



**HAL**  
open science

# Apport de la morphométrie géométrique dans l'approche de l'obstruction nasale

Djamel Hazbri

► **To cite this version:**

Djamel Hazbri. Apport de la morphométrie géométrique dans l'approche de l'obstruction nasale. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01900887

**HAL Id: dumas-01900887**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01900887v1>**

Submitted on 22 Oct 2018

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

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

**Apport de la morphométrie géométrique dans l'approche de  
l'obstruction nasale.**

**T H È S E A R T I C L E**

**Présentée et publiquement soutenue devant**

**LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE MARSEILLE**

**Le 24 Octobre 2017**

**Par Monsieur Djamel HAZBRI**

**Né le 3 janvier 1986 à Marseille (13)**

Pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

**D.E.S. d'OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE ET CHIRURGIE CERVICO-FACIALE**

**Membres du Jury de la Thèse :**

**Monsieur le Professeur DESSI Patrick**

**Président**

**Monsieur le Professeur GIOVANNI Antoine**

**Assesseur**

**Monsieur le Professeur NICOLLAS Richard**

**Assesseur**

**Monsieur le Docteur MICHEL Justin**

**Directeur**

# AIX-MARSEILLE UNIVERSITE

**Président** : Yvon BERLAND

## FACULTE DE MEDECINE

**Doyen** : Georges LEONETTI

**Vice-Doyen aux Affaires Générales** : Patrick DESSI

**Vice-Doyen aux Professions Paramédicales** : Philippe BERBIS

**Assesseurs :**

- \* aux Etudes : Jean-Michel VITON
- \* à la Recherche : Jean-Louis MEGE
- \* aux Prospectives Hospitalo-Universitaires : Frédéric COLLART
- \* aux Enseignements Hospitaliers : Patrick VILLANI
- \* à l'Unité Mixte de Formation Continue en Santé : Fabrice BARLESI
- \* pour le Secteur Nord : Stéphane BERDAH
- \* aux centres hospitaliers non universitaire : Jean-Noël ARGENSON

**Chargés de mission :**

- \* 1<sup>er</sup> cycle : Jean-Marc DURAND et Marc BARTHET
- \* 2<sup>ème</sup> cycle : Marie-Aleth RICHARD
- \* 3<sup>ème</sup> cycle DES/DESC : Pierre-Edouard FOURNIER
- \* Licences-Masters-Doctorat : Pascal ADALIAN
- \* DU-DIU : Véronique VITTON
- \* Stages Hospitaliers : Franck THUNY
- \* Sciences Humaines et Sociales : Pierre LE COZ
- \* Préparation à l'ECN : Aurélie DAUMAS
- \* Démographie Médicale et Filiation : Roland SAMBUC
- \* Relations Internationales : Philippe PAROLA
- \* Etudiants : Arthur ESQUER

**Responsable administratif :**

- \* Déborah ROCCHICCIOLI

**Chefs de service :**

- \* Communication : Laetitia DELOUIS
- \* Examens : Marie-Thérèse ZAMMIT
- \* Intérieur : Joëlle FAVREGA
- \* Maintenance : Philippe KOCK
- \* Scolarité : Christine GAUTHIER

### DOYENS HONORAIRES

M. Yvon BERLAND  
M. André ALI CHERIF  
M. Jean-François PELLISSIER

## PROFESSEURS HONORAIRES

MM	AGOSTINI Serge	MM	GALLAIS Hervé
	ALDIGHERI René		GAMERRE Marc
	ALLIEZ Bernard		GARCIN Michel
	AQUARON Robert		GARNIER Jean-Marc
	ARGEME Maxime		GAUTHIER André
	ASSADOURIAN Robert		GERARD Raymond
	AUTILLO-TOUATI Amapola		GEROLAMI-SANTANDREA André
	BAILLE Yves		GIUDICELLI Roger
	BARDOT Jacques		GIUDICELLI Sébastien
	BARDOT André		GOUDARD Alain
	BERARD Pierre		GOUIN François
	BERGOIN Maurice		GRISOLI François
	BERNARD Dominique		GROULIER Pierre
	BERNARD Jean-Louis		HADIDA/SAYAG Jacqueline
	BERNARD Pierre-Marie		HASSOUN Jacques
	BERTRAND Edmond		HEIM Marc
	BISSET Jean-Pierre		HOUEL Jean
	BLANC Bernard		HUGUET Jean-François
	BLANC Jean-Louis		JAQUET Philippe
	BOLLINI Gérard		JAMMES Yves
	BONGRAND Pierre		JOUVE Paulette
	BONNEAU Henri		JUHAN Claude
	BONNOIT Jean		JUIN Pierre
	BORY Michel		KAPHAN Gérard
	BOURGEADE Augustin		KASBARIAN Michel
	BOUVENOT Gilles		KLEISBAUER Jean-Pierre
	BOUYALA Jean-Marie		LACHARD Jean
	BREMOND Georges		LAFFARGUE Pierre
	BRICOT René		LEVY Samuel
	BRUNET Christian		LOUCHET Edmond
	BUREAU Henri		LOUIS René
	CAMBOULIVES Jean		LUCIANI Jean-Marie
	CANNONI Maurice		MAGALON Guy
	CARTOUZOU Guy		MAGNAN Jacques
	CAU Pierre		MALLAN- MANCINI Josette
	CHAMLIAN Albert		MALMEJAC Claude
	CHARREL Michel		MATTEI Jean François
	CHOUX Maurice		MERCIER Claude
	CIANFARANI François		METGE Paul
	CLEMENT Robert		MICHOTÉY Georges
	COMBALBERT André		MILLET Yves
	CONTE-DEVOLX Bernard		MIRANDA François
	CORRIOL Jacques		MONFORT Gérard
	COULANGE Christian		MONGES André
	DALMAS Henri		MONGIN Maurice
	DE MICO Philippe		MONTIES Jean-Raoul
	DEVIN Robert		NAZARIAN Serge
	DEVRED Philippe		NICOLI René
	DJIANE Pierre		NOIRCLERC Michel
	DONNET Vincent		OLMER Michel
	DUCASSOU Jacques		OREHEK Jean
	DUFOUR Michel		PAPY Jean-Jacques
	DUMON Henri		PAULIN Raymond
	FARNARIER Georges		PELOUX Yves
	FAVRE Roger		PENAUD Antony

FIECHI Marius  
FIGARELLA Jacques  
FONTES Michel  
FRANCOIS Georges  
FUENTES Pierre  
GABRIEL Bernard  
GALINIER Louis  
MM POYEN Danièle  
PRIVAT Yvan  
QUILICHINI Francis  
RANQUE Jacques  
RANQUE Philippe  
RICHAUD Christian  
ROCHAT Hervé  
ROHNER Jean-Jacques  
ROUX Hubert  
ROUX Michel  
RUFO Marcel  
SAHEL José  
SALAMON Georges  
SALDUCCI Jacques  
SAN MARCO Jean-Louis  
SANKALE Marc  
SARACCO Jacques  
SARLES Jean-Claude  
SCHIANO Alain  
SCOTTO Jean-Claude  
SEBAHOUN Gérard  
SERMENT Gérard  
SERRATRICE Georges  
SOULAYROL René  
STAHL André  
TAMALET Jacques  
TARANGER-CHARPIN Colette  
THOMASSIN Jean-Marc  
UNAL Daniel  
VAGUE Philippe  
VAGUE/JUHAN Irène  
VANUXEM Paul  
VERVLOET Daniel  
VIALETES Bernard  
VIGOUROUX Robert  
WEILLER Pierre-Jean  
PENE Pierre  
PIANA Lucien  
PICAUD Robert  
PIGNOL Fernand  
POGGI Louis  
POITOUT Dominique  
PONCET Michel

## PROFESSEURS HONORIS CAUSA

### 1967

MM. les  
Professeurs DADI (Italie)  
CID DOS SANTOS (Portugal)

### 1974

MM. les  
Professeurs MAC ILWAIN (Grande-Bretagne)  
T.A. LAMBO (Suisse)

### 1975

MM. les  
Professeurs O. SWENSON (U.S.A.)  
Lord J.WALTON of DETCHANT (Grande-  
Bretagne)

### 1976

MM. les  
Professeurs P. FRANCHIMONT (Belgique)  
Z.J. BOWERS (U.S.A.)

### 1977

MM. les  
Professeurs C. GAJDUSEK-Prix Nobel (U.S.A.)  
C.GIBBS (U.S.A.)  
J. DACIE (Grande-Bretagne)

### 1978

M. le Président F. HOUPHOUET-BOIGNY (Côte d'Ivoire)

### 1980

MM. les  
Professeurs A. MARGULIS (U.S.A.)  
R.D. ADAMS (U.S.A.)

### 1981

MM. les  
Professeurs H. RAPPAPORT (U.S.A.)  
M. SCHOU (Danemark)  
M. AMENT (U.S.A.)  
Sir A. HUXLEY (Grande-Bretagne)  
S. REFSUM (Norvège)

### 1982

M. le Professeur W.H. HENDREN (U.S.A.)

### 1985

MM. les  
Professeurs S. MASSRY (U.S.A.)  
KLINSMANN (R.D.A.)

### 1986

MM. les  
Professeurs E. MIHICH (U.S.A.)

T. MUNSAT (U.S.A.)  
LIANA BOLIS (Suisse)  
L.P. ROWLAND (U.S.A.)

**1987**

M. le Professeur P.J. DYCK (U.S.A.)

**1988**

MM. les  
Professeurs R. BERGUER (U.S.A.)  
W.K. ENGEL (U.S.A.)  
V. ASKANAS (U.S.A.)  
J. WEHSTER KIRKLIN (U.S.A.)  
A. DAVIGNON (Canada)  
A. BETTARELLO (Brésil)

**1989**

M. le Professeur P. MUSTACCHI (U.S.A.)

**1990**

MM. les  
Professeurs J.G. MC LEOD (Australie)  
J. PORTER (U.S.A.)

**1991**

MM. les  
Professeurs J. Edward MC DADE (U.S.A.)  
W. BURGDORFER (U.S.A.)

**1992**

MM. les  
Professeurs H.G. SCHWARZACHER (Autriche)  
D. CARSON (U.S.A.)  
T. YAMAMURO (Japon)

**1994**

MM. les  
Professeurs G. KARPATI (Canada)  
W.J. KOLFF (U.S.A.)

**1995**

MM. les  
Professeurs D. WALKER (U.S.A.)  
M. MULLER (Suisse)  
V. BONOMINI (Italie)

**1997**

MM. les  
Professeurs C. DINARELLO (U.S.A.)  
D. STULBERG (U.S.A.)  
A. MEIKLE DAVISON (Grande-Bretagne)  
P.I. BRANEMARK (Suède)

**1998**

MM. les  
Professeurs O. JARDETSKY (U.S.A.)

**1999**

MM. les  
Professeurs

J. BOTELLA LLUSIA (Espagne)  
D. COLLEN (Belgique)  
S. DIMAURO (U. S. A.)

**2000**

MM. les  
Professeurs

D. SPIEGEL (U. S. A.)  
C. R. CONTI (U.S.A.)

**2001**

MM. les  
Professeurs

P-B. BENNET (U. S. A.)  
G. HUGUES (Grande Bretagne)  
J-J. O'CONNOR (Grande Bretagne)

**2002**

MM. les  
Professeurs

M. ABEDI (Canada)  
K. DAI (Chine)

**2003**

M. le Professeur  
Sir

T. MARRIE (Canada)  
G.K. RADDI (Grande Bretagne)

**2004**

M. le Professeur

M. DAKE (U.S.A.)

**2005**

M. le Professeur

L. CAVALLI-SFORZA (U.S.A.)

**2006**

M. le Professeur

A. R. CASTANEDA (U.S.A.)

**2007**

M. le Professeur

S. KAUFMANN (Allemagne)

## EMERITAT

### 2013

M. le Professeur	BRANCHEREAU Alain	31/08/2016
M. le Professeur	CARAYON Pierre	31/08/2016
M. le Professeur	COZZONE Patrick	31/08/2016
M. le Professeur	DELMONT Jean	31/08/2016
M. le Professeur	HENRY Jean-François	31/08/2016
M. le Professeur	LE GUICHAOUA Marie-Roberte	31/08/2016
M. le Professeur	RUFO Marcel	31/08/2016
M. le Professeur	SEBAHOUN Gérard	31/08/2016

### 2014

M. le Professeur	FUENTES Pierre	31/08/2017
M. le Professeur	GAMERRE Marc	31/08/2017
M. le Professeur	MAGALON Guy	31/08/2017
M. le Professeur	PERAGUT Jean-Claude	31/08/2017
M. le Professeur	WEILLER Pierre-Jean	31/08/2017

### 2015

M. le Professeur	COULANGE Christian	31/08/2018
M. le Professeur	COURAND François	31/08/2018
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2016
M. le Professeur	MATTEI Jean-François	31/08/2016
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2016
M. le Professeur	VERVLOET Daniel	31/08/2016

### 2016

M. le Professeur	BONGRAND Pierre	31/08/2019
M. le Professeur	BOUVENOT Gilles	31/08/2017
M. le Professeur	BRUNET Christian	31/08/2019
M. le Professeur	CAU Pierre	31/08/2019
M. le Professeur	COZZONE Patrick	31/08/2017
M. le Professeur	FAVRE Roger	31/08/2017
M. le Professeur	FONTES Michel	31/08/2019
M. le Professeur	JAMMES Yves	31/08/2019
M. le Professeur	NAZARIAN Serge	31/08/2019
M. le Professeur	OLIVER Charles	31/08/2017
M. le Professeur	POITOUT Dominique	31/08/2019
M. le Professeur	SEBAHOUN Gérard	31/08/2017
M. le Professeur	VIALETTES Bernard	31/08/2019

## PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS

AGOSTINI FERRANDES Aubert	CHARPIN Denis Surnombre	GORINCOUR Guillaume
ALBANESE Jacques	CHAUMOITRE Kathia	GRANEL/REY Brigitte
ALESSANDRINI Pierre Surnombre	CHAUVEL Patrick Surnombre	GRILLO Jean-Marie Surnombre
ALIMI Yves	CHINOT Olivier	GRIMAUD Jean-Charles
AMABILE Philippe	CHOSSEGROS Cyrille	GROB Jean-Jacques
AMBROSI Pierre	CLAVERIE Jean-Michel Surnombre	GUEDJ Eric
ARGENSON Jean-Noël	COLLART Frédéric	GUIEU Régis
ASTOUL Philippe	COSTELLO Régis	GUIS Sandrine
ATTARIAN Shahram	COURBIERE Blandine	GUYE Maxime
AUDOUIN Bertrand	COWEN Didier	GUYOT Laurent
AUFFRAY Jean-Pierre Surnombre	CRAVELLO Ludovic	GUYS Jean-Michel
AUQUIER Pascal	CUISSET Thomas	HABIB Gilbert
AVIERINOS Jean-François	CURVALE Georges	HARDWIGSEN Jean
AZORIN Jean-Michel	DA FONSECA David	HARLE Jean-Robert
AZULAY Jean-Philippe	DAHAN-ALCARAZ Laetitia	HOFFART Louis
BAILLY Daniel	DANIEL Laurent	HOUVENAEGHEL Gilles
BARLESI Fabrice	DARMON Patrice	JACQUIER Alexis
BARLIER-SETTI Anne	D'ERCOLE Claude	JOLIVET/BADIER Monique
BARTHET Marc	D'JOURNO Xavier	JOUVE Jean-Luc
BARTOLI Jean-Michel	DEHARO Jean-Claude	KAPLANSKI Gilles
BARTOLI Michel	DELARQUE Alain	KARSENTY Gilles
BARTOLIN Robert Surnombre	DELPERO Jean-Robert	KERBAUL François
BARTOLOMEI Fabrice	DENIS Danièle	LAFFORGUE Pierre
BASTIDE Cyrille	DESSEIN Alain Surnombre	LANCON Christophe
BENSOUSSAN Laurent	DESSI Patrick	LA SCOLA Bernard
BERBIS Philippe	DISDIER Patrick	LAUGIER René
BERDAH Stéphane	DODDOLI Christophe	LAUNAY Franck
BERLAND Yvon	DRANCOURT Michel	LAVIEILLE Jean-Pierre
BERNARD Jean-Paul	DUBUS Jean-Christophe	LE CORROLLER Thomas
BEROUD Christophe	DUFFAUD Florence	LE TREUT Yves-Patrice Surnombre
BERTUCCI François	DUFOUR Henry	LECHEVALLIER Eric
BLAISE Didier	DURAND Jean-Marc	LEGRE Régis
BLIN Olivier	DUSSOL Bertrand	LEHUCHER-MICHEL Marie- Pascale
BLONDEL Benjamin	ENJALBERT Alain	LEONE Marc
BONIN/GUILLAUME Sylvie	EUSEBIO Alexandre	LEONETTI Georges
BONELLO Laurent	FAKHRY Nicolas	LEPIDI Hubert
BONNET Jean-Louis	FAUGERE Gérard	LEVY Nicolas
BOTTA Alain Surnombre	FELICIAN Olivier	MACE Loïc
BOTTA/FRIDLUND Danielle	FENOLLAR Florence	MAGNAN Pierre-Edouard
BOUBLI Léon	FIGARELLA/BRANGER Dominique	MARANINCHI Dominique Surnombre
BOYER Laurent	FLECHER Xavier	MARTIN Claude Surnombre
BREGEON Fabienne	FOURNIER Pierre-Edouard	MATONTI Frédéric
BRETELLE Florence	FRAISSE Alain Disponibilité	MEGE Jean-Louis
BROUQUI Philippe	FRANCES Yves Surnombre	MERROT Thierry
BRUDER Nicolas	FRANCESCHI Frédéric	METZLER/GUILLEMAIN Catherine
BRUE Thierry	FUENTES Stéphane	MEYER/DUTOUR Anne
BRUNET Philippe	GABERT Jean	MICCALEF/ROLL Joëlle
BURTEY Stéphane	GAINNIER Marc	MICHEL Fabrice

CARCOPINO-TUSOLI Xavier  
CASANOVA Dominique  
CASTINETTI Frédéric  
CECCALDI Mathieu  
CHABOT Jean-Michel  
CHAGNAUD Christophe  
CHAMBOST Hervé  
CHAMPSAUR Pierre  
CHANEZ Pascal  
CHARAFFE-JAUFFRET  
Emmanuelle  
CHARREL Rémi

CHIARONI Jacques  
NICOLLAS Richard  
OLIVE Daniel  
OUAFIK L'Houcine  
PAGANELLI Franck  
PANUEL Michel  
PAPAZIAN Laurent  
PAROLA Philippe  
PARRATTE Sébastien  
PAUT Olivier  
PELISSIER-ALICOT Anne-Laure  
PELLETIER Jean  
PETIT Philippe  
PHAM Thao  
PIARROUX Renaud  
PIERCECCHI/MARTI Marie-  
Dominique  
PIQUET Philippe  
PIRRO Nicolas  
POINSO François  
POUGET Jean Surnombre  
RACCAH Denis  
RAOULT Didier  
REGIS Jean  
REYNAUD/GAUBERT Martine

GARCIA Stéphane  
GARIBOLDI Vlad  
GAUDART Jean  
GENTILE Stéphanie  
GERBEAUX Patrick  
GEROLAMI/SANTANDREA René  
GILBERT/ALESSI Marie-Christine  
GIORGI Roch  
GIOVANNI Antoine

GIRARD Nadine  
GIRAUD/CHABROL Brigitte

GONCALVES Anthony  
REYNAUD Rachel  
RICHARD/LALLEMAND Marie-Aleth  
RIDINGS Bernard Surnombre  
ROCHE Pierre-Hugues  
ROCH Antoine  
ROCHWERGER Richard  
ROLL Patrice  
ROSSI Dominique  
ROSSI Pascal  
ROUDIER Jean  
SALAS Sébastien  
SAMBUC Roland  
SARLES Jacques  
SARLES/PHILIP Nicole

SASTRE Bernard Surnombre  
SCAVARDA Didier  
SCHLEINITZ Nicolas  
SEBAG Frédéric  
SEITZ Jean-François  
SERRATRICE Jacques  
SIELEZNEFF Igor  
SIMON Nicolas  
STEIN Andréas

MICHEL Gérard  
MICHELET Pierre  
MILH Mathieu  
MOAL Valérie  
MONCLA Anne  
MORANGE Pierre-Emmanuel  
MOULIN Guy  
MOUTARDIER Vincent  
MUNDLER Olivier

NAUDIN Jean  
NICCOLI/SIRE Patricia  
NICOLAS DE LAMBALLERIE  
Xavier  
TAIEB David  
THIRION Xavier  
THOMAS Pascal  
THUNY Franck  
TRIGLIA Jean-Michel  
TROPANO Patrick  
TSIMARATOS Michel  
TURRINI Olivier  
VALERO René  
VEY Norbert  
VIDAL Vincent  
VIENS Patrice  
VILLANI Patrick  
VITON Jean-Michel

VITTON Véronique  
VIEHWEGER Heide Elke  
VIVIER Eric  
XERRI Luc

## PROFESSEUR DES UNIVERSITES

ADALIAN Pascal  
AGHABABIAN Valérie  
BELIN Pascal  
CHABANNON Christian  
CHABRIERE Eric  
FERON François  
LE COZ Pierre  
LEVASSEUR Anthony  
RANJEVA Jean-Philippe  
SOBOL Hagay

**PROFESSEUR CERTIFIE**

BRANDENBURGER Chantal

**PRAG**

TANTI-HARDOUIN Nicolas

**PROFESSEUR ASSOCIE DE MEDECINE GENERALE A MI-TEMPS**

FILIPPI Simon

**PROFESSEUR ASSOCIE A TEMPS  
PARTIEL**

ALTAVILLA Annagrazia  
BURKHART Gary

## MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITE - PRATICIEN HOSPITALIER

ACHARD Vincent	FABRE Alexandre	MOTTOLA GHIGO Giovanna
ANDRE Nicolas	FOUILLOUX Virginie	NGUYEN PHONG Karine
ANGELAKIS Emmanouil	FRERE Corinne	NINOVE Laetitia
ATLAN Catherine	GABORIT Bénédicte	NOUGAIREDE Antoine
BACCINI Véronique	GASTALDI Marguerite	OUDIN Claire
BARTHELEMY Pierre	GAUDY/MARQUESTE Caroline	OVAERT Caroline
BARTOLI Christophe	GELSI/BOYER Véronique	PAULMYER/LACROIX Odile
BEGE Thierry	GIUSIANO Bernard	PERRIN Jeanne
BELIARD Sophie	GIUSIANO COURCAMBECK Sophie	RANQUE Stéphane
BERBIS Julie	GOURIET Frédérique	REY Marc
BERGE-LEFRANC Jean-Louis	GRAILLON Thomas	ROBAGLIA/SCHLUPP Andrée
BEYER-BERJOT Laura	GREILLIER Laurent	ROBERT Philippe
BOUCRAUT Joseph	GRISOLI Dominique	SABATIER Renaud
BOULAMERY Audrey	GUIDON Catherine	SARI-MINODIER Irène
BOULLU/CIOCCA Sandrine	HAUTIER/KRAHN Aurélie	SARLON-BARTOLI Gabrielle
BUFFAT Christophe	HRAIECH Sami	SAVEANU Alexandru
CALAS/AILLAUD Marie-Françoise	JOURDE CHICHE Noémie	SECQ Véronique
CAMILLERI Serge	KASPI-PEZZOLI Elise	SOULA Gérard
CARRON Romain	KRAHN Martin	TOGA Caroline
CASSAGNE Carole	L'OLLIVIER Coralie	TOGA Isabelle
		TREBUCHON/DA FONSECA Agnès
CHAUDET Hervé	LABIT-BOUVIER Corinne	TROUSSE Delphine
COZE Carole	LAFAGE/POCHITALOFF-HUVALE Marina	VALLI Marc
DADOUN Frédéric (disponibilité)	LAGIER Aude	VELLY Lionel
DALES Jean-Philippe	LAGIER Jean-Christophe	VELY Frédéric
DAUMAS Aurélie	LAGOUANELLE/SIMEONI Marie-Claude	VION-DURY Jean
DEGEORGES/VITTE Joëlle	LEVY/MOZZICONACCI Annie	ZATTARA/CANNONI Hélène
DEL VOLGO/GORI Marie-José	LOOSVELD Marie	
DELLIAUX Stéphane	MANCINI Julien	
DESPLAT/JEGO Sophie	MARY Charles	
DEVEZE Arnaud Disponibilité	MASCAUX Céline	
DUFOUR Jean-Charles	MAUES DE PAULA André	
EBBO Mikaël	MILLION Matthieu	

## MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

(mono-appartenants)

ABU ZAINEH Mohammad	DESNUES Benoît	STEINBERG Jean-Guillaume
BARBACARU/PERLES T. A.	LIMERAT/BOUDOURESQUE Françoise	THOLLON Lionel
BERLAND/BENHAIM Caroline	MARANINCHI Marie	THIRION Sylvie
BERAUD/JUVEN Evelyne (retraite octobre 2016)	MERHEJ/CHAUVEAU Vicky	
BOUCAULT/GARROUSTE Françoise	MINVIELLE/DEVICTOR Bénédicte	
BOYER Sylvie	POGGI Marjorie	
DEGIOANNI/SALLE Anna	RUEL Jérôme	

## MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

GENTILE Gaëtan

**MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES DE MEDECINE GENERALE à MI-TEMPS**

ADNOT Sébastien  
BARGIER Jacques  
BONNET Pierre-André  
CALVET-MONTREDON Céline  
GUIDA Pierre  
JANCZEWSKI Aurélie

**MAITRE DE CONFERENCES  
ASSOCIE à MI-TEMPS**

REVIS Joana

**PROFESSEURS ET MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS****PROFESSEURS ASSOCIES, MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES (mono-appartenants)****ANATOMIE 4201**

CHAMPSAUR Pierre (PU-PH)  
LE CORROLLER Thomas (PU-PH)  
PIRRO Nicolas (PU-PH)

LAGIER Aude (MCU-PH)

THOLLON Lionel (MCF) (60ème section)

**ANATOMIE ET CYTOLOGIE PATHOLOGIQUES 4203**

CHARAFE/JAUFFRET Emmanuelle (PU-PH)  
DANIEL Laurent (PU-PH)  
FIGARELLA/BRANGER Dominique (PU-PH)  
GARCIA Stéphane (PU-PH)  
XERRI Luc (PU-PH)

DALES Jean-Philippe (MCU-PH)  
GIUSIANO COURCAMBECK Sophie (MCU PH)  
LABIT/BOUVIER Corinne (MCU-PH)  
MAUES DE PAULA André (MCU-PH)  
SECQ Véronique (MCU-PH)

**ANESTHESIOLOGIE ET REANIMATION CHIRURGICALE ;  
MEDECINE URGENCE 4801**

ALBANESE Jacques (PU-PH)  
AUFFRAY Jean-Pierre (PU-PH) Surnombre  
BRUDER Nicolas (PU-PH)  
KERBAUL François (PU-PH)  
LEONE Marc (PU-PH)  
MARTIN Claude (PU-PH) Surnombre  
MICHEL Fabrice (PU-PH)  
MICHELET Pierre (PU-PH)  
PAUT Olivier (PU-PH)

GUIDON Catherine (MCU-PH)

VELLY Lionel (MCU-PH)

**ANTHROPOLOGIE 20**

ADALIAN Pascal (PR)

DEGIOANNI/SALLE Anna (MCF)

**BACTERIOLOGIE-VIROLOGIE ; HYGIENE HOSPITALIERE 4501**

CHARREL Rémi (PU PH)  
DRANCOURT Michel (PU-PH)  
FENOLLAR Florence (PU-PH)  
FOURNIER Pierre-Edouard (PU-PH)  
NICOLAS DE LAMBALLERIE Xavier (PU-PH)  
LA SCOLA Bernard (PU-PH)  
RAOULT Didier (PU-PH)

ANGELAKIS Emmanouil (MCU-PH)  
GOURIET Frédérique (MCU-PH)  
NOUGAIREDE Antoine (MCU-PH)  
NINOVE Laetitia (MCU-PH)

CHABRIERE Eric (PR) (64ème section)  
LEVASSEUR Anthony (PR) (64ème section)  
DESNUES Benoit (MCF) ( 65ème section )  
MERHEJ/CHAUVEAU Vicky (MCF) (87ème section)

**BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE 4401**

BARLIER/SETTI Anne (PU-PH)  
ENJALBERT Alain (PU-PH)  
GABERT Jean (PU-PH)  
GUIEU Régis (PU-PH)  
OUAFIK L'Houcine (PU-PH)

BUFFAT Christophe (MCU-PH)  
MOTTOLA GHIGO Giovanna (MCU-PH)  
SAVEANU Alexandru (MCU-PH)

**ANGLAIS 11**

BRANDENBURGER Chantal (PRCE)

BURKHART Gary (PAST)

**BIOLOGIE ET MEDECINE DU DEVELOPPEMENT  
ET DE LA REPRODUCTION ; GYNECOLOGIE MEDICALE 5405**

METZLER/GUILLEMAIN Catherine (PU-PH)

PERRIN Jeanne (MCU-PH)

**BIOLOGIE CELLULAIRE 4403**

ROLL Patrice (PU-PH)

GASTALDI Marguerite (MCU-PH)

KASPI-PEZZOLI Elise (MCU-PH)

LEVY/MOZZICONNACCI Annie (MCU-PH)

ROBAGLIA/SCHLUPP Andrée (MCU-PH)

**BIOPHYSIQUE ET MEDECINE NUCLEAIRE 4301**

GUEDJ Eric (PU-PH)

GUYE Maxime (PU-PH)

MUNDLER Olivier (PU-PH)

TAIEB David (PU-PH)

BELIN Pascal (PR) (69ème section)

RANJEVA Jean-Philippe (PR) (69ème section)

CAMMILLERI Serge (MCU-PH)

VION-DURY Jean (MCU-PH)

BARBACARU/PERLES Téodora Adriana (MCF) (69ème section)

**BIostatistiques, Informatique Médicale  
ET Technologies de Communication 4604**

CLAVERIE Jean-Michel (PU-PH) Surnombre

GAUDART Jean (PU-PH)

GIORGI Roch (PU-PH)

CHAUDET Hervé (MCU-PH)

DUFOUR Jean-Charles (MCU-PH)

GIUSIANO Bernard (MCU-PH)

MANCINI Julien (MCU-PH)

SOULA Gérard (MCU-PH)

ABU ZAINEH Mohammad (MCF) (5ème section)

BOYER Sylvie (MCF) (5ème section)

**CARDIOLOGIE 5102**

AVIERINOS Jean-François (PU-PH)

BONELLO Laurent (PU PH)

BONNET Jean-Louis (PU-PH)

CUISSET Thomas (PU-PH)

DEHARO Jean-Claude (PU-PH)

FRAISSE Alain (PU-PH) Disponibilité

FRANCESCHI Frédéric (PU-PH)

HABIB Gilbert (PU-PH)

PAGANELLI Franck (PU-PH)

THUNY Franck (PU-PH)

**CHIRURGIE DIGESTIVE 5202**

BERDAH Stéphane (PU-PH)

HARDWIGSEN Jean (PU-PH)

LE TREUT Yves-Patrice (PU-PH) Surnombre

SASTRE Bernard (PU-PH) Surnombre

SIELEZNEFF Igor (PU-PH)

BEYER BERJOT Laura (MCU-PH)

**CHIRURGIE GENERALE 5302**

DELPERO Jean-Robert (PU-PH)

MOUTARDIER Vincent (PU-PH)

SEBAG Frédéric (PU-PH)

TURRINI Olivier (PU-PH)

BEGE Thierry (MCU-PH)

**CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE ET TRAUMATOLOGIQUE 5002**

ARGENSON Jean-Noël (PU-PH)  
BLONDEL Benjamin (PU-PH)  
CURVALE Georges (PU-PH)  
FLECHER Xavier (PU PH)  
PARRATTE Sébastien (PU-PH)  
ROCHWERGER Richard (PU-PH)  
TROPANO Patrick (PU-PH)

**CANCEROLOGIE ; RADIOTHERAPIE 4702**

BERTUCCI François (PU-PH)  
CHINOT Olivier (PU-PH)  
COWEN Didier (PU-PH)  
DUFFAUD Florence (PU-PH)  
GONCALVES Anthony (PU-PH)  
HOUVENAEHEL Gilles (PU-PH)  
MARANINCHI Dominique (PU-PH) Surnombre  
SALAS Sébastien (PU-PH)  
VIENS Patrice (PU-PH)  
SABATIER Renaud (MCU-PH)

**CHIRURGIE INFANTILE 5402**

ALESSANDRINI Pierre (PU-PH) Surnombre  
GUYS Jean-Michel (PU-PH)  
JOUVE Jean-Luc (PU-PH)  
LAUNAY Franck (PU-PH)  
MERROT Thierry (PU-PH)  
VIEHWEGER Heide Elke (PU-PH)

**CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE ET STOMATOLOGIE 5503**

CHOSSEGROS Cyrille (PU-PH)  
GUYOT Laurent (PU-PH)

**CHIRURGIE THORACIQUE ET CARDIOVASCULAIRE 5103**

COLLART Frédéric (PU-PH)  
D'JOURNO Xavier (PU-PH)  
DODDOLI Christophe (PU-PH)  
GARIBOLDI Vlad (PU-PH)  
MACE Loïc (PU-PH)  
THOMAS Pascal (PU-PH)

FOUILLOUX Virginie (MCU-PH)  
GRISOLI Dominique (MCU-PH)  
TROUSSE Delphine (MCU-PH)

**CHIRURGIE PLASTIQUE,  
RECONSTRUCTRICE ET ESTHETIQUE ; BRÛLOLOGIE 5004**

CASANOVA Dominique (PU-PH)  
LEGRE Régis (PU-PH)  
HAUTIER/KRAHN Aurélie (MCU-PH)

**CHIRURGIE VASCULAIRE ; MEDECINE VASCULAIRE 5104**

ALIMI Yves (PU-PH)  
AMABILE Philippe (PU-PH)  
BARTOLI Michel (PU-PH)  
MAGNAN Pierre-Edouard (PU-PH)  
PIQUET Philippe (PU-PH)  
SARLON BARTOLI Gabrielle (MCU PH)

**HISTOLOGIE, EMBRYOLOGIE ET CYTOGENETIQUE 4202**

GRILLO Jean-Marie (PU-PH) Surnombre  
LEPIDI Hubert (PU-PH)  
ACHARD Vincent (MCU-PH)  
PAULMYER/LACROIX Odile (MCU-PH)

**GASTROENTEROLOGIE ; HEPATOLOGIE ; ADDICTOLOGIE 5201**

BARTHET Marc (PU-PH)  
BERNARD Jean-Paul (PU-PH)  
BOTTA-FRIDLUND Danielle (PU-PH)  
DAHAN-ALCARAZ Laetitia (PU-PH)  
GEROLAMI-SANTANDREA René (PU-PH)  
GRIMAUD Jean-Charles (PU-PH)  
LAUGIER René (PU-PH)  
SEITZ Jean-François (PU-PH)  
VITTON Véronique (PU-PH)

**GENETIQUE 4704****DERMATOLOGIE - VENEREOLOGIE 5003**

BERBIS Philippe (PU-PH)  
 GROB Jean-Jacques (PU-PH)  
 RICHARD/LALLEMAND Marie-Aleth (PU-PH)

GAUDY/MARQUESTE Caroline (MCU-PH)

BEROUD Christophe (PU-PH)

LEVY Nicolas (PU-PH)  
 MONCLA Anne (PU-PH)  
 SARLES/PHILIP Nicole (PU-PH)

KRAHN Martin (MCU-PH)  
 NGYUEN Karine (MCU-PH)  
 TOGA Caroline (MCU-PH)

**ENDOCRINOLOGIE ,DIABETE ET MALADIES METABOLIQUES ;  
 GYNECOLOGIE MEDICALE 5404**

BRUE Thierry (PU-PH)  
 CASTINETTI Frédéric (PU-PH)  
 NICCOLI/SIRE Patricia (PU-PH)

ZATTARA/CANNONI Hélène (MCU-PH)

**GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE ; GYNECOLOGIE MEDICALE 5403****EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE ET PREVENTION 4601**

AUQUIER Pascal (PU-PH)  
 BOYER Laurent (PU-PH)  
 CHABOT Jean-Michel (PU-PH)  
 GENTILE Stéphanie (PU-PH)  
 SAMBUC Roland (PU-PH)  
 THIRION Xavier (PU-PH)

AGOSTINI Aubert (PU-PH)  
 BOUBLI Léon (PU-PH)  
 BRETELLE Florence (PU-PH)  
 CARCOPINO-TUSOLI Xavier (PU-PH)  
 COURBIERE Blandine (PU-PH)  
 CRAVELLO Ludovic (PU-PH)  
 D'ERCOLE Claude (PU-PH)

BERBIS Julie (MCU-PH)  
 LAGOUANELLE/SIMEONI Marie-Claude (MCU-PH)

MINVIELLE/DEVICTOR Bénédicte (MCF)(06ème section)  
 TANTI-HARDOUIN Nicolas (PRAG)

**IMMUNOLOGIE 4703**

KAPLANSKI Gilles (PU-PH)  
 MEGE Jean-Louis (PU-PH)  
 OLIVE Daniel (PU-PH)  
 VIVIER Eric (PU-PH)

FERON François (PR) (69ème section)

BOUCRAUT Joseph (MCU-PH)  
 DEGEORGES/VITTE Joëlle (MCU-PH)  
 DESPLAT/JEGO Sophie (MCU-PH)  
 ROBERT Philippe (MCU-PH)  
 VELY Frédéric (MCU-PH)

**HEMATOLOGIE ; TRANSFUSION 4701**

BLAISE Didier (PU-PH)  
 COSTELLO Régis (PU-PH)  
 CHIARONI Jacques (PU-PH)  
 GILBERT/ALESSI Marie-Christine (PU-PH)  
 MORANGE Pierre-Emmanuel (PU-PH)  
 VEY Norbert (PU-PH)

BACCINI Véronique (MCU-PH)  
 CALAS/AILLAUD Marie-Françoise (MCU-PH)  
 FRERE Corinne (MCU-PH)  
 GELSI/BOYER Véronique (MCU-PH)  
 LAFAGE/POCHITALOFF-HUVALE Marina (MCU-PH)  
 POGGI Marjorie (MCF) (64ème section)

BERAUD/JUVEN Evelyne (MCF) 65ème section) (retraite octobre 2016)

BOUCAULT/GARROUSTE Françoise (MCF) 65ème section)

**MEDECINE LEGALE ET DROIT DE LA SANTE 4603**

LEONETTI Georges (PU-PH)  
 PELISSIER/ALICOT Anne-Laure (PU-PH)  
 PIERCECCHI/MARTI Marie-Dominique (PU-PH)

**MALADIES INFECTIEUSES ; MALADIES TROPICALES 4503**

BROUQUI Philippe (PU-PH)  
 PAROLA Philippe (PU-PH)  
 STEIN Andréas (PU-PH)

BARTOLI Christophe (MCU-PH)

BERLAND/BENHAIM Caroline (MCF) (1ère section)

LAGIER Jean-Christophe (MCU-PH)  
 MILLION Matthieu (MCU-PH)

**MEDECINE PHYSIQUE ET DE READAPTATION 4905****MEDECINE INTERNE ; GERIATRIE ET BIOLOGIE DU VIEILLISSEMENT ; MEDECINE GENERALE ; ADDICTOLOGIE 5301**

BONIN/GUILLAUME Sylvie (PU-PH)  
 DISDIER Patrick (PU-PH)  
 DURAND Jean-Marc (PU-PH)  
 FRANCES Yves (PU-PH) Surnombre  
 GRANEL/REY Brigitte (PU-PH)  
 HARLE Jean-Robert (PU-PH)  
 ROSSI Pascal (PU-PH)  
 SCHLEINITZ Nicolas (PU-PH)  
 SERRATRICE Jacques (PU-PH) disponibilité  
 EBBO Mikael (MCU-PH)

BENSOUSSAN Laurent (PU-PH)  
 DELARQUE Alain (PU-PH)

VITON Jean-Michel (PU-PH)

**MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL 4602**

BOTTA Alain (PU-PH) Surnombre  
 LEHUCHER/MICHEL Marie-Pascale (PU-PH)  
 BERGE-LEFRANC Jean-Louis (MCU-PH)  
 SARI/MINODIER Irène (MCU-PH)

GENTILE Gaëtan (MCF Méd. Gén. Temps plein)

**NEPHROLOGIE 5203**

FILIPPI Simon (PR associé Méd. Gén. à mi-temps)

BERLAND Yvon (PU-PH)  
 BRUNET Philippe (PU-PH)  
 BURTEY Stéphanne (PU-PH)  
 DUSSOL Bertrand (PU-PH)  
 MOAL Valérie (PU-PH)  
 JOURDE CHICHE Noémie (MCU PH)

ADNOT Sébastien (MCF associé Méd. Gén. à mi-temps)  
 BARGIER Jacques (MCF associé Méd. Gén. à mi-temps)  
 BONNET Pierre-André (MCF associé Méd. Gén. à mi-temps)  
 CALVET-MONTREDON Céline (MCF associé Méd. Gén. à temps plein)  
 GUIDA Pierre (MCF associé Méd. Gén. à mi-temps)

**NUTRITION 4404****NEUROCHIRURGIE 4902**

DARMON Patrice (PU-PH)  
 RACCAH Denis (PU-PH)  
 VALERO René (PU-PH)

DUFOUR Henry (PU-PH)  
 FUENTES Stéphane (PU-PH)  
 REGIS Jean (PU-PH)  
 ROCHE Pierre-Hugues (PU-PH)  
 SCAVARDA Didier (PU-PH)

ATLAN Catherine (MCU-PH)  
 BELIARD Sophie (MCU-PH)

CARRON Romain (MCU PH)  
 GRAILLON Thomas (MCU PH)

MARANINCHI Marie (MCF) (66ème section)

<b>ONCOLOGIE 65 (BIOLOGIE CELLULAIRE)</b>	<b>NEUROLOGIE 4901</b>
CHABANNON Christian (PR) (66ème section) SOBOL Hagay (PR) (65ème section)	ATTARIAN Sharham (PU PH) AUDOIN Bertrand (PU-PH) AZULAY Jean-Philippe (PU-PH) CECCALDI Mathieu (PU-PH) EUSEBIO Alexandre (PU-PH)
<b>OPHTALMOLOGIE 5502</b>	FELICIAN Olivier (PU-PH) PELLETIER Jean (PU-PH) POUGET Jean (PU-PH) Surnombre
DENIS Danièle (PU-PH) HOFFART Louis (PU-PH) MATONTI Frédéric (PU-PH) RIDINGS Bernard (PU-PH) Surnombre	<b>PEDOPSYCHIATRIE; ADDICTOLOGIE 4904</b>
<b>OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE 5501</b>	DA FONSECA David (PU-PH) POINSO François (PU-PH)
DESSI Patrick (PU-PH) FAKHRY Nicolas (PU-PH) GIOVANNI Antoine (PU-PH) LAVIEILLE Jean-Pierre (PU-PH) NICOLLAS Richard (PU-PH) TRIGLIA Jean-Michel (PU-PH)  DEVEZE Arnaud (MCU-PH) Disponibilité  REVIS Joana (MAST) (Orthophonie) (7ème Section)  ROMAN Stéphane (Professeur associé des universités mi-temps)	<b>PHARMACOLOGIE FONDAMENTALE - PHARMACOLOGIE CLINIQUE; ADDICTOLOGIE 4803</b>
<b>PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE 4502</b>	BLIN Olivier (PU-PH) FAUGERE Gérard (PU-PH) MICALLEF/ROLL Joëlle (PU-PH) SIMON Nicolas (PU-PH)  BOULAMERY Audrey (MCU-PH) VALLI Marc (MCU-PH)
DESSEIN Alain (PU-PH) PIARROUX Renaud (PU-PH)  CASSAGNE Carole (MCU-PH) L'OLLIVIER Coralie (MCU-PH) MARY Charles (MCU-PH) RANQUE Stéphane (MCU-PH) TOGA Isabelle (MCU-PH)	<b>PHILOSOPHIE 17</b>
<b>PEDIATRIE 5401</b>	LE COZ Pierre (PR) (17ème section)  ALTAVILLA Annagrazia (PR Associé à mi-temps)
CHAMBOST Hervé (PU-PH) DUBUS Jean-Christophe (PU-PH) GIRAUD/CHABROL Brigitte (PU-PH) MICHEL Gérard (PU-PH) MILH Mathieu (PU-PH) REYNAUD Rachel (PU-PH) SARLES Jacques (PU-PH) TSIMARATOS Michel (PU-PH)  ANDRE Nicolas (MCU-PH)	<b>PHYSIOLOGIE 4402</b>
	BARTOLOMEI Fabrice (PU-PH) BREGEON Fabienne (PU-PH) CHAUVEL Patrick (PU-PH) Surnombre JOLIVET/BADIER Monique (PU-PH) MEYER/DUTOUR Anne (PU-PH)  BARTHELEMY Pierre (MCU-PH) BOULLU/CIOCCA Sandrine (MCU-PH) DADOUN Frédéric (MCU-PH) (disponibilité) DEL VOLGO/GORI Marie-José (MCU-PH)

COZE Carole (MCU-PH)  
FABRE Alexandre (MCU-PH)  
OUDIN Claire (MCU-PH)  
OVAERT Caroline (MCU-PH)

DELLIAUX Stéphane (MCU-PH)  
GABORIT Bénédicte (MCU-PH)  
REY Marc (MCU-PH)  
TREBUCHON/DA FONSECA Agnès (MCU-PH)

**PSYCHIATRIE D'ADULTES ; ADDICTOLOGIE 4903**

AZORIN Jean-Michel (PU-PH)  
BAILLY Daniel (PU-PH)  
LANCON Christophe (PU-PH)  
NAUDIN Jean (PU-PH)

LIMERAT/BOUDOURESQUE Françoise (MCF) (40ème section)  
RUEL Jérôme (MCF) (69ème section)  
STEINBERG Jean-Guillaume (MCF) (66ème section)  
THIRION Sylvie (MCF) (66ème section)

**PSYCHOLOGIE - PSYCHOLOGIE CLINIQUE, PCYCHOLOGIE SOCIALE 16**

AGHABABIAN Valérie (PR)

**PNEUMOLOGIE; ADDICTOLOGIE 5101**

**RADIOLOGIE ET IMAGERIE MEDICALE 4302**

BARTOLI Jean-Michel (PU-PH)  
CHAGNAUD Christophe (PU-PH)  
CHAUMOITRE Kathia (PU-PH)  
GIRARD Nadine (PU-PH)  
GORINCOUR Guillaume (PU-PH)  
JACQUIER Alexis (PU-PH)  
MOULIN Guy (PU-PH)  
PANUEL Michel (PU-PH)  
PETIT Philippe (PU-PH)  
VIDAL Vincent (PU-PH)

ASTOUL Philippe (PU-PH)  
BARLESI Fabrice (PU-PH)  
CHANEZ Pascal (PU-PH)  
CHARPIN Denis (PU-PH) Surnombre  
REYNAUD/GAUBERT Martine (PU-PH)

GREILLIER Laurent (MCU PH)  
MASCAUX Céline (MCU-PH)

TOMASINI Pascale (Maitre de conférences associé des universités)

**THERAPEUTIQUE; MEDECINE D'URGENCE; ADDICTOLOGIE 4804**

**REANIMATION MEDICALE ; MEDECINE URGENCE 4802**

GAINNIER Marc (PU-PH)  
GERBEAUX Patrick (PU-PH)  
PAPAZIAN Laurent (PU-PH)  
ROCH Antoine (PU-PH)

AMBROSI Pierre (PU-PH)  
BARTOLIN Robert (PU-PH) Surnombre  
VILLANI Patrick (PU-PH)

DAUMAS Aurélie (MCU-PH)

HRAIECH Sami (MCU-PH)

**UROLOGIE 5204**

**RHUMATOLOGIE 5001**

GUIS Sandrine (PU-PH)  
LAFFORGUE Pierre (PU-PH)  
PHAM Thao (PU-PH)  
ROUDIER Jean (PU-PH)

BASTIDE Cyrille (PU-PH)  
KARSENTY Gilles (PU-PH)  
LECHEVALLIER Eric (PU-PH)  
ROSSI Dominique (PU-PH)

A mon jury de thèse

A Monsieur le Professeur Patrick DESSI,

C'est dans votre service et sous votre aura bienveillante que j'ai pu être formé à l'Oto-Rhino-Laryngologie. Vous avez employé toute votre énergie à bâtir ce service et à réunir les conditions les plus optimales nécessaires à notre formation. Vous incarnez l'excellence de la chirurgie Rhino sinusienne dont vous êtes un maître incontesté. La perfection de vos gestes chirurgicaux et votre bon sens clinique suscitent ma plus grande admiration. Vous m'avez fait l'honneur d'accepter de présider ce jury, soyez assuré cher Maître de ma plus profonde reconnaissance et de mon plus grand respect.

