

Développement cervico-cranial-facial chez l'Homme : du fœtus à l'adulte



Méthodes morphométriques 3D pour l'étude de la croissance des structures cranio-faciales

Gérard Subsol, CNRS/LIRMM, Montpellier

mars 2012

G. Subsol - LIRMM - mars 2012

0. Obtention de données 3D...+t

Problème 1 : Comment obtenir des données temporelles pour l'étude 3D de la croissance des structures cranio-faciales ?

Modalité d'acquisition privilégié : scanner X pour voir l'os

1. **Idéalement** : même sujet à plusieurs instants

Mais :

1. Irradiant
2. D'autant plus chez des enfants... chez qui on veut étudier la croissance...
3. Et il ne faut pas bouger, ce qui peut poser problème pour les bébés (contention ou sédation)

Donc pas d'exams et/ou une précision ou ROI insuffisante (pas toute la tête) et/ou des cas pathologiques (fracture, déformations congénitales, problèmes d'orthodontie grave)...

Dans le futur, est-ce que le CBCT peut améliorer cette situation ?

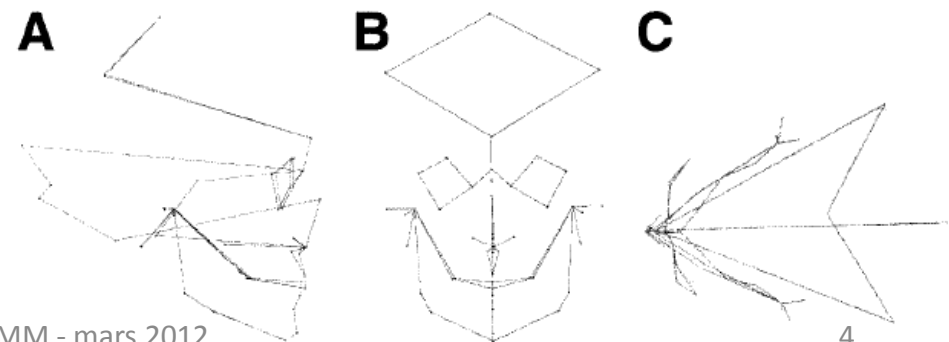
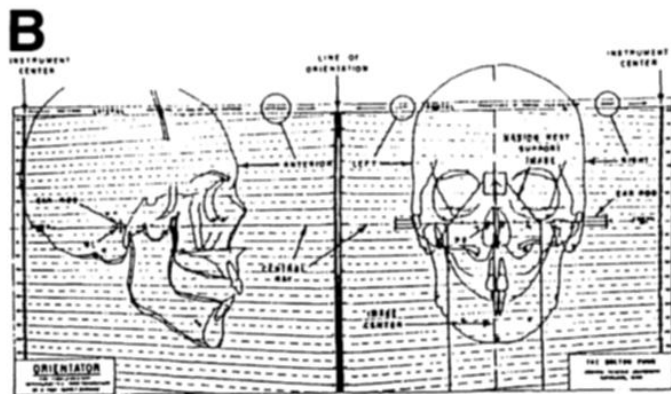
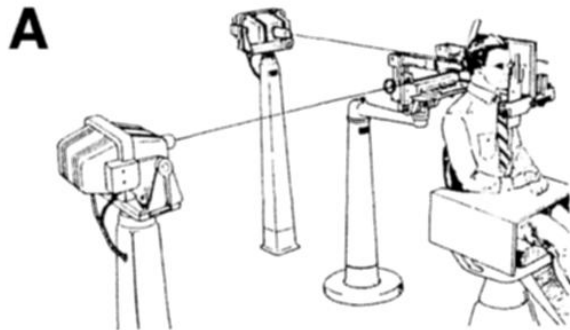
Problème 1 : Comment obtenir des données temporelles pour l'étude 3D de la croissance des structures cranio-faciales ?

2. Passer de données 2D+t à 3D+t

(ex. Bolton Brush Growth Study 1927-1959 – 4309 sujets !)

Three-Dimensional Bolton–Brush Growth Study Landmark Data: Ontogeny and Sexual Dimorphism of the Bolton Standards Cohort

DAVID DEAN, PH.D.
 MARK G. HANS, M.S.D., D.D.S.
 FRED L. BOOKSTEIN, PH.D.
 KRISHNA SUBRAMANYAN, B.ENG., M.ENG., PH.D.



G. Subsol - LIRMM - mars 2012

Problème 1 : Comment obtenir des données temporelles pour l'étude 3D de la croissance des structures cranio-faciales ?

3. Utilisation de données transversales (cross section study)

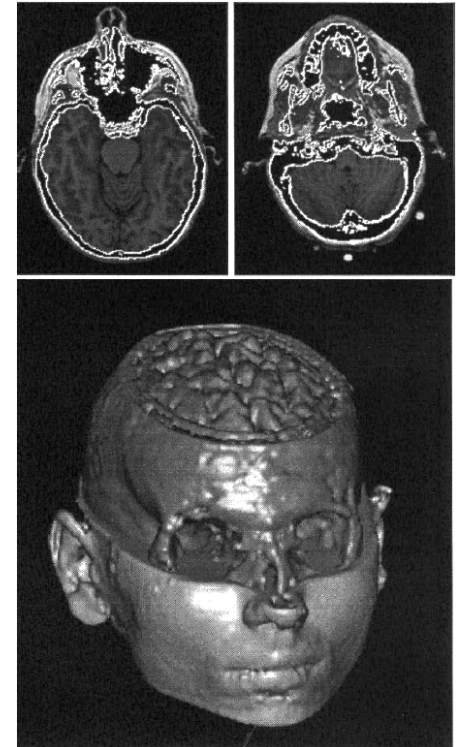
- Interférence de la variabilité inter-individuelle avec la croissance ?

4. Modèle animal

- Impossible de trouver des données de primate... ?
- Et même de rongeur alors que c'est faisable au μ -scan.

5. Autres modalités d'acquisition 3D moins ou non invasives

- IRM mais acquisition longue
- Et on ne voit pas l'os \rightarrow segmentation



Problème 1 : Comment obtenir des données temporelles pour l'étude 3D de la croissance des structures cranio-faciales ?

5. Autres modalités d'acquisition 3D moins ou non invasives

- Ultrasons : image floue et limitée en 3D
- Surfactive : rapide (stéréo) mais ne permet pas de voir les structures osseuses...

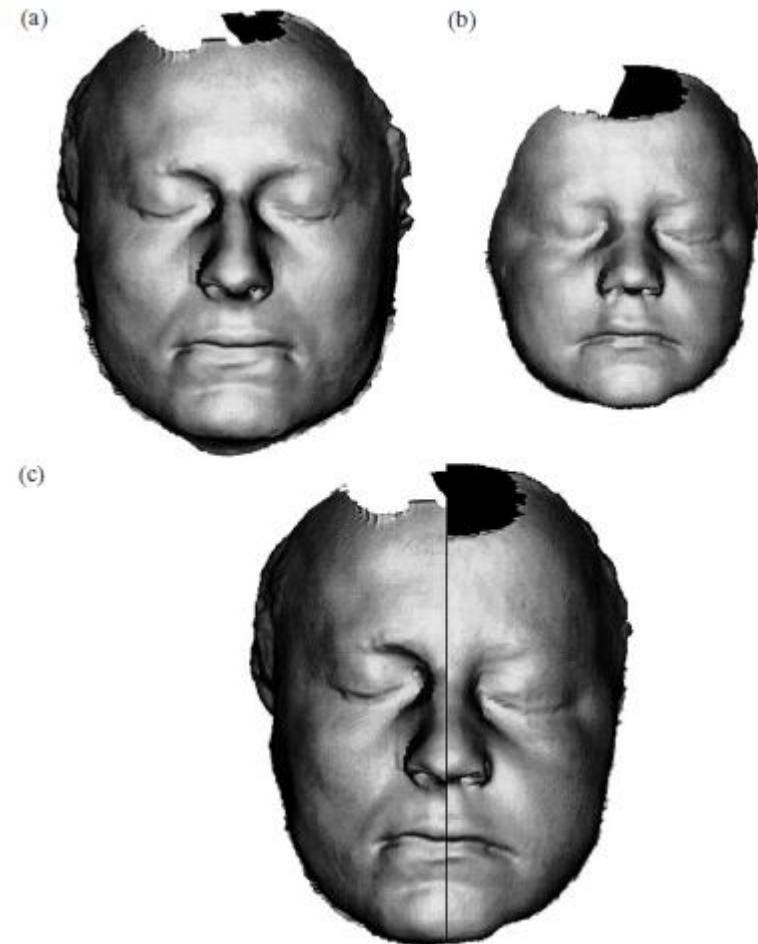


Figure 1 Subject A, aged (a) 22 and (b) 6 years plotted to same scale. (c) Composite image with Subject A aged 22 (left) and aged 6 years (right) plotted to same size.

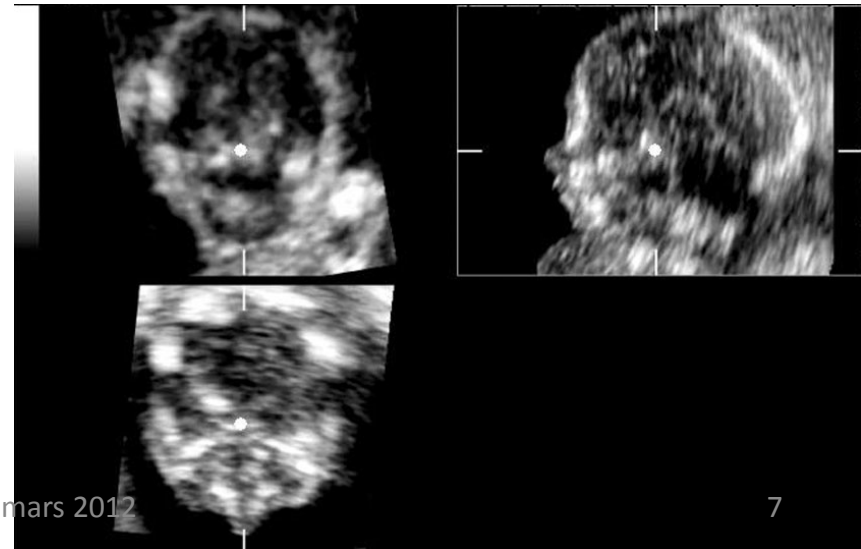
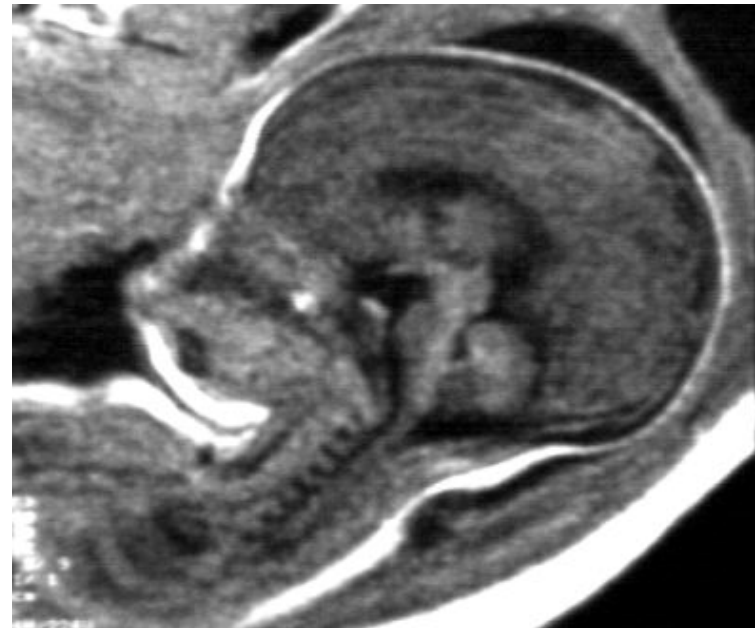
Problème 2 : Comment corrélater les données anté et post-natales ?

