise entre 0.840 (0.8027-0.9661) et 0.953 (0.9407-0.9904), la valeur la plus élevée étant pour la distance CAEC7 et la plus basse pour l'angle T1T12.

Pour le troisième observateur, r s'échelonnait de 0.871 (0.8534-0.9222) à 0.965 (0.9192-0.9866). La valeur de r la plus haute était pour la distance CAEH, la plus basse pour l'angle C2C6.

L'ICC était compris entre 0.803 (angle T1T12) et 0.991 (C7PL), correspondant à une excellente reproductibilité interobservateur.

L'analyse graphique de Bland et Altman reflète les différences observées entre deux opérateurs en fonction de la moyenne de la mesure (angle ou distance) sur la même radiographie. Les points inclus entre les lignes +2 SD et -2SD sont considérés comme des indices d'excellente reproductibilité interobservateur. Cette analyse n'a pas montré d'erreur systématique entre les observateurs pris deux à deux. Nous montrons ici trois exemples de cette analyse graphique (figures 10 à 12).

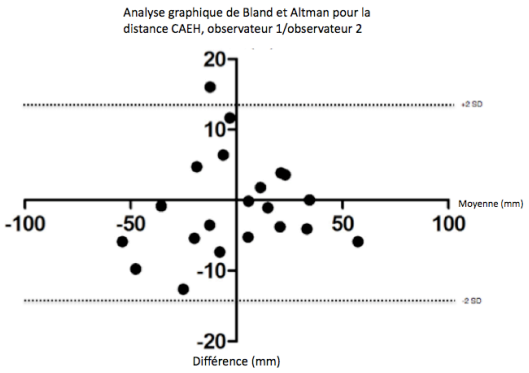


Figure 10

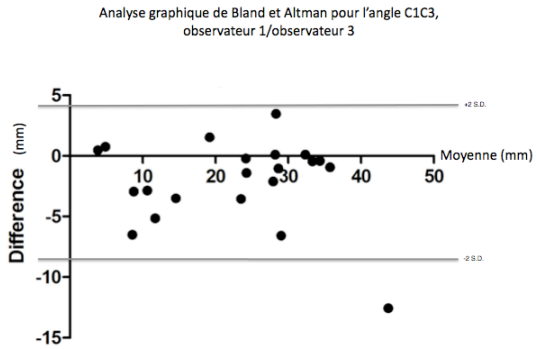


Figure 11

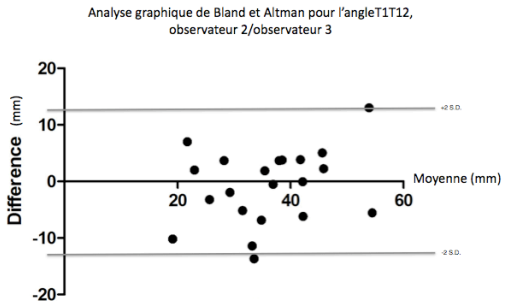


Figure 12

3) Discussion

A notre connaissance, une seule étude de reproductibilité portant sur des repères d'anatomie radiologique rachidiens a été publiée à ce jour (66). Dans cette étude, Dang et al. ont réalisé une étude de reproductibilité de mesures radiographiques (sur radiographies analogiques standard de rachis entier debout de face et de profil) avec deux observateurs et 17 patients atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent non opérés. Les paramètres recueillis portaient sur le plan frontal et sur le plan sagittal. Dans le plan sagittal, la lordose lombaire était mesurée par l'angle de Cobb sagittal T12S1 et T10L2, de la cyphose thoracique par les angles T5T12, T2T5, T2T12 et l'équilibre sagittal apprécié par la C7 plumb-line. Leurs résultats montrent une excellente reproductibilité inter et intraobservateurs pour tous les paramètres sagittaux sauf la cyphose thoracique. L'explication apportée au défaut de reproductibilité sur ces paramètres repose selon les auteurs sur la superposition fréquente de la cage thoracique sur le rachis de profil chez les patients présentant une gibbosité. Nous n'avons pour notre part pas rencontré cette difficulté grâce à la possibilité de variation des contrastes apportée par l'outil d'analyse d'imagerie

Il nous est apparu nécessaire de nous poser la question de la fiabilité des repères choisis autant que du logiciel employé dans notre étude avant de les utiliser pour les analyses à venir dans les autres parties de ce travail.

a) Choix des repères

i. Les angles de Cobb sagittaux lombaires et thoraciques

L'étude de reproductibilité a utilisé des angles de Cobb sagittaux lombaires et thoraciques largement décrits pour mesurer la lordose lombaire et la cyphose thoracique. Les valeurs des reproductibilités inter- et intraobservateurs trouvées ici sont comparables à celles rapportées lors de la lecture de radiographies conventionnelles (67).

ii. Les angles de Cobb cervicaux sagittaux

La lordose cervicale totale était appréciée par l'angle sagittal C2C6 (58). Il a été choisi de diviser le segment cervical en deux parties distinctes : le rachis cervical supérieur (C1C3) et le rachis cervical inférieur (C3C7). La segmentation du rachis cervical avec un

seuil en C3 présente l'intérêt de séparer le rachis cervical supérieur, plus mobile, du rachis cervical inférieur. L'angle C1C3 reflète la position de la tête et en particulier des orbites lorsque le sujet a le regard horizontal. La lordose cervicale inférieure (angle C3C7) est soumise à de moindres variations que l'angle C1C3 et est plus directement reliée à la courbure sagittale du rachis thoracique. L'angle C3C7 est donc potentiellement un reflet des modifications sagittales d'adaptation au rachis thoracique sous-jacent. Nous avons trouvé une excellente fiabilité de la mesure de ces paramètres (r s'échelonnant de 0.847 à 0.955, ICC de 0.846 à 0.954).

iii. Intérêt du repère du constitué par les conduits auditifs externes

Les études s'intéressant à l'équilibre sagittal utilisent très majoritairement la C7 plumb line pour apprécier l'équilibre global. Or cette distance horizontale n'est pas significativement corrélée à la ligne verticale issue du centre de gravité du patient (68) et n'est donc pas parfaitement représentative de son équilibre sagittal global. En effet, cette mesure ne prend pas en compte la participation du rachis cervical dans l'équilibre sagittal global du rachis.

Les conduits auditifs externes (CAE) sont anatomiquement localisés au sommet du rachis cervical et sont physiquement très proches des centres de l'équilibre situés dans les conduits auditifs internes. Leur position sagittale peut facilement définir un repère pertinent pour l'équilibre sagittal global du rachis. L'identification des CAE sur les radiographies de rachis entier de profil est aisée mais n'est pas toujours réalisable sur les radiographies conventionnelles en raison du besoin de limiter l'irradiation des patients.

Les mesures des distances utilisant le repère du CAE ont montré une excellente reproductibilité (r de Pearson compris entre 0.924 et 0.999 et ICC de 0.905 à 0.971), indiquant que les CAE sont des repères radiologiques fiables utilisables lors de l'analyse de l'équilibre sagittal global du rachis.

L'analyse de l'équilibre frontal reposant sur des mesures comportant comme repère le milieu du segment unissant les deux conduits auditifs externes de face est réalisable. Les caractéristiques anatomiques des conduits auditifs externes de profil sont aussi intéressantes pour l'analyse de l'équilibre de face incluant la participation du rachis cervical. Ceci nécessitera d'être exploré dans d'autres travaux.

b) Stéréoradiographie biplanaire basse dose (EOS)

Le contour sagittal global peut être facilement analysé avec une excellente reproductibilité en utilisant le système EOS comme montré dans cette partie de notre travail. L'imagerie bidimensionnelle EOS est intéressante pour de multiples raisons. Elle permet l'acquisition rapide de radiographies numériques avec une dose d'irradiation six à dix fois moindre que les radiographies conventionnelles. Il est alors plus simple d'avoir des radiographies étendues montrant le rachis cervical en entier avec la tête et les conduits auditifs externes. Puisque l'acquisition est directement bidimensionnelle (la source de rayons X et le détecteur ont un mouvement de translation parallèle synchronisé), les distances et les angles peuvent être mesurés sans biais de projection.

L'acquisition d'un cliché EOS de rachis entier dure dix à quinze secondes, suivant la taille du sujet. Durant ce temps d'acquisition, les sujets ne doivent pas respirer. Aucun problème de qualité d'image (flou dû au mouvement) n'a été rapporté sur notre série.

Les propriétés de basse irradiation et les possibilités de reconstruction tridimensionnelle apportées par l'imagerie EOS expliquent son utilisation de plus en plus large. En particulier, ce système d'imagerie se justifie dans le suivi des pathologies osseuses chroniques nécessitant des clichés répétés (69, 70, 71, 72).

c) Logiciel d'analyse d'imagerie (Kodak Carestream)

Toutes les images ont été numériquement analysées avec un logiciel simple et répandu, installé sur chacun des postes de travail informatique de notre établissement. Ce logiciel est couramment utilisé pour analyser les radiographies conventionnelles et pour mesurer des angles et des distances. Les résultats de reproductibilité que nous avons trouvé dans cette étude indiquent qu'il est possible –et fiable- d'utiliser un outil numérique très simple pour réaliser l'analyse fine du profil sagittal.

d) Analyse statistique

L'ICC a été utilisé à la place du coefficient de corrélation kappa de façon à être capable d'analyser les données issues de trois observateurs indépendants avec un outil statistique suffisamment robuste et adapté.

Le test de Bland et Altman était pertinent, son analyse graphique permettant de visualiser directement le degré d'accord entre deux observateurs en fonction de la valeur de la mesure concernée. Cette méthode permet d'identifier avec acuité un biais

interobservateur quand un observateur sur- ou sous-évalue systématiquement la mesure, ce qui se révèle impossible à effectuer avec un autre test statistique accessible. Dix paramètres testés sur soixante-quinze radiographies (trois groupes de vingt-cinq) lues par trois observateurs, analysés par un test de Bland et Altman par paires représentent quatre-vingt dix graphiques. Nous avons choisi de ne pas tous les représenter ici, sachant que leurs résultats sont grossièrement identiques.

e) Influence de l'instrumentation postérieure sur la reproductibilité

L'identification des repères radiologiques peut être perturbée par la superposition du matériel d'instrumentation postérieure. Il est licite de penser que ceci pourrait influencer la reproductibilité des mesures réalisées. Il a été récemment montré que la présence de matériel de synthèse postérieur n'induisait pas de différence de répétabilité sur les mesures sagittales aux niveaux thoraciques et lombaires sur les reconstructions tridimensionnelles issues du système EOS (73). Dans notre étude, une reproductibilité d'excellent niveau a été montrée sur tous les paramètres sagittaux en postopératoire. De plus, aucune différence de reproductibilité n'a été trouvée entre les trois groupes de patients. Ces résultats indiquent que ni la présence d'instrumentation postérieure ni le degré de déformation sagittale ou rotationnelle du rachis n'influencent la fiabilité des repères radiologiques évalués dans notre étude.

f) Valeurs moyennes des paramètres sagittaux chez les sujets sains

Le groupe des patients sains nous a permis d'établir des valeurs normales des différents paramètres sagittaux chez l'adolescent. Ainsi, nous pouvons retenir que l'équilibre sagittal global neutre correspond à une distance CAEH très faible. La limite est le nombre insuffisant de patients, ne permettant pas d'obtenir une puissance suffisante sur des paramètres d'une grande variabilité. Nous devons pouvoir nous appuyer sur une étude descriptive de cohorte réalisée sur un plus grand nombre de sujets sains de façon à obtenir des normes méthodologiquement solides.

g) Limites de l'étude de reproductibilité

Nous validons ici un outil simple permettant l'analyse du contour sagittal du rachis. Les 50 patients scoliotiques choisis dans cette étude étaient classés Lenke 1 et 2. Les autres types de déformations n'ont pas été testés, et la reproductibilité des paramètres

cervicaux pourrait être moins élevée sur les patients porteurs de courbures de type Lenke 4, la courbure la plus proximale induisant une composante rotationnelle des corps vertébraux et rendant de ce fait l'identification des repères radiologiques plus difficile.

Le but de cette étude était de valider un outil de mesure de façon à pouvoir l'utiliser dans le reste de notre travail sur le plan sagittal du rachis scoliotique avec une acuité méthodologique satisfaisante. Il a été choisi d'analyser vingt-cinq patients par groupe en raison de la puissance suffisante apportée par cet effectif dans la caractérisation de l'accord inter- et intraobservateur (65).

4) Conclusion

Cette partie de notre étude a permis de montrer que la lordose cervicale et l'équilibre sagittal global peuvent être aisément mesurés à l'aide d'un outil simple et facile d'accès avec une très bonne fiabilité. Le profil du rachis cervical peut être abordé avec l'angle sagittal C1C3 pour la partie supérieure la plus mobile, par l'angle C3C7 pour le rachis cervical inférieur et par l'angle C2C6 pour la courbure sagittale globale.

Les conduits auditifs externes se sont révélés d'excellents repères dans l'appréciation de l'équilibre sagittal global. Les plumb lines utilisant le repère du CAE (CAEPL, CAEH) ont un intérêt majeur pour la mesure de l'équilibre sagittal global car ces mesures prennent en compte la participation du rachis cervical dans l'équilibre sagittal, ce qui n'avait pas été décrit à notre connaissance.

Cet outil, solide sur le plan méthodologique, sera utilisé dans les autres parties de notre travail.

III. Analyse épidémiologique et modifications de l'équilibre sagittal après arthrodèse par voie postérieure dans la scoliose idiopathique de l'adolescent

1) Matériels et méthodes

a) Patients

Nous avons revu de façon rétrospective les données collectées prospectivement de 154 patients atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent suivis dans notre établissement et opérés entre 2008 et 2011, présentant des courbures Lenke 1, 2, 3, 5 et 6.

Les caractéristiques démographiques de la cohorte sont résumées dans les tableaux 5 et 6.

La répartition des courbures frontales selon Lenke et la distribution de la vertèbre apicale au sein de la cohorte sont représentées par les figures 13 et 14.

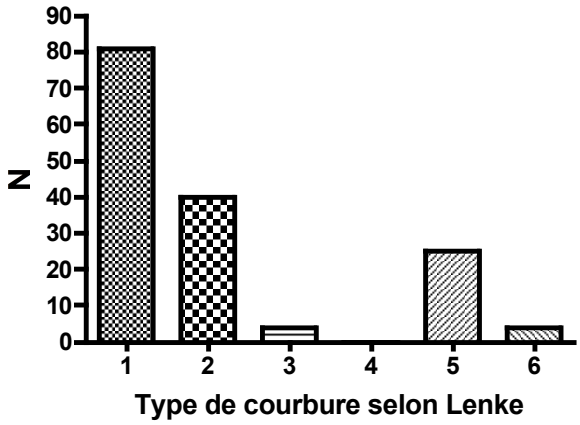


Figure 13

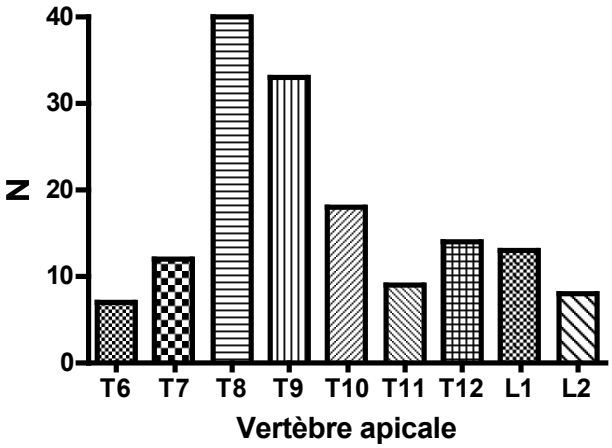


Figure 14

Les critères d'inclusion étaient : scoliose idiopathique de l'adolescent telle que définie plus haut (critères de la SRS), dossier d'imagerie complet comportant les clichés stéréoradiographiques de rachis entier debout de face et de profil (EOS) en préopératoire immédiat, postopératoire précoce à 3 mois et postopératoire tardif à 2 ans de la chirurgie. Les critères d'exclusion étaient : présence d'un spondylolisthésis, antécédent de chirurgie rachidienne, antécédent familial au premier degré d'une scoliose non idiopathique, densité osseuse inhabituelle. Tous les dossiers incomplets étaient rejetés.

Les patients ont été classés en trois catégories selon leur équilibre sagittal global préopératoire apprécié par la distance CAEH :

-déséquilibre antérieur pour une distance CAEH supérieure à 5mm : groupe I (n=72)

-pas de déséquilibre pour une distance CAEH comprise entre –5mm et 5mm : groupe II (n=20)

-déséquilibre postérieur pour une distance CAEH inférieure à –5mm : groupe III (n=62)

Le même type de classement a été effectué en prenant la distance C7PL comme référence de l'équilibre sagittal (normes définies selon Mac-Thiong et al (44)):

-déséquilibre antérieur pour une distance C7PL positive

-pas de déséquilibre pour une distance C7PL comprise entre -30mm et 0

-déséquilibre postérieur pour une distance C7PL inférieure à -30mm

Les patients ont d'autre part été classés en trois groupes selon leur incidence pelvienne (30, 31) :

-faible incidence pelvienne (faible IP, FIP) : IP<44°

-incidence pelvienne moyenne (Moyenne IP, MIP) : 44°<IP<62°

-forte incidence pelvienne (Haute IP, HIP) : IP>62°

b) Stratégie chirurgicale

Les patients ont été opérés par l'un des trois opérateurs séniors du service en suivant la même stratégie chirurgicale et en utilisant le même matériel. L'indication chirurgicale et ses modalités étaient retenues après concertation en réunion de service. La correction et la fusion postéro-latérale par voie postérieure avec adjonction de substitut osseux (bioverre, Novabone, Novabone Products, Alachua, Floride, USA) étaient réalisées en un

temps postérieur unique à l'aide d'un montage hybride tel que décrit par Mazda et al. (38) incluant vis pédiculaires aux étages lombaires (deux à trois vis monoaxiales du côté convexe et une à deux polyaxiales du côté concave), clamps universels aux étages thoraciques (cinq à sept du côté concave, un au sommet de la convexité) et pince pédiculo-sous-lamaires sur les deux étages les plus proximaux. Les tiges longitudinales utilisées étaient en titane pur. La réduction des courbures reposait sur la translation postéro-médiale du rachis thoracique et la translation antéro-médiale du rachis lombaire. Les manœuvres de compression-distraction aux extrémités du montage permettaient d'assurer l'horizontalité du plateau supérieur de T1 et du plateau inférieur de la dernière vertèbre arthrodésée, contrôlée par un cliché radiographique grand format peropératoire. L'intervention était réalisée en décubitus ventral sur table de Jackson sous monitoring continu des potentiels évoqués moteurs et somesthésiques.

La planification des niveaux supérieurs et inférieurs des montages suivait les recommandations suivantes :

-niveau inférieur : la dernière vertèbre arthrodésée doit être en zone de stabilité (corps vertébral inclus entre les lignes verticales issues des articulations sacro-iliaques selon Harrington (74) ou corps vertébral traversé par la ligne centrale du sacrum), neutre sur le plan rotatoire (75, 76), non cunéiformisée et située au-dessus d'un disque mobile (77). Nous laissons toujours au moins deux disques mobiles en-dessous du montage (jamais de fusion incluant la dernière vertèbre lombaire) en raison des phénomènes dégénératifs accélérés rencontrés dans le cas contraire (78, 79, 80, 81, 82). Dans les cas où une fusion étendue au dernier niveau lombaire est théoriquement indiquée, l'attitude de notre équipe consiste à retarder l'intervention autant que possible pour préserver la mobilité, allant jusqu'à n'intervenir qu'à l'âge adulte en cas d'apparition de douleurs lombaires.

-niveau supérieur : le choix du niveau proximal d'arthrodèse repose sur les principes exposés par Ilharreborde et al. (83). Il s'agit de planifier le niveau supérieur en fonction de la raideur de la contre-courbure thoracique et de l'effet prévisible de la réduction des courbures sous-jacentes sur l'inclinaison frontale du plateau supérieur de T1 et sur la hauteur des épaules.

c) Imagerie

Tous les clichés EOS ont été analysés par un même observateur, qui a recueilli les mesures suivantes en préopératoire, postopératoire à 3 mois et postopératoire à 2 ans:

-dans le plan frontal : angle de Cobb de la courbure principale, vertèbre sommet (vertèbre la plus translatée dans le plan frontal par rapport à la ligne centrale verticale du sacrum)

-dans le plan sagittal : C1C3, C3C7, C2C6, L1L5, IP, CAEH, CAEPL, C7PL (mesures décrites dans la première partie de notre travail)

-l'angle de Cobb sagittal T1T12 a été divisé en deux segments : T1T4 pour la cyphose thoracique supérieure et T4T12 pour la cyphose thoracique inférieure.

d) Analyse statistique

L'ensemble des tests statistiques effectués sur les mesures d'angles et de distances a été réalisé à l'aide du logiciel GraphPad Prism V5. Les coefficients de corrélation r de Pearson ont été interprétés comme dans la première partie de notre travail. Les tests t de Student ont été retenus comme significatifs pour des valeurs de $p<0.05$. La comparaison de deux groupes différents a été menée par test t de Student ; la comparaison pré-/postopératoire pour un même groupe a été réalisée par test de Student apparié.

2) Résultats

a) Résultats démographiques (tableaux 5 et 6)

Nombre de sujets	154
Sex ratio	7M/34F
Age moyen	12.39 ans (+/- 1.23)
Angle de Cobb frontal moyen	56.3° (+/-13.5)

Tableau 5 : Caractéristiques démographiques de la cohorte de 154 patients

	Moyenne (écart type)
C1C3°	37.6 (11.1)
C3C7°	-5 (18)
C2C6°	-7 (17.6)
T1T12°	28.2 (12.6)
T1T4°	9.5 (12)
T4T12°	19.5 (15.1)
L1L5°	46 (13)
IP°	49.5 (11.1)
VP°	9.9 (8.1)
PS°	39.6 (9.9)
CAEPLmm	26.6 (28.7)
CAEHmm	-0.2 (32.3)
C7PLmm	15.7 (23.6)
CAEC7mm	10.5 (15.2)

Tableau 6 : Angles et distances sagittales moyennes (écarts types) pour les 154 patients.

b) Modifications du plan frontal

L'angle de Cobb frontal moyen postopératoire précoce était de 20.6° (+/-9.9°), soit une réduction moyenne de 63.86% (+/-13.46).

En postopératoire tardif, l'angle de Cobb moyen était de 24.4° (+/-11.3), soit une réduction moyenne de 55.8% (+/-20).

La différence observée entre la réduction postopératoire précoce et postopératoire tardive était significative (test t de Student apparié, p=0.0046).

Il existe une perte de réduction de la courbure frontale principale entre la période postopératoire précoce à 3 mois et la période postopératoire tardive à 2 ans.

Les patients de la cohorte ont été classés en trois groupes suivant la localisation de la vertèbre apicale de la courbure principale (tableaux 7 et 8, figure 15) :

-SIA thoracique (T) pour une vertèbre apicale située entre T6 et T11 inclus (n=119)
-SIA thoraco-lombaire (TL) pour une vertèbre apicale située en T12 ou L1 (n=27)
-SIA lombaire (L) pour une vertèbre apicale située sous L1 (n=8)

	Correction à 3 mois	Correction à 2 ans	3 mois vs 2 ans
Groupe T	61.6% (13.2)	54.7% (19.7)	**p=0.012**
Groupe TL	73.7% (11.1)	63% (18.3)	n.s.
Groupe L	62.4% (7.7)	47.3% (23.8)	**p=0.0089**

Tableau 7 : Evolution de la correction frontale dans le temps.