A Monsieur le Professeur Antoine GIOVANNI,

Maitre en chirurgie, expert en Laryngologie et Phoniatrie, spécialité dont vous êtes une référence, vous excellez également par votre éloquence. Vos conseils et vos citations sont encore gravés dans ma mémoire. J'ai énormément appris à vos côtés. Par votre sagesse et votre expertise chirurgicale vous resterez pour moi un modèle. Votre présence au sein de ce jury constitue un immense honneur. Soyez assuré de ma plus grande considération.

A Monsieur le Professeur Richard NICOLLAS,

L'apprentissage de l'Oto-Rhino-Laryngologie pédiatrique passe par votre enseignement incontournable. Votre maîtrise chirurgicale étendue en laryngologie, rhinologie et en otologie est connue de tous. Toujours à l'écoute de vos internes, vous n'avez jamais ménagé votre énergie pour nous transmettre votre savoir. Vos préceptes constituent un bien précieux dont j'ai eu le privilège de bénéficier. Vous avez accepté d'apporter votre expertise à ce jury de thèse. Soyez assuré de ma reconnaissance la plus sincère.

A Monsieur le Docteur Justin MICHEL,

Ton savoir immense et tes conseils ont été vitaux dans la genèse de ce travail. Tu fais partie de l'élite de la chirurgie Rhinosinusienne, tu repousses toujours plus loin les limites de notre spécialité. Avec toi on peut tout faire en vidéo-endoscopie. Travailler avec toi constitue une source d'enrichissement permanent. Merci pour ta gentillesse, pour ton soutien et la disponibilité dont tu as fait preuve tout au long de mon parcours d'interne, depuis la première méatotomie moyenne que tu m'as apprise à faire, jusqu'à la finalisation de ce travail thèse. Merci de m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail. J'ai hâte de continuer à apprendre à tes côtés. Sois certain de ma plus sincère amitié et de mon plus grand respect.

A ma famille,

A mon père et à ma mère merci pour tous les sacrifices que vous avez fait pour nous. C'est grâce à vous si je suis là.

A Bilal, tu es le meilleur des frères même si je ne te le dis jamais.

A Hager et Azzdinn, vous avez été toujours à mes côtés dans toutes les circonstances. Merci

A Asmaâ, cela fait maintenant 1 an que nous sommes uni. Merci pour le soutien que tu m'apporte chaque jour même quand je suis pénible.

A toutes ma famille en Tunisie.

A mes Maîtres, par ordre chronologique :

A Mr le Pr Thomassin, j'ai été l'un des derniers à avoir eu la chance de vous voir œuvrer au bloc opératoire. Ce fut un réel plaisir et un honneur.

A Mr le Pr Lavieille, Vos qualités chirurgicales immenses et votre grande disponibilité ont été remarquables. J'ai acquis à vos côtés des connaissances étendues dans le domaine de l'otologie qui vous est si cher.

A Mr le Pr Fakhry, merci pour la qualité de tes enseignements au bloc opératoire. Tu n'es jamais avare de conseils les plus judicieux. Ce semestre à tes côtés restera l'un des moments forts de mon internat. Damien et moi sommes décidément d'accord, tu es vraiment une machine de guerre.

A Mr le Pr Triglia, Chirurgien exemplaire vous savez transmettre à vos collaborateurs et à vos internes une rigueur indispensable au bon exercice de notre profession. Durant le semestre que j'ai eu l'honneur d'effectuer dans le service que vous dirigez, il m'a été permis d'apprendre énormément à vos côtés tant sur le plan de l'ORL pédiatrique que sur le plan humain.

A Mr le Pr Roman, merci de nous inculquer cette approche si particulière qu'est la surdité en pédiatrie.

A Mr le Pr Henry, Quelle chance d'avoir pu vous observer opérer. Votre prestance et votre humour m'ont beaucoup marqué.

A Mr le Pr Sebag, Merci pour ce semestre effectué à vos côtés. Votre sympathie et votre disponibilité sont remarquables.

A tous mes senior, assistants ou PH,

Au Dr Abiraad, merci pour votre gentillesse et pour vos conseils qui m'ont guidé dans mes premiers pas d'interne.

Au Dr Achache, tu m'as transmis ta dalle de la chirurgie. Je t'ai fait chier comme tu me le disais si souvent mais tu m'as guidé dans mes premiers pas en ORL. Merci infiniment pour ta gentillesse et ta bienveillance. Tu as été un super assistant.

Au Dr Alami, ce semestre à Briançon n'aurai pas eu la même saveur sans vos enseignements, votre disponibilité et votre immense sympathie. J'en garde un souvenir mémorable.

Au Dr Antonini, merci pour ta gentillesse et ta pédagogie. Ce fut un plaisir de travailler avec toi à Aix.

Au Dr Charfedinne, darkvedinne le pro du conditionnement. Merci de m'avoir fait partager tes lumières en audio. « hello ! it's me »

Au Dr Checler, grâce à vous j'ai appris à relativiser un saignement artériel.

Au Dr Cihanek, aussi habile sur une barre de pole dance que dans un cou, j'ai passé un super semestre à tes côtés.

Au Dr Collin, merci pour tes enseignements au bloc, toi aussi tu m'as permis de mettre le pied à l'étrier.

Au Dr Decuttoli, ce fût un plaisir d'être votre interne pendant 6 mois. J'ai beaucoup appris à vos côtés. Encore merci.

Au Dr Devèze, merci pour tes enseignements et ta gentillesse.

Au Dr Anne Farinetti, à mon grand regret j'ai été rarement au bloc avec toi mais les rares occasions ont été si fructueuses. Merci.

Au Dr Jaloux, merci pour ces collaborations du lundi d'urgence !!!! T'es mec en or. Promis je toucherai plus à ta chaise.

Au Dr Daniel Korchia, Merci pour votre gentillesse, je crois que c'est le maître mot qui vous caractérise. C'est un réel plaisir d'opérer à vos côtés.

Au Dr Lagier, les radiocinéma avec toi c'était du grand art, du 7eme art. Merci pour ces soirées de révisions d'anatomies vitales pour l'examen de DES.

Au Dr Lavedrine, la plus dijonnaise des marseillaises (ou l'inverse), tu c'est un plaisir de pouvoir travailler avec toi

Au Dr Claire Le Treut, tu as su créer un monde de bisounours un havre de paix en plein milieu du CHU Nord. Je te souhaite le meilleur et surtout un tableaux excel bien remplis.

Au Dr Meller, toujours très agréable de travailler à vos côtés et de discuter avec vous, vous qui incarnez le calme et la gentillesse. Merci pour vos apprentissages otologiques.

Au Dr Moreddu, merci pour ce semestre inoubliable et riches en émotions chirurgicales. « Eric ! il dessature ! yé n'arrive plou à ventilé ! »

Au Dr Morvan, partenaire de M2, Homo militaris, félicitation pour ce nouvel immature !

Au Dr Montava, merci pour la patience et la générosité dont tu fais preuve au bloc pour nous faire faire des gestes.

Au Dr Paganelli, merci pour ton soutien, mon seul regret (et frustration) aura été de n'avoir jamais pu travailler avec toi comme interne. Cela aura été explosif j'en suis sûr. Non je t'assure quand j'avais 3 ans je ne me mettais pas des pièces de monnaies dans la bouche, moi.

Au Dr Penicaud, j'ai toujours été impressionné par ta science des lambeaux par ton fabuleux jeu de jambe ! Et aussi par ton recrutement de rhinoplastie ! Quel plaisir de travailler et d'apprendre avec toi. Je suis vraiment content de pouvoir continuer l'aventure avec toi.

Au moment d'évoquer le Dr Radulesco, beaucoup de chose me viennent à l'esprit « Oh yeah !!! Oh yeah !!! ».

- Tu penses à quoi ?
- Je pense à ta mère.
- Y'a quoi demain au bloc ?
- Y'a ta mère.
- C'est qui lui ?
- Le nouveau copain de mère

Depuis ce semestre dans lequel tu as débarqué en plein milieu, nous nous sommes rapidement insultés ce fut le début d'une profonde amitié. Tu as su me guider à ta manière (de merde). Je suis heureux de pouvoir travailler avec toi.

Au Dr Raza Tantely, ne retient que meilleur.

Au Dr Vincent Rossi, le Brianconnais.

Au Dr Danièle Robert, merci de m'avoir fait partager vos connaissances en déglutition.

Au Dr Salburgo pchhhh, merci pour ton soutien et ta sympathie. Toi aussi promis je toucherai plus à ta chaise.

Au Dr Santini, je pense toujours à ton aura protectrice qui nous enveloppé durant le semestre que nous avons passé avec toi. Je te souhaite le meilleur pour ta futur maternité.

Au Dr Serra, merci pour ta gentillesse ta patience et ta douceur légendaire.

A mes co-internes, dans l'ordre chronologique

A Maxime Caillot, mon premier co-interne je te considère comme un frère, alors qu'est ce qu'on fait qu'est ce qu'on fait pas, en fait il est paraplégique le mec.

A Julie Fernandez Rodriguez, malheureusement nous n'avons été qu'une seule fois co-interne mais ce fut si intense. Nous formions une belle équipe dans cette cher unité A.

A Laura Lo Mone, pour une fois je ne dirai pas que tu m'as fait l'aumône d'avoir été ma co-interne à de multiples reprises ça serait trop facile.

A Alexia Mattei, alexchia, merci de rigoler à mes blagues mêmes les plus pourris. Au cours de ces 5 semestres que nous avons passé ensemble tu auras été une oreille attentive. Ton esprit es mue par un système complexe que peu de personnes arrivent à pénétrer. Oups je n'ai plus d'écouvillon...

A Damien Rivière, le bogoss de l'armée française, notre débat sur la meilleure manière de faire un surjet ne seras jamais tranché, même si je pense que l'aiguille droite offre une meilleure pénétration des tissus. Ce semestre de combat, et de performance vocale en tout genre resterons graver dans ma mémoire. J'espère qu'on aura à nouveau l'occasion de faire un karaoké.

Samy Wajsbrot, le Wajsbrot, on aura bien rigolé pendant ce semestre. Est-ce que tu peux.....

...faire une courbe osseuse ?

A Marie Eva Rossi, je eu la chance de t'avoir comme co-interne alors que tu étais exploratrice en pédiatrie.

A Cyrine Zgolli, j'espère que ces lignes te parviendront jusqu'en Tunisie. Merci de m'avoir permis de m'exercer linguistiquement en tunisien.

Aux bibounets et bibounette du 4eme ouest, Cyrille Buisset, mon ami de Lorraine tu gères entre guillemets les calcémies comme un dieu, Kastuya, peluche, fais gaffe à ton transit, moi je n'ai jamais dit qu'étais bête merci pour les services que tu m'as rendu, Arthur Klein le vegan le plus bestiale ta philosophie de vie c'est ouf ne change rien, Justine Delmas, la Jessica Alba aux petites poignets, tu es soumise mais tu contrôles ta pointes et toi il te manque rien.

A mes dernières Co-Interne,

Pauline Barry merci de m'avoir plus qu'aidé ces 6 derniers mois, tu es une fille en or.

Jaaaaaaade, merci, tout tes petits coups de pouces réunis sont devenus des poings monumentaux dressés en l'air. Quand tu veux je te file mes consensus.

A Laura Monestier, titi tu as survécu à ton séjour en zone de guerre et toi aussi tu t'es bien battu pour les scanners. Si un jour tu sèches n'oublie pas de faire un lavement de nez.

A tous les autres,

Abdy, merci pour ta gentillesse n'oublie pas de prendre un peu de muscle. Franck t'es fou mais je t'aime bien. A Carole Boulzette, il faut qu'on crée ce fameux djamel deboulze. A Astrid Mazoyer

partenaire de M2, tu es la prochaine sur la liste bon courage pour cette dernière ligne droite. R studio® est ton ami. A Mathieux le Flemm, félicitation pour le Gaspard. A Mimariolle, Zidi, Lounges, Bory. A Justine Mugnier.

Aux orthophonistes Marido et Christine.

A Françoise Gauthier.

Aux infirmières de service, de bloc, des consultations, les secrétaires, AS et ASH.

A mon Macbook®

A youtube®



## Introduction générale

Le septum nasal est une structure très souvent impliquée dans l'obstruction nasale. Il a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques s'attachant à le décrire dans sa conformation et tentant de définir les meilleurs moyens de corriger ses anomalies architecturales. De nouveaux outils de bio-statistiques ont vu le jour ces dernières années. Ils semblent offrir des perspectives intéressantes pour l'étude de la conformation des objets complexes. Nous souhaitons, par ce travail de thèse, étudier, l'apport de la morphométrie géométrique dans l'étude du septum nasal. Notre travail est divisé en 3 chapitres qui ont la particularité de reposer sur une méthode d'analyse statistique commune.

Le premier est une étude préliminaire au cours de laquelle nous souhaitons définir et valider une méthode d'analyse du septum nasal à l'aide de la morphométrie géométrique sur une population de sujets sains.

Le second, intitulé « étude principale : Apport de la morphométrie géométrique septale dans l'approche de l'obstruction nasale », avait pour but d'établir une classification des déformations du septum nasal chez des individus se plaignant d'obstruction nasale.

Le troisième est le dernier chapitre, intitulés « Perspective : Analyse en morphométrie géométrique des variations pré- et post-opératoires du septum nasal », avait pour but d'étudier les variations morphologiques du septum nasal apportée par les chirurgies correctrices de type septoplastie.

**- A -**

# **Etude préliminaire**

**ETUDE DU SEPTUM NASAL DE L'ADULTE PAR LA  
MORPHOMÉTRIE GÉOMÉTRIQUE**

Master 2 recherche

# SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>2. MATERIEL ET METHODE</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Population de l'étude</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Reconstruction 3D : segmentation par ITK-SNAP</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Landmarks</b>	<b>13</b>
2.3.1 Définition des landmarks	13
2.3.2. Sélection et description des landmarks utilisés pour l'analyse	14
<b>2.4. Morphométrie géométrique</b>	<b>18</b>
2.4.1 Principe de la morphométrie géométrique	18
<b>2.5 Analyses statistiques</b>	<b>24</b>
2.5.1. Fiabilité de la méthode	24
2.5.2. Recherche des allométries	24
2.5.3. Recherche d'un dimorphisme sexuel	25
2.5.4. Comparaison landmarks osseux et landmarks mous	25
<b>3. RESULTATS</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Etude de la fiabilité des Landmark osseux</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Etude de la fiabilité des Landmark muqueux</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Population de l'étude</b>	<b>27</b>
<b>3.4 Morphométrie géométrique</b>	<b>28</b>
3.4.1. Analyse Procuste généralisée couplée à l'analyse en composantes principales pour le septum osseux	28
3.4.2. Analyse Procruste généralisée couplée à l'analyse en composantes principales pour le septum mou	31
3.4.3. Analyse visuelle de la variabilité le long des composantes principales	34
<b>3.5. Analyses statistiques</b>	<b>38</b>

3.5.1. Recherche des allométries du septum osseux et du septum mou .....	38
3.5.2. Recherche d'un dimorphisme sexuel .....	41
<b>3.6. Fiabilité de la méthode/Validité des Landmarks du tissu mou par rapport aux landmarks osseux.....</b>	<b>43</b>
<b>4. DISCUSSION.....</b>	<b>44</b>
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>46</b>
<b>6. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>47</b>

# 1. INTRODUCTION

---

Le septum nasal est une structure médiane séparant les deux fosses nasales. Il s'agit d'une structure verticale constituée à sa partie antérieure par le cartilage quadrangulaire et à sa partie postérieure par des éléments osseux, la lame perpendiculaire de l'ethmoïde appendue à la base du crâne au niveau de la lame criblée et le vomer os impaire de la face situé à la partie postéro inférieure de la cloison nasale (1). Cet os orienté en bas et en avant, s'insère en haut sur le sphénoïde et en bas sur le plancher des fosses nasales composé de l'os palatin et l'os maxillaire. (2)

La cloison nasale a une anatomie interindividuelle très variable (3). Celle-ci est rarement parfaitement rectiligne. Elle se présente selon différentes conformations avec des amplitudes de déviation plus ou moins importantes. Celles-ci peuvent être soit antérieures, soit postérieures ou associées (4), (5), (6) (7) (8)

Ces déviations peuvent être constitutionnelles ou acquises secondairement par traumatisme notamment. (9)

Les fosses nasales ayant un rôle majeur dans la ventilation en offrant un lieu de passage initial à l'air inspiré et un lieu de passage final à l'air expiré, toute déformation de la cloison peut entraver ce flux aérien. Cela se manifeste cliniquement par la sensation d'obstruction nasale.

Il s'agit d'un motif fréquent de consultation en Oto-Rhino-Laryngologie (ORL). Ce symptôme s'évalue objectivement par la réalisation d'une rhinomanométrie, examen permettant d'apprécier les résistances à l'écoulement de l'air au sein des deux fosses nasales.

Le traitement des déviations septales symptomatiques est chirurgical. La septoplastie (10) est une des interventions les plus fréquemment pratiquées en ORL. (11) (12)

Dans la littérature de nombreuses tentatives de classifications des variations morphologiques du septum ont été proposées mais aucunes ne s'est réellement imposées. (13)

Elles étaient basées sur des descriptions cliniques visuelles sur sujet vivant ou sur sujet anatomique (14) ou à partir d'analyse d'examen d'imageries scanners (15). Mais aucune n'a à ce jour étudié la conformation du septum nasale grâce à la morphométrie géométrique. (16)

Aucun landmarks n'est définis dans la littérature pour cette région. (17)

Les objectifs de notre travail étaient :

1. Définir des LM os et des LM mous pour le septum nasal
2. Valider ces Landmark : fiabilité et reproductibilité pour le septum nasal
3. Réaliser une étude en morphométrie géométrique de la conformation du septum nasal avec analyse descriptive.
4. Comparer les LM os et LM mous entre eux pour avoir une notion de l'influence des tissus mous sur la conformation septale.

## 2. MATERIEL ET METHODE

---

### 2.1. Population de l'étude

---

Deux cents examens tomodensitométriques ont été extraits de la base de données des services de Radiologie Générale du CHU de l'Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille (APHM) de façon aléatoire entre novembre 2009 et décembre 2016.

#### **Nos critères d'inclusion étaient**

- *Liés aux individus*

N'ont été inclus dans cette étude que les individus :

- Adultes (âge supérieur à 18 ans)
- N'étant pas équipé de matériel médical susceptible de déformer le vestibule ou la fosse nasale (sonde nasogastrique, lunettes à oxygène)
- *Liés aux examens tomodensitométriques*

N'ont été inclus que les examens :

- Réalisés dans notre centre
- Réalisés selon le protocole : scanner hélicoïdal multibarettes Siemens Somatom Définition (Siemens Healthcare) ou General Electric Light speed LS 16 Pro (GE) en utilisant les paramètres suivants : 120-Kv, 130 mAs, coupes de 0.6 mm chaque 0.3 mm.
- Permettant la visualisation complète du massif facial depuis l'extrémité de la pyramide nasale en avant jusqu'au tronc cérébral en arrière et d'une oreille à l'autre latéralement
- Ne présentant pas d'artefact métallique ni dentaire rendant peu fiable la reconstruction 3D
- Ne présentant pas d'importante déminéralisation du septum osseux.

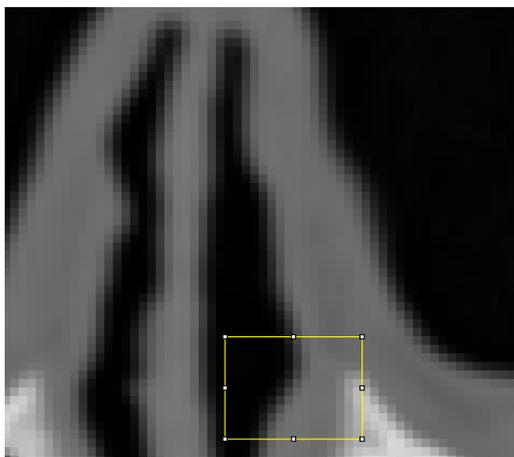
## 2.2. Reconstruction 3D : segmentation par ITK-SNAP

---

La génération du modèle surfacique était réalisée grâce au logiciel de segmentation semi-automatique d'images ITK-SNAP (18) qui permet de superviser le processus de segmentation (19).

Cette méthode repose sur une détermination du seuil séparant le mieux l'air des structures osseuses, cartilagineuses et des parties molles. Nous avons appliqué pour chaque individu la méthode du Half Maximum Height (HMH) décrite et utilisée pour évaluer des distances linéaires sur une coupe unique d'examen tomodensitométrique et « sur os sec » (19). Cette mesure est obtenue en calculant la valeur moyenne de niveau de gris (valeur seuil) à partir de l'histogramme établi au niveau de deux structures adjacentes. Cette technique permet de fixer une valeur mathématique à cette zone de transition où le changement des niveaux de gris n'est pas abrupt mais au contraire progressif. Dans le but d'établir au mieux les valeurs de seuillage entre les structures, nous avons obtenu les histogrammes des interfaces air/tissu mou et os/air à l'aide de l'outil « Measure » du logiciel ImageJ® v.1.44o (National Institutes of Health) (Figure 1). Afin d'obtenir une valeur moyenne pour chaque individu, nous avons réalisé 10 mesures par individu. Nous avons ensuite déterminé la valeur maximale et la valeur minimale puis calculé la valeur moyenne des moyennes.

A cette méthode se sont ajoutées des retouches réalisées manuellement en 2D et en 3D.



**Figure 1.** Vue, zoom maximum, dans une coupe axiale de l'examen tomodensitométrique illustrant la technique du HMH.

Le processus de segmentation d'images permet de séparer une image en plusieurs zones. Les points connexes ayant des propriétés similaires (niveaux de gris) vont être réunis dans le même ensemble. L'algorithme utilisé procède par croissance de régions. Cette technique consiste à regrouper des points voisins pour former des régions de plus en plus importantes. Pendant le seuillage, les régions ainsi sélectionnées sont visualisées sur les trois coupes (transversale, coronale, sagittale). Cela permet à l'utilisateur d'évaluer la qualité du seuillage sur différentes coupes 2D et de l'adapter de manière dynamique pour reconstruire une géométrie 3D correspondant au domaine que l'on cherche à extraire.

Les étapes de cette modélisation sont :

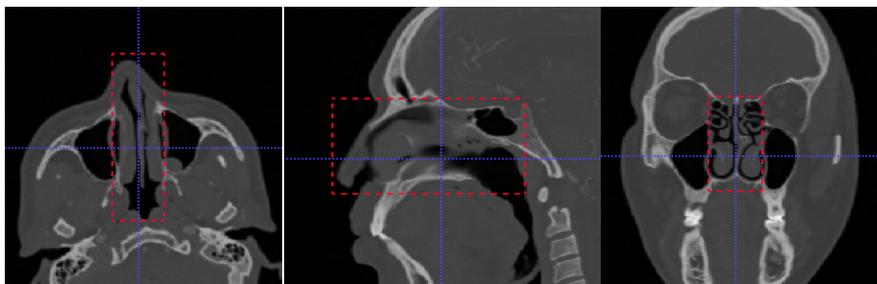
- Sélection de la région d'intérêt (figure 2) : cela va permettre de limiter le domaine d'évolution du contour actif (ensemble de points que l'on va déplacer pour leur faire épouser une forme). Afin d'avoir un volume contenant l'ensemble du vestibule nasal, dans notre étude la région d'intérêt était un parallélépipède rectangle dont les limites étaient :

Sur une coupe sagittale passant par le septum nasal :

- En haut : un plan axial passant par la suture des os propre du nez à l'os frontal
- En avant : un plan coronal passant par la pointe du nez
- En arrière : un plan coronal passant par la paroi postérieure du cavum
- En bas : un plan axial passant par l'ouverture des narines sur le milieu extérieur

Sur une coupe transversale passant par le plus large des narines :

- Latéralement : un plan sagittal passant par la cloison inter sinuso nasale

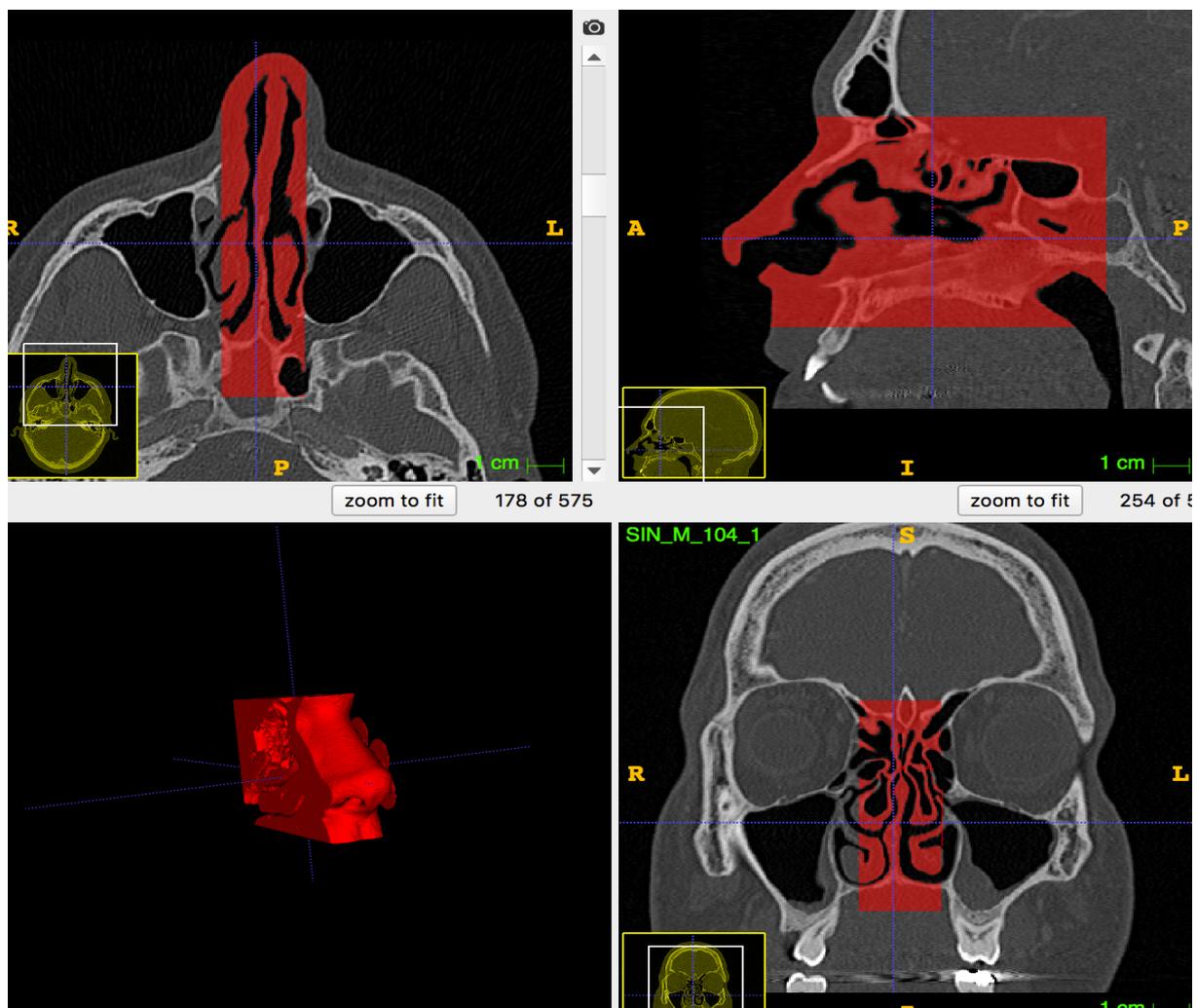


**Figure 2.** Visualisation de la zone d'intérêt en pointillés rouges sur une coupe axiale, sagittale et coronale

Pour chaque individu, on procède deux reconstructions.

Tout d'abord on effectue une reconstruction de son septum osseux en faisant abstraction de ses tissus mous.

- Mise en place des contours actifs (bulle) à l'intérieur de ce volume. Le contour actif va se dilater (énergie de contrainte) pour remplir les structures osseuses du septum, en s'arrêtant aux zones de plus faible gradient d'intensité (tissus mou). (Figure 3)



**Figure 3.** Capture d'écran du processus de segmentation. Le modèle en cours d'acquisition est en rouge.

Puis dans un second temps, en adaptant la valeur seuil, on réalise par le même procédé une reconstruction du septum tissus mou, c'est-à-dire le septum en totalité comprenant en plus du septum osseux, le septum cartilagineux et le revêtement muqueux.

Cette fois-ci le contour actif va se dilater pour remplir les structures osseuses du septum, en s'arrêtant aux zones de plus faible gradient d'intensité (l'air).

Plusieurs problèmes peuvent rendre la segmentation difficile voire impossible :

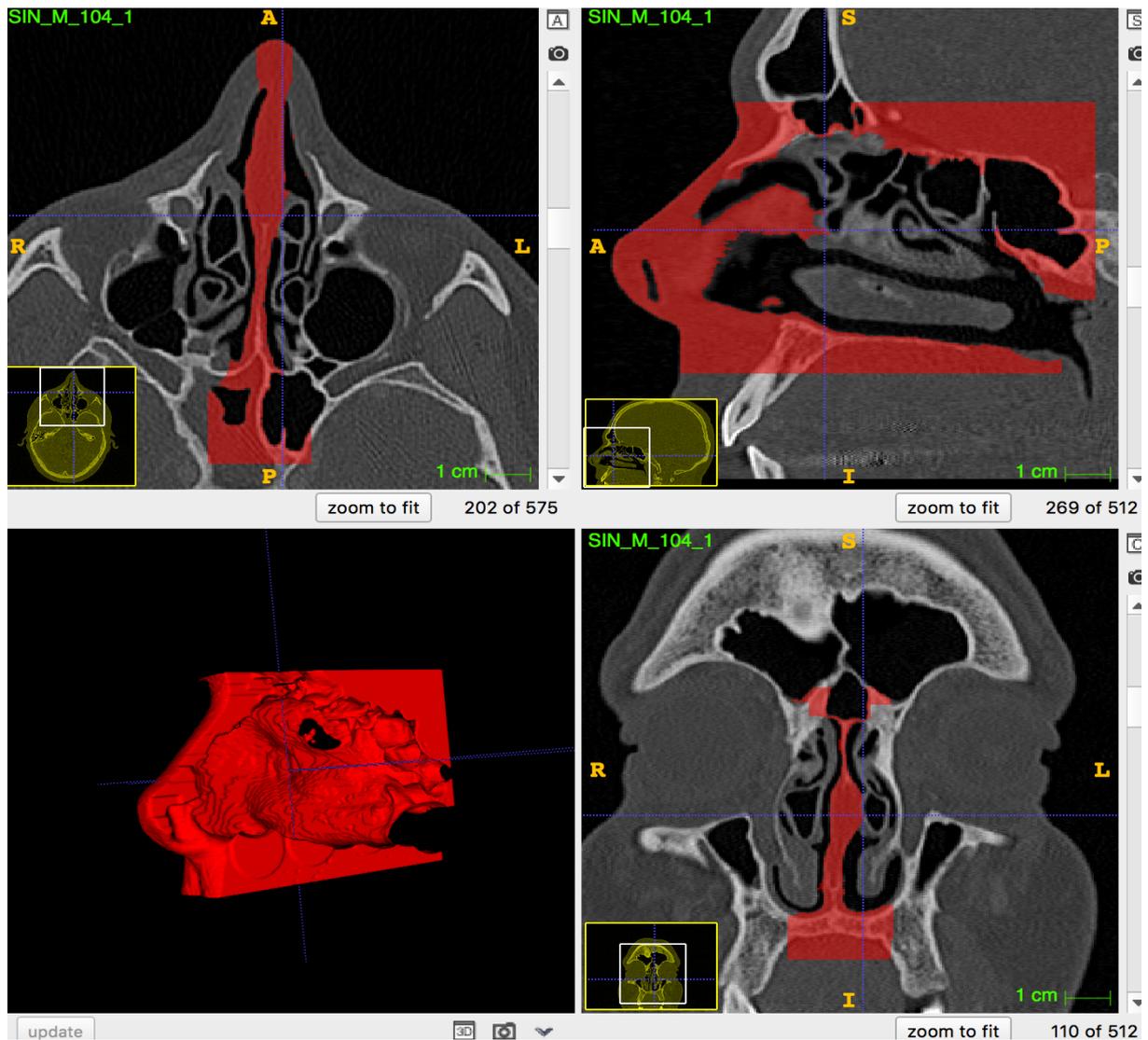
1. Présence d'artefacts dentaires : les images deviennent floues dans certaines régions

2. Epaisseur des coupes trop importantes : des coupes d'épaisseur supérieure à 1mm sont responsables d'un bruitage de l'image. Une épaisseur de coupe de 0,6 mm a permis de reconstruire des géométries avec un maximum de détails anatomiques.

3. Choix du seuil de segmentation : si le seuil choisi est trop bas ou quand l'organe est représenté dans une large plage de niveaux de gris, la segmentation peut alors englober des régions d'organes voisins dont les valeurs sont dans la plage du seuillage, ou à l'inverse si le seuil est trop haut, la segmentation va supprimer des zones aériennes. Une bonne connaissance de l'anatomie est nécessaire pour valider le choix du seuil de segmentation afin de reconstruire une géométrie 3D aussi proche que possible de la réalité anatomique.

4. Choix de smoothness et de l'expansion du contour actif : deux paramètres régulent le comportement de l'expansion du contour actif, le paramètre de rugosité et celui de pression. Une analogie peut être faite avec le gonflement d'un ballon. Le paramètre de rugosité permet de régler la façon dont le contour va épouser plus ou moins les formes. Le paramètre de pression agit sur la capacité du contour actif à pénétrer les zones étroites. Dans notre cas, le paramètre d'expansion a été réglé au maximum pour permettre au contour actif de passer les régions anatomiques étroites.

Après obtention du modèle, un travail coupe par coupe était effectué afin de supprimer du modèle l'air du milieu extérieur (figure 4).



**Figure 4.** Capture d'écran du modèle en fin de segmentation avant exportation

Il faut noter qu'une fois le domaine extrait, aucun algorithme de lissage n'a été appliqué à son maillage surfacique pour ne pas modifier de façon critique la réalité anatomique des modèles. Le fichier contenant ce maillage surfacique 3D est alors enregistré au format STL (surface triangularisée, utilisée dans le domaine de la stéréolithographie). (Figure 4).

## 2.3. Landmarks

---

### 2.3.1. Définition des landmarks

La morphométrie repose sur l'utilisation de « points repères » (ou landmarks) correspondant à des *loci* anatomiques identifiables d'un individu à l'autre chez tous les spécimens de l'étude (20). Ce sont donc des points « équivalents » et reconnaissables sur des objets soumis à comparaison (21). L'ensemble de ces points repères peut occuper un espace bi ou tridimensionnel et leur configuration permet de décrire la forme (22).

Du fait du rôle central que tiennent ces points repères en morphométrie géométrique, il est important de comprendre leur fonction dans l'analyse de la conformation. En effet, les études basées sur l'utilisation de points repères présentent la particularité d'étudier un certain nombre de paramètres dont la pertinence sera démontrée lors de l'analyse statistique (20).

Plusieurs critères sont à prendre en compte dans le choix des points repères. Idéalement, ils correspondent à des *loci* anatomiques homologues qui ne modifient pas leur position relative par rapport aux autres points repères et doivent fournir une visualisation schématique adéquate de la morphologie des structures étudiées. En se basant sur ces critères et plus particulièrement sur celui d'homologie, Bookstein a établi une classification en trois catégories (23).

Les Types I sont des points pour lesquels l'homologie d'un cas à l'autre est fortement supportée. Par exemple un point de convergence précis de plusieurs structures osseuses est facilement identifiable chez chaque individu.

Les Types II sont des repères dont l'homologie d'un sujet à l'autre est supportée par la géométrie (extrémité d'un processus osseux, maxima ou minima de courbure d'un os) et non par des caractéristiques anatomiques ou histologiques. (24)

Les Types III sont beaucoup plus problématiques et ne devraient pas selon certains être considérés comme des points repères. Ils n'ont pas défini pas les structures avoisinant ce point

mais plutôt comme étant positionnés à un extrême par rapport à un autre point.

### **2.3.2. Sélection et description des landmarks utilisés pour l'analyse**

Aucun landmark du septum nasal n'était décrit dans la littérature. Pour chaque zone d'intérêt clinique nous avons défini un landmarks osseux (posé sur les reconstruction osseuses) et un landmarks mou (posé sur les reconstruction muqueuses) :

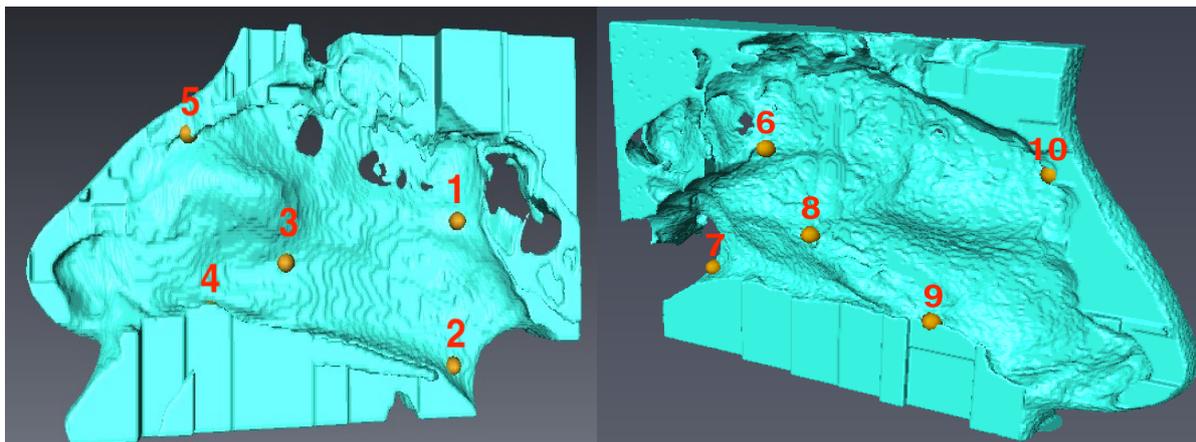
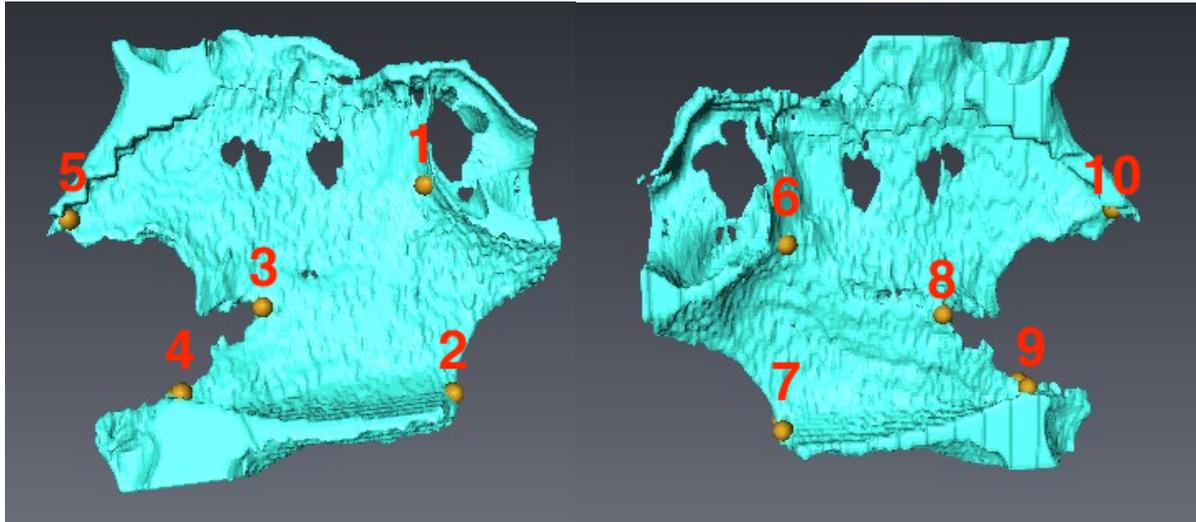
Au total dans cette étude il existait :

10 landmarks par septum pour l'os (5 par côtés) Figure 5 en haut.

10 landmarks par septum pour la muqueuse (5 par côtés) Figure 5 en bas.

Il s'agissait de points repères de type I et de types II représentés par des zones de jonction osseuses. Ces points repères ont été choisis de façon à refléter le mieux possible la morphologie du septum ainsi que pour leur fiabilité et leur reproductibilité (Figure 5).