Avant la naissance :

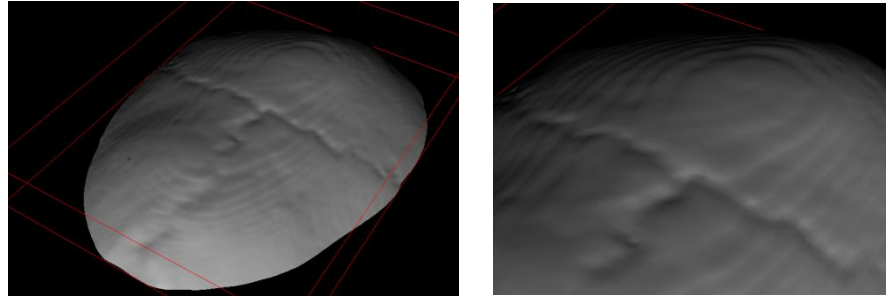
- Ultrasons 3D
- IRM

Où placer le zéro ?

Y-a-t-il une « discontinuité » de croissance à la naissance ?

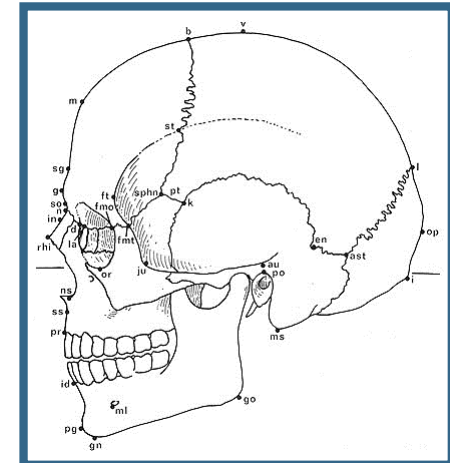


1. Définition des landmarks pour la morphométrie 3D

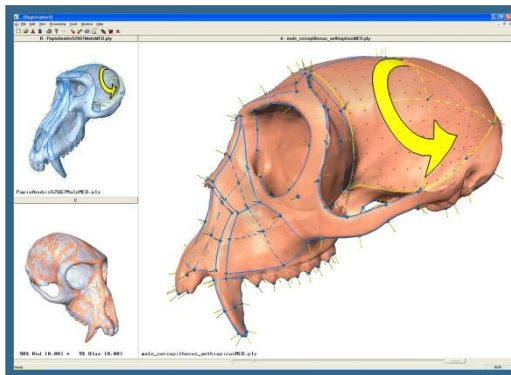


⇒ Difficultés dans la définition des points de repère

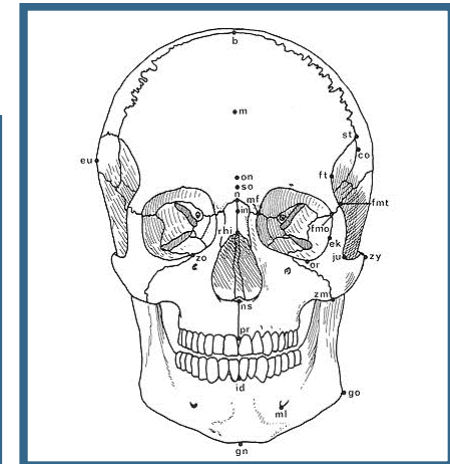
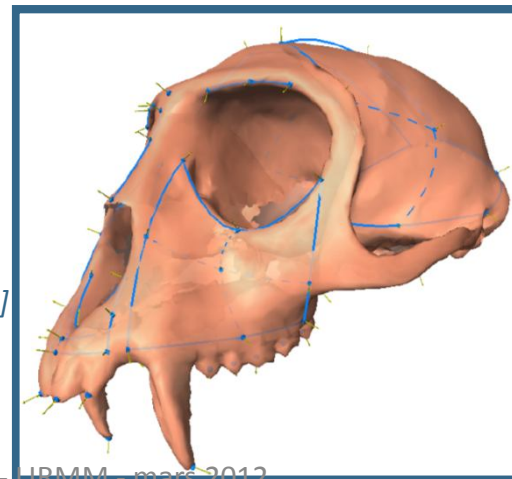
Type I	Définition structurelle	<ul style="list-style-type: none"> • expertise nécessaire • imprécision de localisation • variabilité interindividuelle • limités en nombre
Type II	Définition géométrique	<ul style="list-style-type: none"> • signification anatomique ?
Type III	Définition non locale	<ul style="list-style-type: none"> • définition non absolue



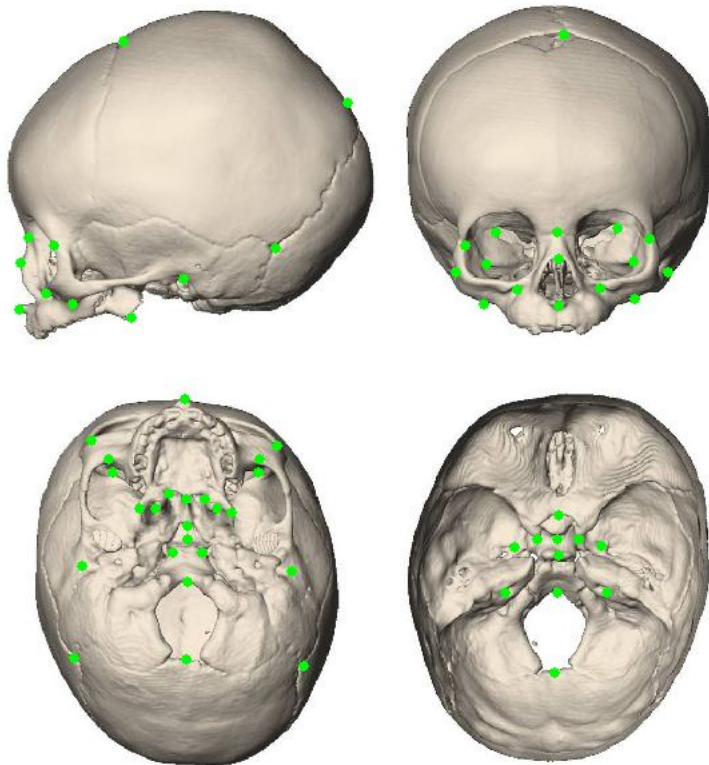
⇒ Placement manuel de quelques dizaines de points avec assistance informatisée



[D. Wiley et al. "Evolutionary Morphing". IEEE Visualization, 2005]



