

# Université de Poitiers

## Faculté de Médecine et Pharmacie

ANNEE 2023

### THESE

#### POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE (décret du 25 novembre 2016)

Présentée et soutenue publiquement  
Le 03/10/2023 à Poitiers  
Par **M. BOCHE André** né le 07/07/1995

Contribution de la caméra TOF, un nouvel outil pour la mesure des déformations et de l'asymétrie du tronc dans la scoliose idiopathique de l'adolescent.

#### COMPOSITION DU JURY

**Président** : Monsieur le Professeur Pierre PRIES

**Membres** : Monsieur le Professeur Brice ILHARREBORDE  
Monsieur le Docteur Simon TEYSSEDOU  
Madame le Docteur Cécile SWENNEN

**Directeur de thèse** : Monsieur le Docteur Tanguy VENDEUVRE


**LISTE DES ENSEIGNANTS**

Année universitaire 2023 – 2024

**SECTION MEDECINE**
**Professeurs des Universités-Praticiens Hospitaliers**

- ALBOUY Marion, santé publique – **Référente égalité-diversité**
- BINET Aurélien, chirurgie infantile
- BOISSON Matthieu, anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
- BOULETI Claire, cardiologie
- BOURMEYSTER Nicolas, biochimie et biologie moléculaire
- BRIDOUX Frank, néphrologie
- BURUCOA Christophe, bactériologie-virologie
- CHEZE-LE REST Catherine, biophysique et médecine nucléaire
- CHRISTIAENS Luc, cardiologie
- CORBI Pierre, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
- COUDROY Rémi, médecine intensive-réanimation – **Assesneur 2<sup>nd</sup> cycle**
- DAHYOT-FIZELIER Claire, anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
- DONATINI Gianluca, chirurgie viscérale et digestive
- DROUOT Xavier, physiologie – **Assesneur recherche**
- DUFOUR Xavier, Oto-Rhino-Laryngologie – **Assesneur 2<sup>nd</sup> cycle, stages hospitaliers**
- FAURE Jean-Pierre, anatomie
- FRASCA Denis, anesthésiologie-réanimation
- FRITEL Xavier, gynécologie-obstétrique
- GARCIA Rodrigue, cardiologie
- GERVAIS Elisabeth, rhumatologie
- GICQUEL Ludovic, pédopsychiatrie
- GOMBERT Jean-Marc, immunologie
- GOUJON Jean-Michel, anatomie et cytologie pathologiques
- GUILLEVIN Rémy, radiologie et imagerie médicale
- HAUET Thierry, biochimie et biologie moléculaire
- ISAMBERT Nicolas, cancérologie
- JAAFARI Nematollah, psychiatrie d'adultes
- JABER Mohamed, cytologie et histologie
- JAYLE Christophe, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
- KARAYAN-TAPON Lucie, cancérologie
- KEMOUN Gilles, médecine physique et de réadaptation (*en disponibilité*)
- LECLERE Franck, chirurgie plastique, reconstructrice
- LELEU Xavier, hématologie
- LEVEQUE Nicolas, bactériologie-virologie – **Assesneur 1<sup>er</sup> cycle**
- LEVEZIEL Nicolas, ophtalmologie
- MACCHI Laurent, hématologie
- MCHEIK Jiad, chirurgie infantile
- MEURICE Jean-Claude, pneumologie
- MILLOT Frédéric, pédiatrie, oncologie pédiatrique
- MIMOZ Olivier, médecine d'urgence
- NASR Nathalie, neurologie
- NEAU Jean-Philippe, neurologie – **Assesneur pédagogique médecine**
- ORIOT Denis, pédiatrie
- PACCALIN Marc, gériatrie – **Doyen, Directeur de la section médecine**
- PELLERIN Luc, biologie cellulaire
- PERAULT-POCHAT Marie-Christine, pharmacologie clinique

- PERDRISOT Rémy, biophysique et médecine nucléaire – **Assesneur L.AS et 1<sup>er</sup> cycle**
- PERRAUD CATEAU Estelle, parasitologie et mycologie
- PRIES Pierre, chirurgie orthopédique et traumatologique
- PUYADE Mathieu, médecine interne
- RAMMAERT-PALTRIE Blandine, maladies infectieuses
- RICHER Jean-Pierre, anatomie
- RIGOARD Philippe, neurochirurgie
- ROBLOT France, maladies infectieuses, maladies tropicales
- ROBLOT Pascal, médecine interne
- SAULNIER Pierre-Jean, thérapeutique
- SCHNEIDER Fabrice, chirurgie vasculaire
- SILVAIN Christine, gastro-entérologie, hépatologie – **Assesneur 3<sup>e</sup> cycle**
- TASU Jean-Pierre, radiologie et imagerie médicale
- THIERRY Antoine, néphrologie – **Assesneur 1<sup>e</sup> cycle**
- THILLE Arnaud, médecine intensive-réanimation
- TOUGERON David, gastro-entérologie
- WAGER Michel, neurochirurgie
- XAVIER Jean, pédopsychiatrie

**Maîtres de Conférences des Universités-Praticiens Hospitaliers**

- ALLAIN Géraldine, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire (*en mission 1 an à/c 01/11/2022*)
- BEN-BRIK Eric, médecine du travail (**en détachement**)
- BILAN Frédéric, génétique
- BRUNET Kévin, parasitologie et mycologie
- CAYSSIALS Emilie, hématologie
- CREMNITER Julie, bactériologie-virologie
- DIAZ Véronique, physiologie – **Référente relations internationales**
- EGLOFF Matthieu, histologie, embryologie et cytogénétique
- EVRARD Camille, cancérologie
- GACHON Bertrand, gynécologie-obstétrique (*en dispo 2 ans à/c du 31/07/2022*)
- GARCIA Magali, bactériologie-virologie (*absente jusqu'au 29/12/2023*)
- GUENEZAN Jérémie, médecine d'urgence
- HARIKA-GERMANEAU Ghina, psychiatrie d'adultes
- JAVAUGUE Vincent, néphrologie
- JUTANT Etienne-Marie, pneumologie
- KERFORNE Thomas, anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire (*en mission 1 an à/c 01/11/2022*)
- LAFAY-CHEBASSIER Claire, pharmacologie clinique
- LIUU Evelyne, gériatrie
- MARTIN Mickaël, médecine interne – **Assesneur 2<sup>nd</sup> cycle**
- MASSON REGNAULT Marie, dermato-vénérologie
- PALAZZO Paola, neurologie (*en dispo 5 ans à/c du 01/07/2020*)
- PICHON Maxime, bactériologie-virologie
- PIZZOFERRATO Anne-Cécile, gynécologie-obstétrique
- RANDRIAN Violaine, gastro-entérologie, hépatologie
- SAPANET Michel, médecine légale

- THUILLIER Raphaël, biochimie et biologie moléculaire
- VALLEE Maxime, urologie

**Maitre de Conférences des universités de médecine générale**

- MIGNOT Stéphanie

**Professeur associé des universités des disciplines médicales**

- FRAT Jean-Pierre, médecine intensive-réanimation

**Professeur associé des universités des disciplines odontologiques**

- FLORENTIN Franck, réhabilitation orale

**Professeurs associés de médecine générale**

- ARCHAMBAULT Pierrick
- AUDIER Pascal
- BIRAULT François
- BRABANT Yann
- FRECHE Bernard

**Maitres de Conférences associés de médecine générale**

- AUDIER Régis
- BONNET Christophe
- DU BREUILLAC Jean
- FORGEOT Raphaële
- JEDAT Vincent

**Professeurs émérites**

- BINDER Philippe, médecine générale (08/2028)
- DEBIAIS Françoise, rhumatologie (08/2028)
- GIL Roger, neurologie (08/2026)
- GUILHOT-GAUDEFFROY François, hématologie et transfusion (08/2023) – renouvellement 3 ans demandé – en cours
- INGRAND Pierre, biostatistiques, informatique médicale (08/2025)
- LECRON Jean-Claude, biochimie et biologie moléculaire (08/2028)
- MARECHAUD Richard, médecine interne (24/11/2023)
- RICCO Jean-Baptiste, chirurgie vasculaire (08/2024)
- ROBERT René, médecine intensive-réanimation (30/11/2024)
- SENON Jean-Louis, psychiatrie d'adultes (08/2026)

**Professeurs et Maitres de Conférences honoraires**

- AGIUS Gérard, bactériologie-virologie
- ALCALAY Michel, rhumatologie
- ALLAL Joseph, thérapeutique (ex-émérite)
- ARIES Jacques, anesthésiologie-réanimation
- BABIN Michèle, anatomie et cytologie pathologiques
- BABIN Philippe, anatomie et cytologie pathologiques
- BARBIER Jacques, chirurgie générale (ex-émérite)
- BARRIERE Michel, biochimie et biologie moléculaire
- BECQ-GIRAUDON Bertrand, maladies infectieuses, maladies tropicales (ex-émérite)
- BEGON François, biophysique, médecine nucléaire
- BOINOT Catherine, hématologie – transfusion
- BONTOUX Daniel, rhumatologie (ex-émérite)
- BURIN Pierre, histologie
- CARRETIER Michel, chirurgie viscérale et digestive (ex-émérite)
- CASTEL Olivier, bactériologie-virologie ; hygiène
- CAVELLIER Jean-François, biophysique et médecine nucléaire
- CHANSIGAUD Jean-Pierre, biologie du développement et de la reproduction
- CLARAC Jean-Pierre, chirurgie orthopédique
- DABAN Alain, cancérologie radiothérapie (ex-émérite)
- DAGREGORIO Guy, chirurgie plastique et reconstructrice

- DEBAENE Bertrand, anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
- DESMAREST Marie-Cécile, hématologie
- DEMANGE Jean, cardiologie et maladies vasculaires
- DORE Bertrand, urologie (ex-émérite)
- EUGENE Michel, physiologie (ex-émérite)
- FAUCHERE Jean-Louis, bactériologie-virologie (ex-émérite)
- FONTANEL Jean-Pierre, Oto-Rhino Laryngologie (ex-émérite)
- GILBERT-DUSSARDIER Brigitte, génétique
- GOMES DA CUNHA José, médecine générale (ex-émérite)
- GRIGNON Bernadette, bactériologie
- GUILLARD Olivier, biochimie et biologie moléculaire
- GUILLET Gérard, dermatologie
- HERPIN Daniel, cardiologie (ex-émérite)
- JACQUEMIN Jean-Louis, parasitologie et mycologie médicale
- KAMINA Pierre, anatomie (ex-émérite)
- KITZIS Alain, biologie cellulaire (ex-émérite)
- KLOSSEK Jean-Michel, Oto-Rhino-Laryngologie
- KRAIMPS Jean-Louis, chirurgie viscérale et digestive
- LAPIERRE Françoise, neurochirurgie (ex-émérite)
- LARSEN Christian-Jacques, biochimie et biologie moléculaire
- LEVARD Guillaume, chirurgie infantile
- LEVILLAIN Pierre, anatomie et cytologie pathologiques
- MAIN de BOISSIERE Alain, pédiatrie
- MARCELLI Daniel, pédopsychiatrie (ex-émérite)
- MARILLAUD Albert, physiologie
- MAUCO Gérard, biochimie et biologie moléculaire (ex-émérite)
- MENU Paul, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire (ex-émérite)
- MORICHAU-BEAUCHANT Michel, hépato-gastro-entérologie
- MORIN Michel, radiologie, imagerie médicale
- PAQUEREAU Joël, physiologie
- POINTREAU Philippe, biochimie
- POURRAT Olivier, médecine interne (ex-émérite)
- REISS Daniel, biochimie
- RIDEAU Yves, anatomie
- RODIER Marie-Hélène, parasitologie et mycologie
- SULTAN Yvette, hématologie et transfusion
- TALLINEAU Claude, biochimie et biologie moléculaire
- TANZER Joseph, hématologie et transfusion (ex-émérite)
- TOUCHARD Guy, néphrologie (ex-émérite)
- TOURANI Jean-Marc, cancérologie
- VANDERMARCO Guy, radiologie et imagerie médicale

## SECTION PHARMACIE

### *Professeurs des universités-praticiens hospitaliers*

- DUPUIS Antoine, pharmacie clinique – **Assesseur pédagogique pharmacie**
- FOUCHER Yohann, biostatistiques
- GREGOIRE Nicolas, pharmacologie et pharmacométrie
- MARCHAND Sandrine, pharmacologie, pharmacocinétique
- RAGOT Stéphanie, santé publique

### *Professeurs des universités*

- BODET Charles, microbiologie
- CARATO Pascal, chimie thérapeutique
- FAUCONNEAU Bernard, toxicologie
- FAVOT-LAFORGE Laure, biologie cellulaire et moléculaire
- GUILLARD Jérôme, pharmacochimie
- IMBERT Christine, parasitologie et mycologie médicale
- OLIVIER Jean-Christophe, pharmacie galénique, biopharmacie et pharmacie industrielle – **réfèrent relations internationales**
- PAGE Guylène, biologie cellulaire, biothérapeutiques
- RABOUAN Sylvie, chimie physique, chimie analytique (**retraite au 01/12/2023**)
- SARROUILHE Denis, physiologie humaine – **Directeur de la section pharmacie**

### *Maîtres de conférences des universités-praticiens hospitaliers*

- BARRA Anne, immuno-hématologie
- BINSON Guillaume, pharmacie clinique
- THEVENOT Sarah, hygiène, hydrologie et environnement

### *Maîtres de conférences*

- BARRIER Laurence, biochimie générale et clinique
- BON Delphine, biophysique
- BRILLAULT Julien, pharmacocinétique, biopharmacie
- BUYCK Julien, microbiologie (HDR)
- CHAUZY Alexia, pharmacologie fondamentale et thérapeutique
- DEBORDE-DELAGE Marie, chimie analytique
- DELAGE Jacques, biomathématiques, biophysique
- GIRARDOT Marion, biologie végétale et pharmacognosie
- INGRAND Sabrina, toxicologie
- MARIVINGT-MOUNIR Cécile, pharmacochimie (HDR)
- PAIN Stéphanie, toxicologie (HDR)
- PINET Caroline, physiologie, anatomie humaine
- RIOUX-BILAN Agnès, biochimie – **Référente CNAES – Responsable du dispositif COME'in – référente égalité-diversité**
- TEWES Frédéric, chimie et pharmacotechnie (HDR)
- THOREAU Vincent, biologie cellulaire et moléculaire
- WAHL Anne, phytothérapie, herborisation, aromathérapie

### *Maîtres de conférences associés - officine*

- DELOFFRE Clément, pharmacien
- ELIOT Guillaume, pharmacien
- HOUNKANLIN Lydwin, pharmacien

### *A.T.E.R. (attaché temporaire d'enseignement et de recherche)*

- ARANZANA-CLIMENT Vincent, pharmacologie
- KAOUAH Zahyra, bactériologie
- MOLINA PENA Rodolfo, pharmacie galénique

### *Professeur émérite*

- COUET William, pharmacie clinique (08/2028)

## CENTRE DE FORMATION UNIVERSITAIRE EN ORTHOPHONIE (C.F.U.O.)

- GICQUEL Ludovic, PU-PH, **directeur du C.F.U.O.**
- VERON-DELOR Lauriane, maître de conférences en psychologie

## ENSEIGNEMENT DE L'ANGLAIS

- DEBAIL Didier, professeur certifié

## CORRESPONDANTS HANDICAP

- Pr PERDRISOT Rémy, section médecine
- Dr RIOUX-BILAN Agnès, section pharmacie

## REMERCIEMENTS

### À Monsieur le Professeur Pierre PRIES

Vous me faites l'honneur de présider mon jury de thèse. Je vous remercie pour cette transmission constante de connaissances et de passion qui vous est propre. Pour ces anecdotes plus ou moins anciennes sur l'histoire de la chirurgie, de la médecine et de la scoliose. Et enfin pour la confiance que vous m'avez accordée, tant au bloc qu'en dehors dans la gestion du service et de mes camarades. Soyez assuré de ma gratitude et de mon plus profond respect.

### À Monsieur le Professeur Brice ILHARREBORDE

Vous me faites également l'honneur de faire partie de ce jury. Vous n'avez pas hésité une seconde et c'est révélateur de votre implication pour vos internes, pour la médecine et pour la scoliose. Je vous remercie pour toutes les connaissances acquises, tant pratiques que théoriques durant ces six mois. Votre dévouement envers vos patients, votre rigueur et votre recherche constante de perfection sont des exemples qui guideront ma pratique. Recevez l'expression de mon profond respect.

### Au Docteur Simon TEYSSEDOU

Je n'oublierai aucune des découvertes musicales au bloc ces dernières années. C'est faux, j'en ai déjà oubliées beaucoup. Merci pour tout Simon, c'est un réel bonheur d'opérer avec toi. Au plaisir de partager quelques Suze, l'amie de l'estomac.

### Au Docteur Cécile SWENNEN

Merci d'avoir pris le petit pioupiou que j'étais il y a trois ans sous ton aile. Ta patience, ta confiance en moi au bloc comptent parmi les origines de la voie que j'ai choisie aujourd'hui.

### Au Docteur Tanguy VENDEUVRE

Merci de m'avoir amené sur ce projet et de m'avoir fait confiance pour le mener à bien. Il n'en est qu'à ses balbutiements j'en suis sûr, et c'est avec beaucoup d'excitation que j'espère le continuer avec toi dans cette émulation scientifique.

-----

### Au Professeur Valéry VALLE

Vous êtes à la base de mon travail, merci pour votre temps, et cette volonté de coopération avec le milieu médical. Avec tout mon respect.

### Aux Professeurs Romain Dayer et Anne Tabard

Votre aide précieuse, votre curiosité, et votre rigueur ont permis la finalisation de ce projet. Je vous remercie pour cette collaboration et très certainement les autres à venir.

### Aux orthopédistes du CHU et anciens

Dr Hamcha : Merci pour cette exigence qui est la vôtre et le nombre infini de conseils chirurgicaux qu'on peut tirer d'une simple PTG.

**Dr Moufid Abdolah-Yassine** : Je ne serai probablement pas la moitié de l'interne/chirurgien que je suis devenu aujourd'hui sans toi. Pour cette rigueur névrotique, cette application infinie et ta confiance, je ne te remercierai jamais assez. « Oh moi tu sais, tout le monde s'en fiche... »

**Dr Bouget et Losson** : Il faut savoir opérer vite et bien. Record de PIH à battre 13'32 peau à peau. Merci pour ces vanes, ces délires et ces conseils.

**Dr Nicolas Pointet** : Merci pour tout Nico, reste comme tu es. Ça a toujours été un plaisir de fendre des dos à 4h du mat' avec toi.

**À tous les autres chirurgiens** auprès desquels il y avait toujours quelque chose à prendre, un conseil, une méthode, une blague, voire des dizaines et des dizaines de chaque. Merci pour tous ces moments passés au bloc et en dehors.

**Aux équipes d'orthopédie du CH de Niort, Angoulême, La Rochelle et Robert Debré** :  
Merci de m'avoir accompagné jusqu'ici.

**À mes co-internes tout au long du chemin** : Paulo, Yann et Nico, Thibault, Richard, Alexis, Druru et Bebich, Cazemaj, Louis niglo et Delmon le roi démon incontrôlable, Anat, Mel, Laure, Barthes, Benjam, Ludmi, Wass, Chloé, Bridoux et tous les plus jeunes et les oubliés. Merci à tous.

**Mention spéciale pour les filles du 4B** : merci pour les blagues, les rires, les sourires, les sorties, les histoires, les potins et surtout votre soutien incroyable tout au long de mon internat. Lola et Emilie du D, je ne vous oublie pas non plus. Vous êtes toutes formidables. Merci.

**À la Fémyly** : je n'oublierai jamais nos moments. Je suis très fier des personnes que vous êtes devenues aujourd'hui. S'il y a une seule petite chose à regretter de tout ce parcours, c'est d'être à plus de 300km de chacun d'entre vous. Je ne vous remercierai jamais assez.

**Aux premiers de la 25** : Marie, Mathieu, Tass, Roro, Lolo, Mac, bordel ce semestre... 7 mois de pur plaisir accompagné des plus gros kiffeurs que je connaisse. Merci pour tout ça, et pour ce qui reste à venir parce que ça continue. Je vous aime.

**Aux énervés d'Angoulême** : Merci pour ce semestre incroyable, pour tout, sauf pour la valise beaucoup trop lourde de déguisements.

**Aux males beta-sigmas de La Rochelle** : Thomas, Pacheu, Sammy, JBabes et Ju. Il ne faut pas être si beau et intelligent que ça pour réussir dans la vie et plaire aux femmes. Merci pour cette leçon les frères. Léa tu rayonneras toujours.

**À la team Poitiers** : Clem, Alice, Stess, Babou, Antoine, Crousty, merci d'embellir Poitiers par vos charismes fous. Hâte d'accueillir DJ baby dans la team, félicitations. Sans oublier Jerem, Elise, Suzy et Clément, vous êtes des amours, merci pour tout.

**Aux voisins de la Grand Rue** : Ces couples goals... Il fallait bien qu'on copie nos modèles avec Ju, et qu'on transforme cette rue en triangle du kiff. Merci à tous les quatre de faire partie de ma vie. Raph et Nono les amours, pardonnez-nous nos excès. Les deux gros sacs, ne vous éloignez jamais.

**À Thomas et Anna** : Petit mot spécial parce que je vous aime, c'est tout.

-----

**À ma famille :**

**À mes grands-parents** : qui étaient et sont probablement mes plus grands fans. Mamie Simone, il te reste une prothèse à poser. A bon entendeur. Merci de tout mon cœur.

**À mes parents** : ce travail, c'est la consécration, l'aboutissement de 10 années pendant lesquelles vous avez été omniprésents. Je vous le dédie, et serai déjà très heureux si je parviens à vous intéresser. Merci de m'avoir permis de grandir dans cette voie et de me prouver tous les jours votre fierté. Je vous dois tout. Je vous aime.

**À Jeanne** : Tu aurais quasi pu faire partie de cette étude, à peine trop âgée pour les critères d'inclusion. On ne sera plus jamais très loin, je te le promets. Tu es probablement la personne la plus forte que je connaisse. Un exemple à ta façon. Merci.