Dans ce travail nous le septum osseux et le septum muqueux qui lui correspond ont servi de base à notre travail, nous n'avons pas défini de landmarks cartilagineux pur.



**Figure 5.** Position des points repères sur septums nasaux osseux et muqueux : vue de face, vue latérale droite et gauche

Le tableau 1 montre la définition des landmarks. Chaque point repère avait 3 coordonnées X, Y et Z.

SEPTUM	LANDMARK	DEFINITION
Gauche	1	Zone de jonction entre le sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	2	Extrémité postéro inférieure du vomer
	3	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	4	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
	5	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et les os propres du nez.
Droit	6	Zone de jonction entre le sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	7	Extrémité postéro inférieure du vomer
	8	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	9	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
	10	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et les os propres du nez.

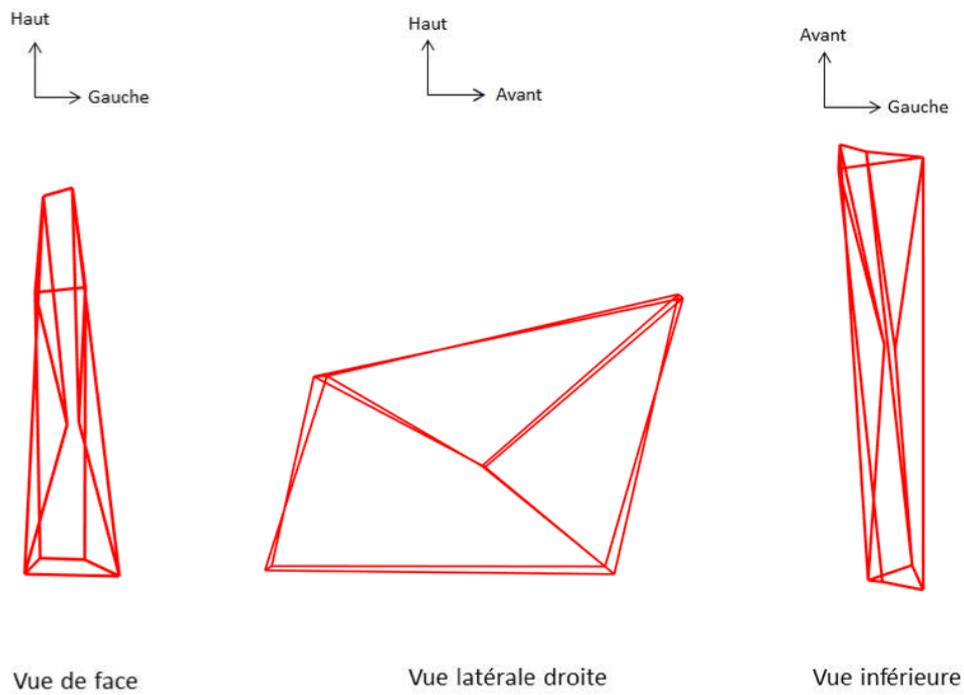
**Tableau 1.** Définition des landmarks

Le positionnement des différents points s'est fait à l'aide du logiciel AVIZO<sup>®</sup>. Les maillages surfaciques obtenus dans ITK-Snap<sup>®</sup> ont été exportés au format «. STL» puis importés dans le logiciel Avizo<sup>®</sup>.

Pour chaque individu, tous les points ont été positionnés systématiquement dans le même ordre et enregistrés dans un fichier au format «.landmark.ascii». Les coordonnées des points repères ont ensuite été exportés dans le logiciel R<sup>®</sup> à l'aide d'un programme développé au

laboratoire.

Grâce à ces landmarks on pouvait analyser la morphologie globale du septum nasale (Figure 6).



**Figure 6.** Morphologie globale du septum nasal après pose des landmarks d'intérêts

## 2.4. Morphométrie géométrique

---

Définie par Bookstein comme la fusion entre la géométrie et la biologie, la morphométrie géométrique s'attache à étudier la forme des objets en deux ou trois dimensions (19). Elle permet ainsi de visualiser en trois dimensions les changements de conformation d'un objet ce qui n'est pas réalisable avec les techniques de morphométrie conventionnelle. Cette méthode, initialement mise au point pour l'étude d'éléments non vivants, a été ensuite appliquée dans divers domaines de la biologie développementale et de la médecine( (25), (26)) Elle a pour but d'étudier la morphologie des structures en s'affranchissant de paramètres tels que la taille ou l'orientation en faisant appel à une succession de calculs statistiques afin de mettre en évidence d'éventuelles variations et d'essayer d'en expliquer l'origine. A ce titre, la morphométrie géométrique peut être considérée à la fois comme un outil biologique et comme un outil statistique (20).

### 2.4.1. Principe de la morphométrie géométrique

La description des approches modernes de l'analyse des variations de formes fait appel à des termes qui nécessitent d'être définis pour éviter toutes confusions.

Comme évoqué précédemment, la morphométrie repose sur l'utilisation de « points repères » (ou landmarks) correspondant à des *loci* anatomiques identifiables d'un individu à l'autre chez tous les spécimens de l'étude (20).

On appelle « conformation » l'ensemble des caractéristiques géométriques qui demeurent lorsque les effets relatifs à la position, la taille (échelle) et à la rotation ont été retirés d'un objet (27).

Enfin, la morphométrie géométrique se base sur la taille centroïde qui est une évaluation naturelle de la taille (22).

- ***L'analyse Procruste Généralisée***

L'analyse Procruste ou superposition Procruste a été développée afin de pouvoir étudier la conformation des spécimens en s'étant affranchi au préalable d'un certain nombre de paramètres tels que la taille, la position et la rotation (28) (29).

- Soient deux matrices de points repères bidimensionnels représentant 2 triangles

$$M_1 = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \end{bmatrix}$$

Ces matrices permettent de définir l'espace de configuration qui correspond à l'ensemble des K (nombre de points repères) x M (dimension) matrices décrivant toutes les combinaisons possibles de configuration (dans ce cas : 3x2=6 dimensions), cet espace pouvant être assimilé à une hypersphère.

- Filtrage de la position

$$M_1 = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_c & Y_c \end{bmatrix}$$

Les coordonnées du point centroïde de chaque matrice sont calculées en réalisant la moyenne des coordonnées X, Y et Z de la matrice.

L'information de position est alors éliminée en retranchant à chaque coordonnée la valeur du point centroïde.

$$M_1 = \begin{bmatrix} (X_1 - X_c) & (Y_1 - Y_c) \\ (X_2 - X_c) & (Y_2 - Y_c) \\ (X_3 - X_c) & (Y_3 - Y_c) \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad M'_1 = \begin{bmatrix} X'_1 & Y'_1 \\ X'_2 & Y'_2 \\ X'_3 & Y'_3 \end{bmatrix}$$

Ceci entraîne une translation de chaque point centroïde à l'origine. Au cours de cette transformation, 2 dimensions de l'espace de configuration sont perdues (qui devient un espace à 4 dimensions).

### - Élimination de la taille

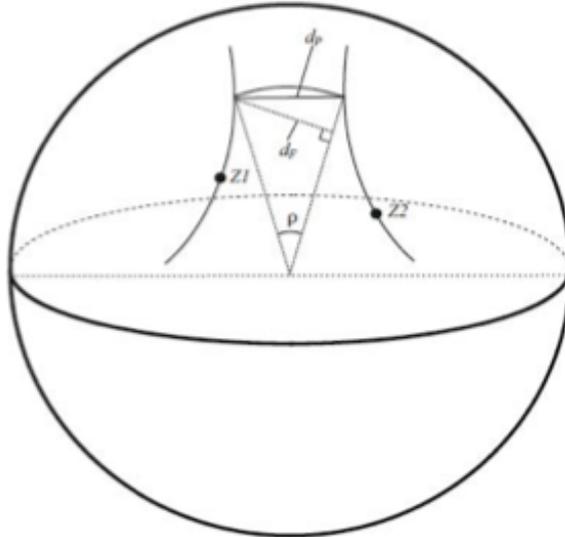
L'information de taille est ensuite éliminée en calculant la taille centroïde (CS) correspondant à la racine carrée de la somme des carrés des distances séparant chaque point du point centroïde. Celle-ci est alors utilisée pour calculer la matrice  $M''_1$  et  $M''_2$  de pré-conformation en divisant chaque coordonnée par la taille centroïde.

$$M'_1 = \frac{1}{CS} \begin{bmatrix} X'_1 & Y'_1 \\ X'_2 & Y'_2 \\ X'_3 & Y'_3 \end{bmatrix} \quad \longrightarrow \quad M''_1 = \begin{bmatrix} X''_1 & Y''_1 \\ X''_2 & Y''_2 \\ X''_3 & Y''_3 \end{bmatrix}$$

Cette modification s'accompagne également de la perte d'une dimension de l'espace de conformation (réduit à 3 dimensions).

### - Retrait de l'orientation

Les différentes configurations sont alors pivotées dans cet espace de préconformation décrivant à la surface de la sphère un arc de cercle appelé fibre. L'angle de rotation à effectuer est alors calculé de façon à ce que la somme des carrés des distances séparant chaque fibre soit minimale : ce sont les distances Procrustes partielles  $dp$  déterminées dans l'espace de conformation.



**Figure 7.** Représentation de l'espace de pré-conformation. La distance chordale  $dp$  entre les fibres est la distance Procruste partielle et  $df$  correspond à la distance Procruste totale.<sup>5</sup>

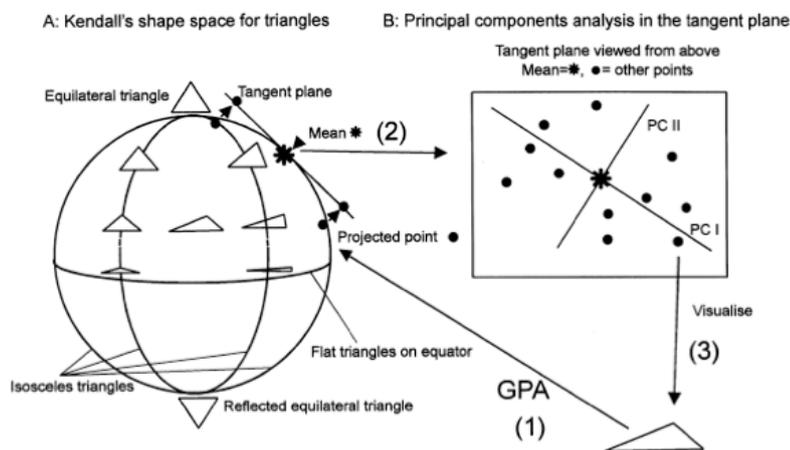
Les distances Procrustes totales  $df$  sont déterminées lorsque les configurations sont déplacées le long du rayon de l'hypersphère afin de réduire les différences entre les points repères.

Ces calculs entraînent la perte d'une dimension de l'espace de conformation (qui devient une sphère à 3 dimensions).

- Espace de conformation de Kendall et espace de conformation tangent Euclidien.

L'espace de conformation de Kendall correspond à un espace à  $KM - M - 1 - M(M - 1)/2$  dimensions pouvant être représenté dans le cas de triangles par une surface sphérique de diamètre 1 (39). Les différentes conformations pour les triangles sont données par des

coordonnées. Cet espace sphérique non euclidien ne permet pas d'appliquer les méthodes statistiques traditionnelles euclidiennes. C'est pourquoi il est nécessaire de projeter la surface sphérique sur un espace tangent à la sphère au niveau de la forme moyenne. Les différentes formes sont alors projetées orthogonalement ou stéréographiquement le long de cet espace où les méthodes statistiques euclidiennes sont utilisables (32).



A. Représentation de l'espace de conformation de Kendall pour les triangles. B. Schéma représentant la projection des points correspondant aux différents triangles sur l'espace tangent au triangle moyen (\*) et les composantes principales de la variabilité de conformation dans cet espace tangent (PCI et PCII). Les trois étapes de cette méthode sont présentées : (1) l'analyse Procruste généralisée, (2) la projection de ces points sur l'espace tangent à la conformation moyenne, (3) visualisation de la variabilité de conformation par une analyse en composantes principales.

- **Analyse Procuste Généralisée couplée à l'analyse en composante principale (ACP)**

Après une superposition procuste nous avons défini la conformation de chaque individu qui

est définie par ses résidus procustes, c'est-à-dire la distance de chacun des points repères par rapport aux points repères de la forme moyenne (30). Afin d'explorer les différences de formes pouvant exister entre les individus, nous avons réalisé des analyses en composantes principales afin d'estimer les principaux axes de variation au sein de l'espace tangent (31).

Cette analyse, débute par le calcul d'une matrice de variance/covariance des résidus procustes permettant de mettre en évidence la variabilité de conformation des différentes structures indépendamment de la taille centroïde. Le principe de l'ACP est de trouver un axe, issu d'une combinaison linéaire des variables d'origine, tel que la variance du nuage autour de cet axe soit maximale. Ce premier vecteur (vecteur propre = eigenvector) constitue la première composante et possède une valeur propre (eigenvalue) correspondant au pourcentage de variance expliquée (32) (33).

On poursuit la recherche du deuxième vecteur, indépendant du premier, selon le même principe en imposant qu'il soit orthogonal au premier. On arrête alors le calcul de ces vecteurs lorsque 100% de la variance est expliquée.

Pour chaque individu, les points repères d'intérêt ont été extraits du fichier « .landmark.ascii » obtenu avec le logiciel Landmarks®. A partir de ce fichier, une superposition Procruste généralisée telle qu'elle a été décrite précédemment a été réalisée à l'aide du logiciel R®. Une matrice de variance/covariance a été calculée et l'analyse en composante principale a été réalisée. On obtient donc une représentation sous forme d'un nuage de points de l'ensemble des individus le long des axes factoriels représentant chaque composante. Pour chacune d'entre elles, R® fournit les coordonnées 3D de la forme moyenne (consensus) et de la forme qui correspond aux maxima de variation le long de cet axe. Nous avons utilisé la « méthode du coude » pour définir le nombre de composantes principales retenu pour décrire les paramètres morphométriques.

- ***Variables étudiées***

Grace à la morphométrie géométrique, nous avons donc étudié successivement :

- La superposition Procruste de l'ensemble des individus de notre étude
- La représentation de l'individu consensus dont nous avons décrit les principales caractéristiques

- Le minimum et le maximum de variation le long des axes des composantes principales que nous avons sélectionné afin de visualiser exclusivement la variabilité le long de cette composante et s'affranchir de l'influence des autres composantes

A l'issue de cette étape nous disposons donc :

1. De l'ensemble des composantes décrivant 100% de la variation des différentes structures ;
2. Du pourcentage de variation décrit par chacune d'entre elles ;
3. Des coordonnées 3D de la forme moyenne de chaque structure dite « consensus » ;
4. Des coordonnées 3D des maxima de variation le long des composantes principales sélectionnées par la méthode dite « du coude ».

## 2.5. Analyses statistiques

---

L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel R®.

### 2.5.1. Fiabilité de la méthode

Lors d'études basées sur la mesure des structures osseuses, il existe toujours une part d'erreur qui peut être scindée en deux composantes : la part d'erreur liée à l'utilisation de l'outil de mesure et celle dépendante de la subjectivité de l'individu qui réalise les mesures. Nous avons choisi une méthode évaluant la répétabilité de nos mesures. Nous avons donc utilisé la méthode des MANOVA Procuste pour définir la répétabilité qui correspond à la différence de mesure prise par le même observateur à deux temps différents. Les 10 landmarks osseux et les 10 landmarks mous ont été posés sur dix sujets, tirés au sort parmi notre population, deux fois par le même opérateur à deux semaines d'intervalle, afin de tester la répétabilité. Les coordonnées des landmarks obtenus par ces séries de mesures étaient alors comparées et le pourcentage de variabilité lié à l'erreur de mesure était évalué par MANOVA Procuste.

### 2.5.2. Recherche des allométries

Une allométrie est une notion ancienne définie par l'existence d'une association statistique entre la taille et la conformation (34). Plus précisément elle sous-entend un lien de causalité entre la taille et la conformation. Il est possible de dire qu'elle représente l'influence de la taille sur la conformation. La recherche des allométries en morphométrie géométrique est une étape nécessaire pour pouvoir affirmer ou infirmer l'indépendance de la conformation par rapport à la taille (35). Nous avons utilisé une régression linéaire simple de chaque composante individuellement sur le volume afin connaître l'influence de la taille sur la conformation de chacune des composantes principales, jusqu'à expliquer 95% de la variance.

### **2.5.3. Recherche d'un dimorphisme sexuel**

Nous avons recherché un dimorphisme sexuel en fonction de la conformation du septum par la méthode du Hotelling's T2 test qui est un équivalent de la MANOVA lorsqu'il n'existe que deux groupes.

Les conditions sont :

5. Normalité multivariée pour chaque groupe
6. Egalité des matrices de variance-covariance (homoscedasticité) pour chaque groupe (grâce au test M2box)

Si ces conditions n'étaient pas remplies nous utilisons une MANOVA non paramétrique.

### **2.5.4. Comparaison landmarks osseux et landmarks mous**

Pour chaque zone d'intérêt clinique nous avons défini un landmarks os ou un landmarks mou. Afin de connaître les pourcentages de variation entre ces LM marquant une même région nous avons utilisé une MANOVA procuste comme lors de la validation de la répétabilité.

## 3. RESULTATS

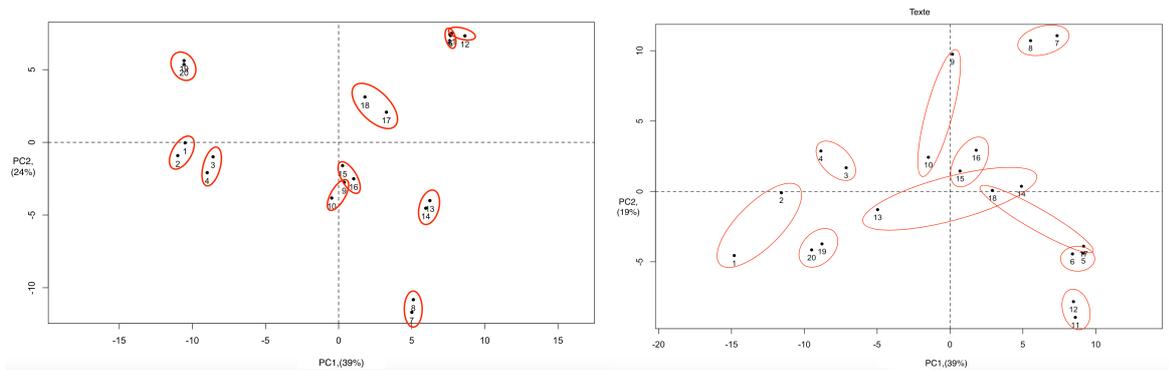
### 3.1. Etude de la fiabilité des Landmark osseux

Lors d'études basées sur la mesure des structures osseuses, il existe toujours une part d'erreur qui peut être scindée en deux composantes : la part d'erreur liée à l'utilisation de l'outil de mesure et celle dépendante de la subjectivité de l'individu qui réalise les mesures.

Nous avons choisi une méthode évaluant la répétabilité de nos mesures. Nous avons donc utilisé la méthode des MANOVA Procustes pour définir la répétabilité qui correspond à la différence de mesure prise par le même observateur à deux temps différents. Les 10 landmarks ont été posés sur dix sujets, tirés au sort parmi notre population, deux fois par le même opérateur à 1 mois d'intervalle, afin de tester la répétabilité. Les coordonnées des landmarks obtenus par ces séries de mesures étaient alors comparées et le pourcentage de variabilité lié à l'erreur de mesure était évalué par MANOVA Procuste.

Le pourcentage de la variabilité lié à l'erreur de mesure était de 7,3% sur l'ensemble des landmarks.

La Figure 8 droite présente la projection des conformations issues des 2 séries de mesures des 10 individus de notre échantillon tiré au sort le long des deux premières composantes.



**Figure 8.** Projection des conformations issues des 2 séries de mesures des 10 individus de notre échantillon tiré au sort le long des deux premières composantes pour l'os à gauche et le muqueux à droite

### 3.2. Etude de la fiabilité des Landmark muqueux

---

Nous avons également étudié la répétabilité des landmarks du septum mou par la même méthode que pour septum osseux en déterminant par MANOVA Procuste les différences entre deux séries de landmarks muqueux posés chez 10 individus de notre études tirés au sort à 1 mois d'intervalle.

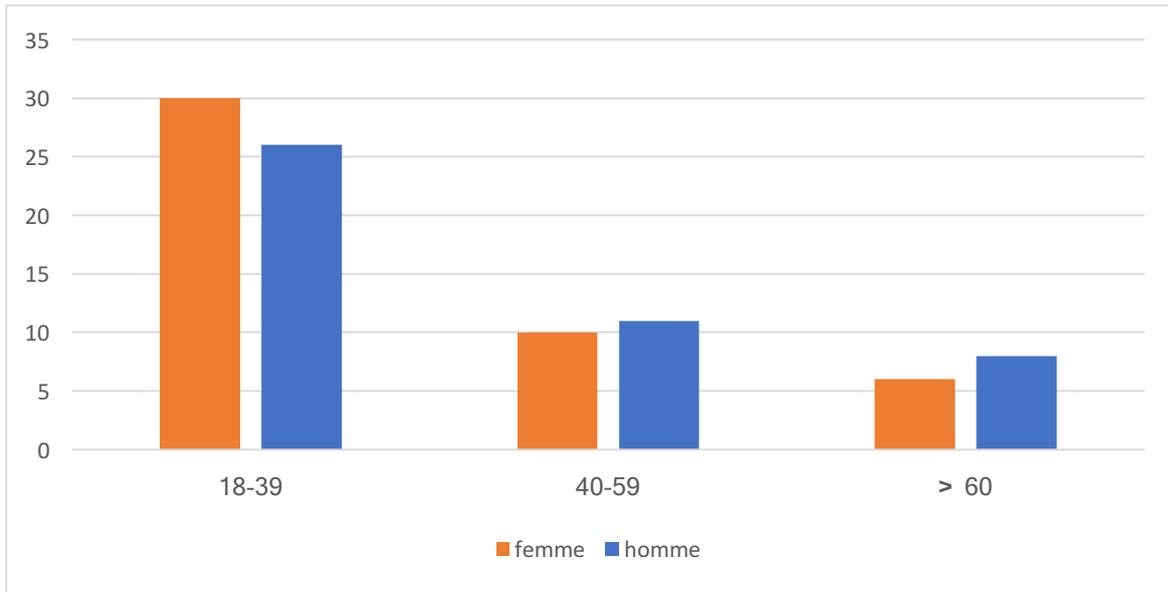
Le pourcentage de la variabilité lié à l'erreur de mesure était de 28 % sur l'ensemble des landmarks.

La Figure 8 gauche présente la projection des conformations issues des 2 séries de mesures des 10 individus de notre échantillon tiré au sort le long des deux premières composantes.

### 3.3. Population de l'étude

---

Au total 91 individus ont pu être inclus dans ce travail. Les examens étaient anonymisés et seuls l'âge et le sexe des individus étaient connus. Il s'agissait de 46 femmes et de 45 hommes. L'âge moyen dans l'ensemble de la population était de 39 ans (18 à 85 ans). Il était de 37,7 ans chez les individus femmes (18 à 76 ans) et de 40,5 ans (18 à 85 ans) chez les individus hommes (Figure 9)



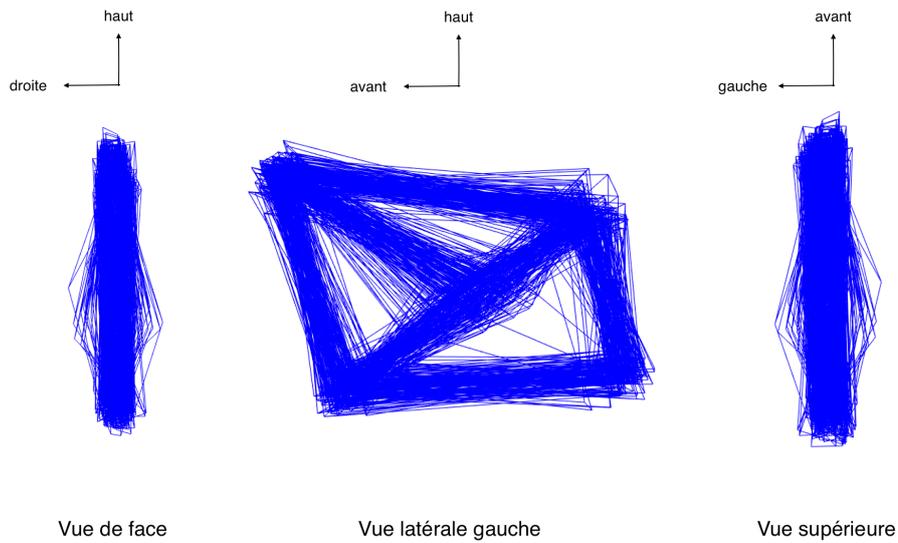
**Figure 9.** Répartition par âge et par sexe des 91 individus inclus dans l'étude.

### 3.4. Morphométrie géométrique

---

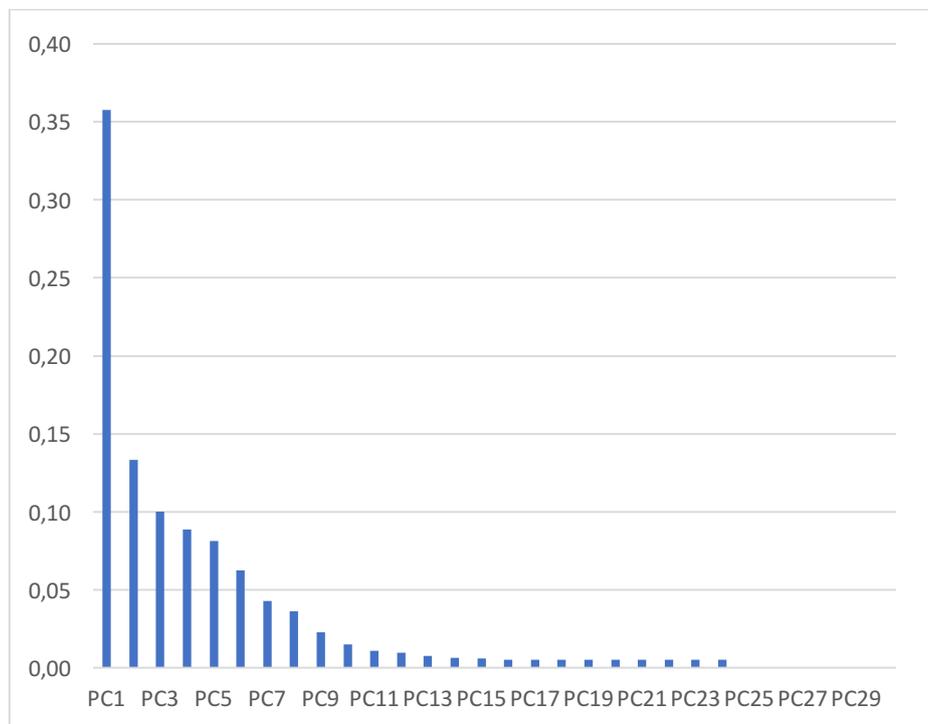
#### 3.4.1. Analyse Procuste généralisée couplée à l'analyse en composantes principales pour le septum osseux

Au terme de la superposition Procuste (Figure 10), une conformation moyenne de l'ensemble des objets est calculée.



**Figure 10.** Superposition Procuste des 10 landmarks osseux de l'ensemble des individus de l'étude (vue de face, vue latérale gauche, vue supérieure)

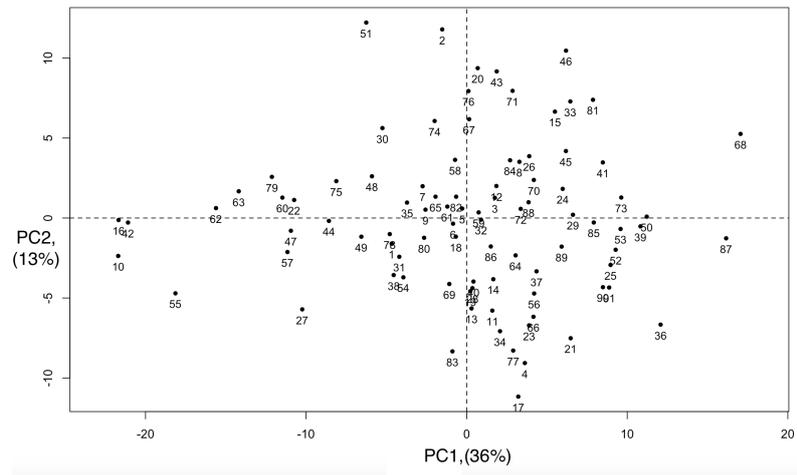
La figure 11 montre les valeurs propres des différentes composantes de l'analyse des septum osseux.



**Figure 11.** Valeurs propres des différentes composantes de l'analyse des septum osseux.

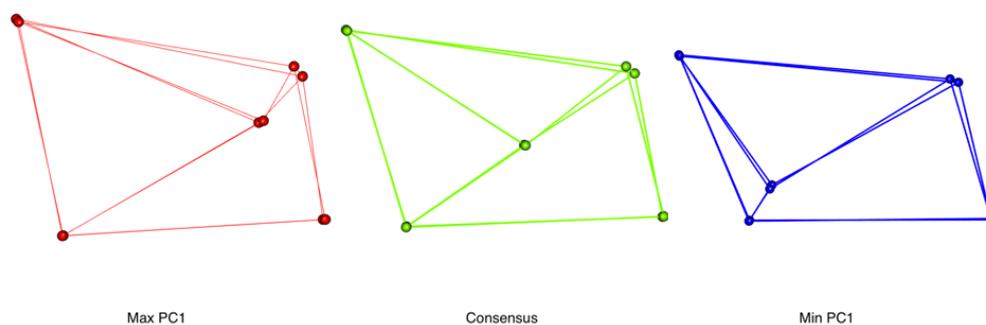
Dans notre série de septum osseux, les 2 premières composantes (PC1, PC2) ont été utilisées. Elles représentaient près de 49% de la variance totale.

La figure 12 présente la projection des conformations des individus de notre population le long des deux premières composantes principales.



**Figure 12.** Analyse en composantes principales 1 et 2 qui expriment 49 % de la variance totale.

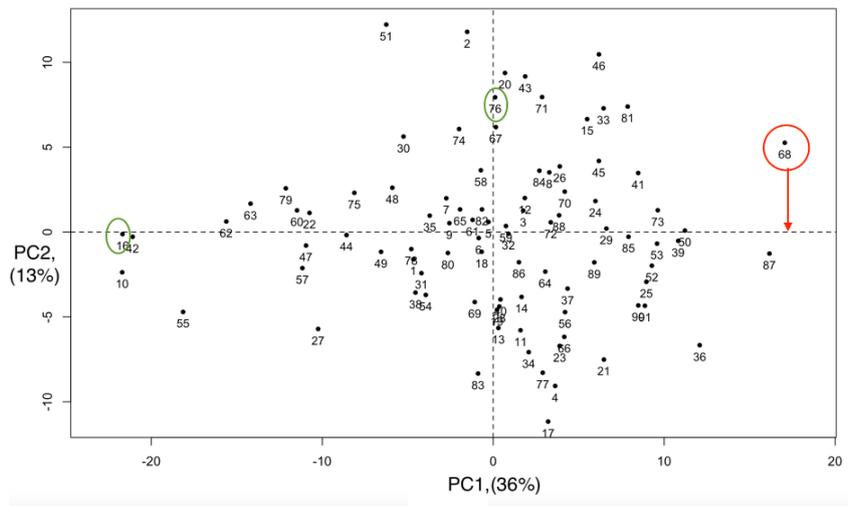
La figure 13 montre la variabilité de conformation dans PC1.



**Figure 13.** Variabilité de conformation dans PC1 (Maximum sur PC1 en rouge, Consensus en vert et Minimum sur PC1 en bleu) du septum osseux. Vue latérale gauche

Nous avons toujours utilisé les coordonnées des maximums de variation projetées sur l'axe de composante principale étudiée afin de visualiser exclusivement la variabilité le long de

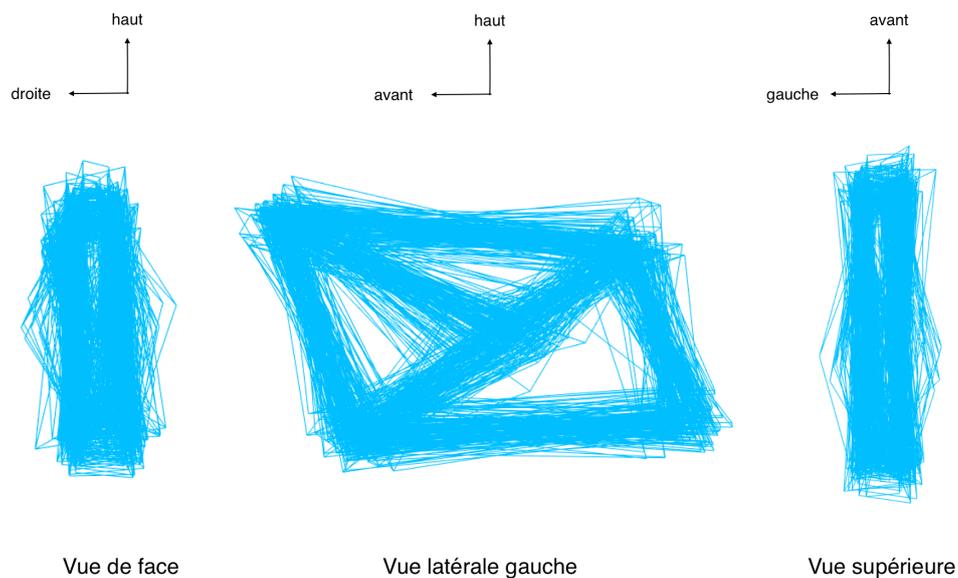
cette composante et s'affranchir de l'influence des autres composantes (Figure 14).



**Figure 14.** Sélection du consensus, du minimum et du maximum de PC1 et illustration de la projection des coordonnées sur l'axe de la PC1 pour l'analyse de la variabilité le long de cet axe.

### 3.4.2. Analyse Procruste généralisée couplée à l'analyse en composantes principales pour le septum mou

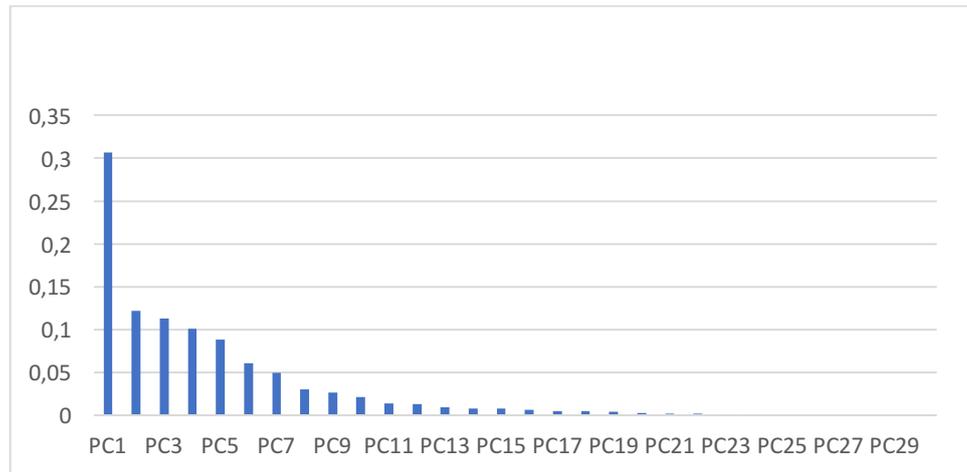
Par la même démarche nous avons effectué sur l'ensemble des coordonnées des landmarks du septum muqueux une superposition Procruste (Figure 15) et nous obtenons une conformation moyenne de l'ensemble des objets est calculée.



**Figure 15.** Superposition Procruste des 10 landmarks muqueux de l'ensemble des individus de l'étude (vue de face, vue latérale gauche, vue supérieure)

La figure 16 montre les valeurs propres des différentes composantes de l'analyse des septum muqueux.

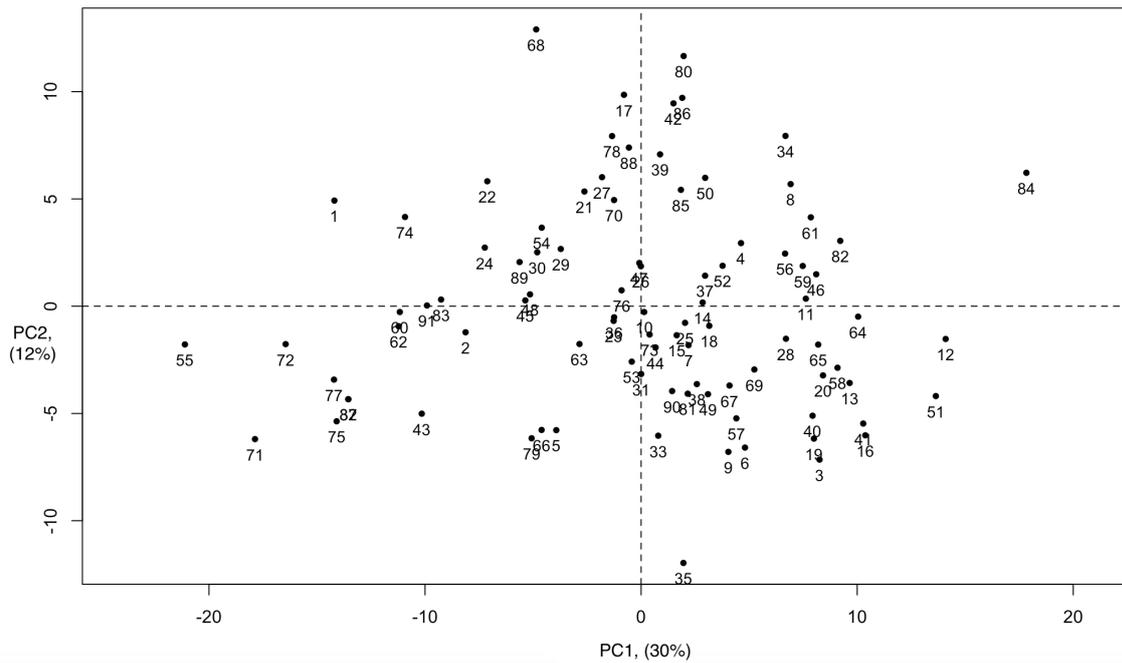
Etudes du septum muqueux par analyse Procuste généralisée couplée à une analyse en composante principale.



**Figure 16.** Valeurs propres des différentes composantes de l'analyse des septum muqueux.

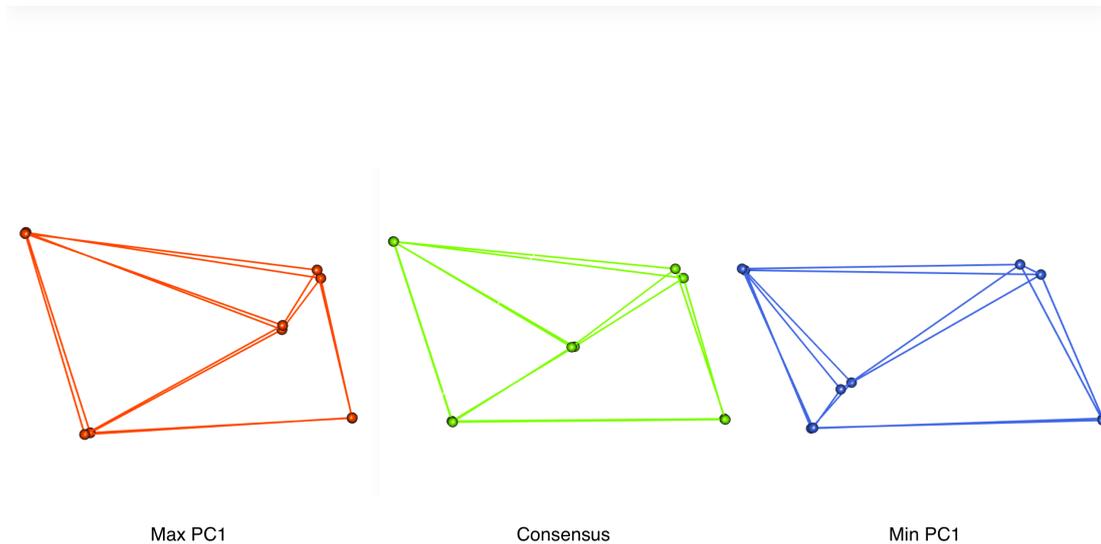
Dans notre série de septum muqueux, les 2 premières composantes (PC1, PC2) ont été utilisées. Elles représentaient près de 43% de la variance totale.

La figure 17 présente la projection des conformations des individus de notre population le long des deux premières composantes principales.



**Figure 17.** Analyse en composantes principales 1 et 2 qui expriment 43 % de la variance totale.

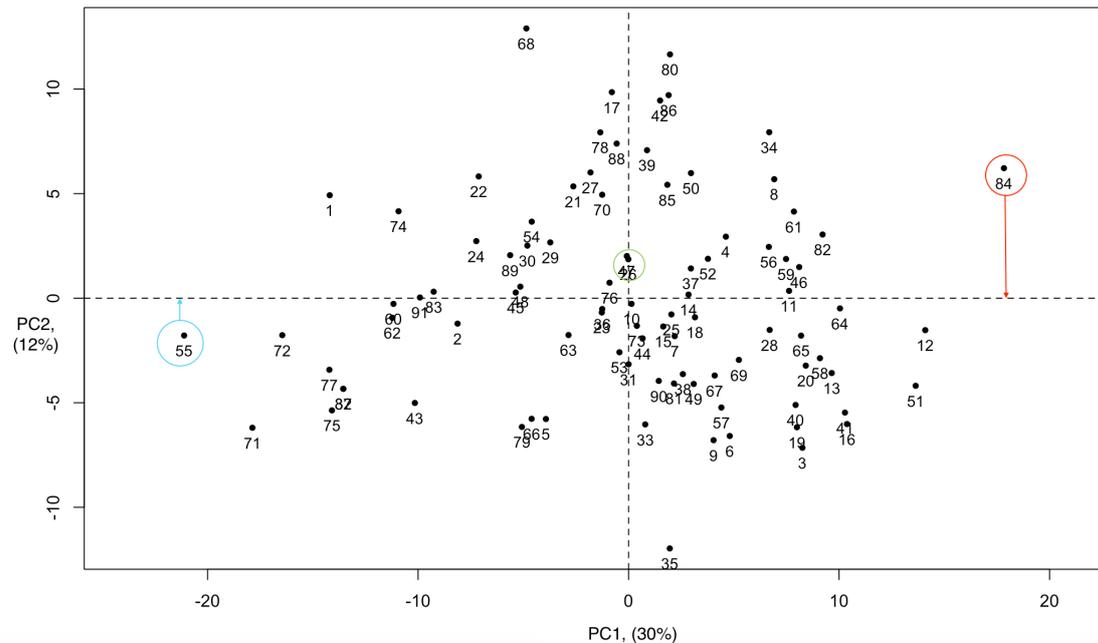
La figure 18 montre la variation de conformation dans PC1 pour le septum muqueux.



**Figure 18.** Variabilité de conformation dans PC1 (Maximum sur PC1 en rouge, Consensus en vert et Minimum sur PC1 en bleu) du septum muqueux. Vue latérale gauche avant en haut

Nous avons toujours utilisé les coordonnées des maximums de variation projetées sur l'axe

de composante principale étudiée afin de visualiser exclusivement la variabilité le long de cette composante et s'affranchir de l'influence des autres composantes (Figure 20).