[R. Martin, K. Saller. "Lehrbuch der Anthropologie", 1957]



```

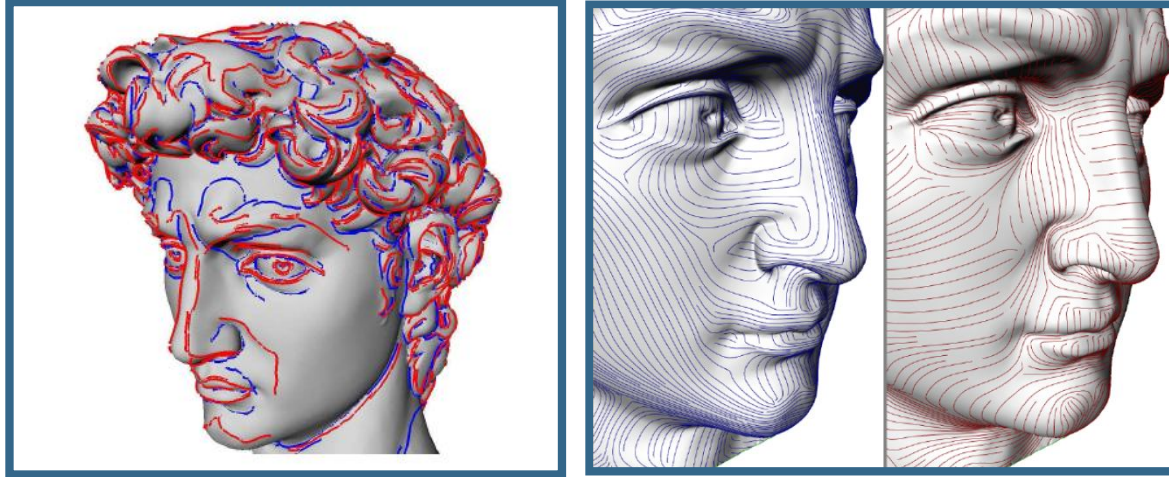
2 lacp:left anterior clinoid process
3 rast:right asterion
4 last:left asterion
5 bas2:basion-taken endocranially but placing point as inferior as possible
6 dor:dorsum sellae-midline point of dorsum sellae
7 rfov:right foramen ovale-medial point on longitudinal axis of foramen, endocranial
8 lfov:left foramen ovale-medial point on longitudinal axis of foramen, endocranial
9 vsj:vomero sphenoid junction-taken on vomer
10 riam:right internal auditory meatus-postero-lateral point
11 liam:left internal auditory meatus-postero-lateral point
12 opi2:opisthion-taken endocranially but placing point as inferior as possible
13 pns:posterior nasal spine
14 rptgh:right pterigoid hamulus
15 lptgh:left pterigoid hamulus
16 sella:sellae fossa hypophysialis-midline point of sellae fossa hypophysialis
17 rasof2:right fissura orbitalis superior-right anterior superior orbital fissure (from anterior view)
18 rfoi:right fissura orbitalis inferior-right sphenozygomatic suture of inferior orbital fissure (from anterior view)
19 lasof2:left fissura orbitalis superior-left anterior superior orbital fissure (from anterior view)
20 lfoi:left fissura orbitalis inferior-left sphenozygomatic suture of inferior orbital fissure (from anterior view)
21 rif:right foramen infra orbitary-take the most superior if many, mark inferolaterally
22 lif:left foramen infra orbitary-take the most superior if many, mark inferolaterally
23 rfz:right sutura fronto zygomatic-right fronto-zygomatic junction at orbital rim
24 lfz:left sutura fronto zygomatic-left fronto-zygomatic junction at orbital rim
25 nas:nasion-superior intersection of nasals
26 nal:nasale-inferior point between nasals
27 ans:anterior nasal spine
28 rzmi2:right zygomaxillare inferior-taken on notch-most inferior point in anterior view
29 lzmi2:left zygomaxillare inferior-taken on notch-most inferior point in anterior view
30 brg:bregma-if open, project sutures and place where they would meet
31 lam:lambda-if open, project sutures and place where they would meet
32 rsyn:right spheno-occipital synchondrosis-most antero-lateral point of the sheno-occipital synchondrosis taken on the occipital (ventral view)
33 lsyn:left spheno-occipital synchondrosis-most antero-lateral point of the sheno-occipital synchondrosis taken on the occipital (ventral view)
34 rpns:right posterior angulation on palatine plate-most lateral angulation/corner at posterior edge of palatine plate (from ventral view)
35 lpns:left posterior angulation on palatine plate-most lateral angulation/corner at posterior edge of palatine plate (from ventral view)
36 rpp:right lamina lateralis, processus pterigoid-most postero-inferior point (from ventral view)
37 lpp:left lamina lateralis, processus pterigoid-most postero-inferior point (from ventral view)
38 psph:Post sphenoid-most postero-medial point on body of the sphenoid (from ventral view)
39 cpsh:chiasmatic sulcus on presphenoid-antieriormost point of indentation in center of presphenoid (from dorsal view)
40 reams:right external auditory meatus-lateral point on the horizontal canal roof
41 leams:left external auditory meatus-lateral point on the horizontal canal roof

```

Reset Show All

Comment séparer les erreurs de positionnement des landmarks de la variabilité de la forme ?

⇒ Gros potentiel dans la définition automatique de points/lignes de repère 3D de type II à l'aide de la géométrie différentielle

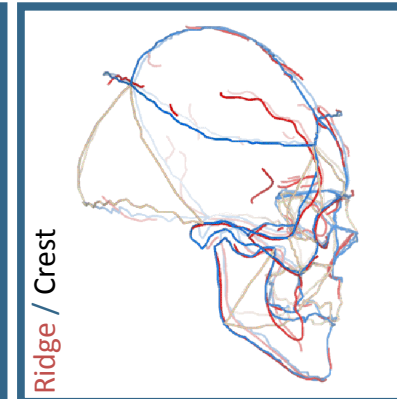
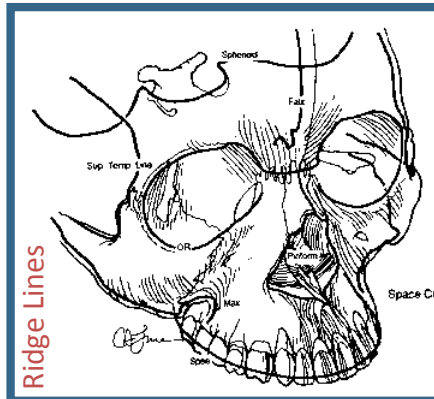


[P. Alliez et al. "Anisotropic Polygonal Remeshing". SIGGRAPH, 2003]

[F. Cazals, M. Pouget. "Topology driven algorithms for ridge extraction on meshes". INRIA Research Report 5526, 2005]

⇒ Très peu de travaux sur la comparaison/évaluation avec des repères anatomiques

[F. Bookstein, C. Cutting. "Cranofacial Morphogenesis and Dymorphogenesis", 1988]

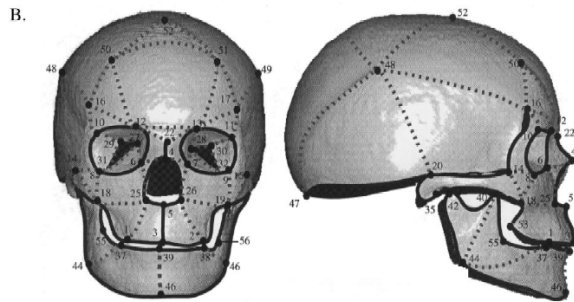


[J.P. Thirion et al. "Validation of Three Inter-Patients Matching Methods". Visualization in Biomedical Computing, 1996].

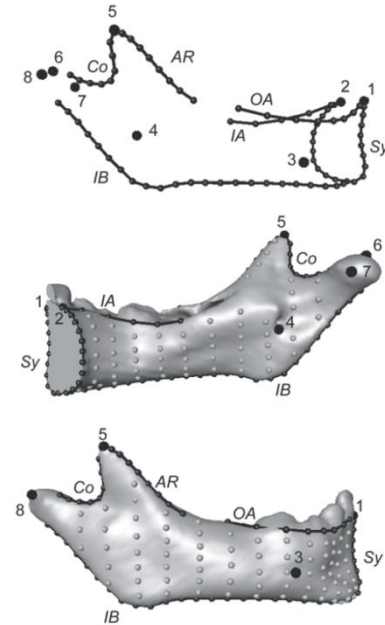
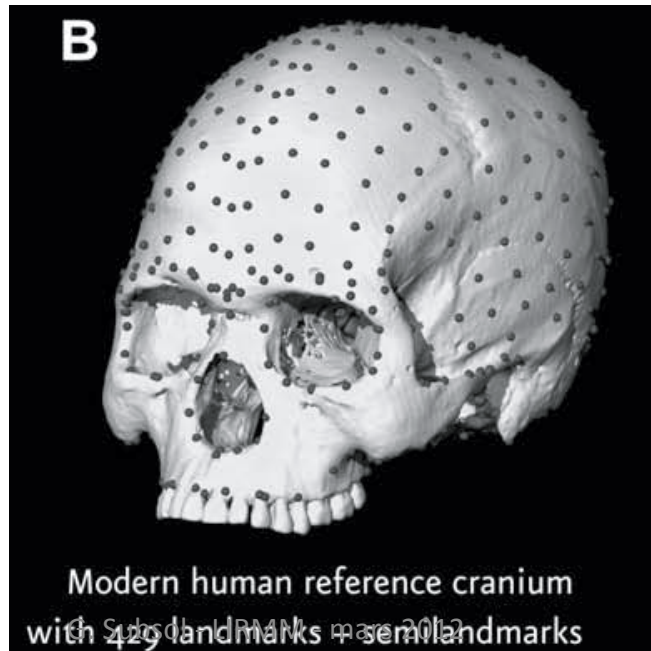
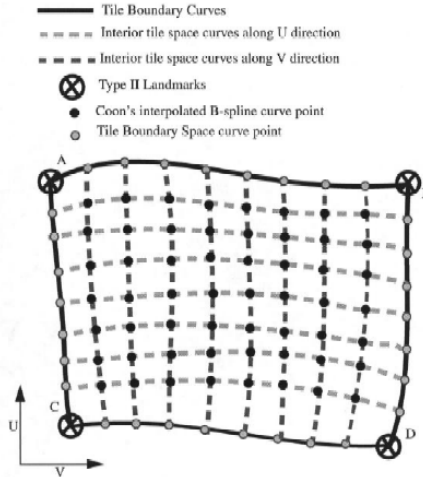
⇒ La multiplication de pseudo-landmarks (type III) placés par interpolation de landmarks suivant des lignes ou des carreaux permet d'être au plus près des « surfaces ».

A procedure to average 3D anatomical structures

Krishna Subramanyan^{a,1}, David Dean^{b,*}



SKULL LANDMARKS		
1.r_upper_molar	19.l_ant_inf_inf_zygoma	37.r_lower_molar
2.l_upper_molar	20.r_porion	38.l_lower_molar
3.upper_in_e_dge	21.l_porion	39.lower_in_e_dge
4.tip_of_nose_Rhinion	22.nasion	40.r_coronoid
5.ANS	23.r_base_of_coronoid	41.l_coronoid
6.r_lacrimal	24.l_base_of_coronoid	42.r_condyilion
7.l_lacrimal	25.r_lat_pir_ap	43.l_condyilion
8.r_inf_lat_orb_corner	26.l_lat_pir_ap	44.r_gonion
9.l_inf_lat_orb_corner	27.r_optic_foramen	45.l_gonion
10.r_sup_lat_orb_corner	28.l_optic_foramen	46.menton
11.l_sup_lat_orb_corner	29.r_tip_sup_orb_fissure	47.mid_sup_nuchal_line_pt
12.r_sup_medial_orb_corner	30.l_tip_sup_orb_fissure	48.r_posterior_boss_pt
13.l_sup_medial_orb_corner	31.r_tip_inf_orb_fissure	49.l_posterior_boss_pt
14.r_ant_inf_sup_zygoma	32.l_tip_inf_orb_fissure	50.r_anterior_boss_pt
15.l_ant_inf_sup_zygoma	33.r_post_tip_inf_orb_fissure	51.l_anterior_boss_pt
16.r_ant_sup_sup_zygoma	34.l_post_tip_inf_orb_fissure	52.coronal_sagittal_intersection
17.l_ant_sup_sup_zygoma	35.r_lo_porion	53.r_pterygomaxillary_point
18.r_ant_inf_inf_zygoma	36.l_lo_porion	54.l_pterygomaxillary_point



Coquerelle, 2011

2. Méthode de morphométrie 3D à base de landmarks

Méthodes par superposition

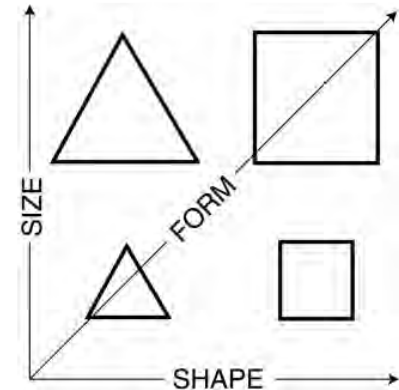
1. On superpose « au mieux » les landmarks dans un repère commun (= forme « moyenne »)
2. On analyse les différences résiduelles entre landmarks par rapport à la moyenne

Exemple : Generalized Procrustes Analysis + Analyse en Composantes Principales

Problème 1 : Comment superposer « au mieux » ?