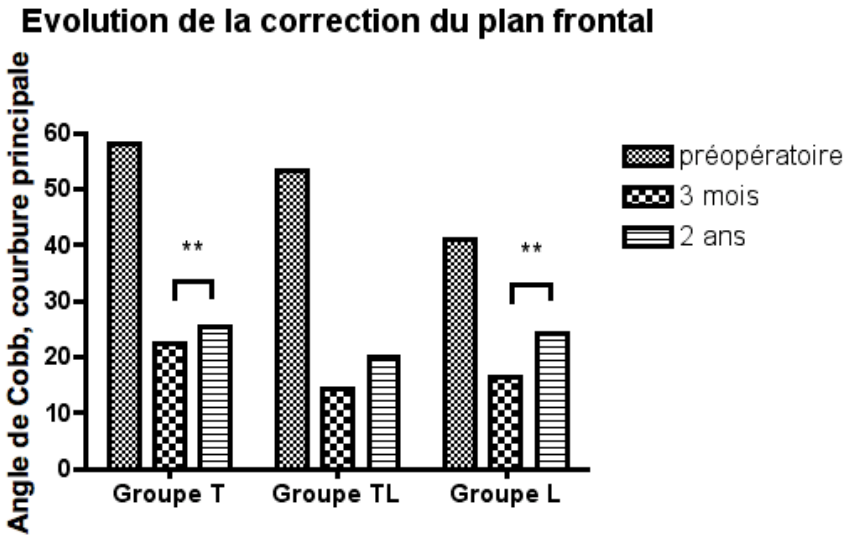


Figure 15: Evolution de la correction du plan frontal dans chaque groupe de courbure. t-test de Student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

	Groupe T	Groupe TL	Groupe L	T vs TL	T vs L	TL vs L
Correction à 3 mois	61.6% (13.2)	73.7% (11.1)	62.4% (7.7)	**p=0.0357**	n.s.	n.s.
Correction à 2 ans	54.7% (19.7)	63% (18.3)	47.3% (23.8)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 8 : Différences de correction selon le type de courbure frontale. t-test de Student. Résultats significatifs pour p<0.05.

Il existe une perte de correction significative entre la période postopératoire précoce et la période postopératoire tardive pour les scolioses thoraciques et les scolioses lombaires mais pas pour les scolioses thoracolombaires.

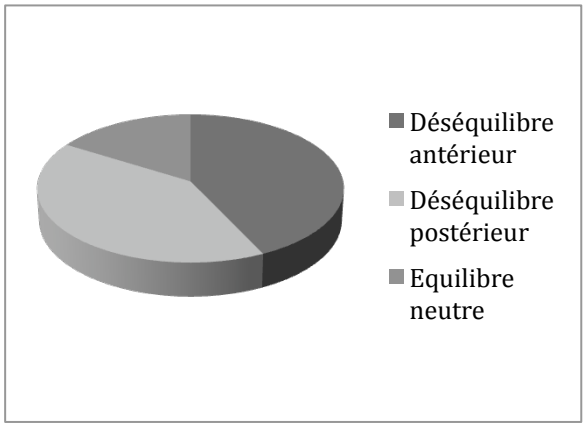
Par ailleurs, la seule différence de correction entre deux groupes de scoliose est entre le groupe scoliose thoracique et le groupe scoliose lombaire à 3 mois postopératoire.

c) Répartition des IP et CAEH selon le type de courbure frontale préopératoire

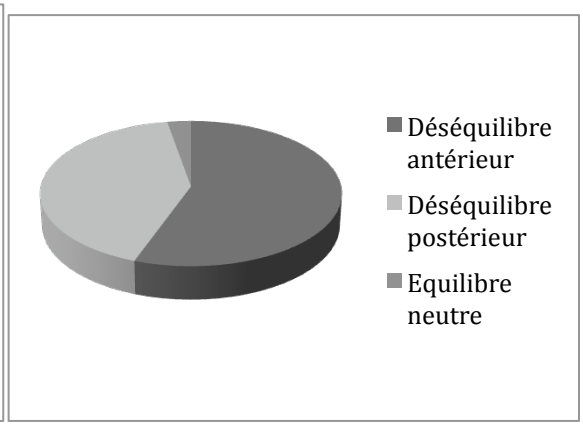
La répartition des IP et CAEH suivant le type de courbure principale en préopératoire est représentée dans le tableau 9 et la figure 16.

	Courbure principale thoracique (T)	Courbure principale thoracolombaire (TL)	Courbure principale lombaire (L)	T vs TL	T vs L	TL vs L
IP° moyenne (écart type)	48.9 (10.6)	49.3 (10.3)	62.5 (15.4)	n.s.	p=0.058	n.s.
CAEH mm moyenne (écart type)	2.8 (27.8)	-7.9 (44.7)	-4.7 (17.4)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PL mm moyenne (écart type)	17.7 (21.2)	8.2 (30.9)	23.8 (30.9)	n.s	n.s.	n.s.

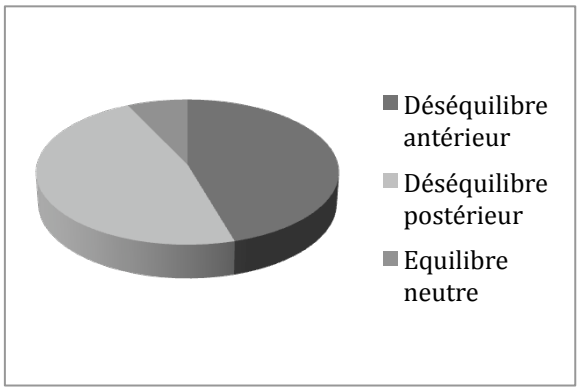
Tableau 9 : Incidence pelvienne (IP) et équilibre sagittal global (CAEH ou C7PL) préopératoires selon type de courbure. T-test de Student. Résultats significatifs pour p<0.05.



Equilibre sagittal global (CAEH), groupe T



Equilibre global (CAEH), groupe TL



Equilibre sagittal global (CAEH), groupe L

Figure 16 : répartition des types d'équilibre sagittal préopératoire selon le type de courbure frontale

L'incidence pelvienne n'est pas différente quel que soit le type de courbure frontale.

Les patients du groupe L ont une incidence pelvienne plus marquée que les patients des deux autres groupes (tendance à la significativité).

L'équilibre sagittal global apprécié par la distance CAEH et par la distance C7PL préopératoire est indépendant du type de courbure frontale.

Nous avons également cherché à caractériser une corrélation entre le niveau de la vertèbre sommet de la courbure principale et l'incidence pelvienne.

Il n'existe aucune corrélation significative entre ces incidence pelvienne et niveau de la vertèbre sommet de la courbure principale (r de Pearson à 0.1561, p non significatif).

d) Corrélations IP/paramètres sagittaux et CAEH et C7PL/paramètres sagittaux

i. IP et paramètres sagittaux (tableau 10)

	Coefficient r de Pearson	**p**
IP/CAEH	0.1846	n.s.
IP/C1C3	0.1650	n.s.
IP/C3C7	-0.013	n.s.
IP/C2C6	0.064	n.s.
IP/T1T12	-0.2734	n.s.
IP/L1L5	**0.3786**	**0.0147**
IP/CAEPL	**0.4151**	**0.007**
IP/C7PL	**0.4272**	**0.006**
IP/CAEC7	0.1195	n.s.

Tableau 10 : Corrélations entre incidence pelvienne (IP) et paramètres sagittaux.
Tous patients de la cohorte.

L'incidence pelvienne est une mesure radiologique en rapport avec l'anatomie du bassin des patients. Elle est fixe pour un patient donné, et conditionne les courbures sagittales du rachis lombaire sus-jacent. Cette affirmation a été bien démontrée par plusieurs études de grande envergure et de méthodologie satisfaisante chez les sujets non scoliotiques (15, 46, 48, 49, 50). Nous rapportons ici les coefficients de corrélation qui existent entre l'incidence pelvienne et les paramètres sagittaux des 154 patients de la cohorte en préopératoire.

Des corrélations significatives sont identifiées entre l'incidence pelvienne et l'équilibre sagittal mesuré par la C7PL (r=0.4272, p=0.006), entre l'incidence pelvienne et l'équilibre sagittal global mesuré par la distance CAEPL (r=0.4151, p=0.007), et entre l'incidence pelvienne et la lordose lombaire (r=0.3786, p=0.0147).

ii. CAEH ou C7PL et paramètres sagittaux (tableaux 11 et 12)

	Coefficient r de Pearson	**p**
CAEH/C1C3	0.2125	n.s.
CAEH/C3C7	0.1011	n.s.
CAEH/C2C6	0.1110	n.s.
CAEH/T1T12	0.08632	n.s.
CAEH/L1L5	0.2483	n.s.
CAEH/CAEPL	**0.9654**	**p<0.0001**
CAEH/C7PL	**0.7203**	**p<0.0001**
CAEH/IP	0.1846	n.s.
CAEH/CAEC7	**0.8621**	**0.0027**

Tableau 11 : Corrélations entre équilibre sagittal global (distance CAEH) et paramètres sagittaux

La distance CAEH est positivement corrélée à la distance CAEPL (r=0.9654, p<0.0001), à la distance C7PL (r=0.7203, p<0.0001) et à la distance CAEC7 (r=0.8621, p=0.0027).

Les autres paramètres sagittaux n'ont pas de corrélation significative avec la distance CAEH.

	Coefficient r de Pearson	**p**
C7PL/C1C3	0,022	n.s.
C7PL/C3C7	0,1794	n.s.
C7PL/C2C6	0,2392	n.s.
C7PL /T1T12	-0,1975	n.s.
C7PL /L1L5	0,06225	n.s.
C7PL /CAEPL	**0,8385**	**p<0.0001**
CAEH/C7PL	**0.7203**	**p<0.0001**
C7PL /IP	**0,4269**	**0,006**
C7PL /CAEC7	0,0846	n.s.

Tableau 12 : Corrélations entre équilibre sagittal global (distance C7PL) et paramètres sagittaux.

La distance C7PL est corrélée à la CAEPL et à la CAEH, ainsi qu'à l'incidence pelvienne. L'équilibre sagittal global apprécié par la C7PL est donc sous la dépendance de l'incidence pelvienne (corrélation positive : une forte incidence pelvienne et associée à un équilibre plus antérieur). Le rachis cervical joue alors un rôle d'ajustement postural dicté par la position sagittale du rachis sous-jacent.

iii. Les trois types de déséquilibres préopératoires (tableaux 13 et 14)

	I-déséquilibre antérieur CAEH (n=72)	II-CAEH équilibré (n=20)	III-déséquilibre postérieur CAEH (n=62)	I vs II	I vs III	II vs III
CAEH mm Moyenne (écart type)	26.3 (21.7)	0.4 (2.6)	-31.7 (20.7)	**p=0.019**	**$p<10^{-4}$**	**p=0.004**
C1C3° Moyenne (écart type)	40.5 (8.1)	31.5 (1.7)	34.4 (13.7)	**p=0.029**	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-1.9 (21.3)	-13.2 (10.2)	-6 (16.1)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-2.2 (19.7)	-18.8 (10)	-8.1 (15.9)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	28.8 (13.6)	27.2 (10.1)	26.5 (12.9)	n.s.	n.s.	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	49.5 (11.4)	44.8 (7.8)	40.8 (14.8)	n.s.	**p=0.042**	n.s.
IP° Moyenne (écart type)	52 (10.8)	47.3 (18.8)	46.8 (7.4)	n.s.	**$p<10^{-4}$**	**$p<10^{-4}$**
VP° Moyenne (écart type)	7.9 (8.7)	10.4 (6.4)	12.3 (7.6)	n.s.	n.s.	n.s.
PS° Moyenne (écart type)	44.2 (7)	37.0 (15)	34.6 (8.4)	n.s.	**p=0.001**	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	47.98 (20.36)	27.07 (7.74)	2.8 (23.9)	**p=0.043**	**$p<10^{-4}$**	**p=0.049**
C7PLmm Moyenne (écart type)	30.58 (19.30)	10.93 (8.61)	0.2 (22.8)	**p=0.046**	**$p=5.10^{-4}$**	n.s.
CAEC7mm Moyenne (écart type)	15.03 (15.37)	16.44 (6.91)	2.7 (15.2)	n.s.	**p=0.037**	**p=0.043**

Tableau 13 : Analyse descriptive préopératoire selon le type d'équilibre sagittal (distance CAEH). T-test de Student. Résultats significatifs pour p<0.05.

	I-déséquilibre antérieur C7PL (n=101)	II-C7PL équilibré (n=44)	III-déséquilibre postérieur C7PL (n=9)	I vs II	I vs III	II vs III
CAEH mm Moyenne (écart type)	11.5 (26.7)	-17.4 (23)	-43 (27.5)	n.s.	**p=0.004**	**p=0.03**
C1C3° Moyenne (écart type)	37.6 (11.8)	36.7 (9.4)	39.3 (8.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-3.9 (19.2)	-8.9 (14.8)	-9.3 (12.2)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-6.3 (19.2)	-12.5 (11)	-7.7 (14.4)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	27.2 (12.9)	28.7 (10.2)	43.6 (8.7)	n.s.	**p=0.03**	**p=0.04**
T1T4° Moyenne (écart type)	7.2 (11.4)	13.6 (11.3)	20.4 (10.1)	n.s.	n.s.	n.s.
T4T12° Moyenne (écart type)	20.0 (16.7)	18.5 (10.8)	23.2 (1.5)	n.s.	n.s.	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	45.1 (13)	48.5 (13.4)	49.2 (10.2)	n.s.	n.s.	n.s.
IP° Moyenne (écart type)	52.5 (11.5)	43.6 (6)	41.3 (8)	n.s.	n.s.	n.s.
VP° Moyenne (écart type)	9.8 (7.5)	5.7 (3.5)	8.2 (5.6)	n.s.	n.s.	n.s
PS° Moyenne (écart type)	39.4 (9.6)	38.0 (7.5)	33.1 (12.2)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	40.1 (20.9)	1.2 (19.5)	-18.4 (14.7)	n.s.	**p=0.02**	n.s.
C7PLmm Moyenne (écart type)	27.5 (16.5)	-9.4 (9.1)	-38.1 (15.7)	**p=0.002**	**p=0.001**	**p=0.004**
CAEC7mm Moyenne (écart type)	12.5 (15)	6.2 (15)	8.9 (7.3)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 14 : analyse descriptive préopératoire selon le type d'équilibre sagittal mesuré par la distance C7PL. T-test de Student. Résultats significatifs pour $p<0.05$.

Les patients en situation de déséquilibre postérieur préopératoire (selon la distance C7PL) ont une cyphose thoracique plus importante que les patients équilibrés ou en déséquilibre antérieur.

Sur le plan démographique, les trois groupes étaient comparables (âge moyen, sex ratio). Les patients du groupe I (déséquilibre antérieur) avaient une lordose cervicale

supérieure plus marquée, une lordose lombaire plus importante et une incidence pelvienne plus prononcée que les patients des deux autres groupes.

Les patients du groupe III (déséquilibre postérieur) avaient une lordose lombaire moins grande que les patients du groupe I, une incidence pelvienne moins importante que les patients des deux autres groupes. Les distances CAEPL, C7PL et CAEC7 suivaient le classement des trois groupes dans le sens du déséquilibre.

iv. Les trois groupes d'incidences pelviennes (tableau 15)

	FIP (n=45)	MIP (n=90)	HIP (n=19)	FIP vs MIP	FIP vs HIP	MIP vs HIP
IP° Moyenne (écart type)	38.1 (5.3)	50.8 (4.4)	71.6 (6.3)	**$p<10^{-4}$**	**$p<10^{-4}$**	**$p<10^{-4}$**
VP° Moyenne (écart type)	4.7 (6.8)	11.0 (7.5)	18.45 (4.45)	n.s.	**p=0.045**	n.s.
PS° Moyenne (écart type)	33.5 (10.9)	39.9 (7.1)	53.20 (3.26)	n.s.	**p=0.043**	**p=0.05**
C1C3° Moyenne (écart type)	35 (14.6)	38.7 (9.7)	39.4 (6.4)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-3.2 (14.8)	-4.1 (19.4)	-8.9 (17.7)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-5.3 (17.3)	-6.9 (17.2)	-6.5 (18.5)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	32.9 (16.8)	27.8 (9.5)	19.2 (7.7)	n.s.	**p=0.034**	**p=0.013**
L1L5° Moyenne (écart type)	41.3 (9.6)	45.4 (14.2)	59.1 (2)	n.s.	**p=0.002**	**p=0.04**
CAEH mm Moyenne (écart type)	1.4 (45.8)	-5.6 (24)	17.6 (18.3)	n.s.	n.s.	**p=0.0397**
CAEPLmm Moyenne (écart type)	21 (34.8)	23 (23.4)	56.2 (17)	n.s.	**p=0.052**	**p=0.008**
C7PLmm Moyenne (écart type)	12.9 (28.5)	11 (17.8)	43.2 (14.9)	n.s.	**p=0.042**	**p=0.0014**
CAEC7mm Moyenne (écart type)	8 (15)	10.9 (16.6)	13 (8)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 15 : Analyse descriptive préopératoire selon l'incidence pelvienne (IP). T-test de Student. Résultats significatifs pour p<0.05.
FIP : faible incidence pelvienne ; MIP : incidence pelvienne moyenne ; HIP : haute incidence pelvienne

Une forte incidence pelvienne est associée à une plus forte lordose lombaire, une plus faible cyphose thoracique, et à un plus grand déséquilibre antérieur.

Les patients du groupe forte incidence pelvienne sont davantage déséquilibrés vers l'avant que les patients du groupe incidence pelvienne moyenne (comme montré via les distances CAEH, CAEPL et C7PL).

v. Incidence pelvienne et cyphose thoracique : les déterminants de l'équilibre sagittal préopératoire

La déformation scoliotique entraîne une translation antérieure du segment rachidien concerné. Ceci se manifeste dans les scolioses thoraciques et thoraco-lombaires par une diminution de la cyphose (84, 85, 86, 87). La diminution de la cyphose thoracique impose alors aux segments adjacents (rachis cervical et rachis lombaire) des modifications adaptatives dans le but de maintenir un équilibre sagittal satisfaisant tout en prenant en compte les paramètres pelviens comme nous l'avons vu plus haut.

Nous nous sommes ici attachés à décrire le segment lombaire et le segment cervical ainsi que l'équilibre sagittal global en prenant comme variables l'incidence pelvienne et la cyphose thoracique. Nous avons donc défini 4 groupes de patients selon l'incidence pelvienne et la cyphose thoracique préopératoire :

-faible incidence pelvienne (IP°<44°) associée à hypocyphose thoracique (T1T12°<20°) : groupe FIP/FCT (n=21)

-faible incidence pelvienne associée à une forte cyphose thoracique (T1T12°>45°) : groupe FIP/HCT (n=30)

-forte incidence pelvienne (IP°>62°) associée à une hypocyphose thoracique : groupe HIP/FCT (n=17)

-forte incidence pelvienne associée à une forte cyphose thoracique : groupe HIP/HCT. Aucun patient ne répondait à la combinaison de ces deux critères.

Nous avons comparé l'ensemble des paramètres sagittaux de ces groupes en préopératoire (Tableau 16).

	FIP/FCT	FIP/HCT	HIP/FCT	FIP/FCT vs FIP/HCT	FIP/FCT vs HIP/FCT	FIP/HCT vs HIP/FCT
C1C3° Moyenne (écart type)	19.4 (16.6)	46.2 (5.5)	38 (3.6)	**p=0.0324**	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-21.4 (9)	-1.6 (10.8)	-7.7 (20.3)	**p=0.0436**	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-26.4 (4.7)	6.6 (9.4)	-3.8 (19.9)	**p=0.0053**	p=0.076	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	8.1 (5.5)	49.8 (3.3)	14 (3.2)	**p=0.0001**	n.s.	**$p<10^{-4}$**
T1T4° Moyenne (écart type)	2.1 (9)	23.6 (7.2)	6.5 (1.5)	**p=0.0317**	n.s.	**p=0.0194**
T4T12° Moyenne (écart type)	5.9 (5)	26.1 (9.9)	7.4 (2.1)	**p=0.0413**	n.s.	**p=0.0423**
L1L5° Moyenne (écart type)	28.8 (1.9)	48.5 (7.5)	59.6 (2.2)	**p=0.0132**	**p=0.0001**	p=0.0854
IP° Moyenne (écart type)	38.7 (3.4)	38.6 (3.7)	69.8 (5.8)	n.s.	**p=0.0029**	**p=0.0008**
VP° Moyenne (écart type)	7.3 (1)	4.9 (6.6)	18.6 (4.7)	n.s.	**p=0.0296**	**p=0.0482**
PS° Moyenne (écart type)	31.4 (4.5)	33.7 (10.2)	51.3 (2.3)	n.s.	**p=0.0052**	**p=0.0474**
CAEPLmm Moyenne (écart type)	17.6 (21.6)	14.2 (40.3)	65.9 (15.6)	n.s.	**p=0.0427**	n.s.
CAEHmm Moyenne (écart type)	-13.2 (18.7)	-2.9 (52.3)	24.7 (20)	n.s.	p=0.086	n.s.
C7PLmm Moyenne (écart type)	11.9 (20.8)	4.2 (38)	48.8 (14.2)	n.s.	p=0.085	n.s.
CAEC7mm Moyenne (écart type)	6.1 (2.9)	9.6 (6.4)	17.1 (2.5)	n.s.	**p=0.0157**	n.s.

Tableau 16 : comparaison préopératoire des paramètres sagittaux. FIP/FCT : faible incidence pelvienne/hypocyphose thoracique. FIP/HCT : faible incidence pelvienne/cyphose thoracique élevée. HIP/FCT : incidence pelvienne forte/hypocyphose thoracique.

Les patients ayant une faible incidence pelvienne associée à une hypocyphose thoracique sont en déséquilibre postérieur, ont une faible lordose lombaire et une hypocyphose cervicale (exemple figure 17).



Figure 17: Patiente de 13 ans. Courbure Lenke 1, sommet T8. Faible incidence pelvienne (34.6°), faible lordose lombaire (28.8°), hypocyphose thoracique (T1T12°=6°), déséquilibre sagittal postérieur (CAEH=-13.3mm), cyphose cervicale (C2C6=-26.5°)

Les patients ayant une forte incidence pelvienne associée à une hypocyphose thoracique sont en position de déséquilibre antérieur, ont une forte lordose lombaire et une cyphose cervicale moins marquée que dans le groupe de patients ayant une faible incidence pelvienne (exemple figure 18).



Figure 18: Patiente de 12 ans. Courbure type Lenke 1, sommet T8. Incidence pelvienne forte (80.4°), lordose lombaire à 57°, hypocyphose thoracique (T1T12°=17.3°), déséquilibre sagittal antérieur (CAEH=12mm), cyphose cervicale (C2C6°=-12°)

Dans le groupe de patients ayant une faible incidence pelvienne et une forte cyphose thoracique, il est intéressant de noter une forte lordose lombaire et un segment rachidien cervical en lordose assurant un équilibre sagittal global neutre. Ce dernier groupe est particulièrement intéressant dans la mesure où la lordose lombaire des patients n'est plus adaptée à leur incidence pelvienne mais répond à la cyphose thoracique. Ceci nous amène à considérer la courbure sagittale du rachis lombaire non plus comme la résultante unique des paramètres pelviens mais comme la combinaison des paramètres pelviens physiologiques et de la courbure sagittale thoracique pathologique dans le but d'assurer un équilibre le plus proche possible de la neutralité. Les courbures sagittales du rachis cervical sont pour leur part régies par le déséquilibre sagittal résiduel au-dessus du rachis thoracique.

e) Modifications après arthrodèse par voie postérieure

i. Modifications de l'équilibre global

EVOLUTION SELON L'EQUILIBRE GLOBAL

-Postopératoire précoce à 3 mois (tableaux 17 et 18)

	I-déséquilibre antérieur CAEH (n=72) [préopératoire vs 3 mois]	II-CAEH équilibré (n=20) [préopératoire vs 3 mois]	III-déséquilibre postérieur CAEH (n=62) [préopératoire vs 3 mois]
CAEH mm Moyenne (écart type)	35.2 (33.7) [n.s.]	9.8 (25) [n.s.]	-19.4 (18.4) [n.s.]
C1C3° Moyenne (écart type)	38.3 (11.2) [n.s.]	34.6 (5.4) [n.s.]	34 (11) [n.s.]
C3C7° Moyenne (écart type)	-4.9 (16.4) [n.s.]	-9.1 (10) [n.s.]	-1.9 (12.4) [n.s.]
C2C6° Moyenne (écart type)	-2.3 (16.6) [n.s.]	-12.6 (13.8) [n.s.]	-4 (11.8) [n.s.]
T1T12° Moyenne (écart type)	34.1 (12.1) [n.s.]	29.7 (9.3) [n.s.]	30.2 (11.3) [n.s.]
L1L5° Moyenne (écart type)	46.1 (12) [n.s.]	39 (3.8) [n.s.]	38.3 (10) [n.s.]
IP° Moyenne (écart type)	51.3 (12.4) [n.s.]	47.2 (17.7) [n.s.]	46.6 (10.8) [n.s.]
VP° Moyenne (écart type)	9.2 (9.5) [n.s.]	9.4 (9.1) [n.s.]	11.7 (7.1) [n.s.]
PS° Moyenne (écart type)	42.1 (8.8) [n.s.]	37.9 (12.3) [n.s.]	34.9 (8.9) [n.s.]
CAEPLmm Moyenne (écart type)	35.2 (33.7)	31 (15.2)	12 (13.1)
C7PLmm Moyenne (écart type)	23.1 (23.3) [n.s.]	3.6 (43.2) [n.s.]	10.6 (14.19) [n.s.]
CAEC7mm Moyenne (écart type)	11.4 (13.8) [n.s.]	7 (2) [n.s.]	3 (16.3) [n.s.]

