

Surface de symétrie d'une structure 3D : application à l'étude des déformations scoliotiques du dos

Thèse en informatique présentée par **MARION MORAND** devant le jury composé de :

- **JULIE DIGNE**, CR CNRS, LIRIS, Université Claude Bernard Lyon 1, Rapporteuse
- **JEAN-LUC MARI**, PU, LIS, Université Aix-Marseille, Rapporteur
- **ARNAUD DUPEYRON**, PUPH, Université Montpellier / CHU de Nîmes, Examinateur
- **SYLVAIN PRIMA**, CR INRIA, INRIA Rennes - Bretagne Atlantique, Examinateur

- **CHRISTOPHE FIORIO**, PU, LIRMM, Polytech Montpellier, Directeur de thèse
- **GÉRARD SUBSOL**, CR CNRS, LIRMM Montpellier, Co-encadrant
- **OLIVIER COMAS**, Docteur - Ingénieur, DMS Imaging, Invité

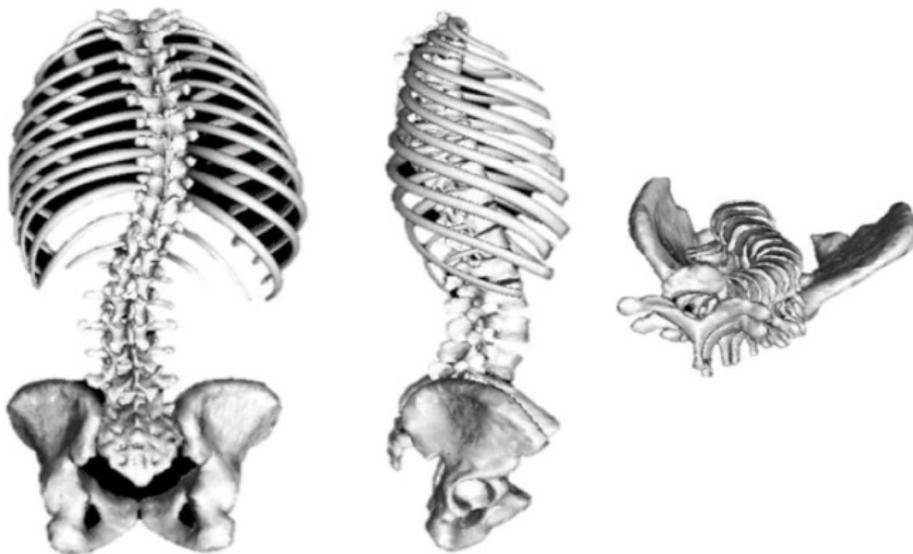


Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Surface de symétrie
- 3 Carte d'asymétrie
- 4 Application à la scoliose
- 5 Vers une modélisation du rachis
- 6 Conclusion et perspectives

Scoliose

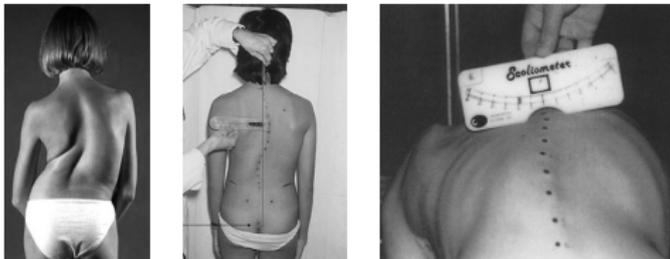
- **Déformation 3D évolutive du rachis** avec déviation latérale et rotation des vertèbres
- 2 à 4% des jeunes individus dans le monde



(Ramsay, 2013)

Diagnostic et suivi des évolutions de la scoliose (1)

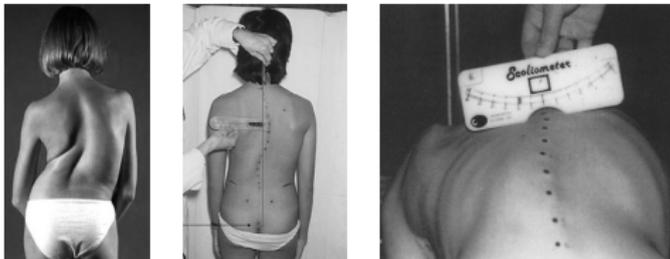
- 1 **Consultation clinique** : mise en évidence d'une déformation de la surface du dos



(Dangerfield et al., 1996 ; Sud et Tsirikos, 2013)

Diagnostic et suivi des évolutions de la scoliose (1)

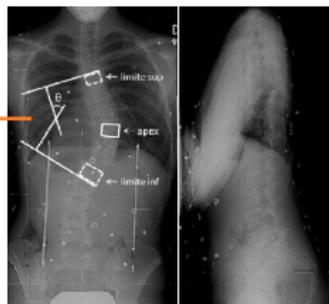
- 1 **Consultation clinique** : mise en évidence d'une déformation de la surface du dos



(Dangerfield et al., 1996 ; Sud et Tsirikos, 2013)

- 2 **Radiographies du rachis total (face / profil)**

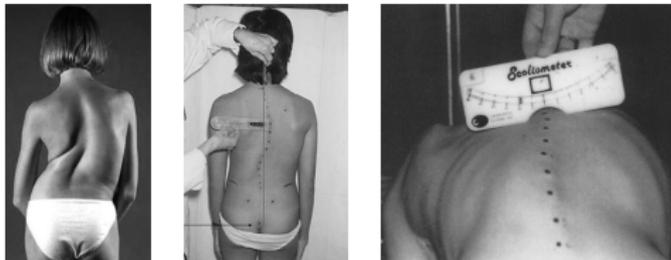
Angle
de Cobb



(Seoud, 2012)

Diagnostic et suivi des évolutions de la scoliose (1)

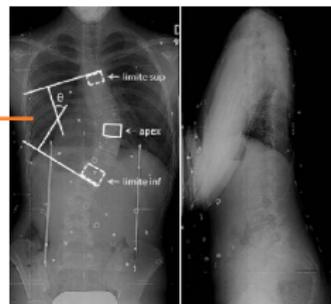
- 1 **Consultation clinique** : mise en évidence d'une déformation de la surface du dos



(Dangerfield et al., 1996 ; Sud et Tsirikos, 2013)

- 2 **Radiographies du rachis total (face / profil)**

Angle
de Cobb



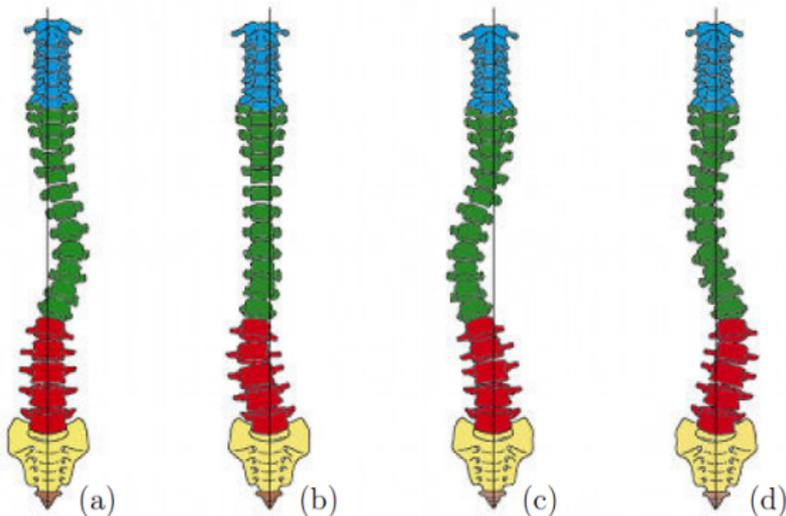
(Seoud, 2012)

- 3 **Imagerie complémentaire 3D : IRM / Scanner X**

Évaluation des déformations scoliotiques

Catégoriser les courbures scoliotiques en fonction :

- de leur **localisation** (thoracique, lombaire, thoracolombaire)
- de leur **nombre** (simple, double, triple)
- de leur **importance** (bénigne, moyenne, sévère)



(Gesbert, 2014)

Limites actuelles

- Irradiation du patient



Ronckers et al., 2008, Multiple Diagnostic X-rays for Spine Deformities and Risk of Breast Cancer Multiple Diagnostic X-rays for Spine Deformities and Risk of Breast Cancer. *Cancer Epidemiol Biomarkers and Prevention*.

- Radiographies ⇒ Mesures 2D pour une déformation 3D



Jaremko et al., 2002, Comparison of Cobb Angles Measured Manually, Calculated from 3-D Spinal Reconstruction, and Estimated from Torso Asymmetry. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*.

- Position couchée pour le scanner X et l'IRM
⇒ Mesures 3D biaisées

Limites actuelles

- Irradiation du patient



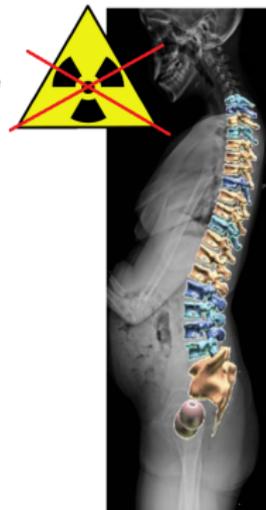
Ronckers et al., 2008, Multiple Diagnostic X-rays for Spine Deformities and Risk of Breast Cancer Multiple Diagnostic X-rays for Spine Deformities and Risk of Breast Cancer. *Cancer Epidemiol Biomarkers and Prevention*.

- Radiographies ⇒ Mesures 2D pour une déformation 3D



Jaremko et al., 2002, Comparison of Cobb Angles Measured Manually, Calculated from 3-D Spinal Reconstruction, and Estimated from Torso Asymmetry. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*.

- Position couchée pour le scanner X et l'IRM
⇒ Mesures 3D biaisées



Objectif : Utiliser des mesures 3D, en position debout, sans rayons X

Imagerie optique 3D du dos

- Depuis 1980, développement de systèmes d'**acquisitions optiques** de la **surface 3D du dos** (lumière structurée, stéréo, infrarouge...)

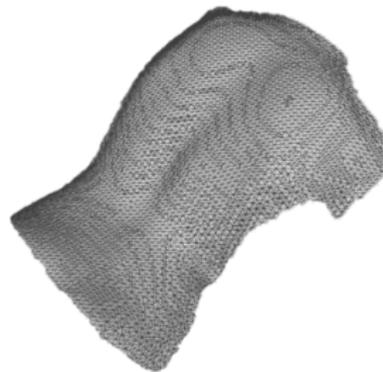


Willner, 1979, Moiré Topography for the Diagnosis and Documentation of Scoliosis. Acta Orthopaedica Scandinavica.