PB 1.1 Quelle méthode de superposition choisir ?

- Procrustes (translation, taille, rotation)
- Alignement sur une arête commune
- Moindres carrés (rigide, similitude, affine ?)
- Superposition anatomique (ex. plan de Francfort, grille de Talairach)



→ expliciter les hypothèses (anatomiques) sur la stabilité (fixe ou pas), la variabilité (est-elle importante) et la pertinence (mesure que l'on souhaite)

PB 1.2 Comment trouver la forme « moyenne » ?

- Comment trouver la forme « moyenne » ?
 - Sans superposition : $F_{moy} = \text{moyenne des } P_i$
 - Après superposition : $P_i \rightarrow P'_i$; $F_{moy} = \text{moyenne des } P'_i$
 - Mais dans Procrustes, la superposition est par rapport à F_{moy} ... qu'on ne connaît pas... Processus itératif ?
- Y-a-t-il une influence de la forme de départ ?

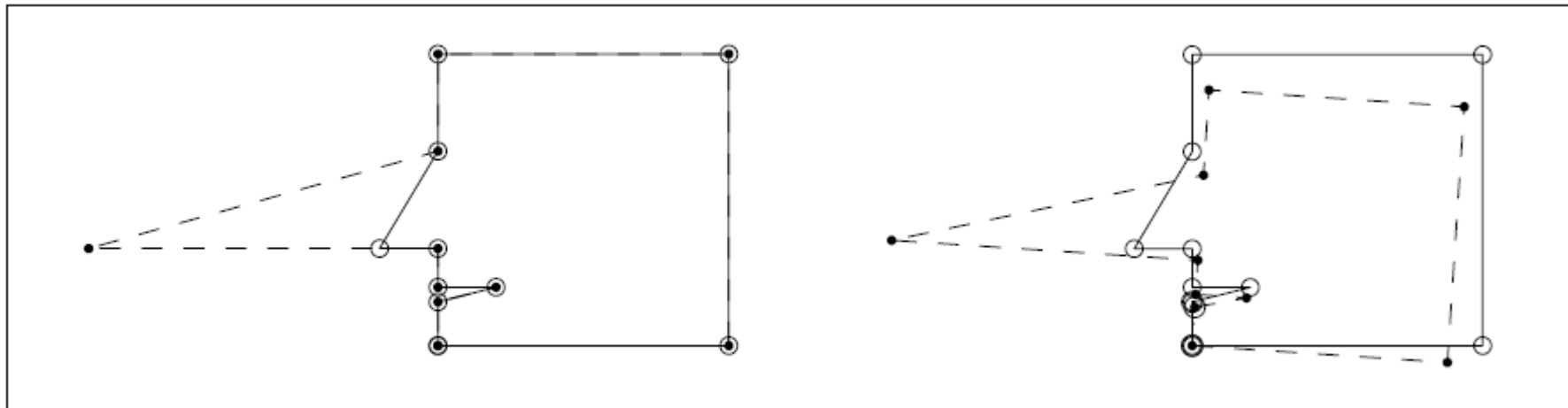
→ valider le processus (en particulier la forme de départ)

Problème 1 : Comment superposer « au mieux » ?

PB 1.3 Comment éviter des mesures aberrantes ?

- Effet « Pinocchio » lié à une minorité de points « aberrants »....

→ Peut-être résolu par l'utilisation de méthodes « robuste » statistiquement (exemple : suppression des landmarks les plus distants).



Problème 2 : Comment analyser les différences résiduelles ?

PB 2.1 Limites de l'Analyse en Composantes Principales

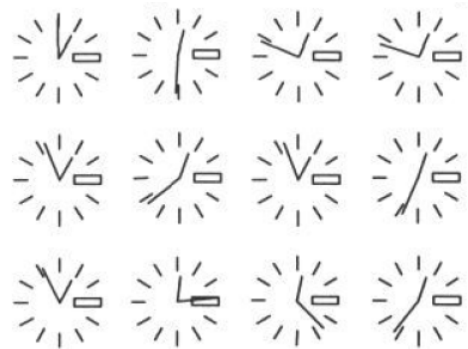
- Les coordonnées normalisées d'une forme définie par n landmarks sont données par :
 $X_i = (x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n)$
- On va chercher une transformation linéaire $M : Y_i = M \cdot X_i$ telle que la matrice de covariance des Y_i soit diagonale.
Cela signifiera que les coordonnées transformées sont indépendantes linéairement.

$$\Sigma_X = \text{var}(\vec{X}) = \text{var} \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{var}(X_1) & \text{cov}(X_1 X_2) & \cdots & \text{cov}(X_1 X_p) \\ \text{cov}(X_2 X_1) & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(X_p X_1) & \cdots & \cdots & \text{var}(X_p) \end{pmatrix}$$

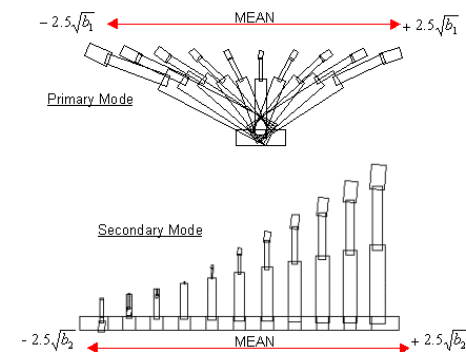
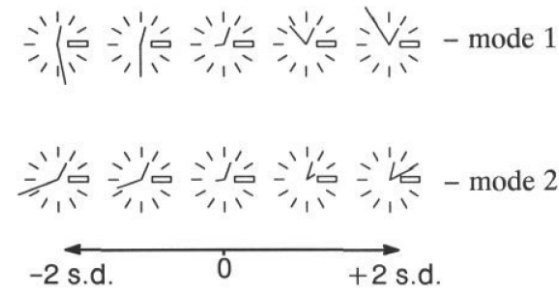
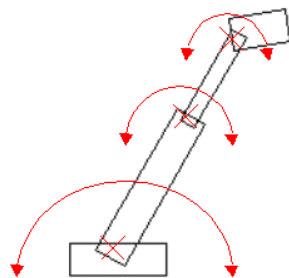
- On démontre alors que M est définie par les vecteurs propres de Σ_X
- Les valeurs propres donnent les variances associées aux différents vecteurs de la nouvelle base. On peut ainsi trier les coordonnées par « importance ».
- *Application 1* : décorréler les coordonnées
- *Application 2* : réduire l'information en ne gardant que les coordonnées les plus significatives. Utile pour la visualisation en 2D (2 modes) ou 3D (3 modes)

PB 2.1 Limites de l'Analyse en Composantes Principales

- Mais... ne fonctionne que pour des coordonnées **linéairement** corrélées :



29 landmarks



→ Bien faire l'hypothèse qu'il y aura une corrélation linéaire.

→ Eventuellement, changer de paramétrisation (ex. rotation) ou décomposer les modèles en sous-modèles linéaires (ex. articulation entre modules)

→ Utiliser des méthodes d'analyse non-linéaire (non linear PCA), plus locale (Localized Components Analysis) ou non-euclidienne (Principal Geodesic Analysis, Maximum Autocorrelation Function Analysis)

Méthodes par déformation

1. On déforme les formes vers une forme « moyenne »
2. On analyse les paramètres de la déformation

Exemple : Thin Plate Spline + Principal Warps Decomposition

Problème 1 : Comment déformer « au mieux » ?

PB 1.1 Quelle classe de déformation choisir ?

- **Générale** pour avoir une superposition après déformation
- Mais en conservant une certaine « **régularité** »... pour ne pas avoir un comportement chaotique entre les landmarks
- Exprimable **mathématiquement** pour les calculs
- Décomposable éventuellement pour supprimer certaines déformations
- Avec une liste de paramètres ou une décomposition **compréhensible**

**GLOBAL AND LOCAL DEFORMATIONS
OF SOLID PRIMITIVES**
Alan H. Barr
Computer Science Department †
California Institute of Technology
Pasadena, California

*Mélange et décomposition de
transformations « compréhensibles »
(rigide, affine, twist, bending....)*

IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL. 11, NO. 6, JUNE 1989

567

Principal Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformations

FRED L. BOOKSTEIN

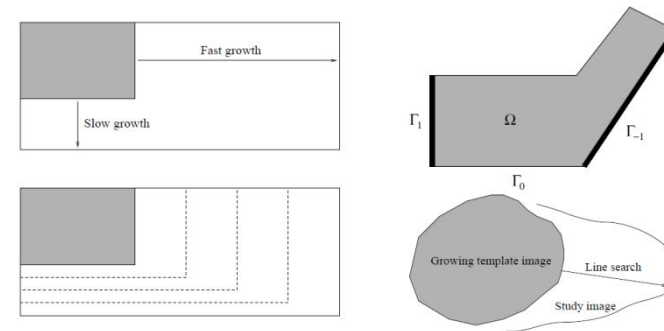
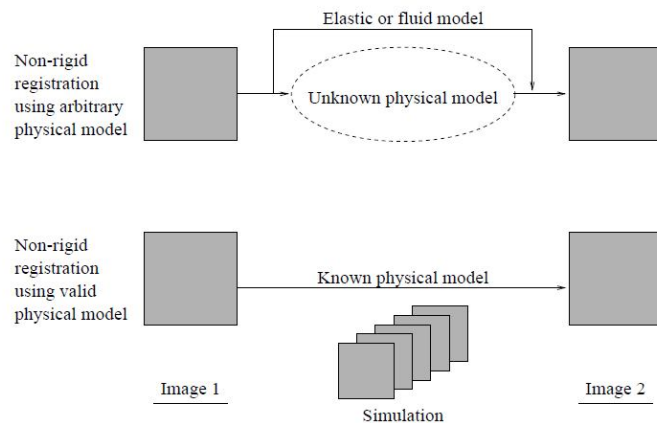
AMERICAN JOURNAL OF PHYSICAL ANTHROPOLOGY 62:151-165 (1983)

The Measurement of Form and Variation in Form: An Application
of Three-Dimensional Quantitative Morphology by Finite-Element
Methods

JAMES CHEVERUD, JACK L. LEWIS, WILLIAM BACHRACH, AND
WILLIAM D. LEW
*Departments of Anthropology, Cell Biology and Anatomy, and Ecology and
Evolutionary Biology (J.C.) and Departments of Civil Engineering and
Orthopaedic Surgery (J.L.L., W.B., W.D.L.), Northwestern University,
Evanston, Illinois 60201*

*Classe mathématique de fonctions « régulières »
et décomposable en « modes » (quelquefois
hiérarchisés mais pas forcément
compréhensibles)*

→ attention, il n'y a pas forcément de lien, ni de justification entre la « physique » de la fonction mathématique et le problème ! La déformation n'est pas forcément correcte entre les landmarks et les modes n'ont pas forcément de sens réel...