**À Raphaël** : Tu es pour au moins 10% de ce travail, 1% pour toi, 9% pour le Dr Maboul. Merci pour tout mon frère.

**A la famille Tremblais** : Évelyne et Érick merci de m'avoir accueilli aussi chaleureusement parmi vous. J'espère pouvoir continuer à passer du bon temps à la cabane bressuiraise pendant encore très longtemps à vos côtés. Simon, reste comme tu es, gentil et attentionné, même si c'est dans l'eau à plusieurs milliers de kilomètres. Il serait d'ailleurs peut être temps de me faire enfin passer mon niveau 1, marre des baptêmes...

**À Justine** : Le soleil de ma vie, mon plus grand soutien. Je ne pourrai jamais assez te remercier de partager ma vie et de rayonner à mes côtés. Je suis l'homme le plus comblé et le plus fier du monde. Merci de me rendre meilleur, de me supporter et de me faire confiance pour te rendre heureuse. Pour toujours. Je t'aime.

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

TOF : Time-of-Flight

SIA : scoliose idiopathique de l'adolescent

SI : scoliose idiopathique

CA : angle de Cobb

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

GS : gold standard

ATR : angle of trunk rotation - angle de rotation du tronc

FBT : Adam's forward bending test - test d'antéflexion d'Adams

IMC : index de masse corporelle

TDM : tomodensitométrie

IRM : imagerie par résonance magnétique

LED : light emitting diode (DEL – diode électroluminescente)

CCD : charge coupled device – dispositif à transfert de charge (capteur photographique)

ZR : zone de référence

ZI : zone d'intérêt

AUC : aire sous la courbe

ROC : receiver operating characteristic - fonction d'efficacité du récepteur

Se : sensibilité

Sp : spécificité

GTA : global trunk asymmetry

H : homme

F : femme

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	5
LISTE DES ABREVIATIONS .....	8
1. INTRODUCTION.....	10
1.1 Définition.....	10
1.2 Signes cliniques .....	12
1.3 Complications liées à la scoliose .....	13
1.4 Principes du traitement .....	13
1.5 Epidémiologie et intérêt du dépistage .....	16
1.6 Méthode de description des scolioses.....	16
1.7 Caméra TOF .....	20
2. MATERIELS ET METHODES .....	23
2.1 Patients.....	23
2.2 Procédure .....	23
2.3 Critère de jugement principal .....	29
2.4 Analyse statistique.....	29
3. RESULTATS .....	30
3.1 Patients.....	30
3.2 Validité .....	31
3.3 Meilleur seuil et aire sous la courbe .....	32
3.4 Caractéristiques de test .....	33
4. DISCUSSION .....	35
5. CONCLUSION .....	37
BIBLIOGRAPHIE .....	38
REFERENCES DE L'IMAGERIE .....	41
VERSION ARTICLE.....	42
SERMENT .....	57

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Définition

#### 1.1.1. Scoliose

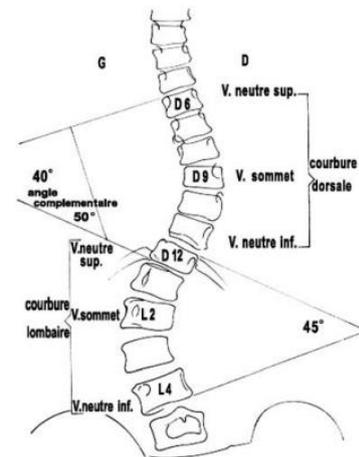
La scoliose idiopathique de l'adolescent (SIA) est une déformation tridimensionnelle de la colonne vertébrale.

Elle combine une déviation latérale dans le plan frontal, un aplatissement des courbures dans le plan sagittal, ainsi qu'une rotation des vertèbres dans le plan axial (1).

La définition d'une scoliose est basée sur la mesure radiographique d'un angle de Cobb (CA) supérieur à  $10^\circ$  (2,3).

L'angle de Cobb est l'angle formé par deux droites passant par les vertèbres les plus inclinées. Il est mesuré du plateau supérieur de la vertèbre supérieure au plateau inférieur de la vertèbre inférieure et rend compte de la sévérité de la scoliose.

L'examen de référence est la radiographie antéropostérieure du rachis corps entier (2).



**Image 1.** Diagramme de la radiographie de face d'une scoliose double majeure, définition des vertèbres neutres supérieures, vertèbres sommet, et neutres inférieures. Mesure des angles de Cobb entre les plateaux les plus inclinés.

Lorsque la scoliose débute entre 1 et 4 ans, on parle de scoliose idiopathique (SI) infantile. Elle représente 1% des SI, et concerne autant les garçons que les filles avec un ratio 1 pour 1. Leur évolution est dite « maligne » si les courbures rapidement évolutives imposent un traitement chirurgical, ou bénignes si elles restent peu évolutives avant l'âge de 10 ans.

Lorsque la scoliose se déclare entre 4 ans et le début de la puberté, on parle de SI juvénile. Elle représente 10 à 15% des SI. Le ratio fille/garçon est proche de 1 et tend à augmenter progressivement en faveur des filles. Là encore, le risque d'aggravation est modéré jusqu'à la puberté (4).

La classification la plus utilisée dans le monde pour décrire précisément la scoliose est la classification de Lenke (5).

Elle prend en compte 3 éléments :

- le type de courbure
- un modificateur frontal lombaire
- un modificateur sagittal

Elle définit également comme structurelle toute courbure dont le CA reste  $>25^\circ$  après radiographie dynamique de type bending.

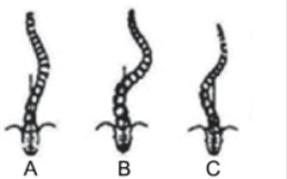
**Image 2.** Classification des scolioses idiopathiques selon Lenke

Type of curve				
Type	Proximal thoracic	Main thoracic	Thoracolumbar/Lumbar	Type of Curve
1	Non-structural	Structural (main)	Non-structural	Main thoracic (MT)
2	Structural	Structural (main)	Non-structural	Double thoracic (DT)
3	Non-structural	Structural (main)	Structural	Double main (DM)
4	Structural	Structural (main)	Structural	Triple main (TM)
5	Non-structural	Non-structural	Structural (main)	Thoracolumbar/Lumbar (TL/L)
6	Non-structural	Structural	Structural (main)	Thoracolumbar/Lumbar – MT(TL/L-MT) (Lumbar curve > thoracic in $\geq 10^\circ$ )

<p><b>Structural criteria</b></p> <p>Proximal Thoracic - Lateral inclination, Cobb <math>\geq 25^\circ</math> - Kyphosis T2 – T5 <math>\geq +20^\circ</math></p> <p>Main Thoracic - Lateral inclination, Cobb <math>\geq 25^\circ</math> - Kyphosis T10 – L2 <math>\geq 25^\circ</math></p> <p>Thoracolumbar/Lumbar - Lateral inclination, Cobb <math>\geq 25^\circ</math> - Kyphosis T10 – L2 <math>\geq +20^\circ</math></p>	<p><b>Location of apex</b></p> <table border="0"> <tr> <td><b>Curve</b></td> <td><b>Apex</b></td> </tr> <tr> <td>Thoracic</td> <td>DISC T2 – T11-12</td> </tr> <tr> <td>Thoracolumbar</td> <td>T12 – L1</td> </tr> <tr> <td>Lumbar</td> <td>DISC L1-2 – L4</td> </tr> </table>	<b>Curve</b>	<b>Apex</b>	Thoracic	DISC T2 – T11-12	Thoracolumbar	T12 – L1	Lumbar	DISC L1-2 – L4
<b>Curve</b>	<b>Apex</b>								
Thoracic	DISC T2 – T11-12								
Thoracolumbar	T12 – L1								
Lumbar	DISC L1-2 – L4								

Lumbar Spine Modifier		Modifiers			Sagittal Thoracic Profile T5 – T12	
Lumbar Spine Modifier	CVSL up to Lumbar Apex	A	B	C		
A	CVSL between pedicles				- (Hypo)	< 10°
B	CVSL touches the apical body (or bodies)				N (Normal)	10° - 40°
C	CVSL completely medial				+ (Hyper)	> 40°

Curve type (1 – 6) + Lumbar Spine Modifier (A, B, or C) + Thoracic Sagittal Modifier (-, N, or +).

### 1.1.2. Scoliose idiopathique et secondaire

La classification des scolioses dites secondaires n'est pas consensuellement admise mais ces dernières peuvent être regroupées en 4 grands groupes :

- Neurologique ou neuromusculaire
- Malformative congénitale
- Dysplasique syndromique
- Post-traumatique et post chirurgicale

Parmi les scolioses neurologiques, on peut compter les scolioses secondaires à des lésions médullaires, à des cavités de syringomyélie, des myélo-méningocèles ou encore des malformations de type Chiari.

Les scolioses neuromusculaires associent souvent des retards mentaux, des atteintes respiratoires, des cardiomyopathies et des troubles sensitifs avec risque d'escarres. Ces scolioses sont volontiers thoraciques gauches associées à une cyphose (6,7).

Les scolioses dites malformatives et congénitales sont à début précoce et concernent surtout les filles (60%). Elles regroupent les défauts de formation vertébrale (hémi-vertèbres), les défauts de segmentation (blocs complets ou partiels), et les défauts de soudure (7,8).

Les scolioses évoluant dans le cadre d'un syndrome sont souvent initialement au second plan vis-à-vis des autres signes cliniques. On peut notamment citer les maladies du tissu conjonctif (Ehlers-Danlos, Marfan), la neurofibromatose ou encore l'ostéogénèse imparfaite (7).

Les scolioses post traumatiques ou post chirurgicales sont une unité à part, liées comme leur nom l'indique à un facteur extrinsèque.

Les scolioses secondaires ont en règle générale un potentiel évolutif plus grave que les SIA. Le pronostic est complexe car les autres complications sont souvent au premier plan. La prise en

charge de ces pathologies est nécessairement multidisciplinaire de par l'hétérogénéité des symptômes. Il faut donc s'attacher à éliminer toutes ces étiologies aux moyens d'un examen clinique minutieux (volontiers itératif) et des examens complémentaires soigneusement choisis. Le diagnostic de scoliose idiopathique est retenu lorsqu'aucune cause n'a été retrouvée, c'est la forme majoritaire des deux (7).

## 1.2. Signes cliniques

La déformation rachidienne progressive s'accompagne de signes cliniques à observer et dépister chez le patient.

Pour la partie supérieure du tronc, on observe souvent une différence de hauteur des épaules ainsi qu'une asymétrie des clavicules, des seins et des scapulas.

La déformation sinueuse de la colonne est suivie par les processus épineux en C ou en S.

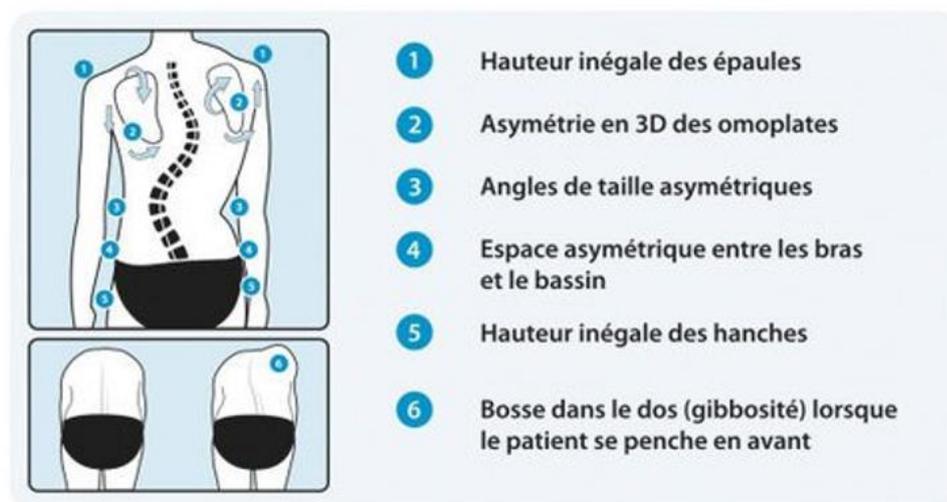
Elle est aussi responsable d'un déséquilibre tronc/bassin et notamment de l'élargissement de l'espace libre du côté de la concavité nommé lucarne, juste au-dessus du « pince taille ».

Enfin la rotation vertébrale entraîne une déformation de la cage thoracique et une saillie des côtes sous la peau visible de dos et exacerbée à l'antéflexion qu'on nomme gibbosité.

**Image 4.** Photographie de dos d'une jeune fille avec scoliose (gauche) Gibbosité visible après test d'antéflexion (droite)



**Image 3.** Signes cliniques de scoliose



### **1.3. Complications liées à la scoliose**

La rotation vertébrale entraîne une déformation progressive de la cage thoracique, jusqu'à réduire l'espace du poumon vers lequel les vertèbres se tournent. Pour des angles de Cobb très élevés ( $CA > 80^\circ$ ), la déformation est telle qu'elle peut entraîner un syndrome restrictif pulmonaire. Des épreuves fonctionnelles respiratoires sont quasi systématiquement réalisées pour les scolioses importantes, en préopératoire.

Cependant seuls les patients avec des courbures thoraciques supérieures à  $110^\circ$  et une capacité vitale pulmonaire inférieure ou égale à  $45^\circ$  sont à risque majoré de mortalité prématurée. Des déformations aussi importantes sont de moins en moins rencontrées dans les pays développés, grâce à la sensibilisation, le dépistage et les techniques orthopédiques et chirurgicales (9).

Li et al ont montré dans une étude récente de 2018 que la qualité du sommeil était également impactée, et que l'index d'apnée-hypopnée était significativement plus élevé chez les patients atteints de SIA (10).

Les complications de la scoliose sont également neuromusculaires et ostéoarticulaires. La déformation rachidienne s'inscrit dans une perpétuelle réorganisation du schéma corporel et de l'appareil locomoteur toute au long de son évolutivité. Les modifications du schéma de la marche, du port de tête, les positions vicieuses, acquises pour compenser la scoliose sont autant de facteurs pouvant entraîner des douleurs en grandissant. Les sujets adultes ayant une scoliose dite vieillie sont plus dorso-lombalgiques que la population générale. La dégénérescence discale est également plus importante et plus rapide (11–13).

La scoliose idiopathique est considérée par beaucoup et depuis longtemps comme non douloureuse. Une scoliose douloureuse doit d'ailleurs faire questionner le diagnostic idiopathique et faire rechercher une cause secondaire (14). Cet adage est de plus en plus remis en question et de nombreuses études cherchent à prouver à l'aide de scores fonctionnels, de qualité de vie, et de douleur, que la prise en compte de cette dernière en préopératoire est absolument fondamentale pour les résultats de satisfaction post-opératoire.

Enfin les complications psychologiques de la scoliose sont parmi les plus difficiles à traduire et à caractériser. Le schéma corporel est habituellement bouleversé, et ce le plus souvent pendant la puberté, période charnière du développement psychologique, mental et social de l'adolescent. Le reflet dans le miroir, le regard d'autrui, les complexes sont autant d'aspects qui régissent la vie d'un adolescent atteint de SIA. D'une façon générale, une grande attention est portée depuis quelques années sur la question de la qualité de vie chez ces patients.

## **1.4. Principes du traitement**

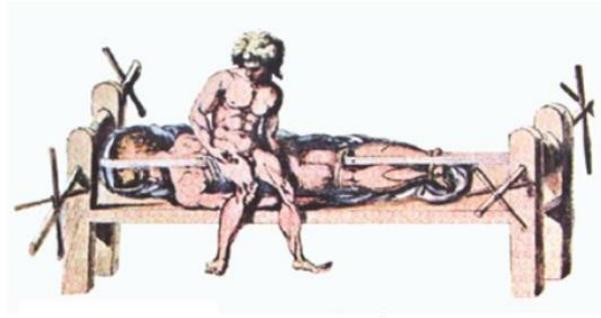
### **1.4.1. Histoire**

La majorité des patients ne nécessitera jamais d'opération chirurgicale et le traitement de leur scoliose reposera sur des mesures non invasives médicales et orthopédiques (15).

Il faut bien distinguer les déformations sans rotation que sont les attitudes scoliotiques, essentiellement fonctionnelles, ne posant pas de réel problème thérapeutique.

Pour les scolioses vraies les principes de traitement ont très peu changé depuis Hippocrate : tirer, pousser (et si possible déroter), mais avec « quelques » inventions intercurrentes.

Pendant des siècles, le traitement de la scoliose ne semble pas avoir été une préoccupation. Hippocrate a écrit longuement sur les façons de corriger les déformations du rachis et les gibbosités. Il préfère l'élongation en position horizontale complétée par la compression d'un levier transversal.



**Image 5.** Inversion de la colonne vertébrale selon Hippocrate à l'aide d'un lit de traction ou scammon

Ambroise Paré au 16<sup>ème</sup> siècle cerne parmi les premiers, la déformation de l'adolescence, déformation évolutive à contrôler jusqu'à ce que le sujet "ait acquis ses trois dimensions", en renouvelant les appareils (ancêtres des corsets) tous les trois mois.

Au 18<sup>ème</sup> siècle, les deux principes sont appliqués ensemble : traitement orthopédique la journée et traction la nuit. Au 19<sup>ème</sup> siècle, les traitements se recentrent autour de la gymnastique et des assouplissements, avec corset et point d'appui en dehors du sport.

C'est vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle qu'apparaissent les bandes plâtrées et les corsets plâtrés moulés. Hibbs en 1914 réalise la première arthrodèse véritable. Harrington en 1963 viendra ajouter à la technique une tige d'arthrodèse, rapidement adoptée par tous les orthopédistes dans le monde. On doit son perfectionnement à Yves Cotrel et Jean Dubousset qui ont l'idée originale d'imprimer à une tige métallique incurvée une torsion inverse à celle des vertèbres. Ils associent à ce montage rigide, un vissage pédiculaire pour compléter la technique d'arthrodèse que nous connaissons aujourd'hui (16).

#### **1.4.2. Indications de traitement**

De la surveillance simple à la chirurgie, le traitement est aujourd'hui bien codifié, et même si le chirurgien doit autant que possible respecter les souhaits de l'adolescent et l'impliquer dans sa prise en charge, il répond toujours à ces grands principes.

Au décours du premier bilan, pour des angles de Cobb compris entre 10 et 20° en dehors de la période puberté, on évalue le caractère évolutif de la scoliose. Si celle-ci ne l'est pas, une surveillance simple peut être choisie avec consultation radio-clinique tous les 3 à 6 mois. Une pratique sportive sans limite est recommandée, bénéfique sur l'hygiène de vie, le renforcement musculaire etc. De la kinésithérapie insistant sur le renforcement et l'économie rachidienne est prescrite de façon quasi systématique.

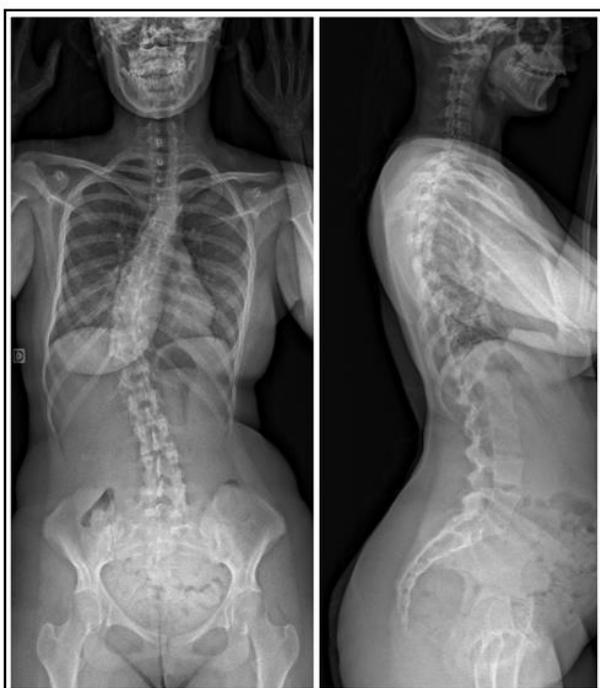
Le traitement orthopédique (corset), a pour objectif de freiner l'évolution de la scoliose. Il est indiqué à partir d'un angle de Cobb supérieur ou égal à 20-25° (17) avec un potentiel de croissance restant. Le type de corset est dépendant des équipes. On peut notamment citer le corset CTM (Cheneau-Toulouse-Münster), le Boston, le corset hyper-correcteur nocturne (de Charleston, de Caen etc.), le corset gardois. Son choix est fonction de l'âge du patient, de son quotidien (horaires, écoles, activités physiques), de son implication dans sa prise en charge. La réévaluation fréquente de son indolence, son efficacité et de l'observance du patient, sont primordiales. Les complications liées au corset sont à dépister, parmi lesquelles les atteintes cutanées et nerveuses par compression, les troubles digestifs par pesanteur gastrique ou les troubles respiratoires par restriction de la cage thoracique.

Il est arrêté à la fin de la croissance rachidienne lorsque trois critères cliniques et radiologiques sont associés :

- Taille assise stable à 6 mois d'intervalle
- Premières règles datant de plus de 2 ans pour la fille
- Stade Risser IV

L'indication du traitement chirurgical est fonction du déséquilibre, du type de courbure, et de la sévérité (angle de Cobb). Le caractère évolutif de la scoliose est aussi à prendre en compte : CA d'emblée supérieur à  $30^\circ$  quel que soit l'âge, aggravation supérieur ou égale à  $5^\circ$  à partir de  $15^\circ$  à 6 mois d'intervalle, perte de taille ou évolution cyphosante à 5 ans d'intervalle. En règle générale, la solution chirurgicale est retenue pour des Cobb  $>40-45^\circ$  en thoracique et  $30-35^\circ$  en lombaire, le plus souvent vers la fin de l'adolescence ou début de l'âge adulte (18).

L'arthrodèse par voie postérieure est la chirurgie de référence, et consiste à obtenir la fusion des vertèbres entre elles après redressement de la colonne par manœuvre de distraction contraction et dérotation. Elle est obtenue au moyen de vis introduites dans les pédicules des vertèbres reliées entre elles par des tiges courbées. C'est une chirurgie lourde, de plusieurs heures, associées à des risques chirurgicaux non négligeables qu'il convient d'exposer au patient et à ses parents (risque neurologique par atteinte de la moelle ou des racines nerveuses, risque de brèche méningée, risque hémorragique, infectieux...)(18).