- Depuis 2010, AXS Médical (DMS Imaging) est acteur du marché



BIOMOD



Maillage 3D du dos

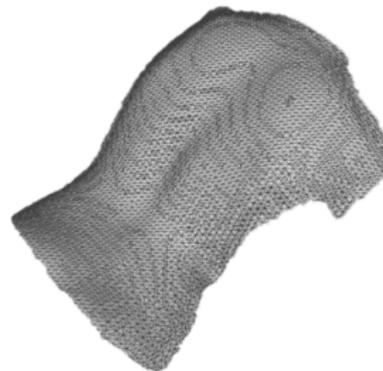
Imagerie optique 3D du dos

- Depuis 1980, développement de systèmes d'**acquisitions optiques** de la **surface 3D du dos** (lumière structurée, stéréo, infrarouge...)



Willner, 1979, Moiré Topography for the Diagnosis and Documentation of Scoliosis. Acta Orthopaedica Scandinavica.

- Depuis 2010, AXS Médical (DMS Imaging) est acteur du marché



BIOMOD



Maillage 3D du dos

Imagerie optique 3D du dos

- Depuis 1980, développement de systèmes d'**acquisitions optiques** de la **surface 3D du dos** (lumière structurée, stéréo, infrarouge...)



Willner, 1979, Moiré Topography for the Diagnosis and Documentation of Scoliosis. Acta Orthopaedica Scandinavica.

- Depuis 2010, AXS Médical (DMS Imaging) est acteur du marché



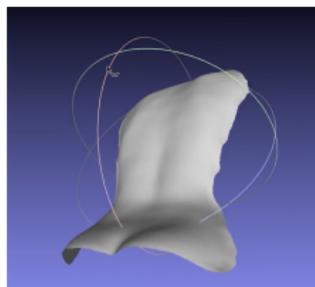
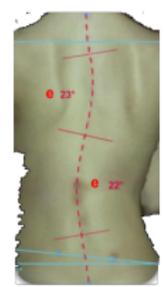
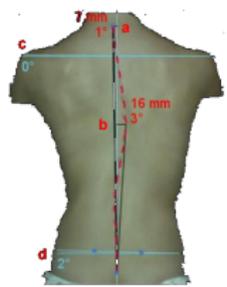
BIOMOD



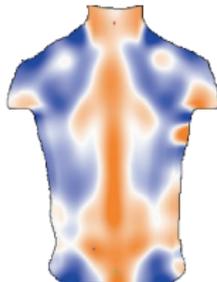
Maillage 3D du dos

Évaluation des déformations de la surface du dos

- **Indices locaux** : distance, angle...



- **Indices globaux** : carte topographique, carte de courbures...

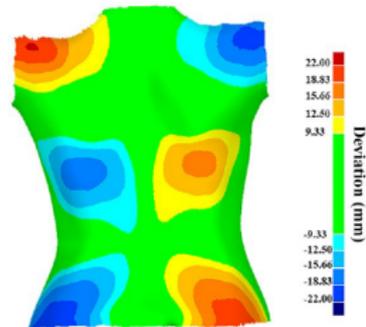
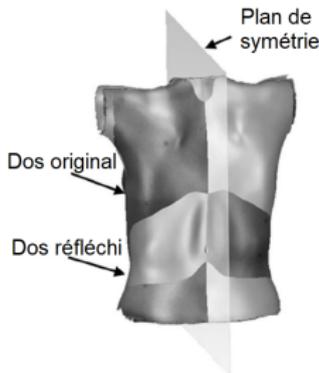


Analyse des asymétries du dos

Carte d'asymétrie

Visualisation d'une valeur d'asymétrie pour tous les points de la surface

- 1 Calcul d'un plan de symétrie
- 2 Calcul et visualisation des valeurs d'asymétrie



Komeili et al., 2014, Surface topography asymmetry maps categorizing external deformity in scoliosis. Spine Journal.

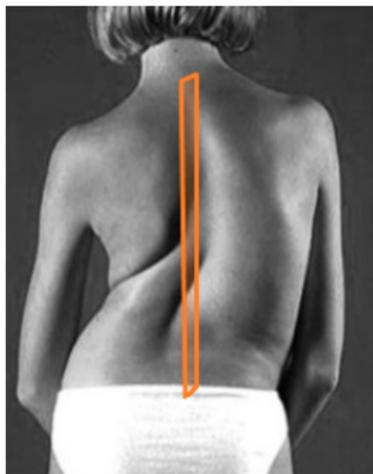


Hong et al., 2017, Surface Topography Classification Trees for Assessing Severity and Monitoring Progression in AIS. Spine.



Ghaneei et al., 2018, 3D Markerless asymmetry analysis in the management of AIS. BMC Musculoskeletal Disorders.

Limites des cartes d'asymétrie



Plan de symétrie



Surface de symétrie



Problématiques

- 1 Comment calculer la surface de symétrie d'une structure 3D ?
- 2 Comment quantifier et visualiser l'asymétrie de cette structure ?
- 3 Cela va-t-il améliorer la catégorisation et le suivi de la scoliose ?
- 4 Cela permettrait-il de modéliser le rachis ?

Sommaire

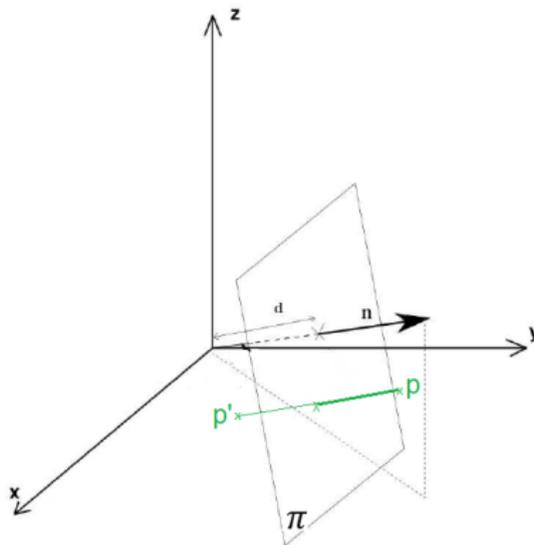
- 1 Contexte
- 2 Surface de symétrie
- 3 Carte d'asymétrie
- 4 Application à la scoliose
- 5 Vers une modélisation du rachis
- 6 Conclusion et perspectives

Symétrie plane d'une structure 3D

Symétrie par rapport à Π

Soit $\Pi = (\mathbf{n}, d)$ le plan de symétrie d'un objet O et S la symétrie orthogonale par rapport à Π , alors le point \mathbf{p}' symétrique de $\mathbf{p} \in O$ est tel que :

$$\mathbf{p}' = S_{\Pi}(\mathbf{p}) = (\mathbf{I}_3 - 2\mathbf{nn}^T)\mathbf{p} + 2d\mathbf{n}$$

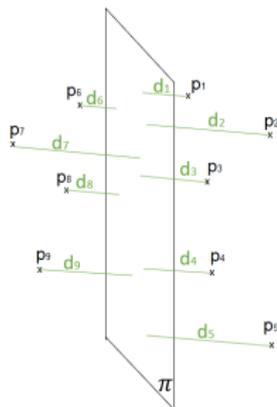


Calcul d'un plan de symétrie

Méthodes fondées uniquement sur les points \mathbf{p}_i :

Π^* est le plan qui passe au mieux à travers le nuage de points \mathbf{p}_i

$$\Pi^* = \underset{\Pi}{\operatorname{argmin}} \sum_i d_i^2 = \underset{(n,d)}{\operatorname{argmin}} \sum_i |\mathbf{n}^T \mathbf{p}_i - d|^2$$



Une méthode classique : Analyse en Composantes Principales (ACP)



Minovic et al., 1992, Three Dimensional Symmetry Identification, Part I : Theory. Technical report Kyushu Institute of Technology.

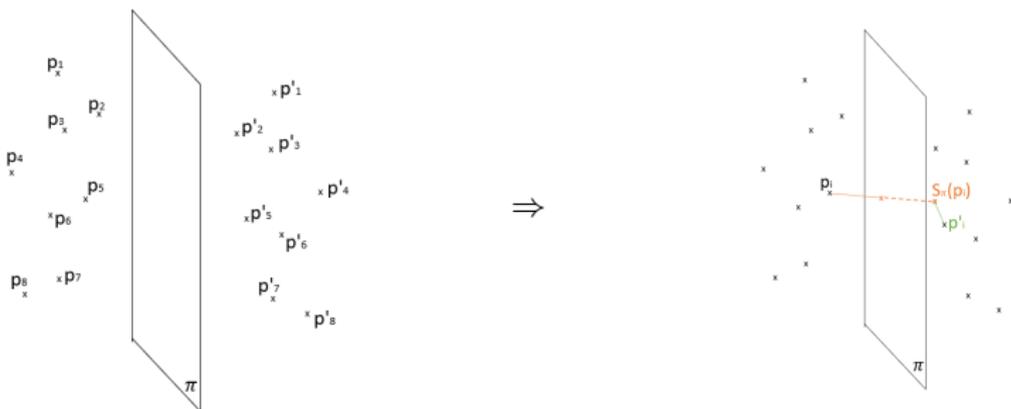
Calcul d'un plan de symétrie

Méthodes fondées sur des appariements de points ($\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i$) :

Π^* est le plan qui permet d'approcher au mieux les points $S_{\Pi}(\mathbf{p}_i)$ avec les points appariés \mathbf{p}'_i

$$\Pi^* = \underset{\Pi}{\operatorname{argmin}} \sum_i \|\mathbf{p}'_i - S_{\Pi}(\mathbf{p}_i)\|^2$$

Principe :



Combès et al., 2008, Automatic symmetry plane estimation of bilateral objects in point clouds. 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR.

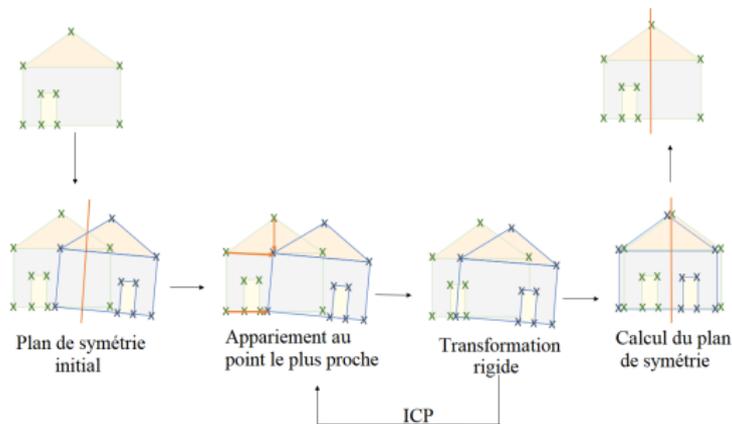
Calcul d'un plan de symétrie

Méthodes fondées sur des appariements de points ($\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_i'$) :

Π^* est le plan qui permet d'approcher au mieux les points $S_{\Pi}(\mathbf{p}_i)$ avec les points appariés \mathbf{p}_i'

$$\Pi^* = \underset{\Pi}{\operatorname{argmin}} \sum_i \|\mathbf{p}_i' - S_{\Pi}(\mathbf{p}_i)\|^2$$

Méthode indirecte :



Besl et al., 1992, A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.