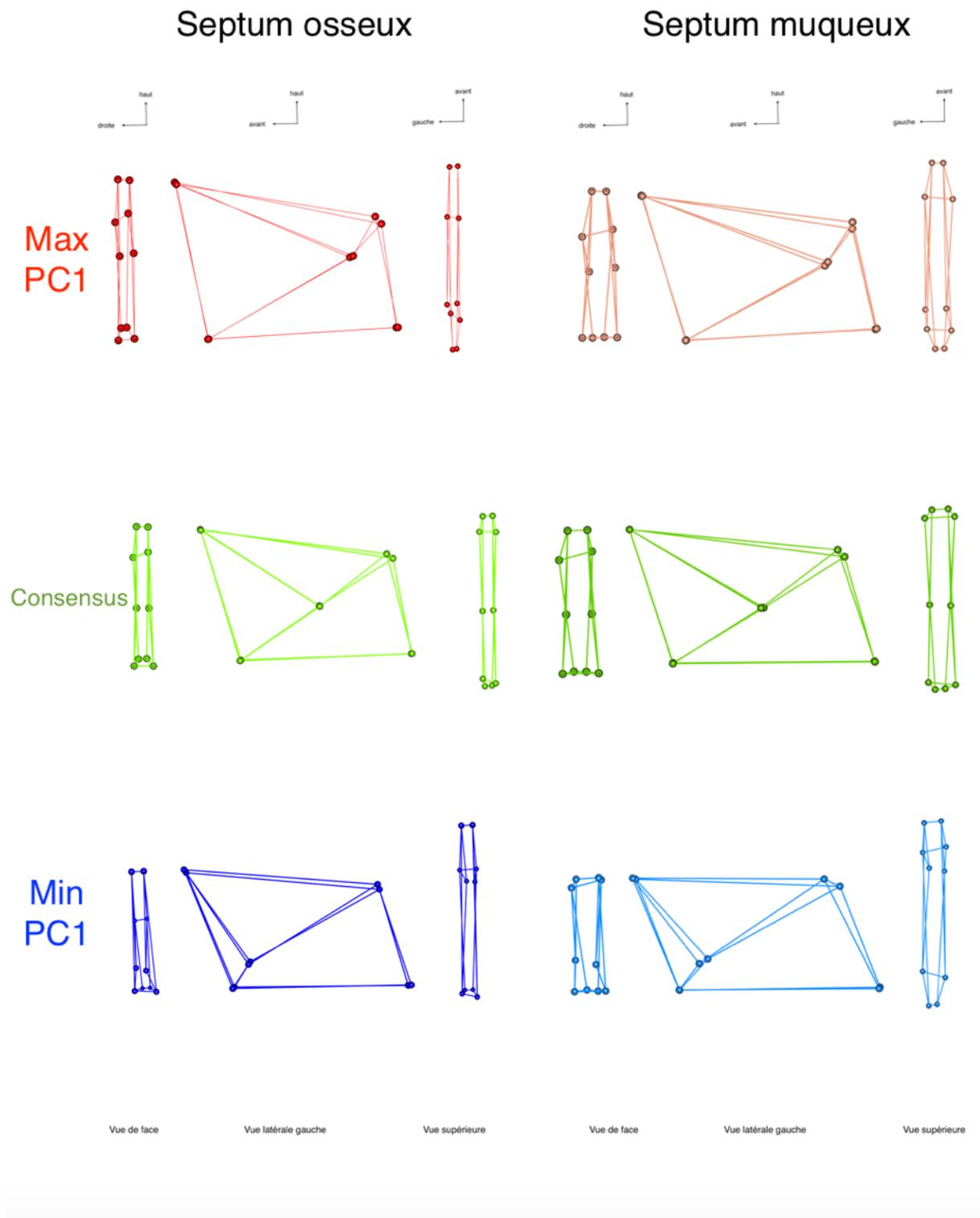


**Figure 19.** Sélection du consensus (rouge), du minimum (vert) et du maximum (bleu) de PC1 et illustration de la projection des coordonnées sur l'axe de la PC1 pour l'analyse de la variabilité le long de cet axe.

### 3.4.3. Analyse visuelle de la variabilité le long des composantes principales

Par l'analyse en composante principale nous avons obtenu les coordonnées des minima et maxima de variation le long des 2 premières composantes principales. Pour les modifications observées le long des composantes principales nous présentons successivement le consensus puis le minimum et le maximum des 2 premières composantes que nous décrivons sur leur vue de face, latérales et supérieures.

3.4.3.1. Analyse descriptive des septum osseux et muqueux sur le minimum, le maximum et le consensus de PC1 (Figure 20)



**Figure 20.** Comparaison individu consensus (en vert) et variation minimum (en bleu) et maximum (en rouge) sur la PC 1 pour les septums muqueux et osseux

La comparaison des représentations graphiques des Landmarks des extremums de variation le long de la composante principale n°1 permet de mettre en évidence la variation de hauteur et de longueur le long de PC1.

Sur la vue de face, le septum du maximum de PC1 est plus haut par rapport au minimum de PC1.

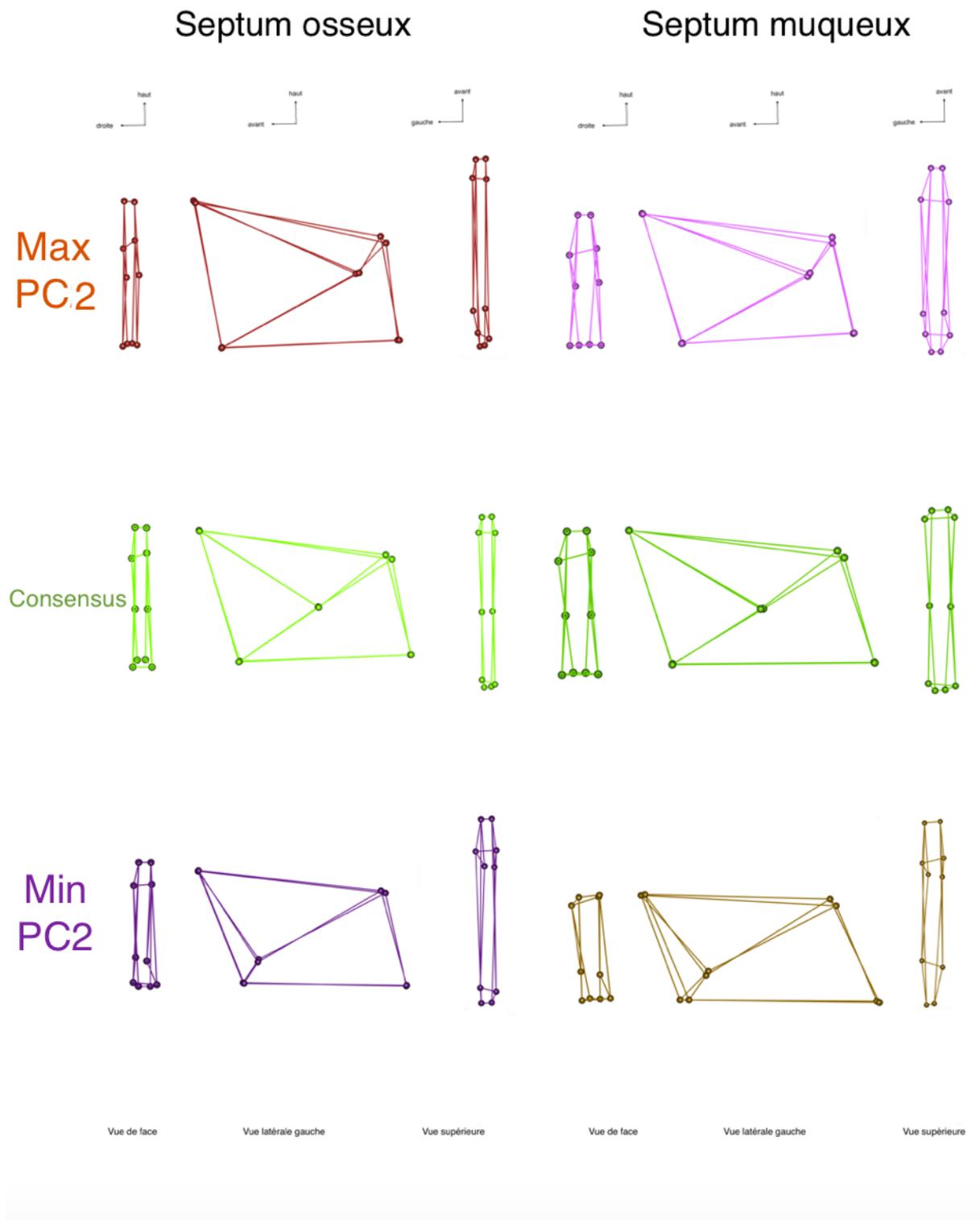
Sur la vue de face nous pouvons constater que les déviations dans le plan frontal ne sont pas marquées, la partie centrale du septum est légèrement dévié vers la droite chez le minimum de PC1 alors qu'elle est déviée à gauche chez le max de PC1.

L'extrémité antéro inférieure du vomer est plus large que son extrémité postéro inférieure et est également plus large que la jonction LPE/OPN (extrémité antéro supérieure).

Sur la vue latérale, la jonction LPE/vomer/cartilage quadrangulaire est plus postériorisé chez le maximum de PC1 par rapport au minimum de PC1. L'angle décrit par la jonction OPN/LPE, jonction LPE/vomer/cartilage et l'extrémité antéro inférieure du vomer est plus aiguë chez le maximum de PC1.

Pour le septum muqueux, nous faisons état des mêmes observations, la différence avec le septum osseux réside en la présence d'une structure septale qui est globalement plus épaisse que pour l'os. Le différentiel de largeur entre l'extrémité antéro inférieure du vomer avec l'extrémité postéro inférieure et est avec la jonction LPE/OPN est beaucoup plus marquée pour le septum muqueux.

3.4.3.2. Analyse descriptive des septum osseux et muqueux sur le minimum, le maximum et le consensus de PC2 (Figure 21)



**Figure 21.** Comparaison individu consensus (en vert) et variation minimum et maximum sur la PC 2

La comparaison des représentations graphiques des landmarks des extrêmes de variation le long de la composante principale n°2 permet de mettre en évidence la variation de l'angulation et de hauteur le long de PC2.

Sur la vue de face, le maximum de PC2 est plus haut et son extrémité antéro supérieure est moins projetée par rapport au minimum de PC2.

La partie centrale du septum est faiblement dévié vers la droite chez le minimum de PC2 alors qu'elle est déviée à gauche chez le max de PC2.

Sur la vue latérale, la jonction LPE/vomer/cartilage quadrangulaire est plus postériorisé chez le maximum de PC2 par rapport au minimum de PC2. L'angle décrit par la jonction OPN/LPE, jonction LPE/vomer/cartilage et l'extrémité antéro inférieure du vomer est plus aiguë chez le max de PC2.

Le septum muqueux est plus épais que le septum osseux.

### 3.5. Analyses statistiques

#### 3.5.1. Recherche des allométries du septum osseux et du septum mou

Une allométrie est une notion ancienne définie par l'existence d'une association statistique entre la taille et la conformation. Plus précisément elle sous-entend un lien de causalité entre la taille et la conformation. Il est possible de dire qu'elle représente l'influence de la taille sur la conformation. La recherche des allométries en morphométrie géométrique est une étape nécessaire pour pouvoir affirmer ou infirmer l'indépendance de la conformation par rapport à la taille. Nous avons systématiquement recherché les allométries par la méthode de régression multivariée qui ne nécessite pas d'avoir des données multivariées normales. Nous avons utilisé une régression linéaire simple pour connaître l'influence de la taille sur la conformation de chacune des composantes principales, jusqu'à expliquer 95% de la variance.

Pour le septum osseux :

	Df	Pillai approx	F num	Df den	Df	Pr(>F)
size	1	0.99994	52525	23	67	< 2.2e-16 ***
Residuals 89						
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Il existait une influence de la taille sur la conformation. Nous avons cherché à quantifier l'influence de la taille sur la confirmation pour chacune des composantes principales par des régressions linéaires que nous présentons ci-dessous

```

PC1
Call:
lm(formula = prcomp(m_dataproc)$x[, 1] ~ taille)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-24.8629  -4.6911   0.2005   4.9393  15.0797

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 233.0387    64.6600   3.604 0.000516 ***
taille      -2.8715     0.7967  -3.604 0.000515 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.344 on 89 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1274,    Adjusted R-squared:  0.1176
F-statistic: 12.99 on 1 and 89 DF,  p-value: 0.0005154
11,8% de la variabilité était liée à l'influence de la taille sur la conformation.

```

Pour la PC2 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC3 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC4 : 6 % de la variabilité était lié à l'influence de la taille sur la conformation.

Pour la PC5 : 15,7% de la variabilité était lié à l'influence de la taille sur la conformation.

Pour la PC6 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC7 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC8 : 3, 8% de la variabilité était lié à l'influence de la taille sur la conformation.

Pour la PC9 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC10 : 34% de la variabilité était lié à l'influence de la taille sur la conformation.

Pour la PC11 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour le septum muqueux :

	Df	Pillai approx	F num	Df den	Df	Pr(>F)
size	1	0.99995	59243	23	67	< 2.2e-16 ***
Residuals	89					
---						
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Pour le septum osseux et le septum muqueux, il n'existait une influence de la taille sur la conformation pour aucune des composantes principales. Nous avons étudié les composantes principales pour qu'elle représente 95% de la variabilité soit les 11 première composante pour le septum mou.

PCI					
Call:					
lm(formula = prcomp(m_dataproc)\$x[, 1] ~ taille)					
Residuals:					
	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-15.8772	-5.0652	0.2291	6.2071	24.3771
Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	-210.145	91.283	-2.302	0.0237	*
taille	2.526	1.097	2.302	0.0237	*
---					
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					
Residual standard error: 7.533 on 89 degrees of freedom					
Multiple R-squared: 0.05621, Adjusted R-squared: 0.0456					
F-statistic: 5.3 on 1 and 89 DF, p-value: 0.02366					
<b>4,6% de la variabilité était liée à l'influence de la taille sur la conformation.</b>					

Pour la PC2 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC3 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC4 : 7 % de la variabilité était lié à l'influence de la taille sur la conformation.

Pour la PC5 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC6 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC7 : 3, 8% de la variabilité était lié à l'influence de la taille sur la conformation.

Pour la PC8 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC9 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

Pour la PC10 : il n'y avait pas d'influence de la taille sur la conformation. (Résultats non significatifs).

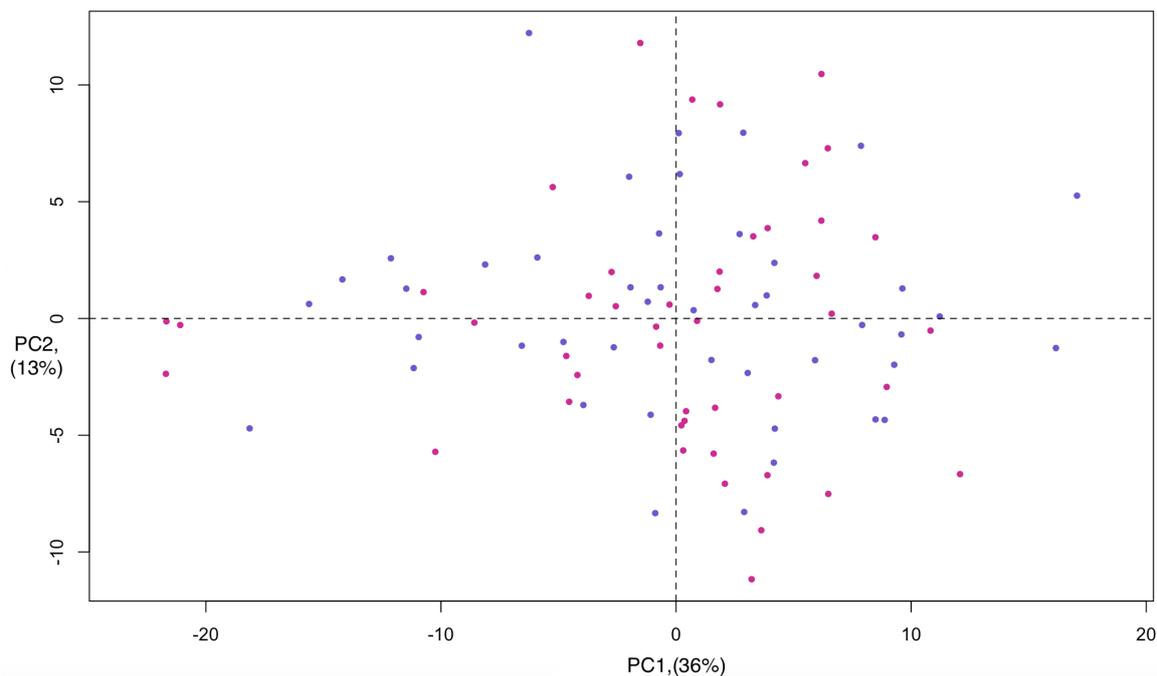
Pour la PC11 : 7, 8% de la variabilité était lié à l'influence de la taille sur la conformation.

### 3.5.2. Recherche d'un dimorphisme sexuel

La recherche d'un dimorphisme sexuel a été réalisée par la méthode du Hotelling's T2 test qui est un équivalent de la MANOVA lorsqu'il n'existe que deux groupes.

La variance était différente entre nos deux groupes sur le test M2 box. Nous avons donc utilisé une MANOVA non paramétrique pour tester la différence de conformation entre les hommes et les femmes de notre population.

Pour le septum osseux :



**Figure 21.** Projection des conformations des individus de notre population le long deux premières composantes en fonction du facteur sexe (individus femmes en rouge, individus hommes en bleu).

```

adonis(formula = acp$x[, 1:11] ~ sexe2, permutations = 9999, method = "euclidean")
Permutation: free
Number of permutations: 9999

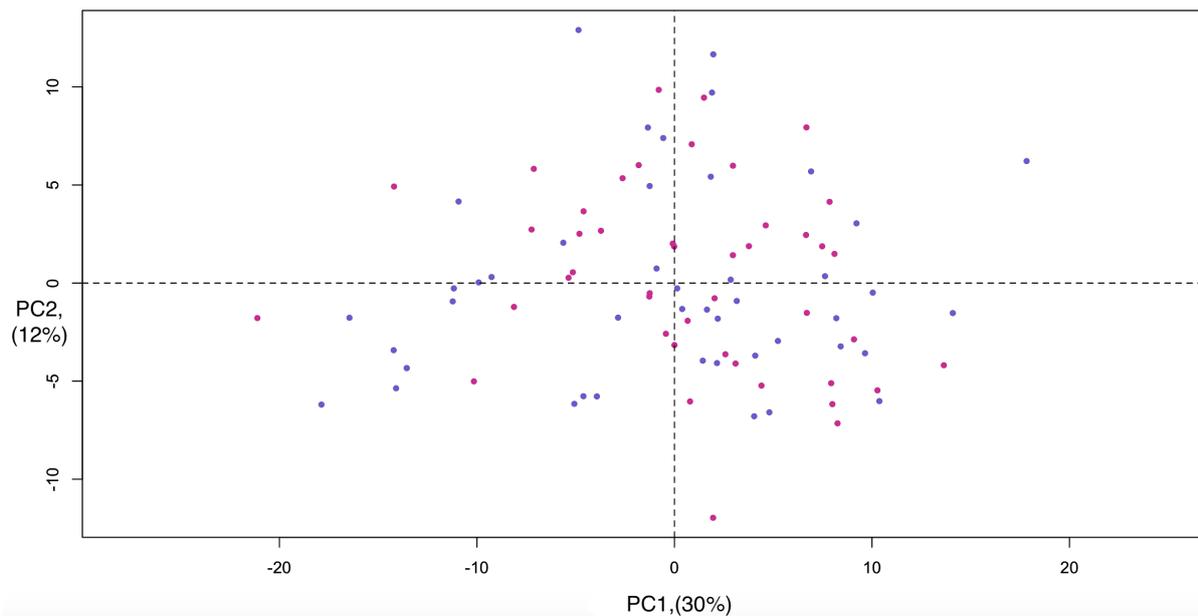
Terms added sequentially (first to last)

      Df SumsOfSqs MeanSqs F.Model    R2 Pr(>F)
sexe2  1      49.5   49.526 0.30185 0.00338 0.9632
Residuals 89 14602.5 164.073    0.99662
Total    90 14652.0    1.00000

```

Nous n'avons retrouvé aucune différence de conformation entre les hommes et les femmes de notre population avec un degré de significativité  $p=0,9632$ .

Pour le septum muqueux :



**Figure 21.** Projection des conformations des individus de notre population le long deux premières composantes en fonction du facteur sexe (individus femmes en rouge, individus hommes en bleu).

```
Call:
adonis(formula = acp$x[, 1:13] ~ sexe2, permutations = 9999, method = "euclidean")

Permutation: free
Number of permutations: 9999

Terms added sequentially (first to last)

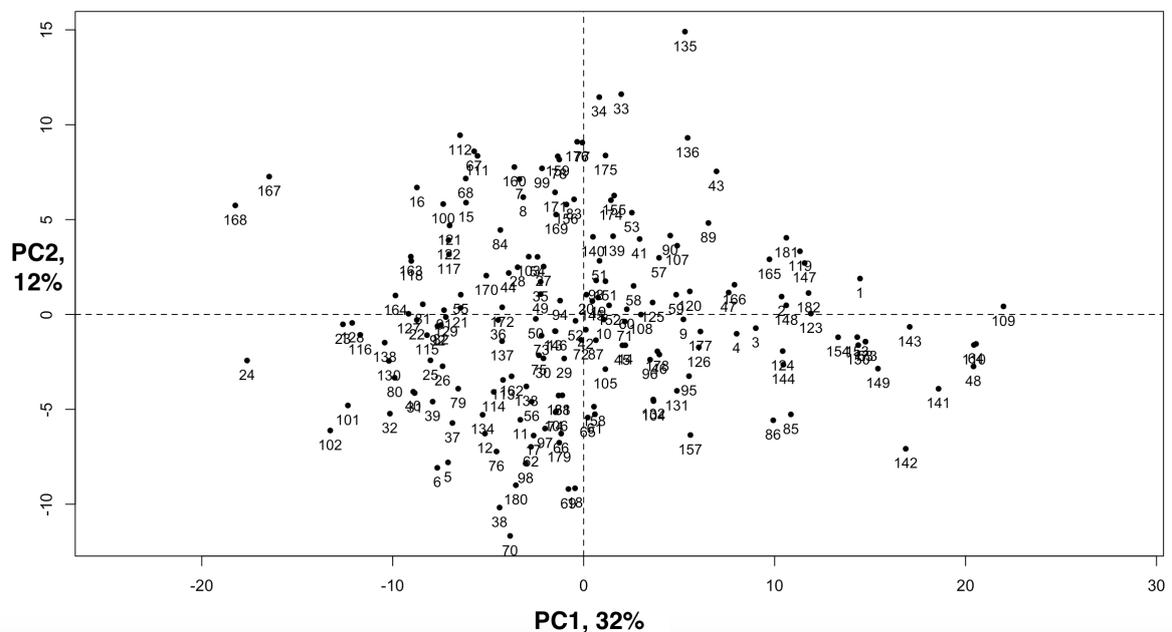
      Df SumsOfSqs MeanSqs F.Model    R2 Pr(>F)
sexe2  1    108.4   108.4 0.58249 0.0065 0.7842
Residuals 89  16562.9   186.1      0.9935
Total    90  16671.3      1.0000
```

Aucune différence de conformation n'a été retrouvée entre les hommes et les femmes pour le septum muqueux dans notre population avec un degré de significativité  $p=0,7842$

### 3.6. Fiabilité de la méthode/Validité des Landmarks du tissu mou par rapport aux landmarks osseux.

Pour chaque zone d'intérêt clinique nous avons défini un landmark osseux et un landmark muqueux. Afin de connaître le pourcentage de variation entre ces landmarks marquant une même région nous avons utilisé une MANOVA Procuste sur R®.

Le pourcentage de différence entre les landmarks mou et osseux était de 28%



**Figure 20.** Projection des conformations issues des 2 types de Landmark mesurés sur les septum osseux et muqueux le long des deux premières composantes.

## 4. DISCUSSION

Dans notre étude nous avons inclus 91 patients et nous avons travaillé à partir de reconstruction issue d'examen tomodensitométriques. Les examens étaient anonymisés. Seul l'âge et le sexe des individus étaient connus afin de pouvoir décrire notre population et ensuite rechercher un dimorphisme sexuel. La répartition entre les sexe était bien équilibré.

L'utilisation du logiciel ITK-SNAP 3.4.0 (18) nous a permis de réaliser des reconstructions tridimensionnelles des sinus à partir d'acquisitions tomodensitométriques. Une des problématiques rencontrée lors la segmentation 3D est la définition du seuil du niveau de gris séparant les structures molles de l'os du septum et celui séparant le revêtement muqueux de l'air dans les fosses nasales. Plusieurs techniques de seuillages ont été rapportées dans la littérature (33). Nous avons choisi d'appliquer la technique du HMM. Cette mesure est obtenue en calculant la valeur moyenne de niveau de gris (valeur seuil) à partir de l'histogramme établi au niveau de deux structures adjacentes. Cette technique permet de fixer une valeur mathématique à cette zone de transition où le changement des niveaux de gris n'est pas abrupt mais au contraire progressif (44) (36). A cette méthode se sont ajoutées des retouches réalisées manuellement, essentiellement la suppression des structures adjacentes au septum (Cornets, masses latérales de l'ethmoïde) incluses dans la segmentation semi-automatique du fait de leur proximité et voire parfois même de leur contact étroit avec les parois septales. Nous avons choisi d'isoler le septum nasal.

Les 10 points repères choisis par septum osseux était des Landmark de type I. Notre étude des landmarks du septum osseux a démontré que ceux-ci étaient plus fiables que les landmarks muqueux, nous avons pu démontrer par MANOVA sur R® portant sur la conformation des septum osseux des individus que ceux-ci avaient un meilleur taux de répétabilité ; 7,3% contre 28% pour les landmarks mous. Ces différences peuvent être expliquer par la différence d'épaisseur entre septum osseux et muqueux lié à la présence de structures molles.

Les analyses en composantes principales montrent la grande variabilité du septum. Les PC1 et PC2, représentent 49% de la variance totale pour le septum osseux et 43% pour le septum

muqueux. L'analyse en composantes principales, représentation des PC1 et PC2 en ajoutant le facteur sexe montre qu'il ne semble pas y avoir de répartition par sexe le long de ces composantes que ce soit pour l'os ou pour le mou.

Nous avons pu obtenir les coordonnées Procrustes pour les extrêmes de variation le long de la PC1, de la PC2. Nous avons toujours utilisé les coordonnées projetées sur l'axe de la composante principale étudiée afin de s'affranchir de l'effet des autres composantes.

L'analyse descriptive retrouve essentiellement une différence de hauteur du septum nasal avec une jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/OPN plus ou moins projeté vers l'avant. Mais les variations les plus importantes étaient observées sur la position plus ou moins antérieure de la zone de jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/vomer/cartilage.

Etonnamment et en discordance avec une impression clinique forte, nous n'avons pas mis en évidence dans notre population de variation importante du septum dans le plan frontal. Ces résultats sont probablement liés au fait que cette étude a été réalisée sur des sujets sains et non des patients opérés de déformations septales.

De manière assez logique, les mêmes observations se retrouvent de manière symétrique au sein des minimum et maximum de variation des septum muqueux.

La recherche des allométries montre qu'il existe une influence de la taille sur la conformation pour notre population dans certaines des composantes représentant 95% de la population.

Nous n'avons pas mis en évidence de dimorphisme sexuel dans la conformation des septums dans notre population.

L'étude comparative des landmarks osseux et muqueux par MANOVA montre une différence de 28%. Cette différence montre la part de variabilité de la conformation septale due à l'épaisseur de la muqueuse et des tissus mous du septum. Sur un plan fonctionnel ces variations sont importantes.

Les critères d'exclusions choisis avaient pour but d'éliminer des facteurs qui auraient faussé les analyses futures en biaisant la reconstruction tridimensionnelle des septums, comme l'équipement médical de type sonde naso-gastrique ou lunette à oxygène.

Au total nous avons étudié 91 individus adultes des tous âges.

## 5. CONCLUSION

Notre étude en morphométrie géométrique nous a permis de définir des landmarks osseux et muqueux du septum nasal.

Nous avons défini 10 landmarks fiables et reproductibles.

Nous avons décrit la variabilité de conformation du septum nasal au sein d'un échantillon de population adulte.

La présence des tissu mous de recouvrement est responsable d'une différence de conformation relativement faible avec le septum osseux.

Enfin, nous avons exclu l'existence d'un dimorphisme sexuel pour la conformation du septum.

Ce travail constitue une première étape à l'exploration de la partie cartilagineuse antérieure du septum avec la définition de nouveaux landmarks à ce niveau afin de pouvoir en association avec les travaux portant sur le vestibule et les cornets contribuer à une meilleure approche de la conformation/fonction du nez.

## 6. Bibliographie

---

- 1951, Becker OJ. Problems of the septum in rhinoplastic surgery. *A.M.A. archives of otolaryngology*. 1951-Jun et 53(6):622-639. 1951-Jun 1951. 1951-Jun 1951.
- 1977 , Kendall D. The diffusion of shape. *Advances in Applied Probability*. et 9:428-430.
- 1984 , Bookstein FL. A statistical method for biological shape comparisons. *Journal of Theoretical Biology* et 107(3):475-520.
- 1991 , Bookstein FL. *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*: Cambridge University Press et p., 435.
- 1930–1945., Mosimann J.E. Size allometry: Size and shape variables with characterizations of the lognormal and generalized gamma distributions. *Journal of the American Statistical Association* 1970. 65:.
- Aix-Marseille, Michel. J. et al. Contribution à l'étude des cavités naso-sinusiennes de l'adulte par morphométrie géométrique et la simulation numérique des écoulements. et 2015.
- Aziz, T., V. L. Biron, K. Ansari, and C. Flores-Mir, 2014, Measurement tools for the diagnosis of nasal septal deviation: a systematic review: *Journal of Otolaryngology-Head & Neck Surgery*, v. 43.
- Baumann I, Baumann H. A new classification of septal deviations. *Rhinology*. Sep 2007 et 45(3):220-223.
- Bookstein F. Foundations of morphometrics. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 1982 et 13:451-470.
- Bookstein FL. Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1996 et 58(2):313-365.
- Buyukertan, M., N. Keklikoglu, and G. Kokten, 2003, A morphometric consideration of nasal septal deviations by people with paranasal complaints et a computed tomography study: *Rhinology*, v. 41, p. 21-24.
- Cho GS, Jang YJ. Deviated Nose Correction: Different Outcomes According to the Deviation Type. *Laryngoscope*. May 2013 et 123(5):1136-1142.
- Cottle, M. H., R. M. Loring, G. G. Fischer, and I. E. Gaynon, 1958, The maxilla-premaxilla approach to extensive nasal septum surgery: *A.M.A. archives of otolaryngology*, v. 68, p. 301-13.
- Delmas, Rouvière et. 2002. Anatomie humaine descriptive topographique et fonctionnelle, tome 1 : Tête et cou. . 2002. Vol. tome 1.
- Dryden I, and Mardia KV. *Statistical shape analysis*. Chichester: Wiley 1998.
- <http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php?n=Main.Publications>, ITK-SNAP Publications [Internet]. [cited 2016 May 31]. Available from:.
- ipan MJ, Most SP (2014). Development of a severity classification system for subjective nasal obstruction. *JAMA Facial Plast Surg* 15(5):358–361.
- Kendall DG. Shape manifold, Procrustean metrics and complex projective spaces. *Bulletin of the London Mathematical Society* 1984 et 16:81-121.

- Kim J, Cho JH, Kim SW, Kim BG, Lee DC, Kim SW. Anatomical Variation of the Nasal Septum: Correlation Among Septal Components. *Clinical Anatomy*. Nov 2010 et 23(8):945-949.
- Kim, J., J. H. Cho, S. W. Kim, B. G. Kim, D. C. Lee, and S. W. Kim, 2010, Anatomical Variation of the Nasal Septum: Correlation Among Septal Components: *Clinical Anatomy*, v. 23, p. 945-949.
- Klossek J-M, Desmons C, Serrano E, Percodani J. Anatomie des cavités nasosinusiennes. [Httpwwwem-Premiumcomlamauniv-Amufrdatatraitesor20-16631](http://www.em-premium.com.lama.univ-amu.fr/article/1234) [Internet]. [cited 2016 Jun 5] et <http://www.em-premium.com.lama.univ-amu.fr/article/1234>, Available from:.
- Krajina Z, Bumber Z. CONTRIBUTION TO NASAL-SEPTUM DEFORMITIES. *Acta Oto-Laryngologica*. 1982 et 93(3-4):291-294.
- Lee SJ, Liong K, Lee HP. Deformation of Nasal Septum During Nasal Trauma. *Laryngoscope*. Oct 2010 et 120(10):1931-1939.
- Michel J, Paganelli A, Fakhry N, et al. Determination of age and gender: Anthropological and forensic interest of frontal sinus 3D reconstructions. *Journal of Forensic Sciences*. 2015 et 60(2):269-73.
- Miles, B. A., D. Petrisor, H. Kao, R. A. Finn, and G. S. Throckmorton, 2007, Anatomical variation of the nasal septum: Analysis of 57 cadaver specimens: *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, v. 136, p. 362-368.
- Min, Y. G., H. W. Jung, and C. S. Kim, 1995, Prevalence study of nasal septal deformities in Korea: results of a nation-wide survey: *Rhinology*, v. 33, p. 61-5.
- Mladina, R., E. Cujic, M. Subaric, and K. Vukovic, 2008, Nasal septal deformities in ear, nose, and throat patients: An international study: *American Journal of Otolaryngology*, v. 29, p. 75-82. 2008.
- Mladina, R., N. Skitarelic, G. Poje, and M. Subaric, 2015, Clinical Implications of Nasal Septal Deformities: *Balkan Medical Journal*, v. 32, p. 137-146.
- Moreddu E, Puymerrail L, Michel J, Achache M, Dessi P, Adalian P. Morphometric measurements and sexual dimorphism of the piriform aperture in adults. *Surgical Radiological Anatomy* 2013 et 35(10):917-24.
- O'Higgins P. The study of morphological variation in the hominid fossil record: biology, landmarks and geometry. *Journal of Anatomy* 2000 et 1):103-120., 197 ( Pt.
- Oxnard C, and O'Higgins P. Biology clearly needs morphometrics. Does morphometrics need biology? *Biological Theory* 2009 et 4(1):84-97.
- Prabhu, L. V., A. V. Ranade, R. Rai, M. M. Pai, A. Kumar, P. Sinha, and S. R. Nayak, 2009, The nasal septum: An osteometric study of 16 cadaver specimens: *Ent-Ear Nose & Throat Journal*, v. 88, p. 1052-+.
- Sastre J. Etude tridimensionnelle de la partie postérieure de la base du crâne chez le fœtus : applications à la détermination de l'âge en anthropologie médico-légale. Thèse, Marseille 2011 et p., 256.
- Sedaghat, A. R., N. Y. Busaba, M. J. Cunningham, and D. A. Kieff, 2013, Clinical Assessment is an Accurate Predictor of Which Patients Will Need Septoplasty: *Laryngoscope*, v. 123, p. 48-52.

**Spoor CF, Zonneveld FW, and Macho GA. Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: applications and problems. American Journal of Physical Anthropology 1993 et 91(4):469-484.**

**Turkbey B, Fotin SV, Huang RJ et al. Fully Automated Prostate Segmentation on MRI: Comparison With Manual Segmentation Methods and Specimen Volumes. American Journal Of Roentgenology. 2013 et W720-W729., 201(5):.**

**Zelditch ML, Swiderski DL, Shetts HD, and Fink WL. Geometric morphometrics for biologists: a primer: Elsevier Academic Press 2004 et p., 443.**

**- B -**

## **Etude principale**

**Apport de la morphométrie géométrique septale dans  
l'approche de l'obstruction nasale**

# Table des matières

Table des matières .....	51
<b>1. Introduction .....</b>	<b>53</b>
<b>2. Matériel et méthode.....</b>	<b>55</b>
<b>2.1. Population de l'étude.....</b>	<b>55</b>
<b>2.2. Processus de segmentation 3D.....</b>	<b>57</b>
<b>2.3. Morphométrie géométrique .....</b>	<b>62</b>
2.3.1. 2.3.1. Principes de la morphométrie géométrique .....	63
2.3.2. 2.3.2. Les points repères ou landmarks.....	65
2.3.3. Définition et validations des points repères utilisés pour l'analyse .....	66
<b>2.4. Analyses statistiques.....</b>	<b>73</b>
2.4.1. Une analyse descriptive de notre population .....	73
2.4.2. La validation des landmarks .....	73
2.4.3. Le partitionnement de la population (Clustering).....	73
2.4.4. La corrélation des clusters avec les résistances rhinomanométriques .....	74
2.4.5. Analyse visuelle descriptive après analyse Procuste généralisés et analyse en composante principale pour chacun des clusters .....	74
2.4.6. 2.4.6. La synthèse de nos résultats et la proposition d'une classification des déformations septales.....	77
<b>3. Résultats.....</b>	<b>77</b>
<b>3.1. Population .....</b>	<b>77</b>
3.1.1. <i>Population pathologique</i> .....	77
3.1.2. <i>Population témoin</i> .....	78
3.1.3. <i>Comparaison des 2 populations</i> .....	79
<b>3.2. Validation des landmarks.....</b>	<b>79</b>
<b>3.3. Partitionnement de la population : clusterisation .....</b>	<b>81</b>
<b>3.4. Corrélation des clusters avec les résistances rhinomanométriques .....</b>	<b>85</b>
<b>3.5. Analyse visuelle descriptive après analyse Procuste généralisés et analyse en composante principale pour chacun des clusters.....</b>	<b>86</b>
3.5.1. Cluster 1 .....	87

3.5.2.	Cluster 2 .....	91
3.5.3.	Cluster 3 .....	95
3.5.4.	Cluster 4 .....	99
<b>3.6.</b>	<b>Synthèse .....</b>	<b>105</b>
<b>4.</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>107</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>115</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>116</b>
<b>I.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>Erreur ! Le signet n'est pas défini.</b>

# 1. Introduction

Les fosses nasales ont un rôle majeur dans la ventilation et le conditionnement thermique et hygrométrique de l'air inspiré. Tout obstacle à cet écoulement aérien sera responsable d'une obstruction nasale et d'un défaut de conditionnement (1). La prévalence de l'obstruction nasale est importante au sein de la population générale(2–6) ce qui en fait un motif courant de consultation en Oto-Rhino-Laryngologie. Ce symptôme est responsable d'une altération importante de la qualité de vie, limitant les activités physiques et diminuant la qualité du sommeil (7–9). L'obstruction nasale peut être objectivée par la réalisation d'une rhinomanométrie, examen permettant d'apprécier les résistances à l'écoulement de l'air au sein des deux fosses nasales(10,11). Le septum, par sa situation médiane au sein des fosses nasales est fréquemment responsable de cette obstruction (12). Il est constitué à sa partie antérieure par le cartilage quadrangulaire et à sa partie postérieure par des éléments osseux, la lame perpendiculaire de l'ethmoïde appendue à la base du crâne au niveau de la lame criblée et le vomer situé à la partie postéro inférieure de la cloison nasale (13–15). Le septum présente des variations de conformation, inter-individuelles, très marquées au sein de la population générale. C'est une structure rarement rectiligne (17–20). Il se présente selon différentes configurations avec des amplitudes de déviation plus ou moins importantes. Celles-ci peuvent être soit antérieures, soit postérieures ou associées (5,21,22). Le traitement de ces déviations septales symptomatiques est chirurgical (23–25). La septoplastie est une des interventions les plus fréquemment pratiquées en Oto-Rhino-Laryngologie et Chirurgie Cervico-Faciale.

La morphométrie géométrique est une méthode statistique utilisée en anthropologie biologique et médico-légale permettant d'analyser la conformation d'un objet en

s'affranchissant de sa taille et de sa position dans l'espace, cela dans le but de comparer les individus où les espèces entre elles (30) (31). Il s'agit d'une méthode d'analyse statistique puissante et objective de la conformation des objets. Notre précédent travail de mémoire de recherche de Master 2 a utilisé et validé l'utilisation de la morphométrie géométrique dans l'étude du septum nasal sur une population de 91 individus. Le présent travail de thèse constitue l'étape suivante de notre recherche avec l'application de cette méthode d'analyse sur une population de sujets pathologiques.

Dans la littérature de nombreuses tentatives de classifications des déviations septales ont été proposées (6,21,22,26–29). Mais aucune n'a fait appel à la morphométrie géométrique dans la caractérisation des différentes variantes morphologiques du septum nasal.

Les objectifs de notre travail étaient d'étudier les variations morphologiques pathologiques de cloison nasales et de tenter d'établir une classification des déformations septales symptomatiques. Pour cela nous avons :

- établi des profils (cluster) regroupant différents types de conformations
- étudié les corrélations de ces différents profils conformationnels avec le degré d'obstruction nasale
- proposé une classification des déformations.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. Population de l'étude

Il s'agit d'une étude rétrospective monocentrique incluant des individus pris en charge dans le service d'Oto-Rhino-Laryngologie et Chirurgie Cervico-Faciale adulte de l'hôpital de la Timone puis de l'hôpital de la Conception, de l'Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille (APHM) entre janvier 2013 et mai 2017. La population de l'étude était divisée en 2 groupes d'individus : le groupe pathologique et le groupe témoin.

#### *Groupe pathologique :*

Il s'agissait de patients adultes, opérés d'une septoplastie ou d'une rhino-septoplastie et pour lesquels nous disposions du scanner pré-opératoire ainsi que des données de la rhinomanométrie pré-opératoire, examens réalisés de manière systématique chez tous les patients rapportant une plainte fonctionnelle nasale obstructive avant toute prise de décision.

Les critères d'inclusions étaient :

- Individus adultes (âge supérieur à 18 ans)
- Avec obstruction nasale non réversible après test aux vasoconstricteurs, objectivée à la rhinomanométrie. (Résistance pour une fosse nasale supérieure à 0,30 sPa/mL)
- Présentant une déviation septale objectivée sur le scanner pré-opératoire et à l'endoscopie
- Ayant été opérés de septoplastie ou de rhinoseptoplastie.

Les scanners ont été extraits de la base de données des services de radiologie de l'APHM. Ils ont été réalisés selon le protocole : scanner hélicoïdal multibarettes Siemens Somatom Définition (Siemens Healthcare) ou General Electric Light speed LS 16 Pro (GE) en utilisant les paramètres suivants : 120-Kv, 130 mAs, coupes de 0.6 mm chaque 0.3 mm. Ils devaient englober les fosses nasales et le massif facial en totalité.

Les critères d'exclusions étaient :

- Sujets mineurs
- Les scanners contenant des artefacts métalliques ou dentaires
- Les scanners acquis selon un protocole non hélicoïdal
- L'absence de scanner pré-opératoire ou de rhinomanométrie pré opératoire disponible.

*Groupe témoin :*

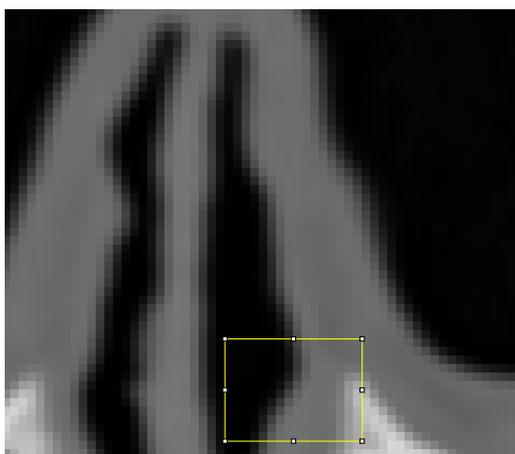
Nous avons également inclus un groupe d'individus témoins adultes ne se plaignant pas d'obstruction nasal chez lesquelles nous disposions des données rhinomanométriques. Ceci afin de pouvoir comparer notre population pathologique à une population normale. Pour ces individus nous disposions pas de scanner car il n'y avait pas d'indication à ce qu'il soit prescrit.

## 2.2. Processus de segmentation 3D

Pour chaque scanner nous avons réalisé une reconstruction 3D de la cloison nasale à l'aide du logiciel de segmentation semi-automatique ITK SNAP® (32). La méthode de reconstruction que nous avons utilisée a été détaillée lors de notre précédente étude préliminaire de master 2.

Cette méthode de reconstruction repose sur une détermination du seuil de niveau de gris séparant le mieux l'air des structures osseuses, cartilagineuses et des parties molles. Nous avons appliqué pour chaque individu la méthode du Half Maximum Height (HMH) décrite et utilisée pour évaluer des distances linéaires sur une coupe unique d'examen tomodensitométrique et « sur os sec » (11). Cette mesure est obtenue en calculant la valeur moyenne de niveau de gris (valeur seuil) à partir de l'histogramme établi au niveau de deux structures adjacentes. Cette technique permet de fixer une valeur mathématique à cette zone de transition où le changement des niveaux de gris n'est pas abrupt mais au contraire progressif. Dans le but d'établir au mieux les valeurs de seuillage entre les structures, nous avons obtenu les histogrammes des interfaces air/tissu mou et os/air à l'aide de l'outil « Measure » du logiciel ImageJ® v.1.44o (Figure 1). Afin d'obtenir une valeur moyenne pour chaque individu, nous avons réalisé 10 mesures par individu. Nous avons ensuite déterminé la valeur maximale et la valeur minimale puis calculé la valeur moyenne des moyennes.