Tableau 17: Changements postopératoires précoces à 3 mois selon les types d'équilibre sagittal préopératoire (CAEH), t-test de Student apparié. Résultats significatifs pour $p<0.05$.

	I-déséquilibre antérieur C7PL (n=101) [préopératoire vs 3 mois]	II-C7PL équilibré (n=44) [préopératoire vs 3 mois]	III-déséquilibre postérieur C7PL (n=9) [préopératoire vs 3 mois]
CAEH mm Moyenne (écart type)	1.7 (31) [n.s.]	-11.2 (15.8) [n.s.]	3.5 (18.3) [n.s.]
C1C3° Moyenne (écart type)	36.2 (12.2) [n.s.]	36.4 (7.4) [n.s.]	38.7 (1.6) [n.s.]
C3C7° Moyenne (écart type)	-6.2 (14.8) [n.s.]	2.7 (11) [n.s.]	-1.9 (12.6) [n.s.]
C2C6° Moyenne (écart type)	-5.5 (16.5) [n.s.]	-2.9 (11.7) [n.s.]	0.8 (10.9) [n.s.]
T1T12° Moyenne (écart type)	32.2 (12.6) [n.s.]	34 (10.2) [n.s.]	43.3 (10.3) [n.s.]
L1L5° Moyenne (écart type)	42.6 (12.5) [n.s.]	41.5 (8.6) [n.s.]	46.1 (5.1) [n.s.]
IP° Moyenne (écart type)	50.8 (15) [n.s.]	44.8 (9.7) [n.s.]	40.3 (12.5) [n.s.]
VP° Moyenne (écart type)	12.5 (11.1) [n.s.]	7.9 (4.6) [n.s.]	5.5 (3.3) [n.s.]
PS° Moyenne (écart type)	38.3 (16.6) [n.s.]	36.9 (9.2) [n.s.]	34.8 (10.3) [n.s.]
CAEPLmm Moyenne (écart type)	30.5 (27.8) [n.s.]	12.8 (17.4) [n.s.]	29.5 (18.8) [n.s.]
C7PLmm Moyenne (écart type)	18.5 (27.5) [n.s.]	5.5 (12.2) [n.s.]	6.4 (6.7) [**p=0.0119**]
CAEC7mm Moyenne (écart type)	8.1 (13.4) [n.s.]	8 (16.4) [n.s.]	19.5 (12.9) [n.s.]

Tableau 18 : Changements postopératoires précoces à 3 mois selon les types d'équilibre préopératoire (C7PL). T-test de Student apparié. Résultats significatifs pour $p<0.05$.

Aucune modification significative de l'équilibre global apprécié par la distance CAEH n'a été observée en postopératoire précoce.

En revanche, l'équilibre global mesuré par la distance C7PL a été significativement amélioré dans le groupe en déséquilibre postérieur (selon la C7PL). Ceci signifie qu'une modification s'est produite sous l'étage C7. En scindant la cyphose thoracique en deux

parties (au-dessus du montage : T1T4 ; incluse dans le montage : T4T12), nous retrouvons pour le groupe en déséquilibre postérieur suivant la C7PL (tableau 19) :

	Préopératoire	Postopératoire précoce 3 mois	t-test apparié
T1T4° Moyenne (écart type)	20.4 (10.1)	14.8 (4.3)	**p=0.05**
T4T12° Moyenne (écart type)	23.2 (1.5)	28.5 (6.3)	**p=0.043**

Tableau 19 : modifications précoces (3 mois postopératoire) de la cyphose thoracique supérieure (T1T4°) et inférieure (T4T12°) chez les patient en déséquilibre postérieur préopératoire selon la C7PL.

Les résultats des tableaux 17 à 19 signifient que la correction du déséquilibre postérieur mesuré par la C7PL est due conjointement à la diminution de la cyphose thoracique supérieure (au-dessus du montage) et à l'augmentation de la cyphose thoracique inférieure (incluse dans le montage).

-Postopératoire tardif à 2 ans (tableaux 20 et 21)

	I-déséquilibre antérieur CAEH (n=72) [préopératoire vs 2 ans]	II-CAEH équilibré (n=20) [préopératoire vs 2 ans]	III-déséquilibre postérieur CAEH (n=62) [préopératoire vs 2 ans]
CAEH mm Moyenne (écart type)	2.2 (18.9) [**p=0.0023**]	-9.2 (6.6) [n.s.]	-20.6 (15.9) [n.s.]
C1C3° Moyenne (écart type)	38.9 (7.4) [n.s.]	34.6 (6.4) [n.s.]	35.1 (11.5) [n.s.]
C3C7° Moyenne (écart type)	-1.9 (15.9) [n.s.]	-5.2 (8.5) [n.s.]	1.4 (14.2) [n.s.]
C2C6° Moyenne (écart type)	1.5 (20) [n.s.]	-9.2 (10.6) [n.s.]	3.6 (14.1) [**p=0.0268**]
T1T12° Moyenne (écart type)	37.5 (12.4) [**p=0.0102**]	37.9 (12) [**p=0.041**]	38.5 (12.6) [**p=0.0011**]
L1L5° Moyenne (écart type)	48.3 (11.4) [n.s.]	34.6 (10.5) [n.s.]	42.4 (11.7) [n.s.]
IP° Moyenne (écart type)	50.9 (12.4) [n.s.]	34.6 (8.7) [n.s.]	47.3 (9.6) [n.s.]
VP° Moyenne (écart type)	8.6 (7.2) [n.s.]	9.4 (9.1) [n.s.]	11.4 (6.2) [n.s.]
PS° Moyenne (écart type)	42.4 (8.2) [n.s.]	37.9 (12.3) [n.s.]	36.0 (8) [n.s.]
CAEPLmm Moyenne (écart type)	25.5 (19.3) [**p=0.0007**]	15.2 (4.3) [n.s.]	10.8 (16.6) [**p=0.0473**]
C7PLmm Moyenne (écart type)	11.2 (14.6) [**p=0.0007**]	5.8 (16.6) [n.s.]	5.2 (14.8) [n.s.]
CAEC7mm Moyenne (écart type)	12.7 (14.5) [n.s.]	18.6 (16.1) [n.s.]	6 (17.6) [n.s.]

Tableau 20 : Changements postopératoires tardifs à 2 ans selon les types d'équilibre préopératoire (CAEH). T-test de Student apparié. Résultats significatifs pour $p<0.05$.

	I-déséquilibre antérieur C7PL (n=101) [préopératoire vs 2 ans]	II-C7PL équilibré (n=44) [préopératoire vs 2 ans]	III-déséquilibre postérieur C7PL (n=9) [préopératoire vs 2 ans]
CAEH mm Moyenne (écart type)	-3 (19.4) [n.s.]	-21 (16.2) [n.s.]	-12 (11.9) [n.s.]
C1C3° Moyenne (écart type)	36.7 (10.2) [n.s.]	36.6 (7.6) [n.s.]	39.5 (5.7) [n.s.]
C3C7° Moyenne (écart type)	-0.9 (16.4) [n.s.]	0.8 (8.7) [n.s.]	-6.6 (1) [n.s.]
C2C6° Moyenne (écart type)	-0.4 (18.8) [n.s.]	2 (12.9) [n.s.]	0.6 (4.4) [n.s.]
T1T12° Moyenne (écart type)	37.2 (12.8) [n.s.]	40.4 (10.7) [n.s.]	49.3 (8) [n.s.]
L1L5° Moyenne (écart type)	44.2 (13.5) [n.s.]	44.2 (9.6) [n.s.]	47.5 (5.9) [n.s.]
IP° Moyenne (écart type)	49.2 (13.1) [n.s.]	44.9 (7.9) [n.s.]	40.4 (12.2) [n.s.]
VP° Moyenne (écart type)	9.8 (7.5) [n.s.]	7.6 (4.3) [n.s.]	5.9 (0.9) [n.s.]
PS° Moyenne (écart type)	39.4 (9.6) [n.s.]	37.2 (9) [n.s.]	34.4 (12.3) [n.s.]
CAEPLmm Moyenne (écart type)	24.5 (15.1) [n.s.]	2.5 (17.6) [n.s.]	9 (7.2) [n.s.]
C7PLmm Moyenne (écart type)	11.3 (14.2) [n.s.]	2.6 (14.3) [n.s.]	-9.8 (16) [n.s.]
CAEC7mm Moyenne (écart type)	12.5 (15.3) [n.s.]	3.2 (17.7) [n.s.]	19.2 (9.1) [n.s.]

Tableau 21: Changements postopératoires tardifs à 2 ans selon les types d'équilibre préopératoire (C7PL). T-test de Student apparié. Résultats significatifs pour $p<0.05$.

En postopératoire tardif, une diminution significative du déséquilibre selon la distance CAEH a été notée dans les deux groupes de patients déséquilibrés. En revanche, aucune modification de l'équilibre n'était observée lorsque l'équilibre global était apprécié par la distance C7PL.

EVOLUTION SELON L'INCIDENCE PELVIENNE

-postopératoire précoce à 3 mois (tableau 22)

	FIP (n=45)	MIP (n=90)	HIP (n=19)	FIP préopératoire vs 3 mois	MIP préopératoire vs 3 mois	HIP préopératoire vs 3 mois
IP° Moyenne (écart type)	36.3 (6.8)	50.1 (10.6)	71.7 (6.3)	n.s.	n.s.	n.s.
VP° Moyenne (écart type)	3.3 (5.5)	13.7 (9.5)	19.6 (8.9)	n.s.	n.s.	n.s.
PS° Moyenne (écart type)	33.0 (8.4)	36.4 (17.1)	52.2 (5.1)	n.s.	n.s.	n.s.
C1C3° Moyenne (écart type)	35.5 (11)	36.3 (11.1)	35.4 (9.8)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-3.2 (13.7)	-1.8 (13.5)	-13.5 (14.1)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-4.8 (17.1)	-4.1 (13.1)	-6.7 (17.4)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	33.8 (10.8)	33.2 (12.9)	26.1 (6.1)	n.s.	**p=0.0019**	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	41.3 (7.5)	39.7 (11.1)	54.1 (12.8)	n.s.	**p=0.0059**	n.s.
CAEH mm Moyenne (écart type)	15.4 (31.5)	-10 (24.7)	-4 (16.3)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	31.8 (30.7)	19.8 (24.9)	34.8 (17.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PLmm Moyenne (écart type)	10.6 (32.8)	15.4 (21)	22.5 (14.6)	n.s.	n.s.	**p=0.0092**
CAEC7mm Moyenne (écart type)	11.3 (15.3)	5.2 (14.6)	14.4 (7.3)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 22 : Modifications postopératoires précoces à 3 mois selon le groupe d'incidence pelvienne. T-test de Student apparié. Résultats significatifs pour $p<0.05$. FIP : faible incidence pelvienne ; MIP : incidence pelvienne moyenne ; HIP : haute incidence pelvienne

Dans le groupe d'incidence pelvienne modérée, on remarque une augmentation de la cyphose thoracique et une diminution de la lordose lombaire.

Dans le groupe de forte incidence pelvienne, la seule modification en postopératoire précoce est une diminution du déséquilibre antérieur selon la C7PL.

-Postopératoire tardif à 2 ans (tableau 23)

	FIP (n=45)	MIP (n=90)	HIP (n=19)	FIP préopératoire vs 2 ans	MIP préopératoire vs 2 ans	HIP préopératoire vs 2 ans
IP° Moyenne (écart type)	37.8 (5.8)	49.1 (9.2)	65.1 (10.9)	n.s.	n.s.	n.s.
VP° Moyenne (écart type)	5.8 (4.7)	10.1 (6.7)	15.1 5.1	n.s.	n.s.	n.s.
PS° Moyenne (écart type)	32 (7)	39.1 (8.2)	50 (7.7)	n.s.	n.s.	n.s.
C1C3° Moyenne (écart type)	33.1 (11.5)	38.5 (8.2)	40.2 (6.5)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-0.4 (12.6)	2.6 (13.3)	-11.8 (14.2)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	3.4 (14.2)	1.9 (17.4)	-9 (15.4)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	42.9 (10.9)	39.3 (11.4)	24.2 (7.4)	**p=0.0385**	**p=0.013**	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	41.9 (6.4)	42.7 (13)	56.9 (12.4)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEH mm Moyenne (écart type)	-8.6 (22.3)	-13.3 (16.1)	6.2 (19.4)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	10.9 (18)	15 (14.3)	40.5 (16.6)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PLmm Moyenne (écart type)	1.2 (16.4)	7.1 (10.7)	27.6 (10.1)	n.s.	n.s.	**p=0.0505**
CAEC7mm Moyenne (écart type)	11.1 (22.3)	9.2 (14.3)	12.7 (9)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 23 : Modifications postopératoires tardives à 2 ans selon le groupe d'incidence pelvienne. T-test de Student apparié. Résultats significatifs pour $p<0.05$.
FIP : faible incidence pelvienne ; MIP : incidence pelvienne moyenne ; HIP : haute incidence pelvienne

Dans les groupes faible incidence pelvienne et incidence pelvienne modérée, la cyphose thoracique est significativement augmentée. Dans le groupe forte incidence, l'équilibre global est amélioré dans le sens d'une diminution du déséquilibre antérieur selon la C7PL.

Nous avons poursuivi l'analyse en étudiant les modifications sagittales postopératoires des patients présentant en préopératoire une faible incidence pelvienne associée à une hypocyphose thoracique (groupe FIP/FCT), une faible incidence pelvienne associée à

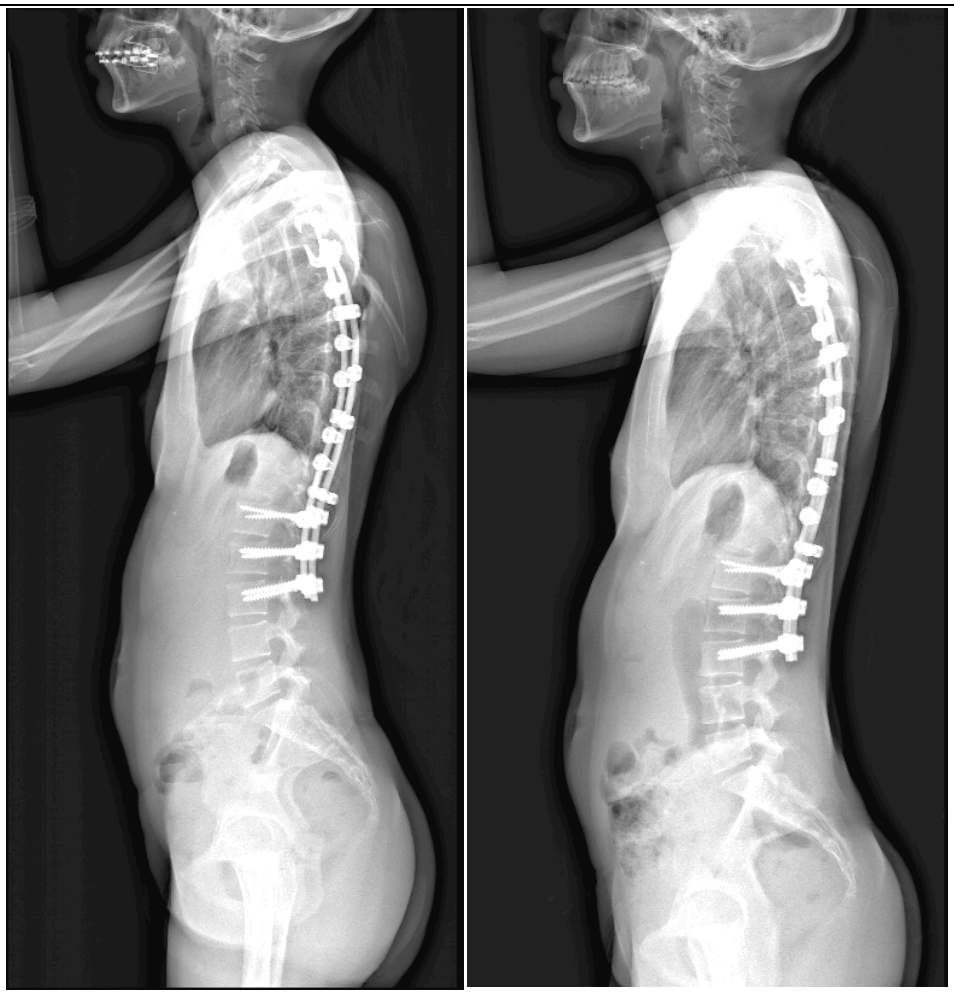
une hypercyphose thoracique (groupe FIP/HCT) et une faible incidence pelvienne associée à une hypercyphose thoracique (groupe HIP/HCT) comme définis dans l'analyse préopératoire (chapitre III, 2) d) v.).

Ces résultats sont regroupés dans les tableaux 24, 25 et 26.

N=21	Préopératoire	3 mois	2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
C1C3° Moyenne (écart type)	19.4 (16.6)	27.9 (15.1)	26 (18.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-21.4 (9)	-7.9 (2.6)	-6 (12.2)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-26.4 (4.7)	-10.8 (4.1)	4.7 (8.4)	n.s.	**p=0.046**	**p=0.0406**
T1T12° Moyenne (écart type)	8.1 (5.5)	21 (4.6)	32.7 (1.4)	p=0.08	**p=0.0155**	p=0.105
T1T4° Moyenne (écart type)	2.1 (9)	-2.4 (3.3)	6.2 (3.3)	n.s.	n.s.	**p=0.0038**
T4T12° Moyenne (écart type)	5.9 (5)	23.4 (2.5)	26.5 (4.8)	**p=0.0107**	**p=0.0437**	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	28.8 (1.9)	37 (12.9)	37.5 (8.4)	n.s.	p=0.063	n.s.
IP° Moyenne (écart type)	38.7 (3.4)	38.7 (1.6)	38.6 (3.6)	n.s.	n.s.	n.s.
VP° Moyenne (écart type)	7.3 (1.0)	-0.6 (5.8)	9.1 (2.6)	p=0.07	n.s.	p=0.056
PS° Moyenne (écart type)	31.4 (4.5)	33.3 (6.5)	29.5 (2.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	17.6 (21.6)	1.9 (9.2)	21.8 (11.5)	p=0.084	n.s.	p=0.0732
CAEHmm Moyenne (écart type)	-13.2 (18.7)	-4.4 (12.5)	-7.5 (2)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PLmm Moyenne (écart type)	11.9 (20.8)	9.7 (13.2)	15 (10.6)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7mm Moyenne (écart type)	6.1 (2.9)	-6.5 (4.5)	-0.4 (10.8)	**p=0.0376**	n.s.	n.s.

Tableau 24 : **groupe FIP/FCT** (faible incidence pelvienne/hypocyphose thoracique). Evolution des paramètres sagittaux en préopératoire, postopératoire précoce (3 mois) et postopératoire tardif (2 ans). T-test de Student apparié. Significativité retenue pour les valeurs de $p<0.05$.

La correction de la cyphose thoracique globale, due majoritairement à l'augmentation de la cyphose thoracique inférieure, est associée à une augmentation de la lordose lombaire à terme et à une augmentation de la lordose cervicale sans changement de l'équilibre sagittal global chez les patients présentant une faible incidence pelvienne et une hypocyphose thoracique. Une antéversion du bassin est retrouvée précocement mais pas au recul (exemple figures 19 et 20)



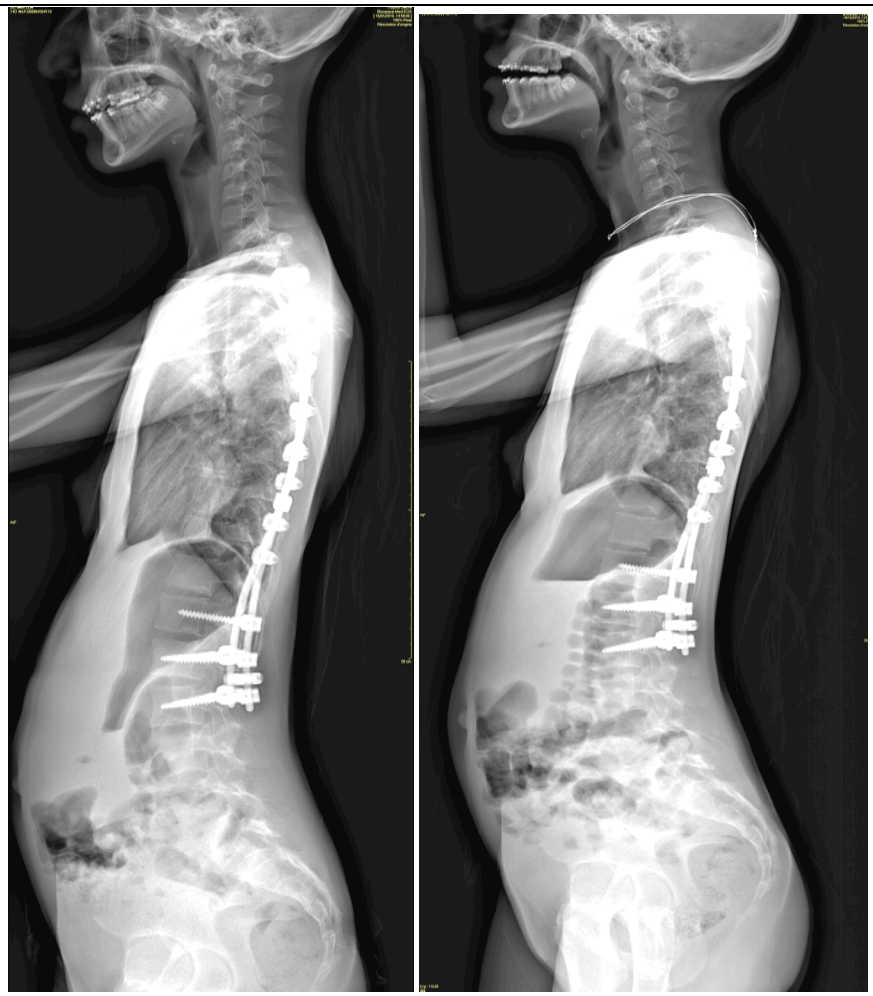
Figures 19 et 20: patiente ayant une faible incidence pelvienne associée à une hypocyphose thoracique préopératoire (voir figure 17). Figure 19 : postopératoire à 3 mois. Figure 20 : postopératoire à 2 ans.