Zhang et al., 2006, 3D face authentication and recognition based on bilateral symmetry analysis. The Visual Computer.

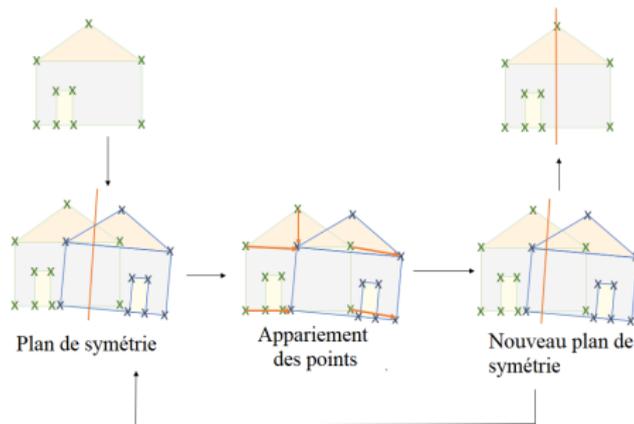
Calcul d'un plan de symétrie

Méthodes fondées sur des appariements de points ($\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_i'$) :

Π^* est le plan qui permet d'approcher au mieux les points $S_{\Pi}(\mathbf{p}_i)$ avec les points appariés \mathbf{p}_i'

$$\Pi^* = \underset{\Pi}{\operatorname{argmin}} \sum_i \|\mathbf{p}_i' - S_{\Pi}(\mathbf{p}_i)\|^2$$

Méthode directe :



Méthodes de détection d'une surface de symétrie

Problématique : Comment calculer une surface de symétrie ?

La recherche d'une surface de symétrie, un problème ancien

[O4a]

SYMÉTRIE ORTHOGONALE PAR RAPPORT A UN CYLINDRE
QUELCONQUE;

PAR M. GEMINIANO PIRONDINI, à Parme.

§ I.

Deux points A, A_1 sont *symétriques* par rapport à un cylindre K (*cylindre ichnographique*) quand la droite AA_1 est normale à la surface de K et qu'en outre elle est partagée en deux parties égales par cette surface.

Deux figures F, F_1 sont *symétriques*, quand une d'elles est le lieu des symétriques des points de l'autre.



Mangeot, 1891, Surfaces de symétrie du troisième ordre d'une quadrique. Nouvelles annales de mathématiques.



Pirondini, 1900, Symétrie orthogonale par rapport à un cylindre quelconque. Nouvelles annales de mathématiques.

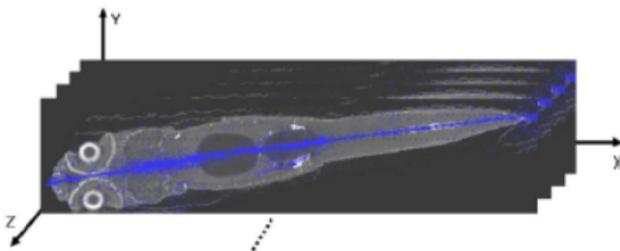


Mangeot, 1901, Sur les surfaces symétriques par rapport au cône de révolution. Annales scientifiques de l'E.N.S.

Méthodes de détection d'une surface de symétrie

Méthodes fondées sur des coupes

- Détection d'une courbe de symétrie pour chaque coupe
- Interpolation des courbes de symétrie



Limites :

- Influence des orientations des coupes
- Non applicable directement aux données surfaciques



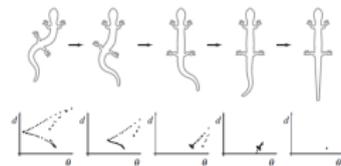
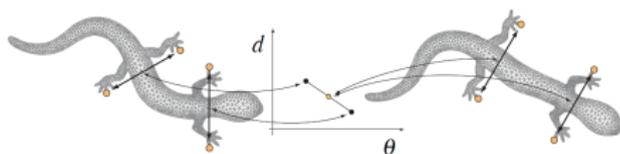
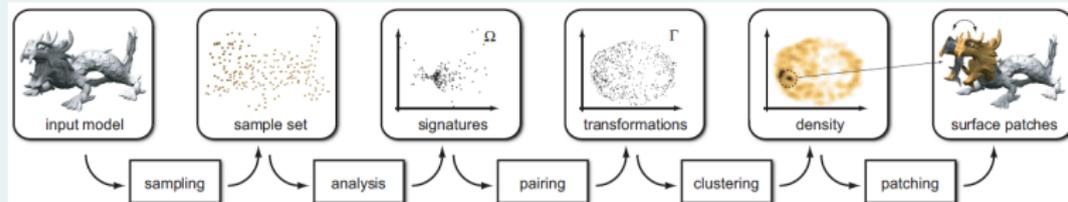
Stegmann et al., 2005, Mid-sagittal Plane and Mid-sagittal Surface Optimization in Brain MRI Using a Local Symmetry Measure. Medical Imaging 2005 : Image Processing.



Lee et al., 2013, Detecting curved symmetric parts using a deformable disc model. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision.

Méthodes de détection d'une surface de symétrie

Méthodes fondées sur des symétries partielles



Limites : Ne fournit pas une surface de symétrie générale



Mitra et al., 2006, Partial and approximate symmetry detection for 3D geometry. ACM Transactions on Graphics.

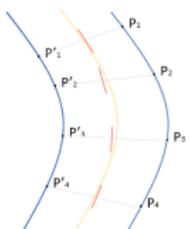


Mitra et al., 2007, Symmetrization. ACM Transactions on Graphics.

Méthodes de détection d'une surface de symétrie

Méthodes fondées sur des plans de symétrie

- Recherche de points correspondants
- Définition de leurs plans de symétrie
- Approximation de la surface de symétrie



Limites : Paramétrisation qui ne s'adapte pas aux fortes et aux multiples courbures

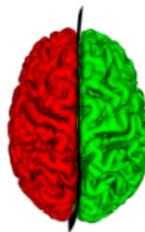
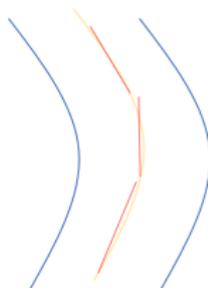
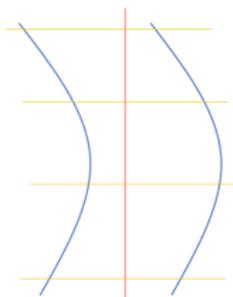


Sato, 1996, Detecting planar and curved symmetries of 3D shapes from a range image. Computer Vision and Image Understanding.

Méthodes de détection d'une surface de symétrie

Méthodes fondées sur des plans de symétrie

- Division de la structure, orthogonalement au plan de symétrie global
- Recherche d'un plan de symétrie pour chaque sous-structure
- Approximation de la surface de symétrie

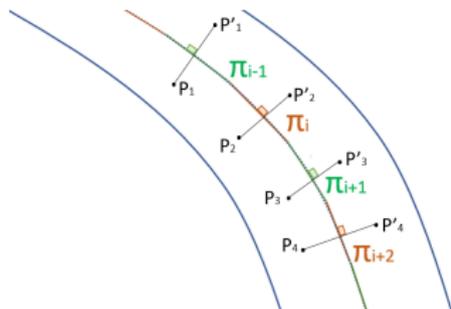


Limites : Paramétrisation qui ne s'adapte pas aux fortes et aux multiples courbures



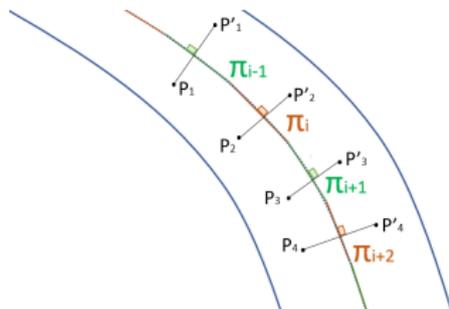
Notre contribution

Proposition : Extension d'une méthode fondée sur des plans de symétrie, pour approximer une surface de symétrie générale

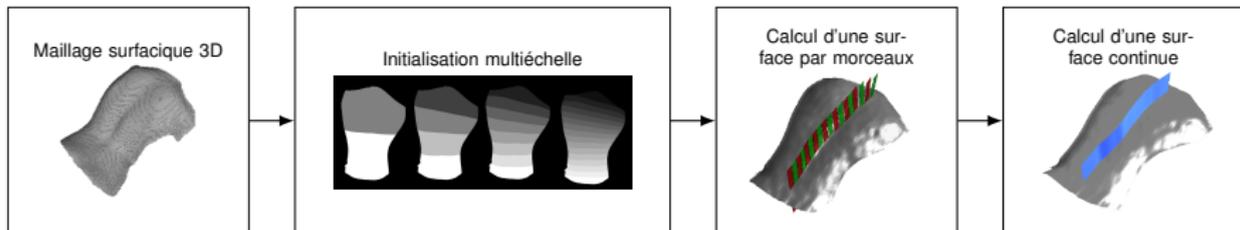


Notre contribution

Proposition : Extension d'une méthode fondée sur des plans de symétrie, pour approximer une surface de symétrie générale

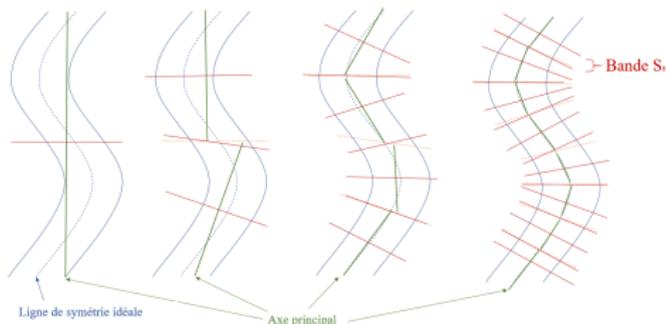
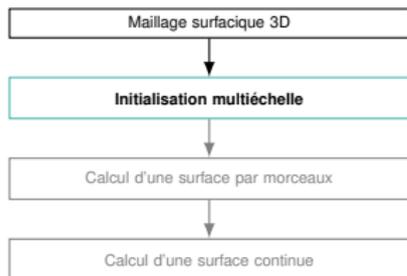