Cela permet de déterminer le seuil de niveau de gris à partir duquel le logiciel ITK SNAP® va initier le processus de segmentation. Nous avons ensuite réalisé des retouches manuelles à l'issue de ce processus afin d'effacer les structures adjacentes comme les cornets et isoler ainsi parfaitement le septum nasal.



**Figure 1.** Vue, zoom maximum, dans une coupe axiale de l'examen tomodensitométrique illustrant la technique du HMH.

Le processus de segmentation d'images permet de séparer une image en plusieurs zones. Les points connexes ayant des propriétés similaires (niveaux de gris) vont être réunis dans le même ensemble. L'algorithme utilisé procède par croissance de régions. Cette technique consiste à regrouper des points voisins pour former des régions de plus en plus importantes. Pendant le seuillage, les régions ainsi sélectionnées sont visualisées sur les trois coupes (transversale, coronale, sagittale). Cela permet à l'utilisateur d'évaluer la qualité du seuillage sur différentes coupes 2D et de l'adapter de manière dynamique pour reconstruire une géométrie 3D correspondant au domaine que l'on cherche à extraire.

Les étapes de cette modélisation sont :

- Sélection de la région d'intérêt (figure 2) : cela va permettre de limiter le domaine

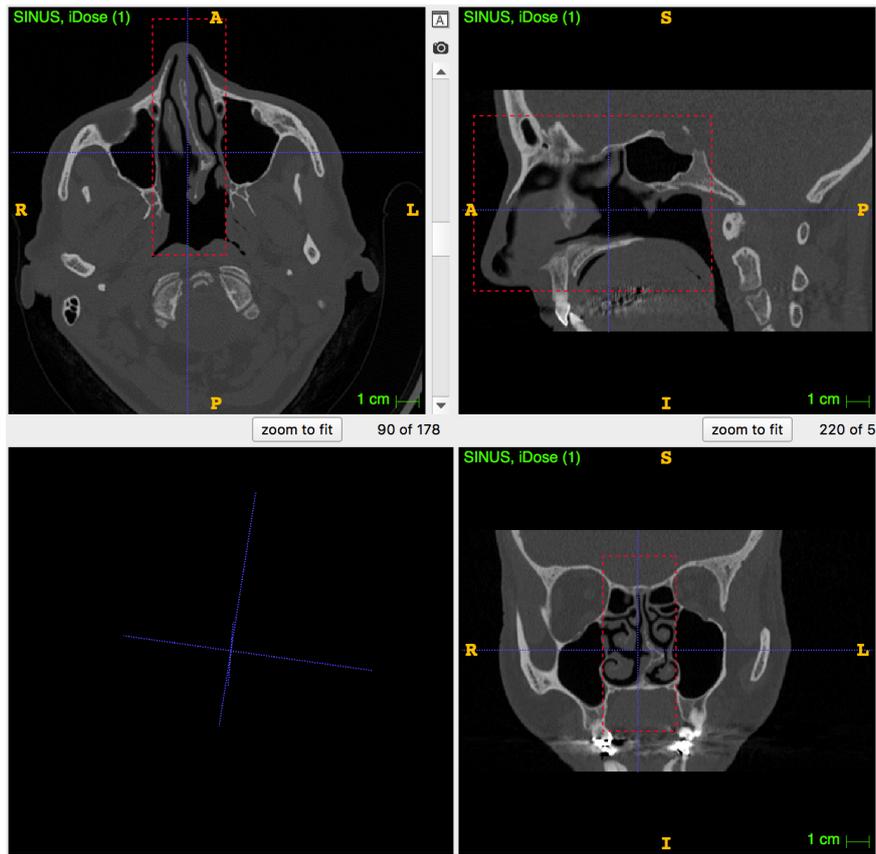
d'évolution du contour actif (ensemble de points que l'on va déplacer pour leur faire épouser une forme). Afin d'avoir un volume contenant l'ensemble du septum nasal, dans notre étude la région d'intérêt était un parallélépipède rectangle dont les limites étaient :

Sur une coupe sagittale passant par le septum nasal :

- En haut : un plan axial passant par au-dessus de l'apophyse crista galli
- En avant : un plan coronal passant par la pointe du nez
- En arrière : un plan coronal passant par la paroi postérieure du cavum
- En bas : un plan axial situé en dessous du plancher des fosses nasale

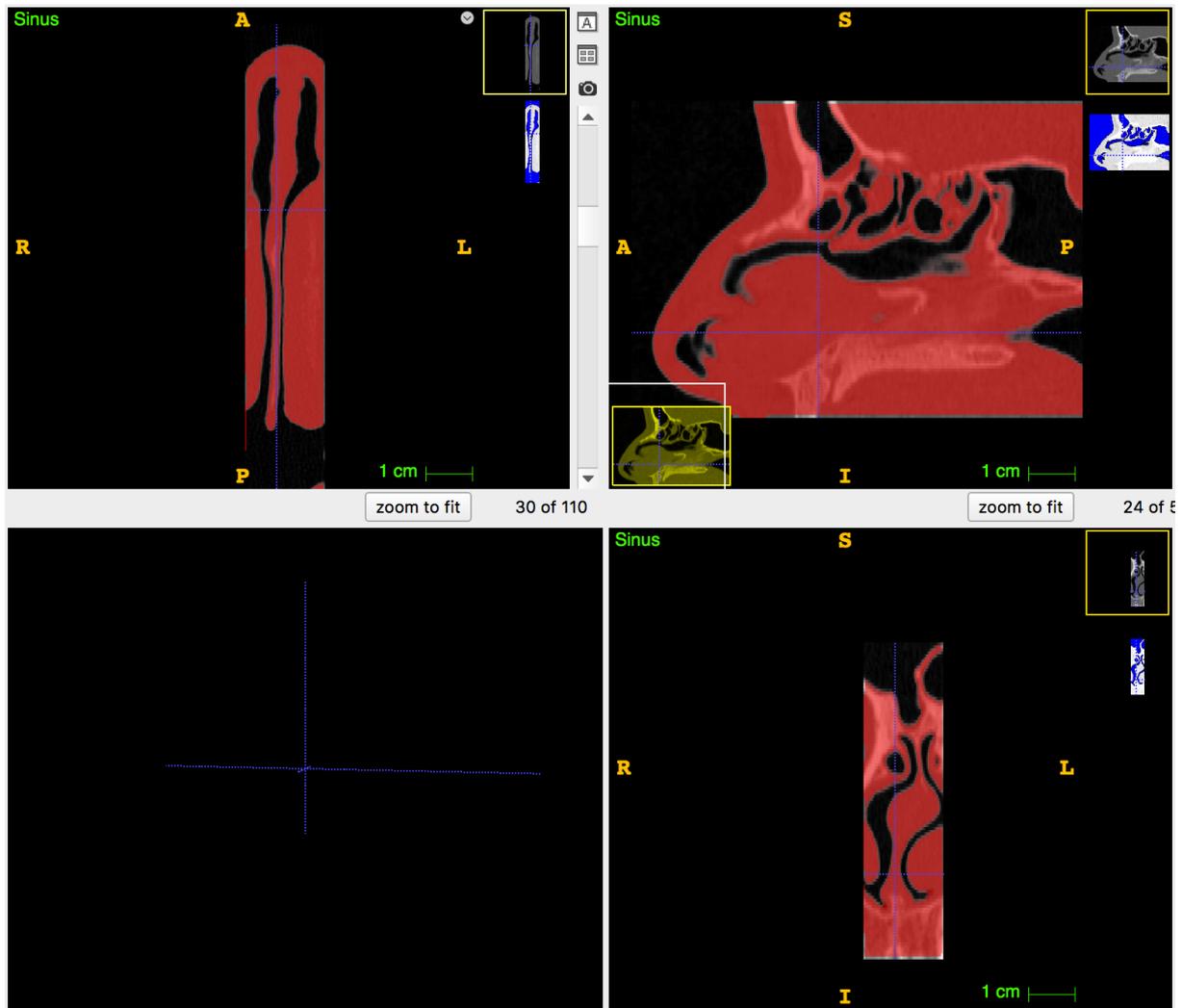
Sur une coupe transversale passant par le plus large des narines :

- Latéralement : un plan sagittal passant par la cloison inter sinus nasale



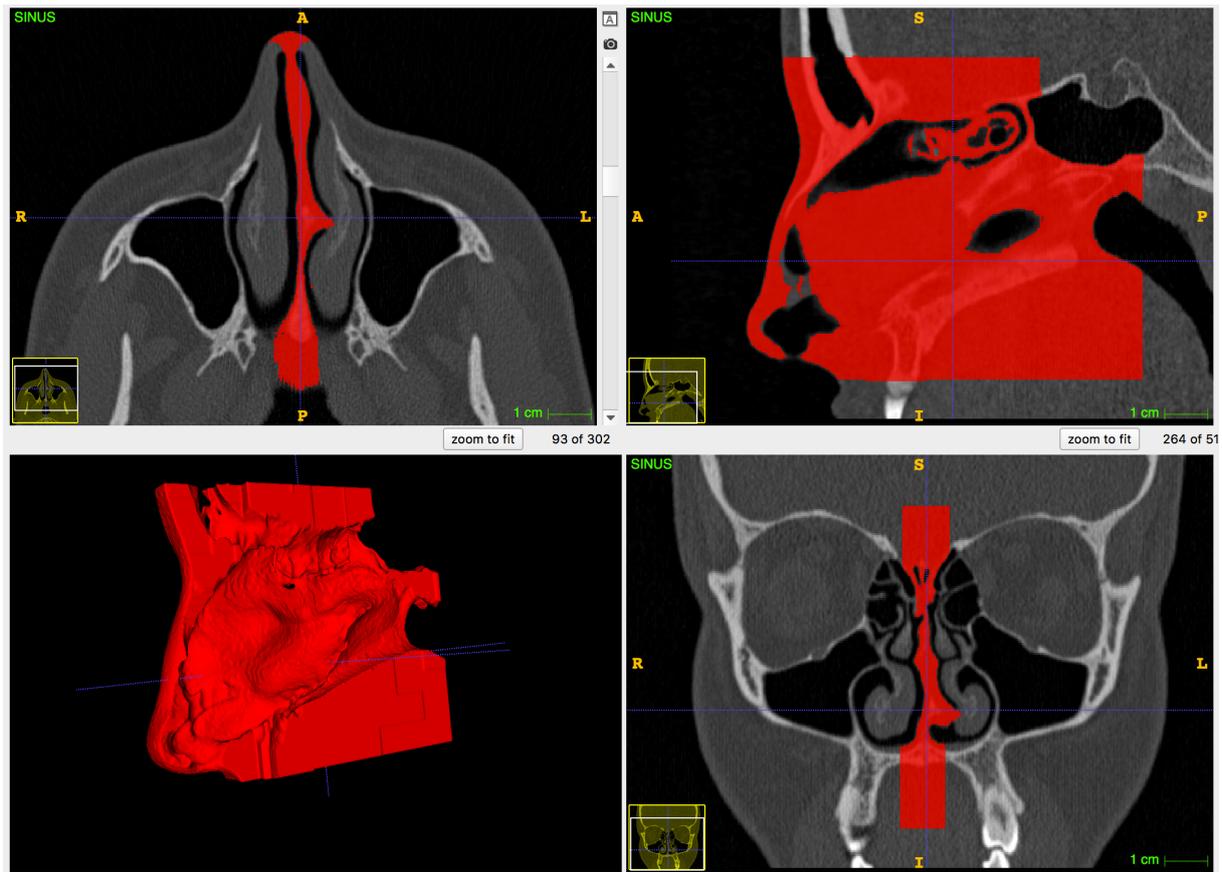
**Figure 2.** Visualisation de la zone d'intérêt en pointillés rouges sur une coupe axiale, sagittale et coronale

Pour chaque individu, en utilisant la valeur seuil séparant les niveaux de gris entre l'air et les tissus mou, on procède à une reconstruction de son septum muqueux en incluant dans la région d'intérêt la crista galli et l'orifice piriforme en totalité. Le processus de segmentation est initié par la mise en place des contours actifs (bulle) à l'intérieur de ce volume. Le contour actif va se dilater (énergie de contrainte) pour remplir les structures constituant le septum, en s'arrêtant aux zones de plus faible gradient d'intensité (l'air) (Figure 3).



**Figure 3.** Capture d'écran du processus de segmentation. Le modèle en cours d'acquisition est en rouge.

Après obtention du modèle, un travail coupe par coupe était effectué afin de supprimer du modèle les structures adjacentes non septales comme les cornets et les masses latérales de l'éthmoïde (figure 4).



**Figure 4.** Capture d'écran du modèle en fin de segmentation avant exportation

Une fois le domaine extrait, aucun algorithme de lissage n'a été appliqué à son maillage surfacique pour ne pas modifier de façon critique la réalité anatomique des modèles. Le fichier contenant ce maillage surfacique 3D est alors enregistré au format STL (surface triangularisée, utilisée dans le domaine de la stéréolithographie).

### 2.3. Morphométrie géométrique

La morphométrie géométrique a été développée par Bookstein dans les années 80 afin de pallier les limites de la morphométrie conventionnelle ou « traditionnelle », en conservant et comparant très précisément les conformations de différents objets(30,30,33). Elle s'attache à étudier la forme des objets en deux ou trois dimensions. Elle permet ainsi de visualiser en trois

dimensions les changements de conformation d'un objet ce qui n'est pas réalisable avec les techniques de morphométrie conventionnelle. Elle a pour but d'étudier la morphologie des structures en s'affranchissant de paramètres tels que la taille ou l'orientation en faisant appel à une succession de calculs statistiques ceci afin de mettre en évidence d'éventuelles variations et d'essayer d'en expliquer l'origine.

### **2.3.1. Principes de la morphométrie géométrique**

La morphométrie géométrique constitue une approche moderne de l'analyse des variations de formes. Elle fait appel à des termes qui nécessitent d'être définis pour éviter toute confusion. La forme d'un objet est la résultante de l'association de sa taille et de sa conformation. Les notions de taille, conformation et forme interviennent dans toutes les études morphométriques et leurs relations ont été formalisées par l'équation suivante : « *Form = size + shape* » qui peut se traduire en français par : « FORME = TAILLE + CONFORMATION » (34).

Ainsi si nous prenons l'exemple de deux tours Eiffel, l'originale et sa réplique miniature (figure 5).



**Figure 5.** Comparaison de deux objets Tour Eiffel : taille réelle et réplique miniature

Nous pouvons dire que ces deux objets ont la même conformation mais ils n'ont pas la même forme car ils sont de taille différente. Ainsi on appelle « conformation » l'ensemble des caractéristiques géométriques qui demeurent lorsque les effets relatifs à la position, la taille (échelle) et à la rotation ont été retirés d'un objet. La morphométrie géométrique permet ainsi d'étudier la conformation des objets afin de pouvoir les comparer entre eux.

Deux approches sont utilisées en morphométrie géométrique : l'étude par contour ou par points d'intérêts. La seconde est celle qui est le plus utilisée. Elle se base sur l'utilisation de points d'intérêts appelés « points repères » ou « landmarks » situés sur l'objet que l'on veut étudier. En médecine ils correspondent à des *loci* anatomiques (extrémité d'un os, articulation, foramen etc...) bien identifiables d'un individu à l'autre chez tous les spécimens de l'étude (33). Ils doivent fournir une visualisation schématique adéquate de la morphologie des structures étudiées. Leurs coordonnées sont ensuite relevées en 2D ou en 3D, soit

directement dans un logiciel si l'on travaille sur des images, soit directement sur l'objet en 3D, à l'aide d'un pointeur laser adapté et la configuration de ces points permet de décrire la forme. Les effets de la taille sont ensuite éliminés grâce au calcul de la distance procrustéenne (35) ou à l'aide des coordonnées de Bookstein, ce qui autorise enfin la réalisation de comparaisons objectives des formes étudiées. Enfin, la morphométrie géométrique se base sur la taille centroïde qui est une évaluation naturelle de la taille. La taille centroïde est la racine carré de la somme des distances entre les landmarks et le centre de gravité de chaque objet, c'est une mesure de la taille non-corrélée à la conformation (36).

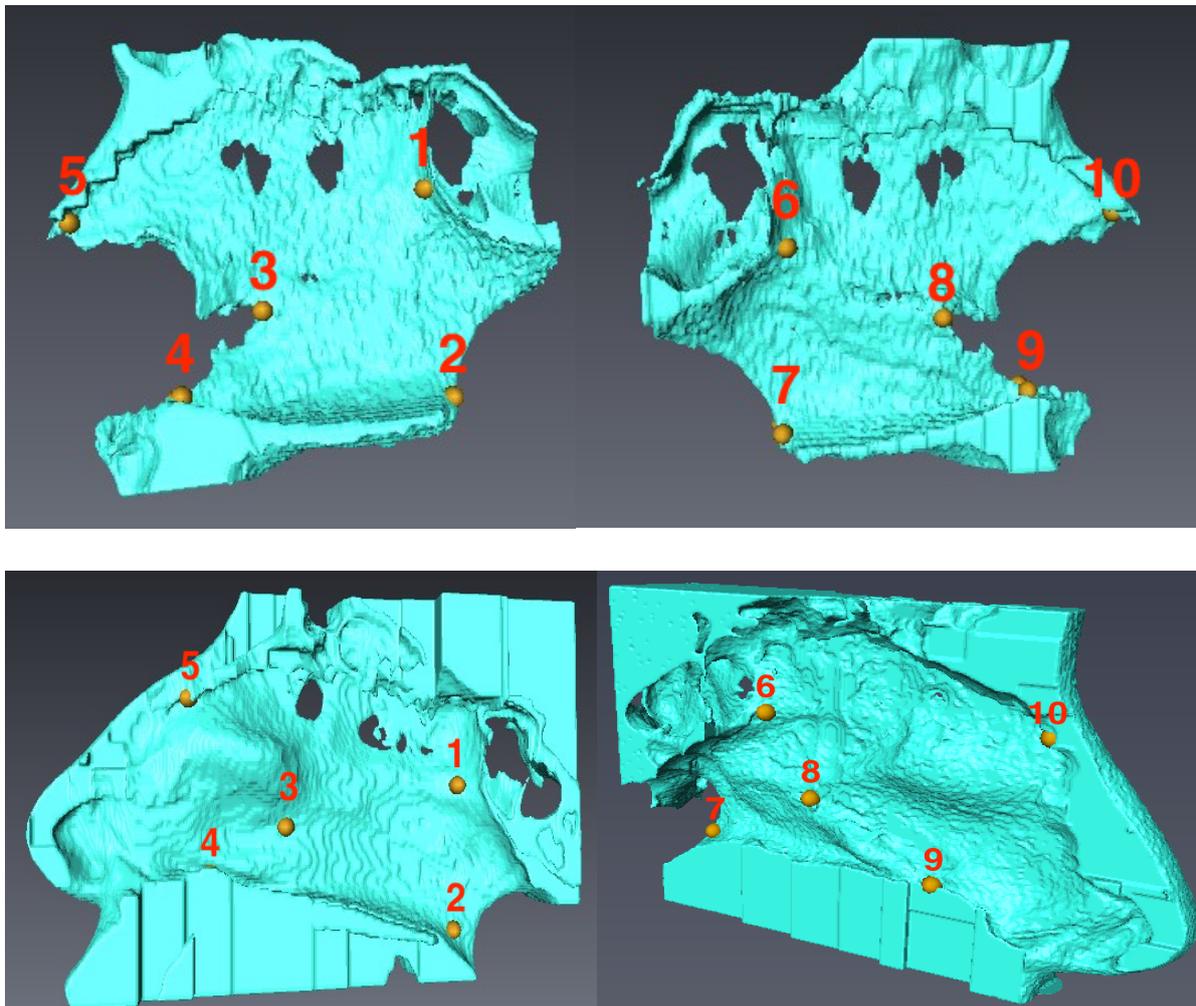
### **2.3.2. Les points repères ou landmarks**

Bookstein a établi une classification des points repères en trois catégories (33).

- Les Types I sont des points pour lesquels l'homologie d'un cas à l'autre est fortement supportée. Par exemple un point de convergence précis de plusieurs structures osseuses est facilement identifiable chez chaque individu.
- Les Types II sont des repères dont l'homologie d'un sujet à l'autre est supportée par la géométrie (extrémité d'un processus osseux, maxima ou minima de courbure) et non par des caractéristiques anatomiques ou histologiques.
- Les Types III sont beaucoup plus problématiques et ne devraient pas selon certains être considérés comme des points repères. Ils ne sont pas définis par les structures avoisinant ce point mais plutôt comme étant positionnés à un extrême par rapport à un autre point.

### 2.3.3. Définition et validation des points repères utilisés pour l'analyse

Lors de notre précédent travail de mémoire de recherche de master 2 présenté en chapitre A, nous avons étudié 10 landmarks situés sur la cloison nasale muqueuse que nous avons comparé à 10 landmarks homologues de type I situés sur le versant osseux de la cloison nasale. La figure 6 montre la situation des landmarks muqueux et osseux de la cloison nasale utilisés lors du travail de mémoire de master 2 et le tableaux 1 précise leur définition.



**Figure 6.** Position des points repères du septum nasal osseux et muqueux : vue de face, vue latérale droite et gauche

SEPTUM	LANDMARK	DEFINITION
Gauche	1	Zone de jonction entre le sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	2	Extrémité postéro inférieure du vomer
	3	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et le cartilage quadrangulaire
	4	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
	5	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et les os propres du nez.
Droit	6	Zone de jonction entre le sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	7	Extrémité postéro inférieure du vomer
	8	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et le cartilage quadrangulaire.
	9	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
	10	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et les os propres du nez.

**Tableau 1.** Définition des landmarks

Cette étude a pu démontrer la fiabilité de ces points repères placés directement sur la muqueuse septale et nous avons pu valider cette démarche.

Pour notre travail de thèse nous avons étendu notre analyse en définissant 8 autres landmarks du septum muqueux cartilagineux. Nous avons également utilisé des landmarks du massif facial au niveau de l'orifice piriforme osseux et de l'apophyse crista galli qui nous ont servi de repère pour la ligne médiane nous permettant ainsi d'obtenir une représentation de « l'environnement » osseux dans lequel s'intègre la cloison nasale (37). Au total les points repères retenus dans notre travail étaient au nombre de 30 par ensemble cloison nasale/sinus piriforme/crista galli pour un individu.

Il s'agissait de points repères de type II pour certains représentés par des maxima de courbure au niveau notamment ( landmarks 10 et 25 ) du verre de montre antérieure, du pied de cloison ( landmarks 12 et 26 ) et du rail septal postérieur ( landmarks 4 et 20 ). Ces points repères ont été choisis pour être placés au niveau des zones d'intérêt du septum reflétant les déformations les plus fréquemment décrites.

Nous avons également placé des landmarks de type I externe au septum au niveau osseux, l'orifice piriforme et la crista galli.

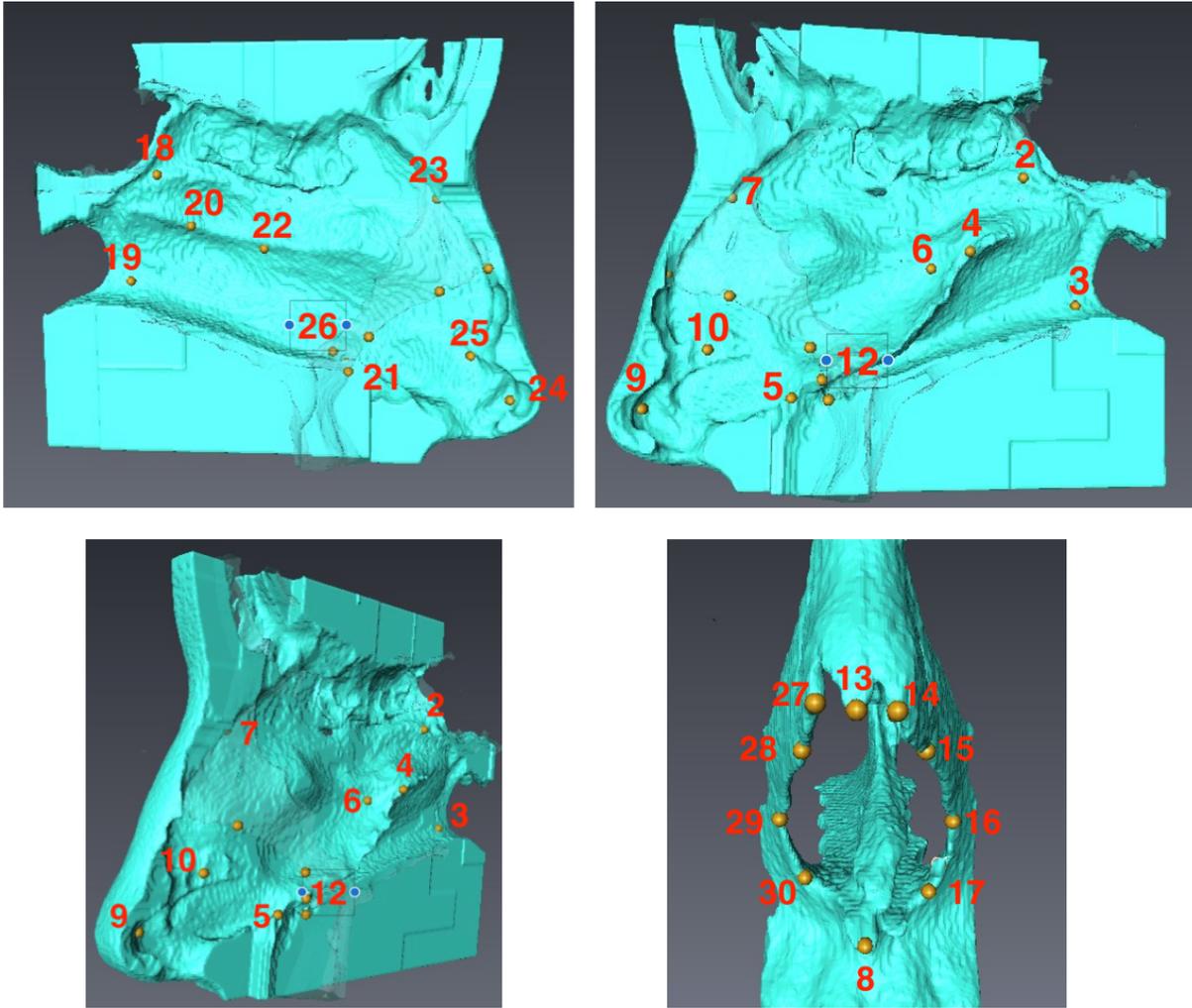
En résumé nous avons

18 landmarks du septum

9 landmarks osseux de l'orifice piriforme

3 landmarks osseux « environnementaux »

La figure 7 présente la localisation de ces landmarks et le tableaux 2 précise leur définition.



**Figure 7 :** Position des points repères utilisées sur le septum nasal : vue latérale droite, latérale gauche et  $\frac{3}{4}$  gauche ; et orifice piriforme

Structures anatomique	LM	DEFINITION
Os	1	Rostre sphénoïdal
Septum gauche	2	Zone de jonction entre la face antérieure du sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'ethmoïde.
Septum gauche	3	Extrémité postéro inférieure du vomer
Septum gauche	4	Maximum de courbure au niveau du rail septal.
Septum gauche	5	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
Septum gauche	6	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et le cartilage quadrangulaire
Septum gauche	7	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et les os propres du nez.
Septum gauche	8	Épine nasale antérieure
Septum gauche	9	Point le plus antérieur du cartilage quadrangulaire
Septum gauche	10	Maximum de courbure du cartilage quadrangulaire. Le verre de montre.
Crista galli	11	Extrémité supérieure de la crista galli
Septum gauche	12	Maximum de courbure du pied de cloison
Orifice piriforme	13	Point le plus antérieure des os propres du nez sur le plan médian
Orifice piriforme	14	Extrémité antéro médiane de l'os propre du nez gauche
Orifice piriforme	15	Zone de suture entre l'os propre du nez gauche et l'os maxillaire
Orifice piriforme	16	Maximum de courbure latéral de l'orifice piriforme à gauche
Orifice piriforme	17	Zone d'inversion de courbure entre la partie latérale de l'orifice piriforme et la partie inférieure à gauche.
Orifice piriforme	27	Extrémité antéro médiane de l'os propre du nez à droite

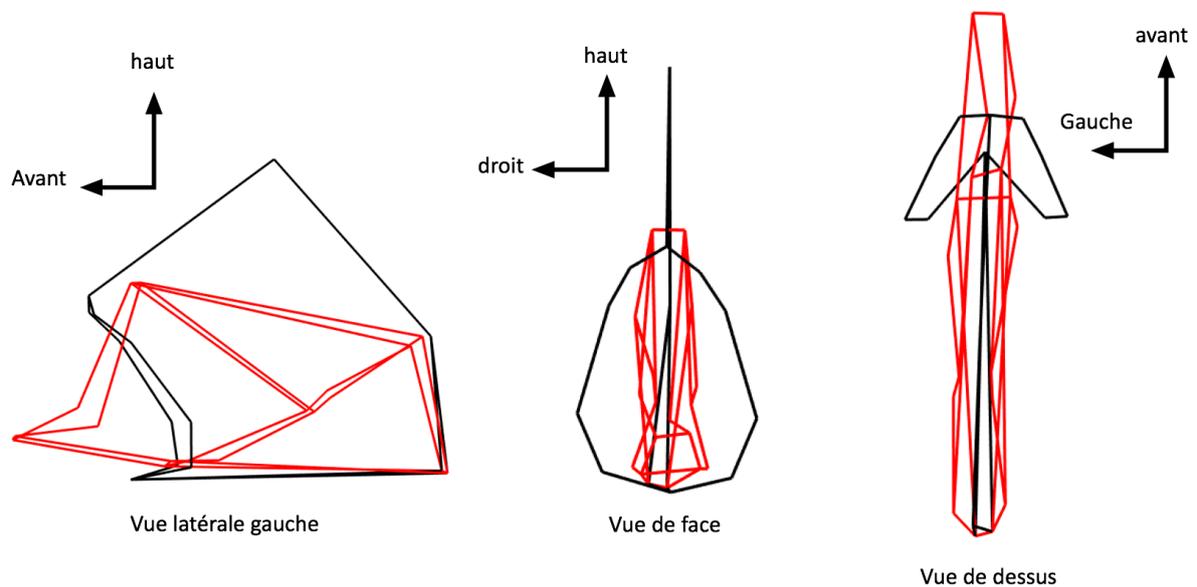
Orifice piriforme	28	Zone de suture entre l'os propre du nez droit et l'os maxillaire
Orifice piriforme	29	Maximum de courbure latéral de l'orifice piriforme à droite
Orifice piriforme	30	Zone d'inversion de courbure entre la partie latérale de l'orifice piriforme et la partie inférieure à droite
Septum droit	18	Zone de jonction entre la face antérieure du sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'ethmoïde.
Septum droit	19	Extrémité postéro inférieure du vomer
Septum droit	20	Maximum de courbure au niveau du rail septal.
Septum droit	21	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
Septum droit	22	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et le cartilage quadrangulaire
Septum droit	23	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et les os propres du nez.
Septum droit	24	Point le plus antérieur du cartilage quadrangulaire
Septum droit	25	Maximum de courbure du cartilage quadrangulaire. Le verre de montre.
Septum droit	26	Maximum de courbure du pied de cloison

**Tableau 2.** Définition des points repères (landmarks) utilisés lors du travail de thèse. En grisé les landmarks « environnementaux » du massif facial

Le positionnement des différents points s'est fait à l'aide du logiciel avizo<sup>®</sup>. Les maillages surfaciques obtenus dans ITK-SNAP<sup>®</sup> ont été exportés au format « STL » puis importés dans le logiciel avizo<sup>®</sup>.

Pour chaque individu, tous les points ont été positionnés systématiquement dans le même ordre et leurs coordonnées  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ont été enregistrées dans un fichier au format « .landmark.ascii ». Ces coordonnées des points repères constituant les données brutes de notre étude ont ensuite été exportées dans le logiciel R studio®.

Grâce à ces landmarks nous pouvons analyser la morphologie globale du septum nasal (Figure 8).



**Figure 8.** Morphologie globale du septum nasal obtenue par le positionnement des landmarks d'intérêts. Exemple d'un individu. Les landmarks du septum sont reliés par des lignes rouges, les landmarks du cadre osseux sont reliés entre eux par des lignes noires.

## 2.4. Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques ont été menées sur le logiciel R studio®. Nous avons effectué successivement :

### 2.4.1. Une analyse descriptive de notre population

### 2.4.2. La validation des landmarks

Nous avons tout d'abord procédé à une validation des landmarks précédemment définis par une étude de leur répétabilité évaluée par MANOVA Procuste. Nous avons posé ces landmarks à deux reprises chez 20 individus à un mois d'intervalle et nous avons déterminé le pourcentage de différence qu'il existait entre les deux poses.

### 2.4.3. Le partitionnement de la population (Clustering)

Dans un second temps, nous avons regroupé les cloisons nasales partageant des caractéristiques morphologiques les plus similaires en réalisant un partitionnement (« clustering »). Le partitionnement de données (« data clustering » en anglais) est une des méthodes statistiques d'analyse des données. Elle vise à diviser un ensemble de données en différents « paquets » ou « cluster » homogènes, en ce sens que les données de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes, qui correspondent le plus souvent à des critères de proximité (similarité). Le clustering cherche à faire des classes telles que :

- Les différences intra-classe soient minimales pour obtenir des *clusters*
- Les différences inter-classe soient maximales afin d'obtenir des sous-ensembles bien différenciés.

Dans notre travail à l'aide du logiciel R studio® et de la fonction HCPC du package FactomineR, nos individus ont pu être classés en fonction de leur distance statistique matérialisant leur différence morphologique au sein d'un arbre appelé dendrogramme.

#### **2.4.4. La corrélation des clusters avec les résistances rhinomanométriques**

Puis nous avons poursuivi notre analyse par une troisième étape au cours de laquelle nous avons étudié la corrélation de nos clusters avec les données de la rhinomanométrie. Nous avons comparé par un test statistique de Wilcoxon-Mann Whitney les résistances moyennes de chacun de nos clusters aux résistances moyennes de notre population témoin. Nous avons également déterminé pour chacun des clusters les résistances moyennes, les résistances moyennes droite et gauche afin de pouvoir identifier si ce regroupement sur des bases morphologique avait une traduction sur le plan fonctionnel au niveau des résistances du flux aérien.

#### **2.4.5. Analyse visuelle descriptive après analyse Procuste généralisés et analyse en composantes principales pour chacun des clusters**

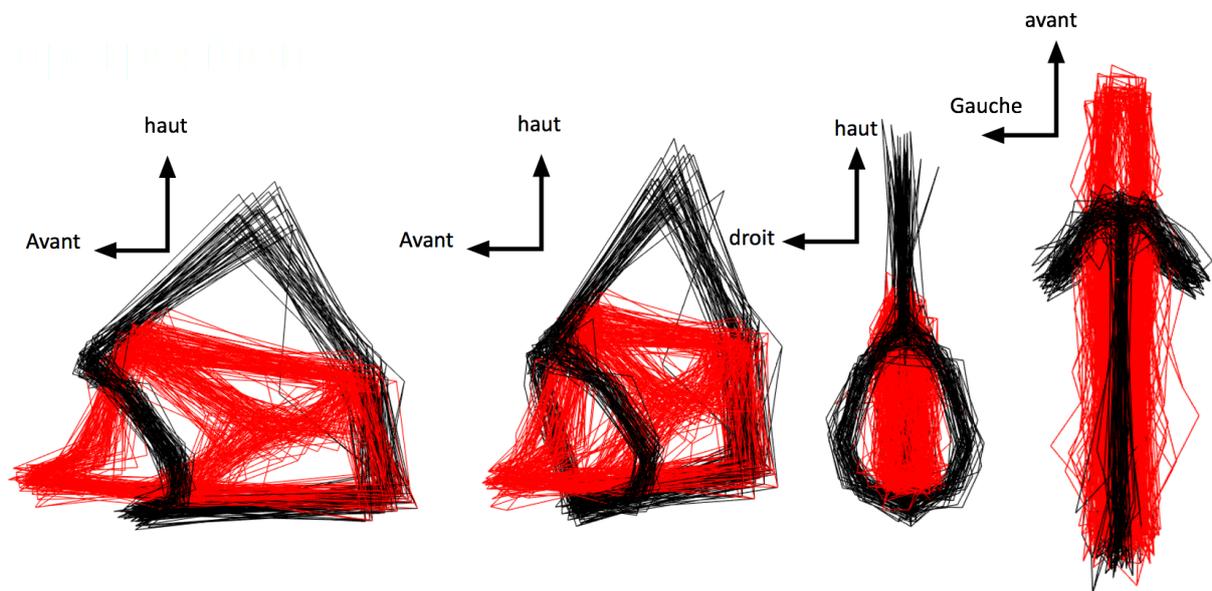
Enfin pour chacun des groupes de cluster nous avons réalisé une analyse visuelle descriptive des caractéristiques morphologiques des septums qui les constituaient. Pour cela nous avons procédé à une superposition Procuste couplée à une analyse en composantes principales. Les coordonnées des points repères d'intérêt ont été extraites du fichier « .landmark.ascii » obtenues avec le logiciel Avizo®. A partir de ce fichier, une superposition Procuste généralisée a été réalisée à l'aide du logiciel R studio®. Une matrice de variance/covariance a été calculée et l'analyse en composante principale a été réalisée. On obtient donc une représentation sous forme d'un nuage de points de l'ensemble des individus le long des axes factoriels représentant chaque composante. Pour chacune d'entre elles, R studio® fournit les

coordonnées 3D de la forme moyenne (consensus) et de la forme qui correspond au maximum de variation le long de cet axe. Nous avons réalisé cette analyse pour chacun de nos groupes de cluster. Ainsi pour chacun des clusters nous avons pu identifier et décrire leur individu consensus représentant leur forme moyenne respective. Nous pouvions ainsi décrire les caractéristiques morphologiques de chacun de ces consensus. Cela nous a permis de pouvoir comparer les différences morphologiques qu'ils existaient entre chacun de ces clusters. Pour chacun des clusters nous avons également identifié et décrit les particularités morphologiques des individus représentant leur maximum et leur minimum de variabilité le long de la composante principale numéro 1.

La superposition Procuste permet de définir la conformation de chaque individu qui est définie par ses résidus Procuste, c'est-à-dire la distance de chacun des points repères par rapport aux points repères de la forme moyenne. Elle permet de comparer la forme de chacun des septums de notre analyse après élimination de l'effet de la taille et de la rotation. Afin d'explorer les différences de formes existantes entre les individus de chacun de nos clusters, nous avons réalisé des analyses en composantes principales (ACP). Cette analyse, débute par le calcul d'une matrice de variance/covariance des résidus Procustes permettant de mettre en évidence la variabilité de conformation des différentes structures indépendamment de la taille centroïde. Le principe de l'ACP est de trouver un axe, issu d'une combinaison linéaire des variables d'origine, telle que la variance du nuage autour de cet axe soit maximale. Ce premier vecteur (vecteur propre = eigenvector) constitue la première composante et possède une valeur propre (eigenvalue) correspondant au pourcentage de variance expliquée. On poursuit la recherche du deuxième vecteur, indépendant du premier, selon le même principe en imposant qu'il soit orthogonal au premier. On arrête alors le calcul de ces vecteurs lorsque

100% de la variance est expliquée. Les principes de la superposition Procuste est détaillé en annexe 1.

En exemple la figure 9 illustre ce que serait une superposition Procuste appliquée à l'ensemble des 50 septums de notre population.



**Figure 9.** Visualisation de l'ensemble des 50 individus après superposition procuste en vue latérale gauche, de  $\frac{3}{4}$  gauche, de face et supérieure. Les landmarks du septum sont reliés par des lignes rouges, les landmarks du cadre osseux sont reliés entre eux par des lignes noires.

Pour chacun de nos cluster, grâce à la morphométrie géométrique, nous avons donc étudié successivement :

- La superposition Procuste de l'ensemble des septums de chacun de nos clusters
- La représentation de l'individu consensus, le minimum et le maximum de variation le long des axes de la composante principale numéro 1, dont nous avons décrit les

principales caractéristiques.

#### **2.4.6. La synthèse de nos résultats et la proposition d'une classification des déformations septales**

Nous avons enfin proposé une classification des déformations septales, corrélée aux données de la rhinomanométrie, à partir de l'analyse descriptive de nos clusters.

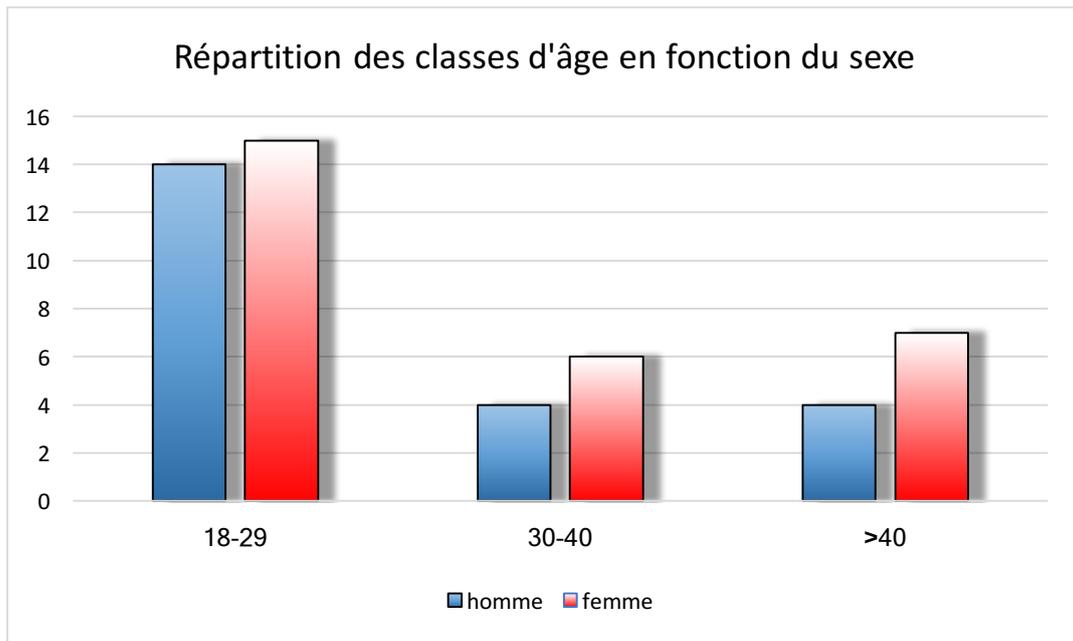
### **3. Résultats**

#### **3.1. Population**

##### *3.1.1. Population pathologique*

Au total 50 scanners ont été inclus dans notre travail. Ces examens ont été anonymisés, seuls l'âge le sexe et les données de la rhinomanométrie étaient connus. Ces examens ont été réalisés chez des individus âgés de 18 à 63 ans. La moyenne d'âge est de 31 ans.

La répartition par sexe est de 28 femmes pour 22 hommes. La moyenne d'âge chez les femmes est de 28 ans. La moyenne d'âge chez les hommes est de 34 ans.



**Figure 10.** Groupe pathologique : Répartition des classes d'âges en fonction du sexe

La moyenne des résistances nasales de notre population est de 2,85 sPa/mL (4,02 sPa/mL à droite et 2,84 sPa/mL à gauche).

Chez les femmes les résistances moyennes de 3,25 sPa/mL (5,24 sPa/mL à droite et 1,79 sPa/mL à gauche).

Chez les hommes les résistances moyennes de 2,35 sPa/mL (2,48 sPa/mL à droite et 4,19 sPa/mL à gauche).

### 3.1.2. Population témoin

Elle était constituée de 30 individus, 19 femmes et 11 hommes âgés de 20 à 56 ans. La moyenne d'âge est de 33 ans.

La moyenne des résistances est de 0,58 sPa/mL, (0,53 sPa/mL à droite et 0,63 sPa/mL à gauche).

Chez les femmes les résistances moyennes sont de 0,48 sPa/mL (0,40 sPa/mL à droite et 0,60 sPa/mL à gauche).

Chez les hommes les résistances moyennes sont de 0,77 sPa/mL (0,91 sPa/mL à droite et 0,68 sPa/mL à gauche).

### *3.1.3. Comparaison des 2 populations*

Dans la population pathologique le sexe ratio est de 0,78. Il était de 0,58 dans la population.

La répartition des âges de chacune de ces populations a été comparé par un test de Wilcoxon - Mann Whitney. Ce test est utilisé lorsqu'il faut décider si 2 groupes indépendants sont issus de la même population. Les groupes peuvent avoir des nombres d'observations différents.