N=30	Préopératoire	3 mois	2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
C1C3° Moyenne (écart type)	46.2 (5.5)	40.9 (3.1)	38.8 (5.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-1.6 (10.8)	-4.8 (12.6)	-1.3 (7.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	6.6 (9.4)	-3.4 (11.7)	2 (4)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	49.8 (3.3)	37.3 (11.3)	45.9 (8.9)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T4° Moyenne (écart type)	23.6 (7.2)	5.4 (9.8)	8.1 (5.2)	**p=0.0492**	**p=0.0072**	n.s.
T4T12° Moyenne (écart type)	26.1 (9.9)	31.9 (5.6)	37.7 (9.3)	n.s.	n.s.	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	48.5 (7.5)	43.8 (3.5)	44.7 (3.8)	n.s.	n.s.	n.s.
IP° Moyenne (écart type)	38.6 (3.7)	35.3 (6.3)	34.8 (5.3)	n.s.	n.s.	n.s.
VP° Moyenne (écart type)	4.9 (6.6)	3.7 (1.6)	1.8 (4)	n.s.	n.s.	n.s.
PS° Moyenne (écart type)	33.7 (10.2)	31.6 (7)	33.0 (8.5)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	14.2 (40.3)	40.5 (6.3)	9.2 (6.3)	n.s.	n.s.	p=0.0525
CAEHmm Moyenne (écart type)	-2.9 (52.3)	22.3 (1)	-4.6 (15.7)	n.s.	n.s.	p=0.0688
C7PLmm Moyenne (écart type)	4.2 (38)	14.9 (9.4)	-6.1 (15.6)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7mm Moyenne (écart type)	9.6 (6.4)	20.4 (8.4)	15.5 (11.4)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 25 : **groupe FIP/HCT** (faible incidence pelvienne/cyphose thoracique élevée. Evolution des paramètres sagittaux en préopératoire, postopératoire précoce (3 mois) et postopératoire tardif (2 ans). T-test de Student apparié. Significativité retenue pour les valeurs de $p<0.05$.

Ces patients, non déséquilibrés en préopératoire, restent globalement équilibrés en postopératoire tardif après une phase de déséquilibre antérieur marqué. Le déséquilibre antérieur postopératoire précoce est en rapport avec une diminution de la cyphose thoracique supérieure non compensée par le rachis cervical. En postopératoire

tardif, le déséquilibre est corrigé par une augmentation de la cyphose thoracique basse et une adaptation du rachis cervical. Les figures 21 et 22 illustrent ce type de profil.



Figures 21 et 22: patiente ayant une forte incidence pelvienne associée à une hypocyphose thoracique préopératoire (voir figure 18). Figure 21 : postopératoire à 3 mois. Figure 22 : postopératoire à 2 ans.

N=17	Préopératoire	3 mois	2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
C1C3° Moyenne (écart type)	38 (3.6)	38.7 (11.5)	40.9 (7.6)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-7.7 (20.3)	-12.2 (18.1)	-11.7 (18.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-3.8 (19.9)	-0.8 (20.4)	-8.3 (19.6)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	14 (3.2)	27 (3.3)	20.4 (6.8)	**p=0.0463**	n.s.	n.s.
T1T4° Moyenne (écart type)	6.5 (1.5)	7 (2.9)	-12.1 (5.6)	n.s.	**p=0.0405**	p=0.0677
T4T12° Moyenne (écart type)	7.4 (2.1)	20.4 (5.1)	32.5 (7.5)	n.s.	**p=0.0301**	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	59 (2.2)	55 (8.9)	65.6 (4.5)	n.s.	n.s.	n.s.
IP° Moyenne (écart type)	69.8 (5.8)	73.3 (1.9)	70.6 (1.7)	n.s.	n.s.	n.s.
VP° Moyenne (écart type)	18.6 (4.7)	22.9 (3.9)	17.4 (4.6)	n.s.	n.s.	n.s.
PS° Moyenne (écart type)	51.3 (2.3)	50.4 (5.6)	53.2 (2.9)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	65.9 (15.6)	50.1 (7.1)	45 (6.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEHmm Moyenne (écart type)	24.7 (20)	-5.6 (5.6)	5.9 (17.5)	p=0.062	n.s.	n.s.
C7PLmm Moyenne (écart type)	48.8 (14.2)	30.3 (11.3)	28.5 (1.4)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7mm Moyenne (écart type)	17.1 (2.5)	20.2 (6.2)	16.5 (8.1)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 26: **groupe HIP/FCT** (forte incidence pelvienne/faible cyphose thoracique). Evolution des paramètres sagittaux en préopératoire, postopératoire précoce (3 mois) et postopératoire tardif (2 ans). T-test de Student apparié. Significativité retenue pour les valeurs de $p<0.05$.

Dans le groupe de patients présentant en préopératoire une forte incidence pelvienne associée à une faible cyphose thoracique, le déséquilibre antérieur global initial est corrigé par l'augmentation de la cyphose thoracique haute et de la cyphose thoracique basse sans modification de la statique cervicale.

ii. Explications des modifications de l'équilibre global

En postopératoire précoce, aucune modification n'a été observée.

En postopératoire tardif, l'équilibre global de la cohorte est significativement amélioré..

Nous avons décomposé étage par étage ces modifications. La segmentation du rachis dans le plan sagittal a suivi la division usuelle en lordose cervicale, cyphose thoracique et lordose lombaire. En postopératoire, le rachis thoracique est le siège d'une instrumentation postérieure dont l'extrémité proximale va définir un rachis thoracique supérieur (au-dessus du montage) et un rachis thoracique inférieur (compris dans le montage). Pour des questions pratiques, nous avons choisi de fixer la vertèbre T4 comme vertèbre limite.

-Modifications de l'étage cervical en postopératoire tardif (tableau 16)

Dans le groupe déséquilibre postérieur selon la distance CAEH préopératoire, la courbure cervicale globale (C2C6) est modifiée avec une restauration de la lordose (-4° vs 3.6°, p=0.0268).

-Modifications de l'étage thoracique en postopératoire tardif (tableaux 27 à 33).

	Préopératoire	Postopératoire précoce à 3 mois	Postopératoire tardif à 2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
T1T12° moyenne (écart type)	28.2 (12.6)	32.4 (11.7)	38.4 (12.1)	**p = 0.0138**	**$p<10^{-4}$**	**p=0.0004**
T1T4° moyenne (écart type)	9.5 (12)	6.2 (12.5)	7.9 (14)	n.s.	n.s.	n.s.
T4T12° moyenne (écart type)	19.5 (15.1)	27.5 (12)	31.9 (11.9)	**p= 0.0003**	**$p<10^{-4}$**	**p=0.0065**

Tableau 27: Analyse segmentaire thoracique. **Tous patients**. T-test de Student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

	Préopératoire	Postopératoire précoce à 3 mois	Postopératoire tardif à 2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
T1T12° moyenne (écart type)	28.8 (13.6)	34.1 (12.1)	37.5 (12.4)	n.s.	**p=0.0102**	n.s.
T1T4° moyenne (écart type)	11.2 (10.7)	7 (13.5)	7.3 (14.4)	n.s.	n.s.	n.s.
T4T12° moyenne (écart type)	18.7 (15.4)	28.6 (13.4)	32 (11.2)	**p=0.0026**	**p=0.0008**	n.s.

Tableau 28 : Analyse segmentaire thoracique. **Groupe déséquilibre antérieur préopératoire (CAEH)**. t-test de Student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

	Préopératoire	Postopératoire précoce à 3 mois	Postopératoire tardif à 2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
T1T12° moyenne (écart type)	27.2 (12.9)	32.2 (12.6)	37.2 (12.8)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T4° moyenne (écart type)	7.2 (11.4)	5.5 (10.5)	6.8 (13.2)	n.s.	n.s.	n.s.
T4T12° moyenne (écart type)	20.0 (16.7)	26.7 (12.6)	30.4 (11.1)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 29 : Analyse segmentaire thoracique. **Groupe déséquilibre antérieur préopératoire (C7PL)**. t-test de Student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

	Préopératoire	Postopératoire précoce à 3 mois	Postopératoire tardif à 2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
T1T12° moyenne (écart type)	27.2 (10.1)	29.7 (9.31)	37.9 (12)	n.s.	**p=0.041**	**p=0.0476**
T1T4° moyenne (écart type)	-2 (15.2)	0.3 (7.5)	9.6 (7.1)	n.s.	p=0.092	n.s.
T4T12° moyenne (écart type)	29.3 (21.5)	29.3 (10.2)	28.3 (11.9)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 30 : Analyse segmentaire thoracique. **Groupe non déséquilibré en préopératoire (CAEH)**. t-test de student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

	Préopératoire	Postopératoire précoce à 3 mois	Postopératoire tardif à 2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
T1T12° moyenne (écart type)	28.7 (10.2)	34.0 (10.2)	40.4 (10.7)	n.s.	**p=0.0008**	n.s.
T1T4° moyenne (écart type)	13.6 (11.3)	7.3 (17.3)	8.6 (15.6)	n.s.	n.s.	n.s.
T4T12° moyenne (écart type)	18.5 (10.8)	32.6 (8.6)	38.9 (11.8)	**p=0.0024**	**p=0.0014**	n.s.

Tableau 31 : Analyse segmentaire thoracique. **Groupe non déséquilibré en préopératoire (C7PL)**. t-test de student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

	Préopératoire	Postopératoire précoce à 3 mois	Postopératoire tardif à 2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
T1T12° moyenne (écart type)	26.5 (12.9)	30.2 (11.3)	38.5 (12.6)	n.s.	**p=0.0011**	**p=0.0085**
T1T4° moyenne (écart type)	12.1 (10.2)	7.3 (10.4)	7.5 (14.8)	p=0.084	n.s.	n.s.
T4T12° moyenne (écart type)	15.6 (10.3)	24.5 (9.8)	33.2 (12.1)	**p=0.0092**	**p=0.0003**	**p=0.0015**

Tableau 32: Analyse segmentaire thoracique. **Groupe déséquilibre postérieur en préopératoire (CAEH)**. t-test de Student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

	Préopératoire	Postopératoire précoce à 3 mois	Postopératoire tardif à 2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
T1T12° moyenne (écart type)	43.6 (8.7)	43.3 (10.3)	49.3 (8)	n.s.	n.s	n.s.
T1T4° moyenne (écart type)	20.4 (10.1)	14.8 (4.3)	10.5 (4.4)	n.s.	n.s.	n.s.
T4T12° moyenne (écart type)	23.2 (1.5)	28.5 (6.3)	38.8 (10.6)	n.s.	**p=0.047**	n.s.

Tableau 33: Analyse segmentaire thoracique. **Groupe déséquilibre postérieur en préopératoire (C7PL)**. t-test de Student apparié. Résultats significatifs pour p<0.05.

.*Thoracique global (T1T12)*

Une augmentation significative de la cyphose thoracique globale est observée dans les trois groupes d'équilibres.

Dans les groupes de patients globalement équilibrés et de patients en déséquilibre postérieur, l'augmentation de la cyphose a lieu entre 3 mois et 2 ans postopératoires.

.*Thoracique haut (angle T1T4)*

Dans le groupe de patients en déséquilibre antérieur, aucune modification significative de l'angle T1T4 n'est notée, ni en postopératoire précoce ni en postopératoire tardif.

Dans le groupe de patients équilibrés (suivant CAEH), il existe une augmentation de la cyphose régionale haute entre le préopératoire et le recul à 2 ans à la limite de la significativité.

Dans le groupe de patients en déséquilibre postérieur, la diminution de la cyphose thoracique haute entre le pré- et le postopératoire précoce tend vers la significativité. Cette tendance n'est pas retrouvée en postopératoire tardif.

.*Thoracique bas*

La cyphose thoracique basse est augmentée dans les deux groupes en situation de déséquilibre.

Il n'existe pas de différence entre le postopératoire précoce et le postopératoire tardif chez les patients en déséquilibre antérieur.

Dans le groupe en déséquilibre postérieur suivant la distance CAEH, il existe une continuité dans l'augmentation de la cyphose thoracique basse entre le postopératoire à 3 mois et à 2 ans.
Dans le groupe non déséquilibré suivant la distance C7PL, il existe une augmentation continue également de la cyphose thoracique des étages instrumentés (thoracique bas).

-Modifications de l'étage lombaire en postopératoire tardif (tableau 16)
Aucune modification de courbure en postopératoire tardif n'est à signaler.

iii. Analyse de la zone jonctionnelle supérieure

Dans cette partie de notre travail, le comportement du rachis sus-jacent à l'extrémité proximale du montage est analysé. En effet, une des complications postopératoires tardives de la chirurgie des déformations rachidiennes, qu'elles soient frontales ou sagittales, est la dégradation des niveaux adjacents aux extrémités des montages. Dans le cas de la scoliose idiopathique de l'adolescent, la problématique est propre au niveau supérieur du montage. La compréhension et la prévention de la cyphose jonctionnelle supérieure sont des enjeux majeurs de la chirurgie de la scoliose idiopathique de l'adolescent et de nombreux auteurs en ont identifié les facteurs de risque (références bibliographiques 88 à 97). La question posée réside donc dans l'étude du comportement du rachis sus-jacent au montage en fonction du niveau supérieur de l'arthrodèse. Nous avons ici étudié les modifications sagittales précoces (à 3 mois) et tardives (à 2 ans de la chirurgie) du rachis thoracique supérieur, du rachis cervical et de l'équilibre sagittal global.

Nous avons isolé trois groupes de patients en fonction du niveau supérieur du montage :
-groupe T2 : patients dont le niveau supérieur de l'arthrodèse est situé en T2 (N=22)
-groupe T3 : patients dont le niveau supérieur de l'arthrodèse est situé en T3 (N=40)
-groupe T4 : patients dont le niveau supérieur de l'arthrodèse est situé en T4 ou en dessous (N=92)

Les patients des trois groupes avaient une cyphose thoracique globale (mesurée par l'angle T1T12) identique en préopératoire.

En préopératoire (tableau 26) et postopératoire précoce (3 mois) (tableau 27), les trois groupes de patients ne présentaient pas de différence d'angles ou de distances dans le plan sagittal.

	Groupe T4 (n=92)	Groupe T3 (n=40)	Groupe T2 (n=22)	T4 vs T3	T4 vs T2	T3 vs T2
C1C3° moyenne (écart type)	39.4 (9.1)	32.4 (14.1)	37.2 (9.6)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° moyenne (écart type)	-7.2 (17.3)	-7.2 (13.9)	8.8 (23.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° moyenne (écart type)	-8.2 (17)	-11.4 (13.3)	3.2 (22.3)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPL mm moyenne (écart type)	22 (31.2)	36.2 (17.4)	26.3 (30.4)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEH mm moyenne (écart type)	-5.1 (29.6)	5.4 (24.1)	7.9 (48.8)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PL mm moyenne (écart type)	10.6 (23.9)	23 (17.8)	19.4 (25.1)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7 mm moyenne (écart type)	11 (17.9)	13.3 (6.2)	4.4 (11.9)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 34 : **Préopératoire**. Courbures sagittales supérieures et équilibre global selon le niveau supérieur du montage. T-test de Student.

	Groupe T4 (n=92)	Groupe T3 (n=40)	Groupe T2 (n=22)	T4 vs T3	T4 vs T2	T3 vs T2
C1C3° moyenne (écart type)	37.8 (8.8)	35.8 (12.6)	30.5 (13.2)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° moyenne (écart type)	-4.3 (16.3)	-6.5 (8.8)	3.3 (10.2)	n.s.	n.s.	p=0.0767
C2C6° moyenne (écart type)	-3.9 (15.6)	-9.3 (12.3)	0.1 (14.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPL mm moyenne (écart type)	23.8 (24.3)	20.9 (17.3)	35.5 (42.1)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEH mm moyenne (écart type)	-8.9 (22.6)	0.6 (23.4)	14 (42.7)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PL mm moyenne (écart type)	13.6 (17.7)	6.7 (31.4)	33.1 (27.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7 mm moyenne (écart type)	10.5 (15.2)	5.2 (10.4)	3.4 (16.3)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 35 : Postopératoire à **3 mois**. Courbures sagittales supérieures et équilibre global selon le niveau supérieur du montage. T-test de Student.

	Groupe T4 (n=92)	Groupe T3 (n=40)	Groupe T2 (n=22)	T4 vs T3	T4 vs T2	T3 vs T2
C1C3° moyenne (écart type)	37.8 (7.5)	33.5 (13)	40.4 (8)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° moyenne (écart type)	-2.6 (15.7)	0.4 (13.2)	5.9 (8.2)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° moyenne (écart type)	-2.7 (17.3)	1.1 (11.9)	14.3 (16)	n.s.	**p=0.043**	n.s.
CAEPL mm moyenne (écart type)	17.9 (19.7)	14.7 (5.2)	15.1 (16.5)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEH mm moyenne (écart type)	-9.4 (20.8)	-11.4 (14.2)	-7.9 (17.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PL mm moyenne (écart type)	7.5 (13.7)	6.9 (14)	6.7 (14.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7 mm moyenne (écart type)	10.5 (16.7)	10.2 (14.6)	8.6 (16.5)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 36 : Postopératoire à **2 ans**. Courbures sagittales supérieures et équilibre global selon le niveau supérieur du montage. T-test de Student.

En postopératoire tardif (2 ans), les patients du groupe T2 ont une lordose cervicale globale plus importante que des patients des groupes T3 et T4 (tableau 28).

	Préopératoire	3 mois	2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
C1C3° moyenne (écart type)	37.2 (9.6)	30.5 (13.2)	40.4 (8)	n.s.	n.s.	**p=0.0252**
C3C7° moyenne (écart type)	8.8 (23.3)	3.3 (10.2)	5.9 (8.2)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° moyenne (écart type)	3.2 (22.3)	0.1 (14.7)	14.3 (16)	n.s.	n.s.	**p=0.0286**
CAEPL mm moyenne (écart type)	26.3 (30.4)	35.5 (42.1)	15.1 (16.5)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEH mm moyenne (écart type)	7.9 (48.8)	14 (42.7)	-7.9 (17.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PL mm moyenne (écart type)	19.4 (25.1)	33.1 (27.7)	6.7 (14.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7 mm moyenne (écart type)	4.4 (11.9)	3.4 (16.3)	8.6 (16.5)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 37 : **Groupe T2** (n=22). Modifications des courbures supérieures et de l'équilibre sagittal global en postopératoire précoce et tardif. T-test de Student apparié.

Les patients du groupe T2 ont une augmentation progressive de la lordose cervicale globale durant la période postopératoire.

	Préopératoire	3 mois	2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
C1C3° moyenne (écart type)	39.4 (9.1)	37.8 (8.8)	37.8 (7.5)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° moyenne (écart type)	-7.2 (17.3)	-4.4 (16.3)	-2.6 (15.7)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° moy (sd)	-8.2 (17)	-3.9 (15.6)	-2.7 (17.3)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPL mm moyenne (écart type)	22 (31.2)	23.8 (24.3)	17.9 (19.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEH mm moyenne (écart type)	-5.1 (29.6)	-8.9 (22.6)	-9.4 (20.8)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PL mm moyenne (écart type)	10.6 (23.9)	13.6 (17.7)	7.5 (13.7)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEC7 mm moyenne (écart type)	11 (17.9)	10.5 (15.2)	10.5 (16.7)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 38 : **Groupe T4** (n=92). Modifications des courbures supérieures et de l'équilibre sagittal global en postopératoire précoce et tardif. T-test de Student apparié.

	Préopératoire	3 mois	2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
C1C3° moyenne (écart type)	32.4 (14.1)	35.8 (12.6)	33.5 (13)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° moyenne (écart type)	-7.2 (13.9)	-6.5 (8.8)	0.4 (13.2)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° moyenne (écart type)	-11.4 (13.3)	-9.3 (12.3)	1.1 (11.9)	n.s.	**p= 0.0084**	**p=0.009**
CAEPL mm moyenne (écart type)	36.2 (17.4)	20.9 (17.3)	14.7 (5.2)	n.s.	**p= 0.0064**	n.s.
CAEH mm moyenne (écart type)	5.4 (24.1)	0.6 (23.4)	-11.4 (14.2)	n.s.	**p=0.0335**	n.s.
C7PL mm moyenne (écart type)	23 (17.8)	6.7 (31.4)	6.9 (14)	n.s.	p=0.0609	n.s.
CAEC7 mm moyenne (écart type)	13.3 (6.2)	5.2 (10.4)	10.2 (14.6)	**p=0.0466**	n.s.	n.s.

Tableau 39 : **Groupe T3** (n=40). Modifications des courbures supérieures et de l'équilibre sagittal global en postopératoire précoce et tardif. T-test de Student apparié.

Dans le groupe T3, il existe une augmentation progressive de la lordose cervicale C2C6 associée à une amélioration de l'équilibre sagittal à 2 ans (tableau 39).

Au total :

-les patients ayant un niveau supérieur de montage en T4 présentent une diminution de la cyphose thoracique supérieure sans retentissement sur le rachis cervical ni sur l'équilibre sagittal global (qui reste en déséquilibre postérieur).

-les patients ayant un niveau supérieur de l'arthrodèse en T2 ont une augmentation de la cyphose au-dessus du montage avec un retentissement adaptatif du rachis cervical permettant l'obtention d'un équilibre sagittal global proche de la neutralité.

iv. Evolution de la cyphose thoracique globale (T1T12) et supérieure (T1T4) en fonction du niveau supérieur d'arthrodèse (tableau 40 et 41, figures 23 et 24)

	Préopératoire T1T12°	Postopératoire 3 mois T1T12°	Postopératoire 2 ans T1T12°	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
Groupe T4 Moyenne (écart type)	29.5 (12.8)	32.1 (12.2)	37.2 (13.2)	n.s.	n.s.	n.s.
Groupe T3 Moyenne (écart type)	26.5 (12.2)	32.1 (10.3)	38.3 (9.1)	n.s.	**p=0.0032**	n.s.
Groupe T2 Moyenne (écart type)	24.6 (12.5)	37.4 (10.6)	45.7 (9.5)	**p=0.001**	**p=0.0016**	**p=0.01**

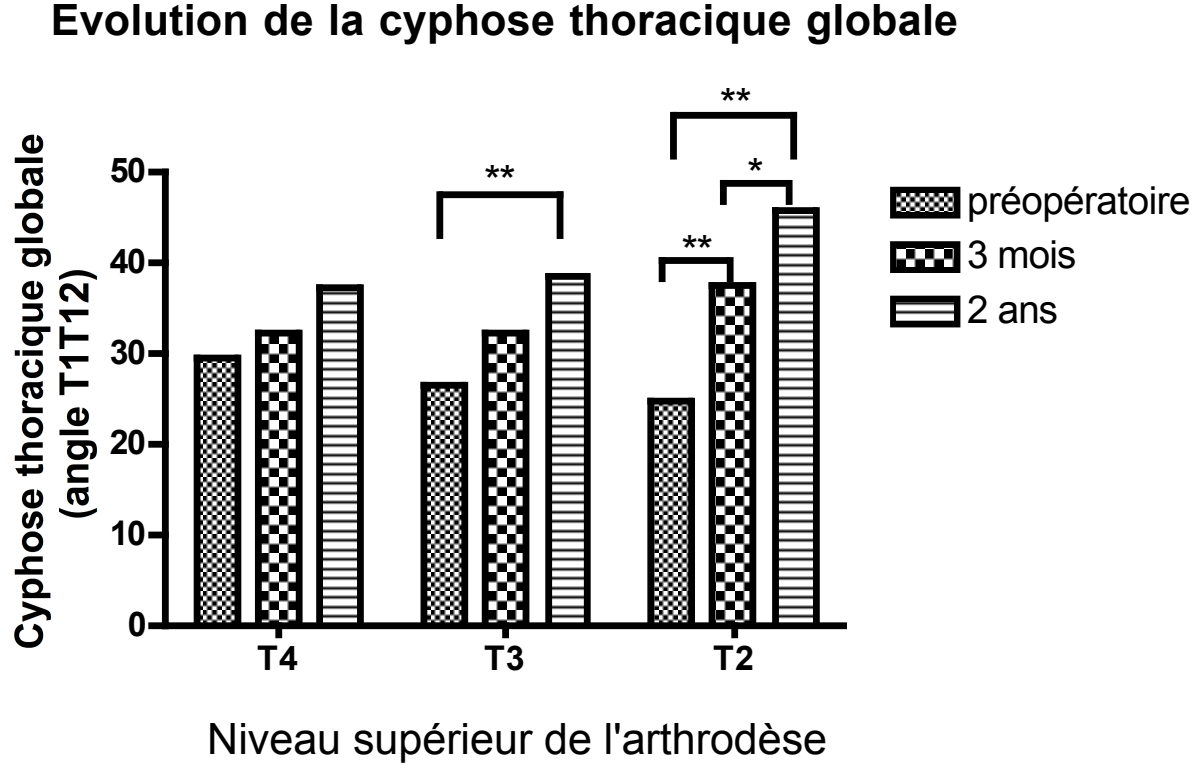


Tableau 40 et figure 23: Evolution de la courbure sagittale thoracique globale selon le niveau supérieur du montage. T-test de Student apparié. (* : p<0.05 ; ** : p<0.005)

	Préopératoire T1T4°	Postopératoire 3 mois T1T4°	Postopératoire 2 ans T1T4°	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
Groupe T4 Moyenne (écart type)	11.7 (10.7)	6.4 (11.9)	4.2 (13.5)	n.s.	**p= 0.0377**	n.s.
Groupe T3 Moyenne (écart type)	6.8 (12.3)	4.3 (10.1)	9.9 (11.1)	n.s.	n.s.	n.s.
Groupe T2 Moyenne (écart type)	2.1 (13.1)	10.2 (17.1)	20.8 (12.6)	n.s.	**p= 0.0035**	n.s.