⇒ Schéma global de l'algorithme :



Initialisation de la ligne de symétrie L_0 et des bandes S_0^i

Initialisation multiéchelle fondée sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP)



Résultat : Ensemble de bandes $\{S_0^i\}$

Calcul surface de symétrie par morceaux

Maillage surfacique 3D

Initialisation multiéchelle

Calcul d'une surface de symétrie par morceaux

Calcul des plans de symétrie locaux Π_k pour chaque S_k^i

Calcul de la nouvelle ligne de symétrie L_{k+1}

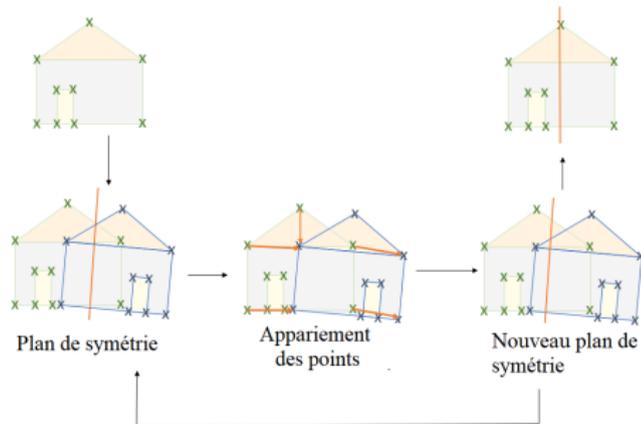
Calcul des nouvelles bandes S_{k+1}^i , orthogonales à L_{k+1}



Obtention de la surface de symétrie par morceaux

Calcul d'une surface de symétrie continue

Détection du plan de symétrie des S_k^i



Résultat : Ensemble de plans de symétrie $\{\Pi_k^i\}$



Combès et al., 2008, Automatic symmetry plane estimation of bilateral objects in point clouds. 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR.



Chetverikov et al., 2002, The Trimmed Iterative Closest Point algorithm. 16th International Conference on Pattern Recognition.

Calcul surface de symétrie par morceaux

Maillage surfacique 3D

Initialisation multiéchelle

Calcul d'une surface de symétrie par morceaux

Calcul des plans de symétrie locaux Π_k^i pour chaque S_k^i

Calcul de la nouvelle ligne de symétrie L_{k+1}

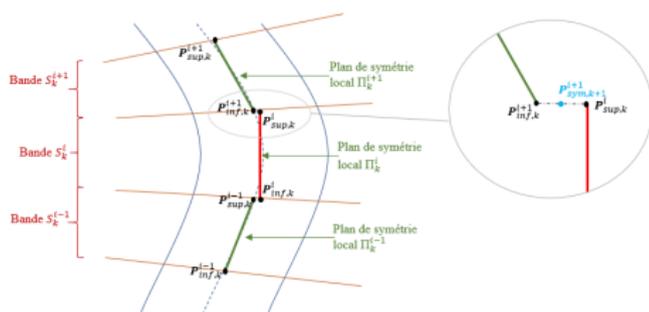
Calcul des nouvelles bandes S_{k+1}^i , orthogonales à L_{k+1}

Obtention de la surface de symétrie par morceaux

Calcul d'une surface de symétrie continue

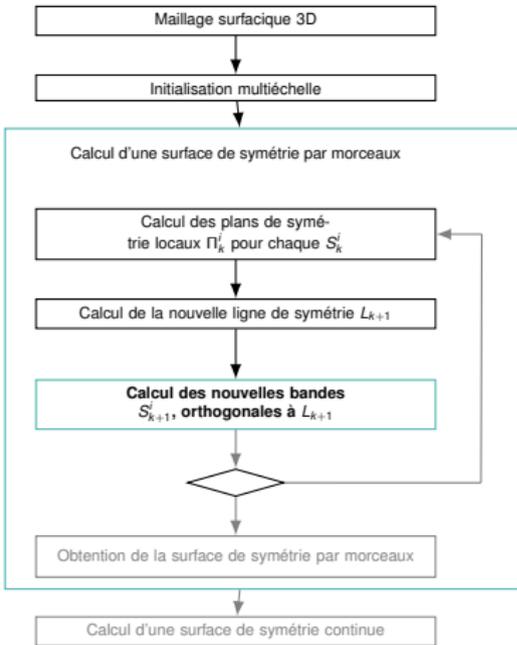
Définition de la ligne de symétrie L_{k+1}

Points de symétrie à l'intersection entre le maillage, $\{\Pi_k^i\}$ et $\{S_k^i\}$



Résultat : Ligne de symétrie $L_{k+1} = \{P_{sym,k+1}^i\}$

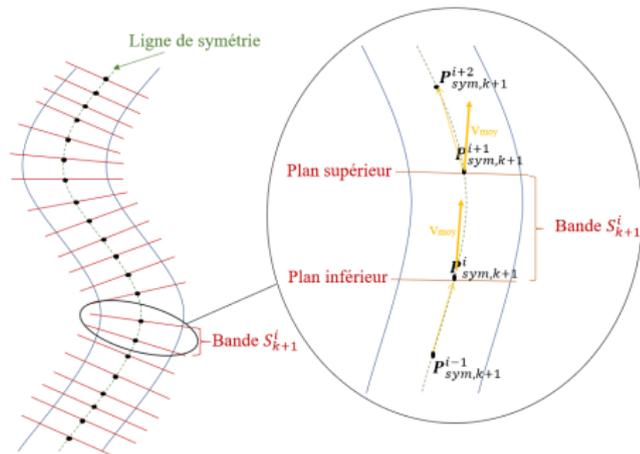
Calcul surface de symétrie par morceaux



Définition des bandes itératives S_{k+1}^i

Sous-maillage compris entre :

- le plan supérieur ($v_{moy}, P_{sym,k+1}^{i+1}$) ;
- le plan inférieur ($v_{moy}, P_{sym,k+1}^i$).



Résultat : Ensemble de bandes itératives $\{S_{k+1}^i\}$

Calcul surface de symétrie par morceaux

Maillage surfacique 3D

Initialisation multiéchelle

Calcul d'une surface de symétrie par morceaux

Calcul des plans de symétrie locaux Π_k^i pour chaque S_k^i

Calcul de la nouvelle ligne de symétrie L_{k+1}

Calcul des nouvelles bandes S_{k+1}^i , orthogonales à L_{k+1}

Obtention de la surface de symétrie par morceaux

Calcul d'une surface de symétrie continue

Itération

Conditions d'arrêt :

- Ligne de symétrie stable
- Nombre maximal d'itérations atteint

Calcul surface de symétrie par morceaux

Maillage surfacique 3D

Initialisation multiéchelle

Calcul d'une surface de symétrie par morceaux

Calcul des plans de symétrie locaux Π_k^i pour chaque S_k^i

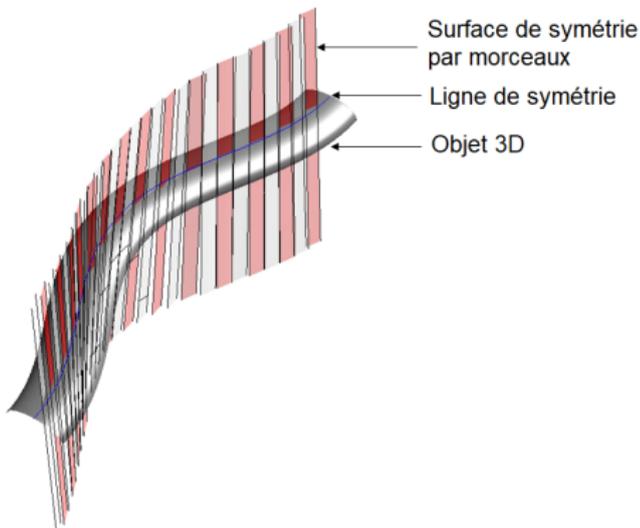
Calcul de la nouvelle ligne de symétrie L_{k+1}

Calcul des nouvelles bandes S_{k+1}^i , orthogonales à L_{k+1}

Obtention de la surface de symétrie par morceaux

Calcul d'une surface de symétrie continue

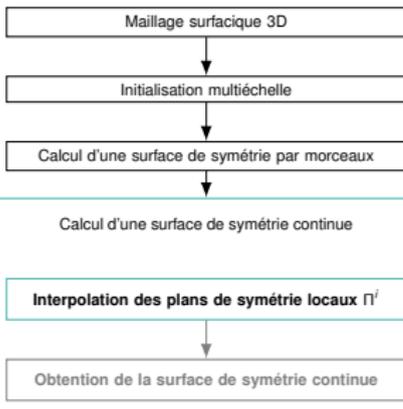
Obtention de la surface de symétrie par morceaux



Résultat :

- Ligne de symétrie $L = \{\mathbf{P}_{sym}^i\}$
- Surface de symétrie par morceaux $S_{sym} = \{\Pi^i\}$

Calcul d'une surface continue

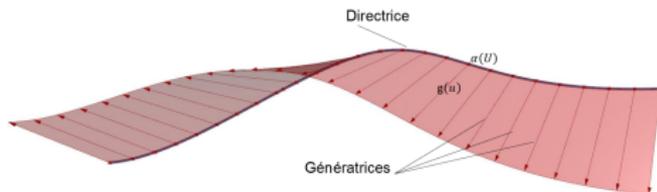


Surface réglée

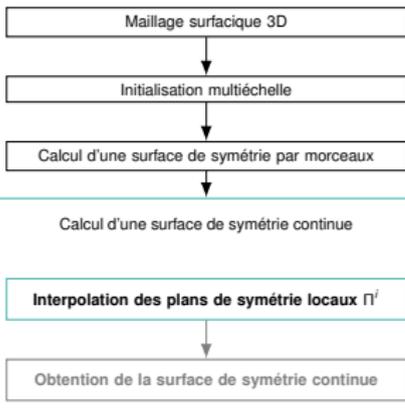
On appelle surface réglée de directrice α et de génératrices $\delta(u)$ la surface engendrée par le mouvement des droites $\delta(u)$ le long de la courbe α .