**Image 6.** Jeune fille de 15 ans présentant une SIA Lenke 1AN  
Radiographie de face et de profil debout



**Image 7.** Radiographie post-opératoire à 18 mois de son arthrodèse par voie postérieure T3-L3.

## 1.5. Épidémiologie et intérêt du dépistage

Bien que la prévalence de cette maladie soit difficile à estimer en pratique, d'après les programmes de dépistage scolaire et les études épidémiologiques nombreuses de 2005 à 2015, elle pourrait être comprise entre 1 et 3% dans la population âgée de 10 à 18 ans.

Le sexe-ratio est estimé de 1,5/1 à 3/1 au global et tend à augmenter avec l'âge. Les courbures à angle de Cobb élevé sont statistiquement plus fréquentes chez la fille que le garçon. Sexe-ratio de 1,4/1 pour les CA compris entre 10 et 20°, contre 7,2/1 pour les CA >40° (19).

Le dépistage précoce de la scoliose associée à un traitement conservateur montre de meilleurs résultats cliniques et une diminution du nombre de patient qui nécessiteront une chirurgie (20–22). Malgré cela, on observe une augmentation du nombre de chirurgie dans la population de SIA, passant de 4,4 (3,1-5,9) à 9,8 (9,1-10,8) pour 100000 individus entre 2005 et 2018 (23).

Le dépistage précoce de la SIA est consensuellement considéré comme une part importante et bénéfique au traitement.

De plus, on observe régulièrement en consultation, des enfants adressés pour suspicion de déformation rachidienne dont les mesures radiographiques ne respectent pas les critères de scoliose. Ces enfants subissent des irradiations dont l'indication est inappropriée et les effets néfastes bien connus (24,25).

La SIA respecte tous les critères d'une maladie à dépister établis par l'OMS (26).

- C'est une maladie dont l'évolution est bien connue et dont le dépistage précoce réduit la morbidité.
- Son dépistage et un traitement conservateur précoces améliorent l'efficacité du traitement (20).
- La reconnaître et la traiter tôt permet dans la majorité des cas d'éviter une chirurgie.

Il apparaît donc nécessaire d'avoir accès à un outils de dépistage de la SIA simple, fiable, et reproductible. Cet outil devrait permettre de réduire à la fois les adressages abusifs et les enfants faux négatifs, avec une précision, une reproductibilité et une sensibilité importantes.

Il n'y a malheureusement pas de consensus, ni recommandation claire et définie à ce sujet (27).

Comme déjà mentionné plus haut, la majorité des patients atteints de SIA sera traitée par des thérapies non chirurgicales (15), mais une surveillance étroite pendant les années de croissance est nécessaire pour s'assurer qu'aucune intervention chirurgicale n'est requise. L'utilisation de corsets pendant le traitement orthopédique nécessite un suivi radiographique tous les 4 à 6 mois, comme le recommandent les directives internationales (15,17).

L'exposition répétée aux radiations pendant cette période, associée à la plus grande sensibilité des enfants aux radiations (28), peut augmenter le risque de cancer (29).

La réduction des doses de rayonnement pendant la surveillance est donc un défi majeur pour éviter les problèmes de santé à long terme.

## 1.6. Méthode de description des scolioses

### 1.6.1. Radiographie et principe de l'EOS

L'examen de référence de dépistage et de suivi de la scoliose est la radiographie corps entier de face et de profil (3).

Afin de réduire les doses irradiantes associées à une radiographie simple, chez des patients amenés à répéter cet examen, l'examen devenu référence est la radiographie de type EOS.

C'est un système d'imagerie médicale permettant l'acquisition simultanée de deux images radiographiques, face et profil, en limitant la dose de rayons X absorbée. Le système s'appuie sur la haute sensibilité d'un détecteur gazeux inventé par Georges Charpak (Prix Nobel en 1992). Son application orthopédique dans la reconstitution 3D de la colonne vertébrale et/ou des membres inférieurs est initialement française via la société EOS Imaging (30).

Le patient est positionné debout ou assis. Le système EOS est un système de balayage de deux pinceaux très fins de rayons X, qui prend environ vingt secondes. L'examen global nécessite environ trois minutes avec une faible dose de radiation. Il permet une réduction de 50 à 85% du rayonnement par rapport à un examen radiographique conventionnel (31).



**Image 8.** Cabine de radiographie de type EOS (gauche) et images radiographiques corps entier avec reconstruction 3D (droit)

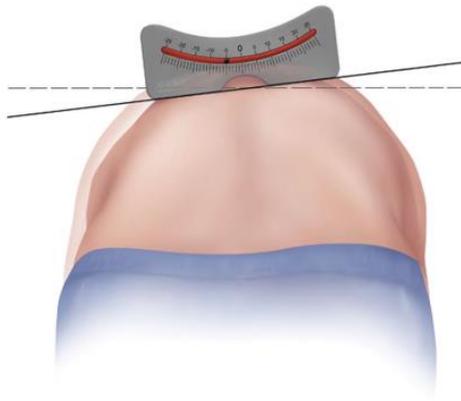
### 1.6.2. Scoliomètre et Adams FBT

L'outil le plus utilisé en pratique courante est le scoliomètre utilisé pour mesurer un angle de rotation du tronc (ATR) lors de la position fléchié en avant (Adams forward bending test - FBT). Il est peu coûteux et non invasif (24).

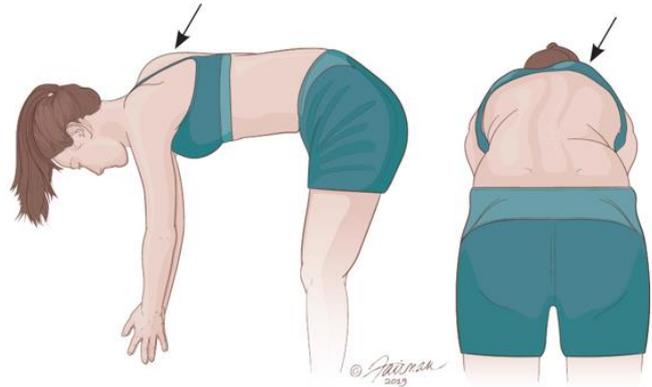
Il ne mesure en aucun cas des courbures mais plutôt une asymétrie du tronc. C'est un inclinomètre mécanique équivalent de niveau à bulle positionné le long de la colonne vertébrale sur les épineuses et balayé de haut en bas pour trouver le sommet de la gibbosité. Ce sommet représente le plus grand angle formé entre la parallèle au sol (bille et gravité) et la gibbosité.



**Image 9.** Scoliomètre de Bunnell



**Image 10.** Mesure de l'angle de rotation du tronc mesuré au scoliomètre lors d'un test d'antéflexion de Adam



**Image 11.** Test d'antéflexion d'Adam et gibbosité droite (flèche)

Cet outil, possède une sensibilité estimée à 92-100% pour les scolioses thoraciques avec  $CA > 20\%$  (32). Il est moins sensible sur les plus petits Cobb, et également moins performant sur les courbures lombaires, dont la manifestation clinique (gibbosité lombaire) est moins flagrante que pour les courbures thoraciques.

Il a été montré récemment que ce test pouvait être mis en défaut par un index de masse corporelle (IMC) plus élevé. Margalit et al. retrouvent une meilleure sensibilité du scoliomètre pour un angle de gibbosité à  $7^\circ$  chez les patients normaux, contre  $5^\circ$  pour les patients obèses. Cela suggère qu'un IMC élevé aurait tendance à « cacher » les courbures et, qu'il faudrait adresser ces derniers en consultation spécialisée à partir d'un angle de rotation thoracique plus faible (33). La population obèse ne représente néanmoins pas une part importante de la population des SIA.

### 1.6.3. TDM/IRM

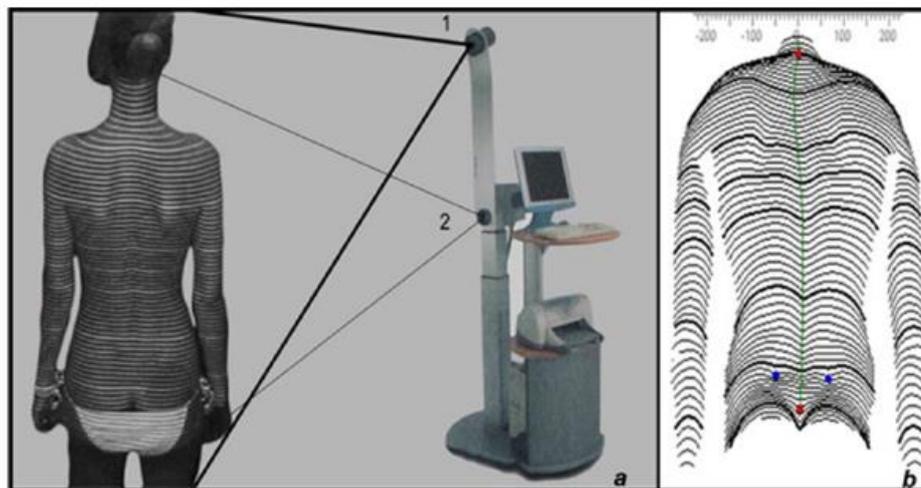
Ces 2 examens sont des examens complémentaires, non réalisés de façon systématique.

La tomodensitométrie (scanner) basée aussi sur le rayonnement X, est surtout utilisée en préopératoire pour une étude morphologique vertèbre par vertèbre. Contrairement à l'imagerie radiographie en 2D, elle permet une reconstruction 3D de chaque vertèbre, pour évaluer sa morphologie, sa taille, les structures osseuses ou vasculaires adjacentes ainsi que la densité osseuse, et ainsi choisir le matériel optimal pour l'instrumentation chirurgicale.

L'IRM quant à elle, basée sur les vibrations des atomes d'hydrogène soumis à un champ électromagnétique, est un examen diagnostique. Elle est surtout prescrite pour dépister une anomalie neurologique, en cas de point d'appel ou non. La découverte d'une moelle attachée basse, d'une cavité de syringomyélie ou d'un pseudoraphisme, doivent faire reconsidérer le diagnostic de scoliose idiopathique et orienter vers un avis neurochirurgical. L'IRM est systématiquement faite devant un examen clinique anormal ou un syndrome polymalformatif connu.

### 1.6.4. Rasterstéréographie

Autre outil de dépistage : la rasterstéréographie, utilisant la méthode de projection de frange de Moiré. Elle utilise des bandes de lumière horizontales projetées sur le dos, dont elles épousent les formes et déformations. La transformation de ces bandes horizontales en courbes permet un surfacage en trois dimensions.



**Image 12.** Équipement de mesure rasterstéréographique avec caméra (1) et projecteur (2) (a). Reconstruction en 3D du relief du dos (b)

La rasterstéréographie est une technologie peu coûteuse, sans irradiation, offrant la possibilité de mesurer la courbure rachidienne et de déterminer un angle de scoliose (34–36).

Une récente méta-analyse montre une bonne reproductibilité et validité interne de la mesure de l'angle de scoliose par rasterstéréographie (37). Une seule étude a évalué l'efficacité de la rasterstéréographie pour le dépistage scolaire (38). Pour l'instant il n'a pas été montré de supériorité par rapport au scoliomètre.

Comme mentionné précédemment, la nécessité de trouver des outils de dépistage et de suivi non irradiants, a poussé au développement de méthodes d'imagerie 3D, autres que la rasterstéréographie.

Sans décrire en détail l'intégralité de ces méthodes, on peut citer, les reconstructions scanographiques (39,40) (irradiant), ou encore les systèmes d'imagerie 3D utilisant les ultrasons (41,42). Une récente méta-analyse de 2022, a passé en revue 18 études et 7 systèmes de topographie de surface différents dont la validité et la fiabilité sont très prometteuses pour l'évaluation des déformations corporelles associées à la SIA (43).

### 1.6.5. Photographies

La photographie figure parmi les examens invasifs, non irradiants, utilisés dans l'analyse des déformations. De nombreuses études ont tenté de se focaliser sur les axes majeurs de déformation corporelle, à savoir l'asymétrie du pli de taille, la différence de hauteur des épaules/clavicule. Pour ne citer que ces axes, il n'y a encore aujourd'hui aucun consensus et aucun repère parfaitement défini pour les décrire de façon fiable et reproductible.

La nature même de l'examen est un biais à cela. La photographie nécessite des angles de prise de vue standardisée, un patient immobile, avec des reliefs osseux visibles. La qualité des images, la luminosité et le caractère peu reproductible du positionnement de certains marqueurs d'intérêt (intra et interindividuel) sont également d'autres biais. En effet, deux examinateurs ne placeront pas nécessairement les pointes de scapula, les acromions, les crêtes iliaques etc., au même endroit. Obtenir des mesures et valeurs chiffrées précises nécessite l'utilisation de marqueurs dont le diamètre est centimétrique (ou infracentimétrique), pour décrire des structures qui sont parfois bien plus larges.

Un exemple parlant est la différence de hauteur des épaules, élément important de la perception de soi pour l'adolescent et facteur tout aussi important de satisfaction post-opératoire (44). De nombreux auteurs se sont attachés à trouver une corrélation forte entre les données radiographiques décrivant cette différence de hauteur des épaules et des données dites « cosmétiques » mesurées à partir de photographies (45–47). Les freins à cette corrélation et limites de ces études sont en partie les mêmes que ceux cités plus haut.

## 1.7. Caméra TOF

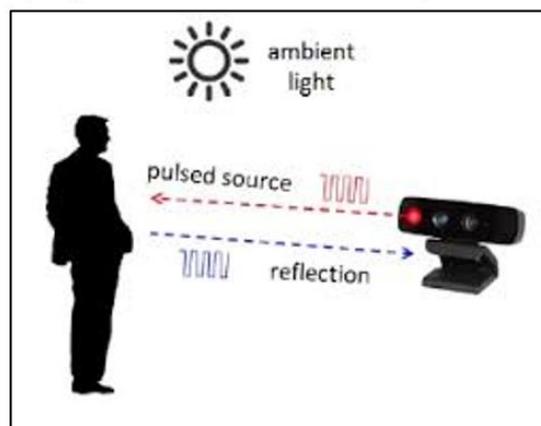
### 1.7.1. Principe

La caméra TOF est une caméra fonctionnant sur le principe de calcul du temps de vol. Elle mesure en temps réel une scène en 3D.

Pour chaque pixel, la caméra mesure le temps pris par le photon pour effectuer l'aller-retour émetteur/objet.

Sans pour autant s'épancher sur des bases de physique des ondes lumineuses, la distance de chaque point d'un objet situé devant cette caméra est calculée via le temps que chacun des pixels met à revenir à la caméra une fois émis puis réfléchi. Cette distance ( $v=d/t$ ) pour chaque pixel est extrapolée pour cartographier en 3D l'image pris en photo.

**Image 13.** Principe de réflexion de lumière pulsée par un objet captée par une caméra à la fois émetteur et capteur



**Image 14.** Carte de profondeur établie à partir d'une photographie par caméra TOF

### 1.7.2. Composition

La caméra TOF est composée au minimum des éléments suivants :

- Système d'illumination (ensemble de LED ou de diode lasers) pour émettre des photons
- Capteur TOF : il est similaire à un capteur de caméra standard (2D). Il transforme la lumière incidente en signal électrique. Il est néanmoins plus complexe car capable de mesurer pour chaque pixel le temps de vol que la lumière incidente a parcouru entre la caméra et l'objet. Cette complexité nécessite une surface plus grande par pixel, ce qui a pour conséquence une résolution latérale (ou nombre de pixels) nettement moins grande que pour les capteurs 2D standards. Une résolution typique pour une caméra TOF se situe aux alentours de 176×144 px.
- Partie électronique : elle doit être capable de précisément synchroniser la lumière émise avec le fonctionnement du capteur TOF. L'ordre de grandeur des données qu'elle manipule est la nano et picoseconde.
- Conversion analogique/numérique : le signal généré par le capteur TOF est converti en signal numérique, du type coordonnées sphériques ou coordonnées cartésiennes.

### 1.7.3. Avantages et inconvénients des caméras TOF

Contrairement aux scanners lasers utilisant parfois des têtes pivotantes afin de balayer la totalité de l'objet mesuré et utilisant une mécanique complexe, les caméras TOF offrent l'avantage d'acquérir la totalité de l'image sans procédé de balayage. Cela permet de construire des caméras mécaniquement très stables, en évitant toutes pièces mobiles qui seraient astreintes aux détériorations dues aux vibrations.

Contrairement aux caméras stéréo qui sont soumises à des contraintes géométriques leur imposant une taille minimale, et contrairement aux scanners lasers nécessitant une mécanique complexe et volumineuse, les caméras TOF peuvent être conçues de taille compacte. Certaines caméras industrielles ne sont pas plus grandes que 65 × 65 × 80 mm.

Les caméras TOF dépendent de la quantité du signal propre collecté, la lumière ambiante peut donc interférer avec la mesure de la distance. Pour minimiser cet effet, on peut utiliser un filtre à bande passante, on peut augmenter la quantité de lumière émise par la caméra, ou augmenter la sensibilité du capteur TOF.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"><li>- Acquisition 3D de la totalité de la scène en temps réel</li><li>- Temps d'examen réduit</li><li>- Capture d'image instantanée</li><li>- Pas de procédé de balayage</li><li>- Stabilité mécanique</li><li>- Peu encombrant, taille réduite</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interférence due aux autres sources lumineuses</li><li>- Nécessité de post-traitement de photo par opérateur</li><li>- Logiciel à prendre en main</li></ul>

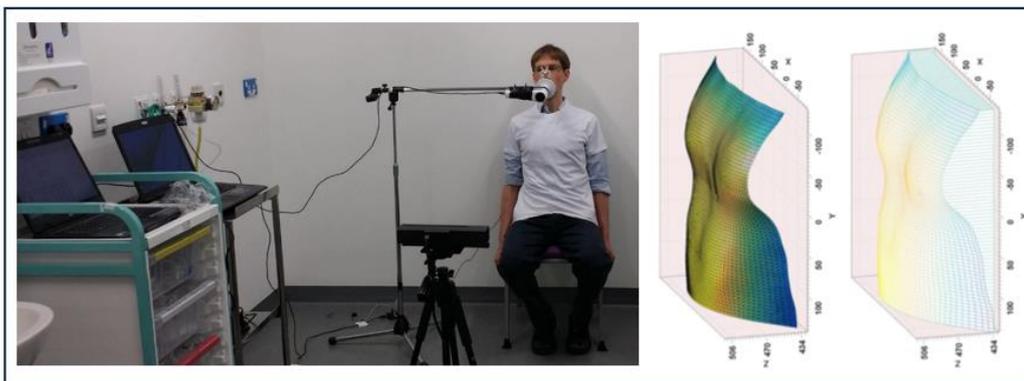
#### 1.7.4. Utilisation dans l'industrie

Les caméras TOF possèdent une multitude d'applications et sont implantées dans l'industrie depuis une vingtaine d'années. Une liste non exhaustive de nouvelles possibilités offertes par les caméras TOF :

- Interaction machine – être humain
- Mesure de volumes et de positions dans le domaine de l'automatisation industrielle
- Assistance de parcage et de conduite dans le domaine automobile
- Navigation automatique dans le domaine de la robotique
- Jeux vidéo, avec la Kinect 2.0 de la Xbox One.

#### 1.7.5. Utilisation en médecine

Cette technologie est peu présente dans le domaine médical. Parmi les plus récentes études et descriptions de cette outils, on peut notamment citer son utilisation dans le positionnement des patients au cours de radiothérapie (48). Sharp et al en 2017 l'utilise pour mesurer l'ampliation thoracique au cours d'épreuves fonctionnelles respiratoires (49). Chen et al en 2019 se servent d'une caméra TOF+CCD pour localiser de façon stricte et reproductible des électrodes au cours d'électroencéphalogrammes (50). En dehors de ces études, les applications à la médecine, semblent pour le moment peu développées.



**Image 15.** Utilisation d'une caméra TOF lors d'épreuves fonctionnelles respiratoires (gauche). Reconstruction surfacique thoracique et estimation de volume (droite)

## **2. MATERIEL ET METHODE**

### **2.1. Patients**

Cette étude est une étude de caractéristique de test visant à obtenir une valeur seuil de sensibilité et spécificité. Elle est monocentrique menée sur le CHU de Poitiers.

La population générale de cette étude est constituée de tous les patients adressés en consultation spécialisée rachis du Dr Vendevre du 16/11/2022 au 15/03/2023. On exclura de cette population d'emblée les patients non adressés pour scoliose et les suivis post-opératoires.

Critères d'inclusion :

- Patient adressé en consultation spécialisée rachis enfant/adolescent/jeune adulte
- Age <30ans
- Accord pour prise de mesure caméra

Critères d'exclusion :

- Patient en post-opératoire d'une chirurgie rachidienne

Ont été photographiés 114 patients. Parmi ces derniers 3 ont dû être exclus car ne respectant pas les critères d'inclusion (postopératoires), et 3 pour données concernant l'angle de Cobb introuvables (absence d'imagerie, problème d'identitovigilance).

108 patients ont donc été analysés avec le logiciel de la caméra TOF.

Malheureusement parmi ces 108 patients, 15 avaient des données manquantes concernant l'ATR mesuré au scoliomètre.

Au total donc, 93 patients ont été comparés pour le meilleur seuil.

### **2.2. Procédure**

#### **2.2.1. Radiographie**

Chaque patient recruté a bénéficié d'une radiographie de rachis entier traditionnelle (réalisée en ville ou au CHU de Poitiers) ou de type EOS, dans le cadre du suivi de sa pathologie rachidienne.

#### **2.2.2. Examen clinique et scoliomètre**

Après un examen anamnestique général puis propre aux consultations de scoliose (date des symptômes, traitement précédent, date des premières règles...), chaque patient recruté a également bénéficié d'un examen clinique rigoureux, dévêtu au tronc, sans brassière ou soutien-gorge pour les filles. Nous avons procédé à une mesure de la taille, puis effectué un test d'antéflexion d'Adams et de mesure de l'angle de gibbosité avec un scoliomètre comme décrit dans la littérature (32).