Tableau 41: Evolution de la courbure sagittale thoracique supérieure selon le niveau supérieur du montage. T-test de Student apparié.

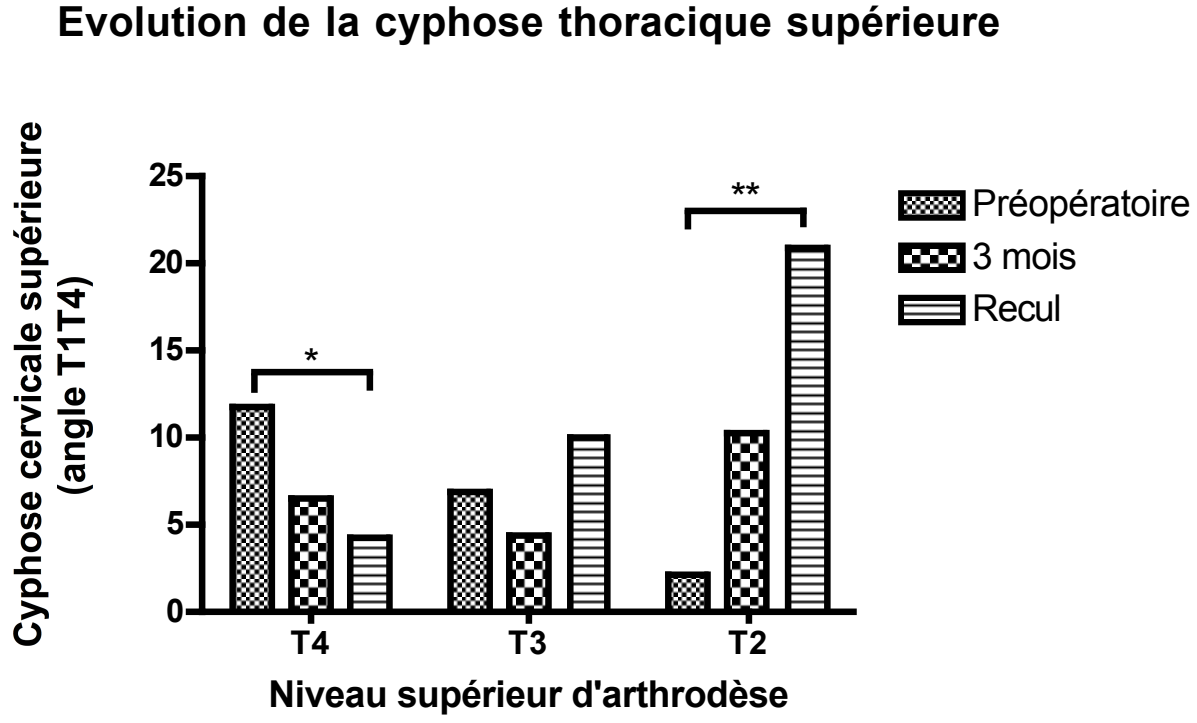


Tableau 41 et figure 24 : Evolution de la courbure sagittale thoracique supérieure selon le niveau supérieur du montage. T-test de Student apparié. (* : $p<0.05$; ** : $p<0.005$)

Les valeurs considérées comme normales sont issues des articles de Vedantam et al. (98) et de la cohorte de Mac-Thiong et al. (99), portant toutes deux sur une population d'adolescents non scoliotiques. Nous retiendrons une valeur de cyphose thoracique globale normale comprise entre 33.1° et 54.9°.

Il n'existe pas de différence significative de cyphose thoracique entre les trois groupes en préopératoire. Celle-ci est dans les limites de la normale.

En postopératoire au recul, la cyphose thoracique des sujets arthrodésés jusqu'en T2 tend à être plus importante que les sujets dont le montage s'arrête en T4 ou T3. Pour le groupe T2, la cyphose globale à 2 ans est de l'ordre de 45°, soit dans les limites supérieures de la normale.

Nous avons étudié l'amplitude de modification de la cyphose thoracique suivant le niveau supérieur arthrodésé entre la période préopératoire et le recul.

Les montages dont l'extrémité proximale est plus haute (T2) sont associés à une augmentation progressive de cyphose thoracique globale due à l'augmentation de la cyphose thoracique supérieure qui atteint à 2 ans les limites supérieures de la normale.

f) Analyse des échecs de rééquilibration du plan sagittal

Nous avons analysé les paramètres sagittaux des patients en déséquilibre postopératoire tardif (à 2 ans) selon la distance C7PL.

Sur les 154 patients de la cohorte, 70 sont en déséquilibre antérieur (distance C7PL>0mm (44)) en postopératoire tardif. Nous avons choisi d'analyser ces patients en les considérant comme des échecs de la correction du plan sagittal.

Ces patients se répartissent comme suit (figure 25):

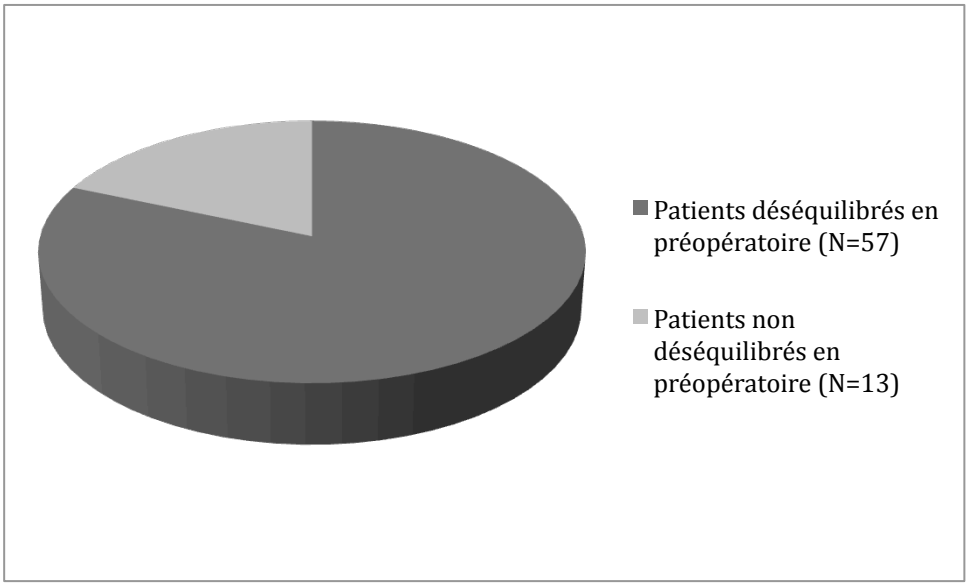


Figure 25 : Patients en déséquilibre antérieur postopératoire. Répartition de l'équilibre préopératoire

Les 57 patients en déséquilibre antérieur postopératoire étaient tous en situation de déséquilibre antérieur préopératoire. La prise en charge chirurgicale, si elle a effectivement corrigé le plan frontal, n'a pas permis de restaurer un équilibre global satisfaisant.

Nous avons analysé en détail les 13 patients qui ont été déséquilibrés par la chirurgie (tableau 42, figures 26 et 27)).

La déformation rachidienne de ces patients était de type Lenke 1 dans 7 cas (53.8%) et de type Lenke 2 dans 6 cas (46.2%).

N=13	Préopératoire	3 mois	2 ans	Préopératoire vs 3 mois	Préopératoire vs 2 ans	3 mois vs 2 ans
C1C3° Moyenne (écart type)	40.8 (8.0)	37.4 (7.8)	37.3 (7.3)	n.s.	n.s.	n.s.
C3C7° Moyenne (écart type)	-14.5 (12.8)	1.6 (10.4)	-1.2 (4.5)	n.s.	n.s.	n.s.
C2C6° Moyenne (écart type)	-13.4 (12.2)	1.2 (12.5)	4.1 (7.9)	n.s.	n.s.	n.s.
T1T12° Moyenne (écart type)	29.8 (15.8)	36.5 (13.4)	46.7 (9.4)	n.s.	**p=0.039**	n.s.
T1T4° Moyenne (écart type)	6.7 (12.0)	-0.9 (14.6)	4.1 (1.3)	n.s.	n.s.	n.s.
T4T12° Moyenne (écart type)	23.1 (8.1)	37.4 (6.8)	42.6 (9.2)	n.s.	**p=0.049**	n.s.
L1L5° Moyenne (écart type)	42.4 (12.8)	36.1 (9.0)	39.3 (6.8)	n.s.	n.s.	n.s.
IP° Moyenne (écart type)	37.9 (5.9)	39.1 (12.3)	39.1 (8.4)	n.s.	n.s.	n.s.
VP° Moyenne (écart type)	6.1 (2.3)	7.6 (2.1)	10.9 (1.5)	n.s.	**p=0.037**	n.s.
PS° Moyenne (écart type)	31.1 (8.7)	34.7 (10.7)	32.3 (6.9)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEPLmm Moyenne (écart type)	3.6 (14.0)	26.2 (17.4)	16.7 (16.5)	n.s.	n.s.	n.s.
CAEHmm Moyenne (écart type)	-15.0 (13.7)	2.5 (15.9)	-16.2 (10.6)	n.s.	n.s.	n.s.
C7PLmm Moyenne (écart type)	-10.2 (9.3)	11.4 (11.5)	20 (4.1)	n.s.	**p=0.0429**	n.s.
CAEC7mm Moyenne (écart type)	13.5 (8.4)	15 (14.7)	21.2 (10.8)	n.s.	n.s.	n.s.

Tableau 42 : **Patients déséquilibrés par la prise en charge chirurgicale** (distance C7PL positive à 2 ans de recul). Evolution des paramètres sagittaux en préopératoire, postopératoire précoce (3 mois) et postopératoire tardif (2 ans). T-test de Student apparié. Significativité retenue pour les valeurs de $p<0.05$.

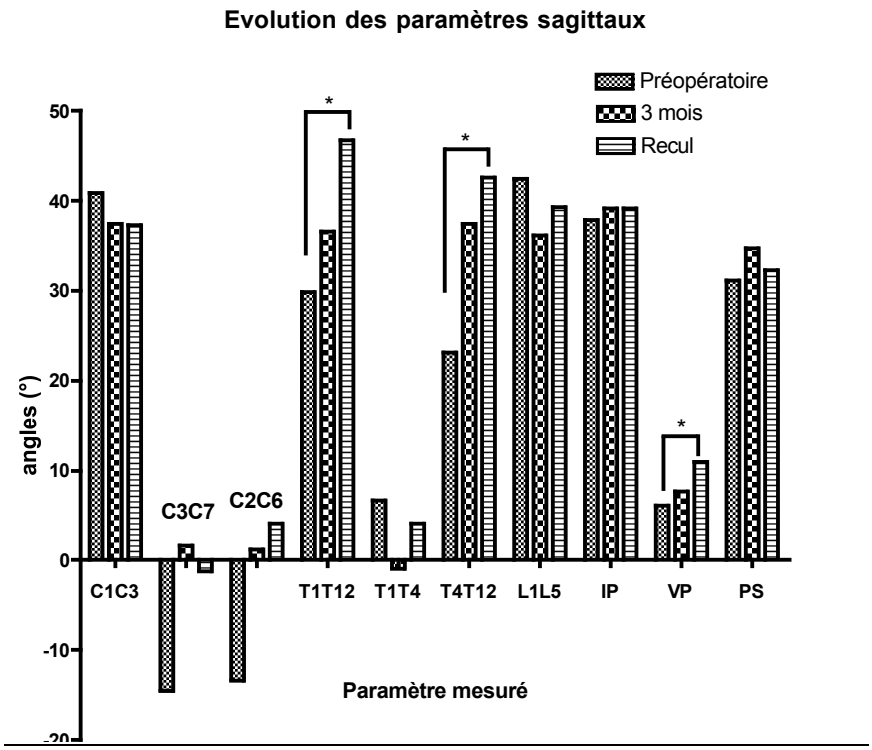


Figure 26: **Patients déséquilibrés par la prise en charge chirurgicale** (distance C7PL positive à 2 ans de recul). Evolution des paramètres sagittaux. (* : p<0.05)

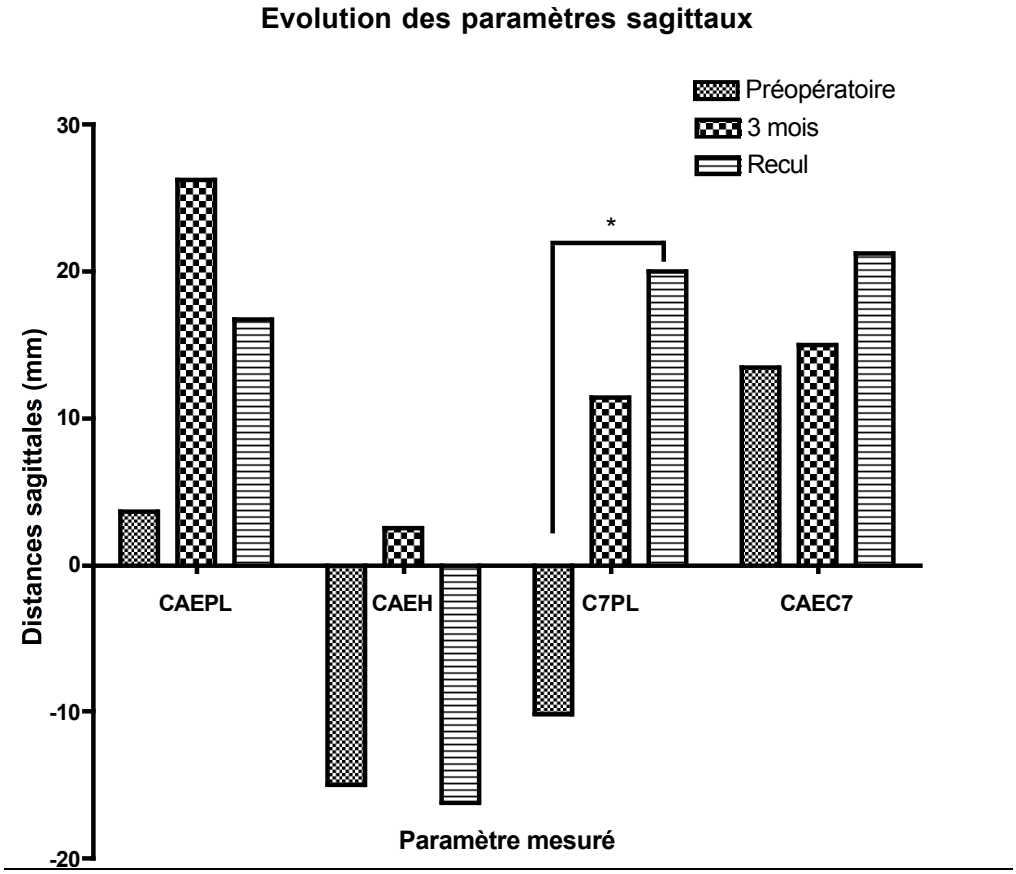


Figure 27: **Patients déséquilibrés par la prise en charge chirurgicale** (distance C7PL positive à 2 ans de recul). Evolution des paramètres sagittaux en préopératoire, postopératoire précoce (3 mois) et postopératoire tardif (2 ans). (* : p<0.05)

Plusieurs particularités de ces patients sont notables : une faible incidence pelvienne préopératoire (moyenne 37.9°) avec une lordose adaptée (42.4°) et une cyphose thoracique globale dans les limites de la normale (29.8°).

Au recul, il existe une majoration significative de la cyphose thoracique globale (46.7°) en rapport avec une augmentation de la cyphose thoracique inférieure, comprise dans le montage (42.6°) et une diminution de l'antéversion du bassin et un déséquilibre antérieur selon la distance C7PL. La lordose cervicale a tendance à s'accentuer au recul pour compenser le déséquilibre antérieur. Ces différences n'existent qu'entre le préopératoire et le recul, il n'y a pas de modification significative entre le préopératoire et le postopératoire précoce.

La lordose lombaire reste adaptée à l'incidence pelvienne et la pente sacrée n'est pas significativement modifiée.

Chez ces patients, les niveaux supérieurs d'arthrodèse ont été T2 pour 4 patients (30.7%), T3 pour 4 patients (30.7%) et T4 pour 5 patients (38.6%) (pas de différence significative).

IV. DISCUSSION

A ce jour, les travaux portant sur l'étude de la scoliose idiopathique de l'adolescent présentent des limites communes. Nous tentons en effet de raisonner sur des projections bidimensionnelles (plan frontal et plan sagittal) d'une déformation tridimensionnelle. Nous ne disposions jusqu'à très récemment que de radiographies standard pour tenter de caractériser la déformation rachidienne. Quelques études ont pu avancer dans la compréhension tridimensionnelle grâce à l'utilisation d'examens tomodensitométriques répétés sur des populations d'adolescents atteints de scolioses idiopathiques (100, 101). Cependant, les doses de radiations ionisantes totales délivrées ont fait abandonner cette pratique au profit des stéréoradiographies biplanaires basse dose (EOS) (102).

Nous avons choisi dans notre étude de poursuivre la totalité du raisonnement en nous focalisant sur le plan sagittal. En effet, la majorité des complications à moyen terme sont en rapport avec le profil des patients scoliotiques (cyphose jonctionnelle proximale ou distale), justifiant l'intérêt qui doit être porté aux modifications de l'équilibre sagittal.

1) Imagerie

a) EOS

L'ensemble des données de notre travail est issu de clichés radiographiques obtenus avec le système EOS de stéréoradiographies biplanaires numériques. Ce type d'imagerie permet l'acquisition de clichés de rachis entier debout de face et de profil de façon simultanée en délivrant une dose inférieure de six à dix fois à la dose délivrée par le même type de clichés réalisés en radiographiques standard (103). Du fait de la faible dose délivrée, la zone imagée peut être élargie en incluant les conduits auditifs externes. Plusieurs intérêts ont été décrits à l'utilisation de ce type d'imagerie, outre la dose délivrée plus faible que les radiographies traditionnelles. Grâce à une acquisition directement bidimensionnelle (le capteur plan et la source de rayons suivent un mouvement parallèle et synchrone), tout problème de biais de projection est éliminé permettant l'obtention de mesures d'angles et de distances fiables. Ce système permet également d'éliminer le biais lié au changement de position du patient entre le cliché de face et le cliché de profil, les deux incidences étant réalisée simultanément.

b) Position lors de l'acquisition

Une position standard a été définie pour l'ensemble des sujets lors de l'acquisition des clichés. Nous avons repris la position debout, regard horizontal et poings sur les clavicules telle qu'elle a été décrite par Faro et validée par la Scoliosis Research Society (62). Cette posture standardisée nous autorise à comparer les sujets de notre cohorte entre eux et rend possible la comparaison de nos résultats avec les autres données de la littérature. Le choix de cette position repose sur plusieurs arguments : station d'équilibre debout, dégagement de la superposition des bras sur le rachis de profil, pas de modification de la position antéro-postérieure du centre de gravité par rapport à une station debout bras le long du corps (position d'équilibre neutre « naturelle »).

Cependant, il est important de garder à l'esprit que les clichés obtenus dans cette position sont des images figées d'une situation dynamique. Il convient de rester critique par rapport aux résultats obtenus sachant qu'il est probable que deux acquisitions réalisées à deux instants distincts donnent des résultats sensiblement différents sans que cela soit pathologique (concept de « cône de stabilité » défendu par Dubousset et exploré par Skalli et al. (104).

2) Validation de l'outil de mesure

a) Pertinence de la validation

A notre connaissance, aucune des séries se focalisant sur l'équilibre sagittal des sujets scoliotiques n'a utilisé d'outil d'analyse méthodologiquement validé. Seule une série récente a utilisé une méthodologie assez comparable dans son approche, mais pour l'examen tridimensionnel du rachis scoliotique (73). Cette dernière étude a formalisé ses résultats suivant les normes ISO (International Organization for Standardization), donnant une marge de précision des mesures en degrés. Pour notre part, nous avons choisi d'utiliser un outil facile d'accès et non spécifique. Il convenait donc de vérifier qu'il permettait de réaliser une analyse reproductible.

b) Logiciel d'imagerie

Nous avons choisi d'utiliser un logiciel d'imagerie répandu et de prise en main aisée (Kodak Carestream Pacs). Nous avons ici démontré que ce logiciel très facile d'accès en pratique clinique quotidienne présentait des critères de fiabilité permettant son utilisation dans l'étude détaillée du plan sagittal du sujet scoliotique.

c) Utilisation du repère des conduits auditifs externes

La pertinence de ce repère anatomique repose sur le fait que l'équilibre sagittal global du rachis ne peut s'apprécier que par des mesures prenant en compte la totalité du rachis, depuis l'occiput jusqu'au sacrum. La limite la plus importante concernant l'utilisation de ce repère est la définition de l'horizontalité du regard du patient (comme il leur est demandé lors de la réalisation des clichés de rachis entier). En effet, la position de la tête du patient lors de l'acquisition modifie la position des CAE dans l'espace. Il apparaît nécessaire de définir précisément lors d'une étude complémentaire les critères d'horizontalité du regard.

Les mesures « classiques » utilisent la vertèbre C7 comme repère supérieur et négligent de ce fait la participation du rachis cervical dans l'équilibre sagittal. Dans notre série préliminaire de 25 patients, la distance moyenne de la C7PL était de 14.7mm (écart type 18.9mm). Il n'existe pas dans la littérature de description de norme pour la C7PL chez l'adolescent. Aussi nous avons défini le déséquilibre selon la C7PL comme suit, nous appuyant sur nos résultats sur sujets sains :

-déséquilibre antérieur pour C7PL>35mm

-déséquilibre postérieur pour C7PL<-5mm

-équilibre neutre pour -5mm<C7PL<35mm

Les graphiques suivants illustrent les différences de classement des patients de notre cohorte suivant la prise en compte du rachis cervical dans l'équilibre sagittal global préopératoire (figures 28 et 29).

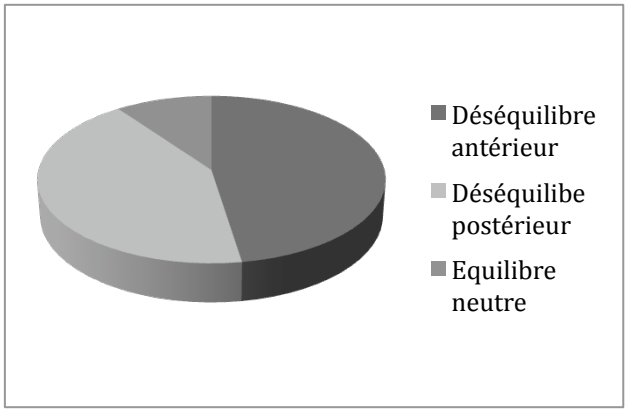


Figure 28 : Equilibre sagittal selon la distance CAEH

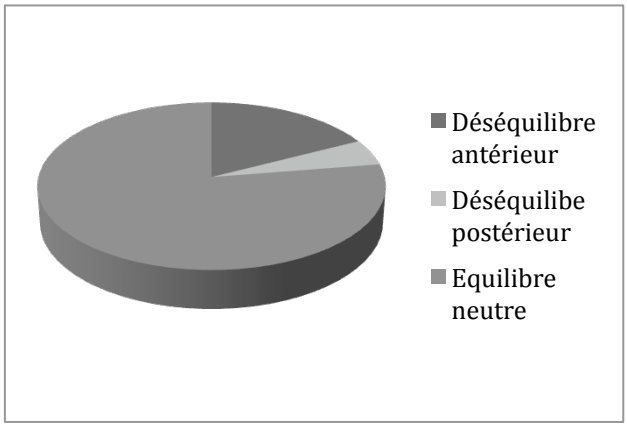


Figure 29 : Equilibre sagittal global selon la distance C7PL

Il est intéressant de noter que les patients de la cohorte, en préopératoire, étaient classés très majoritairement en équilibre global neutre suivant la C7PL alors que le classement suivant la distance CAEH objective une faible minorité de patients équilibrés. Les résultats obtenus en utilisant la distance CAEH pour apprécier l'équilibre sagittal global sont donc pertinents.