Représentation paramétrique :

$$\mathbf{M} \in \mathcal{S}, v \in \mathbb{R} \iff \mathbf{M}(u, v) = \alpha(u) + v\mathbf{g}(u)$$

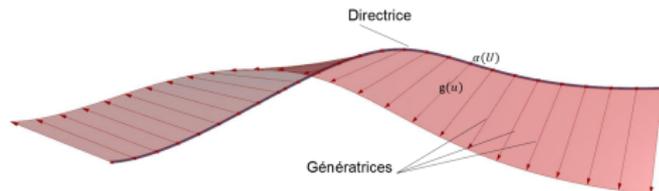


Calcul d'une surface continue



Interpolation des plans de symétrie locaux Π^i

- 1 Directrice : Ligne de symétrie L_k
- 2 Vecteur directeur de \mathbf{g}^i : $\mathbf{g}^i = \mathbf{n}^i \wedge \mathbf{t}^i$
 - \mathbf{n}^i vecteur directeur Π^i
 - \mathbf{t}^i tangente à L_k



Calcul d'une surface continue

Obtention d'une surface continue

Maillage surfacique 3D



Initialisation multiéchelle



Calcul d'une surface de symétrie par morceaux

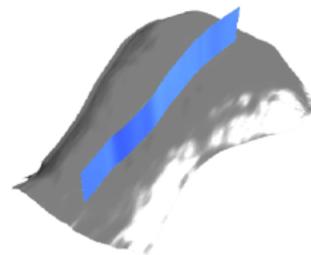
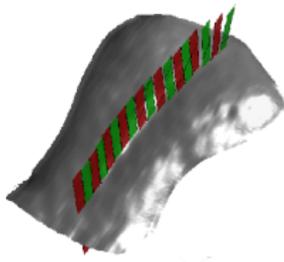


Calcul d'une surface de symétrie continue

Interpolation des plans de symétrie locaux Π^i



Obtention de la surface de symétrie continue



Évaluation de la précision de la détection de S_{sym}

Maillages de structures tubulaires :

- Base : demi-ellipse (20 mm - 10 mm)
- Ligne d'extrusion : $a \sin(x)$

							
RMSD _{lat} (mm)	0,16	0,50	0,64	0,80	0,62	1,10	1,75
RMSD _{depth} (mm)	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,09
Valeur moyenne θ (deg)	0,5	1,3	1,9	2,2	1,8	2,8	4,0

$$* RMSD = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{N}}$$

Évaluation de la précision de la détection de S_{sym}

Maillages de structures tubulaires :

- Base : demi-ellipse (20 mm - 10 mm)
- Ligne d'extrusion : $a \sin(x)$

							
RMSD _{lat} (mm)	0,16	0,50	0,64	0,80	0,62	1,10	1,75
RMSD _{depth} (mm)	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,09
Valeur moyenne θ (deg)	0,5	1,3	1,9	2,2	1,8	2,8	4,0

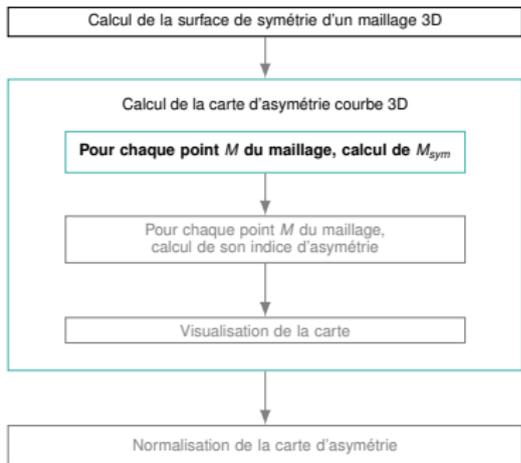
$$* RMSD = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{N}}$$

→ **Bonne précision en cas de fortes et de multiples courbures**

Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Surface de symétrie
- 3 Carte d'asymétrie**
- 4 Application à la scoliose
- 5 Vers une modélisation du rachis
- 6 Conclusion et perspectives

Calcul d'une carte 3D d'asymétrie courbe

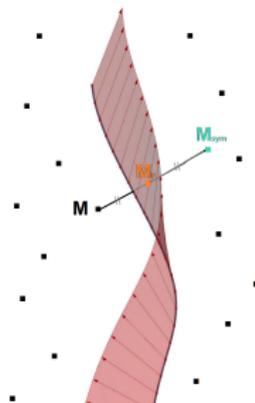


Calcul de M_{sym}

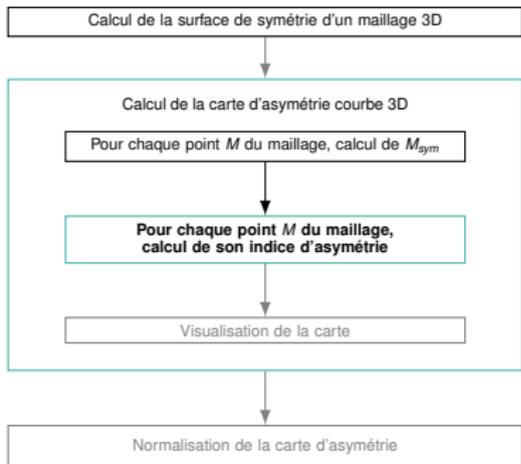
- $M_p(u_p, v_p)$ projeté de \mathbf{M} sur S_{sym} :

$$(u_p, v_p) = \underset{(u, v)}{\operatorname{argmin}} \operatorname{dist}(S(u, v), \mathbf{M})$$

- Calcul de M_{sym} par $M_{sym} = 2MM_p$

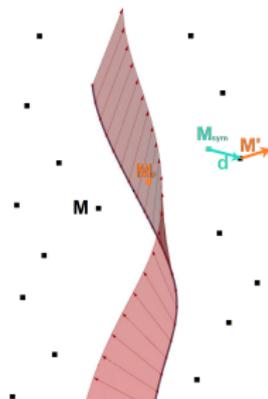


Calcul d'une carte 3D d'asymétrie courbe



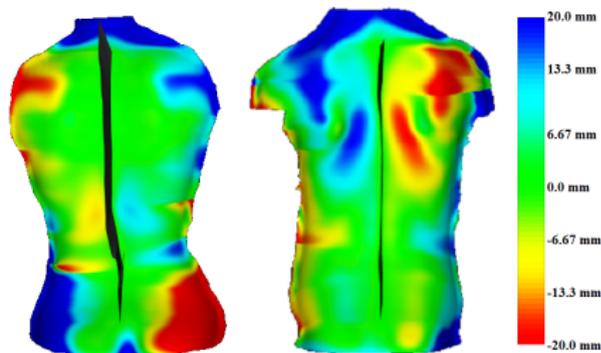
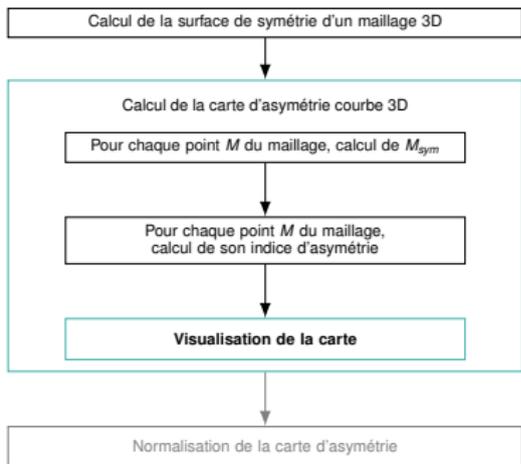
Calcul de l'indice d'asymétrie en chaque point M du maillage

- Pour chaque M_{sym} calculé, recherche du point M' le plus proche M_{sym}
- Calcul de l'indice d'asymétrie comme la distance signée entre M_{sym} et M'



Calcul d'une carte 3D d'asymétrie courbe

Visualisation



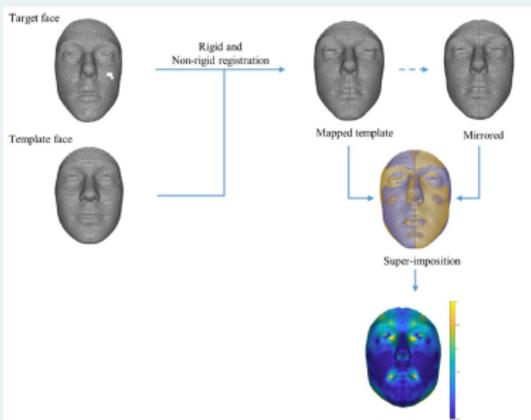
Problématique

Objectif : avoir une carte qui permet la comparaison entre patients et/ou dans le temps) ⇒ **Proposition** : calculer une carte d'asymétrie redressée et normalisée

Problématique

Objectif : avoir une carte qui permet la comparaison entre patients et/ou dans le temps) ⇒ **Proposition** : calculer une carte d'asymétrie redressée et normalisée

Méthodes fondées sur un maillage de référence



Ekrami et al., 2018, Measuring asymmetry from high-density 3D surface scans : An application to human faces. PLoS ONE.



Rolfe et al., 2018, Associations Between Genetic Data and Quantitative Assessment of Normal Facial Asymmetry. Frontiers in Genetics.

Calcul carte 2D d'asymétrie redressée et normalisée

Calcul de la surface de symétrie d'un maillage 3D

Calcul de la carte d'asymétrie courbe 3D

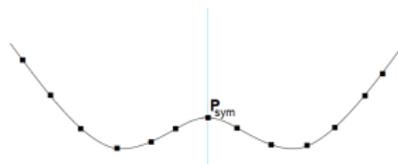
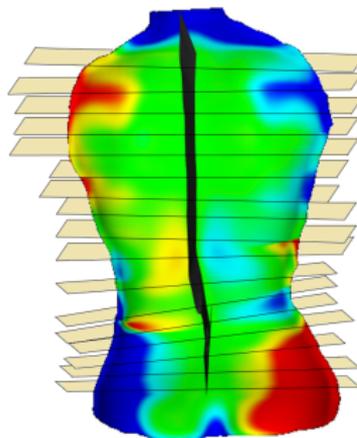
Normalisation de la carte d'asymétrie

Définition des plans de coupes $P_{C,K}$

Centrage et mise à plat des coupes d'asymétries

Visualisation de la carte

Définition des plans de coupes



Calcul carte 2D d'asymétrie redressée et normalisée

Calcul de la surface de symétrie d'un maillage 3D

Calcul de la carte d'asymétrie courbe 3D

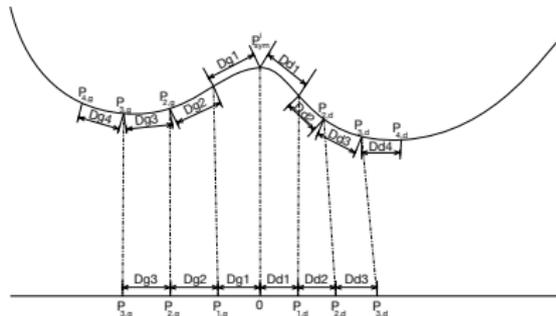
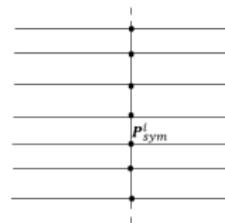
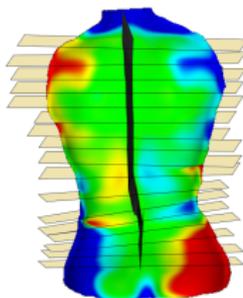
Normalisation de la carte d'asymétrie