Définition de l'hypothèse nulle

HO : la distribution de la variable quantitative est la même dans les 2 groupes

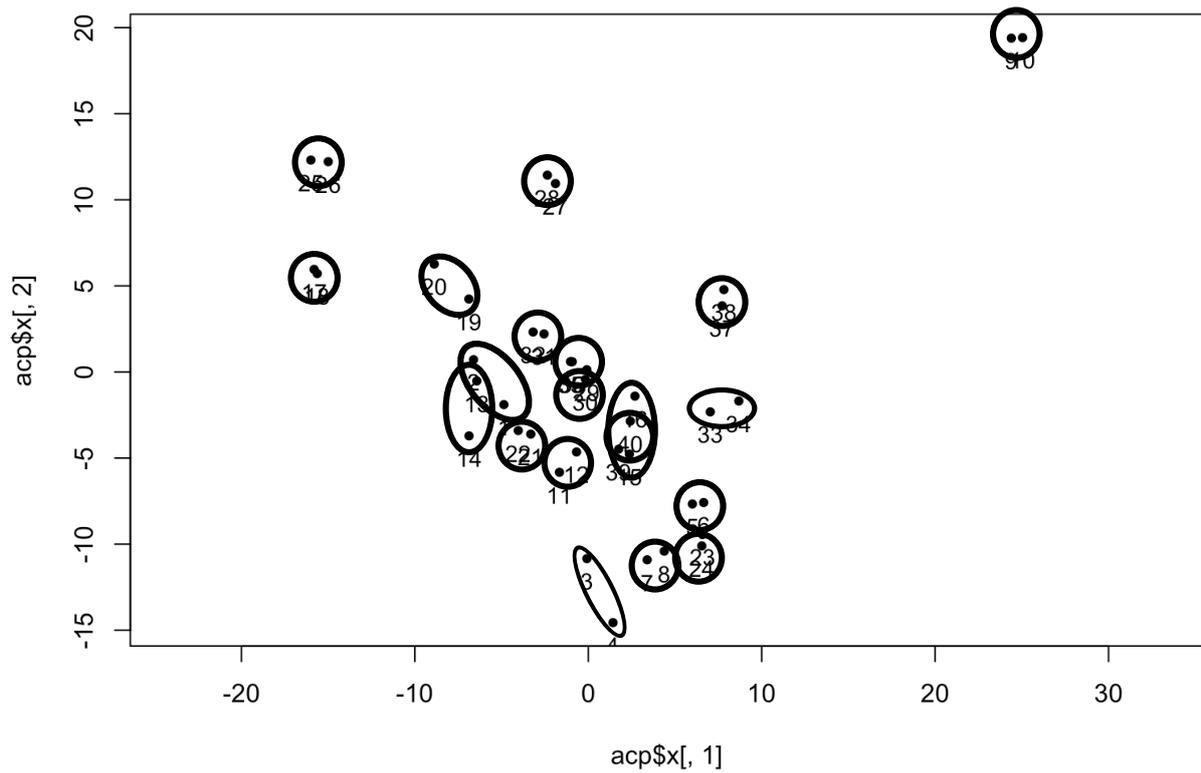
HO : les moyennes sont égales dans les deux groupes

Pour la répartition des âges de nos deux populations : la valeur p (p-value) est de 0.6.

## 3.2. Validation des landmarks

Nous avons testé la fiabilité de nos 30 points repères en évaluant leur répétabilité. Vingt reconstructions 3D de septum ont été tirées au sort parmi notre série de 50. Pour chacune d'entre elles nous avons posés les landmarks à deux reprises à 1 mois d'intervalle. Puis nous avons mesuré le pourcentage de différence qu'il existait entre les deux par une MANOVA Procuste. Ce test donne une vue globale du pourcentage de différences lié à l'erreur de mesure.

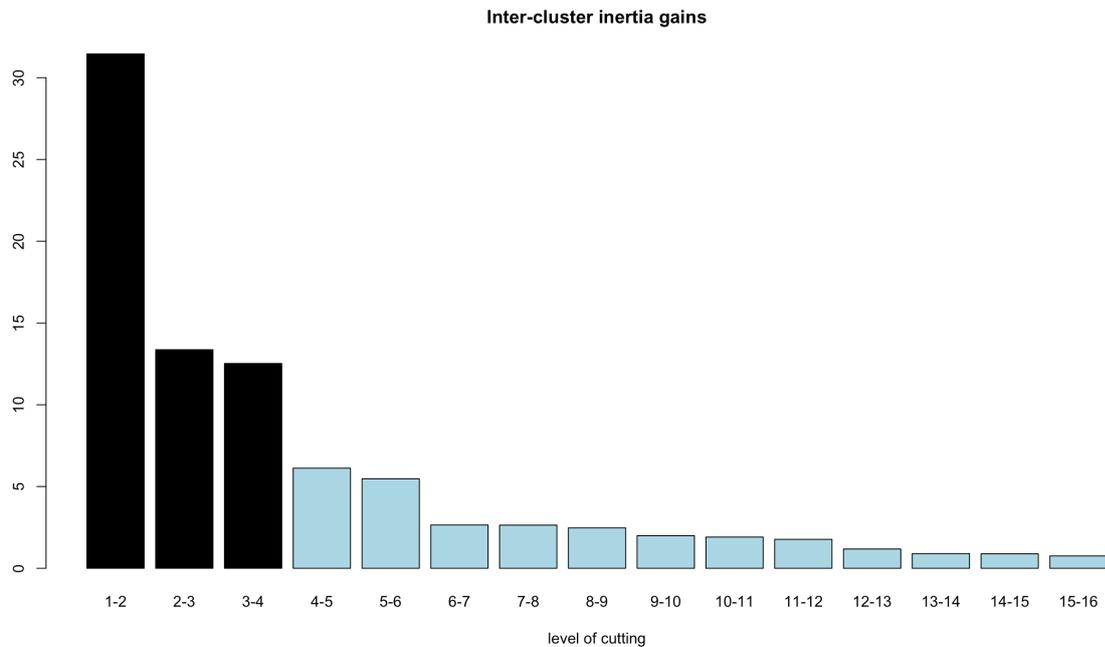
La figure 11 est une représentation graphique de la répétabilité. Chaque individu est représenté par deux points plus les points sont proches meilleurs est le taux de répétabilité. Dans notre étude ce pourcentage de différence lié à l'erreur de mesure est de 7,9%.



**Figure 11.** Représentation de répétabilité graphique le long de la composante principale 1 en fonction de la composante principale 2. Chaque individu est représenté par deux points entourés en noir plus les points sont proches meilleurs est le taux de répétabilité. Dans notre étude ce pourcentage de différence lié à l'erreur de mesure est de 7,9%.

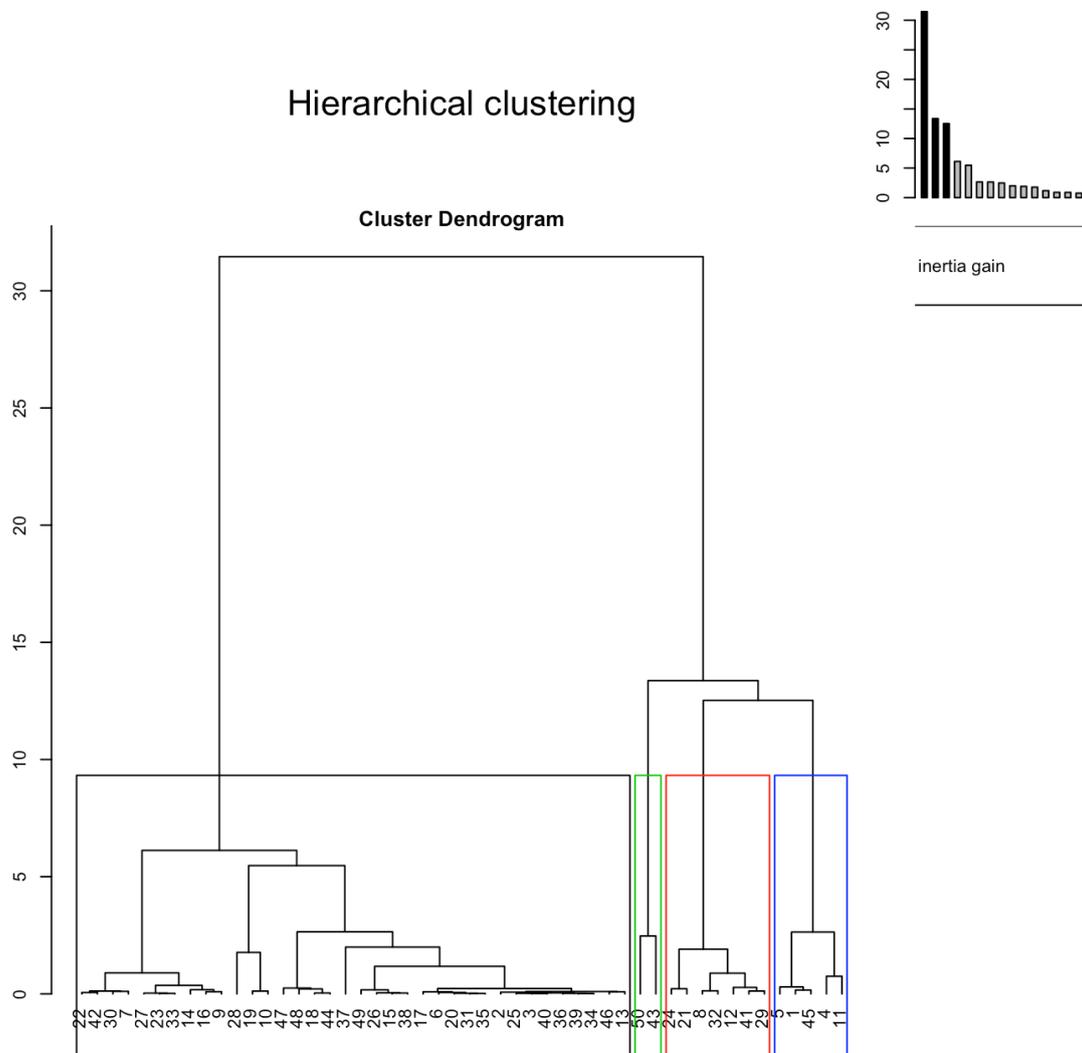
### 3.3. Partitionnement de la population : clusterisation

Le niveau de coupe a été déterminé par la méthode du coude illustrée par la figure 12. Celui-ci a été choisi de manière à faire en sorte que le maximum de variabilité soit représenté.



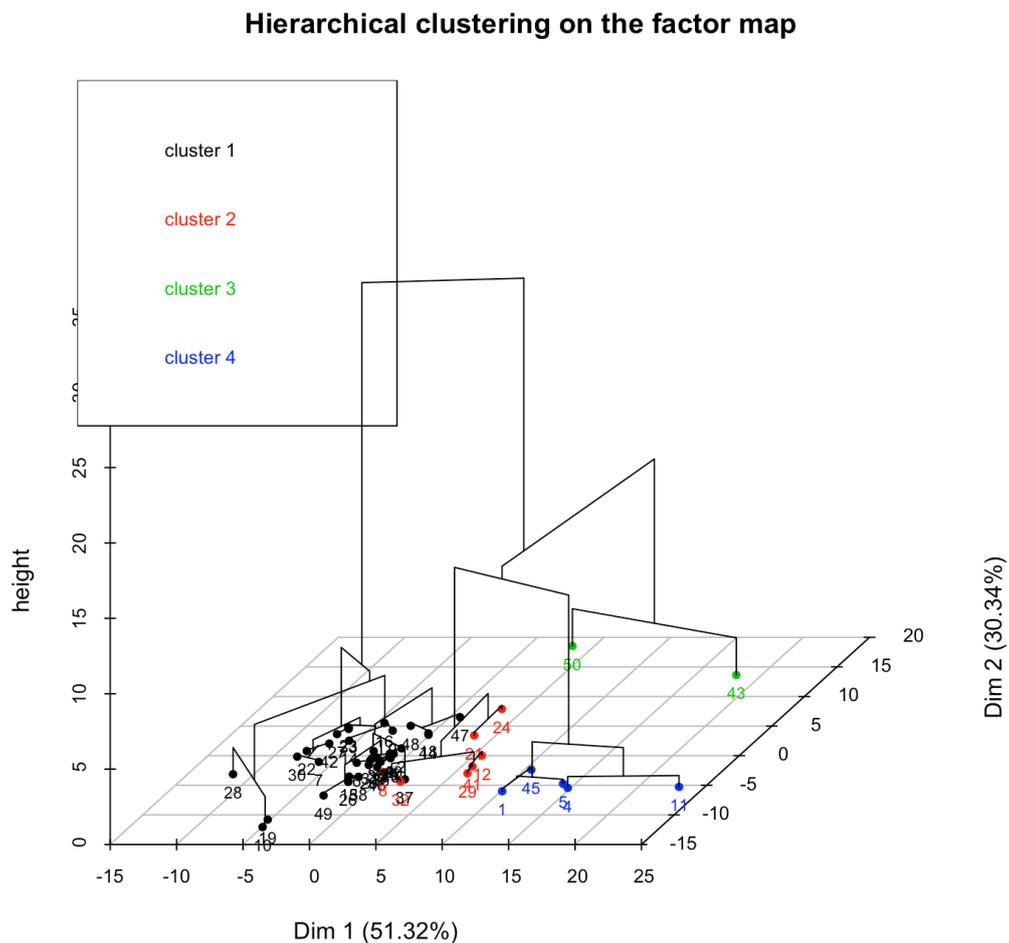
**Figure 12** : Histogramme illustrant la méthode du coude utilisée pour déterminer le niveau de coupe et donc le nombre de clusters de notre analyse. En noir les quatre premiers groupes contiennent le maximum d'inertie.

La figure 13 représente sous forme d'un arbre hiérarchique (dendrogramme) les liens existants entre les différents individus. Le niveau de coupes de sélection des clusters est matérialisé par les cadres de couleurs.



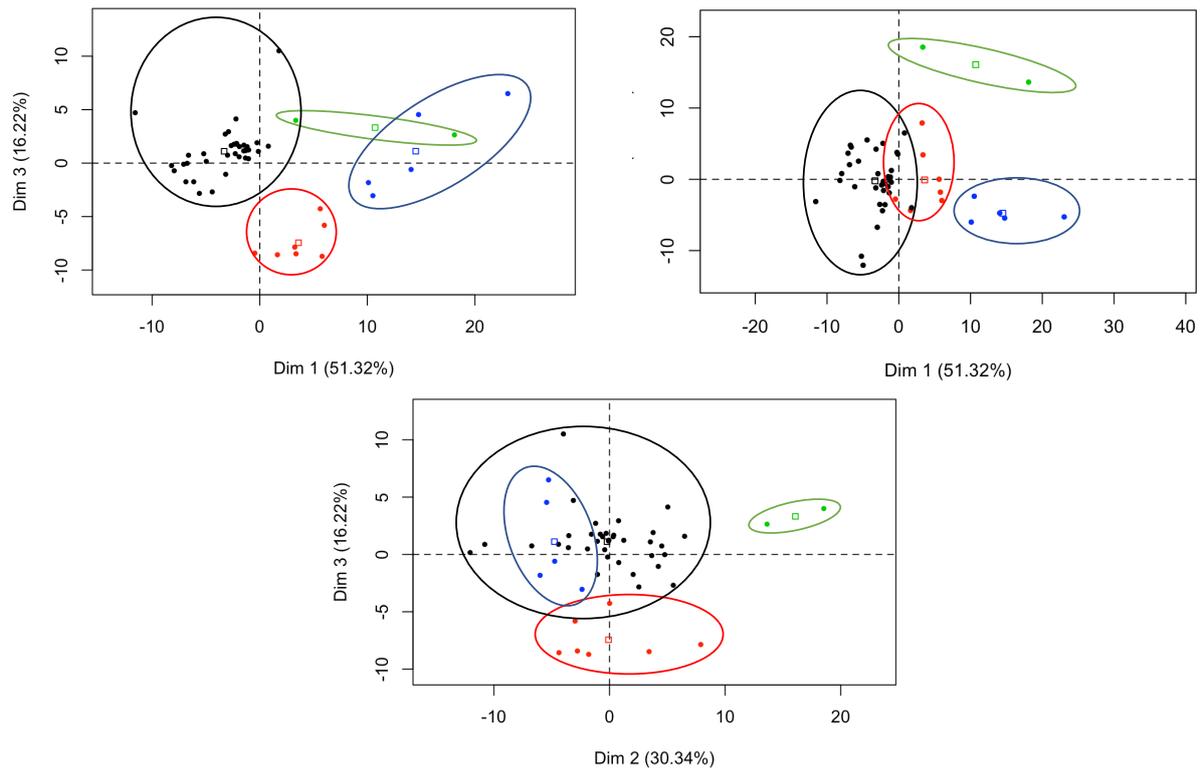
**Figure 13.** Arbre dendrogramme représentant les liens hiérarchiques entre chacun des individus du groupe pathologique

Dans notre étude nous avons ainsi pu identifier quatre groupes statistiquement différents (figure 14). Cette figure représente le dendrogramme en trois dimensions et la disposition des individus de notre analyse. Elle permet de visualiser de manière concrète la répartition des groupes ou « cluster » que nous avons identifié. Le groupe 1 est représenté en noir, le groupe 2 est représenté en rouge, le groupe 3 est représenté en vert, le groupe 4 est représenté en bleu.



**Figure 14.** Groupe pathologique : Dendrogramme en représentation 3D. Les clusters 1, 2, 3 et 4 sont représentés par des couleurs différentes en projections sur la composante principale numéro 1 en fonction de la composante numéro 2

La figure 15 représente la répartition des individus de chacun des quatre groupes selon différents axes de représentation : l'axe 3 en fonction de l'axe 1, l'axe 2 en fonction de l'axe 1, l'axe 3 en fonction de l'axe 2.



**Figure 15.** Groupe pathologique : Représentation des 4 groupes selon différents axes avec dans le sens des aiguilles d'une montre : l'axe 3 en fonction de l'axe 1, l'axe 2 en fonction de l'axe 1, l'axe 3 en fonction de l'axe 2.

Ceci permet de mettre en évidence la bonne différenciation inter-classe existante. Les sous-ensembles paraissant se chevaucher sont en fait bien différenciés lorsque qu'ils sont représentés selon un axe de dimension différent.

### 3.4. Corrélation des clusters avec les résistances rhinomanométriques

La présence de clusters assez compacts souligne la présence d'une différenciation intra-classe très faible témoignant de la bonne homogénéité au sein de chaque groupe.

- Le **cluster 1 (noir)** est constitué de 36 individus, la résistance moyenne c'est-à-dire la moyennes des résistances droite et gauche de chacun des individus du groupes était de : 3,01 sPa/mL
- Pour le **cluster 2 (rouge)** est constitué de 7 individus, la résistance moyenne était de : 1,23 sPa/mL
- Pour le **cluster 3 (vert)** est constitué de 2 individus, la résistance moyenne était de : 2,15 sPa/mL
- Pour le **cluster 4 (bleu)** est constitué de 5 individus, la résistance moyenne était de : 10,08 sPa/mL.

Afin de valider la signification rhinomanométrique de notre partitionnement nous avons comparé les résistances moyennes de l'ensemble des individus de chaque groupe aux résistances moyennes d'un groupe d'individus témoins ne se plaignant pas d'obstruction nasale et dont nous connaissions les valeurs de résistances.

Pour cela nous avons réalisé un test de Wilcoxon-Mann Whitney. Ce test est utilisé lorsqu'il faut décider si deux groupes indépendants sont issus de la même population. Les groupes peuvent avoir des nombres d'observations différents. L'hypothèse nulle est : la distribution des résistances moyennes est la même pour les deux groupes.

Nous avons testé cette hypothèse pour chacun de nos clusters par rapport aux groupes témoins.

- Pour le cluster 1 : p-value = 7.85E-7
- Pour le cluster 2 : p-value = 0.030
- Pour le cluster 3 : p-value = 0.029
- Pour le cluster 4 : p-value = 0.016

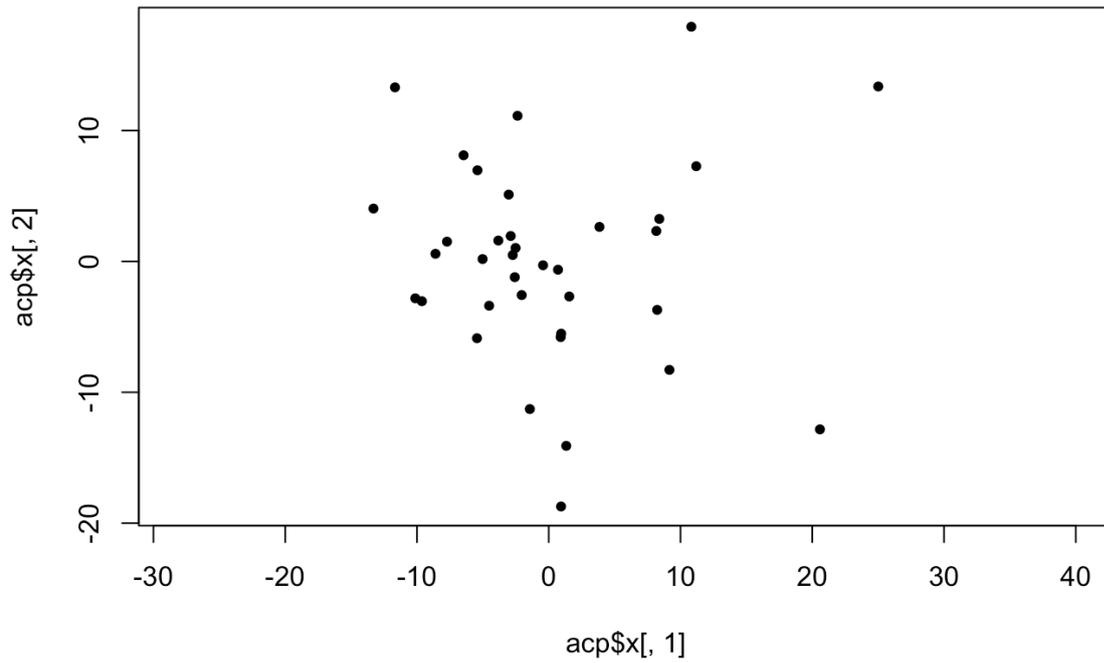
Ainsi pour chacun de nos clusters les différences de résistances moyennes constatées sont statistiquement significatives.

### 3.5. Analyse visuelle descriptive après analyse Procuste généralisée et analyse en composantes principales pour chacun des clusters

Au terme de la superposition Procuste, une conformation moyenne de l'ensemble des cloisons est calculée pour chacun des groupes de cluster par une analyse en composantes principales nous avons obtenu les coordonnées des minima et maxima de variation le long des 2 premières composantes principales. Pour les modifications observées le long des composantes principales nous présentons successivement le consensus puis le minimum et le maximum de la première composante pour chacun des clusters que nous décrivons sur leur vue de face, latérales et supérieures.

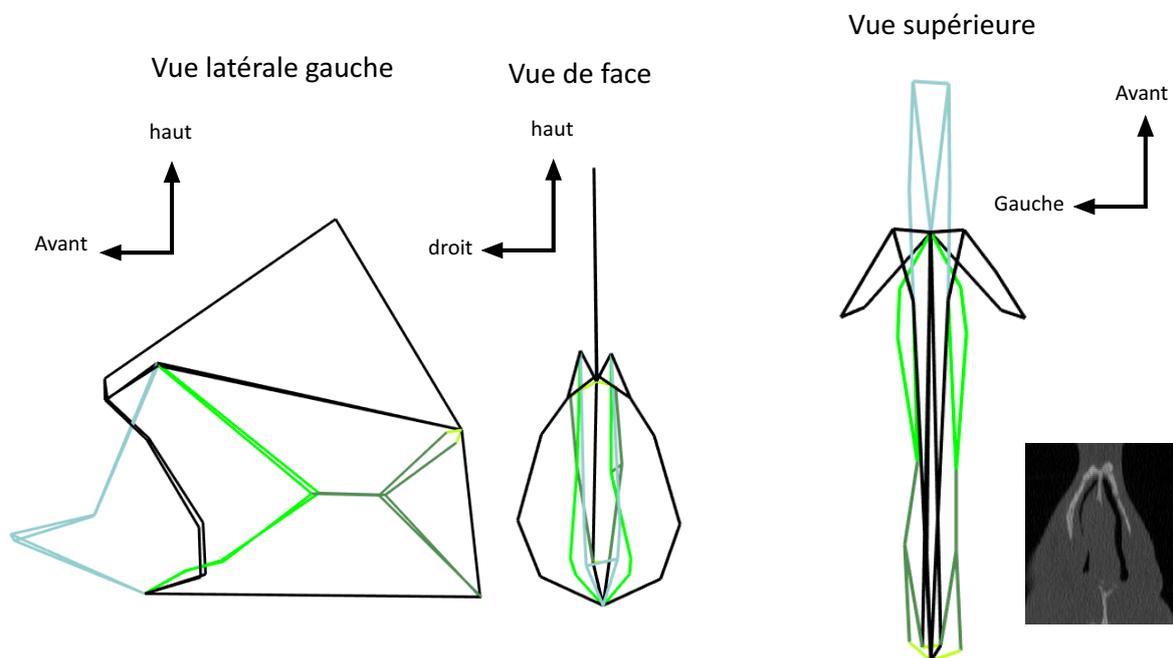
### 3.5.1. Cluster 1

Au sein du cluster 1, la composante principale numéro 1 représente 13% de la variabilité (figure 16).



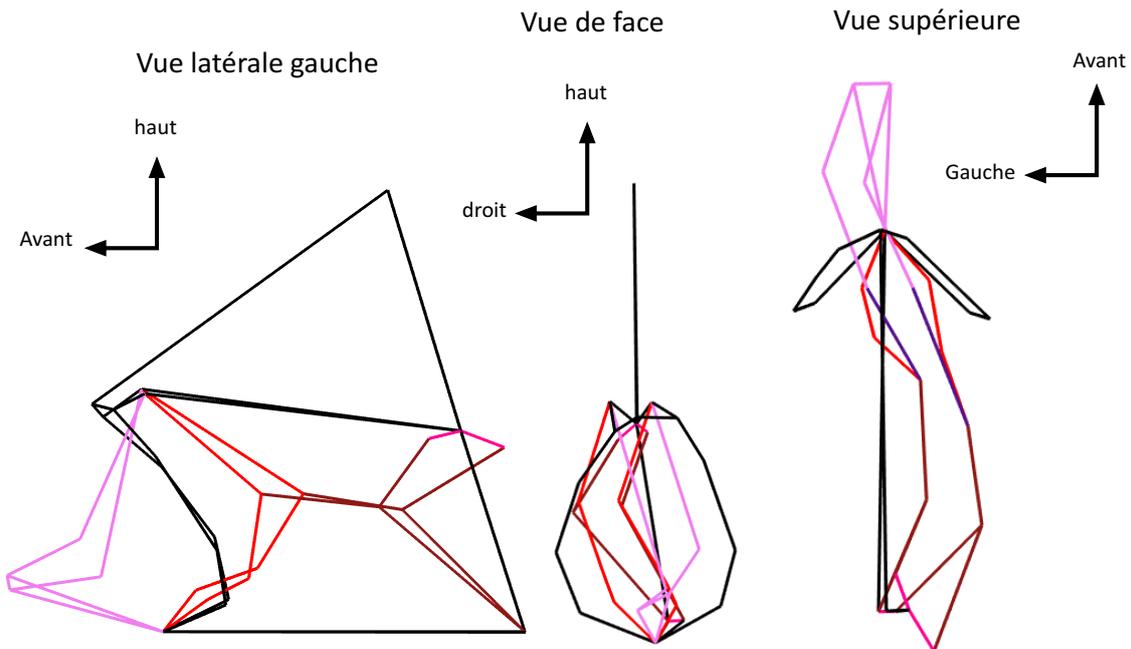
**Figure 16.** Représentation graphique de la variabilité des individus du cluster 1 le long de la composante principale 1 en fonction de la composante principale 2

L'individu consensus du cluster 1 présente une partie antérieure cartilagineuse relativement droite. Il présente par contre la particularité d'avoir un pied de cloison épais de manière symétrique entre le côté droit et le côté gauche. A la partie postérieure le rail septal est plus proéminent à gauche (figure 17).



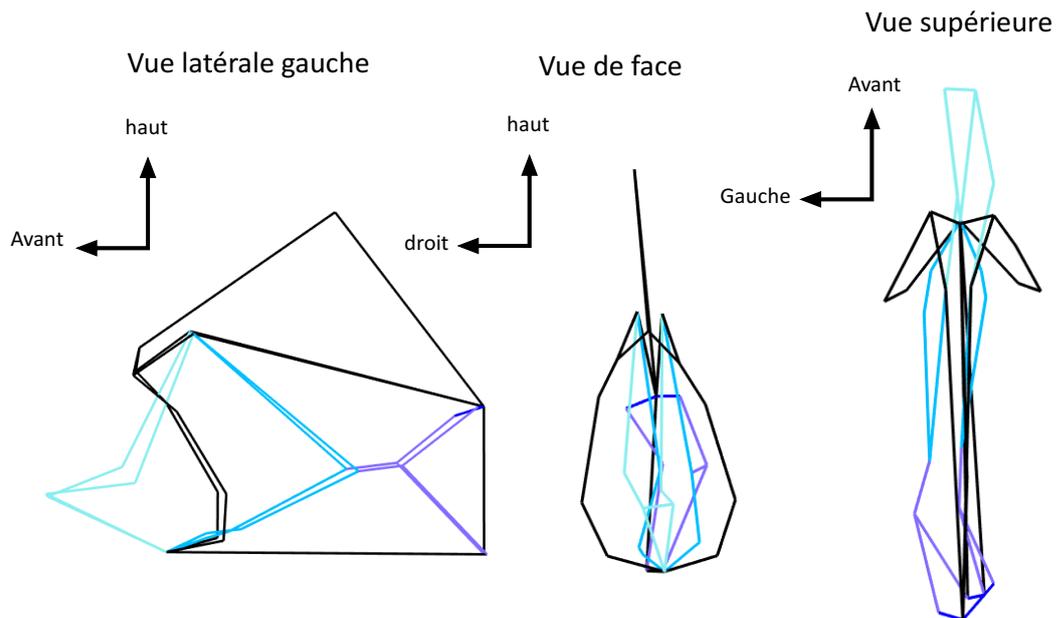
**Figure 17.** Représentation de l'individu consensus du cluster 1 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En bleu turquoise : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En vert vif : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En vert foncé : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

L'individu représentant le maximum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente une déformation en « Z » assez marquée en vue de dessus avec un pied de cloison épais (figure 18).



**Figure 18.** Individu représentant le maximum de PC1 pour le cluster 1 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En rose : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

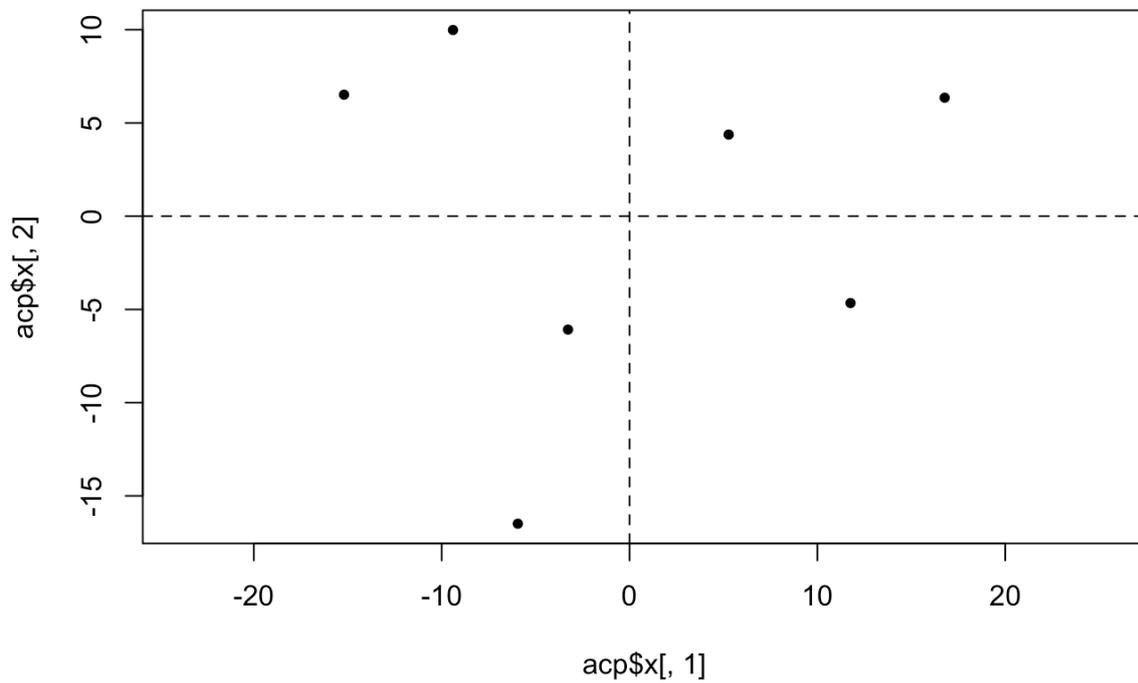
L'individu représentant le minimum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente également une déformation en « Z » mais cette fois ci inversée par rapport au maximum de PC1. Le pied de cloison est également épais (figure 19).



**Figure 19.** Individu représentant le minimum de PC1 pour le cluster 1 en vue latérale gauche, de face et en vue supérieure. En bleu clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En bleu : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En violet : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

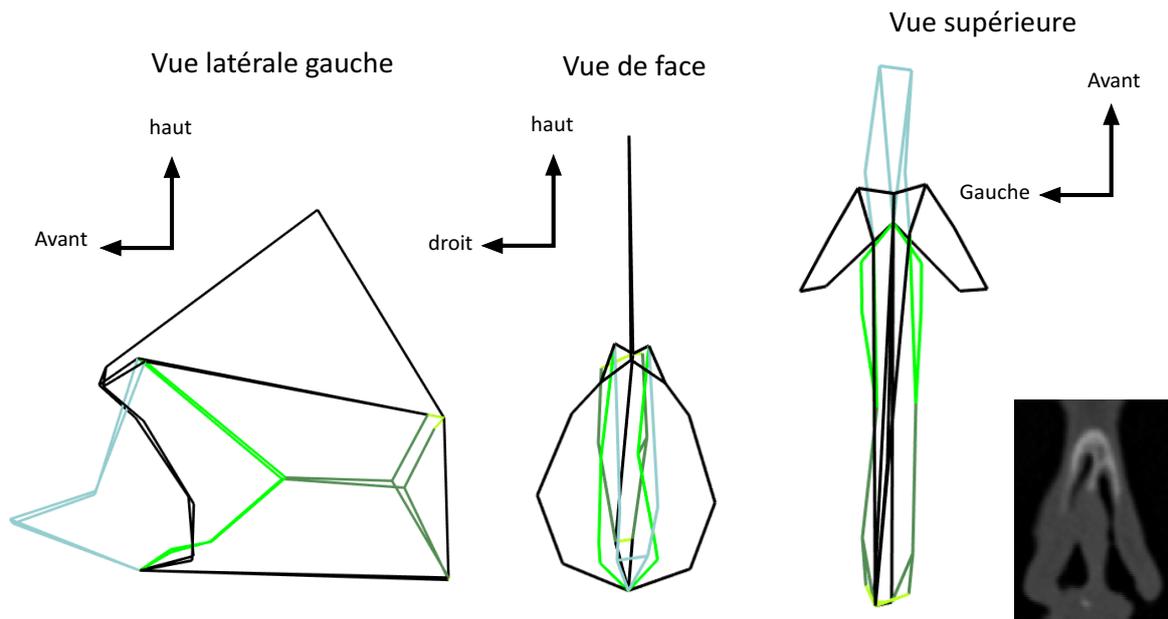
### 3.5.2. Cluster 2

Au sein du cluster 2, la composante principale numéro 1 représente 28 % de la variance (figure 20).



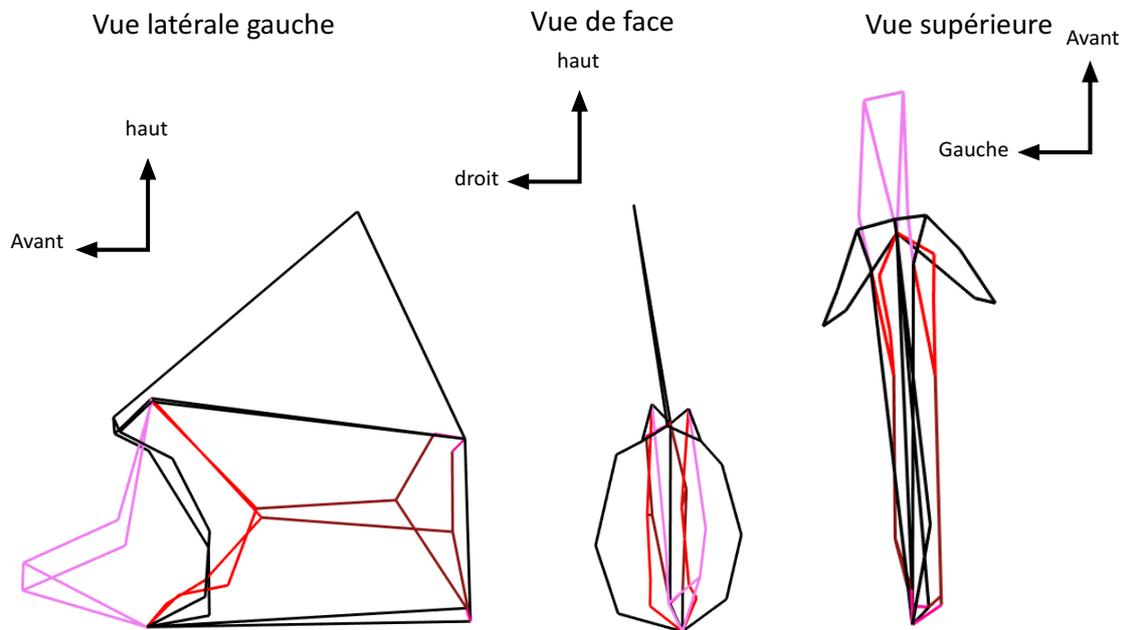
**Figure 20.** Représentation graphique de la variabilité des individus du cluster 2 le long de la composante principale 1 en fonction de la composante principale 2

L'individu consensus du cluster 2 présente une déformation en verre de montre antérieure du cartilage septal quadrangulaire avec une convexité vers la gauche. Le pied de cloison est également épais. La partie postérieure de la cloison est déviée vers la droite (figure 21).



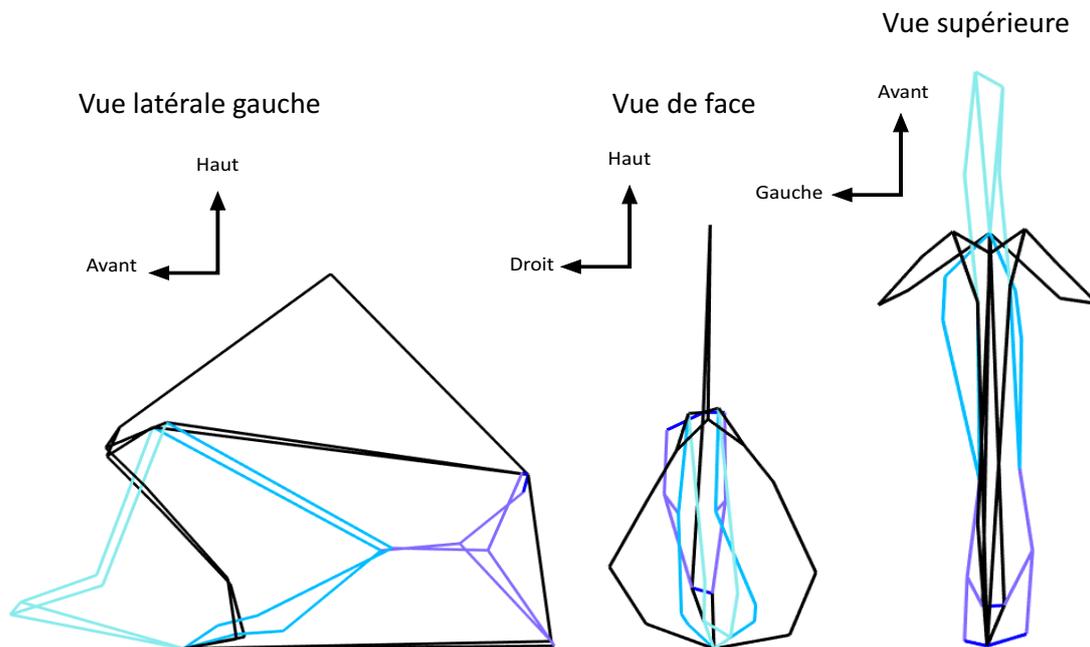
**Figure 21.** Représentation de l'individu consensus du cluster 2 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En bleu turquoise : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En vert vif : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En vert foncé : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

L'individu représentant le maximum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente une déformation en verre de montre antérieure avec convexité vers la gauche. La partie antérieure du septum est particulièrement épaisse (figure 22).



**Figure 22.** Individu représentant le maximum de PC1 pour le cluster 2 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En rose : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

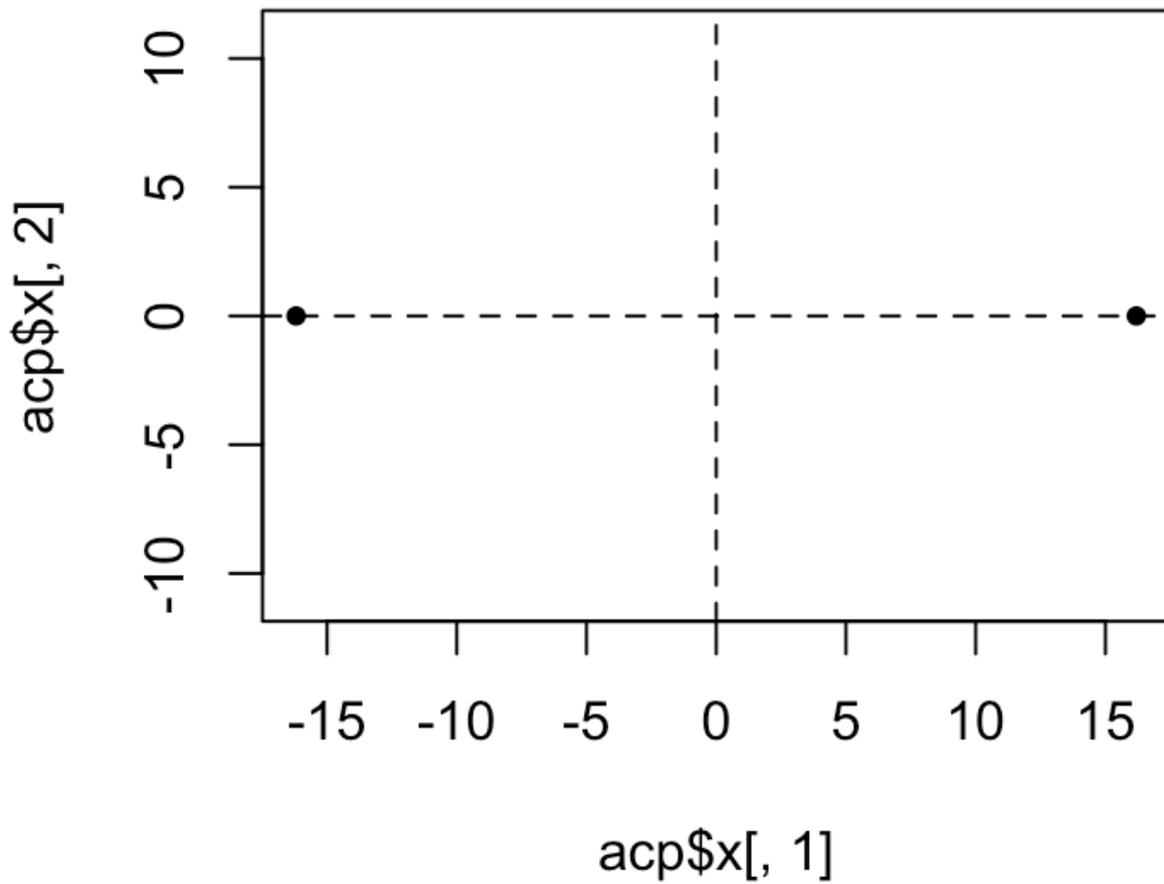
L'individu représentant le minimum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente une déformation en « Z » antérieure associée à un pied de cloison épais et un rail septal proéminent saillant vers la gauche (figure 23).