L'utilisation du système EOS, grâce aux faibles doses délivrées, permet l'obtention de clichés de rachis entier debout incluant les conduits auditifs externes.
Les conduits auditifs externes ont été choisis car leur identification radiologique est aisée sur les clichés de stéréoradiographie de profil. Leur situation anatomique est, de plus, superposable à celle des centres de l'équilibre.

d) Segmentation du rachis cervical

Dans l'optique de l'étude des modifications de courbure sagittale du rachis cervical après arthrodèse vertébrale postérieure, nous avons choisi de scinder le rachis cervical en deux parties : le rachis cervical supérieur, plus mobile, et le rachis cervical inférieur, plus rigide et directement en rapport avec le rachis thoracique supérieur. Là aussi, la fiabilité des mesures associées est excellente, en permettant l'utilisation dans la suite de nos travaux.

3) Analyse de la cohorte

a) Caractéristiques de la cohorte

Notre série est constituée de patients atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent ayant tous eu recours à la chirurgie. Il ne s'agit donc pas d'une population représentative de l'ensemble des sujets scoliotiques mais davantage des scolioses sévères.

La littérature internationale est relativement pauvre en grandes séries de patients atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent avec prise en charge chirurgicale.

Nous avons regroupé les plus grandes séries (concernant des sujets majoritairement non scoliotiques) et leurs caractéristiques propres au sein du tableau ci-après (tableau 43).

Auteurs	N	Sex ratio	âge	Patients	PI°	L1L5°	T5T12°	CAEH (mm)	C7PL (mm)
Vialle	300	0.58F/ 1M*	35.4*	Volontaires adultes asymptomatiques	54.7° (53.46-55.88)*	43° (41.86-44.4)*	40.6° (39.5-41.8)*	Non connu	Non connu
Tanguay	60	19F/ 1M*	14.7	Scoliose idiopathique de l'adolescent	Non connu	Non connu	Non connu	Non connu	Non connu
Mac-Thiong 2007	341	1.5F/ 1M*	12.1*	Volontaires adolescents asymptomatiques	49.1° (38.1-60.1)	48° (36.3-59.7)	44° (33.1-54.9)*	Non connu	Non connu
Mac-Thiong 2010	709	1F/1M*	36.8*	Volontaires adultes asymptomatiques	52.4° (63.2-41.6)*	Non connu	Non connu	Non connu	Non connu
Yong 2012	95	F*	14.1	Scoliose idiopathique de l'adolescent Lenke 1 & 2	44.2° (34.2-54.2)*	48.5° (37.3-59.7)	15.7° (6.2-25.3)*	Non connu	Non connu
Vidal 2012	154	3.4F/ 1M	12.39	Scoliose idiopathique de l'adolescent Lenke 1, 3, 5 & 6	49.51° (38.4-60.6)	46° (33-59)	19.59° (4.5-34.7)	-0.18 (-32.5;32.1)	15.73 (-7.8;39.3)

Tableau 43 : Les différentes études du plan sagittal
Les différences significatives avec notre cohorte sont signalées par un astérisque.

La répartition des différents types de courbure selon Lenke n'est pas mentionnée dans la série de Yong et al. ni dans celle de Tanguay et al. (105, 106). De même, il est difficile de comparer ces deux séries et celle de notre étude étant donné un sex ratio très différent et l'absence de donnée sur le plan sagittal dans l'étude de Tanguay.

b) Classement des patients

Nous avons choisi de répartir l'ensemble des patients de la cohorte selon deux critères sagittaux préopératoires: l'équilibre sagittal global et l'incidence pelvienne.

i. Equilibre sagittal global

Concernant l'équilibre sagittal global, nous avons pris comme seul critère la distance CAEH qui matérialise le déplacement antéropostérieur des conduits auditifs externes par rapport aux hanches, partant du postulat qu'un sujet équilibré dans le plan sagittal place ses CAE à l'aplomb de ses hanches. En nous appuyant sur les moyennes obtenues chez les 25 sujets sains de la première partie de notre travail (Validation de l'outil de mesure), nous avons fixé une norme de la distance CAEH avec une marge de 5mm en avant et en arrière de la position neutre, définissant de ce fait les sujets en position de déséquilibre antérieur et postérieur. A ce jour, il n'existe pas de série nous permettant d'établir de norme pour la mesure CAEH chez le sujet sain ni chez le sujet scoliotique. C'est la limitation la plus importante de notre étude et il conviendra de combler ce manque par la constitution d'une cohorte de plus grande envergure composée de sujets scoliotiques et de sujets sains.

ii. Incidence pelvienne

Il a été démontré à plusieurs reprises dans la littérature par des séries de grande qualité que l'incidence pelvienne du sujet non scoliotique était l'un des paramètres pelviens invariables chez un individu donné, puisque dépendant de l'anatomie du bassin. Ce paramètre est corrélé à la courbure sagittale lombaire sus-jacente chez le sujet sain. Une seule étude de puissance suffisante (50) a montré la persistance de cette corrélation chez le sujet scoliotique dont on sait que le plan sagittal peut être modifié par la déformation rachidienne (39).

Nous avons réparti les patients de la cohorte selon les trois groupes d'incidences pelviennes décrits par Duval-Beaupère (39): faible incidence, incidence modérée et forte incidence.

4) Résultats de l'analyse préopératoire

a) Répartition des IP et CAEH selon le type de courbure frontale préopératoire

i. IP et courbure frontale

L'incidence pelvienne est plus importante dans le groupe des courbures lombaires que dans le groupe des courbures thoraciques. Dans la série de Mac-Thiong et al. de 2003 portant sur 160 sujets atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent (50), l'analyse de variance ne permettait pas de retrouver de différence significative d'incidence pelvienne quel que soit le type de courbure (selon la classification de King) (107). La cohorte étudiée présentait une incidence pelvienne moyenne significativement plus élevée que les patients de notre série (57.3° +/- 13.8° vs 49.5° +/- 11.1°, p=0.0052), et un angle de Cobb frontal moyen significativement plus faible que dans notre série (43.2° vs 56.3°, p<0.0001). Nous avons également examiné la cohorte de Mac-Thiong du point de vue de la répartition des courbures frontales. Dans cette série, les courbures lombaires représentaient 21/160 patients et les courbures thoracolombaires 31/160 patients, soit respectivement 13.1% et 19.3%. Dans notre cohorte, les proportions étaient respectivement de 8/154 et 27/154 soit 5.1% et 17.5%. Ici aussi, la différence observée est très significative. Il y a donc plus de 2.5 fois plus de patients ayant une scoliose idiopathique lombaire dans la série de Mac-Thiong que dans la nôtre.

A la vue de ces résultats, nous avons cherché à objectiver une corrélation entre l'incidence pelvienne et le niveau de la vertèbre sommet de la courbure principale. Nous n'avons pas retrouvé de corrélation significative entre ces deux paramètres, nous permettant d'affirmer que l'incidence pelvienne et le type de scoliose (caractérisé par le niveau de la vertèbre sommet) sont indépendants. Il s'agit d'une donnée nouvelle, jusqu'ici non connue.

ii. CAEH et courbure frontale

La courbure frontale préopératoire et la distance CAEH sont indépendantes.

b) Corrélation IP et paramètres sagittaux

i. IP et lordose lombaire

Nous avons retrouvé sur notre cohorte l'existence d'une corrélation positive entre l'incidence pelvienne et la lordose lombaire (r=0.3786, p=0.0147). Ce lien statistique est bien connu et caractérisé sur plusieurs séries à effectifs importants chez l'adulte, l'enfant et l'adolescent sain. Dans l'étude de Vialle et al. (48) portant sur 300 adultes volontaires asymptomatiques, la corrélation retrouvée entre l'IP et la lordose lombaire est de 0.68 avec un p très significatif. Dans la seule série portant sur des sujets AIS avec indication chirurgicale, Tanguay et al. (106) trouvent un coefficient de corrélation de 0.53, p<0.0001, sur un échantillon de 60 sujets atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent.

Chez l'adolescent scoliotique, deux études caractérisent cette relation. Dans l'étude de Mac-Thiong et al. de 2003 (50), effectuée sur une cohorte de 160 sujets adolescents scoliotiques, le coefficient de corrélation retrouvé est de 0.62 avec un p très significatif. Pour Yong et al. (105), sur une cohorte de 95 adolescentes atteintes de scoliose idiopathique, le coefficient de corrélation trouvé est r=0.278, avec p significatif.

Les résultats de notre série sont donc tout-à-fait cohérents avec ce qui a déjà été décrit.

La particularité de notre série étant le grand nombre de sujets inclus, et donc la puissance statistique.

ii. IP et équilibre sagittal global

La corrélation établie entre l'incidence pelvienne et la C7 plumb line dans notre étude est de r=0.4272, p=0.006. Dans les séries citées plus haut, seules deux ont étudié les corrélations entre IP et équilibre sagittal, et ce chez le sujet adulte sain:

-Vialle et al. (300 adultes sains) (48): l'équilibre sagittal global était apprécié par la mesure du « T1 sagittal offset », qui est un angle reflétant la translation sagittale de T1 par rapport au centre de rotation des hanches. La corrélation retrouvée était r=0.12, avec p significatif.

-Mac-Thiong, 2010 (709 sujets adultes asymptomatiques) (108) : dans cette grande série, l'équilibre sagittal global était apprécié par la mesure du « C7 translation ratio ». La corrélation retrouvée était r=0.21.

Les indices de corrélation entre IP et C7 plumb line (ou assimilés) sont donc faibles dans

la littérature, témoignant d'une grande variabilité chez les sujets sains. Le coefficient de corrélation que nous avons établi sur notre cohorte est plus grand et peut être interprété comme une corrélation modérée (65).

Dans notre étude, l'équilibre sagittal global apprécié par la distance CAEPL est aussi positivement corrélée à l'incidence pelvienne (r=0.4151, p=0.007). Nous ne pouvons pas comparer cette corrélation avec la littérature étant donné que nous sommes les seuls à ce jour à utiliser le repère des conduits auditifs externes.
Nous apportons donc avec notre cohorte une donnée nouvelle : il existe une corrélation positive entre l'incidence pelvienne et l'équilibre sagittal global chez les sujets AIS en préopératoire. Ceci signifie qu'une forte incidence pelvienne est associée à un risque plus grand de déséquilibre antérieur.

iii. IP et autres paramètres sagittaux
Conformément aux données de la littérature, nous n'avons pas retrouvé de corrélation significative entre l'incidence pelvienne et la cyphose thoracique (r=-0.2734, p>0.05).
Pour Mac-Thiong et al. en 2007 (99) sur une cohorte d'adolescents non scoliotiques, le coefficient de corrélation entre IP et cyphose thoracique était r=0.08, avec p non significatif. Pour Vialle et al. (48), sur une cohorte de 300 adultes sains, le coefficient de corrélation entre IP et cyphose thoracique était établi à r=-0.04 (p non connu). Pour Yong et al. (105), le coefficient de corrélation était r=-0.161 (p non significatif).

c) CAEH et paramètres sagittaux
Les seules corrélations significatives que nous rapportons dans notre travail sont évidentes puisqu'il s'agit de corrélations entre la distance CAEH, la distance CAEPL, la C7PL et la distance CAEC7. Ceci nous apprend que l'équilibre sagittal global (mesuré par la distance CAEH) est indépendant des autres paramètres sagittaux et pelviens.

L'ensemble de ces données peut s'interpréter comme suit :
-chez l'adolescent scoliotique, l'incidence pelvienne est positivement corrélée à la lordose lombaire.
-il existe une corrélation positive entre l'incidence pelvienne et l'équilibre sagittal

mesuré par la C7PL. Autrement dit, une forte incidence pelvienne et un déséquilibre antérieur mesuré par la C7PL sont liés.

-il n'existe pas de corrélation entre l'équilibre sagittal global mesuré par la distance CAEH et les autres paramètres sagittaux.

Il est possible d'en déduire qu'un sujet avec une forte incidence pelvienne aura un déséquilibre antérieur mesuré par la C7PL mais un équilibre sagittal global indépendant (mesuré par la distance CAEH) en rapport avec une compensation indépendante du rachis cervical situé au-dessus de C7.

d) L'équilibre sagittal global préopératoire

De façon à affiner la déduction précédente et situer la compensation du rachis cervical, nous avons réparti les sujets de la cohorte selon les trois groupes d'équilibre décrits plus haut.

Les sujets en déséquilibre sagittal global antérieur ont une plus grande distance C7PL, une plus forte incidence pelvienne, une plus importante lordose lombaire et une plus grande lordose cervicale supérieure que les sujets des autres groupes.

Nous en concluons que le rachis cervical supérieur des sujets en déséquilibre antérieur global cherche à compenser le déséquilibre par une plus grande lordose.

e) Influence de l'incidence pelvienne

Bien qu'il n'existe pas de corrélation significative entre incidence pelvienne et cyphose thoracique, la subdivision des patients de notre cohorte en trois groupes d'incidences pelviennes (IP faible, IP modérée, IP forte) a permis de dégager l'association d'une forte incidence pelvienne avec une lordose lombaire plus marquée, une cyphose thoracique moins importante et un déséquilibre antérieur global. Ces nouvelles conclusions font sens dans la mesure où la corrélation entre incidence pelvienne et lordose lombaire est bien caractérisée. La compensation de la forte lordose lombaire par la courbure thoracique ne peut pas se faire car la déformation scoliotique affecte le rachis suivant sa dimension sagittale avec une perte de la cyphose thoracique physiologique. Il en résulte un déséquilibre antérieur global que ne peut pas compenser le rachis cervical malgré l'adaptation de la lordose cervicale supérieure comme montré plus haut.

f) Incidence pelvienne et cyphose thoracique préopératoires: les déterminants du déséquilibre sagittal

Cette partie de notre analyse a permis de mettre en évidence une brèche dans le raisonnement sur lequel nous nous appuyions, et qui faisait de l'incidence pelvienne le déterminant unique de la courbure sagittale lombaire. En réalité, les coefficients de corrélation entre incidence pelvienne et lordose lombaire rapportés dans les différentes études citées (48, 99) s'échelonnant entre 0.62 et 0.68 chez l'adolescent et l'adulte sain (0.3786 dans notre série), permettent de comprendre que s'il existe bien une relation linéaire entre ces deux paramètres, elle est plus complexe qu'une relation directe chez l'adolescent scoliotique. Il existe en effet un facteur supplémentaire à prendre en compte : la cyphose thoracique. Cette dernière prend une place très importante dans l'équation reliant incidence pelvienne et lordose lombaire particulièrement chez le sujet scoliotique, dont la courbure sagittale thoracique est enraidie (109) et doit être considérée comme fixée dans le cadre de la déformation.

La courbure sagittale du rachis lombaire est donc conditionnée par les contraintes imposées par 1) l'anatomie du bassin et 2) la déformation sagittale du rachis thoracique.

De façon à mieux caractériser les relations mathématiques unissant bassin, rachis lombaire et rachis thoracique, il est nécessaire de réaliser une analyse multivariée prenant en compte tous les paramètres sagittaux segmentaires et globaux. Pour que les résultats obtenus soient significatifs, et sachant que l'on désire disposer de deux variables explicatives (incidence pelvienne et cyphose thoracique), la taille de notre cohorte est insuffisante (110).

5) Résultats de l'analyse postopératoire

Le traitement chirurgical de la scoliose idiopathique de l'adolescent doit obéir à cinq objectifs principaux tels que définis par Ward et al. (111): arrêter la progression de la déformation, obtenir une réduction durable et un résultat esthétique satisfaisant, améliorer le pronostic fonctionnel et réduire le risque de progression dégénérative à l'âge adulte. Le choix des modalités du traitement chirurgical est essentiellement basé sur les caractéristiques radiographiques de la déformation. Les résultats cliniques sont directement corrélés avec les caractéristiques radiographiques post-opératoires du plan sagittal. En particulier, une perte de la lordose lombaire, un déséquilibre antérieur et une rétroversion pelvienne ont été corrélés à de moins bons scores fonctionnels chez

l'adulte scoliotique (112, 113).

a) Correction du plan frontal

La correction de l'angle de Cobb de la courbure principale a été mesurée en postopératoire précoce et tardif. La correction décrite dans notre série n'est pas différente de ce qui est rapporté dans la littérature sur les études les plus récentes (114, 115, 116) Nous notons cependant une tendance vers une diminution de la correction entre le postopératoire précoce et le postopératoire tardif (63.8% (+/-13.4) à 3 mois, 55.8% (+/-20) à 24 mois). La perte de correction observée dans notre cohorte est comparable à celles rapportées par la littérature dans les montages postérieurs, qu'ils soient sélectifs (courts) (117, 118, 119) ou longs (120, 121).

La séparation des patients selon les trois groupes de courbures principales (thoracique T, thoraco-lombaire TL et lombaire L) permet d'identifier que la perte de correction du plan frontal est présente dans le groupe T et dans le groupe L, mais pas dans le groupe TL. Cette différence de comportement n'est pas expliquée par la longueur des montages (non différents entre les trois groupes).

b) Modifications de l'équilibre sagittal global après arthrodèse par voie postérieure

i. Influence de l'équilibre global préopératoire

Nous constatons l'absence de modification significative en postopératoire précoce, alors qu'en postopératoire tardif à 2 ans nous notons une diminution nette du déséquilibre (dans les groupes déséquilibrés) ainsi qu'une augmentation de la cyphose thoracique globale (angle T1T12).

Dans le groupe de patients présentant un déséquilibre postérieur préopératoire, on note également que la courbure sagittale cervicale globale mesurée par l'angle C2C6 est modifiée avec le passage d'une cyphose cervicale (C2C6°=-4°) à une lordose cervicale globale (C2C6°=3.6°), avec une différence significative (p=0.0268). Schématiquement, ceci signifie qu'un patient en déséquilibre postérieur préopératoire qui cherchait à compenser ce déséquilibre par une modification de la courbure sagittale cervicale vers la cyphose (pour « rattraper » la ligne d'équilibre), voit sa cyphose thoracique postopératoire restaurée, ce qui a comme effet de redonner un équilibre global plus neutre et une lordose cervicale plus physiologique.

Notre analyse apporte une preuve méthodologiquement solide à ce qui n'était jusqu'ici qu'un raisonnement logique concernant les modifications réciproques des paramètres sagittaux rachidiens.

ii. Influence de l'incidence pelvienne

En postopératoire précoce, seul le groupe d'incidence pelvienne modérée est sujet de modifications, qui sont une diminution de la lordose lombaire et une augmentation de la cyphose thoracique. Les patients du groupe forte incidence pelvienne, majoritairement en déséquilibre antérieur préopératoire, présentent en postopératoire précoce une nette diminution du déséquilibre sagittal antérieur mesuré par la C7 plumb line.

En postopératoire tardif, les groupes faible incidence pelvienne et incidence pelvienne modérée présentent une modification significative de la cyphose thoracique dans le sens de l'augmentation, tandis que seul le groupe d'incidence pelvienne forte montre une diminution du déséquilibre antérieur à la limite de la significativité ($p=0.0505$) par rapport aux mêmes mesures préopératoires.

La correction postopératoire de la cyphose thoracique est une donnée bien établie en rapport avec le type d'instrumentation postérieure. Mazda et al. ont démontré l'effet cyphosant des fixations postérieures utilisant les clamps universels aux étages thoraciques, reposant sur la translation postéro-médiale du rachis thoracique (38). Concernant la diminution du déséquilibre antérieur, l'effet indirect des montages hybrides (via l'augmentation de la cyphose thoracique) est le plus aisément détectable par l'outil d'analyse utilisé dans le groupe qui est le plus déséquilibré (groupe de patients en situation de déséquilibre antérieur).

c) Analyse des modifications segmentaires après chirurgie

Il existe une différence entre le postopératoire précoce et le postopératoire tardif comme mentionné plus haut avec une absence de changement d'équilibre global précoce et une amélioration de l'équilibre sagittal en postopératoire tardif. Ceci suggère que les modifications de l'équilibre sont des phénomènes adaptatifs se produisant à distance de la correction chirurgicale propre et avant l'obtention de la fusion définitive.

Nous avons choisi de diviser le rachis thoracique en deux segments, partant du principe que le rachis thoracique était mécaniquement scindé en deux zones en postopératoire : le rachis thoracique bas, instrumenté donc plus rigide et moins adaptable, et le rachis

thoracique haut situé au-dessus du montage postérieur, libre et adaptable aux reports de contraintes liés à l'instrumentation sous-jacente.

i. Rachis cervical

Seul le groupe de patients en situation de déséquilibre postérieur voit une modification significative du rachis cervical à long terme avec une restauration de la lordose cervicale globale.

ii. Rachis thoracique haut (T1T4)

Aucune modification significative n'est observée sur ce segment. D'un point de vue statistique, nous atteignons les limites de la puissance de notre étude avec des tests de Student appariés dont les valeurs de p sont à la limite de la significativité. Les modifications de la cyphose thoracique haute, si elles existent, ne sont donc pas majeures.

iii. Rachis thoracique bas (T4T12)

L'augmentation de la cyphose thoracique basse dans les deux groupes de patients en déséquilibre sagittal se produit en un seul temps pour les patients en déséquilibre antérieur (pas de différence entre le postopératoire précoce et le postopératoire tardif), au contraire du groupe en déséquilibre postérieur où il existe une continuité dans l'augmentation de la cyphose thoracique basse entre le postopératoire à 3 mois et à 2 ans.

L'amélioration de l'équilibre global dans le groupe de déséquilibre antérieur est donc en rapport avec l'augmentation de cyphose thoracique inférieure. Dans le groupe de patients en déséquilibre postérieur préopératoire, le rachis cervical globalement cyphosé évolue vers la récupération d'une lordose à 2 ans.

iv. Rachis lombaire

La publication récente de Blondel et al. (122) rapporte une augmentation de la lordose lombaire entre 3 mois et 2 ans postopératoire. Cette série est comparable à la nôtre, composée de 30 patients atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent opérés pour fusion par voie postérieure avec montages hybrides. La différence essentielle entre les deux cohortes réside dans la longueur de la fusion. L'arthrodèse postérieure des

patients de la série de Blondel n'a dans aucun cas été étendue au-dessous de L2. Dans notre série, si l'on considère uniquement les scolioses type Lenke 1 2 et 3 (comme c'est le cas chez Blondel et al.), on retrouve un niveau inférieur de fusion en L2 dans 17.2% des cas (niveau inférieur en L3 dans 48.3% des cas et en L4 pour 34.5% des patients). La stratégie de fusion courte utilisée chez Blondel laisse donc au rachis lombaire au moins 4 disques mobiles sous-jacents au montage et donc une plus grande possibilité d'adaptation à l'architecture imposée par la correction du plan sagittal thoracique.

v. Zone jonctionnelle supérieure

Nous avons mis en évidence que le rachis sus-jacent au montage avait un comportement adaptatif. L'équilibre sagittal global est de meilleure qualité chez les patients avec un niveau supérieur d'arthrodèse en T2, mais au prix d'une augmentation de la cyphose thoracique sus-jacente au montage à terme, synonyme de risque de cyphose jonctionnelle. Dans le groupe des patients avec un niveau supérieur en T4, on observe au contraire la persistance d'un déséquilibre postérieur et la diminution de la cyphose thoracique supérieure au recul.

Dans la série de Kim et al. (91), le taux de cyphose jonctionnelle supérieure était de 26% à 7.3 ans (50 patients sur 193, scoliose idiopathique de l'adolescent). La constitution de la cyphose jonctionnelle se faisait dans les deux ans postopératoires. Aucune corrélation entre cyphose jonctionnelle supérieure et niveau supérieur du montage n'était retrouvée. Notre série retrouve un taux de « sujets à risque » de cyphose jonctionnelle à 2 ans plus faible (22 patients sur 154, soit 14.3%) et une association entre le niveau supérieur de montage plus haut (T2) et le risque de cyphose jonctionnelle.

vi. Correction de la cyphose thoracique globale (T1T12) en fonction du niveau supérieur d'arthrodèse

Nous avons montré dans cette partie que les patients ayant un niveau supérieur d'arthrodèse en T2 avaient une cyphose thoracique globale à la limite supérieure de la normale à 2 ans, en rapport avec une plus forte augmentation de la cyphose thoracique que dans les deux autres groupes.