Définition des plans de coupes $P_{C,K}$

Centrage et mise à plat des coupes d'asymétries

Visualisation de la carte

Centrage et mise à plat d'une coupe d'asymétrie



Calcul carte 2D d'asymétrie redressée et normalisée

Calcul de la surface de symétrie d'un maillage 3D

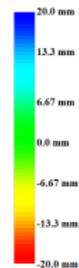
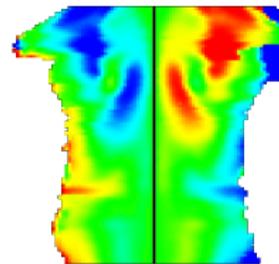
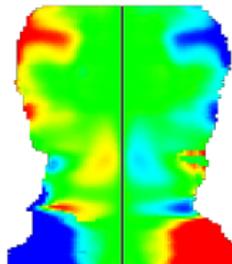
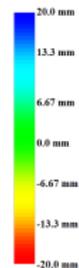
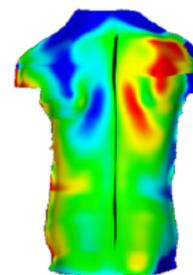
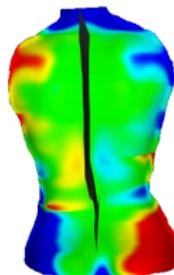
Calcul de la carte d'asymétrie courbe 3D

Normalisation de la carte d'asymétrie

Définition des plans de coupes $P_{C,K}$

Centrage et mise à plat des coupes d'asymétries

Visualisation de la carte

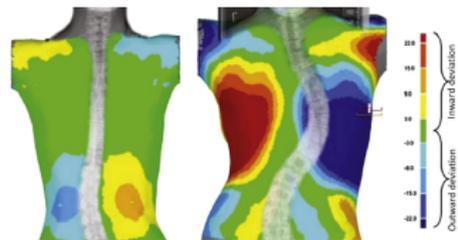
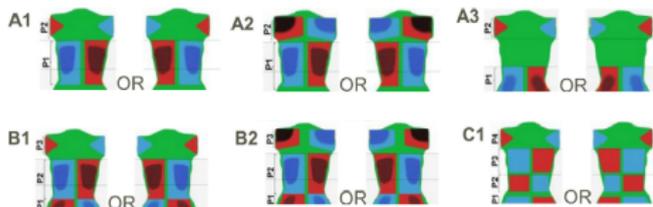


Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Surface de symétrie
- 3 Carte d'asymétrie
- 4 Application à la scoliose**
- 5 Vers une modélisation du rachis
- 6 Conclusion et perspectives

Carte d'asymétrie du dos et scoliose

- Catégorisation visuelle des déformations du dos
- Évaluation quantitative des déformations du dos
- Corrélation radiographie - surface du dos
- Suivi des déformations du dos



Komeili et al., 2014, Surface topography asymmetry maps categorizing external deformity in scoliosis. Spine Journal.



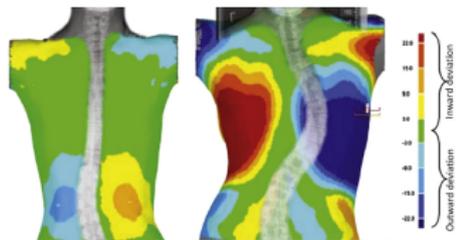
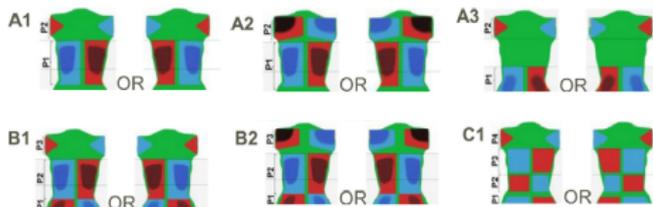
Komeili et al., 2015, Correlation Between a Novel Surface Topography Asymmetry Analysis and Radiographic Data in Scoliosis. Spine Deformity.



Komeili et al., 2015, Monitoring for idiopathic scoliosis curve progression using surface topography asymmetry analysis of the torso in adolescents. Spine Journal.

Carte d'asymétrie du dos et scoliose

- Catégorisation visuelle des déformations du dos
- Évaluation quantitative des déformations du dos
- Corrélation radiographie - surface du dos
- Suivi des déformations du dos



Komeili et al., 2014, Surface topography asymmetry maps categorizing external deformity in scoliosis. Spine Journal.



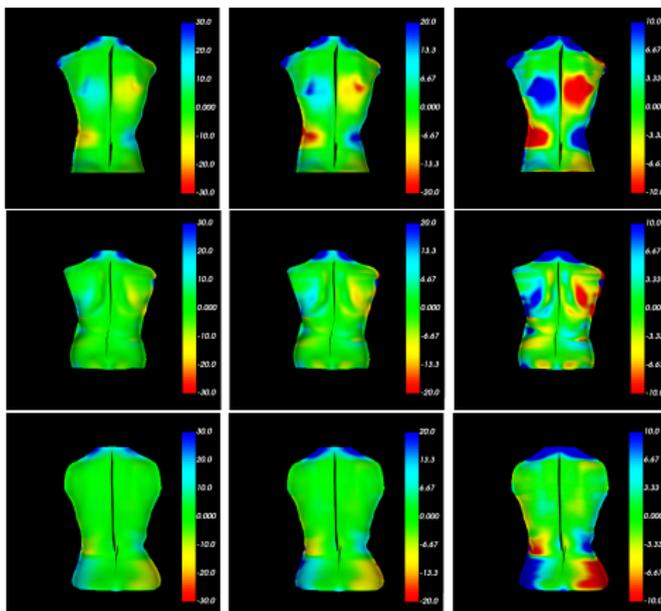
Komeili et al., 2015, Correlation Between a Novel Surface Topography Asymmetry Analysis and Radiographic Data in Scoliosis. Spine Deformity.



Komeili et al., 2015, Monitoring for idiopathic scoliosis curve progression using surface topography asymmetry analysis of the torso in adolescents. Spine Journal.

→ **La carte d'asymétrie courbe peut-elle améliorer les résultats ?**

Études des seuils de normalité



Ghaneei et al.
 $[-9, 33 \text{ mm} ; 9, 33 \text{ mm}]$

Notre proposition
 $[-6, 67 \text{ mm} ; 6, 67 \text{ mm}]$

Komeili et al.
 $[-3, 33 \text{ mm} ; 3, 33 \text{ mm}]$

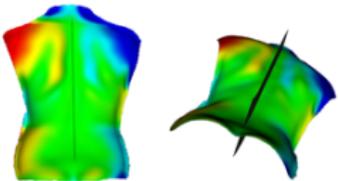
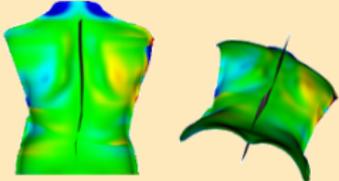
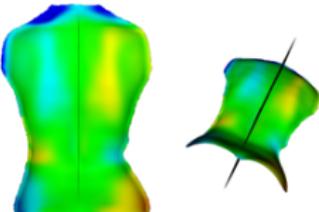
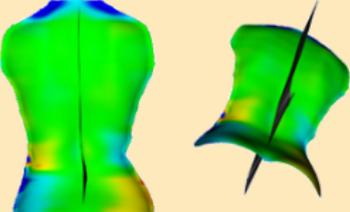
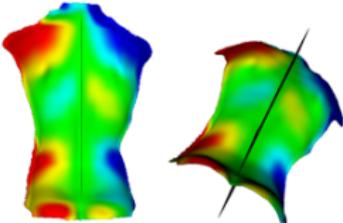
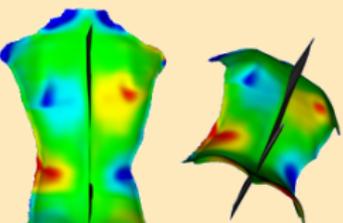


Komeili et al., 2014, Surface topography asymmetry maps categorizing external deformity in scoliosis. Spine Journal.



Ghaneei et al., 2018, 3D Markerless asymmetry analysis in the management of AIS. BMC Musculoskeletal Disorders.

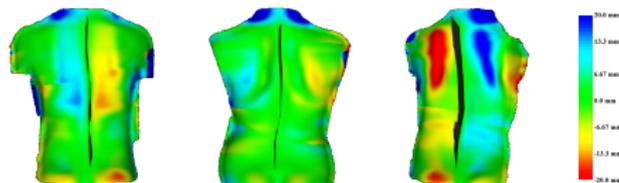
Carte d'asymétrie plane et courbe

	Carte d'asymétrie plane	Carte d'asymétrie courbe
Patient 1 atteint d'une scoliose thoracique		
Patient 2 atteint d'une scoliose lombaire		
Patient 3 atteint d'une scoliose double		

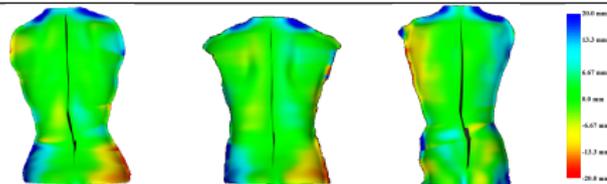
Catégorisation de la scoliose

- Collaboration avec le CHU de Toulouse \Rightarrow **112 acquisitions surfaciques** de patients scoliotiques (21 T, 15 TL, 25 L, 51 D)

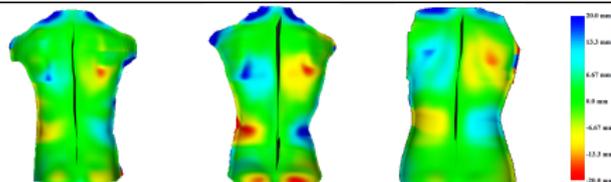
Scoliose thoracique



Scoliose lombaire

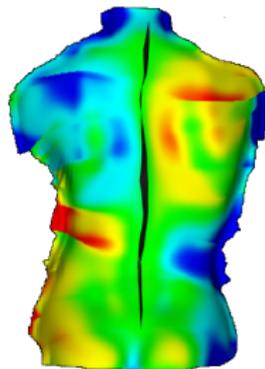


Scoliose double

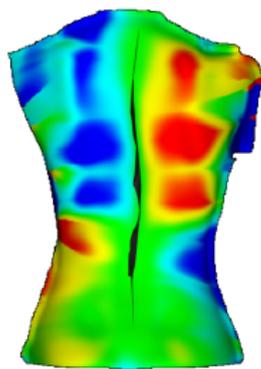


Étude des évolutions des asymétries

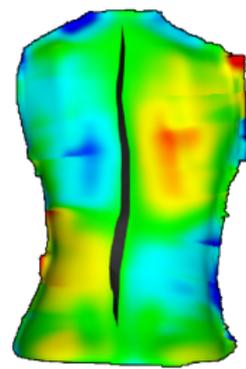
Suivi d'un patient féminin de 12 ans sur 1 an