#### **2.2.3. Camera TOF**

##### **2.2.3.1. Installation**

En fin d'examen clinique, avant de remettre les vêtements et après consentement de l'enfant accompagné d'un de ses parents, nous les avons invités à procéder à la photographie. Haut dévêtu, et pantalon positionné le plus bas possible (sous les crêtes iliaques) pour dévoiler le rachis lombosacré et la région sacrococcygienne, ils devaient s'asseoir sur le tabouret, jambes serrées, main sur les cuisses, dos le plus droit possible, regard droit, et cheveux rabattus vers l'avant.

Le tabouret était placé grâce à des repères au sol avec une distance caméra/tabouret fixe.

La caméra était positionnée en amont sur un trépied et sa hauteur réglée à l'aide de mollette afin de faire apparaître sur le logiciel à la fois le tabouret et l'intégralité de la surface corporelle du patient.



**Image 16.** Caméra TOF sur trépied



**Image 17.** Molettes de réglage du trépied

Après vérification sur logiciel en direct du bon positionnement du patient et de l'absence d'obstacle (cheveux, vêtement), la photo était prise. La durée de l'ensemble de la procédure, explications comprises, était comprise entre 1 et 2 minutes.

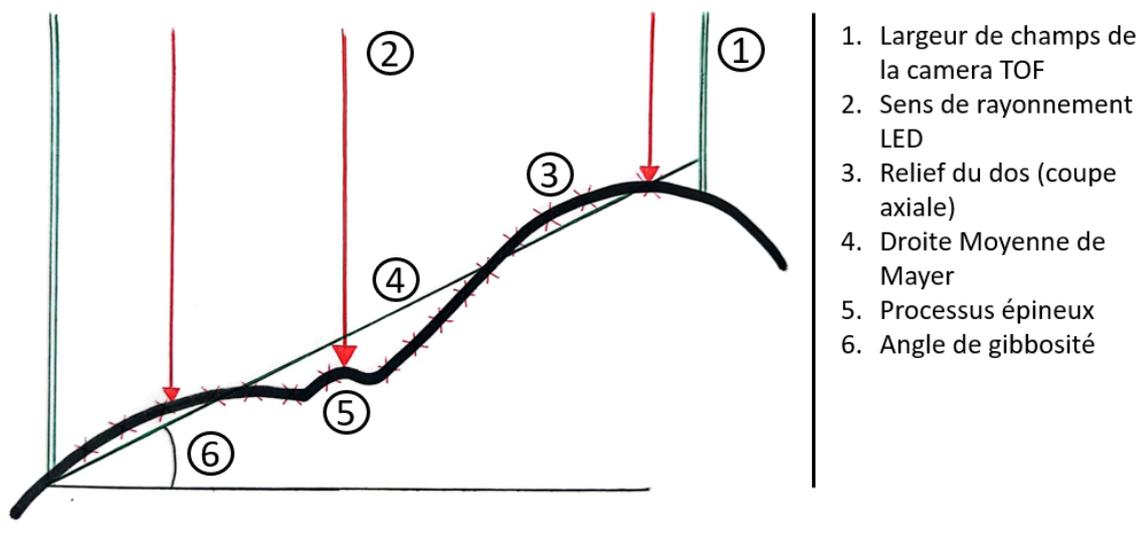


**Image 18.** Installation complète

### 2.2.3.2. Mesure et logiciel

Pour comprendre les données extraites par le logiciel il faut reprendre le principe de l'angle de gibbosité mesuré par le scoliomètre.

Ce dernier mesure l'angle entre la parallèle au sol (assurée en permanence par la bille du niveau à bulle selon le principe de gravité) et le sommet de la gibbosité. (**Image 10** – page 18)



**Image 19.** Principe de mesure d'un angle de gibbosité par caméra TOF

Le logiciel de la caméra TOF quant à lui approxime cet angle. (**Image 19**)

Il cartographie sur toute la largeur d'une zone de référence en 3D le relief du dos. Il construit une droite moyenne passant par tous les points du dos (droite de Mayer et moyenne de nuage de points). L'angle formé par cette droite et une droite parallèle au sol (orthogonale aux rayons de la caméra) est ensuite calculé.

Il est calculé pour chacune des tranches de pixel qui constitue la hauteur de la zone de référence. (hauteur de la fenêtre = 479 pixels ; hauteur de la zone de référence variable aux alentours de 200 pixels)



**Image 20.** Logiciel TOF-Project

Y(pixel)	Distance(mm)	Angle(°)	Corrélation(mm)
133	0.000000	0.000000	0.000000
134	0.000000	0.000000	0.000000
135	1002.000000	2.653978	223.000000
136	1001.750000	2.520500	270.000000
137	1001.250000	2.786053	314.000000
138	1003.000000	2.291722	361.000000
139	1001.500000	2.495911	375.000000
140	999.750000	2.377215	294.000000
331	969.750000	0.072933	127.000000
332	969.750000	0.033852	110.000000
333	969.500000	0.022208	116.000000
334	970.250000	-0.003745	90.000000
335	969.500000	-0.097302	126.000000
336	0.000000	0.000000	0.000000
337	0.000000	0.000000	0.000000

**Image 21.** Tableau d'extraction de données pour une seule photo. Paramètres (distance, angle et corrélation pour chaque pixel)

Avant chaque extraction de données il est indispensable de définir une zone de référence autour d'un axe ainsi que la zone à traiter. Toutes ces mesures ont été réalisées manuellement par un seul examinateur. (Image 22)

Une fois ces 3 paramètres décidés, les résultats sont édités sous forme d'un graphique :

- Ordonnée : hauteur (en tranche de pixel)
- Abscisse : angle de gibbosité (en degré)

Un angle de gibbosité négatif témoigne d'une déformation plus proéminente de la partie gauche par rapport à l'axe. Ces données sont transcrites visuellement sous la forme d'un ensemble de tranche constituant une surface de couleur bleue (Image 24). Elles témoignent de la dissymétrie du tronc à chaque graduation de l'axe des ordonnées. Ces résultats sont également extraits sous forme d'un fichier texte. (Image 21)

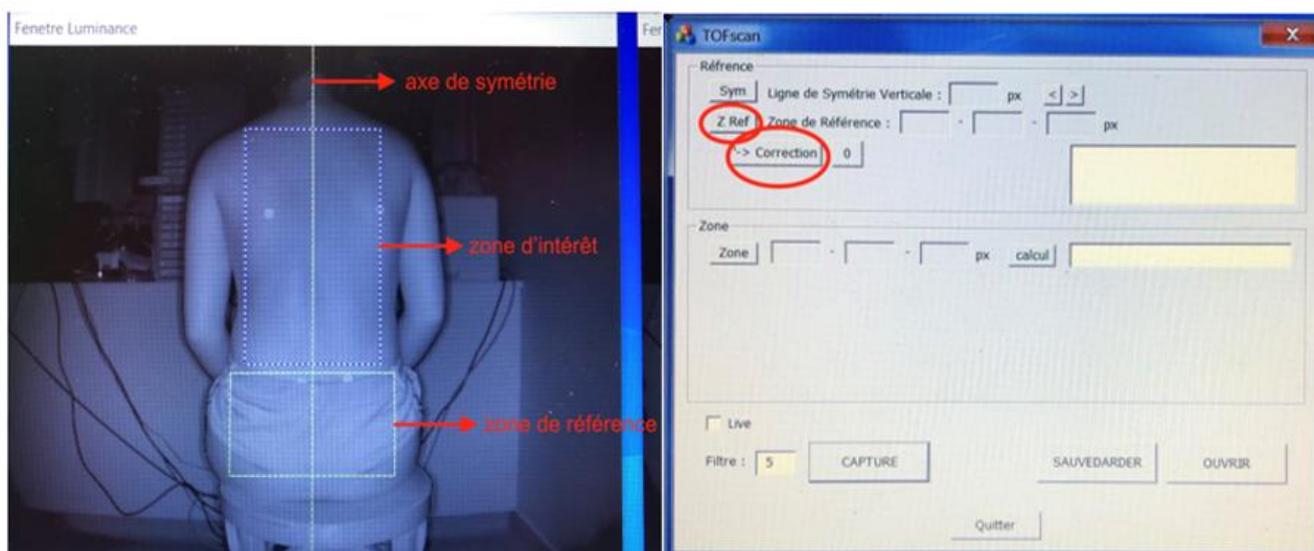


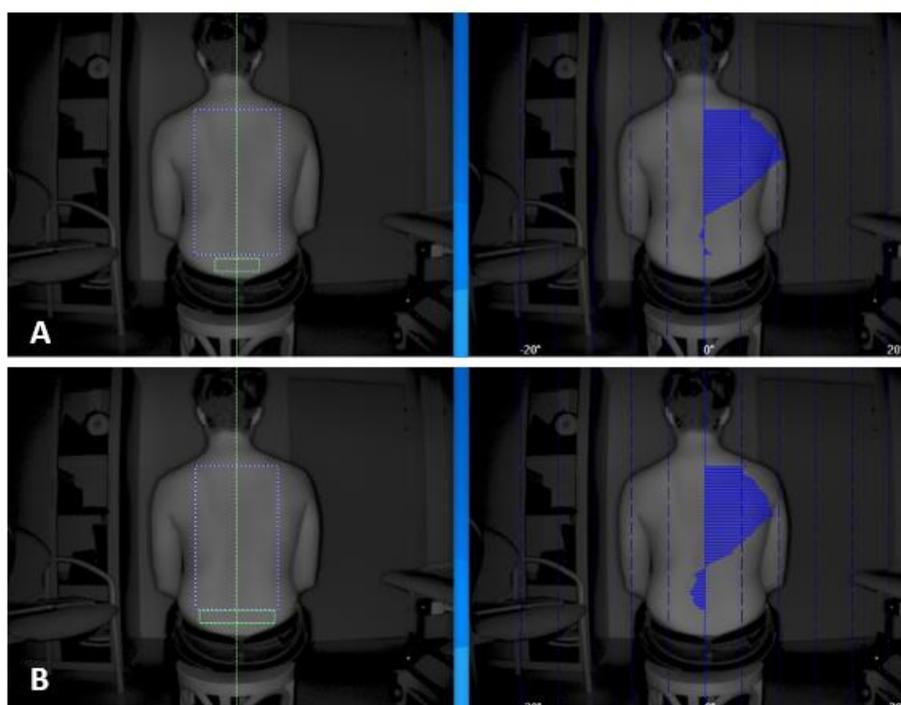
Image 22. Fenêtres de modification des paramètres de calcul (axe de symétrie, zone d'intérêt et zone de référence)

**Axe de symétrie** : à positionner le long de la colonne vertébrale. Il est surtout positionné en fonction du rachis lombosacré qui est au plus près du bassin et non sujet aux déviations médiolaterales. Pour cela on peut s'aider de la fenêtre de symétrisation, en limitant les zones blanches périphériques. (Image 23)



Image 23. Fenêtre de symétrisation

**Zone de référence (ZR) :** l'avantage de la caméra TOF est la possibilité de « recentrer la zone d'intérêt » si le patient n'est pas assis de façon parfaitement orthogonale aux rayons de la caméra. En effet il suffit de choisir une zone de référence que le logiciel de la caméra considérera comme plane et vis-à-vis de laquelle il pourra mesurer les déformations sus-jacentes. Cette ZR doit être la plus plane possible (zone dévêtue), non sujette aux déformations liées à la scoliose (rachis lombaire bas/sacré quasiment plan par rapport au bassin) si possible. À noter que la largeur de la ZR importe peu, mais plus elle est large, plus elle a tendance à « lisser » et masquer les microdéformations (et à potentiellement sous-estimer les macrodéformations). Nous avons donc choisi de la prendre aussi large que possible dans les limites imposées par les vêtements. Il est intéressant également de noter qu'un élargissement de la zone de référence peut avoir pour effet de décaler la zone de symétrie. La forme de la courbe reste la même puisque les calculs sont faits sur toute la largeur de la fenêtre de caméra et non seulement la ZR (cf. ultérieurement).



**Image 24.** Modification de la ZR. L'élargissement de la ZR B par rapport à A a pour effet de translater vers les ordonnées négatives la courbe de dissymétrie (surface bleue)

**Zone d'intérêt (ZI) :** le choix de la ZI est déterminant puisqu'il conditionne l'amplitude des mesures. Nous avons initialement choisi comme ZI la zone de peau la plus large possible sans dépasser le thorax sur les côtés pour éviter des lignes de fuite aberrantes.

Ceci est très peu reproductible en pratique du fait de l'hétérogénéité des morphologies.

Exemple n°1 : une épaule plus basse que l'autre implique de diminuer la hauteur de la ZI sous l'épaule la plus basse.

Exemple n°2 : une asymétrie importante de la taille implique de diminuer la largeur de la ZI.

Les procidences des scapulas sont également un facteur de confusion car elles créent un relief qui n'est pas systématiquement corrélé à la gibbosité. De plus il est important de se rappeler qu'un scoliomètre de consultation fait 20 cm de large, donc 10 cm de part et d'autre de l'axe des épineuses, et que ces 10 cm suffisent à déterminer le sommet de la gibbosité. Nous avons donc opté pour une ZI la plus haute possible comprise entre les scapulas.

Chaque photo est associée à 3 fichiers :

- Un fichier (.raw) correspondant à la photographie (non utilisé)
- Un fichier (.gib) pour l'ensemble des données numériques traitables par le logiciel
- Un fichier texte correspondant aux données extraites chiffrées (distance, angle)

### 2.2.3.3. Trouver la valeur à comparer

L'objectif a été ensuite d'extraire une donnée chiffrée unique du tableau afin d'évaluer la corrélation de cette valeur avec la mesure radiographique de l'angle de Cobb et également de la comparer avec l'angle de rotation tronculaire (ATR) mesuré au scoliomètre.

Cette donnée se devait d'être reproductible d'une mesure à l'autre sur un même patient. Ce n'était ni le cas du l'angle maximal de gibbosité (qui approxime le sommet), ni celui d'une aire sur la courbe qui dépend forcément de l'aire de la ZI.

La courbe observée sur le graphique étant toujours de la même forme, il fallait pouvoir tenir compte de l'éventuelle translation de celle-ci de part et d'autre de l'axe de symétrie (**Image 24**).

La mesure la plus reproductible et représentative de la déformation choisie est l'amplitude entre la valeur négative minimale et la valeur positive maximale. C'est donc la somme en valeur absolue des 2 extrêmes de la courbe. On la nommera **GTA** pour global trunk asymmetry.

La GTA correspond cliniquement à l'angle de gibbosité maximal pour les simples courbures et la somme des 2 angles maximaux de gibbosité pour les doubles courbures. C'est une façon de rendre compte de l'asymétrie tronculaire dans son ensemble, en considérant la gibbosité thoracique mais aussi la gibbosité lombaire, généralement moins prononcée.

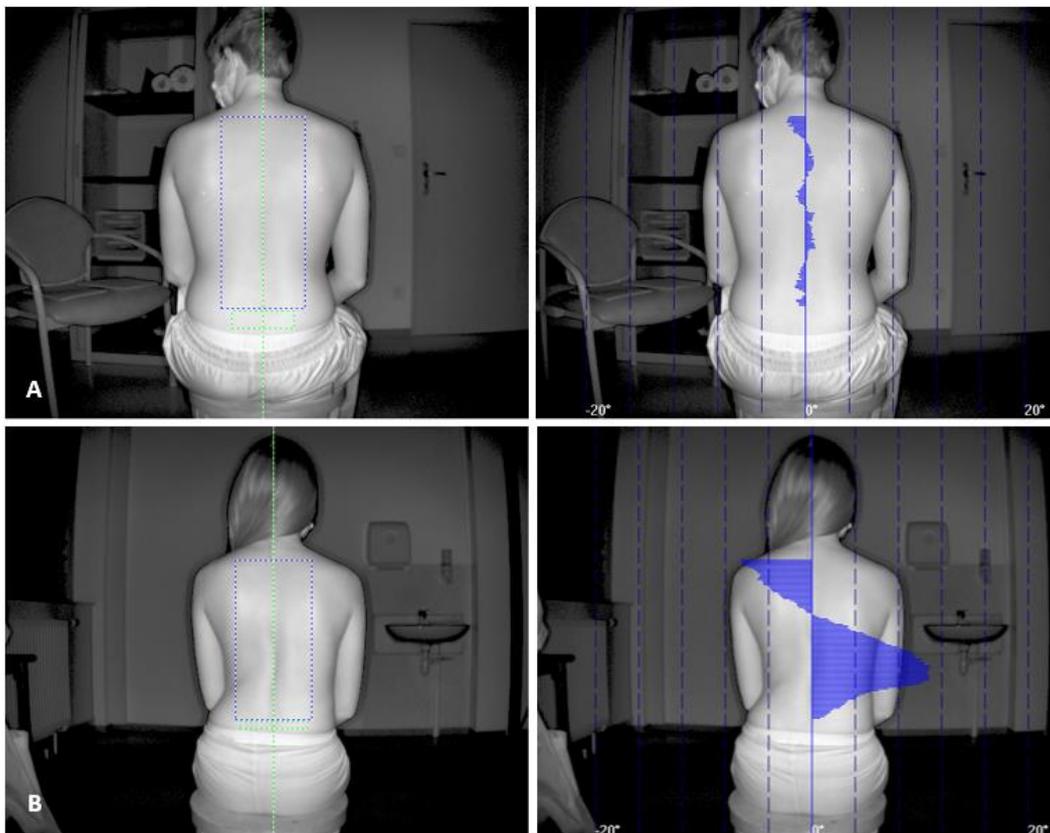


Image 25. Patient de 17 ans sans scoliose (A) Patiente de 24 ans présentant une scoliose thoraco-lombaire droite avec CA 35° (B). On remarque une gibbosité thoracique droite basse et une asymétrie thoracique gauche haute en lien avec la contre courbure.

### 2.3. Critère de jugement principal

L'angle de Cobb était mesuré en consultation par le médecin sénior sur une radiographie EOS du rachis entier, face et profil. Ce dernier était vérifié et comparé aux mesures automatiques réalisées par le logiciel EOS. Enfin l'intégralité des angles de Cobb a été vérifiée une troisième fois par moi-même. Le diagnostic était basé sur un angle de Cobb supérieur ou égal à 10 degrés [2,3], considéré comme le gold standard.

Le paramètre sélectionné pour l'analyse était la GTA, fourni par le logiciel TOF-Project. Enfin, l'ATR mesuré avec le scoliomètre a été utilisé pour comparer les performances diagnostiques de ce dernier.

Les patients ont été répartis en 5 catégories (tranches de 10°) :

- Cobb <10° : considérés comme le groupe contrôle
- Cobb [10-20[
- Cobb [20-30[
- Cobb [30-40[
- Cobb ≥40°

Les Cobb <10° sont considérés comme non scoliotiques et donc groupe contrôle.

Pour la suite des analyses ont été considérés les seuils 10 (diagnostic), 20 (traitement spécifique, médical et orthopédique) et 40 (traitement chirurgical).

### 2.4. Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R (version 4.2.2) et ses extensions (R Development Core Team, 2018). Les valeurs continues ont été rapportées sous forme de moyenne (écart-type) et les valeurs discontinues sous forme de n (%). La GTA évaluée par caméra TOF et la mesure de l'ATR par scoliomètre ont été utilisés comme critère de jugement principal.

Pour évaluer la validité de la GTA et de l'ATR par rapport au gold standard (radiographie), des coefficients de corrélation de Pearson ont été utilisés (avec leur p-value et intervalle de confiance de 95 %). Les critères d'interprétation de la corrélation ont été définis comme suit :  $r > 80\%$  corrélation forte,  $r$  entre 60% et 80% modérée,  $r$  entre 30% et 60% moyenne, et  $r < 30\%$  faible (51).

Deux courbes ROC ont été dressées :

1. une permettant de déterminer l'habileté de chacun des paramètres à diagnostiquer la SIA (angle de Cobb >10°).
2. la deuxième permettant de déterminer l'habileté de chacun des paramètres à diagnostiquer une SIA avec un angle de Cobb >20° (seuil d'intervention thérapeutique).

Les courbes ROC ont été tracées à l'aide du logiciel pROC, et l'aire sous la courbe (AUC) calculée avec un intervalle de confiance à 95 % (52).

Les caractéristiques de test (sensibilité et spécificité) et les aires sous la courbe (AUC) ont été reportées pour chacun des seuils, permettant d'obtenir le meilleur seuil en utilisant la méthode de Youden (53). Les seuils optimaux ont été choisis en maximisant le nombre de sujets correctement classés. Deux seuils supplémentaires entiers 7 et 8 (entourant les seuils optimaux théoriques) ont également été considérés.

Enfin les AUC de la GTA et de l'ATR ont été comparées en utilisant un Bootstrap test pour deux courbes ROC corrélées (roc.test fonction)(52).