Ceci signifie que le pré-cintrage des tiges dans le plan sagittal pourrait être trop accentué à leur partie proximale dans les montages s'étendant en T2, résultant en une

situation à risque de cyphose jonctionnelle. Ceci est majoré par l'utilisation de tiges en titane pur, le titane étant un matériau élastique dans sa réponse aux contraintes (123).

vii. Analyse des échecs de rééquilibration du plan sagittal

Nous avons mis en évidence le rôle d'une incidence pelvienne faible dans la constitution d'un déséquilibre antérieur postopératoire. Ceci est directement lié aux faibles capacités d'adaptation des étages lombaires et sacrés des patients ayant une faible incidence pelvienne.

Il est donc possible de conclure comme suit concernant cette iatrogénie :

-les patients avec une faible incidence pelvienne peuvent être déséquilibrés vers l'avant si le montage thoracique inférieur impose une trop grande cyphose

-la faible incidence pelvienne ne permet pas une rétroversion du bassin suffisante pour compenser le déséquilibre antérieur

-l'élasticité du matériel est à mettre en cause (tiges en titane pur) dans la progression de la cyphose thoracique entre le postopératoire précoce et le recul

Il s'agit d'un ensemble de phénomènes connus chez l'adulte (124) mais non décrit chez l'adolescent scoliotique.

6) Implications: influence de l'analyse effectuée sur la prise en charge chirurgicale des patients atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent

L'étude nous apporte que:

a) le raisonnement que nous utilisons dans la planification des niveaux supérieurs et inférieurs des arthrodèses est valable dans la grande majorité des cas. Il permet d'obtenir un rachis globalement équilibré dans le plan frontal et dans le plan sagittal. Cependant, nous avons vu qu'il existait deux cas de figure dans lesquels l'équilibre sagittal postopératoire tardif est imparfait (déséquilibre antérieur) : les patients étant en déséquilibre antérieur préopératoire et les patients ayant une faible incidence pelvienne. Chez ces patients, il est indispensable de veiller à ne pas imposer une cyphose thoracique trop importante dans le montage, leurs capacités d'adaptation étant alors dépassées (faible incidence pelvienne donc peu d'amplitude de rétroversion de bassin).

b) il est licite et fiable d'utiliser le repère des conduits auditifs externes pour apprécier

l'équilibre sagittal global. Ce repère permet de prendre en compte le rachis cervical dans l'équilibre sagittal global. L'un des objectifs de la chirurgie est d'obtenir un équilibre sagittal global neutre (en s'appuyant sur les normes établies chez le sujet adolescent sain). Il reste cependant à définir des normes concernant les mesures sagittales réalisées avec ce repère.

c) l'incidence pelvienne du sujet scoliotique ne doit pas être considérée comme déterminant unique de la lordose lombaire. La courbure sagittale lombaire est en effet régie chez le patient atteint de scoliose idiopathique de l'adolescent par les deux courbures qui l'encadrent anatomiquement : les paramètres pelviens et la courbure sagittale thoracique.

d) la courbure sagittale du rachis cervical est un paramètre qui s'adapte à la position sagittale des étages sous-jacents dans le but d'assurer un équilibre sagittal global neutre (conduits auditifs externes à l'aplomb des hanches)

e) les patients ayant un niveau supérieur d'arthrodèse en T2 sont plus à risque de cyphose jonctionnelle supérieure que si le niveau supérieur de fusion est situé sous T3. Il convient donc de bien peser l'indication de fusion avec niveau proximal en T2 et préférer chaque fois que cela est possible T3 ou T4 en prenant en compte le plan frontal (compromis entre la correction du déséquilibre frontal des épaules et de la correction du plan sagittal du rachis thoracique).

f) il existe une augmentation progressive de la cyphose thoracique supérieure chez les patients en déséquilibre antérieur postopératoire précoce. Le type de matériau utilisé dans le montage est à remettre en cause en raison d'une plasticité trop importante (titane pur). Il est à noter que depuis avril 2011, les montages sont réalisés en acier chrome-cobalt, qui est associé à une moindre perte de correction frontale et sagittale (125).

g) la planification préopératoire est primordiale. Dans le plan frontal, la planification des niveaux supérieurs et inférieurs est bien codifiée (voir supra III-1) b), p) et est complétée en peropératoire dans notre service par une radiographie de rachis entier de face pour apprécier l'équilibre des épaules, la gîte frontale de T1 et l'horizontalité du plateau inférieur de la dernière vertèbre instrumentée (soumission d'article en cours). Il est impossible de réaliser le même type de contrôle peropératoire de profil en raison des contraintes liées à l'installation du patient. Aussi, seule l'analyse rigoureuse menant à la planification préopératoire des courbures sagittales thoraciques et lombaires peut

permettre d'éviter les échecs de correction du plan sagittal et/ou la iatrogénie en rapport.

7) Limites de l'analyse du plan sagittal

L'analyse réalisée sur le plan sagittal repose sur une technique d'imagerie statique. Les données recueillies sont obligatoirement parcellaires, ne reflétant la position du rachis dans l'espace qu'à un instant donné et dans une position fixée.

Le déséquilibre sagittal global mesuré est donc un point qu'il convient de situer dans une « aire » de stabilité propre au patient. Cette aire doit être définie comme l'ensemble des positions des repères de l'équilibre sagittal global (conduits auditifs externes, vertèbre C7) dans le plan antéro-postérieur en position d'équilibre. Cette notion d'aire de stabilité reste à caractériser chez le sujet scoliotique, en introduisant le retentissement clinique du déséquilibre à long terme. En effet, si le déséquilibre frontal est directement corrélé aux scores de qualité de vie (126, 127, 128), il n'en est pas de même pour le déséquilibre sagittal avec faible recul (2 ans).

Nous devons également rester critiques quant à l'interprétation des résultats que nous avons obtenu et en particulier questionner l'échelle des mesures. Bien que l'outil de mesure ait été méthodologiquement validé et que la cohorte analysée apporte une puissance de bonne qualité à notre étude, il est licite de s'interroger sur la signification d'un déséquilibre sagittal inférieur à 35mm à l'échelle du patient.

V. CONCLUSION

La scoliose idiopathique de l'adolescent, pathologie fréquente et potentiellement grave, présente encore aujourd'hui des aspects non maîtrisés car mal compris.
La prise en charge chirurgicale a connu des améliorations constantes grâce à l'utilisation de moyens technologiques évolués. La préoccupation première que constituait la correction de la déformation du plan frontal a rapidement permis d'aboutir à des corrections satisfaisantes, supérieures à 60%, y compris dans les grandes déformations.
L'étude du rachis scoliotique nous apprend que la déformation tridimensionnelle du rachis peut provoquer une perte des courbures sagittales physiologiques dont on sait qu'elles répondent à une nécessité d'équilibre dynamique dictée par la station debout. De cette modification des courbures physiologiques découle un potentiel déséquilibre sagittal global antérieur ou postérieur suivant les capacités d'adaptation du rachis, responsable à long terme de dégénérescence accélérée, douleurs rachidiennes chroniques et handicap.
De nombreux travaux ont montré que le plan sagittal du rachis non scoliotique était sous la dépendance de l'architecture du bassin, facteur propre à chaque individu. Des études plus récentes ont permis de confirmer cette tendance en l'élargissant au rachis scoliotique. Dès lors, il apparaît que ces paramètres pelviens peuvent être en relation avec l'équilibre global du rachis scoliotique. En effet, l'adaptabilité du plan sagittal au niveau thoracique, est compromise par la déformation elle-même. Pour répondre à cette perte d'adaptabilité, et en particulier lorsque le rachis est fixé par une arthrodèse étendue, seuls les étages libres peuvent compenser un éventuel déséquilibre. Ce constat permettrait d'expliquer la dégénérescence accélérée observée sur les rachis cervicaux des sujets scoliotiques ayant une perte iatrogène de cyphose thoracique physiologique.
Notre travail a permis de répondre à plusieurs questions importantes en analysant rigoureusement une grande cohorte de patients scoliotiques.

Nous avons tout d'abord désiré valider méthodologiquement l'outil de mesure que nous avons utilisé de façon à ce que la précision de nos mesures ne soit pas sujet à biais. Dans le même temps, nous avons décrit un ensemble de nouveaux repères radiologiques permettant d'apprécier l'équilibre sagittal global du rachis en prenant en compte la participation du rachis cervical.
Nous avons ensuite utilisé cet outil pour étudier les paramètres sagittaux.

1. Préopératoire

L'analyse préopératoire a permis de montrer plusieurs associations entre les paramètres sagittaux.

a) En préopératoire, l'incidence pelvienne est corrélée à :

-la lordose lombaire. Cette donnée confirme ce qui est déjà connu dans la littérature, y compris chez le sujet scoliotique mais sur des cohortes moins importantes.

-l'équilibre sagittal global mesuré par la C7 plumb line ou la distance CAEPL (plumb line du conduit auditif externe). Ceci n'était pas encore décrit dans la littérature.

-il n'existe pas de corrélation entre l'incidence pelvienne et le niveau de la vertèbre sommet de la courbure frontale principale.

-il n'existe pas de corrélation entre l'incidence pelvienne et la cyphose thoracique préopératoire

b) Les sujets de notre cohorte ont été répartis en groupes d'équilibre sagittal global préopératoire (déséquilibre antérieur, patient équilibré, déséquilibre postérieur). Nous avons conclu de cette partie de l'analyse que les sujets en déséquilibre antérieur avaient une plus grande lordose cervicale supérieure que les autres patients, visant à compenser le déséquilibre antérieur.

c) Nous avons scindé les effectifs selon l'incidence pelvienne. Il en ressort que les sujets avec une forte incidence pelvienne ont une plus forte lordose lombaire, une cyphose thoracique moins importante et un déséquilibre antérieur global plus marqué que les sujets appartenant aux autres groupes d'incidences pelviennes.

d) Nous avons déterminé que l'incidence pelvienne n'était pas le seul paramètre déterminant la lordose lombaire chez le sujet scoliotique, donc la courbure lombaire sagittale est également soumise à une adaptation à l'hypocyphose thoracique causée par la déformation. Il s'agit d'une donnée non encore décrite dans la littérature.

2. Postopératoire

a) Plan frontal

On observe une perte de correction de l'angle de Cobb de la courbure principale entre le postopératoire précoce à 3 mois et tardif à 2 ans chez les patients présentant des scolioses thoraciques et lombaires, comparable aux données de la littérature.

b) Plan sagittal : modifications de l'équilibre global

L'équilibre sagittal global est amélioré dans les groupes qui étaient en déséquilibre antérieur ou postérieur. La diminution du déséquilibre est en rapport avec une augmentation de la cyphose thoracique imputable au segment rachidien instrumenté.

Dans le groupe de patients en déséquilibre postérieur, la correction de l'équilibre et de la cyphose thoracique est associée à une restauration de la lordose cervicale.

Ces modifications interviennent entre le 3ème mois et la seconde année postopératoire, laissant penser que les phénomènes adaptatifs concernent à la fois le rachis non instrumenté et les segments arthrodésés avant la fusion définitive.

c) Analyse des échecs

Nous avons considéré comme des échecs de la correction sagittale les patients qui n'étaient pas déséquilibrés en préopératoire et qui présentent un déséquilibre au recul selon la C7-plumb line.

Ces patients sont déséquilibrés vers l'avant en postopératoire tardif en raison d'une cyphose thoracique trop importante imposée par le montage et des capacités d'adaptation dépassées (faible incidence pelvienne ne permettant qu'une rétroversion faible du bassin en gardant une lordose lombaire adaptée).

Les patients ayant une faible incidence pelvienne compensent mal les défauts et excès des courbures sagittales en raison de plus faibles capacités d'adaptation (faibles amplitudes de modifications) de la version pelvienne et de la pente sacrée.

Nous concluons de cette analyse qu'il est nécessaire de ne pas trop cyphoser les patients scoliotiques présentant une faible incidence pelvienne. Ceci sera permis par une planification préopératoire rigoureuse de la correction à apporter au plan sagittal.

Il convient à présent de poursuivre nos recherches par la constitution d'une cohorte d'une centaine d'adolescents sains de façon à établir les valeurs normales de l'équilibre sagittal global mesuré à l'aide du repère nouveau constitué par les conduits auditifs externes.

Certaines des modifications observées au sein de cette série d'adolescents atteints de scoliose idiopathique tendent vers la significativité et nous projetons d'élargir notre cohorte jusqu'à plus de 500 patients issus de la même base de données, avec une prise

en charge chirurgicale homogène et des données d'imagerie recueillies et analysées avec le même outil de façon à isoler de très fines différences. Par ailleurs, nous réaliserons sur cette nouvelle cohorte les régressions statistiques multivariées nécessaires à l'obtention de lois mathématiques régissant les relations entre les paramètres pelviens, la lordose lombaire et l'équilibre sagittal global comme cela a été fait chez l'adulte sain. Nous pourrons ainsi démontrer que la déformation sagittale du rachis scoliotique résulte en l'ajout d'un paramètre (la courbure sagittale thoracique) à des équations déjà connues (48), paramètre qu'il convient de corriger lors de la chirurgie pour retrouver une relation physiologique entre les segments, garant d'un meilleur résultat clinique à long terme.

Références bibliographiques

1. Lowe TG, Edgar M, Margulies JY, Miller NH, Raso VJ, Reinker KA, Rivard CH. Etiology of idiopathic scoliosis: current trends in research. *J Bone Joint Surg Am* (2000);82-A:1157-68
2. Gorman KF, Julien C, Moreau A. The genetic epidemiology of idiopathic scoliosis. *Eur Spine J* (2012) Jun 14. [Epub ahead of print]
3. Liang G, Gao W, Liang A, Ye W, Peng Y, Zhang L, Sharma S, Su P, Huang D. Normal leptin expression, lower adipogenic ability, decreased leptin receptor and hyposensitivity to Leptin in Adolescent Idiopathic Scoliosis. *PLoS One* (2012);7(5):e36648. Epub 2012 May 15.
4. Biot B, Bollini G, Clément JL. Scoliose structurale évolutive (dont l'angle est égal ou supérieur à 25°) jusqu'à maturation rachidienne. Haute Autorité de Santé Février 2008
5. Deviren V, Berven S, Kleinstueck F, Antinnes J, Smith JA, Hu SS. Predictors of flexibility and pain patterns in thoracolumbar and lumbar idiopathic scoliosis. *Spine* (2002);27:2346–9
6. Danielsson AJ, Hasserius R, Ohlin A, Nachemson AL. Body appearance and quality of life in adult patients with adolescent idiopathic scoliosis treated with a brace or under observation alone during adolescence. *Spine (Phila Pa 1976)* (2012) 20;37(9):755-62
7. Dubousset J. Importance of the three-dimensional concept in the treatment of scoliotic deformities. In: Dansereau J , ed. International Symposium on 3D Scoliotic Deformities Joined with the VIIth International Symposium on Spinal Deformity and Surface Topography. Montreal, Quebec, Canada : Gustav Fisher Verlag ; 1992 : 302 – 11
8. Perdriolle R, Vidal J. Morphology of scoliosis: Three-dimensional evolution. *Orthopedics* (1987);10: 909–15
9. Roaf R. Vertebral growth and its mechanical control. *J Bone Joint Surg Br* (1960);42:40–59
10. Lonstein JE, Carlson JM . The prediction of curve progression in untreated idiopathic scoliosis during growth. *J Bone Joint Surg Am* (1984);66:1061-71
11. Perdriolle R, Becchetti S, Vidal J. Mechanical process and growth cartilages. *Spine* (1993);18:343–9

12. Arkin et Katz. The effects of pressure on epiphyseal growth; the mechanism of plasticity of growing bone. *The Journal of bone and joint surgery American volume* (1956) vol. 38-A (5) pp. 1056-76
13. Stokes IA, Spence H, Aronsson DD, Kilmer N. Mechanical modulation of vertebral body growth. Implications for scoliosis progression. *Spine* (1996) vol. 21 (10) pp. 1162-7
14. Ohlen G, Aaro S, Bylund P. The sagittal configuration and mobility of the spine in idiopathic scoliosis. *Spine* (1988);13:413–6
15. Poussa M, Harkonen H, Mellin G. Spinal mobility in adolescent girls with idiopathic scoliosis and in structurally normal controls. *Spine* (1989);14:217–9
16. Villemure I, Aubin CE, Grimard G, Dansereau J, Labelle H. Progression of vertebral and spinal three-dimensional deformities in adolescent idiopathic scoliosis: a longitudinal study. *Spine* (2001) vol. 26 (20) pp. 2244-50
17. Glassman SD, Bridwell K, Dimar JR, Horton W, Berven S, Schwab F. The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity. *Spine* (2005);30:2024–9
18. Jackson RP, Simmons EH, Stripinis D. Coronal and sagittal plane spinal deformities correlating with back pain and pulmonary function in adult idiopathic scoliosis. *Spine* (1989);14:1391–7
19. Guigui P. Spinal deformity in the adult. *Presse Med.* (1999) Nov 27;28(37):2075-85
20. Katsuura A, Hukuda S, Saruhashi Y, Mori K. Kyphotic malalignment after anterior cervical fusion is one of the factors promoting the degenerative process in adjacent intervertebral levels. *Eur Spine J* (2001) vol. 10 (4) pp. 320-4
21. Kawakami M, Tamaki T, Yoshida M, Hayashi N, Ando M, Yamada H. Axial symptoms and cervical alignments after cervical anterior spinal fusion for patients with cervical myelopathy. *J Spinal Disord* (1999) vol. 12 (1) pp. 50-6
22. Grob D, Frauenfelder H, Mannion AF. The association between cervical spine curvature and neck pain. *Eur Spine J* (2007);16:669–78
23. Hwang SW, Samdani AF, Tantorski M, Cahill P, Nydick J, Fine A, Betz RR, Antonacci MD. Cervical sagittal plane decompensation after surgery for adolescent idiopathic scoliosis: an effect imparted by postoperative thoracic hypokyphosis. *J Neurosurg Spine* (2011);15:491–6

24. Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, Blanke K. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am* (2001);83:1169–81
25. Xiong B, Sevastik J, Hedlund R, Sevastik B. Sagittal configuration of the spine and growth of the posterior elements in early scoliosis. *J Orthop Res* (1994) vol. 12 (1) pp. 113-8
26. Dickson RA, Lawton JO, Archer IA, Butt WP. The pathogenesis of idiopathic scoliosis. Biplanar spinal asymmetry. *The Journal of bone and joint surgery British volume* (1984) vol. 66 (1) pp. 8-15
27. Kotwicki T, Dubousset J, Padovani JP. Correction of flexible thoracic scoliosis below 65 degrees- a radiological comparison of anterior versus posterior segmental instrumentation applied to similar curves. *Eur Spine J* (2006) Jun;15(6):972-81. Epub 2006 Apr 4
28. Lowenstein JE, Matsumoto H, Vitale MG, Weidenbaum M, Gomez JA, Lee FY, Hyman JE, Roye DP. Coronal and sagittal plane correction in adolescent idiopathic scoliosis: a comparison between all pedicle screw versus hybrid thoracic hook lumbar screw constructs. *Spine (Phila Pa 1976).* (2007) Feb 15;32(4):448-52
29. Cochran T, Irstam L, Nachemson A. Long-term anatomic and functional changes in patients with adolescent idiopathic scoliosis treated by Harrington rod fusion. *Spine* (1983);8:576–84
30. Lagrone MO, Bradford DS, Moe JH, Lonstein JE, Winter RB, Ogilvie JW. Treatment of symptomatic flatback after spinal fusion. *J Bone Joint Surg Am* (1988);70:569–80
31. Lowenstein JE, Matsumoto H, Vitale MG, Weidenbaum M, Gomez JA, Lee FY, Hyman JE, Roye DP. Coronal and sagittal plane correction in adolescent idiopathic scoliosis: a comparison between all pedicle screw versus hybrid thoracic hook lumbar screw constructs. *Spine (Phila Pa 1976).* (2007) Feb 15;32(4):448-52
32. Wasylenko M, Skinner SR, Perry J, Antonelli DJ. An analysis of posture and gait following spinal fusion with Harrington instrumentation. *Spine* (1983);8:840–5
33. Sucato DJ, Agrawal S, O'Brien MF, Lowe TG, Richards SB, Lenke L. Restoration of thoracic kyphosis after operative treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a multicenter comparison of three surgical approaches. *Spine (Phila Pa 1976)* (2008);33:2630–6

34. Lonner BS, Lazar-Antman MA, Sponseller PD, Shah SA, Newton PO, Betz R, Shufflebarger HS. Multivariate analysis of factors associated with kyphosis maintenance in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* (2012) Jul 1;37(15):1297-302
35. Glassman SD, Berven S, Bridwell K, Horton W, Dimar JR. Correlation of radiographic parameters and clinical symptoms in adult scoliosis*. Spine* (2005) vol. 30 (6) pp. 682-8
36. Bridwell KH, Betz R, Capelli AM, Huss G, Harvey C. Sagittal plane analysis in idiopathic scoliosis patients treated with Cotrel-Dubousset instrumentation. *Spine* (1990);15:644–649
37. Ilharreborde B, Even J, Lefevre Y, Fitoussi F, Presedo A, Penneçot GF, Mazda K. Hybrid constructs for tridimensional correction of the thoracic spine in adolescent idiopathic scoliosis: A comparative analysis of Universal Clamps versus hooks. *Spine (Phila Pa 1976)* (2010);35:306–14
38. Mazda K, Ilharreborde B, Even J, Lefevre Y, Fitoussi F, Penneçot GF. Efficacy and safety of posteromedial translation for correction of thoracic curves in adolescent idiopathic scoliosis using a new connection to the spine: the Universal Clamp. *Eur Spine J* (2009) vol. 18 (2) pp. 158-69
39. Legaye J, Duval-Beaupère G, Hecquet J, Marty C. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *Eur Spine J* (1998);7:99–103
40. Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, Benaim C, Mouilleseaux B, Marty C, Prat-Pradal D, Legaye J, Duval-Beaupère G, Pélissier J. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J* (2006);15:415—22
41. Guigui P, Levassor N, Rillardon L, Wodecki P, Cardinne L. Physiological value of pelvic and spinal parameters of sagittal balance: analysis of 250 healthy volunteers. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* (2003);89(6):496-506
42. Descamps H, Commare M. C., Marty C. Le paramètre pelvien : Incidence chez le petit enfant. *Rachis* (1996), vol. 8, no4, pp. 177-80
43. Mac-Thiong JM, Berthonnaud E, Dimar JR, Betz RR, Labelle H. Sagittal alignment of the spine and pelvis during growth. *Spine* (2004) vol. 29 (15) pp. 1642-7

44. Mac-Thiong JM, Labelle H, Roussouly P. Pediatric sagittal alignment. *Eur Spine J* (2011) vol. 20 Suppl 5 pp. 586-90
45. Mangione P, Gomez D, Senegas J. Study of the course of the incidence angle during growth. *Eur Spine J* (1997) vol. 6 (3) pp. 163-7
46. Legaye et Duval-Beaupère. Sagittal plane alignment of the spine and gravity: a radiological and clinical evaluation. *Acta Orthop Belg* (2005) vol. 71 (2) pp. 213-20
47. Cil A, Yazici M, Uzumcugil A, Kandemir U, Alanay A, Alanay Y, Acaroglu RE, Surat A. The evolution of sagittal segmental alignment of the spine during childhood. *Spine* (2005) vol. 30 (1) pp. 93-100
48. Vialle R, Levassor N, Rillardon L, Templier A, Skalli W, Guigui P. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *J Bone Joint Surg Am* (2005);87:260—7
49. De Jonge T, Dubousset JF, Illés T. Sagittal plane correction in idiopathic scoliosis. *Spine* (2002);27:754–61
50. Mac-Thiong JM, Labelle H, Charlebois M, Huot MP, de Guise JA. Sagittal Plane Analysis of the Spine and Pelvis in Adolescent Idiopathic Scoliosis According to the Coronal Curve Type. *Spine* (2003) ;28 :1404–9
51. Berthonnaud E, Dimnet J, Roussouly P, Labelle H. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord* (2005);18:470–5
52. Duval-Beaupère G, Schimdt C, Cosson P. A barycentremetric Study of the sagittal shape of spine and pelvis: the conditions required for an economic standing position. *Ann Biomed Eng* (1992);20:451–62
53. Kuntz C, Levin LS, Ondra SL, Shaffrey CI, Morgan CJ. Neutral upright sagittal spinal alignment from the occiput to the pelvis in asymptomatic adults: a review and resynthesis of the literature. *J Neurosurg Spine* (2007);6:104–12
54. O'Brien MF, Kuklo TR, Blanke KM. Spinal Deformity Study Group. Radiographic Measurement Manual. Memphis, TN: Medtronic Sofamor Danek; 2004
55. Winter RB, Lovell WW, Moe JH. Excessive thoracic lordosis and loss of pulmonary function in patients with idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* (1975);57:972–7