Diagnostic à t_0 :
scoliose thoracique
angle de Cobb de 24°



Diagnostic à $t_0 + 6$ mois :
scoliose thoracique
angle de Cobb de 30°



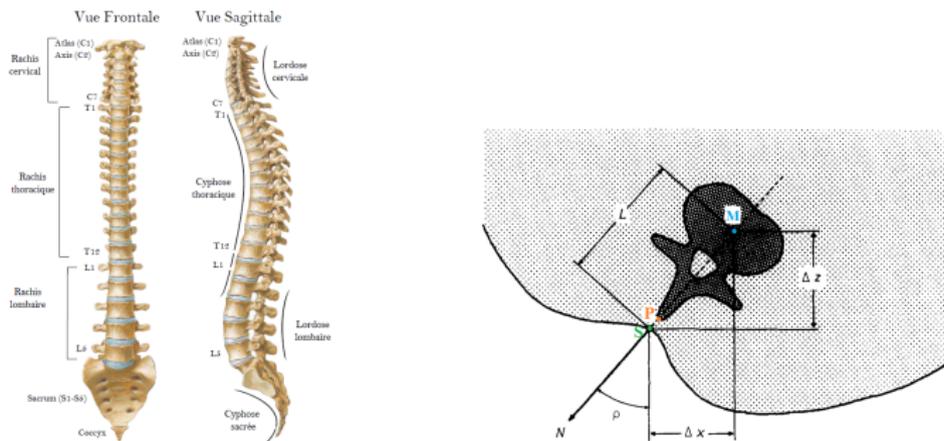
Diagnostic à $t_0 + 1$ an :
scoliose double
angles de Cobb de 24° et 22°

Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Surface de symétrie
- 3 Carte d'asymétrie
- 4 Application à la scoliose
- 5 Vers une modélisation du rachis
- 6 Conclusion et perspectives

Modélisation 3D

Modélisation 3D du rachis à partir de la surface du dos et de sa ligne de symétrie



Turner-Smith et al., 1988, A method for analysis of back shape in scoliosis. *Journal of Biomechanics*.

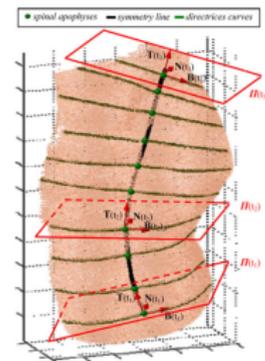
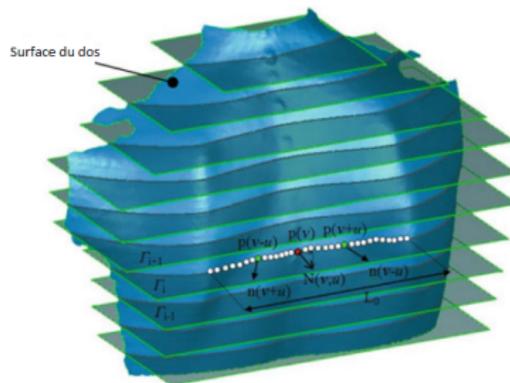


Drerup, 2014, Rasterstereographic measurement of scoliotic deformity. *Scoliosis*.

Détection de la ligne des épineuses : état de l'art

- Méthode cutanée : Méthode de référence
- Méthodes basées sur des sections parallèles ou adaptatives

Limites : peu robustes aux déformations importantes et aux zones plates

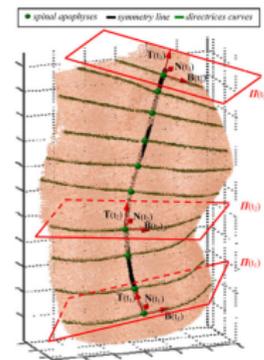
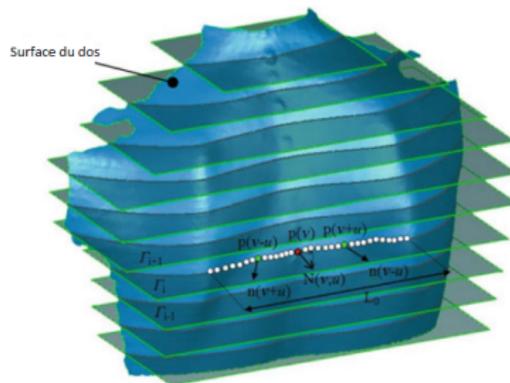


Cappetti et al., 2018, On methods to identify the symmetry line of human back. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM).

Détection de la ligne des épineuses : état de l'art

- Méthode cutanée : Méthode de référence
- Méthodes basées sur des sections parallèles ou adaptatives

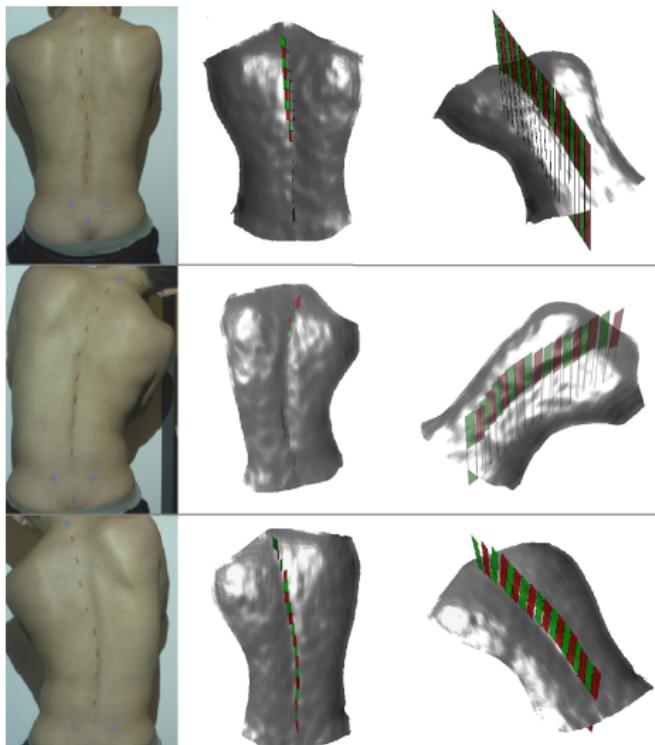
Limites : peu robustes aux déformations importantes et aux zones plates



Cappetti et al., 2018, On methods to identify the symmetry line of human back. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM).

→ **La surface de symétrie du dos peut-elle améliorer les résultats ?**

Détection de la ligne des épineuses



Détection de la ligne des épineuses : validation

- Comparaison ligne automatique - ligne cutanée (moyenne \pm écart type)
- Évaluation de l'influence de la déformation

	Nombre de patients 112	Nombre de patients / [Angle de Cobb]		
		22/ [5° – 15°]	68/[15° – 25°]	22/[25° – 54°]
RMSD_{lat} (mm)	4,82 \pm 1,81	4,54 \pm 1,90	4,89 \pm 1,97	4,91 \pm 1,08
RMSD_{depth} (mm)	0,69 \pm 0,34	0,58 \pm 0,33	0,71 \pm 0,34	0,73 \pm 0,34
MDE (mm)	5,8 \pm 2,28	5,57 \pm 2,43	5,89 \pm 2,44	5,84 \pm 1,47

$$* RMSD = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{N}}$$

$$* MDE = \frac{1}{N} \sum |P' - P|$$



Bolzinger, 2017, Évaluation de la topographie de surface pour la surveillance des patients scoliotiques. PhD Thesis.



Fidler et al., 1984, Repeatability of Isis analysis in normal subjects. Annual Report of the Oxford Orthopaedic Engineering Centre.

Détection de la ligne des épineuses : validation

- Comparaison ligne automatique - ligne cutanée (moyenne \pm écart type)
- Évaluation de l'influence de la déformation

	Nombre de patients 112	Nombre de patients / [Angle de Cobb]		
		22 / [5° – 15°]	68 / [15° – 25°]	22 / [25° – 54°]
RMSD_{lat} (mm)	4,82 \pm 1,81	4,54 \pm 1,90	4,89 \pm 1,97	4,91 \pm 1,08
RMSD_{depth} (mm)	0,69 \pm 0,34	0,58 \pm 0,33	0,71 \pm 0,34	0,73 \pm 0,34
MDE (mm)	5,8 \pm 2,28	5,57 \pm 2,43	5,89 \pm 2,44	5,84 \pm 1,47

$$* RMSD = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{N}}$$

$$* MDE = \frac{1}{N} \sum |P' - P|$$



Bolzinger, 2017, Évaluation de la topographie de surface pour la surveillance des patients scoliotiques. PhD Thesis.



Fidler et al., 1984, Repeatability of Isis analysis in normal subjects. Annual Report of the Oxford Orthopaedic Engineering Centre.

→ **Détection robuste aux faibles comme aux fortes déformations**

Détection de la ligne des épineuses : validation

- Comparaison ligne automatique - ligne cutanée (moyenne \pm écart type)
- Évaluation de l'influence de la déformation

	Nombre de patients 112	Nombre de patients / [IMC]		
		42 / [14 – 17]	58 / [17 – 19]	19 / [19 – 22]
RMSD_{lat} (mm)	4,82 \pm 1,81	4,88 \pm 1,71	4.84 \pm 1,95	4.45 \pm 1,36
RMSD_{depth} (mm)	0,69 \pm 0,34	0,72 \pm 0,34	0,67 \pm 0,33	0,74 \pm 0,36
MDE (mm)	5,8 \pm 2,28	5,91 \pm 2,28	5,77 \pm 2,37	5,59 \pm 1,77

$$* RMSD = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{N}}$$

$$* MDE = \frac{1}{N} \sum |P' - P|$$



Bolzinger, 2017, Évaluation de la topographie de surface pour la surveillance des patients scoliotiques. PhD Thesis.



Fidler et al., 1984, Repeatability of Isis analysis in normal subjects. Annual Report of the Oxford Orthopaedic Engineering Centre.