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Patients

Table 1. Population description

Variable	Total (n=108)
Female, n (%)	70 (65%)
Mean age, yo (SD)	13.8 (3.3)
Age > 10 yo, n (%)	96 (89%)
Risser sign >1, n (%)	81 (75%)
Mean major Cobb angle, degrees (SD)	21.3 (14.6)
<b>Curve type</b>	
Main thoracic (MT), n (%)	28 (26%)
Thoraco-lumbar, n (%)	41 (38%)
Main lumbar (ML), n (%)	18 (17%)
Main thoracolumbar (TL), n (%)	23 (21%)
Double major curve (DM), n (%)	18 (17%)
Double thoracic (DT), n (%)	3 (3%)
No scoliosis curve (Cobb<10), n (%)	18 (17%)
Mean ATR, degrees (SD)	6.9 (4.0)
Mean GTA, degrees (SD)	8.9 (4.0)

*GTA is global trunk asymmetry, ATR is angle of trunk rotation, SD is standard deviation.*

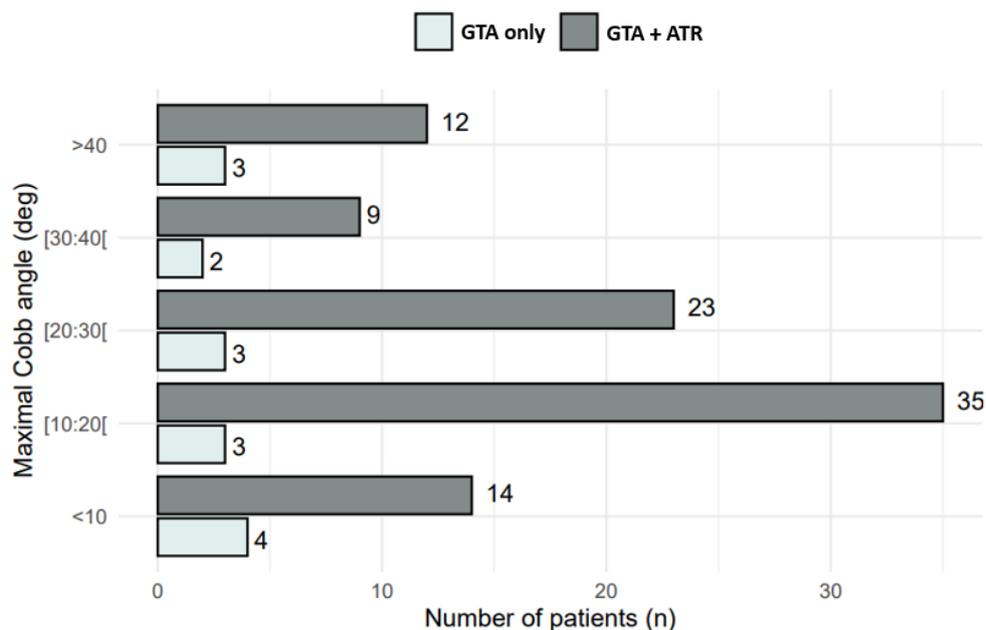
Les patients étaient âgés de 5 à 24 ans, avec une médiane de 14 ans (moyenne 13,9 ans) et étaient majoritairement des femmes : 64% (70F 49H). Quatre-vingt-quatorze des 108 patients (87%) avaient entre 10 et 17 ans, ce qui est en accord avec la population des SIA à dépister. Parmi les 108 patients évalués, 90 (83%) présentaient une scoliose sur la base d'un angle de Cobb mesuré par radiographie  $\geq 10^\circ$ . Par conséquent, 18 des 108 patients ne présentaient pas de scoliose et ont donc été considérés comme notre population contrôle.

En raison des courbures inférieures à  $25^\circ$  et de l'absence de radiographie dynamique de type bending, nous n'avons pas pu classer les patients selon la classification de Lenke (5).

Nous avons considéré 4 types de courbes, reprenant la classification de l'étude épidémiologique de Konieczny et al. en 2013 (19). Trente-et-un patients présentaient une courbure principale thoracique (25 droite, 3 gauche), 3 patients présentaient une double scoliose thoracique. Dix-huit patients avaient une courbure principale lombaire (4 droite, 14 gauche), et 18 une double courbure majeure (12 avec une CA thoracique supérieure à la CA lombaire, et 6 avec l'inverse). Enfin, 23 patients avaient une courbure principale thoraco-lombaire (13 à droite, 10 à gauche). Selon Konieczny, les courbures thoraciques sont les plus fréquentes (48 %), suivies des courbes thoraco-lombaires/lombaires (40 %). Les doubles courbures thoraciques et lombaires (9 %) et les doubles courbures thoraciques (3 %) sont moins fréquentes. 80 % de tous les enfants ont des courbes thoraciques ou thoraco-lombaires/lombaires, pour 77% dans notre étude.

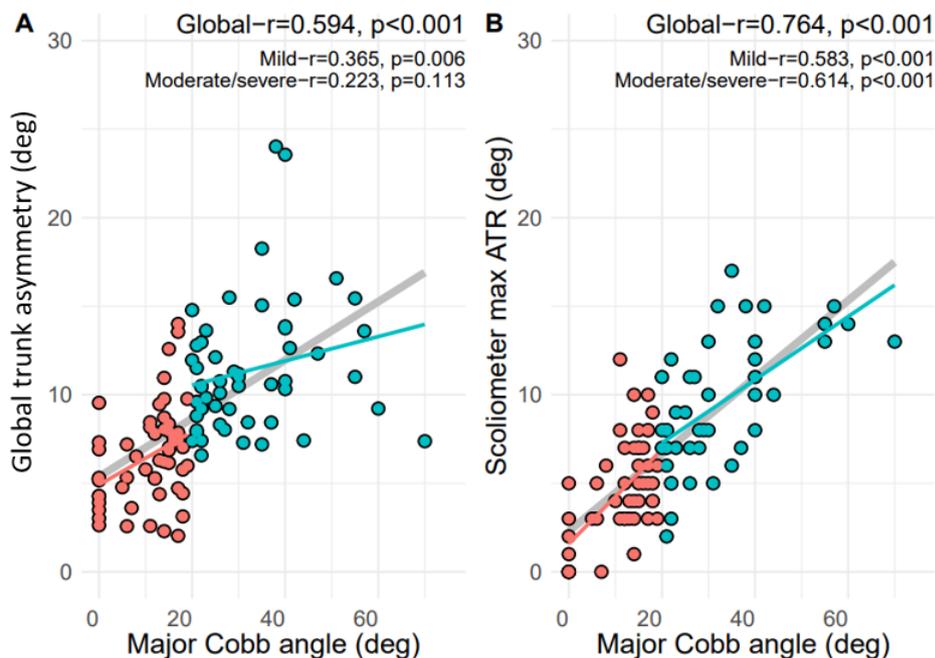
Notre population ne semble pas fortement différer de la population scoliotique idiopathique globale.

**Figure 1.** Cobb angle distribution in the studied population. *GTA* is global trunk asymmetry, *ATR* is angle of trunk rotation, *deg* is degrees.



Comme décrit dans la **figure 1**, 108 patients ont été photographiés par caméra TOF. Malheureusement, 15 de ces 108 patients avaient des données manquantes concernant l'ATR mesurée avec le scoliomètre (examen non réalisé, problème d'identitovigilance). Au total, 93 patients ayant bénéficié des 2 examens, ont pu être comparés (AUC).

### 3.2. Validité



**Figure 2:** Correlation between radiographic evaluation of major Cobb angle (gold standard) and: A) Global trunk asymmetry using TOF camera, B) Maximal angle of trunk rotation (ATR) using scoliometer. *r* is Pearson correlation coefficient; mild curves are defined with Cobb angle  $<20^\circ$ , moderate/severe curves are defined with Cobb angle  $\geq 20^\circ$ .

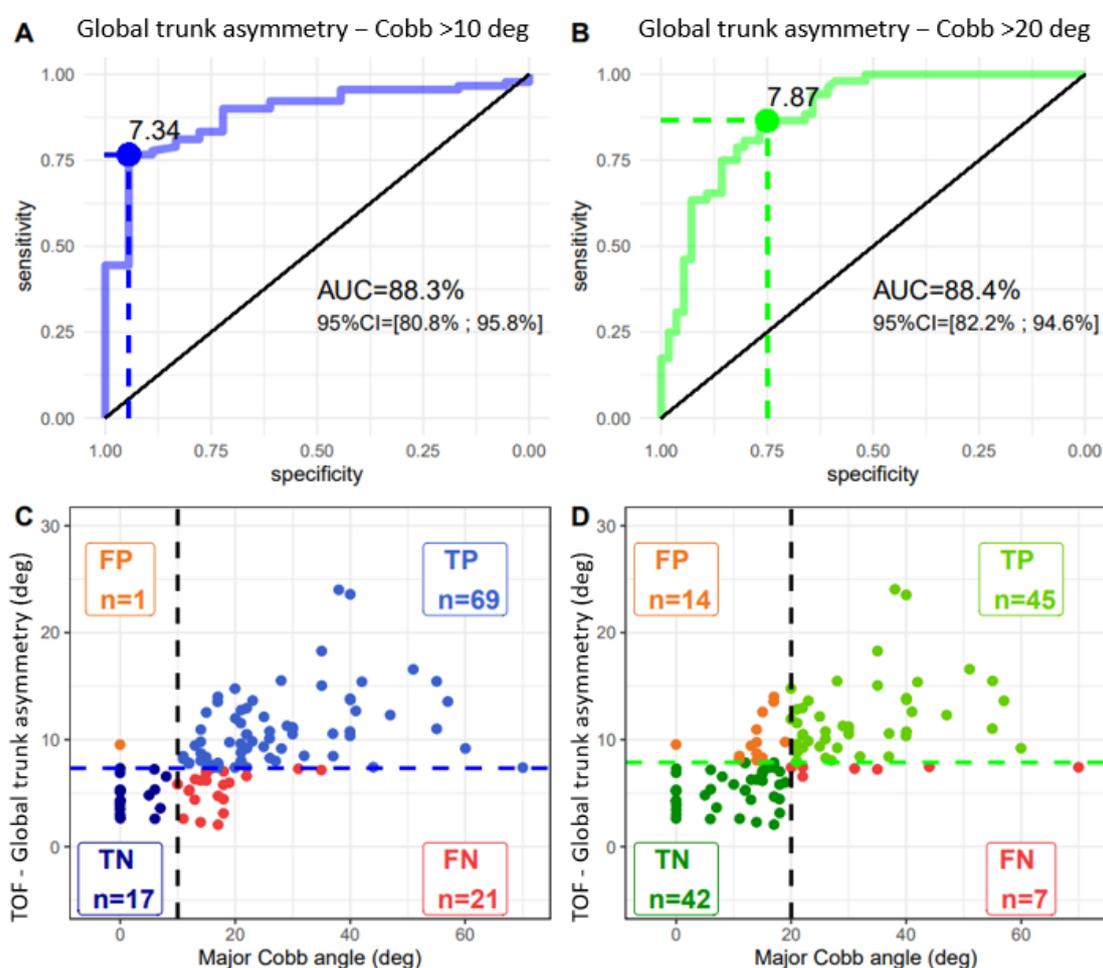
Comme le montre la **figure 2**, les coefficients de corrélation de Pearson de la GTA (vis-à-vis de l'angle de Cobb mesuré à la radiographie) et de l'ATR étaient respectivement 0,594 et 0,764, suggérant une corrélation modérée. En considérant seulement la GTA, ce coefficient tombe à 0,365 pour les moyennes courbures (CA compris entre 10 et 20°), et même à 0,223 pour les courbures >20° mais de façon non significative.

### 3.3. Meilleur seuil et aire sous la courbe

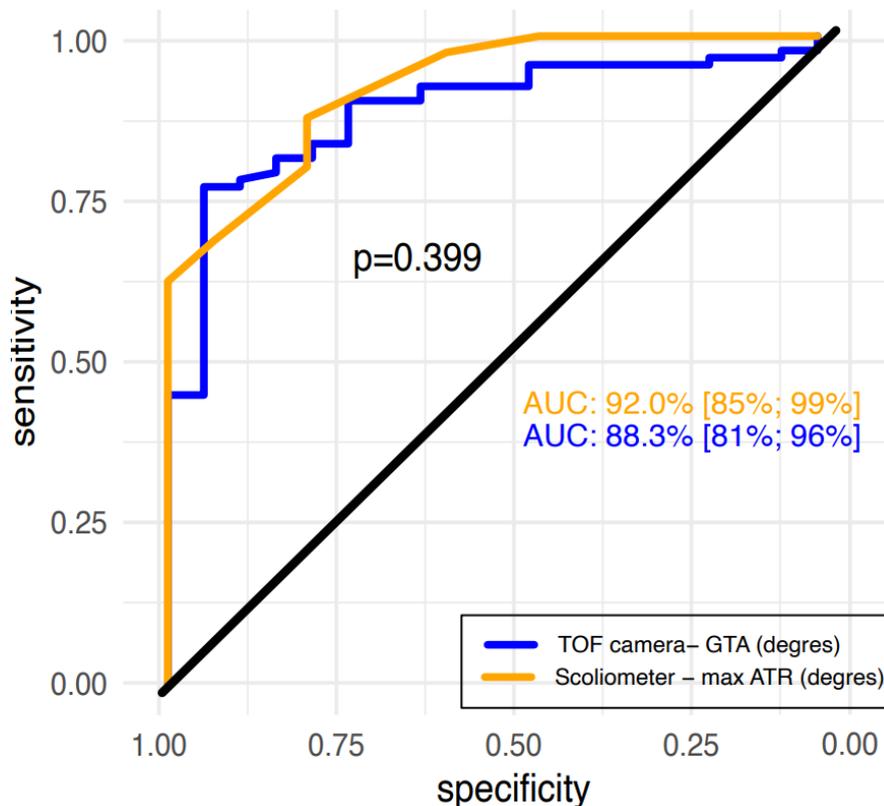
D'après la **figure 3 et 4**, les aires sous la courbe étaient :

- 0,88 (95%IC=0,81-0,96) pour la GTA (diagnostic de scoliose (CA $\geq$ 10°))
- 0,92 (95%IC=0,85-0,99) pour l'ATR (diagnostic de scoliose (CA $\geq$ 10°))
- 0,88 ((95%IC=0,82-0,95) pour la GTA (seuil de traitement (CA $\geq$ 20°))
- L'AUC de l'ATR pour la détection d'un CA $\geq$ 20° n'a pas été calculée.

La différence entre les deux AUC (figure 4) n'était pas statistiquement significative (p=0,399).



**Figure 3:** The first line illustrated the area under curve (AUC) statistic from receiver operating characteristic (ROC) curves with the associated best cut-off point (Youden method) of the global trunk asymmetry using TOF camera. The second line the test characteristics of the best cut-off point for: (A, C) idiopathic scoliosis diagnosis defined with Cobb angle $\geq$ 10° (X-Ray), (B, D) brace indication defined with Cobb angle  $\geq$ 20° (X-Ray). *deg* is degrees; *95%CI* is the corresponding 95% confidence interval; *FP* is false positive; *TP* is true positive; *TN* is true negative; *FN* is false negative.



**Figure 4:** Area under curve (AUC) statistic from receiver operating characteristic (ROC) curves comparison between global trunk asymmetry using TOF camera, and maximal angle of trunk rotation (ATR) using scoliometer for idiopathic scoliosis diagnosis defined with Cobb angle  $\geq 10^\circ$  (X-Ray). Significant differences between AUC were considered at  $p < 0.05$ . AUC are reported with the respective 95% confidence interval.

### 3.4. Caractéristiques de test

Si on considère le diagnostic de scoliose ( $CA \geq 10^\circ$ ), la sensibilité et la spécificité de la GTA avec le seuil 7,34 (meilleur seuil selon Youden) étaient respectivement de 77% (67%-85%) et 94% (73%-100%) (**Tableau 2**).

La sensibilité et la spécificité de la GTA avec le seuil 7 étaient respectivement de 81% (71% ; 89%) et 83% (59% ; 96%). Pour le seuil 8, elles étaient respectivement de 61% (50% ; 71%) et 94% (73% ; 100%).

En considérant le  $CA \geq 20^\circ$ , comme cut-off de traitement orthopédique, la sensibilité et la spécificité de la GTA avec le seuil 7,87 (meilleur seuil de Youden) étaient respectivement de 87% (74%-95%) et 75% (62%-86%). La sensibilité et la spécificité de la GTA avec le seuil 7 étaient respectivement de 98% (90% ; 100%) et 55% (41% ; 69%). Avec le seuil 8, elles étaient respectivement de 83% (70% ; 92%) et 77% (64% ; 87%).

**Table 2** Diagnostic accuracy results of the angle evaluated with TOF to classify curves as idiopathic scoliosis ( $Cobb \geq 10$ ) and mild idiopathic scoliosis ( $Cobb < 20$ ) for 108 patients.

Variable	Scoliosis diagnosis		Brace indication	
	Radiograph		Radiograph	
	Cobb $\geq 10$ (+)	Cobb $< 10$ (-)	Cobb $\geq 20$ (+)	Cobb $< 20$ (-)
<b>GTA &lt; 7</b>	Se= <b>81%</b> (71%; 89%) Sp= <b>83%</b> (59%; 96%)		Se=98% (90%; 100%) Sp=55% (41%; 69%)	
+	73	3	51	25
-	17	15	1	31
<b>Youden threshold</b>	Se=77% (67%; 85%) Sp=94% (73%; 100%)		Se= <b>87%</b> (74%; 94%) Sp= <b>75%</b> (62%; 86%)	
+	69	1	45	14
-	21	17	7	42
<b>GTA &lt; 8</b>	Se=61% (50%; 71%) Sp=94% (73%; 100%)		Se=83% (70%; 92%) Sp=77% (64%; 87%)	
+	55	1	43	13
-	35	17	9	43

*GTA threshold was set at 7.3 degrees for scoliosis diagnosis ( $Cobb \geq 10$ ) and 7.8 degrees for brace indication ( $Cobb \geq 20$ ) using the Youden method [32], and 7 degrees, 8 degrees to compare. ‘+’ and ‘-’ signifies that the value is either superior or inferior to the respective threshold. GTA is global trunk angle, CI is confidence interval. Sensitivity (Se) and specificity (Sp) are presented with the respective 95% confidence interval for each threshold.*

#### 4. DISCUSSION

L'une des forces de notre étude réside dans la taille de l'échantillon, malgré qu'il s'agisse d'un travail préliminaire avec une nouvelle technologie. Nous avons inclus 108 patients dont 50 sont âgés de 10 à 14 ans et 44 de 15 à 17 ans. Ces nombres sont représentatifs respectivement de la population ciblée par les tests de dépistage en milieu scolaire (54) et de la population scoliotique nécessitant un suivi régulier en consultation. Cette étude comporte également un nombre important de patients sains (18 sur 108, 17%) ayant bénéficié de l'examen de référence par radiographie. Ce nombre important de contrôle pour l'effectif global de l'étude nous a permis de calculer les caractéristiques intrinsèques du test.

La plupart des publications n'ont pas ou peu de patients asymptomatiques pour définir de façon significative des caractéristiques de test de dépistage de la scoliose (34).

Nous devons garder à l'esprit que nous sommes un centre de référence tertiaire et que les patients de cette étude sont initialement adressés pour suspicion d'AIS par des pédiatres, des médecins généralistes, des médecins scolaires ou des infirmières. Cette population « déjà adressée » n'est par conséquent pas représentative de la population générale « à dépister ». C'est cet inconvénient, inhérent au design de l'étude, et donc assumé à la base, qui nous empêche de calculer les valeurs prédictives (positives et négatives), caractéristiques indispensables à un bon test de dépistage.

La corrélation entre la GTA et l'angle de Cobb maximal a été analysée en premier lieu, comme prérequis pour les analyses suivantes (**Figure 1**). Le coefficient de Pearson ( $r$ ) global était de 0,594 ( $p < 0,001$ ), que l'on peut considérer associé à une corrélation modérée. Ce même coefficient pour l'ATR était quant à lui plus élevé ( $r = 0,764$  ;  $p < 0,001$ ). Si l'on considère les coefficients par tranche de sévérité de la scoliose, les résultats semblent moins bons. Pour les courbes moyennes ( $CA_{10-20^\circ}$ ) et modérées/sévères ( $CA > 20^\circ$ ), le coefficient de corrélation était respectivement de 0,365 ( $p = 0,006$ ) et 0,223 ( $p = 0,223$ ). Des hypothèses peuvent être émises pour expliquer ces moins bonnes corrélations, parmi lesquelles une dispersion importante pour les petits angles de Cobb, et un nombre important de Cobb proches du seuil diagnostique de 10 (faux positifs/faux négatifs), et le nombre conséquent de courbures sévères.

Le nombre de courbures sévères est intéressant à considérer dans notre échantillon. Quinze patients sur 108 avaient un  $CA > 40^\circ$ . Cette population n'est plus à proprement « à dépister » tant les manifestations/déformations sont visibles à l'œil nu à partir d'un certain degré de Cobb. Ces patients représentent néanmoins une part importante de la population qui pourrait bénéficier d'une nouvelle technologie de suivi non irradiant. L'identification du caractère non évolutif, ou au contraire du dépassement du stade chirurgical est un enjeu majeur pour ces patients dont la valeur de Cobb approche les  $40^\circ$ . Pour ces raisons, nous avons décidé de ne pas exclure les courbures sévères, malgré leur potentiel effet dispersion.

Il est également important d'aborder en discussion le nombre non négligeable de faux négatifs car il représente un préjudice potentiel pour les patients. Si un patient est classé non scoliotique avec une GTA inférieure au seuil, l'absence de réalisation de radiographie pourrait conduire à une insuffisance de traitement. Le nombre de faux négatifs peut être dû au nombre important de CA compris entre 9 et 11, dont les patients malades ou non malades pourraient facilement être placés dans l'une ou l'autre de ces catégories. Un différentiel de 1 ou 2 degrés d'angle de Cobb ne se traduit pas nécessairement par une modification visible sur la déformation corporelle. On peut facilement imaginer la mise en défaut de la caméra TOF ou tout autre outil de topographie de surface, pour des variations infimes de degrés.

En plus de ce qui pourrait s'apparenter à une insuffisance de précision de la machine, on peut y ajouter l'erreur de l'opérateur associée à la mesure du CA sur les radiographies.

D'après le **tableau 2**, la précision diagnostique semble également importante à considérer. La GTA avec un seuil de 7 semble offrir de meilleures caractéristiques de dépistage (Se 81%, Sp 83%), qu'avec le meilleur seuil de Youden 7,34 (Se 77%, Sp 94%) pour le diagnostic de scoliose car la sensibilité est supérieure. En revanche si l'on considère un  $CA > 20$  comme seuil d'indication au traitement orthopédique, le seuil de Youden 7,87 semble être meilleur puisque la spécificité chute à 55% pour le seuil 7.

On remarque en outre que les seuils 7, 7,34, 7,87 et même 8 sont très proches les uns des autres, et que des différences significatives dans la précision du diagnostic semblent apparaître pour des différences étroites de valeur de GTA.

Les photographies par caméra TOF sont prises en quelques secondes et nécessitent très peu de réglages préalables. L'opérateur doit s'assurer que le patient respecte toutes les règles de positionnement et appuyer sur un bouton pour déclencher l'acquisition. On peut aisément imaginer attribuer cette tâche à un membre paramédical ou non médical de l'équipe de dépistage. Cependant, pour obtenir la GTA, la photographie doit être analysée par le logiciel, ce qui impose à l'opérateur de placer manuellement trois zones. Dans notre étude, un seul opérateur a réalisé cette étape en aveugle pour les 108 patients. Le placement de l'axe de symétrie, de la zone de référence et de la zone d'intérêt peut différer d'un opérateur à l'autre ou entre deux mesures de la même photographie à intervalle différent par le même opérateur.

A l'avenir, les résultats de variabilité intra-investigateur et inter-investigateur pour le positionnement de ces zones devront être étudiés. Ils permettront de se pencher sur l'effet de variation de seuil sur la précision diagnostique.