**Figure 23.** Individu représentant le minimum de PC1 pour le cluster 2 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En bleu clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En bleu : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En violet : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli

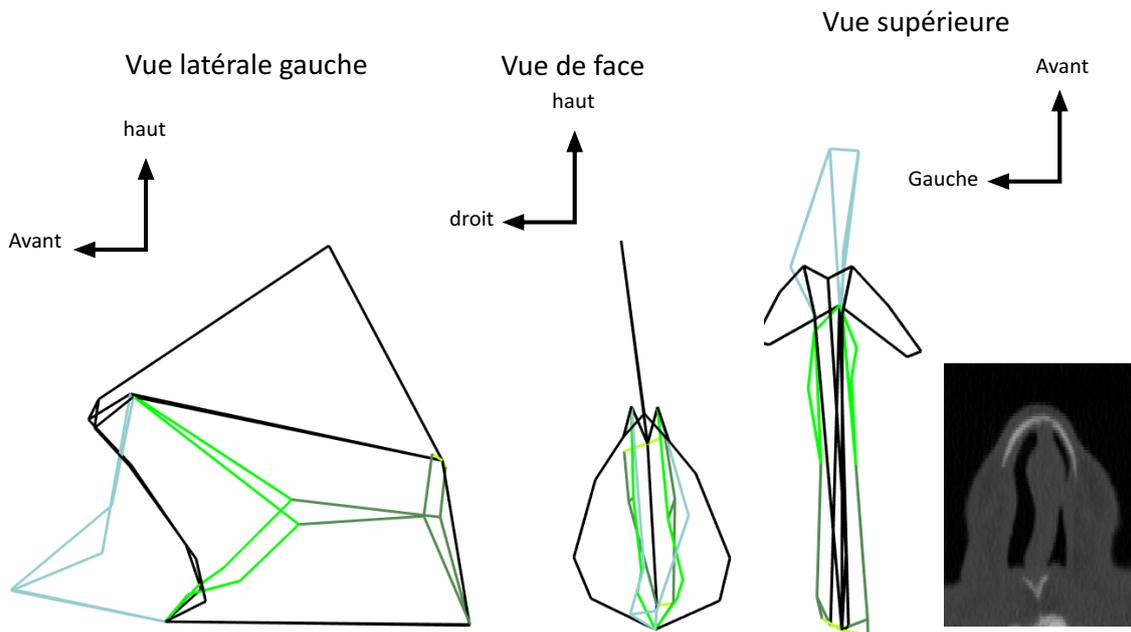
### 3.5.3. Cluster 3

Au sein du cluster 3, la composante principale numéro 1 représente 100% de la variance (figure 24).



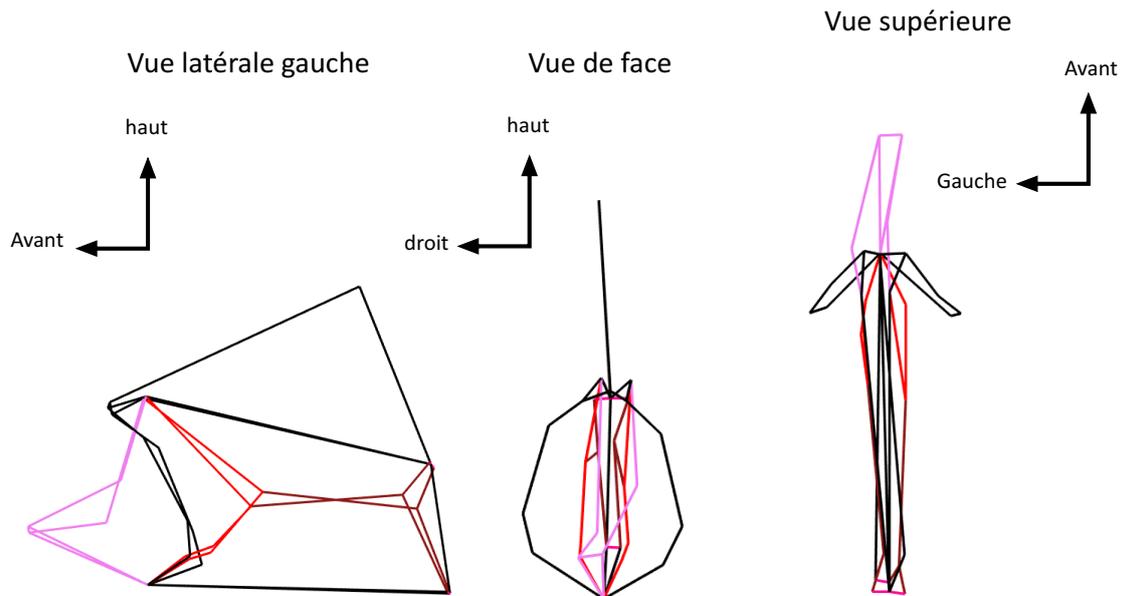
**Figure 24.** Représentation graphique de la variabilité des individus du cluster 3 le long de la composante principale 1 en fonction de la composante principale 2

L'individu consensus du cluster 3 présente une partie antérieure du septum très épaisse avec une déformation très prononcée en verre de montre à convexité orienté vers la gauche. Le pied de cloison est large. La partie postérieure de la cloison est relativement droite (figure 25).



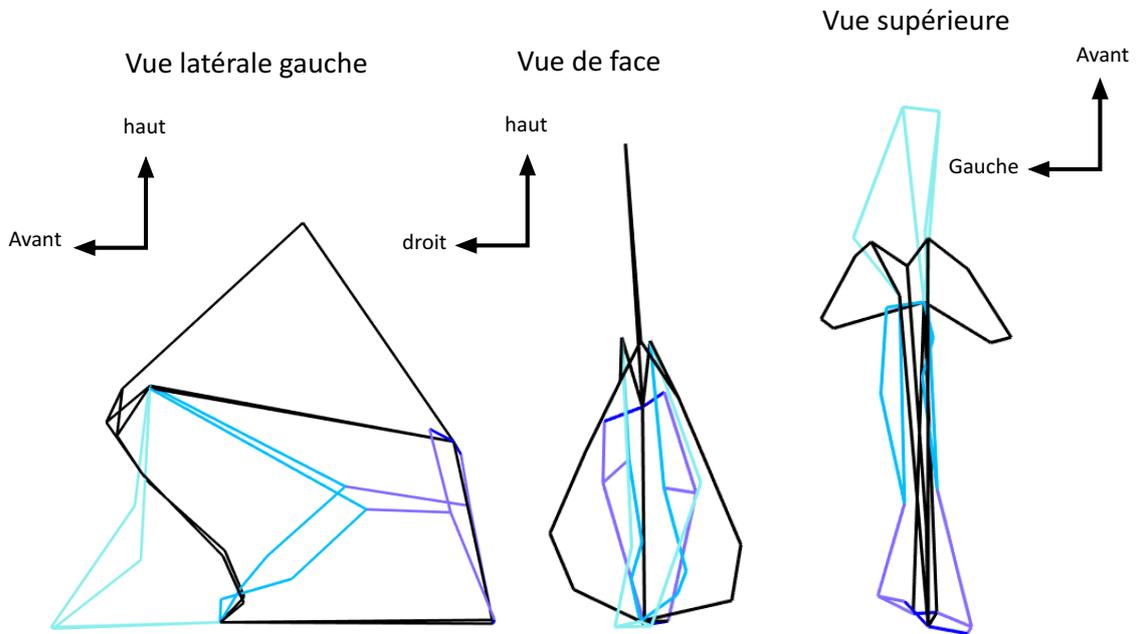
**Figure 25.** Représentation de l'individu consensus du cluster 3 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En bleu turquoise : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En vert vif : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En vert foncé : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

L'individu représentant le maximum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente une déformation en verre de montre antérieure assez marquée avec convexité vers la gauche (figure 26).



**Figure 26.** Individu représentant le maximum de PC1 pour le cluster 3 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En rose : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

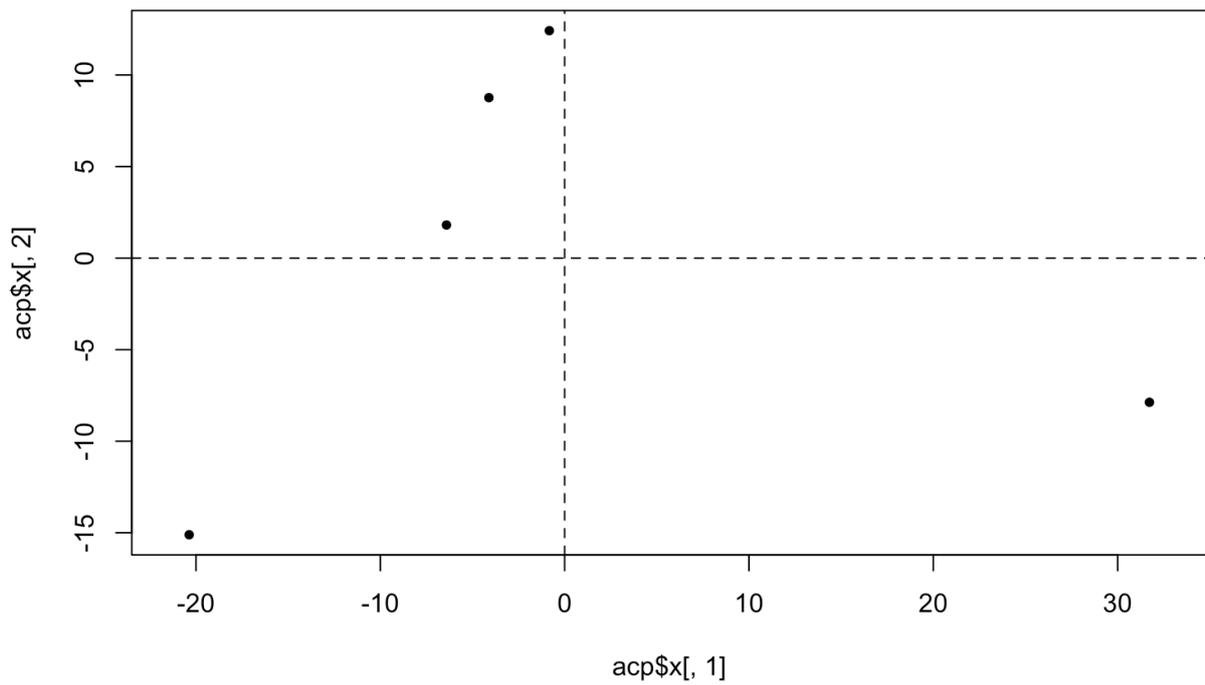
L'individu représentant le minimum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente une déformation en verre de montre antérieure avec une déviation importante vers la droite. La partie postérieure du septum est épaisse (figure 27).



**Figure 27.** Individu représentant le minimum de PC1 pour le cluster 3 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En bleu clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En bleu : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En violet : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

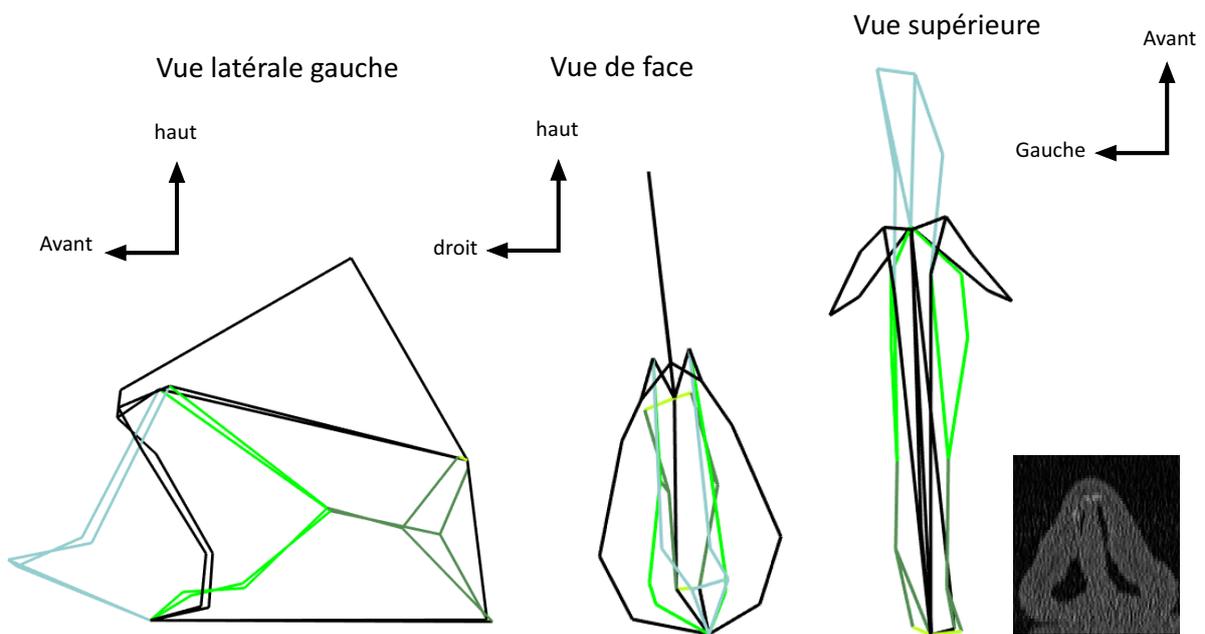
### 3.5.4. Cluster 4

Au sein du cluster 4, la composante principale numéro 1 représente 52% de la variance totale (figure 28).



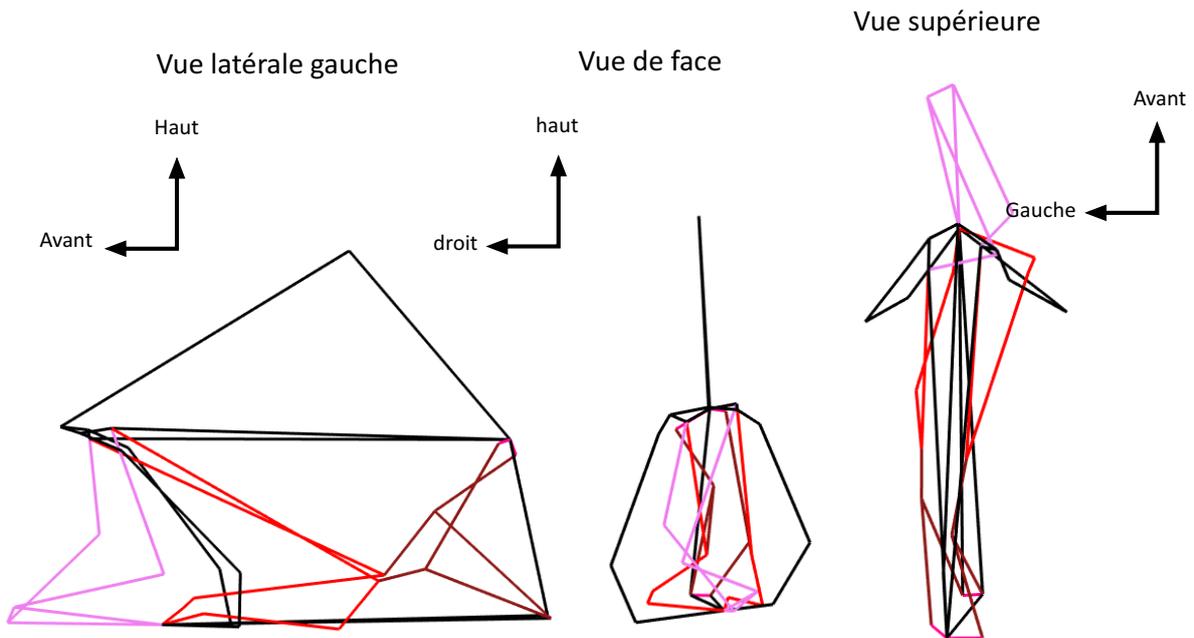
**Figure 28.** Représentation graphique de la variabilité des individus du cluster 4 le long de la composante principale 1 en fonction de la composante principale 2

L'individu consensus du cluster 4 présente une partie antérieure du septum très épaisse également avec une déformation en verre de montre à convexité orienté vers la droite. Le pied de cloison est très élargi avec un développement important vers la droite. La partie postérieure de la cloison est relativement droite (figure 29).



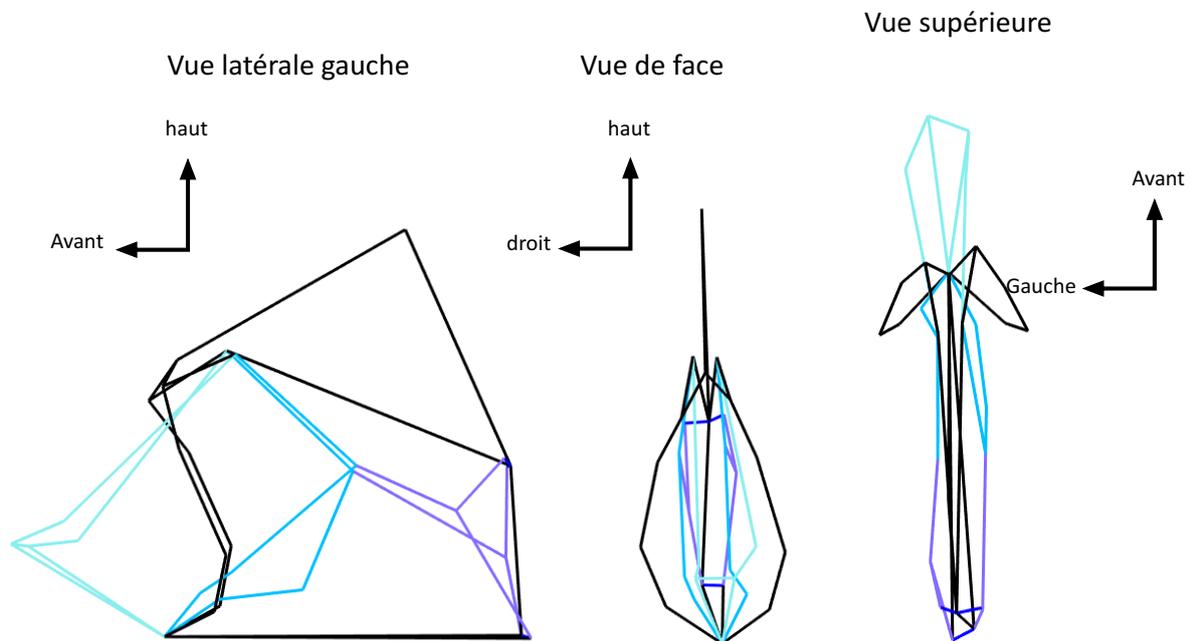
**Figure 29.** Représentation de l'individu consensus du cluster 4 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En bleu turquoise : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En vert vif : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En vert foncé : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

L'individu représentant le maximum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente plusieurs déformations de grandes importances. Une déviation marquée en verre de montre antérieur vers la droite. Un pied de cloison saillant vers la droite déformation en verre de montre antérieur assez marquée avec convexité vers la gauche (figure 30).



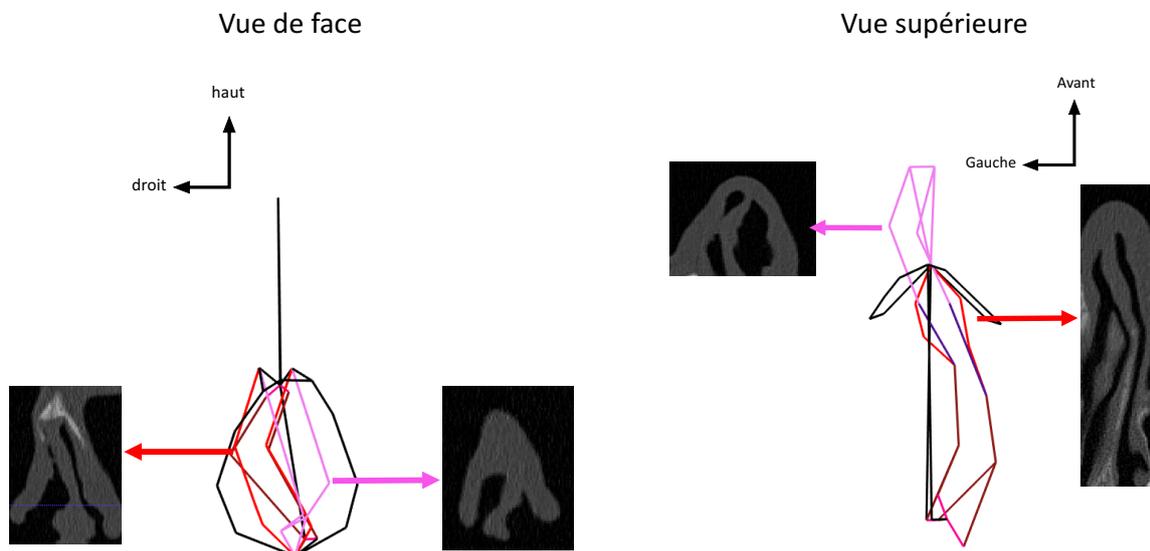
**Figure 30.** Individu représentant le maximum de PC1 pour le cluster 4 en vue latérale gauche, de face et supérieure. En rose : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

L'individu représentant le minimum de variabilité le long de la composante principale numéro 1 présente une cloison antérieure épaisse et dévié vers la droite et un rail septal dévié vers la gauche (figure 31).

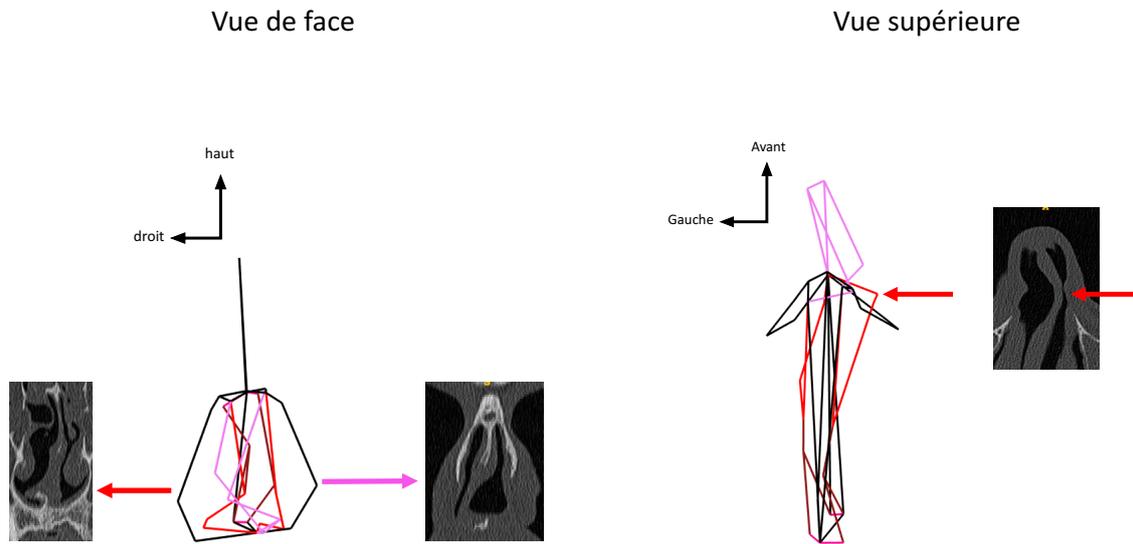


**Figure 31.** Individu représentant le minimum de PC1 pour le cluster 4 en vue latérale gauche, de face et en vue supérieure. En bleu clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En bleu : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En violet : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de l'orifice piriforme, la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la crista galli.

Il apparait ainsi que les clusters à résistance extrême et à très forte résistance, les clusters 1 et 4 sont ceux chez lesquelles nous retrouvons les amplitudes de déviations du septum sont les plus fortes. Pour ces deux clusters, les cloisons nasales des individus représentant le maximum de variation pour la composante principale numéro 1, présentent des déformations majeures (figure 32 et 33).



**Figure 32** : Cluster 1 : visualisation de l'individu représentant le maximum de variation pour la composante principale numéro 1. En rose, cartilage quadrangulaire. En rouge, partie antérieure du septum osseux. En marron, septum postérieur.



**Figure 33** : Cluster 4 : visualisation de l'individu représentant le maximum de variation pour la composante principale numéro 1. En rose, cartilage quadrangulaire. En rouge, partie antérieure du septum osseux. En marron, septum postérieur.

Les clusters à résistances faibles, les clusters 2 et 3 comportent des septums dont les déformations sont présentes mais de moindre amplitude qu'au sein de cluster à forte résistances et résistance extrême.

### 3.6. Synthèse

Au terme de notre analyse, nous pouvons établir une classification des déviations septales de notre étude en quatre types.

Le cluster 1 à forte résistances se caractérise par un septum présentant sur le plan axial une déformation en « Z » de forte amplitude et sur le plan axial une déformation en verre de montre antérieure et un rail septal postérieur dévié dans le sens inverse.

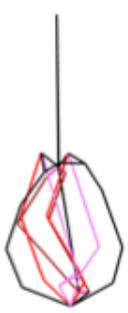
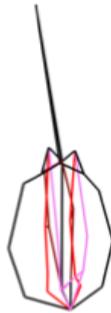
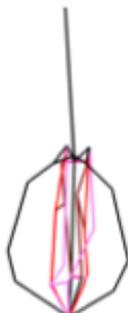
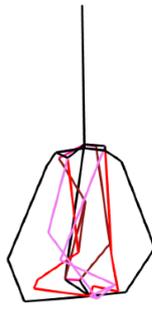
Le cluster 2 à résistances faibles se caractérise par des septums présentant les mêmes déformations que le cluster 1 mais moins marquées.

Le cluster 4 à résistances élevées se caractérise par un septum antérieur très dévié en verre de montre antérieur avec un pied de cloison épais et luxé.

Le cluster 3 à résistances modérées est constitué de septums présentant les mêmes caractéristiques morphologiques que les septums du cluster 4 mais moins prononcées.

Le tableau 3 résume ces observations. Il apparaît ainsi qu'il existerait deux types de déformations du septum nasale, la déformation en « Z » avec inversion de courbure antéro postérieure (cluster 1) et la déformation associant le verre de montre antérieure au pied de cloison (cluster 4). Ces deux types de déformations sont soit de faibles amplitude (cluster 2 et 3) ou de forte amplitude (cluster 1 et 3).

Tableau 3 : Classifications des déformations septales de notre étude

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Axial	Déformation en « Z » marquée	Déformation en « Z » modéré	Déformation en verre de montre modérée	Verre de montre antérieur
Vue axiale				
Frontal	Verre de montre avec rail septal postérieur dans le sens inverse	Verre de montre avec rail septal postérieur dans le sens inverse. Amplitude faible	Pied de cloison épais	Pied de cloison épais et luxé
Vue frontale				
Résistances Moyennes	Fortes R = 3,01 sPa/mL	Faibles R = 1,23 sPa/mL	Modérées R = 2,15 sPa/mL	Très élevées R = 10,08 sPa/mL.

## 4. Discussion

Notre objectif était d'étudier par la morphométrie géométrique les variations morphologiques pathologiques du septum nasal en les mettant en rapport avec le degré d'obstruction nasale. La morphométrie géométrique est une méthode d'étude et d'analyse de la forme d'une structure, qu'elle soit d'origine biologique ou non. C'est un outil statistique de biologie comparative permettant de comparer la forme de différents spécimens. Elle a tout d'abord été développée pour des applications en anthropologie et en paléo anthropologie pour comparer des crânes de différentes espèces, et ainsi tenter d'identifier les liens de parenté qui les unissent. Elle a ensuite été appliquée dans divers domaines de la biologie développementale et de la médecine pour étudier les variations de forme d'un organisme, ou d'une partie de celui-ci, entre différents spécimens.

Elle s'oppose à la morphométrie « traditionnelle », qui se base sur la comparaison de distances linéaires et d'angles entre des points homologues de différents objets. La morphométrie « traditionnelle » présente de nombreux inconvénients. Ils sont liés aux mesures des distances linéaires. Tout d'abord, les distances mesurées sont fortement corrélées à la taille des individus, elles nécessitent une correction. L'utilisation de rapports de distances (indices) permet de « gommer » la différence d'échelles entre deux objets, mais entraînera nécessairement des imprécisions importantes. De plus, deux objets de formes complètement différentes, peuvent présenter des distances linéaires ou des indices identiques (hauteur, largeur...). Du fait de ces inconvénients, les relations géométriques entre les variables ne sont pas conservées, ce qui rend impossible la représentation graphique de la forme de l'objet. La morphométrie « traditionnelle » ne permet donc pas de conserver les informations de forme d'un objet, c'est-à-dire sa conformation.

Les septums de notre étude ont été reconstruits en 3 dimensions à partir de leur imagerie scanner pré-opératoire. Plusieurs problèmes ont été rencontrés au cours de ce processus de segmentation.

1. Présence d'artefacts dentaires : les images deviennent floues dans certaines régions.

2. Epaisseur des coupes trop importantes : des coupes d'épaisseur supérieure à 1mm sont responsables d'un bruitage de l'image et d'une moindre précision anatomique.

3. Choix du seuil de segmentation : si le seuil choisi est trop bas ou quand l'organe est représenté dans une large plage de niveaux de gris, la segmentation peut alors englober des régions d'organes voisins dont les valeurs sont dans la plage du seuillage, ou à l'inverse si le seuil est trop haut, la segmentation va supprimer des zones de septum. Une bonne connaissance de l'anatomie est nécessaire pour valider le choix du seuil de segmentation afin de reconstruire une géométrie 3D aussi proche que possible de la réalité anatomique.

4. Choix de smoothness et de l'expansion du contour actif : deux paramètres régulent le comportement de l'expansion du contour actif, le paramètre de rugosité et celui de pression. Une analogie peut être faite avec le gonflement d'un ballon. Le paramètre de rugosité permet de régler la façon dont le contour va épouser plus ou moins les formes. Le paramètre de pression agit sur la capacité du contour actif à pénétrer les zones étroites. Dans notre cas, le paramètre d'expansion a été réglé au maximum pour permettre au contour actif de passer les régions anatomiques étroites (2).

Notre travail constitue la première étude analysant les différents types de déformations de la cloison nasale en utilisant la morphométrie géométrique. Il s'agit d'une étude monocentrique,

menée sur une population de 50 individus opérés de septoplastie ou de rhino-septoplastie. Elle fait suite à un précédent travail de mémoire de recherche de master 2 réalisé sur une population tout venant de 91 individus. Celui-ci avait permis de valider des points repères situés directement sur la muqueuse en les comparant aux landmarks de type I du septum osseux. Elle a permis de démontrer que l'utilisation de points repères de la muqueuse septale pouvait être utilisée pour décrire la morphologie de la cloison nasale. Dans la littérature une étude publiée en 2017 avait fait appel à la morphométrie géométrique afin d'étudier les interactions entre le septum nasale et le squelette du massif facial chez l'homme pendant la croissance. Mais il s'agissait d'une population pédiatrique de 7 à 18 ans et les points repères utilisés étaient situés en périphérie du septum et non sur les zones les plus déviées du septum (38). Dans notre étude nous avons défini et utilisé des landmarks muqueux supplémentaires situés notamment au niveau de la partie antérieure cartilagineuse du septum. Nous avons validé ceux-ci en réalisant une étude de leurs répétabilités. Celle-ci a été déterminée par MANOVA Procuste, ce test donne une vue globale du pourcentage de différence. Il ne nous permet pas d'identifier spécifiquement quel sont les landmarks les moins précis. Nous avons choisi de placer ces points repères afin qu'ils puissent refléter de manière spécifique les zones les plus déviées du septum : le verre de montre antérieure, le pied de cloison et le rail septal postérieure. Ce sont des landmarks de type II situés au niveau de maxima de courbure. Ils sont par définitions moins précis que les landmarks de types I, mais notre taux de répétabilité estimé à 7,9%, relativement faible nous permet de justifier d'une bonne fiabilité dans les descriptions morphologiques réalisées. Ceci nous autorise à affirmer que les constatations que nous avons pu observer ne sont pas liées à une erreur ou à une approximation au moment de la pose des points repère sur le septum. Une étude de la reproductibilité de ces landmarks aurait pu permettre d'étayer cette précision. Celle-ci aurait consisté en une détermination du

pourcentage de différence par une MANOVA Procuste entre les coordonnées de ces landmarks placées par deux personnes différentes.

Nous avons regroupé ensuite les septums de notre population dont les caractéristiques morphologiques étaient les plus similaires. Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner une population en différentes classes ou sous-groupes. La classification ascendante hiérarchique (CAH) ou clusterisation est l'une d'entre elles. Le principe de la CAH est de rassembler des individus selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice de distances, exprimant la distance existante entre chaque individu pris deux à deux. Deux observations identiques auront une distance nulle. Plus les deux observations seront dissemblables, plus la distance sera importante. La CAH va ensuite rassembler les individus de manière itérative afin de produire un dendrogramme ou arbre de classification. La classification est ascendante car elle part des observations individuelles ; elle est hiérarchique car elle produit des classes ou groupes de plus en plus vastes, incluant des sous-groupes en leur sein. En découpant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on produira la partition désirée. On cherche à ce que les individus regroupés au sein d'une même classe (homogénéité intra-classe) soient le plus semblables possibles tandis que les classes soient le plus dissemblables (hétérogénéité inter-classe). Par défaut, l'arbre est affiché à l'écran et l'arbre sera coupé selon la partition ayant la plus grande perte relative d'inertie. Elle a été effectuée à l'aide de la fonction HCPC sur R studio® à partir des coordonnées de chaque point repère décrivant chacun des septums de notre étude. Cette fonction combine les facteurs principaux, la classification hiérarchique et le partitionnement pour mieux visualiser et mettre l'accent sur les similarités entre individus. HCPC réalise à la fois le calcul de la matrice des distances, du dendrogramme et le partitionnement de la population en classes.

Au terme de cette analyse nous avons pu mettre en évidence quatre clusters de patients. Il s'agissait des septums dont les caractéristiques morphologiques étaient les plus proches. Dans la littérature, de nombreuses études ont décrit et établies une classification des déviations septales. L'une des première fut publiée par Cottle en 1958, elle classait les déviations septales en 1958 en quatre groupes différents, «subluxation», «éperon», «déflexion caudale», «tension septale» (subluxation, large spurs, caudal deflection and tension septum) (23). La classification de Mladina, entre autres, est basée uniquement sur les constatations cliniques de l'examen rhinoscopique antérieur. Elle distingue 7 types de déformations septales (39). Guyuron a proposé en 1999 une autre classification des variations septales basée sur 6 différentes formes : « Tilt » ou inclinaison, « anteroposterieure C » (septum en forme de C dans le plan antéro postérieure ), « cephalocaudal C » (septum en forme de C dans le plan céphalo caudal ), « anteroposterieur S » (septum en forme de S dans le plan antéro postérieure ), « cephalocaudal S » ( septum en forme de S dans le plan céphalo caudal), « wide spurs » (éperon septal large) (22). Baumann a établi une classification basée sur les constatations subjectives de l'endoscopie per opératoire (40). Une étude publiée en 2012 a montré qu'au sein d'une population opérée de septoplastie, le taux de concordance avec le scanner était de 71,9% pour la classification de Guyuron et de 50% pour la classification de Mladina. Ces taux de corrélation même s'ils sont relativement importants ne sont pas proches de 100% et ne peuvent donc pas être considérées comme suffisant pour faire intervenir ces éléments de classification dans la décision chirurgicale.

Toutes ces études étaient basées sur les constatations visuelles subjectives de l'examen clinique ou endoscopique. D'autres études plus récentes ont établi leurs observations sur les données de l'imagerie tomodensitométrie. En 2003, Buyukertan avait étudié la morphologie de la cloison nasale en divisant celle-ci en 10 segments afin de mieux caractériser

et localiser les déformations. D'autres auteurs ont également, à partir de scanners, déterminé les niveau de déviation et les zone de « stress » du septum (41). Aucun de ces travaux n'a fait appel à la morphométrie géométrique pour décrire les déformations septales.

Une revue systématique de la littérature publiée en 2016 a établi que la majorité des systèmes de classification des déviations septales décrivaient : la déformation en verre de montre antérieure (C-shaped), le verre de montre inversé (reverse C-shaped ), la déformation en « Z » (S-shaped ) ou le « Z » inversé (6). Ce sont ces descriptions que nous avons utilisées afin de caractériser les formes des septums de notre étude.

Toutes ces études étaient basées sur des descriptions cliniques visuelles sur sujet vivant ou sur sujet anatomique ou à partir d'analyse d'examen d'imageries scanners. Mais aucune n'a à ce jour utilisé cette méthode statistique de regroupement des déviations septales. Cette technique offre l'avantage de pouvoir être utilisée à grande échelle sur grand nombre d'individus.

Ce travail a permis d'établir un lien entre la morphologie, l'anatomie et la fonction ventilatoire nasale. Une étude publiée en décembre 2016 avait affirmé qu'il n'existait pas de lien entre le type de déviation septale et le degrés d'obstruction nasale (42). Mais elle se basait sur une échelle visuelle analogique subjective d'évaluation de la sensation d'obstruction nasale. Notre travail s'est appuyé sur les données objectives de la rhinomanométrie à l'aide desquelles nous avons déterminé la signification fonctionnelle de notre classification en « cluster » (43). Nous avons comparé les résistances moyennes des individus de chaque cluster aux résistances moyennes d'un groupe témoin. Ce groupe témoin est issu d'une population adulte ne se plaignant pas d'obstruction nasale. La population témoin et la population pathologique avaient un sexe ratio différent mais nous il n'y avait pas de différences entre les deux groupes

au niveau de leur âge. Nous avons pu démontrer ainsi par la réalisation d'un test statistique que les différences de résistances étaient statistiquement significatives par rapport à notre groupe témoin. Notre partitionnement en cluster possède donc une traduction fonctionnelle. Notre classification est pertinente sur le plan clinique. Notre analyse s'est basée sur les valeurs résistances moyennes, celle-ci étaient les plus pertinentes pour caractériser de manières spécifiques chacun de nos clusters. Nous pouvions ainsi mettre en évidence l'existence d'un groupe à résistance très forte : le cluster 4 ( $R_{moyenne} = 10,08$  sPa/mL), un groupe à forte résistance : le cluster 1 ( $R_{moyenne} = 3,01$  sPa/mL), un groupe de résistances modérément élevées : le cluster 3 ( $R_{moyenne} = 2,15$  sPa/mL), un groupe à résistances faibles : le cluster 2, ( $R_{moyenne} = 1,23$  sPa/mL),

Les effectifs de nos clusters sont cependant inégaux, avec un cluster 1 majoritaire avec 36 individus et un cluster 3 composé de deux individus. Ceci suggère qu'il existe vraisemblablement une morphologie de cloison nasale plus répandue au sein d'une population chirurgicale. Nous avons ensuite décrit la variabilité des septums de chacun de nos clusters par la réalisation d'une superposition Procuste couplée à une analyse en composantes principales. La superposition Procuste nous a permis de décrire leurs conformations en nous affranchissant de l'effet de la taille et de la position. Par l'analyse en composantes principales nous avons pu identifier et décrire une morphologie moyenne de septum pour chacun des clusters. Elle était représentée par l'individu consensus. L'analyse de cette forme moyenne ne suffisait pas à déterminer les caractéristiques morphologiques propres à chacun de nos clusters car elle « gomme » les informations liées aux conformations les plus extrêmes. C'est pour cela que nous avons également identifié par l'analyse en composantes principales les morphologies septales représentant les maximums et les minimums de variabilités. Ainsi nous avons pu mettre en évidence que les clusters chez les lesquelles les valeurs de résistances

étaient les plus élevées se caractérisaient par la présence de septums très fortement déviés. Les déformations les plus extrêmes de la cloison nasale sont responsables des degrés d'obstruction nasal les plus sévères. Les clusters de fortes résistances rassemblent une population d'individus dont les amplitudes des déformations sont les plus fortes. Il aurait fallu étayer ces résultats par une description exhaustive de la variabilité des effectifs de chaque cluster pour toutes les composantes représentant 95% de la variance.

Ainsi nous avons pu mettre au jour une classification des déformations du septum nasal chez des individus se plaignant d'obstruction nasale basé sur un fondement statistique fiable et reproductible. Nous avons pu, ainsi, décrire 4 types de déviation septale, chacune associée à une sévérité d'obstruction nasale différente. Nous avons identifié :

1. La déformation en « Z » avec inversion de courbure antéro postérieure de forte amplitude (cluster 1)
2. La déformation associant le verre de montre antérieure au pied de cloison de forte amplitude (cluster 4).
3. La déformation en « Z » avec inversion de courbure antéro postérieure de faible amplitude (cluster 2)
4. La déformation associant le verre de montre antérieure au pied de cloison de faible amplitude (cluster 3).

## 5. Conclusion

Le septum nasal est l'une des structures anatomiques les plus variables chez l'Homme. La morphométrie géométrique est un outil d'analyse statistique étudiant la morphologie d'un objet en s'affranchissant de paramètres tels que la taille et l'orientation de celui-ci. Pour la première fois, nous l'avons appliqué dans l'étude des variations de formes du septum nasal. Nous avons démontré que cette technique pouvait être appliquée de manière fiable sur les déviations septales. En utilisant des outils statistiques tels que la classification ascendante hiérarchique ou clusterisation, nous avons pu identifier quatre clusters de variantes morphologique du septum nasal. En utilisant des modèles tridimensionnels, nous avons pu rationaliser de manière statistiquement significative l'étude des déformations de la cloison nasale. Ce travail ouvre ainsi un nouveau champ d'exploration des variations morphologiques du septum pouvant être utilisé à grande échelle. Les déformations du septum constituent l'étiologie la plus fréquente de l'obstruction nasale mais toutes les déviations n'ont pas obligatoirement de traductions cliniques. Notre étude a permis ainsi de mettre au jour une méthode d'analyse des déformations de la cloison permettant d'identifier à partir d'examen d'imagerie celles qui s'accompagnent d'obstruction nasale les plus sévères. Ce travail s'inscrit dans un cadre plus large d'amélioration de la prise en charge des patients se plaignant d'un trouble ventilatoire nasal. Ces résultats couplés aux études en dynamique des fluides pourraient permettre de localiser de manières spécifiques les zones du septum dont les déformations entravent le plus l'écoulement aérien au sein des fosses nasales. Cela pourra permettre à termes de guider le geste chirurgical en proposant grâce à l'apport des techniques vidéo endoscopiques une septoplastie ciblé. Ce travail constitue ainsi un nouvel apport dans la compréhension des relations conformation/fonction.

# Bibliographie

1. Chen XB, Lee HP, Hin Chong VF, Wang DY. Assessment of septal deviation effects on nasal air flow: A computational fluid dynamics model. *Laryngoscope*. 2009 Sep;119(9):1730-1736.
2. Wee JH. Classification and prevalence of nasal septal deformity in Koreans according to two classification systems. *Acta Otolaryngol*. 2012 Jun ;132(1):52-7.
3. Gray LP. Deviated nasal-septum - incidence and etiology. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1978;87(3):3-20.
4. Min YG, Jung HW, Kim CS. Prevalence study of nasal septal deformities in Korea: results of a nationwide survey. *Rhinology*. 1995;33:61-5.
5. Mladina R, Cujic E, Subaric M, Vukovic K. Nasal septal deformities in ear, nose, and throat patients: An international study. *Am J Otolaryng*. 2008;29:75-82.
6. Teixeira J, Certal V, Chang ET, Camacho M. Nasal Septal Deviations: A Systematic Review of Classification Systems. *Plast Surg Int*. 2016. Disponible sur internet : <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4737055/>>
7. Heimer D. Sleep apnea syndrome treated by repair of deviated nasal septum. *Chest J*. 1983;84(2):184.
8. Stewart MG, Witsell DL, Smith TL, Weaver EM, Yueh B, Hannley MT. Development and validation of the Nasal Obstruction Symptom Evaluation (NOSE) Scale. *Otolaryngol-Head Neck Surg*. 2004;130(2):157-63.
9. Kara M, Erdoğan H, Güçlü O, Sahin H, Dereköy FS. Evaluation of Sleep Quality in Patients With Nasal Septal Deviation via the Pittsburgh Sleep Quality Index. *J Craniofac Surg*. 2016;27(7):1738-40.
10. Roithmann R, Cole P, Chapnik J, Shpirer I, Hoffstein V, Zamel N. Acoustic rhinometry in the evaluation of nasal obstruction. *Laryngoscope*. 1995 Mar;105(3):275-81.
11. Pirila T, Tikanto J. Unilateral and bilateral effects of nasal septum surgery demonstrated with acoustic rhinometry, rhinomanometry, and subjective assessment. *Am J Rhinol*. 2001 Apr;15(2):127-33.
12. Michel J. Contribution à l'étude des cavités naso-sinusiennes de l'adulte par morphométrie géométrique et la simulation numérique des écoulements [Thèse de Doctorat d'Université, Anthropologie]. Marseille: Université Aix-Marseille Faculté de Médecine ; 2015.
13. Klossek JM, Desmons C, Serrano E, Percodani J. Anatomie des cavités nasosinusiennes. Masson EM-Consulte. 1997. Disponible sur internet : <<http://www.em-consulte.com/article/1234/anatomie-des-cavités-nasosinusiennes>>
14. Delmas. Tête et cou Tome 1. In: Rouvière. Anatomie humaine descriptive topographique et fonctionnelle, 2002.
15. Foster A, Holton N. Variation in the Developmental and Morphological Interaction Between the Nasal Septum and Facial Skeleton. *Anat Rec*. 2016 Jun;299(6):730-40.