Non-Rigid Image Registration using Bone Growth Model

Morten Bro-Nielsen^{1,2,3}, Claus Gramkow^{2,3}, Sven Kreiborg²

¹HT Medical, Inc., 6001 Montrose Road, Suite 902, Rockville, MD 20852, USA

²3D-Lab, School of Dentistry, Univ. of Copenhagen, Denmark

³Dept. of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark

e-mail: bro@ht.com WWW <http://www.imm.dtu.dk/~bro>

PB 1.2 Comment normaliser et trouver la forme de référence ?

- On a besoin d'avoir une forme moyenne pour calculer la déformation. Comment faire (ex. Procrustes) ?

→ valider le processus (en particulier la forme de départ)

Méthodes fondées sur des distances

1. Pour chaque forme, on calcule une matrice de distances inter-landmarks
2. On compare ces paramètres ou on analyse la matrice

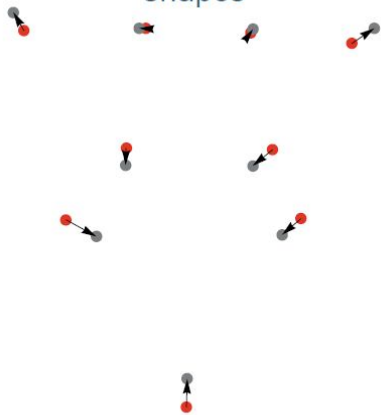
Exemple : Euclidean Distance Matrix Analysis

AMERICAN JOURNAL OF PHYSICAL ANTHROPOLOGY 86:415-427 (1991)

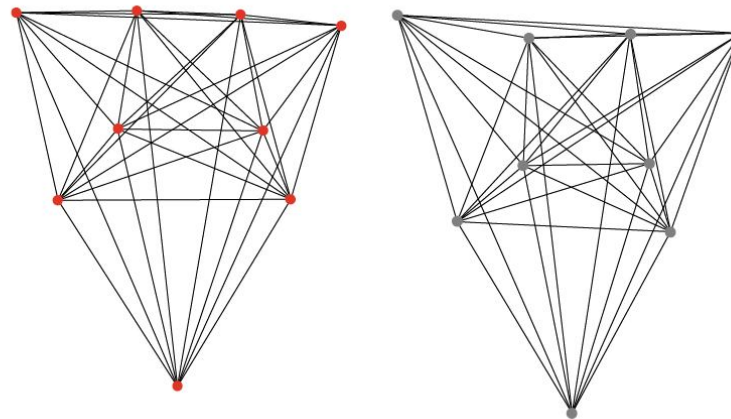
Euclidean Distance Matrix Analysis: A Coordinate-Free Approach for Comparing Biological Shapes Using Landmark Data

SUBHASH LELE AND JOAN T. RICHTSMEIER
Department of Biostatistics, The Johns Hopkins University, School of Hygiene and Public Health (S.L.) and Department of Cell Biology and Anatomy, The Johns Hopkins University, School of Medicine (J.T.R.), Baltimore, Maryland 21205

Procrustes approach:
summed distance between
shapes



EDMA approach:
matrix of distances between
landmarks compared between
shapes



→ Ne nécessite pas de normalisation

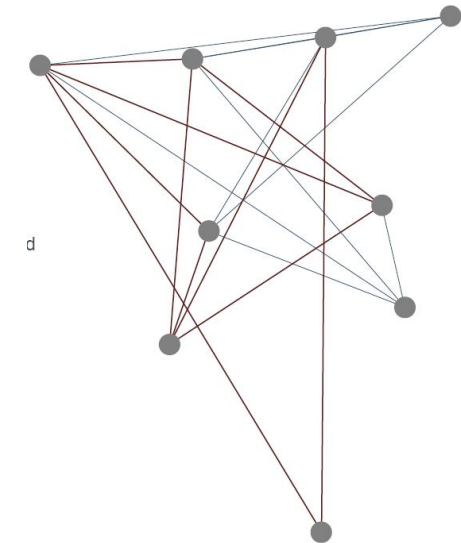
G. Subsol - LIRMM - mars 2012

Problème 1 : Comment comprendre l'analyse ?

PB 1.1 Comment calculer et visualiser les différences entre forme

- Distances → faut-il normaliser ?
- Ratio de distance
- Visualisation par couleur

→ La compréhension n'est pas facile.



— Distance longer
— Distance shorter

PB 1.2 Comment remonter aux landmarks ?

- En comparant les écarts des distances impliquant ce point entre les formes.

→ difficile de trouver des motifs de points

AMERICAN JOURNAL OF PHYSICAL ANTHROPOLOGY 107:273-283 (1998)

A Simple Method for Visualization of Influential Landmarks
When Using Euclidean Distance Matrix Analysis

THEODORE M. COLE III,^{1*} AND JOAN T. RICHTSMEIER²
¹Department of Basic Medical Science, School of Medicine,
University of Missouri-Kansas City, Kansas City, Missouri
²Department of Cell Biology & Anatomy, The Johns Hopkins University
School of Medicine, Baltimore, Maryland

3. Autres méthodes de morphométrie 3D

1. Méthodes fondées sur les surfaces 3D

- On prend tous les points des surfaces → la forme est donc appréhendée dans sa **globalité**.
- **Contrairement aux pseudo-landmarks** dont les appariements sont interpolés à partir de ceux des landmarks, il faut trouver dans ce cas automatiquement les appariements entre les points → **algorithmes de recalage surfacique** rigide et non-rigide.

Surface-Bounded Growth Modeling Applied to Human Mandibles

Per Ronsholt Andresen*, Fred L. Bookstein, Knut Conradsen, Bjarne Kjær Ersbøll, Jeffrey L. Marsh, and Sven Kreiborg

Abstract—From a set of longitudinal three-dimensional scans of the same anatomical structure, we have accurately modeled the temporal shape and size changes using a linear shape model. On a total of 31 computed tomography scans of the mandible from six patients, 14851 semilandmarks are found automatically using shape features and a new algorithm called *geometry-constrained diffusion*. The semilandmarks are mapped into Procrustes space. Principal component analysis extracts a one-dimensional subspace, which is used to construct a linear growth model. The worst case mean modeling error in a cross validation study is 3.7 mm.

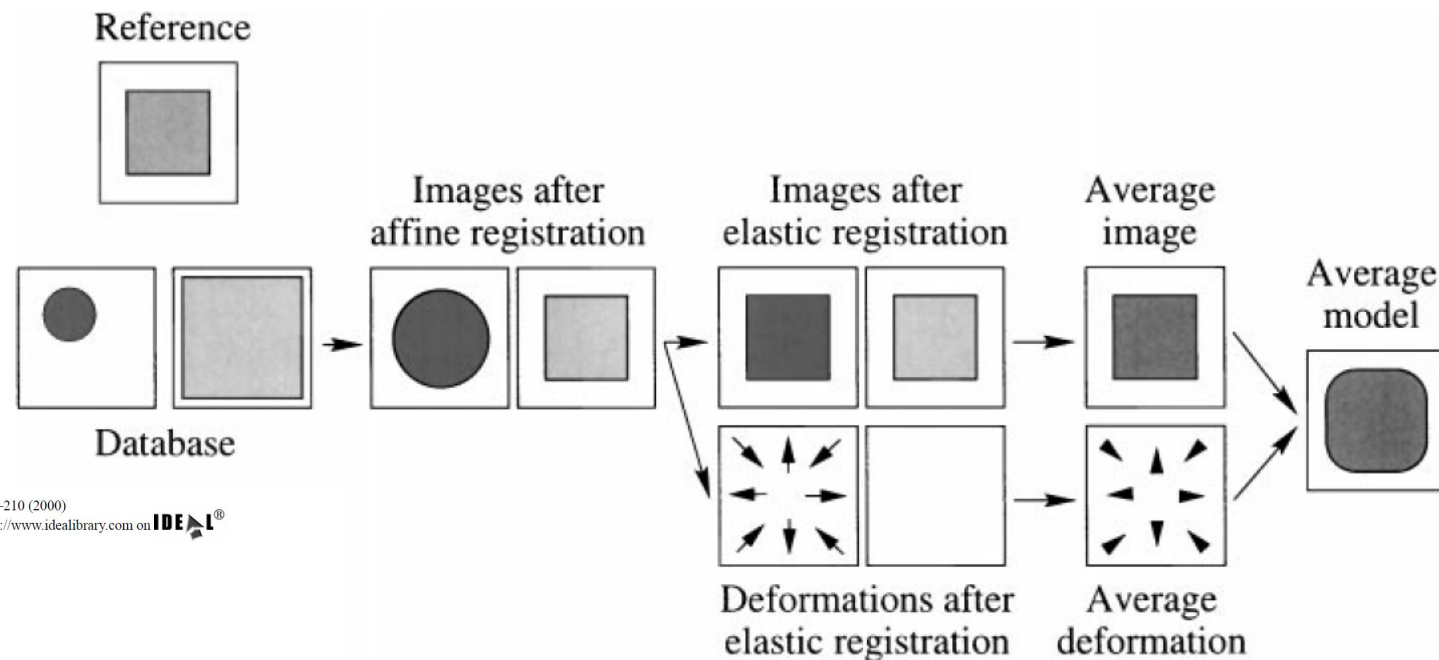
Index Terms—Geometry-constrained diffusion, morphometrics, nonrigid shape-preserving registration, principal component analysis, Procrustes analysis, semilandmarks.

31 point sets in a linear subspace of surprisingly low dimension, affording surprisingly accurate growth predictions.