Il faut compter parmi les limites de l'étude, les facteurs pouvant influencer les mesures de surface et inhérents à tout outil de topographie de surface. En effet, pour protéger la vie privée du sujet et par pudeur, la région sacro-coccygienne est souvent couverte par des vêtements pendant l'examen et peut ne pas être entièrement exposée. Ceci peut affecter le choix de la zone d'intérêt ou de la zone de référence par l'opérateur. Pour de futures études, on peut imaginer insister sur la nécessité de baisser au maximum les sous-vêtements avant le positionnement sur le tabouret.

Un des points forts de cette étude est la comparaison avec l'outil clinique le plus couramment utilisé, le scoliomètre, même si elle n'a pas été construite autour de cette comparaison. Quarante-treize personnes sur 108 ont bénéficié de mesures de l'ATR et de la GTA. L'aire sous la courbe de la GTA et de l'ATR étaient très bonnes (0,88 et 0,92) pour le diagnostic de la scoliose et n'était pas significativement différentes ( $p=0,399$ ) (**Figure 4**). Il s'agit d'un résultat satisfaisant et prometteur pour la caméra TOF puisque les caractéristiques diagnostiques du scoliomètre dans notre étude semblent correspondre à celles de la littérature (31). Il est important de considérer qu'il s'agit de deux outils différents, rendant la comparaison principalement informative. L'ATR du scoliomètre est mesurée patient penché en avant, dans une position connue pour exacerber la gibbosité. La caméra TOF, quant à elle, évalue la surface dorsale d'un patient assis, dans une position plus naturelle mais réduisant la gibbosité. Pour une comparaison technique plus pertinente, il faudrait envisager une étude dans laquelle la photographie serait prise au cours d'une épreuve d'antéflexion (FBT), avec la caméra TOF en hauteur et pointant verticalement vers le sol. Cependant, nous pensons que cela pourrait nuire à la reproductibilité des mesures. Il pourrait également être plus difficile d'établir une zone de référence telle que la région lombosacrée ou sacro-coccygienne.

Dans cette étude, l'index de masse corporelle n'a pas été pris en compte au moment de l'inclusion. Il s'agit certainement d'une limitation car la précision des mesures est plus faible chez les patients obèses ou chez les patients présentant des surfaces musculaires asymétriques (55). Il a récemment été montré que le test scoliomètre/FBT peut être mis en défaut par un IMC élevé. Margalit et al. ont constaté une meilleure sensibilité du scoliomètre pour un ATR de 7° chez les patients normaux, contre 5° chez les patients obèses. Cela suggère qu'un IMC élevé aurait tendance à masquer les courbures, et que les patients obèses devraient être orientés vers une consultation spécialisée à partir d'un ATR plus faible (33). Les futures études évaluant le pouvoir de dépistage de la caméra TOF devront prendre en compte l'IMC.

Enfin, nous devons garder à l'esprit que les patients et leurs familles sont probablement plus préoccupés par l'amélioration de la forme extérieure et de l'esthétique de leur corps que par leur angle de Cobb radiologique. Il est maintenant communément établi que l'objectif de tout chirurgien du rachis est de traiter les patients en fonction de leurs besoins, les questions esthétiques devant être la raison principale du traitement de la scoliose (56). Déjà en 1976, Thulbourne et al. ne trouvaient pas de corrélation linéaire claire entre la déformation des côtes et l'angle de Cobb (57). Pour les questions esthétiques, l'épaule, l'omoplate, la taille ou les seins doivent être pris en compte (58), et il apparaît maintenant que leur asymétrie est certainement mieux évaluée par les techniques de topographie de surface telle que la caméra TOF, qu'aux moyens des paramètres radiologiques traditionnels (CA, cyphose thoracique).

## 5. CONCLUSION

En raison de leur caractère non irradiant et non invasif, les techniques de topographie de surface ont un grand potentiel et des applications prometteuses dans l'évaluation de la scoliose. Parmi ces techniques, nous pensons que la caméra TOF peut occuper une place importante. Il s'agit d'un appareil peu coûteux, léger, compact et facile à transporter. Elle ne nécessite pas d'installation complexe et permet une acquisition d'images facile et rapide, ce qui la rend intéressante pour une utilisation de routine.

La caméra TOF semble offrir des caractéristiques intéressantes pour l'analyse de la scoliose, et devra faire l'objet d'études plus approfondies pour en faire un outil de dépistage fiable.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Perdriolle R, Vidal J. Morphology of scoliosis: three-dimensional evolution. *Orthopedics*. juin 1987;10(6):909-15.
2. Richards BS, Vitale MG. Screening for idiopathic scoliosis in adolescents. An information statement. *J Bone Joint Surg Am*. janv 2008;90(1):195-8.
3. James JJ. Idiopathic scoliosis; the prognosis, diagnosis, and operative indications related to curve patterns and the age at onset. *J Bone Joint Surg Br*. févr 1954;36-B(1):36-49.
4. Dobbs MB, Weinstein SL. Infantile and juvenile scoliosis. *Orthop Clin North Am*. juill 1999;30(3):331-41, vii.
5. Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am*. août 2001;83(8):1169-81.
6. Vialle R, Thévenin-Lemoine C, Mary P. Neuromuscular scoliosis. *Orthop Traumatol Surg Res OTSR*. févr 2013;99(1 Suppl):S124-139.
7. Masson E. EM-Consulte. [cité 23 août 2023]. Scolioses secondaires. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/8390/scolioses-secondaires>
8. Winter RB. Congenital scoliosis. *Orthop Clin North Am*. avr 1988;19(2):395-408.
9. Pehrsson K, Bake B, Larsson S, Nachemson A. Lung function in adult idiopathic scoliosis: a 20 year follow up. *Thorax*. juill 1991;46(7):474-8.
10. Li X, Guo H, Chen C, Tan H, Lin Y, Li Z, et al. Does Scoliosis Affect Sleep Breathing? *World Neurosurg*. oct 2018;118:e946-50.
11. Kovacs FM, Gestoso M, Gil Del Real MT, López J, Mufraggi N, Ignacio Méndez J. Risk factors for non-specific low back pain in schoolchildren and their parents: a population based study. *Pain*. juin 2003;103(3):259-68.
12. Danielsson AJ, Wiklund I, Pehrsson K, Nachemson AL. Health-related quality of life in patients with adolescent idiopathic scoliosis: a matched follow-up at least 20 years after treatment with brace or surgery. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. août 2001;10(4):278-88.
13. Schwab FJ, Smith VA, Biserni M, Gamez L, Farcy JPC, Pagala M. Adult scoliosis: a quantitative radiographic and clinical analysis. *Spine*. 15 févr 2002;27(4):387-92.
14. Hoeffel C, Gaucher H, Hoeffel JC, Galloy MA, Arnould V. Painful scoliosis. *Klin Padiatr*. 1997;209(2):78-83.
15. Menger RP, Sin AH. Adolescent and Idiopathic Scoliosis. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [cité 23 août 2023]. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499908/>
16. Histoire de la Scoliose [Internet]. [cité 23 août 2023]. Disponible sur: <https://www.demauroy.net/Histoire%20Scoliose.htm>
17. El-Hawary R, Chukwunyeremwa C. Update on evaluation and treatment of scoliosis. *Pediatr Clin North Am*. déc 2014;61(6):1223-41.
18. Lonner BS, Ren Y, Yaszay B, Cahill PJ, Shah SA, Betz RR, et al. Evolution of Surgery for Adolescent Idiopathic Scoliosis Over 20 Years: Have Outcomes Improved? *Spine*. 15 mars 2018;43(6):402-10.
19. Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop*. févr 2013;7(1):3-9.
20. Torell G, Nordwall A, Nachemson A. The changing pattern of scoliosis treatment due to effective screening. *J Bone Joint Surg Am*. mars 1981;63(3):337-41.
21. Ashworth MA, Hancock JA, Ashworth L, Tessier KA. Scoliosis screening. An approach to cost/benefit analysis. *Spine*. oct 1988;13(10):1187-8.
22. Montgomery F, Willner S. Screening for idiopathic scoliosis. Comparison of 90 cases shows less surgery by early diagnosis. *Acta Orthop Scand*. août 1993;64(4):456-8.
23. Tsirikos AI, Roberts SB, Bhatti E. Incidence of spinal deformity surgery in a national health service from 2005 to 2018: an analysis of 2,205 children and adolescents. *Bone Jt Open*. mars 2020;1(3):19-28.

24. Grivas TB, Wade MH, Negrini S, O'Brien JP, Maruyama T, Hawes MC, et al. SOSORT consensus paper: school screening for scoliosis. Where are we today? *Scoliosis*. 26 nov 2007;2:17.
25. Thilagaratnam S. School-based screening for scoliosis: is it cost-effective? *Singapore Med J*. nov 2007;48(11):1012-7.
26. World Health Organization. Regional Office for Europe. Screening programmes: a short guide. Increase effectiveness, maximize benefits and minimize harm [Internet]. World Health Organization. Regional Office for Europe; 2020 [cité 23 août 2023]. 58 p. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/330829>
27. Płaszewski M, Grantham W, Jespersen E. Screening for scoliosis - New recommendations, old dilemmas, no straight solutions. *World J Orthop*. 18 sept 2020;11(9):364-79.
28. Kleinerman RA. Cancer risks following diagnostic and therapeutic radiation exposure in children. *Pediatr Radiol*. sept 2006;36 Suppl 2(Suppl 2):121-5.
29. Don S. Radiosensitivity of children: potential for overexposure in CR and DR and magnitude of doses in ordinary radiographic examinations. *Pediatr Radiol*. oct 2004;34 Suppl 3:S167-172; discussion S234-241.
30. Illés T, Somoskeöy S. The EOS™ imaging system and its uses in daily orthopaedic practice. *Int Orthop*. juill 2012;36(7):1325-31.
31. McKenna C, Wade R, Faria R, Yang H, Stirk L, Gummerson N, et al. EOS 2D/3D X-ray imaging system: a systematic review and economic evaluation. *Health Technol Assess Winch Engl*. 2012;16(14):1-188.
32. Côté P, Kreitz BG, Cassidy JD, Dzus AK, Martel J. A study of the diagnostic accuracy and reliability of the Scoliometer and Adam's forward bend test. *Spine*. 1 avr 1998;23(7):796-802; discussion 803.
33. Margalit A, McKean G, Constantine A, Thompson CB, Lee RJ, Sponseller PD. Body Mass Hides the Curve: Thoracic Scoliometer Readings Vary by Body Mass Index Value. *J Pediatr Orthop*. juin 2017;37(4):e255-60.
34. Fong DYT, Lee CF, Cheung KMC, Cheng JCY, Ng BKW, Lam TP, et al. A meta-analysis of the clinical effectiveness of school scoliosis screening. *Spine*. 1 mai 2010;35(10):1061-71.
35. Hierholzer E, Hackenberg L. Three-dimensional shape analysis of the scoliotic spine using MR tomography and rasterstereography. *Stud Health Technol Inform*. 2002;91:184-9.
36. Betsch M, Wild M, Jungbluth P, Hakimi M, Windolf J, Haex B, et al. Reliability and validity of 4D rasterstereography under dynamic conditions. *Comput Biol Med*. juin 2011;41(6):308-12.
37. Krott NL, Wild M, Betsch M. Meta-analysis of the validity and reliability of rasterstereographic measurements of spinal posture. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. sept 2020;29(9):2392-401.
38. Chowanska J, Kotwicki T, Rosadzinski K, Sliwinski Z. School screening for scoliosis: can surface topography replace examination with scoliometer? *Scoliosis*. 3 avr 2012;7(1):9.
39. Adam CJ, Izatt MT, Harvey JR, Askin GN. Variability in Cobb angle measurements using reformatted computerized tomography scans. *Spine*. 15 juill 2005;30(14):1664-9.
40. Xiao B, Zhang Y, Yan K, Jiang J, Ma C, Xing Y, et al. Where should Scoliometer and EOS Imaging be Applied when Evaluating Spinal Rotation in Adolescent Idiopathic Scoliosis -A Preliminary Study with Reference to CT Images. *Glob Spine J*. 5 août 2022;21925682221116824.
41. Jiang W, Chen X, Yu C. A real-time freehand 3D ultrasound imaging method for scoliosis assessment. *J Appl Clin Med Phys*. août 2022;23(8):e13709.
42. Lai KKL, Lee TTY, Lee MKS, Hui JCH, Zheng YP. Validation of Scolioscan Air-Portable Radiation-Free Three-Dimensional Ultrasound Imaging Assessment System for Scoliosis. *Sensors*. 19 avr 2021;21(8):2858.
43. Su X, Dong R, Wen Z, Liu Y. Reliability and Validity of Scoliosis Measurements Obtained with Surface Topography Techniques: A Systematic Review. *J Clin Med*. 26 nov 2022;11(23):6998.
44. Bagó J, Carrera L, March B, Villanueva C. Four radiological measures to estimate shoulder balance in scoliosis. *J Pediatr Orthop Part B*. 1996;5(1):31-4.
45. Qiu X sheng, Ma W wei, Li W guo, Wang B, Yu Y, Zhu Z zhang, et al. Discrepancy between radiographic shoulder balance and cosmetic shoulder balance in adolescent idiopathic scoliosis

- patients with double thoracic curve. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* janv 2009;18(1):45-51.
46. Akel I, Pekmezci M, Hayran M, Genc Y, Kocak O, Derman O, et al. Evaluation of shoulder balance in the normal adolescent population and its correlation with radiological parameters. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc.* mars 2008;17(3):348-54.
  47. Kuklo TR, Lenke LG, Graham EJ, Won DS, Sweet FA, Blanke KM, et al. Correlation of radiographic, clinical, and patient assessment of shoulder balance following fusion versus nonfusion of the proximal thoracic curve in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine.* 15 sept 2002;27(18):2013-20.
  48. Gilles M, Fayad H, Miglierini P, Clement JF, Scheib S, Cozzi L, et al. Patient positioning in radiotherapy based on surface imaging using time of flight cameras. *Med Phys.* août 2016;43(8):4833.
  49. Sharp C, Soleimani V, Hannuna S, Camplani M, Damen D, Viner J, et al. Toward Respiratory Assessment Using Depth Measurements from a Time-of-Flight Sensor. *Front Physiol.* 2017;8:65.
  50. Chen S, He Y, Qiu H, Yan X, Zhao M. Spatial Localization of EEG Electrodes in a TOF+CCD Camera System. *Front Neuroinformatics.* 2019;13:21.
  51. Akoglu H. User's guide to correlation coefficients. *Turk J Emerg Med.* sept 2018;18(3):91-3.
  52. Robin X, Turck N, Hainard A, Tiberti N, Lisacek F, Sanchez JC, et al. pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. *BMC Bioinformatics.* 17 mars 2011;12:77.
  53. Youden WJ. Index for rating diagnostic tests. *Cancer.* janv 1950;3(1):32-5.
  54. Riseborough EJ, Wynne-Davies R. A genetic survey of idiopathic scoliosis in Boston, Massachusetts. *J Bone Joint Surg Am.* juill 1973;55(5):974-82.
  55. Asamoah V, Mellerowicz H, Venus J, Klöckner C. [Measuring the surface of the back. Value in diagnosis of spinal diseases]. *Orthopade.* juin 2000;29(6):480-9.
  56. Negrini S, Grivas TB, Kotwicki T, Maruyama T, Rigo M, Weiss HR, et al. Why do we treat adolescent idiopathic scoliosis? What we want to obtain and to avoid for our patients. SOSORT 2005 Consensus paper. *Scoliosis.* 10 avr 2006;1:4.
  57. Thulbourne T, Gillespie R. The rib hump in idiopathic scoliosis. Measurement, analysis and response to treatment. *J Bone Joint Surg Br.* févr 1976;58(1):64-71.
  58. Zaina F, Negrini S, Atanasio S. TRACE (Trunk Aesthetic Clinical Evaluation), a routine clinical tool to evaluate aesthetics in scoliosis patients: development from the Aesthetic Index (AI) and repeatability. *Scoliosis.* 20 janv 2009;4:3.

## REFERENCE DE L'IMAGERIE

1. Michel Guillaumat. Scoliose idiopathique de l'enfant et de l'adulte jeune. Revue du Rhumatisme 71 (2004) 145–159
2. Lenke LG. Lenke classification system of adolescent idiopathic scoliosis: treatment recommendations. Instr Course Lect. 2005;54:537-42
3. <https://sante.orthodz.com/2017/09/28/6-signes-cliniques-pour-reconnaitre-une-scoliose/>
4. <https://www.clinique-du-dos-bordeaux.fr/fra/les-pathologies/39-scoliose>
5. <https://www.demauroy.net/Histoire%20Scoliose.htm>
6. Radiographie post-opératoire fournie avec l'aimable autorisation du Pr Brice ILHARREBORDE
7. Radiographie post-opératoire fournie avec l'aimable autorisation du Pr Brice ILHARREBORDE
8. <https://www.eos-imaging.com/fr>
9. <https://www.mizuhosi.com/>
10. Angela L Kuznia, Anita K Hernandez, Lydia U Lee. Adolescent idiopathic scoliosis : common questions and answers. Am Fam Physician. 2020 Jan 1 ;101(1) :19-23  
Illustration by Jennifer Fairman
11. Angela L Kuznia, Anita K Hernandez, Lydia U Lee. Adolescent idiopathic scoliosis : common questions and answers. Am Fam Physician. 2020 Jan 1 ;101(1) :19-23  
Illustration by Renee L. Cannon
12. Hierholzer E, Drerup B. Vermessung der Wirbelsäule mittels Rasterstereografie. In: Neugebauer H, editor. Medizinisches Jahrbuch: Was gibt es Neues in der Medizin? Vienna: Verlag Dr. Peter Müller; 1996. pp. 171–184.
13. <https://www.digikey.fr//media/Images/Article%20Library/TechZone%20Articles/2016/May/Use%20Infrared%20Time%20of%20Flight%20Imaging%20to%20Enhance%20Robotic%20Capabilities/article-2016may-use-infrared-time-fig5.jpg?la=en&ts=c7a09dac-d577-44cc-bfd5-0b072edcfd8e>
14. <https://i.ytimg.com/vi/bsA6RKUUA3M/hqdefault.jpg>
15. Sharp C et al. Toward respiratory assessment using depth measurements from a Time-of-Flight sensor. Front Physiol 2017 Feb 7;8:65.
16. Photographie réalisée dans le cadre de l'étude
17. Photographie réalisée dans le cadre de l'étude
18. Photographie réalisée dans le cadre de l'étude
19. Schéma du principe de mesure d'un angle de gibbosité par caméra TOF (réalisé dans le cadre de l'étude)
20. Capture d'écran réalisée dans le cadre de l'étude
21. Capture d'écran réalisée dans le cadre de l'étude
22. Capture d'écran réalisée dans le cadre de l'étude
23. Capture d'écran réalisée dans le cadre de l'étude
24. Capture d'écran réalisée dans le cadre de l'étude
25. Capture d'écran réalisée dans le cadre de l'étude

# Test characteristics and validity of time-of-flight-camera in patients with idiopathic scoliosis.

**Title** : Test characteristics and validity of TOF-camera in patients with idiopathic scoliosis

**Key words** : TOF-camera, spine surface topography, idiopathic scoliosis, validity

**Question** : What are the test characteristics of the TOF-camera as a tool for evaluating idiopathic scoliosis (IS), including area under the curve (AUC), sensibility and specificity for the best threshold?

**Findings** : The use of TOF-camera with a global trunk asymmetry threshold of 7 degrees, seems to offer promising screening/analysing characteristics.

**Meaning** : The present results showed a strong potential of TOF-camera as an idiopathic scoliosis assessment tool, and maybe a no radiation screening tool in the future.

**Study Design** : Single cohort test characteristics study

**Objective** : This study focused on evaluating the validity and test characteristics of TOF-camera in patients with idiopathic scoliosis (IS). This study aimed 1) to evaluate the characteristics of GTA measured with TOF-camera as a tool for describing AIS; 2) to compare these results with those obtained with the scoliometer.

**Summary of Background Data** : Definition of scoliosis is based on the x-rays with a lateral spinal curvature in the frontal plane. The overall prevalence is 3% in the population between 10 and 18 years. The close monitoring of IS population during the growing years is necessary and requires repetitive x-rays, which could lead to long-term health problems. Finding radiation free tools for screening and monitoring IS is therefore a major challenge. The most common test used for screening is based on the evaluation of the angle of trunk rotation (ATR) with a scoliometer during forward bending test, but it is not generally used to assess curvature evolution.

**Patients and methods** : Patients suspected of IS scheduled for x-ray were screened. To evaluate the validity of the global trunk asymmetry (GTA) provided by a TOF-camera, a comparison (Pearson correlation) was performed with the major Cobb angle (CA) obtained using 2D EOS® radiography. GTA and ATR measured with a scoliometer were evaluated. One hundred and eight patients aged from 5 to 24 (mean 13,9 years) were seen during spine specialist consultation. A photograph with the TOF-camera was performed for the 108 patients and a measure of ATR with a scoliometer during Adam's forward bending test, was performed for 93 of them. The AUC statistics from ROC curves were used to describe the discriminative ability of the GTA and ATR parameters with the IS diagnosis defined with a Cobb angle  $>10^\circ$  (X-Ray). Test characteristics (sensitivity and specificity) were reported for the best threshold, identified using the Youden method, for a CA  $>10^\circ$  as well as a CA  $>20^\circ$  considered as a treatment cutoff. AUC of GTA and ATR were compared using a Bootstrap test for two correlated ROC curves methods.

**Results** : Considering scoliosis diagnosis (CA  $\geq 10^\circ$ ), AUC was 0,88 (0,81-0,96) for GTA (threshold =  $7^\circ$ , Se = 81%, Sp = 83%) and 0,92 (0,85-0,99) for ATR. The AUC of GTA and ATR were not significantly different (p = 0.399). Considering a CA  $\geq 20^\circ$ , as a cut-off for orthopaedic treatment, AUC was 0,88 (95%CI = 0,82-0,95) for GTA (threshold = 7,87, Se = 87%, Sp = 75%).

**Conclusions** : The use of a TOF-camera with thresholds of 7 and 7,87, seem to offer interesting screening characteristics of IS. Based on these results, this fast, light, and non-invasive system is a promising tool for IS evaluation. It appears obvious that it needs further investigations such as solid screening characteristics, inter and intra-individual reliability and validity, to be used for monitoring the evolution of IS in growing patients instead of repetitive radiographs.