56. Canavese F, Turcot K, De Rosa V, de Coulon G, Kaelin A. Cervical spine sagittal alignment variations following posterior spinal fusion and instrumentation for adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J* (2011);20(7) :1141-8
57. Ilharreborde B, Vidal C, Skalli W, Mazda K. Sagittal alignment of the cervical spine in adolescent idiopathic scoliosis treated by posteromedial translation. *Eur Spine J* (2012), Epub ahead of print
58. Hilibrand AS, Tannenbaum DA, Graziano GP, Loder RT, Hensinger RN. The sagittal alignment of the cervical spine in adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop* (1995);15:627–32
59. Ofiram E, Garvey TA, Schwender JD, Wroblewski JM, Winter RB. Cervical degenerative changes in idiopathic scoliosis patients who underwent long fusion to the sacrum as adults: incidence, severity and evolution. *J Orthop Traumatol* (2009);10:27–30
60. Marchiori DM, Henderson CN. A cross-section study correlating cervical radiographic degenerative findings to pain and disability. *Spine* (1996);21:2747–52.
61. Deschênes S, Charron G, Beaudoin G, Labelle H, Dubois J, Miron MC, Parent S. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning x-ray imager. *Spine (Phila Pa 1976)* (2010);35:989–94
62. Faro FD, Marks MC, Pawelek J, Newton PO. Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* (2004);29(20):2284-9
63. Altman DG, Bland JM. Measurement in medicine : the analysis of method comparison studies. *Statistician* (1983);32:307-17
64. Bland JM, Altman DG. Measuring agreement in method comparison studies. *Stat Methods Med Res* (1999);8:135-60
65. Rosner B. *Fundamentals of biostatistics*. Belmont, CA. Duxbury Press, 2005
66. Dang NR, Moreau MJ, Hill DL, Mahood JK, Raso J. Intra-observer reproducibility and interobserver reliability of the radiographic parameters in the Spinal Deformity Study Group's AIS Radiographic Measurement Manual. *Spine* (2005) vol. 30 (9) pp. 1064-9

67. Gelb DE, Lenke LG, Bridwell KH, Blanke K, McEnery KW. An analysis of sagittal spinal alignment in 100 asymptomatic middle and older aged volunteers. *Spine* (1995) ;20(12):1351-8
68. El Fegoun AB, Schwab F, Gamez L, Champain N, Skalli W, Farcy JP. Center of gravity and radiographic posture analysis: a preliminary review of adult volunteers and adult patients affected by scoliosis. *Spine* (2005) vol. 30 (13) pp. 1535-40
69. Illés et Somoskeöy. The EOS™ imaging system and its uses in daily orthopaedic practice. *Int Orthop* (2012) vol. 36 (7) pp. 1325-31
70. Schlatterer B, Suedhoff I, Bonnet X, Catonne Y, Maestro M, Skalli W. Skeletal landmarks for TKR implantations: evaluation of their accuracy using EOS imaging acquisition system. *Orthop Traumatol Surg Res* (2009) vol. 95 (1) pp. 2-11
71. Deschênes S, Charron G, Beaudoin G, Labelle H, Dubois J, Miron MC, Parent S. Diagnostic imaging of spinal deformities: reducing patients radiation dose with a new slot-scanning X-ray imager. *Spine* (2010) vol. 35 (9) pp. 989-94
72. Lazennec JY, Rousseau MA, Rangel A, Gorin M, Belicourt C, Brusson A, Catonné Y. Pelvis and total hip arthroplasty acetabular component orientations in sitting and standing positions: measurements reproductibility with EOS imaging system versus conventional radiographies. *Orthop Traumatol Surg Res* (2011) vol. 97 (4) pp. 373-80
73. Ilharreborde B, Steffen JS, Nectoux E, Vital JM, Mazda K, Skalli W, Obeid I. Angle measurement reproducibility using EOS three-dimensional reconstructions in adolescent idiopathic scoliosis treated by posterior instrumentation. *Spine (*2011);36(20):E1306-13
74. Harrington. Technical details in relation to the successful use of instrumentation in scoliosis. *Orthop Clin North Am* (1972) vol. 3 (1) pp. 49-67
75. Nash et Moe. A study of vertebral rotation. *The Journal of bone and joint surgery American volume* (1969) vol. 51 (2) pp. 223-9
76. Moe. Methods of correction and surgical techniques in scoliosis. *Orthop Clin North Am* (1972) vol. 3 (1) pp. 17-48
77. Burton DC, Asher MA, Lai SM. The selection of fusion levels using torsional correction techniques in the surgical treatment of idiopathic scoliosis. *Spine* (1999) vol. 24 (16) pp. 1728-39

78. Schlegel JD, Smith JA, Schleusener RL. Lumbar motion segment pathology adjacent to thoracolumbar, lumbar, and lumbosacral fusions. *Spine* (1996) vol. 21 (8) pp. 970-81
79. Etebar et Cahill. Risk factors for adjacent-segment failure following lumbar fixation with rigid instrumentation for degenerative instability. *J Neurosurg* (1999) vol. 90 (2 Suppl) pp. 163-9
80. Pérez-Grueso FS, Fernández-Baíllo N, Arauz de Robles S, García Fernández A. The low lumbar spine below Cotrel-Dubousset instrumentation: long-term findings. *Spine* (2000) vol. 25 (18) pp. 2333-41
81. Bridwell. Selection of instrumentation and fusion levels for scoliosis: where to start and where to stop. Invited submission from the Joint Section Meeting on Disorders of the Spine and Peripheral Nerves, March 2004. *Journal of neurosurgery Spine* (2004) vol. 1 (1) pp. 1-8
82. Lowe TG, Lenke L, Betz R, Newton P, Clements D, Haher T, Crawford A, Letko L, Wilson LA. Distal junctional kyphosis of adolescent idiopathic thoracic curves following anterior or posterior instrumented fusion: incidence, risk factors, and prevention. *Spine* (2006) vol. 31 (3) pp. 299-302
83. Ilharreborde B, Even J, Lefevre Y, Fitoussi F, Presedo A, Souchet P, Penneçot GF, Mazda K. How to determine the upper level of instrumentation in Lenke types 1 and 2 adolescent idiopathic scoliosis: a prospective study of 132 patients. *J Pediatr Orthop* (2008) vol. 28 (7) pp. 733-9
84. Villemure I, Aubin CE, Dansereau J, Labelle H. Biomechanical simulations of the spine deformation process in adolescent idiopathic scoliosis from different pathogenesis hypotheses. *Eur Spine J* (2004) vol. 13 (1) pp. 83-90
85. Wiedenhöfer B, Fürstenberg CH, Schröder K, Akbar M. [Multiplan correction of a 3D deformity. Options and relevance of optimizing the thoracic kyphosis in reconstructive scoliosis surgery]. *Orthopade* (2011) vol. 40 (8) pp. 672-81
86. Schlenk RP, Kowalski RJ, Benzel EC. Biomechanics of spinal deformity. *Neurosurg Focus* (2003) vol. 14 (1) pp. e2
87. Millner et Dickson. Idiopathic scoliosis: biomechanics and biology. *Eur Spine J* (1996) vol. 5 (6) pp. 362-73

88. Helgeson MD, Shah SA, Newton PO, Clements DH, Betz RR, Marks MC, Bastrom T, Harms Study Group. Proximal kyphosis after posterior spinal fusion in patients with idiopathic scoliosis. *Spine* (1999) vol. 24 (8) pp. 795-9
89. Kuklo TR, Lenke LG, Won DS, Graham EJ, Sweet FA, Betz RR, Bridwell KH, Blanke KM. Spontaneous proximal thoracic curve correction after isolated fusion of the main thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* (2001) vol. 26 (18) pp. 1966-75
90. Yang et Chen. Proximal kyphosis after short posterior fusion for thoracolumbar scoliosis. *Clin Orthop Relat Res* (2003) (411) pp. 152-8
91. Kim YJ, Bridwell KH, Lenke LG, Kim J, Cho SK. Proximal junctional kyphosis in adolescent idiopathic scoliosis following segmental posterior spinal instrumentation and fusion: minimum 5-year follow-up. *Spine* (2005) vol. 30 (18) pp. 2045-50
92. Kim YJ, Lenke LG, Bridwell KH, Kim J, Cho SK, Cheh G, Yoon J. Proximal junctional kyphosis in adolescent idiopathic scoliosis after 3 different types of posterior segmental spinal instrumentation and fusions: incidence and risk factor analysis of 410 cases. *Spine* (2007) vol. 32 (24) pp. 2731-8
93. Hollenbeck SM, Glattes RC, Asher MA, Lai SM, Burton DC. The prevalence of increased proximal junctional flexion following posterior instrumentation and arthrodesis for adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* (2008) vol. 33 (15) pp. 1675-81
94. Helgeson MD, Shah SA, Newton PO, Clements DH, Betz RR, Marks MC, Bastrom T, Harms Study Group. Evaluation of proximal junctional kyphosis in adolescent idiopathic scoliosis following pedicle screw, hook, or hybrid instrumentation. *Spine* (2010) vol. 35 (2) pp. 177-81
95. Wang J, Zhao Y, Shen B, Wang C, Li M. Risk factor analysis of proximal junctional kyphosis after posterior fusion in patients with idiopathic scoliosis. *Injury* (2010) vol. 41 (4) pp. 415-20
96. Yagi M, Akilah KB, Boachie-Adjei O. Incidence, risk factors and classification of proximal junctional kyphosis: surgical outcomes review of adult idiopathic scoliosis. *Spine* (2011) vol. 36 (1) pp. E60-8

97. Ilharreborde B, Morel E, Mazda K, Dekutoski MB. Adjacent segment disease after instrumented fusion for idiopathic scoliosis: review of current trends and controversies. *J Spinal Disord Tech* (2009) vol. 22 (7) pp. 530-9
98. Vedantam R, Lenke LG, Keeney JA, Bridwell KH. Comparison of standing sagittal spinal alignment in asymptomatic adolescents and adults. *Spine* (1998) vol. 23 (2) pp. 211-5
99. Mac-Thiong JM, Labelle H, Berthonnaud E, Betz RR, Roussouly P. Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents. *Eur Spine J* (2007) vol. 16 (2) pp. 227-34
100. Lee SM, Suk SI, Chung ER. Direct vertebral rotation: a new technique of three-dimensional deformity correction with segmental pedicle screw fixation in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* (2004) vol. 29 (3) pp. 343-9
101. Abul-Kasim K, Overgaard A, Maly P, Ohlin A, Gunnarsson M, Sundgren PC. Low-dose helical computed tomography (CT) in the perioperative workup of adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Radiol* (2009) vol. 19 (3) pp. 610-8
102. Brenner DJ, Elliston CD, Hall EJ, Berdon WE. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. *Am Journal Roentgenology* (2001) (176) :289-96
103. Dubousset J, Charpak G, Dorion I, Skalli W, Lavaste F, Deguise J, Kalifa G, Ferey S. [A new 2D and 3D imaging approach to musculoskeletal physiology and pathology with low-dose radiation and the standing position: the EOS system]. *Bull Acad Natl Med* (2005);189:287–97; discussion 297–300
104. W Skalli, F Lavaste - Cahiers d'enseignement de la Sofcot, Chirurgie assistée par orinateur, Elsevier (2002), pp 209-20
105. Yong Q, Zhen L, Zezhang Z, Bangping Q, Feng Z, Tao W, Jun J, Xu S, Xusheng Q, Weiwei M, Weijun W. Comparison of sagittal spinopelvic alignment in Chinese adolescents with and without idiopathic thoracic scoliosis. Spine (2012) vol. 37 (12) pp. E714-20
106. Tanguay F, Mac-Thiong JM, de Guise JA, Labelle H. Relation between the sagittal pelvic and lumbar spine geometries following surgical correction of adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J* (2007);16:531–6
107. King HA, Moe JH, Bradford DS, . The selection of fusion levels in thoracic idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* (1983);65:1302–13

108. Mac-Thiong JM, Roussouly P, Berthonnaud E, Guigui P. Sagittal Parameters of Global Spinal Balance : Normative Values From a Prospective Cohort of Seven Hundred Nine Caucasian Asymptomatic Adults. *Spine* (2010);35(22):1193–8

109. Leong JC, Lu WW, Luk KD, Karlberg EM. Kinematics of the chest cage and spine during breathing in healthy individuals and in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* (1999) vol. 24 (13) pp. 1310-5

110. Stevens J. P. (2002). Applied multivariate statistics for the social sciences. Mahwah, NJ: Lawrence Erblaum

111. Westrick et Ward. Adolescent idiopathic scoliosis: 5-year to 20-year evidence-based surgical results. *J Pediatr Orthop* (2011) vol. 31 (1 Suppl) pp. S61-8

112. Lafage V, Schwab F, Patel A, Hawkinson N, Farcy JP. Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity. *Spine (PhilaPa 1976)* 2009 34:E599–E606

113. Lafage V, Schwab F, Boachie-Adjei O. Group ISS : The impact of reciprocal regional alignment changes distant from the site of spinal osteotomies affects postoperative spinal balance. Scoliosis Research Society 2009, San Antonio

114. Hwang SW, Samdani AF, Wormser B, Amin H, Kimball JS, Ames RJ, Rothkrug AS, Cahill PJ. Comparison of 5-year outcomes between pedicle screw and hybrid constructs in adolescent idiopathic scoliosis. *J Neurosurg Spine* (2012) vol. 17 (3) pp. 212-9

115. Wang W, Zhu Z, Zhu F, Sun C, Wang Z, Sun X, Qiu Y. Different curve pattern and other radiographical characteristics in male and female patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* (2012) vol. 37 (18) pp. 1586-92

116. Newton PO, Marks MC, Bastrom TP, Betz R, Clements D, Lonner B, Crawford A, Shufflebarger H, O'Brien M, Yaszay B, Harms Study Group. Surgical Treatment of Lenke 1 Main Thoracic Idiopathic Scoliosis: Results of a Prospective, Multi-Center Study. *Spine* (2012). Publish Ahead of Print. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31826c6df4

117. Halm H, Niemeyer T, Link T, Liljenqvist U. Segmental pedicle screw instrumentation in idiopathic thoracolumbar and lumbar scoliosis. *Eur Spine J* (2000) vol. 9 (3) pp. 191-7

118. Shufflebarger HL, Geck MJ, Clark CE. The posterior approach for lumbar and thoracolumbar adolescent idiopathic scoliosis: posterior shortening and pedicle screws. *Spine* (2004) vol. 29 (3) pp. 269-76; discussion 276

119. Liljenqvist U, Halm H, Bullmann V. Spontaneous lumbar curve correction in selective anterior instrumentation and fusion of idiopathic thoracic scoliosis of Lenke type C. *Eur Spine J* (2012) Epub ahead of print.

120. Humke T, Grob D, Scheier H, Siegrist H. Cotrel-Dubousset and Harrington Instrumentation in idiopathic scoliosis: a comparison of long-term results. *Eur Spine J* (1995) vol. 4 (5) pp. 280-3

121. Lenke LG, Bridwell KH, Blanke K, Baldus C, Weston J. Radiographic results of arthrodesis with Cotrel-Dubousset instrumentation for the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. A five to ten-year follow-up study. *The Journal of bone and joint surgery American volume* (1998) vol. 80 (6) pp. 807-14

122. Blondel B, Lafage V, Schwab F, Farcy JP, Bollini G, Jouve JL. Reciprocal sagittal alignment changes after posterior fusion in the setting of adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J* (2012) Jun 22. [Epub ahead of print])

123. Niinomi M. Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Mat Science and Engineering : A*. (1998) (243) ;231-6

124. Roussouly P et Pinheiro-Franco JL. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology. *Eur Spine J* (2011) vol. 20 Suppl 5 pp. 609-18

125. Khader W, Ahmed E, Trivedi J. Strategies for correcting thoracic hypokyphosis in pedicle screw constructs for scoliosis – A frank review of techniques and current practice. *J Bone Joint Surg Br* (2012) (94B), supp. X 153

126. Benli IT, Ates B, Akalin S, Citak M, Kaya A, Alanay A. Minimum 10 years follow-up surgical results of adolescent idiopathic scoliosis patients treated with TSRH instrumentation. *Eur Spine J* (2007) vol. 16 (3) pp. 381-91

127. Tsutsui S, Pawelek J, Bastrom T, Lenke L, Lowe T, Betz R, Clements D, Newton PO. Dissecting the effects of spinal fusion and deformity magnitude on quality of life in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* (2009) vol. 34 (18) pp. E653-8

128. Takayama K, Nakamura H, Matsuda H. Quality of life in patients treated surgically for scoliosis: longer than sixteen-year follow-up. *Spine* (2009) vol. 34 (20) pp. 2179-84

Annexes : Récepissés de déclaration CNIL

CNIL
8 rue de Vivienne - 75083 PARIS cedex 02
T. 01 53 73 22 22 - F. 01 53 73 22 00
www.cnil.fr

RÉCÉPISSÉ

DÉCLARATION DE CONFORMITÉ À UNE MÉTHODOLOGIE DE RÉFÉRENCE

Numéro de déclaration

1595489 v 0

du 15-06-2012

Monsieur VIDAL Christophe
HOPITAL ROBERT DEBRE - ASSISTANCE PUBLIQUE HOPITAUX DE PARIS
CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE PEDIATRIQUE,
HOPITAL ROBERT DEBRE
48, BOULEVARD SERURIER
75019 PARIS

Organisme déclarant

Nom : HOPITAL ROBERT DEBRE - ASSISTANCE PUBLIQUE HOPITAUX DE PARIS

Service : SERVICE DE CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE

Adresse : 48, BOULEVARD SERURIER

Code postal : 75019
Ville : PARIS

N° SIREN ou SIRET :
267500452 00995

Code NAF ou APE :
7220Z

Tél. : 0140033820
Fax. :

Traitement déclaré

Finalité : MR1 - Recherches biomédicales

Transferts d'informations hors de l'Union européenne : Non

La délivrance de ce récépissé atteste que vous avez effectué une déclaration de votre traitement à la CNIL et que votre dossier est formellement complet. Vous pouvez mettre en œuvre votre traitement. Cependant, la CNIL peut à tout moment vérifier, par courrier ou par la voie d'un contrôle sur place, que ce traitement respecte l'ensemble des dispositions de la loi du 6 janvier 1978 modifiée en 2004. En tout état de cause, vous êtes tenu de respecter les obligations prévues par la loi et notamment :

1) La définition et le respect de la finalité du traitement,
2) La pertinence des données traitées,
3) La conservation pendant une durée limitée des données,
4) La sécurité et la confidentialité des données,
5) Le respect des droits des intéressés : information sur leur droit d'accès, de rectification et d'opposition.

Pour plus de détails sur les obligations prévues par la loi « informatique et libertés », consultez le site internet de la CNIL : « www.cnil.fr »

Fait à Paris, le 15 juin 2012
Par délégation de la commission

Isabelle FALQUE PIERROTIN
Présidente

Déclaration CNIL pour l'inclusion des 75 patients de l'étude de reproductibilité

CNIL
8 rue de Vivienne - 75083 PARIS cedex 02
T. 01 53 73 22 22 - F. 01 53 73 22 00
www.cnil.fr

RÉCÉPISSÉ

DÉCLARATION DE CONFORMITÉ À UNE MÉTHODOLOGIE DE RÉFÉRENCE

Numéro de déclaration

1595787 v 0

du 18-06-2012

Monsieur VIDAL Christophe
HOPITAL ROBERT DEBRE, ASSISTANCE PUBLIQUE HOPITAUX DE PARIS
CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE PEDIATRIQUE
48, BOULEVARD SERURIER
75019 PARIS

Organisme déclarant

Nom : HOPITAL ROBERT DEBRE, ASSISTANCE PUBLIQUE HOPITAUX DE PARIS

Service : CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE PEDIATRIQUE

Adresse : 48, BOULEVARD SERURIER

Code postal : 75019
Ville : PARIS

N° SIREN ou SIRET :
267500452 00995

Code NAF ou APE :
7220Z

Tél. : 0140033820
Fax. :

Traitement déclaré

Finalité : MR1 - Recherches biomédicales

Transferts d'informations hors de l'Union européenne : Non

La délivrance de ce récépissé atteste que vous avez effectué une déclaration de votre traitement à la CNIL et que votre dossier est formellement complet. Vous pouvez mettre en œuvre votre traitement. Cependant, la CNIL peut à tout moment vérifier, par courrier ou par la voie d'un contrôle sur place, que ce traitement respecte l'ensemble des dispositions de la loi du 6 janvier 1978 modifiée en 2004. En tout état de cause, vous êtes tenu de respecter les obligations prévues par la loi et notamment :

1) La définition et le respect de la finalité du traitement,
2) La pertinence des données traitées,
3) La conservation pendant une durée limitée des données,
4) La sécurité et la confidentialité des données,
5) Le respect des droits des intéressés : information sur leur droit d'accès, de rectification et d'opposition.

Pour plus de détails sur les obligations prévues par la loi « informatique et libertés », consultez le site internet de la CNIL : « www.cnil.fr »

Fait à Paris, le 18 juin 2012
Par délégation de la commission

Isabelle FALQUE PIERROTIN
Présidente

Déclaration CNIL pour les 154 patients de l'étude de cohorte.

Résumé

Le rachis des patients atteints de scoliose idiopathique de l'adolescent (SIA) présente une perte des courbures physiologiques sagittales thoraciques et cervicales, provoquant un déséquilibre. Ces déformations peuvent provoquer une dégénérescence accélérée des structures rachidiennes synonyme de douleurs chroniques et de handicap. L'obtention d'un rachis équilibré aux courbures sagittales physiologiques est un enjeu majeur de la chirurgie de la scoliose. Il est nécessaire de comprendre l'interdépendance des paramètres sagittaux au sein du rachis scoliotique natif ou instrumenté.
Notre étude porte sur une cohorte rétrospective de 154 patients atteints de SIA et isole chaque paramètre de l'équilibre sagittal préopératoire, postopératoire précoce et postopératoire tardif pour établir l'existence de corrélations entre les différentes mesures. Elle se propose également d'identifier les mécanismes adaptatifs postopératoires du rachis non instrumenté.
Dans la première partie de notre travail, nous avons validé méthodologiquement l'outil d'analyse d'imagerie et défini les repères radiologiques utilisés par la suite.
Nous n'avons pas identifié de corrélation entre la courbure frontale préopératoire et l'incidence pelvienne. L'incidence pelvienne est cependant corrélée à la lordose lombaire et à l'équilibre sagittal global en préopératoire. Les patients ayant une faible incidence pelvienne sont plus à risque de déséquilibre antérieur postopératoire en raison de leurs faibles capacités d'adaptation aux modifications du plan sagittal induites par la chirurgie.

Cette étude a des conséquences pratiques sur la planification préopératoire des niveaux d'arthrodèse et sur la planification de correction du plan sagittal en prenant en compte l'incidence pelvienne. Il s'agit d'une analyse statique d'un équilibre dynamique, représentant sa plus importante limite.

Title : Radiographic changes of the sagittal spinal plane in adolescent idiopathic scoliosis after posterior fusion. Results of a prospective monocentric cohort study of 154 patients.

Mots-clés : Scoliose idiopathique de l'adolescent – reproductibilité – équilibre sagittal – modifications réciproques – rachis cervical

Discipline : Chirurgie Orthopédique Pédiatrique

Université de rattachement :
UNIVERSITE PARIS V RENE DESCARTES
15, rue de l'Ecole de Médecine, 75270 PARIS CEDEX 06