The organization of the remainder of this text is as follows. Section II sets the stage for our algorithm by reviewing the literature of nonrigid registration by deformable models. Section III introduces the patients to which we have access, their CT images, and the mechanism by which we produced the 31 mandibular surfaces of the data set. Section IV describes the initialization of our diffeomorphism by detection and matching of crest lines, and Section V shows how we proceed to a full surface-constrained diffusion. In Sections VI and VII, the (31 —

2. Méthodes fondées sur les images 3D

- On prend tous les voxels de l'image → la forme est donc appréhendé dans sa **volume**.
- Il faut trouver dans ce cas automatiquement les appariements entre les voxels → **algorithmes de recalage iconique** rigide et non-rigide.
- Mais comment combiner **différences géométriques et photométriques** (qui peuvent de surcroît interférer dans le recalage...)?



Computer Vision and Image Understanding 77, 192–210 (2000)
doi:10.1006/cviu.1999.0815, available online at <http://www.idealibrary.com> on IDEAL[®]

Average Brain Models: A Convergence Study

Alexandre Guimond

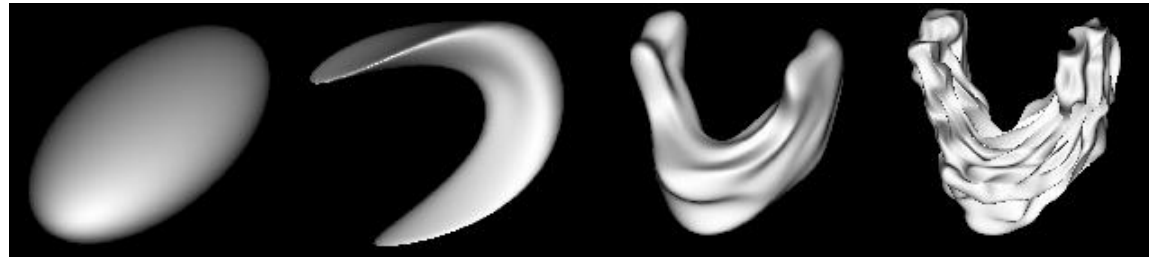
Département d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, Université de Montréal, Montréal, Québec
H3C 3J2, Canada; and INRIA Sophia Antipolis, Projet Epidaure, France

G. Subsol - LIRMM - mars 2012

26

3. Méthodes fondées sur des représentations simplifiées

- On cherche à **paramétrer** la forme en la simplifiant :
 - Moment : estimation par une ellipsoïde
 - Spherical harmonics : estimation par une combinaison de patatoïdes
- On **compare les paramètres**.



Degree 1, 3, 10, 20 SPHARM representations of Mandible surfaces.

MODELING THREE-DIMENSIONAL MORPHOLOGICAL STRUCTURES USING SPHERICAL HARMONICS

Li Shen,^{1,2} Hany Farid,^{3,4} and Mark A. McPeck^{5,6}

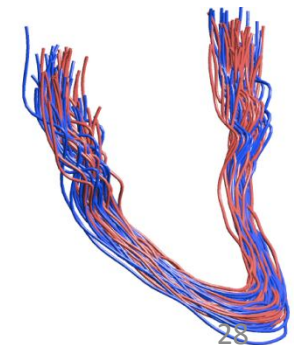
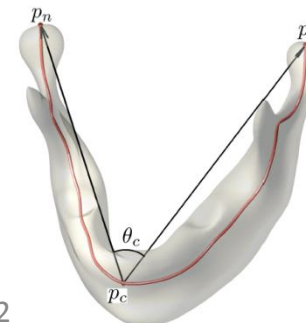
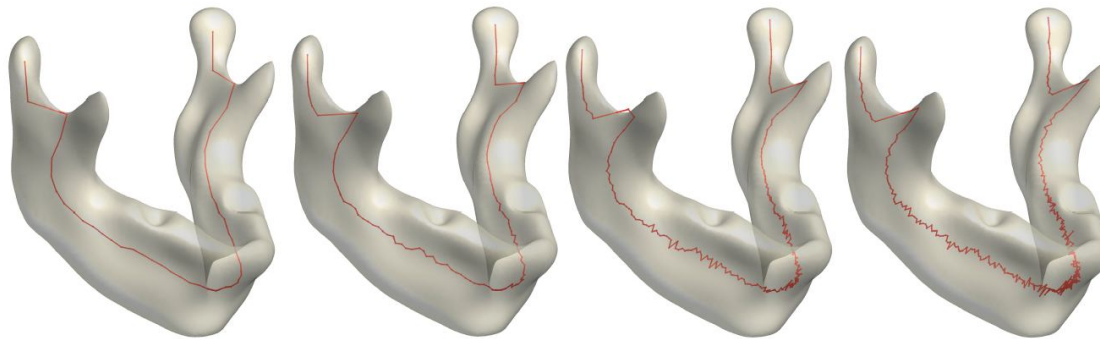
- Mais stabilité et robustesse des paramètres ?
- Référence des paramétrisations ?

3. Méthodes fondées sur des représentations simplifiées

- On cherche à **schématiser** la forme :
 - Squelettisation
- On **compare ces schématisations**.

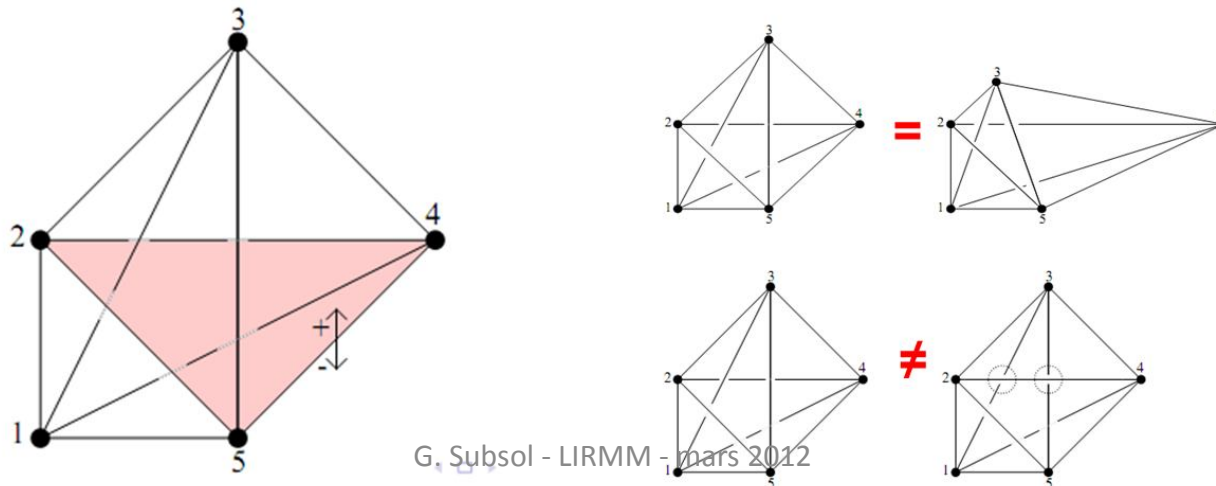
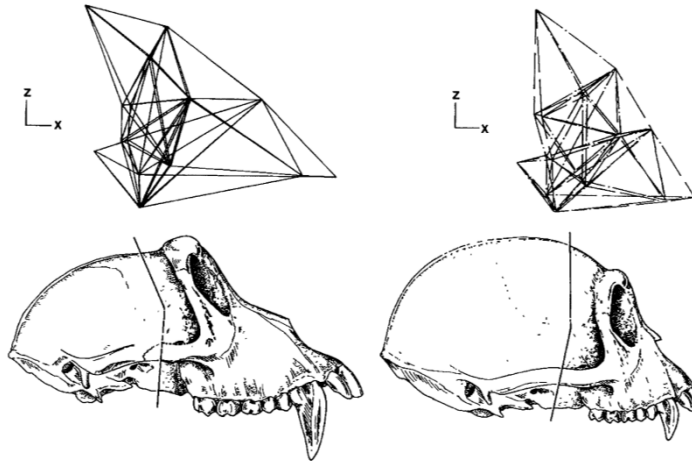
Mandible shape modeling using the second eigenfunction of the Laplace-Beltrami operator

Seongho Seo^a, Moo K. Chung^{abcd}, Brian J. Whyms^d, and Hourii K. Vorperian^d



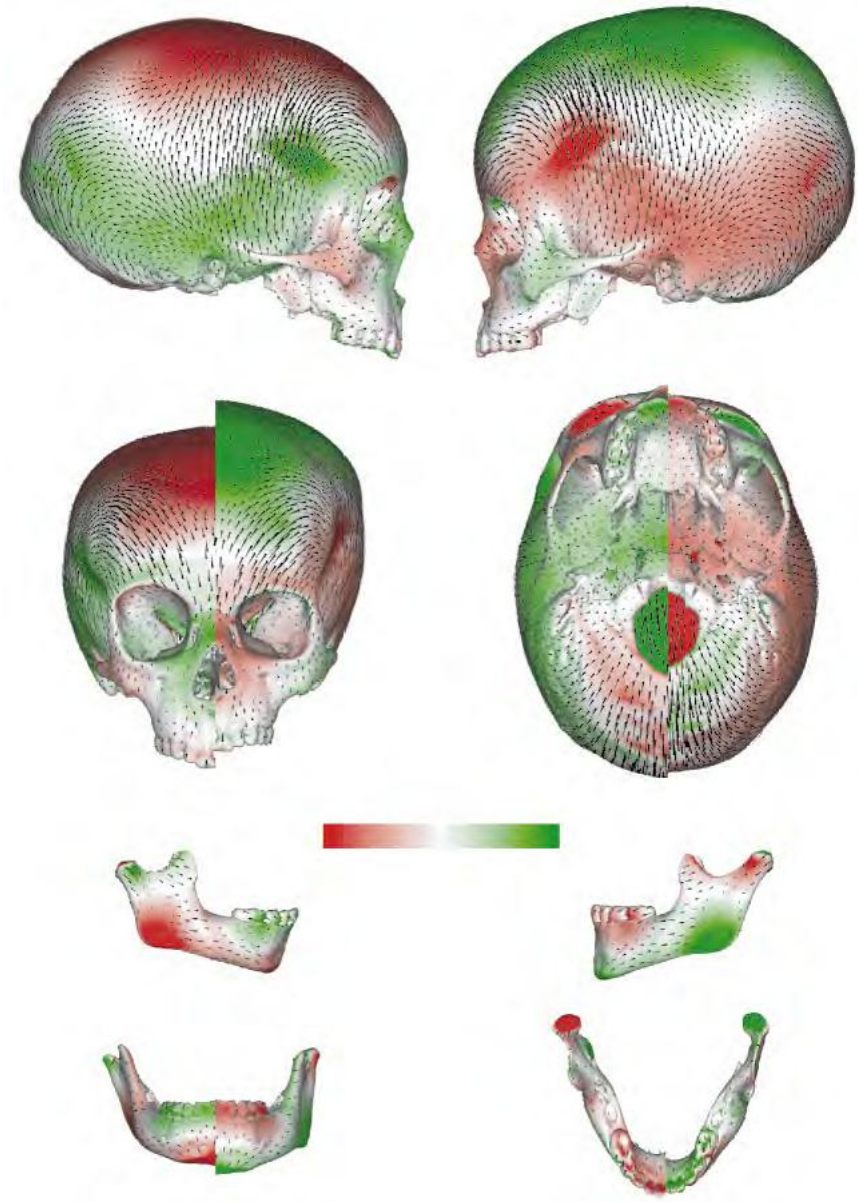
4. Méthode structurelles

- Et si on ne se fondait pas sur la géométrie ou la métrique mais sur la **relation** entre les landmarks ?