## INTRODUCTION

Scoliosis is a three-dimensional (3D) spinal deformity that combines lateral deviation and axial rotation of the spine (1). The definition of scoliosis is based on a Cobb angle (CA)  $>10^\circ$  (2,3) measured on a two-dimensional (2D) anteroposterior full-length spine radiograph (X-Ray) (4).

The overall prevalence of the pathology is from 1% to 3% in the population aging from 10 to 18 years (5). Specific symptoms like abnormal appearance, back pain, or psychological problems, can be influenced by the cause or the severity of scoliosis and its progression. The majority of patients with IS will be treated with non-surgical therapies [6], but its close monitoring during the growing years is necessary to make sure no surgery may be required. The use of braces during orthopaedic treatment requires x-rays every 4 or 6 months as recommended by international guidelines (6,7). The repeated radiation exposure by x-rays during this period coupled with the greater sensitivity of children to radiation (8) may increase cancer risk (9).

The reduction of the radiation doses during IS surveillance is therefore a major challenge to avoid long term health problems. The recent development of the low dose 2D X-ray EOS system is a direct response to this challenge because it allows a 50 to 85% decrease of radiation (10). This imaging technique has been validated for adolescent idiopathic scoliosis (AIS) follow-up (11).

In addition, radiation-free methods have been explored and validated for several years, for the screening and follow-up.

The most commonly used screening test, which is low-cost and non-invasive, is based on the measurement of the angle of trunk rotation (ATR) with a scoliometer during Adams forward bending test (FBT) (12). It remains a clinical tool, evaluating trunk asymmetry rather than curvature.

Other three-dimensional methods, such as CT (13,14), ultrasound (15,16), surface topography (17) or rasterstereography (18,19), are used for monitoring the evolution of AIS. Surface topography (ST) provides a non-invasive assessment of 3D back geometry using laser scanners and light projections. Rasterstereography, is a relatively low-cost tool, that offers the possibility to evaluate the actual spinal curvature with measurement of the scoliosis angle using projecting parallel light lines onto the skin surface. However, these tools remain relatively bulky because they need large setups, scanning processes, or light projection devices. In addition, the duration of images acquisition and the heavy calculating process may be a brake on their use during clinics.

A time-of-flight-camera is a range imaging camera system for measuring distances based on time-of-flight, the round trip time of an artificial light signal, as provided by light-emitting-diode (LED). It is a small device that measures for each pixel of the image the distance between the camera and the object. The extraction and the processing algorithm allow then to obtain the equivalent of a surface topography. In contrast to laser scanning or light projections systems, this is a compact device, and no mechanical moving parts are needed. It is able to measure distances within a complete scene with a single shot.

TOF-camera are used for several years in many industries such as automobile, aeronautic or robotics. It also represents an important tool for earth topography, but its use in the medical field is yet to be developed.

The use of a TOF-camera has been studied in 2016 for patient positioning during radiotherapy (20), and for strict and reproducible electrode localisation during electroencephalogram in 2019 (21). In 2019, Sharp and al. also used it to measure thoracic ampliation during pulmonary function tests (22). Apart from these applications, TOF-camera has never been used for back or trunk asymmetry evaluation in IS.

Therefore, this study aims to evaluate the characteristics of TOF-camera, and its validity for the description of trunk asymmetry in patients with IS. We also chose to compare these results with those obtained with the ATR measured during FBT with a scoliometer.

## **METHODS**

### ***Participants***

Adolescents were recruited among patients scheduled for a biplanar radiography examination for suspected scoliosis or for monitoring previously diagnosed scoliosis.

The inclusion criteria were :

- age <30 years
- informed consent obtained from participant and their respective legal representatives for photograph.

Exclusion criterium was :

- History of spinal or thoracic surgery

### ***Radiographic assessment***

Each patient had a low dose biplanar X-Ray with the EOS® System (Biospace Med, Paris, France) as part of their clinical visit. Patients were examined in a standing position with their fists on their clavicles, elbow flexed, and the head looking forward (23).

### ***Scoliometer assessment***

Adam's forward bending test was performed during the clinical visit (same day). The patient had to take off his/her shirt and bend forward, starting at the waist until the back came to a horizontal plane, with feet together, arms hanging and knees in extension. The examiner stood in the back of the patient and looked along the horizontal plane of the spine, looking for the maximal ATR using a scoliometer (Mizuho Co., Ltd, CA, USA). The scoliometer measurement was done according to the usual guideline of scoliometer use (24), by a spine surgeon.

### ***TOF-camera assessment***

The device included the TOF-camera and its power and PC cable, a camera stand, a portable computer, and a stool. All these elements are relatively small and easy to transport ensuring its mobility as well as its usage in any small room.

The patient was positioned in front of the TOF-camera for the photograph, sitting on the stool with the back facing the camera. Ground markers were previously used for reproducibility of

the stool positioning. We chose to position our TOF-camera on a stand within the distance of 0,7 meters from the stool. This distance was figured using a fixed angle in the TOF-camera of 63 degrees and maximal theoretic torso width for age determined from growth curves. The height of the camera was fixed to 0,8 meters from the ground. The patient had to remove shirt and bras if needed, lower pants and underwear in order to reveal the lumbosacral region and put long hair to the front side. The patients were asked to straighten their back as much as possible as well as to keep their feet parallel to each other, arms flexed with palms on thighs and the eyes-line straight. After checking the good positioning of the patient on the live non coloured video tab of the software, the photograph was taken using the computer space key. This procedure usually did not exceed two minutes. All the data were saved anonymously to a dedicated folder.

### ***DATA assessment***

The TOF-camera software approximates an angle of gibbosity, equivalent to an ATR. It creates a 3D map of the back, across the entire width of an area of interest and calculates this angle for each pixel slice that constitutes the height of this area (window height = 479 pixels; variable height of the reference area around 200 pixels). This procedure needs 3 steps that a blind operator manually performed for each photograph:

- Symmetry axis: it was positioned along the spine, primarily based on the lumbosacral spine, which is closest to the pelvis and not subject to mediolateral deviations.
- Reference zone (RZ): the advantage of the TOF camera is the ability to "recenter the back" if the patient is not sitting perfectly orthogonal to the camera rays. This RZ was drawn on a flat (undressed) area as wide as possible within clothing-imposed limits. It must not be subject to deformations related to scoliosis and therefore drawn within the lower lumbar spine/sacrococcygeal region.
- Area of interest (AI): void spaces beyond the sides of the thorax creates aberrant vanishing lines. Scapular prominences are also a confounding factor as they create a relief that is not necessarily correlated with gibbosity. Also, it is essential to remember that a consultation scoliometer is 20 cm wide, so 10 cm on each side of the symmetry axis is sufficient to determine the gibbosity apex. Therefore, the AI is a zone chosen as high as possible between the scapulae.

The data were extracted through a text file and a graph.

The most reproducible and representative measurement of the chosen deformation is the amplitude between the minimum negative value and the maximum positive value. Therefore, it is the sum in absolute value of the two extremes of the curve. It was called GTA (global trunk asymmetry). Clinically, GTA corresponds to the maximal gibbosity angle for single curves and the sum of the two maximal gibbosity angles for double curves. It is a way to account for trunk asymmetry as a whole, considering not only the thoracic gibbosity but also the lumbar gibbosity, which is generally less pronounced.

### ***Primary outcomes***

The Cobb angle was blindly measured by one senior paediatric spine surgeon on a full standing postero-anterior 2D EOS® radiography. The diagnosis was based on a Cobb angle greater than

10 degrees (2,3) that is considered as the gold standard. Parameters selected for the analysis were the GTA provided by the TOF-camera and ATR measured with the scoliometer during FBT.

### ***Statistical analysis***

All statistical analyses were done using R software (version 4.2.2) and related packages (R Development Core Team, 2018). The continuous outcomes were reported as mean (standard deviation) and the categorial outcomes as n (%). The global trunk asymmetry (GTA) evaluated with the TOF-camera, and the ATR measure were used as primary outcomes. To evaluate the validity between GTA and ATR against the gold standard (X-Ray), Pearson correlation coefficients were used, with respective p-value and 95% confidence interval. The interpretation criteria for correlation were defined as:  $r > 80\%$  was strong,  $r$  between 60% and 80% was moderate,  $r$  between 30% and 60% was fair, and  $r < 30\%$  was poor (25).

The area under the curve (AUC) statistic from receiver operating characteristic (ROC) curves was used to describe the discriminative ability of the GTA and ATR parameters for diagnosing idiopathic scoliosis defined with a Cobb angle  $\geq 10^\circ$  (X-Ray), and of the GTA for brace indication defined with a Cobb angle  $\geq 20^\circ$  (X-Ray). ROC curve was drawn using the pROC package such as AUC calculation with a 95% confidence interval (26). Test characteristics (sensitivity and specificity) were reported for the best threshold identified using the Youden method (27). The optimal cut-point was determined by maximizing the number of correctly classified individuals. AUC of GTA, and ATR were compared using a Bootstrap test for two correlated ROC curves methods using roc.test function in pROC package (26). For the GTA, we reported sensitivity and specificity with the best thresholds. Additionally, we reported values for  $7^\circ$  and  $8^\circ$ .

## **RESULTS**

### ***Participants***

Patients ranged in age from 5 to 24 years (mean 13.9 years) and were predominantly women: 65% (70F 49M). 94 of the 108 patients (87%) were between 10 and 18 years old, which is representative the AIS population according to screening studies.

Among the 108 evaluated patients, 90 (83%) had scoliosis based on x-ray measured Cobb angle  $\geq 10^\circ$ . Thus 18 of 108 had not and were considered our control population. Due to the absence of bending x-rays, we were unable to sort the patients by Lenke curve types (28). We considered 4 curve types, only for descriptive purposes. Among the 31 patients with main thoracic curve, 25 had a main right thoracic curve, 3 a left one. 3 patients had double thoracic scoliosis. 18 patients had a main lumbar curve (4 right, 14 left), and 18 a double major curve (12 with a thoracic CA superior to the lumbar CA, and 6 with the opposite). Finally, 23 had a thoracolumbar main curve (13 right, 10 left).

According to Konieczny and al epidemiologic study in 2012, thoracic curves are the most common (48 %), followed by thoracolumbar/lumbar curves (40 %). Double curves (9 %) and double thoracic curves (3 %) are less common. 80 % of all children have thoracic or

thoracolumbar/ lumbar curves (5). Our population doesn't seem to strongly differ from overall idiopathic scoliotic population.

As described in figure 1, 108 patients were therefore analysed using the TOF-camera software. Unfortunately, 15 of these 108 patients had missing data concerning the ATR measured with the scoliometer. A total of 93 patients were therefore compared for the best threshold.

### ***Validity results***

As shown in figure 2, the Pearson correlation coefficient for GTA and max ATR were respectively 0,594 and 0,764 suggesting moderate correlation with Major Cobb angle (x-ray). Considering GTA, this coefficient dropped to 0,365 for mild curve ( $CA < 20^\circ$ ).

### ***Best threshold and AUC***

As summarised in Figure 3 and 4, considering scoliosis diagnosis ( $CA \geq 10^\circ$ ), AUC was 0,88 (0,81-0,96) for GTA and 0,92 (0,85-0,99). Considering a  $CA \geq 20^\circ$ , as a cut-off for orthopaedic treatment, AUC was 0,88 (95%CI=0,82-0,95) for GTA.

### ***Diagnostic characteristics***

Considering the diagnosis of  $CA \geq 10^\circ$ , the sensibility and specificity of GTA for a threshold of 7,34 were respectively 77% (67%-85%) and 94% (73%-100%) (Table 2). Sensibility and specificity of GTA for the threshold  $< 7$  were respectively 81% (71%; 89%) and 83% (59%; 96%). For the threshold  $< 8$ , they were respectively 61% (50%; 71%) and 94% (73%; 100%).

Considering a  $CA \geq 20^\circ$ , as a cut-off for orthopaedic treatment, the sensibility and specificity of GTA for a threshold of 7,87 were respectively 87% (74%-95%) et 75% (62%-86%). Sensibility and specificity of GTA for the threshold  $< 7$  were respectively 98% (90%; 100%) and 55% (41%; 69%). For the threshold  $< 8$ , they were respectively 83% (70%; 92%) and 77% (64%; 87%).

The AUC of GTA and ATR were not significantly different ( $p=0.399$ ) (Figure 4).

## **DISCUSSION**

We included 108 patients of which 50 are aged between 10 and 14 years old, and 44 between 15 and 17 years old. They represent respectively the population targeted in school-based screening tests (29) and the population with scoliosis which needs regular follow-up consults. One of the strengths of our study comes from its sample size, besides being a preliminary work with a new technology.

This study also included patients without scoliosis (18 of 108, 17%) who underwent the gold standard scoliosis evaluation (X-Ray). This allowed us to calculate the intrinsic characteristics of the test. Most of the literature has no or few healthy control patients to define the characteristics of the scoliosis screening tests (30).

As a tertiary referral centre, our patients are referred by paediatricians, general practitioners, school doctors or nurses for suspicion of IS. This included population did not represent the

general population. Predictive values are important diagnostic characteristics and were not evaluated in our study due to this drawback.

The correlation between GTA and the major Cobb angle was studied, as a prerequisite for the following analyses. The global Pearson coefficient was 0.594 which we can consider as moderate correlation. This coefficient was on the other hand higher for ATR, but still considered moderate. Considering mild curves ( $CA < 20^\circ$ ) and moderate/severe curves ( $CA > 20^\circ$ )  $r$  was 0,365 ( $p=0,006$ ) and 0,223 ( $p=0,223$ ), suggesting GTA better correlate with major CA overall than within shorter angle intervals. An interesting aspect of the patient sample in this study is the number of severe curves. Fifteen out of 108 patients had a  $CA > 40^\circ$ . This number could explain the low correlation for severe curves. These patients could still potentially benefit from a reduction in x-rays in cases where the curve was found to be nonprogressive at a follow-up visit. Thus, in order to evaluate TOF-camera not only as a potential screening tool, but as a tool for scoliosis monitoring, we found interesting to include the patients with severe curves.

The false-negative cases rate is a major issue because it potentially represents harm to the patients. If a patient is classified non scoliotic with a GTA under the threshold, an x-ray may not be obtained leading to consequences of insufficient treatment. The number of false-negatives may be due to the important number of CA between 9 and 11, with patients who could easily be misplaced between ill and not-ill category. The body and trunk deformation of two patients with a 1 or 2 degrees discrepancy, may be too low to be detected by the TOF-camera. This discrepancy may also be due to operator error when measuring the CA on x-rays.

The same drawback arises when we consider diagnostic accuracy results. GTA with a threshold of 7 seems to offer better screening characteristics (Se 81%, Sp 83%), than with a the Youden best threshold 7,34 (Se 77%, Sp 94%) for the scoliosis diagnosis as sensitivity is superior. Considering  $CA > 20$  as a brace indication cutoff, the Youden threshold 7,87 seems to be better since specificity drops to 55% for the threshold 7. The thresholds 7, 7,34, 7,87 and even 8, are very close to each other, and significant differences in diagnostic accuracy seem to appear for narrow differences of GTA values.

In the TOF-camera process, photographs are taken in seconds and need a very few settings. The operator has to make sure the patient follows all the required positioning rules and press a button, which could be done by any medical or non-medical member of the screening team. However, in order to obtain the GTA, the photograph must be analysed with the software, and impose that the operator manually defines three zones. In our study only one operator performed this step blindly for the 108 patients. The placement of the symmetric axis, the reference and interest zones, could either differ between operators, or between two different timed measures of the same photograph by the same operator. This could interfere with the diagnostic accuracy, especially with close values of GTA.

Only one operator measured Cobb angle on x-rays, which also represents a limitation. In the future, intra-investigator et inter-investigator reliability results for zone positioning have to be studied.

The sacrococcygeal region is often covered by clothing during the test to respect the patient privacy and cannot be fully exposed. Therefore, the clothing covering may affect the choice of the interest zone or reference zone by the operator.

Another strength of this study is the comparison with the most commonly used clinical tool, the scoliometer, even though it was not built around this comparison. Ninety three of 108 had ATR

and GTA measurements. AUC of GTA and ATR were very good (0,88 and 0,92) for scoliosis diagnosis and not significantly different ( $p=0.399$ ) (Figure 4). It is a good and promising result for TOF-camera since the diagnostic characteristics of the scoliometer in our study appear to match those of the literature (31). It is important to consider that they are two different tools, making the comparison mainly informative. The ATR of the scoliometer is measured with the patient leaning forward, in a position known to exacerbate the gibbosity. The TOF-camera in another hand, evaluates the back surface of a seated patient in a more natural position but reducing the gibbosity. For a more relevant technical comparison, we would need to consider a study in which the photograph would be taken during FBT, with the TOF-camera high up and pointing vertically toward the ground. However, we think it may undermine the reproducibility of the measurements. It may also be more difficult to establish a reference zone such as the sacrococcygeal region.

In this study was not included the body mass index (BMI) at inclusion. It is probably a limitation because measurement accuracy is lower in obese patients or patients with asymmetrical muscle surfaces (32). It has recently been shown that the scoliometer/FBT test can be compromised by a higher BMI. Margalit et al. found a better sensitivity of the scoliometer for an ATR of  $7^\circ$  in normal patients, compared with  $5^\circ$  in obese patients. This suggests that a high BMI would tend to hide curvatures, and that the latter should be referred for specialist consultation from a lower ATR (33). Future studies evaluating the screening power of the TOF-camera will have to take BMI into account.

Finally, we have to keep in mind that patients and their families are more concerned with improving the external shape or aesthetics than their Cobb angle. We should treat patients according to their needs, and aesthetic issues may be a main reason for treating scoliosis (34). Thulbourne et al. found no clear linear relationship between rib deformity and the Cobb angle (35). For aesthetic issues, shoulder, scapula, waist, or breasts should be considered (36), and their asymmetry should be probably better evaluated with surface topography technique such as TOF-camera than traditional radiological parameters (CA, thoracic kyphosis).

## CONCLUSION

Due to their non-radiation, non-invasive characteristics, surface topography techniques have great potential and promising applications in assessing scoliosis. Among these techniques, we believe that the TOF-camera can occupy an important place. It is a non-expensive, light, compact, and easy to transport device. It doesn't require any major installation, allows easy and fast image acquisition, making it interesting for routine use.

The TOF camera seems to offer interesting features for scoliosis analysis and will need further prospective studies to make it a reliable screening tool.

1. Perdiolle R, Vidal J. Morphology of scoliosis: three-dimensional evolution. *Orthopedics*. juin 1987;10(6):909-15.
2. Richards BS, Vitale MG. Screening for idiopathic scoliosis in adolescents. An information statement. *J Bone Joint Surg Am*. janv 2008;90(1):195-8.
3. James JJ. Idiopathic scoliosis; the prognosis, diagnosis, and operative indications related to curve patterns and the age at onset. *J Bone Joint Surg Br*. févr 1954;36-B(1):36-49.
4. Raso VJ, Lou E, Hill DL, Mahood JK, Moreau MJ, Durdle NG. Trunk distortion in adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop*. 1998;18(2):222-6.
5. Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop*. févr 2013;7(1):3-9.
6. Menger RP, Sin AH. Adolescent and Idiopathic Scoliosis. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [cité 23 août 2023]. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499908/>
7. El-Hawary R, Chukwunyerenna C. Update on evaluation and treatment of scoliosis. *Pediatr Clin North Am*. déc 2014;61(6):1223-41.
8. Kleinerman RA. Cancer risks following diagnostic and therapeutic radiation exposure in children. *Pediatr Radiol*. sept 2006;36 Suppl 2(Suppl 2):121-5.
9. Don S. Radiosensitivity of children: potential for overexposure in CR and DR and magnitude of doses in ordinary radiographic examinations. *Pediatr Radiol*. oct 2004;34 Suppl 3:S167-172; discussion S234-241.
10. McKenna C, Wade R, Faria R, Yang H, Stirk L, Gummerson N, et al. EOS 2D/3D X-ray imaging system: a systematic review and economic evaluation. *Health Technol Assess Winch Engl*. 2012;16(14):1-188.
11. Somoskeöy S, Tunyogi-Csapó M, Bogyó C, Illés T. Accuracy and reliability of coronal and sagittal spinal curvature data based on patient-specific three-dimensional models created by the EOS 2D/3D imaging system. *Spine J Off J North Am Spine Soc*. nov 2012;22(11):1052-9.
12. Grivas TB, Wade MH, Negrini S, O'Brien JP, Maruyama T, Hawes MC, et al. SOSORT consensus paper: school screening for scoliosis. Where are we today? *Scoliosis*. 26 nov 2007;2:17.
13. Adam CJ, Izatt MT, Harvey JR, Askin GN. Variability in Cobb angle measurements using reformatted computerized tomography scans. *Spine*. 15 juill 2005;30(14):1664-9.
14. Xiao B, Zhang Y, Yan K, Jiang J, Ma C, Xing Y, et al. Where should Scoliometer and EOS Imaging be Applied when Evaluating Spinal Rotation in Adolescent Idiopathic Scoliosis -A Preliminary Study with Reference to CT Images. *Glob Spine J*. 5 août 2022;21925682221116824.
15. Jiang W, Chen X, Yu C. A real-time freehand 3D ultrasound imaging method for scoliosis assessment. *J Appl Clin Med Phys*. août 2022;23(8):e13709.
16. Lai KKL, Lee TTY, Lee MKS, Hui JCH, Zheng YP. Validation of Scolioscan Air-Portable Radiation-Free Three-Dimensional Ultrasound Imaging Assessment System for Scoliosis. *Sensors*. 19 avr 2021;21(8):2858.
17. Liu X, Thometz J, Tassone J, Paulsen L, Lyon R. Historical review and experience with the use of surface topographic systems in children with idiopathic scoliosis. *OA Musculoskelet Med*. 1 mai 2013;1.
18. Hierholzer E, Hackenberg L. Three-dimensional shape analysis of the scoliotic spine using MR tomography and rasterstereography. *Stud Health Technol Inform*. 2002;91:184-9.
19. Krott NL, Wild M, Betsch M. Meta-analysis of the validity and reliability of rasterstereographic measurements of spinal posture. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc*. sept 2020;29(9):2392-401.