Détection de la ligne des épineuses : validation

- Comparaison ligne automatique - ligne cutanée (moyenne \pm écart type)
- Évaluation de l'influence de la déformation

	Nombre de patients 112	Nombre de patients / [IMC]		
		42 / [14 – 17]	58 / [17 – 19]	19 / [19 – 22]
RMSD_{lat} (mm)	4,82 \pm 1,81	4,88 \pm 1,71	4.84 \pm 1,95	4.45 \pm 1,36
RMSD_{depth} (mm)	0,69 \pm 0,34	0,72 \pm 0,34	0,67 \pm 0,33	0,74 \pm 0,36
MDE (mm)	5,8 \pm 2,28	5,91 \pm 2,28	5,77 \pm 2,37	5,59 \pm 1,77

$$* RMSD = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{N}}$$

$$* MDE = \frac{1}{N} \sum |P' - P|$$



Bolzinger, 2017, Évaluation de la topographie de surface pour la surveillance des patients scoliotiques. PhD Thesis.

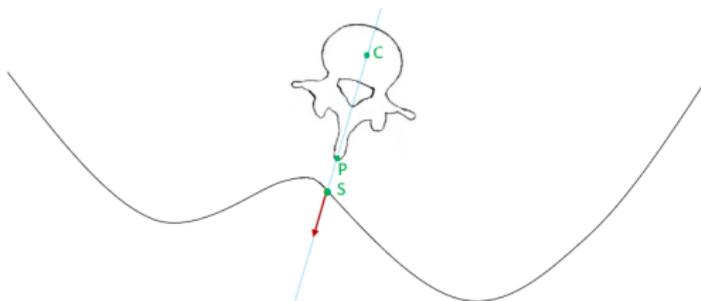


Fidler et al., 1984, Repeatability of Isis analysis in normal subjects. Annual Report of the Oxford Orthopaedic Engineering Centre.

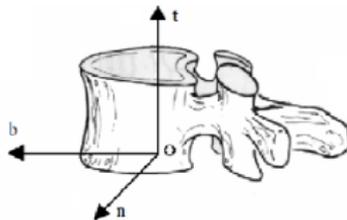
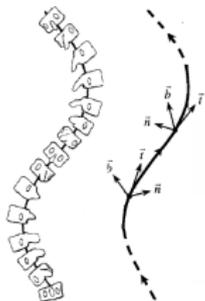
→ **Détection robuste aux différentes morphologies**

Calcul des rotations vertébrales

Notre hypothèse : La surface de symétrie passe par **C**, **P** et **S**

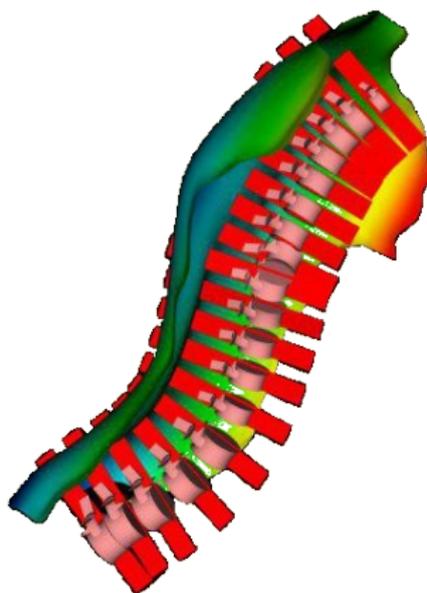


- Rotation axiale (dans le plan horizontal) : vecteur normal \mathbf{n} à S_{sym}
- Rotation avant/arrière (dans le plan sagittal) : tangente \mathbf{t} à la ligne de symétrie
- Rotation latérale (dans le plan frontal) : $\mathbf{b} = \mathbf{n} \wedge \mathbf{t}$



Vers une modélisation 3D du rachis

Modélisation complète 3D du rachis à partir de la surface de symétrie, avec application du facteur de taille sur le modèle des vertèbres.

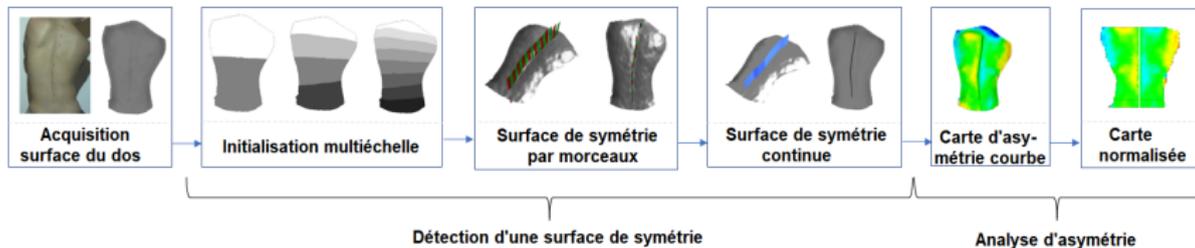


Sommaire

- 1 Contexte
- 2 Surface de symétrie
- 3 Carte d'asymétrie
- 4 Application à la scoliose
- 5 Vers une modélisation du rachis
- 6 Conclusion et perspectives

Bilan

- 1 Surface de symétrie
- 2 Carte d'asymétrie
- 3 Évaluation des déformations des dos scoliotiques
- 4 Modélisation 3D du rachis



Morand et al., 2018, Automatic Extraction of a Piecewise Symmetry Surface of a 3D Mesh : Application to Scoliosis. Workshop ShapeMI : Shape In Medical Imaging, associated to Medical Image Computing Assisted Intervention Conference (MICCAI).



Morand et al., 2018, Automatic extraction of the 3D symmetry line of back surface : application on scoliotic adolescents. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.



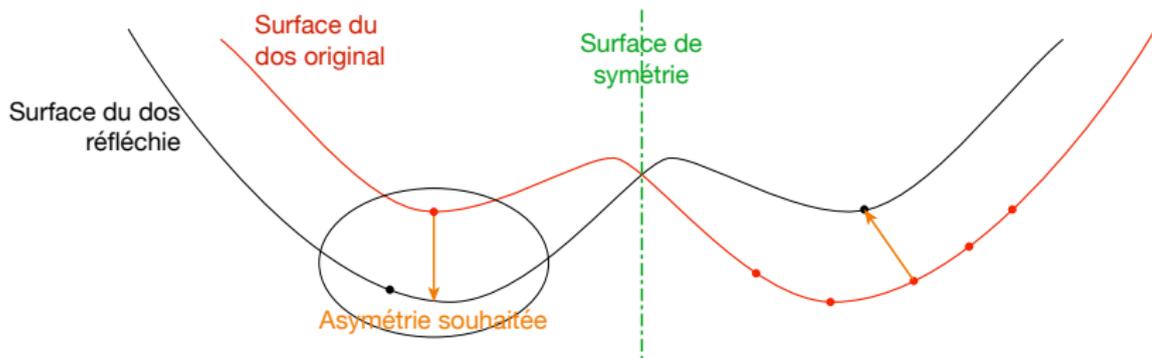
Morand et al., 2017, 3D symmetry line and the torsion application to scoliosis. Surgetica.



Morand et al., 2019, Curved symmetry analysis of back shape for scoliosis categorisation and follow-up. Medical Image Analysis (en cours de soumission).

Perspectives : Détection surface de symétrie

- Évaluation de la robustesse de la détection en fonction de l'ajout de bruit, de points aberrants et de données manquantes
- Fonction d'appariement des points
⇒ Utilisation des normales
- Étude d'autres méthodes de détection de symétries ([Mitra *et al.*,2006], [Kazhdan *et al.*,2004]...)



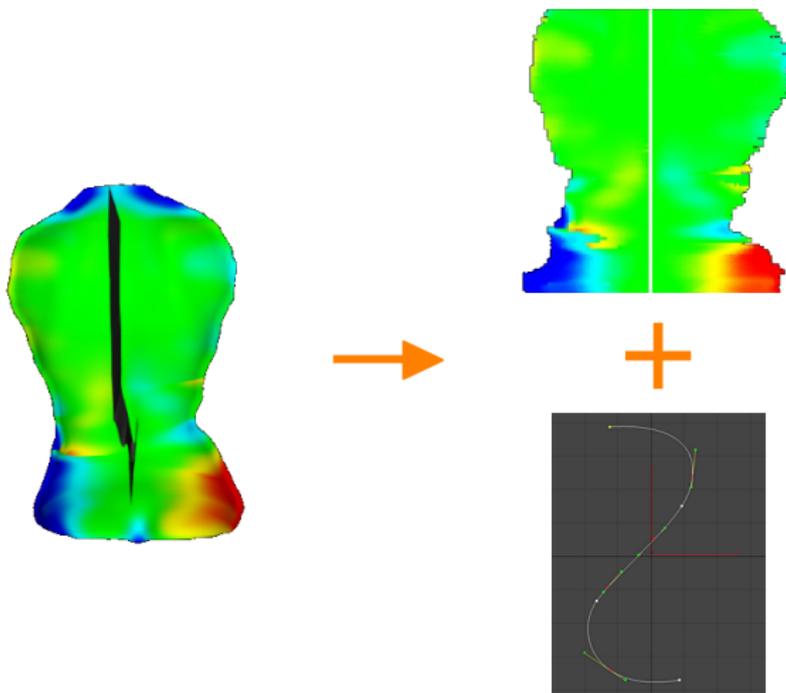
Kim *et al.*, 2015, Bidirectional local distance measure for comparing segmentations Bidirectional local distance measure for comparing segmentations. *Medical Physics*.



Mitra *et al.*, 2013, Symmetry in 3D Geometry : Extraction and Applications. *Computer Graphics*.

Perspectives : Évaluation de l'asymétrie

Comment décorréler l'analyse de la carte d'asymétrie 2D et de la ligne de symétrie 3D ?



Perspectives médicales

- Étude des différentes postures



Pazos et al., 2008, Analysis of trunk external asymmetry in side-bending. *Studies in health technology and informatics*.

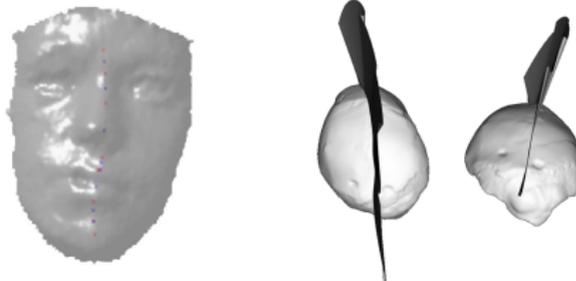
Perspectives médicales

- Étude des différentes postures



Pazos et al., 2008, Analysis of trunk external asymmetry in side-bending. *Studies in health technology and informatics*.

- Études d'autres structures anatomiques



Putnam et al., 1993, Facial scoliosis- a diagnostic dilemma. *International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*.



Beaudet et al., 2018, The endocranial shape of *Australopithecus africanus* : surface analysis of the endocasts of Sts 5 and Sts 60. *Journal of Anatomy*.

Surface de symétrie d'une structure 3D :
application à l'étude des déformations scoliotiques du dos

Merci pour votre attention. Place à vos questions et remarques.