Dans tous les cas...

- Des problèmes de statistiques **multivariées**....
 - **Non-paramétriques**...
 - Pour définir des intervalles de variabilité
 - Ou des paramètres morphométriques **simples** pour appréhender les différences...
 - Ou décomposer en sous-régions **stables** pour étudier la modularité
-
- Avec les difficultés de **visualiser** et **interagir** en 3D



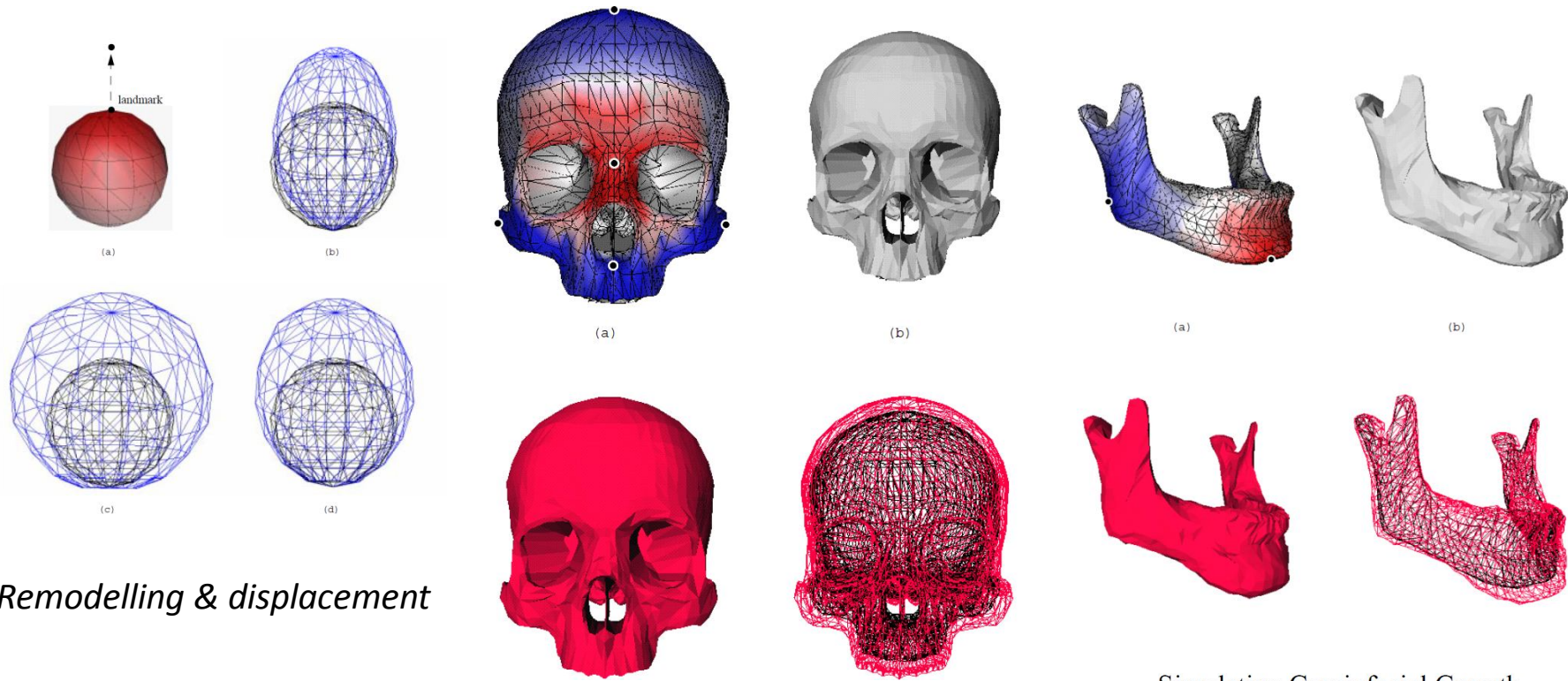
4. Et comment corréler morphométrie 3D et étude de la croissance ?

- Intégration de loi de croissance dans des modèles géométriques
- Analyse de la variabilité liée à la loi de croissance
- Comparaison avec les données → mise en évidence d'une variabilité interindividuelle qui interfère....

JOURNAL OF EXPERIMENTAL ZOOLOGY (MOL DEV EVOL) 302B:322-340 (2004)

Kinematics of Cranial Ontogeny: Heterotopy, Heterochrony, and Geometric Morphometric Analysis of Growth Models

CHRISTOPH PETER EDUARD ZOLLIKOFFER* AND MARCIA SILVIA PONCE DE LEÓN



Remodelling & displacement

Simulating Craniofacial Growth

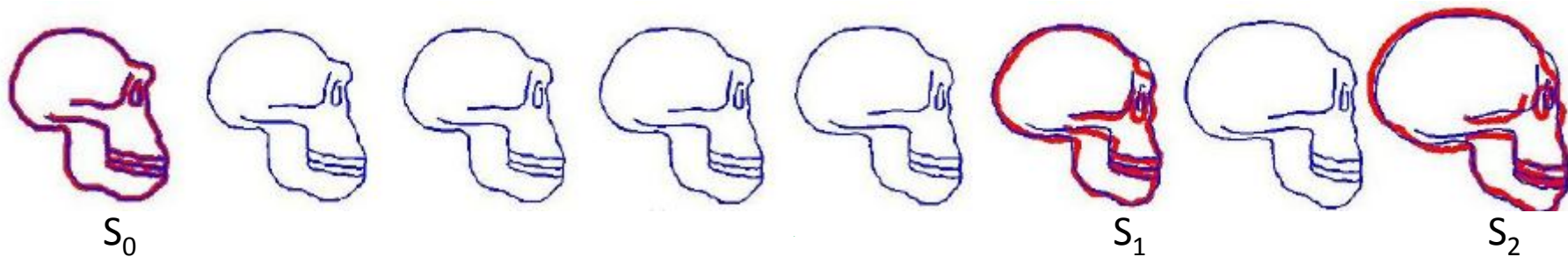
by

Kevin Michael Coughlan

Mais comment analyser cette variabilité spatio-temporelle ?

Statistical models of currents for measuring the variability of anatomical curves, surfaces and their evolution

Problème 1 : on a des formes à différents instants. On veut un modèle d'évolution temporel.

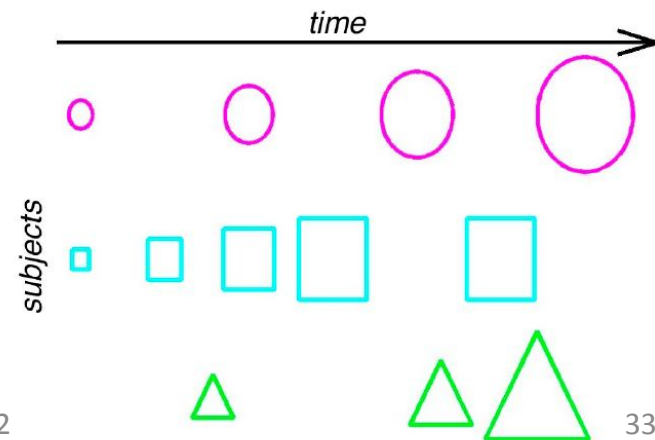


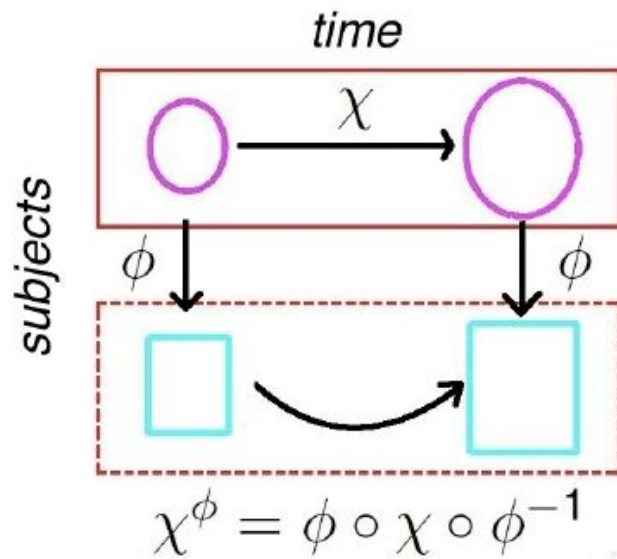
$$J(\chi) = \sum_{t_i} d(\chi_{t_i}(M_0), S_i)^2 + \gamma_\chi \text{Reg}(\chi)$$

Où M_0 est la forme de base et les S_i des données à différents instants.