20. Gilles M, Fayad H, Miglierini P, Clement JF, Scheib S, Cozzi L, et al. Patient positioning in radiotherapy based on surface imaging using time of flight cameras. *Med Phys.* août 2016;43(8):4833.
21. Chen S, He Y, Qiu H, Yan X, Zhao M. Spatial Localization of EEG Electrodes in a TOF+CCD Camera System. *Front Neuroinformatics.* 2019;13:21.
22. Sharp C, Soleimani V, Hannuna S, Camplani M, Damen D, Viner J, et al. Toward Respiratory Assessment Using Depth Measurements from a Time-of-Flight Sensor. *Front Physiol.* 2017;8:65.
23. Faro FD, Marks MC, Pawelek J, Newton PO. Evaluation of a functional position for lateral radiograph acquisition in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine.* 15 oct 2004;29(20):2284-9.
24. Fairbank J. Historical perspective: William Adams, the forward bending test, and the spine of Gideon Algernon Mantell. *Spine.* 1 sept 2004;29(17):1953-5.
25. Akoglu H. User's guide to correlation coefficients. *Turk J Emerg Med.* sept 2018;18(3):91-3.
26. Robin X, Turck N, Hainard A, Tiberti N, Lisacek F, Sanchez JC, et al. pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. *BMC Bioinformatics.* 17 mars 2011;12:77.
27. Youden WJ. Index for rating diagnostic tests. *Cancer.* janv 1950;3(1):32-5.
28. Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am.* août 2001;83(8):1169-81.
29. Riseborough EJ, Wynne-Davies R. A genetic survey of idiopathic scoliosis in Boston, Massachusetts. *J Bone Joint Surg Am.* juill 1973;55(5):974-82.
30. Fong DYT, Lee CF, Cheung KMC, Cheng JCY, Ng BKW, Lam TP, et al. A meta-analysis of the clinical effectiveness of school scoliosis screening. *Spine.* 1 mai 2010;35(10):1061-71.
31. Côté P, Kreitz BG, Cassidy JD, Dzus AK, Martel J. A study of the diagnostic accuracy and reliability of the Scoliometer and Adam's forward bend test. *Spine.* 1 avr 1998;23(7):796-802; discussion 803.
32. Asamoah V, Mellerowicz H, Venus J, Klöckner C. [Measuring the surface of the back. Value in diagnosis of spinal diseases]. *Orthopade.* juin 2000;29(6):480-9.
33. Margalit A, McKean G, Constantine A, Thompson CB, Lee RJ, Sponseller PD. Body Mass Hides the Curve: Thoracic Scoliometer Readings Vary by Body Mass Index Value. *J Pediatr Orthop.* juin 2017;37(4):e255-60.
34. Negrini S, Grivas TB, Kotwicki T, Maruyama T, Rigo M, Weiss HR, et al. Why do we treat adolescent idiopathic scoliosis? What we want to obtain and to avoid for our patients. *SOSORT 2005 Consensus paper. Scoliosis.* 10 avr 2006;1:4.
35. Thulbourne T, Gillespie R. The rib hump in idiopathic scoliosis. Measurement, analysis and response to treatment. *J Bone Joint Surg Br.* févr 1976;58(1):64-71.
36. Zaina F, Negrini S, Atanasio S. TRACE (Trunk Aesthetic Clinical Evaluation), a routine clinical tool to evaluate aesthetics in scoliosis patients: development from the Aesthetic Index (AI) and repeatability. *Scoliosis.* 20 janv 2009;4:3.

**Table 1.** Population description

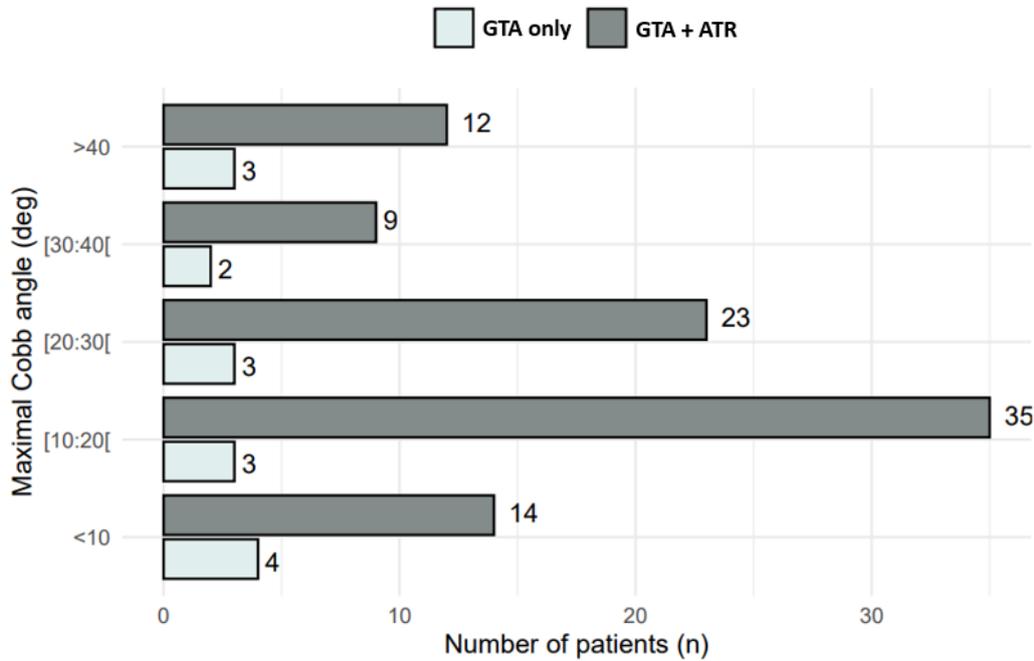
Variable	Total (n=108)
<b>Female, n (%)</b>	70 (65%)
<b>Mean age, yo (SD)</b>	13.8 (3.3)
<b>Age &gt; 10 yo, n (%)</b>	96 (89%)
<b>Risser sign &gt;1, n (%)</b>	81 (75%)
<b>Mean major Cobb angle, degrees (SD)</b>	21.3 (14.6)
<b>Curve type</b>	
Main thoracic (MT), n (%)	28 (26%)
Thoraco-lumbar, n (%)	41 (38%)
Main lumbar (ML), n (%)	18 (17%)
Main thoracolumbar (TL), n (%)	23 (21%)
Double major curve (DM), n (%)	18 (17%)
Double thoracic (DT), n (%)	3 (3%)
No scoliosis curve (Cobb<10), n (%)	18 (17%)
<b>Mean ATR, degrees (SD)</b>	6.9 (4.0)
<b>Mean GTA, degrees (SD)</b>	8.9 (4.0)

*GTA is global trunk asymmetry, ATR is angle of trunk rotation, SD is standard deviation.*

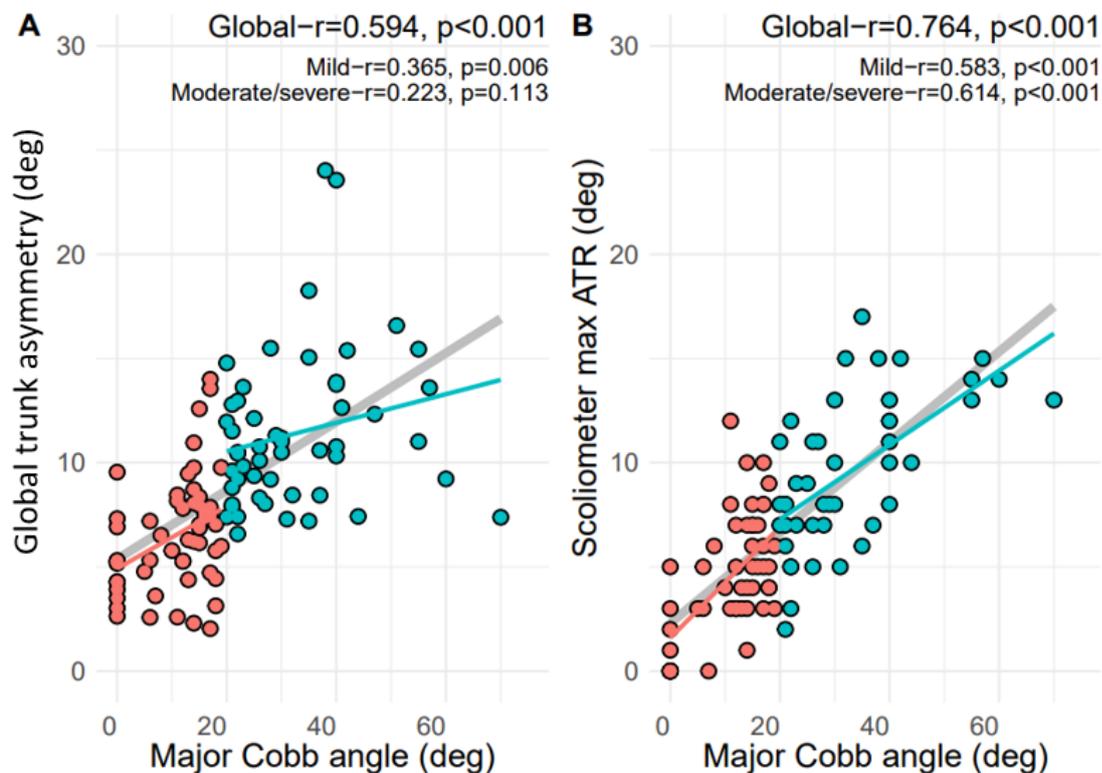
**Table 2** Diagnostic accuracy results of the angle evaluated with TOF to classify curves as idiopathic scoliosis (Cobb $\geq$ 10) and mild idiopathic scoliosis (Cobb<20) for 108 patients.

Variable	Scoliosis diagnosis		Brace indication	
	Radiograph		Radiograph	
	Cobb $\geq$ 10 (+)	Cobb <10 (-)	Cobb $\geq$ 20 (+)	Cobb <20 (-)
<b>GTA&lt;7</b>	Se= <b>81%</b> (71%; 89%) Sp= <b>83%</b> (59%; 96%)		Se=98% (90%; 100%) Sp=55% (41%; 69%)	
+	73	3	51	25
-	17	15	1	31
<b>Youden threshold</b>	Se=77% (67%; 85%) Sp= 94% (73%; 100%)		Se= <b>87%</b> (74%; 94%) Sp= <b>75%</b> (62%; 86%)	
+	69	1	45	14
-	21	17	7	42
<b>GTA&lt;8</b>	Se= 61% (50%; 71%) Sp=94% (73%; 100%)		Se=83% (70%; 92%) Sp=77% (64%; 87%)	
+	55	1	43	13
-	35	17	9	43

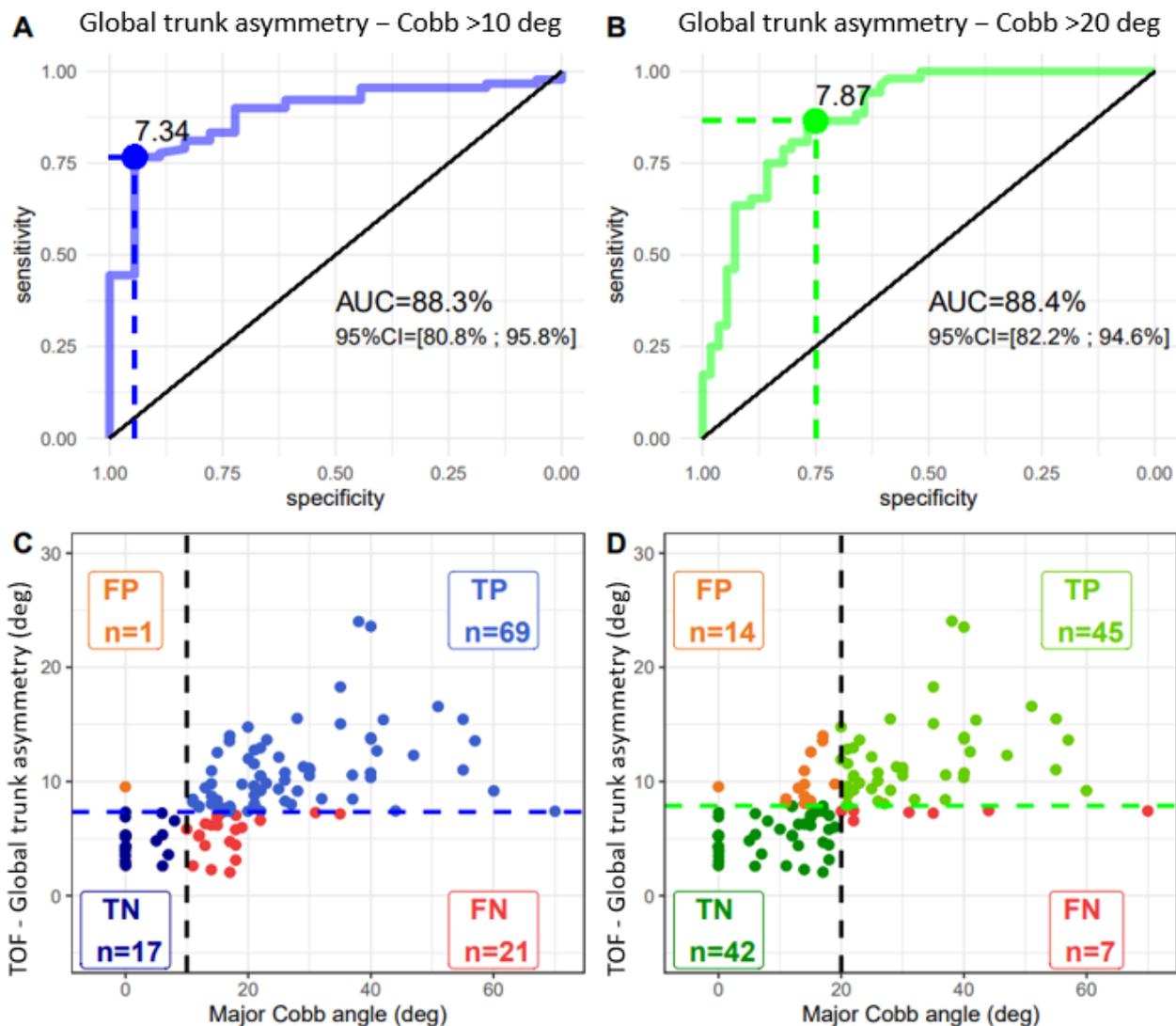
*GTA threshold was set at 7.3 degrees for scoliosis diagnosis (Cobb $\geq$ 10) and 7.8 degrees for brace indication (Cobb $\geq$ 20) using the Youden method [32], and 7 degrees, 8 degrees to compare. ‘+’ and ‘-’ signifies that the value is either superior or inferior to the respective threshold. GTA is global trunk angle, CI is confidence interval. Sensitivity (Se) and specificity (Sp) are presented with the respective 95% confidence interval for each threshold.*



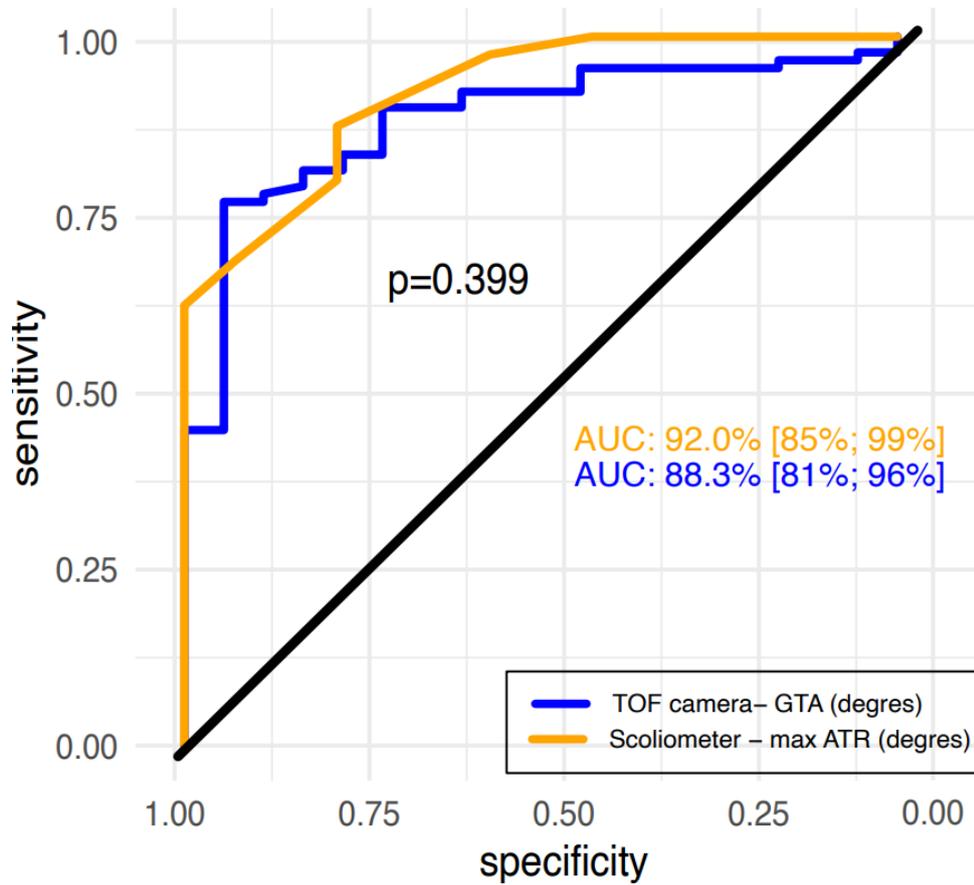
**Figure 1.** Cobb angle distribution in the studied population. *GTA* is global trunk asymmetry, *ATR* is angle of trunk rotation, *deg* is degrees.



**Figure 2:** Correlation between radiographic evaluation of major Cobb angle (gold standard) and: A) Global trunk asymmetry using TOF camera, B) Maximal angle of trunk rotation (ATR) using scoliometer. *r* is Pearson correlation coefficient; mild curves are defined with Cobb angle <20°, moderate/severe curves are defined with Cobb angle ≥20°.



**Figure 3:** The first line illustrated the area under curve (AUC) statistic from receiver operating characteristic (ROC) curves with the associated best cut-off point (Youden method) of the global trunk asymmetry using TOF camera. The second line the test characteristics of the best cut-off point for: (A, C) idiopathic scoliosis diagnosis defined with Cobb angle  $\geq 10^\circ$  (X-Ray), (B, D) brace indication defined with Cobb angle  $\geq 20^\circ$  (X-Ray). *deg* is degrees; *95%CI* is the corresponding 95% confidence interval; *FP* is false positive; *TP* is true positive; *TN* is true negative; *FN* is false negative.



**Figure 4:** Area under curve (AUC) statistic from receiver operating characteristic (ROC) curves comparison between global trunk asymmetry using TOF camera, and maximal angle of trunk rotation (ATR) using scoliometer for idiopathic scoliosis diagnosis defined with Cobb angle  $\geq 10^\circ$  (X-Ray). Significant differences between AUC were considered at  $p < 0.05$ . AUC are reported with the respective 95% confidence interval.



UNIVERSITE DE POITIERS



Faculté de Médecine et de  
Pharmacie

---



En présence des Maîtres de cette école, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'Hippocrate, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine. Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail. Admis dans l'intérieur des maisons mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe ; ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime. Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses !  
Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque !



## **Study Design** : Single cohort test characteristics study

**Objective** : This study focused on evaluating the validity and test characteristics of TOF-camera in patients with idiopathic scoliosis (IS). This study aimed 1) to evaluate the characteristics of GTA measured with TOF-camera as a tool for describing AIS; 2) to compare these results with those obtained with the scoliometer.

**Summary of Background Data** : Definition of scoliosis is based on the x-rays with a lateral spinal curvature in the frontal plane. The overall prevalence is 3% in the population between 10 and 18 years. The close monitoring of IS population during the growing years is necessary and requires repetitive x-rays, which could lead to long-term health problems. Finding radiation free tools for screening and monitoring IS is therefore a major challenge. The most common test used for screening is based on the evaluation of the angle of trunk rotation (ATR) with a scoliometer during forward bending test, but it is not generally used to assess curvature evolution.

**Patients and methods** : Patients suspected of IS scheduled for x-ray were screened. To evaluate the validity of the global trunk asymmetry (GTA) provided by a TOF-camera, a comparison (Pearson correlation) was performed with the major Cobb angle (CA) obtained using 2D EOS® radiography. GTA and ATR measured with a scoliometer were evaluated. One hundred and eight patients aged from 5 to 24 (mean 13,9 years) were seen during spine specialist consultation. A photograph with the TOF-camera was performed for the 108 patients and a measure of ATR with a scoliometer during Adam's forward bending test, was performed for 93 of them. The AUC statistics from ROC curves were used to describe the discriminative ability of the GTA and ATR parameters with the IS diagnosis defined with a Cobb angle  $>10^\circ$  (X-Ray). Test characteristics (sensitivity and specificity) were reported for the best threshold, identified using the Youden method, for a CA  $>10^\circ$  as well as a CA  $>20^\circ$  considered as a treatment cutoff. AUC of GTA and ATR were compared using a Bootstrap test for two correlated ROC curves methods.

**Results** : Considering scoliosis diagnosis (CA  $\geq 10^\circ$ ), AUC was 0,88 (0,81-0,96) for GTA (threshold =  $7^\circ$ , Se = 81%, Sp = 83%) and 0,92 (0,85-0,99) for ATR. The AUC of GTA and ATR were not significantly different (p = 0.399). Considering a CA  $\geq 20^\circ$ , as a cut-off for orthopaedic treatment, AUC was 0,88 (95%CI = 0,82-0,95) for GTA (threshold = 7,87, Se = 87%, Sp = 75%).

**Conclusions** : The use of a TOF-camera with thresholds of 7 and 7,87, seem to offer interesting screening characteristics of IS. Based on these results, this fast, light, and non-invasive system is a promising tool for IS evaluation. It appears obvious that it needs further investigations such as solid screening characteristics, inter and intra-individual reliability and validity, to be used for monitoring the evolution of IS in growing patients instead of repetitive radiographs.

**Keywords** : TOF-camera, spine surface topography, idiopathic scoliosis, validity, test characteristics, global trunk asymmetry