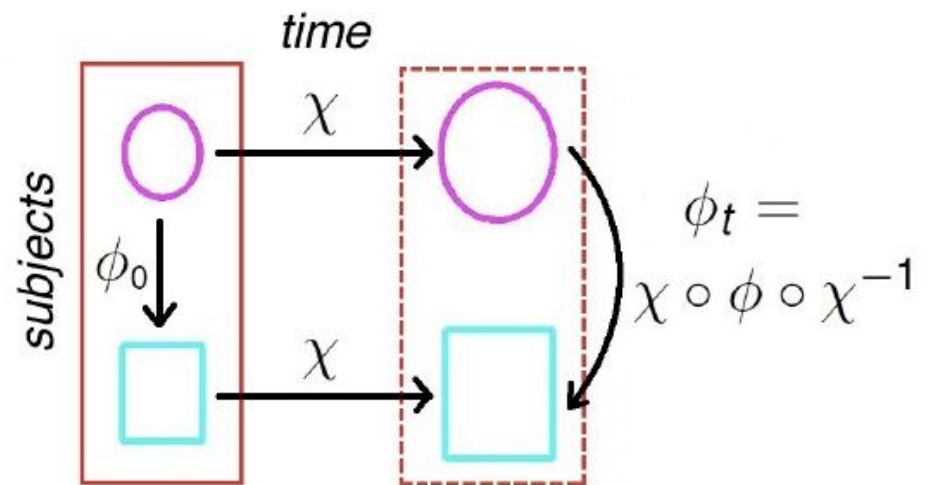
Mais on a aussi un variabilité spatiale...

Problème 2 : comment combiner les deux ?





subject-specific approach



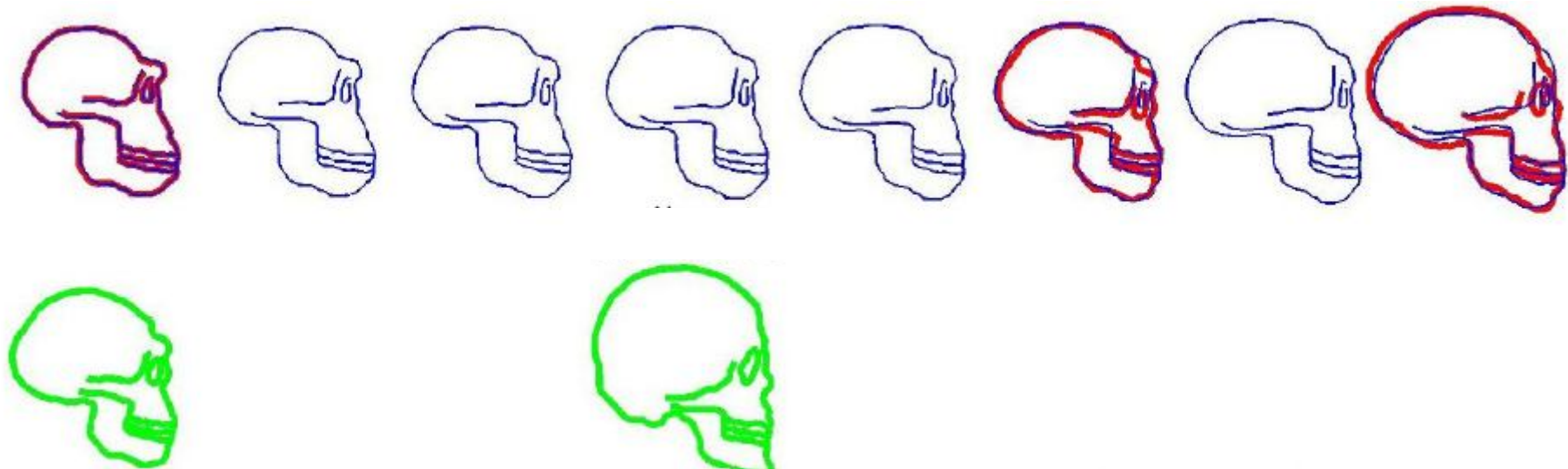
time-specific approach

- Approche subject-specific :
 - Variabilité inter-sujet indépendante du temps
 - Evolution temporelle spécifique à chaque sujet
 - Variabilité de la fonction d'évolution en fonction du sujet

- Approche time-specific :
 - Evolution temporelle indépendante du sujet
 - Variabilité inter-sujet dépend du temps
 - Variabilité du sujet en fonction du temps

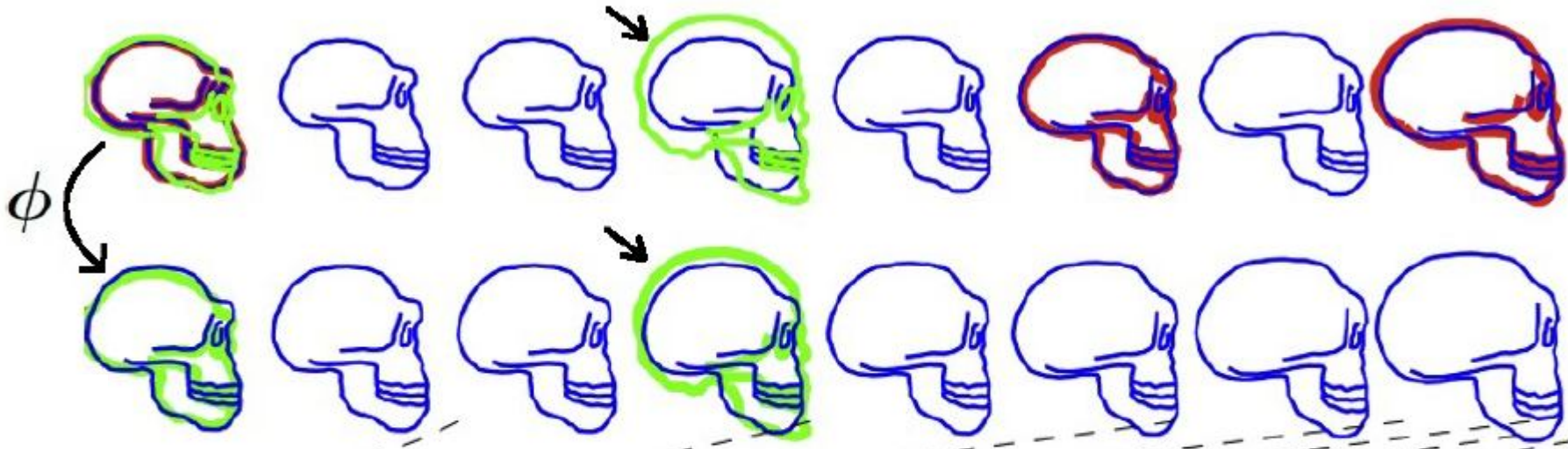
Comment combiner les deux ?

- On a calculé une fonction d'évolution χ ajustée sur les données du sujet 1 (en rouge) :
problème 1
- On a deux données temporelles d'un autre sujet (en vert)



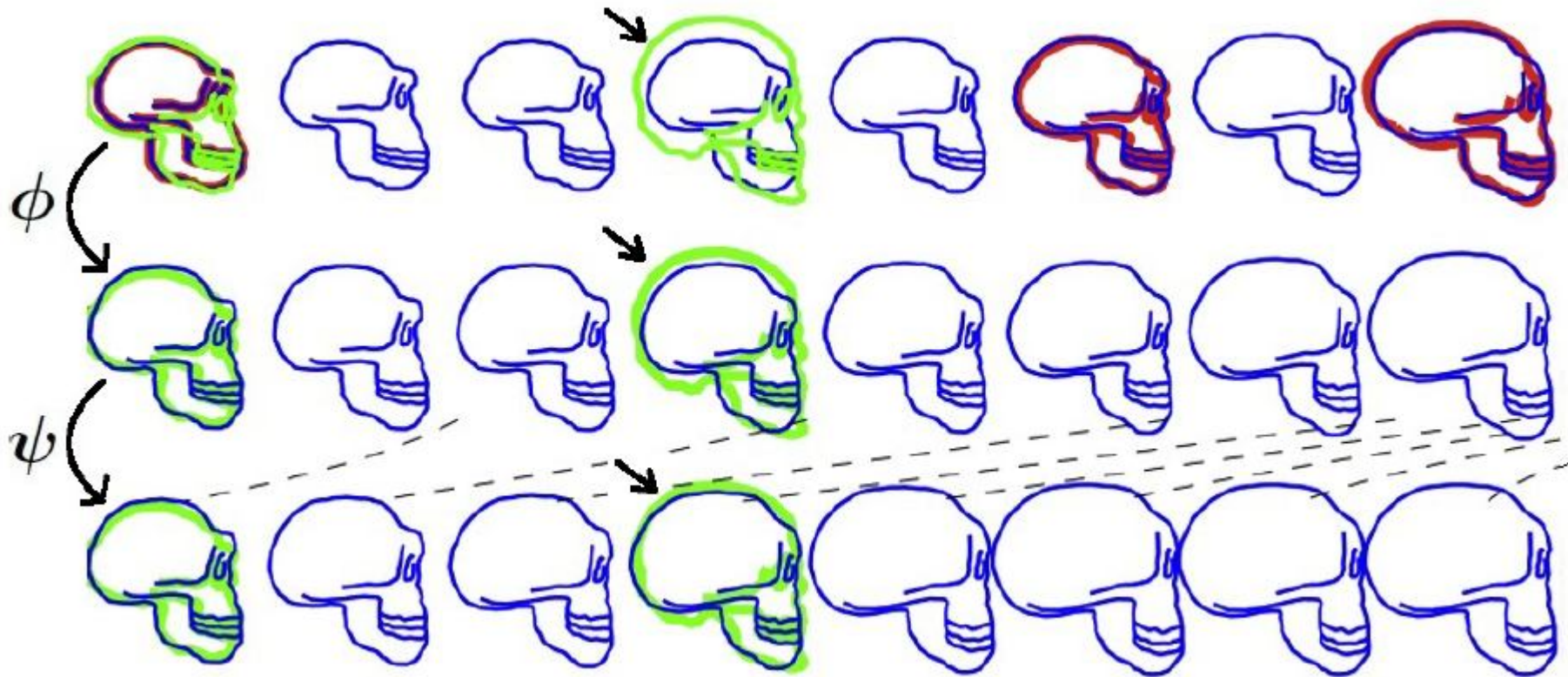
Comment combiner les deux ?

- On calcule la fonction de variabilité ϕ entre les 2 formes à un instant
- On l'applique à toute l'évolution (approche subject-specific). Φ indépendante du temps.



Comment combiner les deux ?

- Mais on va faire du « time-warping », c.a.d. trouver dans l'évolution du sujet 2, le temps où la forme correspond le mieux aux données temporelles réelles.
- Et on modifie la fonction d'évolution en l' « accélérant » ou à la « ralentissant ».



- Du coup ψ n'est plus indépendante du temps et la fonction d'évolution dépend du sujet !
- Permet en particulier de comparer des schémas de croissance en étudiant les variations relatives.