16. Gray LP. Deviated nasal-septum - incidence and etiology. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1978;87(3):3-20.
17. Kim J, Cho JH, Kim SW, Kim BG, Lee DC, Kim SW. Anatomical Variation of the Nasal Septum: Correlation Among Septal Components. *Clin Anat*. 2010 Nov;23(8):945-949.
18. Krajina Z, Bumber Z. Contribution to nasal-septum deformities. *Acta Oto-Laryngol*. 1982;93(3-4):291-294.
19. Miles BA, Petrisor D, Kao H, Finn RA, Throckmorton GS. Anatomical variation of the nasal septum: Analysis of 57 cadaver specimens. *Otolaryng Head Neck*. 2007;136:362-368.
20. Grymer LF, Melsen B. The morphology of the nasal-septum in identical-twins. *Laryngoscope*. 1989 Jun;99(6):642-6.
21. Baumann I, Baumann H. A new classification of septal deviations. *Rhinology*. 2007 Sep; 45(3):220-223.
22. Guyuron B. A practical classification of septonasal deviation and an effective guide to septal surgery. *Plast Reconstr Surg*. 1999 Dec;104(7):2202-2210
23. Cottle MH, Loring GG, Fischer, Gaynon IE. The maxilla-premaxilla approach to extensive nasal septum surgery. *AMA archives of otolaryngology*. 1958;68:301-13.
24. Van Egmond MMHT, Rovers MM, Hendriks CTM, Van Heerbeek N. Effectiveness of septoplasty versus non-surgical management for nasal obstruction due to a deviated nasal septum in adults: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials [en ligne]*. 2015 Dec [cité 7 oct 2017];16(1). Disponible sur internet : <<http://www.trialsjournal.com/content/16/1/500>>
25. Saunte C, Pedersen S. Septoplasty and or submucous resection - 5 years nasal-septum operations [Internet]. Vol. 102. 1988. Disponible sur internet : <Go to ISI>://WOS:A1988Q285600012
26. Lin JK. Analyzing nasal septal deviations to develop a new classification system: a computed tomography study using MATLAB and OsiriX. *JAMA Facial Plast Surg*. 2014 May-Jun;16(3):183-7
27. Rao JJ, Kumar ECV, Babu KR, Chowdary VS, Singh J, Rangamani SV. Classification of nasal septal deviations—Relation to sinonasal pathology. *Indian J Otolaryngol*. 2005 Jul;57(3):199.
28. Ipan MJ, Most SP. Development of a severity classification system for subjective nasal obstruction. *JAMA Facial Plast Surg*. 2014;15(5):358–361.
29. Tomasi M. The deviated nose. Classification and treatment. Apropos of 100 cases. *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*. 1997;114(1-2):41-50.
30. Bookstein F. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. *Journal of classification*. 1993;10(1):133-136
31. Bookstein F. Foundations of morphometrics. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 1982;13:451-470.
32. Yushkevich PA, Piven J, Hazlett HC, Smith RG, Ho S, Gee JC, et al. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability. *Neuroimage*. 2006 Jul 1;31(3):1116-28.

33. Bookstein FL. Landmark methods for forms without landmarks : morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis*. 1997;1:225-243.
34. Baylac M. Morphométrie géométrique et systématique. *Biosystema*. 1996;14:73-89.
35. Kendall DG. Shape manifold, Procrustean metrics and complex projective spaces. *Bulletin of the London Mathematical Society*. 1984;16:81-121.
36. Mitteroecker P, Gunz P. Advances in Geometric Morphometrics. *Evol Biol*. 2009 Jun;36(2):235-47.
37. Moreddu E, Puymérail L, Michel J, Achache M, Dessi P, Adalian P. Morphometric measurements and sexual dimorphism of the piriform aperture in adults. *Surgical Radiological Anatomy*. 2013;35(10):917-24.
38. Goergen MJ, Holton NE, Grünheid T. Morphological interaction between the nasal septum and nasofacial skeleton during human ontogeny. *J Anat*. 2017 May;230(5):689-700.
39. Mladina R, Čujić E, Šubarić M, Vuković K. Nasal septal deformities in ear, nose, and throat patients. *Am J Otolaryngol*. 2008 Mar;29(2):75-82.
40. Baumann I, Baumann H. A new classification of septal deviations. *Rhinology*. 2007 Sep;45(3):220-223.
41. Gui Y, Hailang Z, Peng W, Xiaodong H. Measurement of deformation rate in nasal septum deviation by three-dimensional computer tomography reconstruction and its application in nasal septoplasty endoscopic surgery. *Exp Ther Med*. 2017 Mar;14(2):1519-1525
42. Verhoeven S, Schmelzer B. Type and severity of septal deviation are not related with the degree of subjective nasal obstruction. *Rhinology*. 2016 Dec;54(4):355-360
43. Aziz T, Biron VL, Ansari K, Flores C. Measurement tools for the diagnosis of nasal septal deviation: a systematic review. *J Otolaryngol-Head N*. 2014 Apr 24;43(11)

**- C -**

# **Perspectives**

**ANALYSE EN MORPHOMETRIE GEOMETRIQUE DES  
VARIATIONS PRE- ET POST-OPERATOIRES DU SEPTUM  
NASAL : ETUDE PRELIMINAIRE**

Mémoire de DES

## TABLE DES MATIERES

<b>1. Introduction</b> .....	<b>121</b>
<b>2. Matériels et méthodes</b> .....	<b>123</b>
<b>2.1. Population</b> .....	<b>123</b>
<b>2.2. Processus de segmentation 3D</b> .....	<b>124</b>
<b>2.3. Morphométrie géométrique</b> .....	<b>129</b>
2.3.1. Principes de la morphométrie géométrique .....	129
2.3.2. Les points repères ou landmarks .....	131
2.3.3. Définition et validation des points repères utilisées pour l'analyse .....	131
<b>2.4. Analyses statistiques</b> .....	<b>138</b>
<b>3. Résultats</b> .....	<b>139</b>
<b>3.1. Population</b> .....	<b>139</b>
<b>3.2. Validation des landmarks</b> .....	<b>139</b>
<b>3.3. Comparaison pré/post opératoire du septum nasal</b> .....	<b>139</b>
3.3.1. MANOVA Procuste.....	139
3.3.2. Distances.....	140
3.3.3. Analyse descriptive des individus présentant les conformations pré- et post-opératoires les plus extrêmes. ....	141
3.3.4. Analyse des différents types de transformations .....	146
<b>4. Discussion</b> .....	<b>153</b>
<b>5. Conclusion</b> .....	<b>157</b>
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>158</b>

## 5. Introduction

La septoplastie constitue une des interventions chirurgicales les plus fréquemment pratiquées en oto-rhino-laryngologie (1). L'objectif de cette procédure est de corriger les déformations de la cloison nasale génératrices d'obstruction nasale, symptôme invalidant et très courant au sein de la population générale (2-6)(7-9).

Les critères d'efficacité post chirurgicaux sont avant tout cliniques (8). Ils sont définis, à l'interrogatoire, par une disparition de l'obstruction et une amélioration du confort ventilatoire nasal (10). Ce sont des critères subjectifs basés sur le degré de satisfaction des patients opérés (11). L'examen rhinoscopique endoscopique constitue lui un critère objectif permettant d'apprécier la correction des anomalies du septum. Mais cela ne nous permet pas de caractériser de manière précise l'impact morphologique qu'a eu le geste sur les zones les plus déviées du septum (5)(12)(13). Le degré de modifications générées ou le degré de « redressement » de la cloison nasale pourrait être déterminé par la réalisation d'un examen tomodensitométrique des fosses nasales post-opératoire (12). Toutefois le scanner des fosses nasales, examen d'un intérêt considérable en pré-opératoire dans l'analyse anatomique tridimensionnelle des déformations du septum n'est pas systématiquement réalisé en post opératoire (14,15).

La morphométrie géométrique est une méthode utilisée en anthropologie biologique et médico-légale permettant d'analyser la conformation d'un objet en s'affranchissant de sa taille et de sa position, cela dans le but de comparer les individus ou les espèces entre elles (16) (17). Il s'agit d'une méthode d'analyse statistique puissante et objective de la conformation des objets. Elle a tout d'abord été développée pour des applications en anthropologie et en paléo-anthropologie pour comparer les crânes de différentes espèces, et ainsi tenter d'identifier les liens de parenté qui les unissent (18). Elle a ensuite été appliquée dans divers domaines de la biologie développementale et de la médecine pour étudier les variations de forme d'un organisme, ou d'une partie de celui-ci, entre différents spécimens(17,19-22). Elle s'oppose à la morphométrie « traditionnelle », qui se base sur la comparaison de distances linéaires et d'angles entre des points homologues de différents objets. En morphométrie géométrique, les données ont l'avantage de pouvoir faire l'objet de statistiques, par exemple pour comparer différentes formes entre elles de manière objective et chiffrée.

A l'aide de cette méthode nous avons étudié la morphologie de la cloison nasale (23,24). En premier lieu, dans le cadre d'un travail de recherche de master 2, nous avons évalué la variabilité du septum au sein d'une population tout venant de 91 individus et nous avons pu valider des points repères (landmarks) permettant de représenter la forme du septum. Au terme de cette étude, nous disposons d'un outil intéressant et validé d'analyse de la morphologie de la cloison nasale que nous avons appliqué sur une population pathologique se plaignant d'obstruction nasale. Ceci a fait l'objet d'un travail de thèse d'exercice

qui nous a permis de classer les individus en fonction de leur type d'obstruction et de leurs déformations septales.

Notre étude de mémoire de DES s'inscrit dans la poursuite de cette démarche scientifique d'étude spécifique de la morphologie de la cloison nasale. Parmi nos patients pathologiques opérés nous avons sélectionné ceux dont nous disposions des scanners post-opératoires et nous avons appliqué cette méthode afin d'analyser l'évolution de la morphologie de la cloison.

L'intérêt était d'étudier les types et le degré de correction qui ont été effectués lors de la chirurgie. Notre objectif est d'obtenir, à terme, une méthode permettant de sélectionner les individus qui pourront faire l'objet d'une étude par simulation numérique des écoulements (25).

L'objectif de notre travail était d'étudier l'intérêt de la morphométrie géométrique dans l'évaluation des modifications morphologiques du septum nasale en pré- et post-opératoire d'une septoplastie.

## 6. Matériel et méthodes

### 2.1. Population

Nous avons réalisé une étude rétrospective longitudinale incluant des individus pris en charge dans le service d'Oto-Rhino-Laryngologie et Chirurgie Cervico-Faciale adulte de la Timone puis de la Conception, de l'Assistance Publique des Hôpitaux de Marseille (APHM) entre 2013 et 2017.

Nos critères d'inclusion étaient

- Individus adultes (âge supérieur à 18 ans)
- Avec obstruction nasale non réversible après vasoconstricteurs objectivée à la rhinomanométrie (Résistances pour une fosse nasale supérieure à 0,30 sPa/mL)
- Présentant une déviation septale objectivée sur le scanner pré opératoire
- Ayant été opéré d'une septoplastie ou d'une rhinoseptoplastie
- Avec un scanner post opératoire disponible.

Les scanners ont été extraits de la base de données des services de radiologie de l'APHM.

Ils ont été réalisés selon le protocole : scanner hélicoïdal multibarettes Siemens Somatom Definition (Siemens Healthcare) ou General Electric Light speed LS 16 Pro (GE) en utilisant les paramètres suivants : 120-Kv, 130 mAs, coupes de 0.6 mm chaque 0.3 mm.

Ils devaient englober les fosses nasales et le massif facial en totalité.

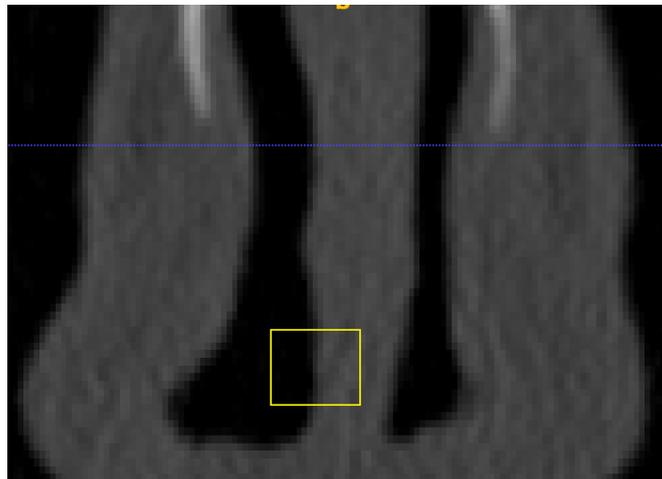
Les critères d'exclusion étaient :

- Un sujet mineur
- Les scanners contenant des artefacts métalliques ou dentaire
- Les scanners acquis selon un protocole non hélicoïdal
- L'absence de scanner post-opératoire

## 2.2. Processus de segmentation 3D

Pour chaque scanner nous avons réalisé une reconstruction 3D de la cloison nasale à l'aide du logiciel de segmentation semi-automatique ITK SNAP® (26). Cette méthode de reconstruction repose sur une détermination du seuil de niveau de gris séparant le mieux l'air des structures osseuses, cartilagineuses et des parties molles. Nous avons appliqué pour chaque individu la méthode du Half Maximum Height (HMH) décrite et utilisée pour évaluer des distances linéaires sur une coupe unique d'examen tomodensitométrique et « sur os sec »(17). Cette mesure est obtenue en calculant la valeur moyenne de niveau de gris (valeur seuil) à partir de l'histogramme établi au niveau de deux structures adjacentes. Cette technique permet de fixer une valeur mathématique à cette zone de transition où le changement des niveaux de gris n'est pas abrupt mais au contraire progressif. Dans le but d'établir au mieux les valeurs de seuillage entre les structures, nous avons obtenu les histogrammes des interfaces air/tissu mou et os/air à l'aide de l'outil « Measure » du logiciel ImageJ® v.1.44o (National Institutes of Health) (Figure 1). Afin d'obtenir une valeur moyenne pour chaque individu, nous avons réalisé 10 mesures par individu. Nous avons ensuite déterminé la valeur maximale et la valeur minimale puis calculé la valeur moyenne des moyennes. Cela permet de déterminer le seuil de niveau de gris à partir duquel le logiciel ITK SNAP® va initier le processus de segmentation.

Nous avons ensuite réalisé des retouches manuelles à l'issue de ce processus afin d'effacer les structures adjacentes comme les cornets et isoler ainsi parfaitement la cloison nasale.



**Figure 1.** Vue, zoom maximum, dans une coupe axiale de l'examen tomodensitométrique illustrant la technique du HMH.

Le processus de segmentation d'images permet de séparer une image en plusieurs zones. Les points connexes ayant des propriétés similaires (niveaux de gris) vont être réunis dans le même ensemble.

L'algorithme utilisé procède par croissance de régions. Cette technique consiste à regrouper des points voisins pour former des régions de plus en plus importantes. Pendant le seuillage, les régions ainsi sélectionnées sont visualisées sur les trois coupes (transversale, coronale, sagittale). Cela permet à l'utilisateur d'évaluer la qualité du seuillage sur différentes coupes 2D et de l'adapter de manière dynamique pour reconstruire une géométrie 3D correspondant au domaine que l'on cherche à extraire.

Les étapes de cette modélisation sont :

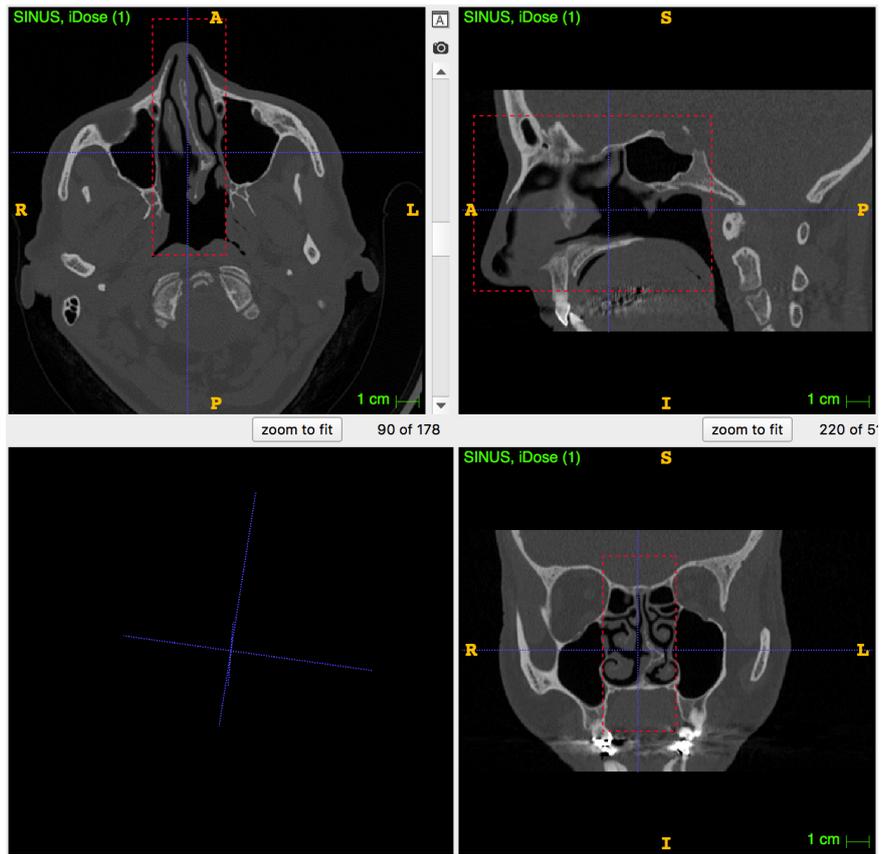
- Sélection de la région d'intérêt (figure 2) : cela va permettre de limiter le domaine d'évolution du contour actif (ensemble de points que l'on va déplacer pour leur faire épouser une forme). Afin d'avoir un volume contenant l'ensemble du septum nasal, dans notre étude, la région d'intérêt était un parallélépipède rectangle dont les limites étaient :

Sur une coupe sagittale passant par le septum nasal :

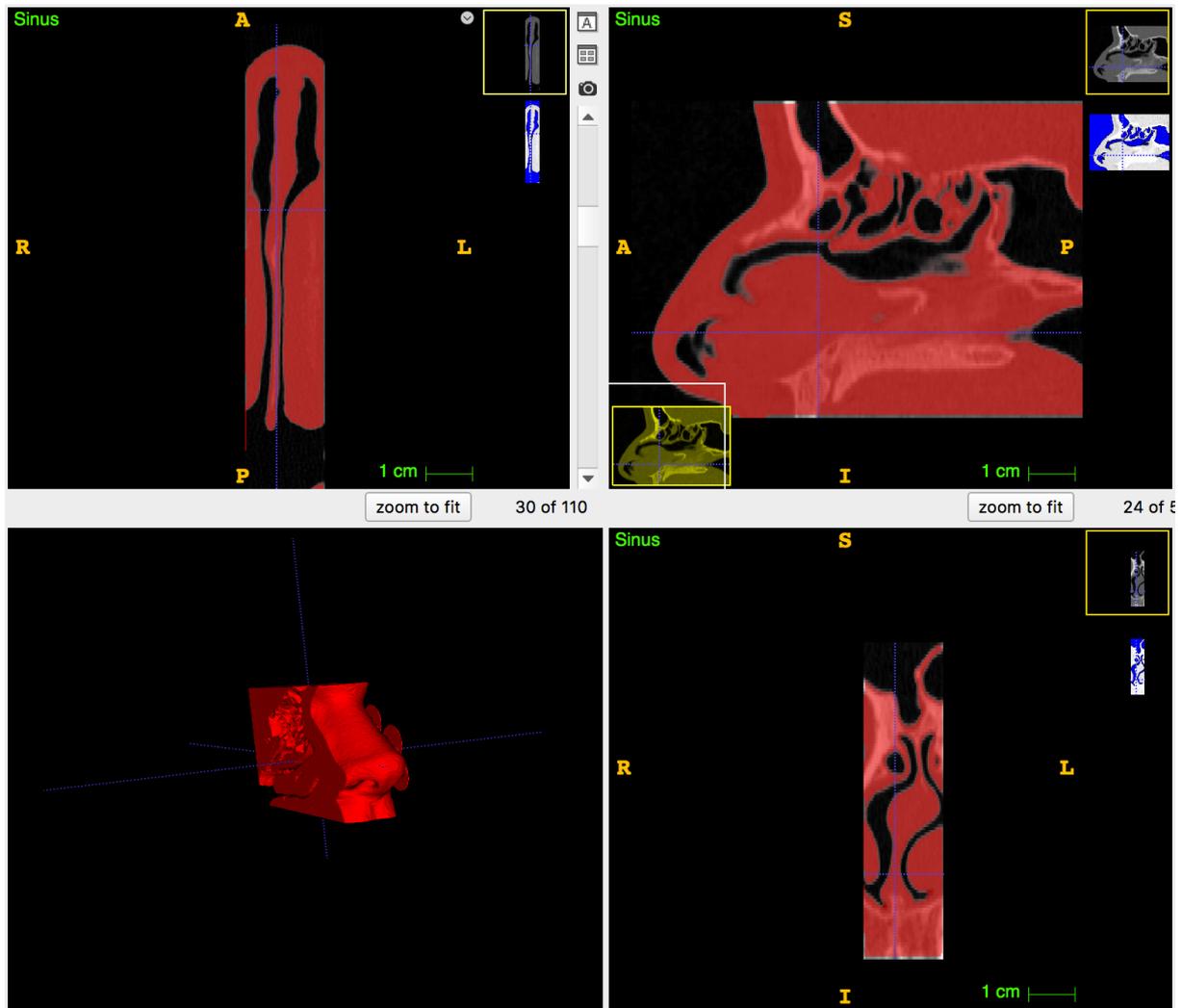
- En haut : un plan axial passant par au-dessus de l'apophyse crista galli
- En avant : un plan coronal passant par la pointe du nez
- En arrière : un plan coronal passant par la paroi postérieure du cavum
- En bas : un plan axial situé en dessous du plancher des fosses nasales

Sur une coupe transversale passant par le plus large des narines :

- Latéralement : un plan sagittal passant par la cloison inter sinus nasale



**Figure 2.** Visualisation de la zone d'intérêt (en pointillés rouges) sur une coupe axiale, sagittale et coronale



**Figure 3.** Capture d'écran du processus de segmentation. Le modèle en cours d'acquisition est en rouge.

En utilisant la valeur seuil séparant les niveaux de gris entre l'air et les tissus mou, on réalise par ce procédé une reconstruction du septum muqueux, c'est-à-dire le septum en totalité comprenant en plus du septum osseux, le septum cartilagineux et le revêtement muqueux. Le contour actif va se dilater pour remplir les structures constitutives du septum, en s'arrêtant aux zones de plus faible gradient d'intensité (l'air). Après obtention du modèle, un travail coupe par coupe était effectué afin de supprimer du modèle les structures adjacentes non septale comme les cornets et les masses latérales de l'ethmoïde (figure 4).



**Figure 4.** Capture d'écran du modèle en fin de segmentation avant exportation

Une fois le domaine extrait, aucun algorithme de lissage n'a été appliqué à son maillage surfacique pour ne pas modifier de façon critique la réalité anatomique des modèles. Le fichier contenant ce maillage surfacique 3D est alors enregistré au format STL (surface triangularisée, utilisée dans le domaine de la stéréolithographie).

## 2.3.Morphométrie géométrique

La morphométrie géométrique a été développée par Bookstein dans les années 80 afin de pallier les limites de la morphométrie conventionnelle ou « traditionnelle », en conservant et comparant très précisément les conformations de différents objets. Elle s'attache à étudier la forme des objets en deux ou trois dimensions. Elle permet ainsi de visualiser en trois dimensions les changements de conformation d'un objet ce qui n'est pas réalisable avec les techniques de morphométrie conventionnelle. Elle a pour but d'étudier la morphologie des structures en s'affranchissant de paramètres tels que la taille ou l'orientation en faisant appel à une succession de calculs statistiques ceci afin de mettre en évidence d'éventuelles variations et d'essayer d'en expliquer l'origine.

### 2.3.1 Principes de la morphométrie géométrique

Cette description des approches modernes de l'analyse des variations de formes fait appel à des termes qui nécessitent d'être définis.

La forme d'un objet est la résultante de l'association de sa taille et de sa conformation. Les notions de taille, conformation et forme interviennent dans toutes les études morphométriques et leurs relations ont été formalisées par l'équation suivante : « Form = *size* + *shape* » qui peut se traduire en français par : « FORME = TAILLE + CONFORMATION » (19)

Ainsi si nous prenons l'exemple de deux tours Eiffel, l'originale et sa réplique miniature (figure 5).



**Figure 5.** Comparaison de deux objets Tour Eiffel : taille réelle et réplique miniature

Nous pouvons dire que ces deux objets ont la même conformation mais ils n'ont pas la même forme car ils sont de taille différente. Ainsi on appelle « conformation » l'ensemble des caractéristiques géométriques qui demeurent lorsque les effets relatifs à la position, la taille (échelle) et à la rotation ont été retiré d'un objet. La morphométrie géométrique permet ainsi d'étudier la conformation des objets afin de pouvoir les comparer entre eux.

Deux approches sont utilisées en morphométrie géométrique : l'étude par contour ou par points d'intérêts. La seconde est celle qui est le plus utilisée. Elle se base sur l'utilisation de points d'intérêts appelés « points repères » ou « landmarks » situés sur l'objet que l'on veut étudier. En médecine ils correspondent à des *loci* anatomiques (extrémité d'un os, articulation, foramen etc.) bien identifiables d'un individu à l'autre chez tous les spécimens de l'étude (20). Ils doivent fournir une visualisation schématique adéquate de la morphologie des structures étudiées. Leurs coordonnées sont ensuite relevées en 2D ou en 3D, soit directement dans un logiciel si l'on travaille sur des images, soit directement sur l'objet en 3D, à l'aide d'un pointeur laser adapté et la configuration de ces points permet de décrire la forme.

Les effets de la taille sont ensuite éliminés grâce au calcul de la distance procrustéenne (27) ou à l'aide des coordonnées de Bookstein, ce qui autorise enfin la réalisation de comparaisons objectives des formes étudiées. Enfin, la morphométrie géométrique se base sur la taille centroïde qui est une évaluation naturelle de la taille. La taille centroïde est la racine carré de la somme des distances entre les landmarks et le centre de gravité de chaque objet, c'est une mesure de la taille non corrélée à la conformation (28).

### **2.3.2. Les points repères ou landmarks**

Bookstein a établi une classification des points repère en trois catégories (17).

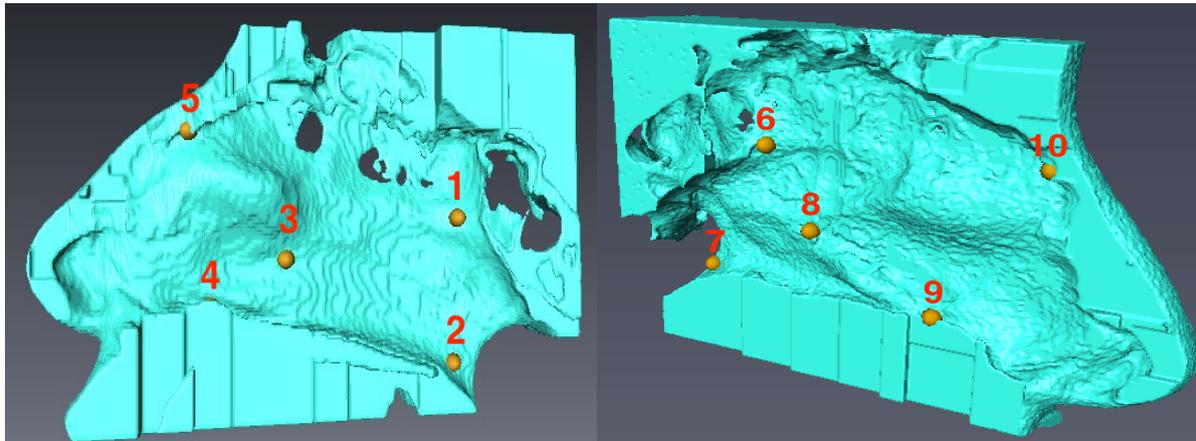
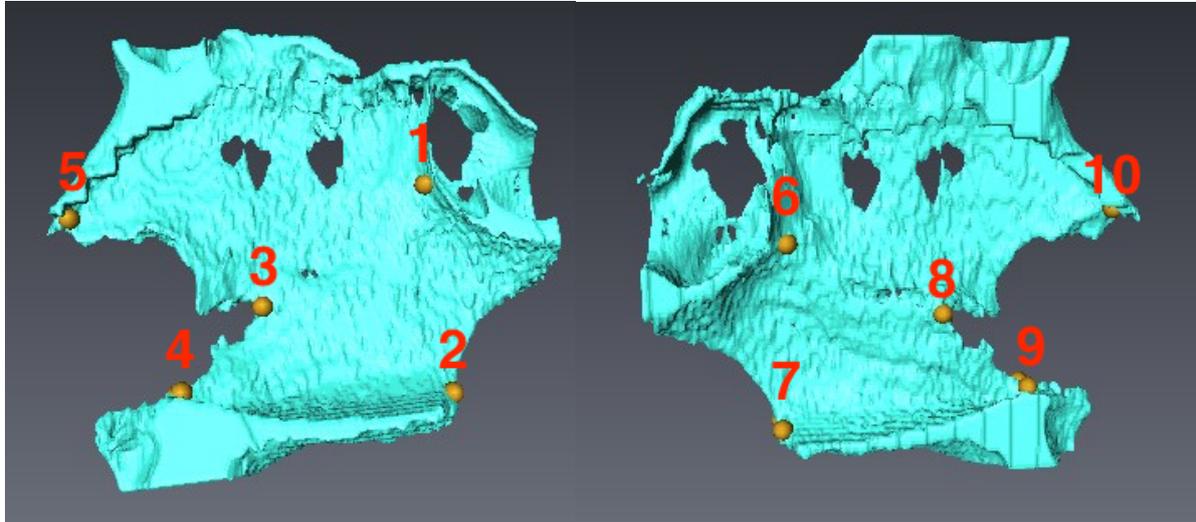
- Les Types I sont des points pour lesquels l'homologie d'un cas à l'autre est fortement supportée. Par exemple un point de convergence précis de plusieurs structures osseuses est facilement identifiable chez chaque individu.
- Les Types II sont des repères dont l'homologie d'un sujet à l'autre est supportée par la géométrie (extrémité d'un processus osseux, maxima ou minima de courbure d'un os) et non par des caractéristiques anatomiques ou histologiques.
- Les Types III sont beaucoup plus problématiques et ne devraient pas selon certains être considérés comme des points repères. Ils ne sont pas définis par les structures avoisinant ce point mais plutôt comme étant positionnés à un extrême par rapport à un autre point (16).

#### **a) Définition et validation des points repères utilisés pour l'analyse**

Lors de nos précédents travaux nous avons définis des landmarks pour caractériser la forme du septum nasal.

Au cours d'un mémoire de recherche de master 2, nous avons étudié 10 landmarks situés sur la cloison nasale muqueuse que nous avons comparé à 10 landmarks homologues de type I situés sur le versant osseux de la cloison nasale.

La figure 6 montre la situation des landmarks muqueux et osseux de la cloison nasale utilisés lors du travail de mémoire de master 2 et le tableau 1 précise leurs définitions.



**Figure 6.** Position des points repères sur septums nasaux osseux et muqueux : vue de face, vue latérale droite et gauche

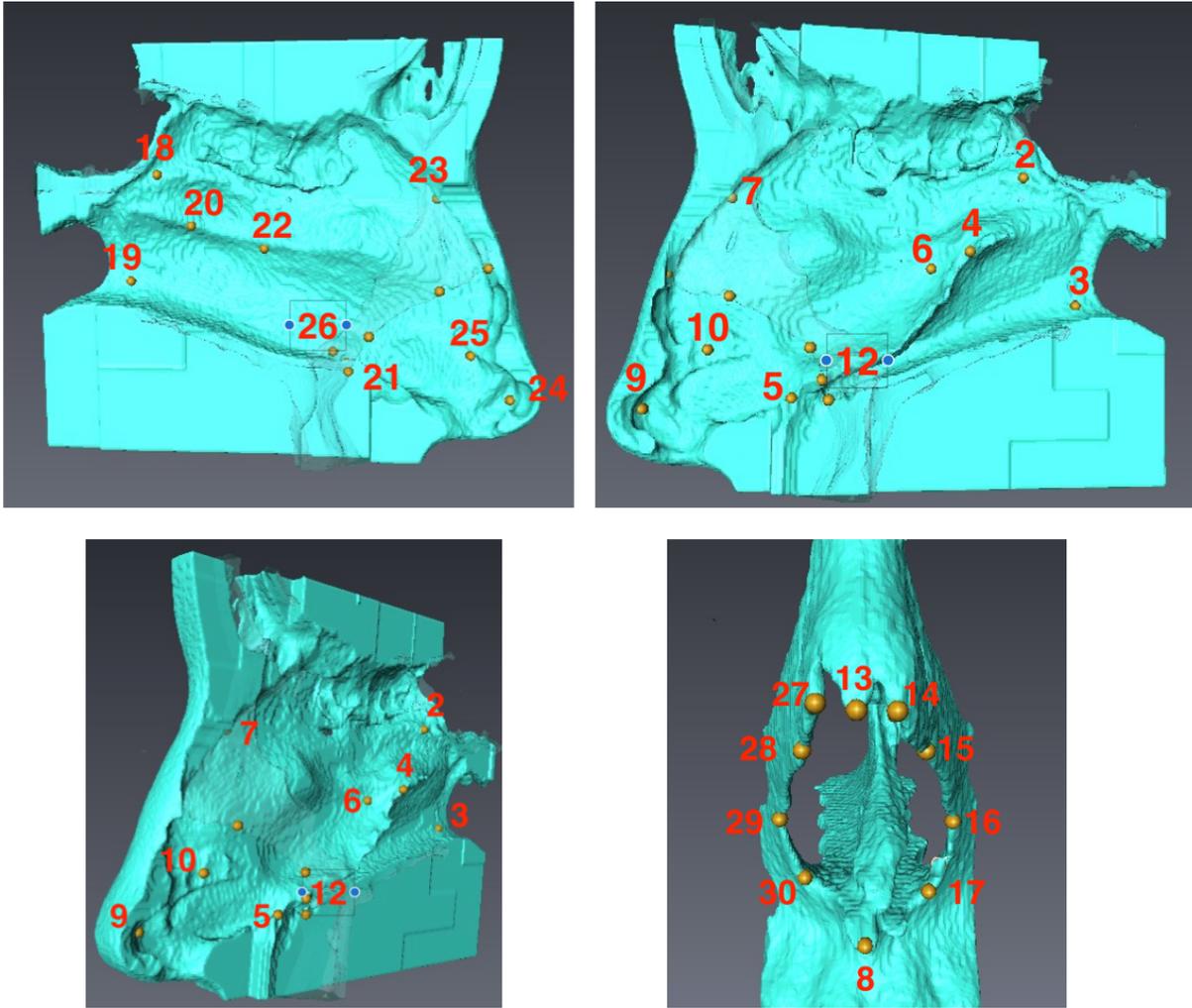
SEPTUM	LANDMARK	DEFINITION
Gauche	1	Zone de jonction entre le sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	2	Extrémité postéro inférieure du vomer
	3	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et le cartilage quadrangulaire
	4	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
	5	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et les os propres du nez.
Droit	6	Zone de jonction entre le sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'éthmoïde
	7	Extrémité postéro inférieure du vomer
	8	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et le cartilage quadrangulaire.
	9	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.
	10	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'éthmoïde et les os propres du nez.

<b>Tableau 1. Définition des landmarks</b>
--

Cette étude a permis de démontrer la fiabilité de ces points repères placés directement sur la muqueuse septale et nous avons pu valider cette démarche.

Pour le travail de thèse, nous avons étendu notre analyse en définissant 8 autres landmarks du septum muqueux cartilagineux antérieure. Nous avons également utilisé des landmarks du massif facial au niveau de l'orifice piriforme osseux (29) et de l'apophyse crista galli qui nous ont servi de repère pour la ligne médiane nous permettant ainsi d'obtenir une représentation de « l'environnement » osseux dans lequel s'intègre la cloison nasale. Au total les points repères retenus dans ce travail étaient au nombre de 30 par ensemble cloison nasale/sinus piriforme/crista galli pour un individu.

La figure 7 présente la localisation de ces landmarks et le tableaux 2 précise leurs définitions.



**Figure 7** : Position des points repères utilisées sur le septum nasal : vue latérale droite, latérale gauche et  $\frac{3}{4}$  gauche ; et orifice piriforme

Structures anatomique	LM	DEFINITION
Os	1	Rostre sphénoïdal
Septum gauche	2	Zone de jonction entre la face antérieure du sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'éthmoïde.
Septum gauche	3	Extrémité postéro inférieure du vomer
Septum gauche	4	Maximum de courbure au niveau du rail septal.
Septum gauche	5	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.

Septum gauche	6	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et le cartilage quadrangulaire
Septum gauche	7	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et les os propres du nez.
Septum gauche	8	Epine nasale antérieure
Septum gauche	9	Point le plus antérieur du cartilage quadrangulaire
Septum gauche	10	Maximum de courbure du cartilage quadrangulaire. Le verre de montre.
Crista galli	11	Extrémité supérieure de la crista galli
Septum gauche	12	Maximum de courbure du pied de cloison
Orifice piriforme	13	Point le plus antérieure des os propres du nez sur le plan médian
Orifice piriforme	14	Extrémité antéro médiane de l'os propre du nez gauche
Orifice piriforme	15	Zone de suture entre l'os propre du nez gauche et l'os maxillaire
Orifice piriforme	16	Maximum de courbure latéral de l'orifice piriforme à gauche
Orifice piriforme	17	Zone d'inversion de courbure entre la partie latérale de l'orifice piriforme et la partie inférieure à gauche.
Orifice piriforme	27	Extrémité antéro médiane de l'os propre du nez à droite
Orifice piriforme	28	Zone de suture entre l'os propre du nez droit et l'os maxillaire
Orifice piriforme	29	Maximum de courbure latéral de l'orifice piriforme à droite
Orifice piriforme	30	Zone d'inversion de courbure entre la partie latérale de l'orifice piriforme et la partie inférieure à droite
Septum droit	18	Zone de jonction entre la face antérieure du sphénoïde, le vomer et la partie postérieure de la lame perpendiculaire de l'ethmoïde.
Septum droit	19	Extrémité postéro inférieure du vomer
Septum droit	20	Maximum de courbure au niveau du rail septal.
Septum droit	21	Point de jonction entre la partie la plus antérieure du vomer et l'os maxillaire.

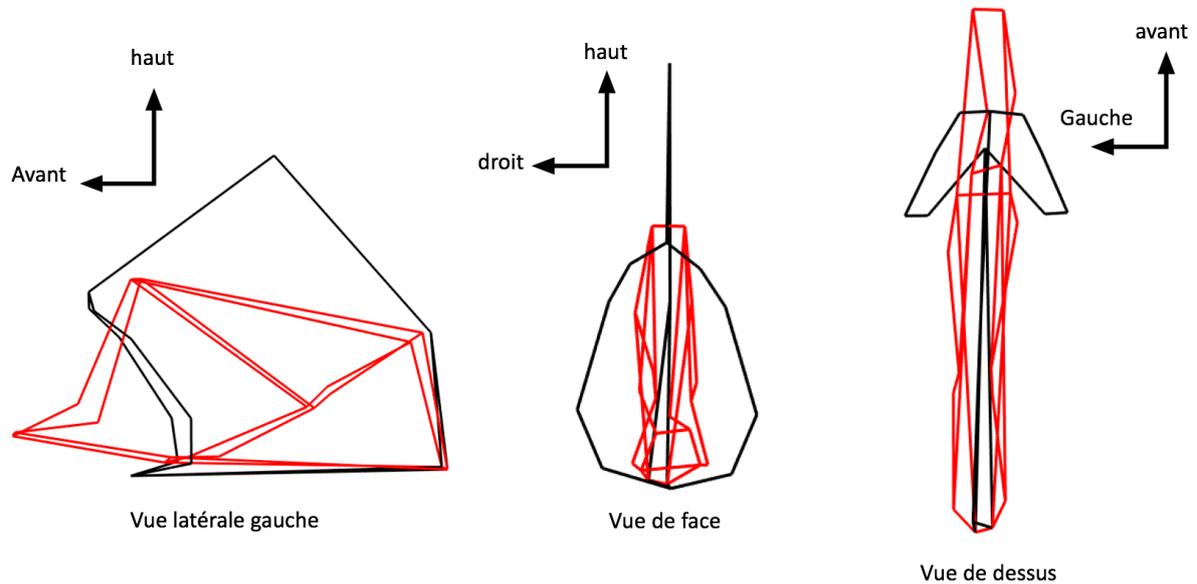
Septum droit	22	Point de jonction antérieure entre le vomer et la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et le cartilage quadrangulaire
Septum droit	23	Point de jonction entre la lame perpendiculaire de l'ethmoïde et les os propres du nez.
Septum droit	24	Point le plus antérieur du cartilage quadrangulaire
Septum droit	25	Maximum de courbure du cartilage quadrangulaire. Le verre de montre.
Septum droit	26	Maximum de courbure du pied de cloison

**Tableau 2.** Définition des points repères (landmark) utilisés lors du travail de thèse. En grisé les landmarks « environnementaux » du massif facial

Le positionnement des différents points s'est fait à l'aide du logiciel Avizo®. Les reconstructions 3D des cloisons nasales obtenues dans ITK-SNAP® ont été exportées au format «. STL » puis importées dans le logiciel Avizo®.

Pour chaque individu, tous les points ont été positionnés systématiquement dans le même ordre et leurs coordonnées x, y, z ont été enregistrées dans un fichier au format «.landmark.ascii». Ces coordonnées des points repères constituant les données brutes de notre étude ont ensuite été exportés dans le logiciel R®.

Grâce à ces landmarks nous pouvons analyser la morphologie globale du septum nasale (Figure 8).



**Figure 8.** Morphologie globale du septum nasal après pose des landmarks d'intérêt. Les landmarks du septum sont reliés par des lignes rouges, les landmarks du cadre osseux sont reliés entre eux par des lignes noires.

## 2.4. Analyse statistique

Toutes les analyses ont été menées sur le logiciel R studio®. Les analyses statistiques ont porté exclusivement sur les landmarks définis pour le septum nasal et pas sur ceux définis pour le cadre osseux.

La validation des landmarks que nous avons définis a été effectuée par une étude de leur répétabilité évaluée par MANOVA Procuste.

Les variations pré- et post opératoires du septum nasal ont été analysées par 3 méthodes.

La première était le calcul du pourcentage global de modification du positionnement des landmarks pour chaque individu entre le pré- et le post-opératoire par la méthode de la MANOVA procustes. Cette méthode permet après une superposition procuste de connaître le positionnement la taille centroïde de chacun des individus dans les 2 premières composantes principales de la variabilité de notre échantillon. Les principes de la superposition procuste sont présentés en annexe 1.

La seconde était un calcul des distances euclidiennes pour chaque individu entre le pré- et le post-opératoire à l'aide du logiciel R studio® et de la fonction « dist ». Les variables des coordonnées procustes des différents points repères de chaque cloison ont été recueillies. Elles définissent un espace multidimensionnel dans lequel chaque observation peut être tracées. La distance euclidienne est une distance géométrique dans cet espace. Ceci nous a permis de repérer les individus pour lesquelles les différences morphologiques septales étaient les plus importantes entre le pré et le post-opératoire ainsi que les individus les plus proches.

La troisième a consisté en une évaluation visuelle descriptive à partir des tracés des lignes reliant les landmarks entre eux (Figure 7) et en une recherche des types de variations induites par la chirurgie. Elles permettaient l'appréciation des déformations et de leurs corrections par le clinicien de façon assez classique.

## 7. Résultats

### 3.1. Population

Dans notre étude ont été inclus 7 individus (3 femmes et 4 hommes). L'âge moyen était de 34,5 ans (29 à 47 ans). Trois patients ont été opérés de rhinoseptoplastie, quatre patients ont été opérés de septoplastie seule.

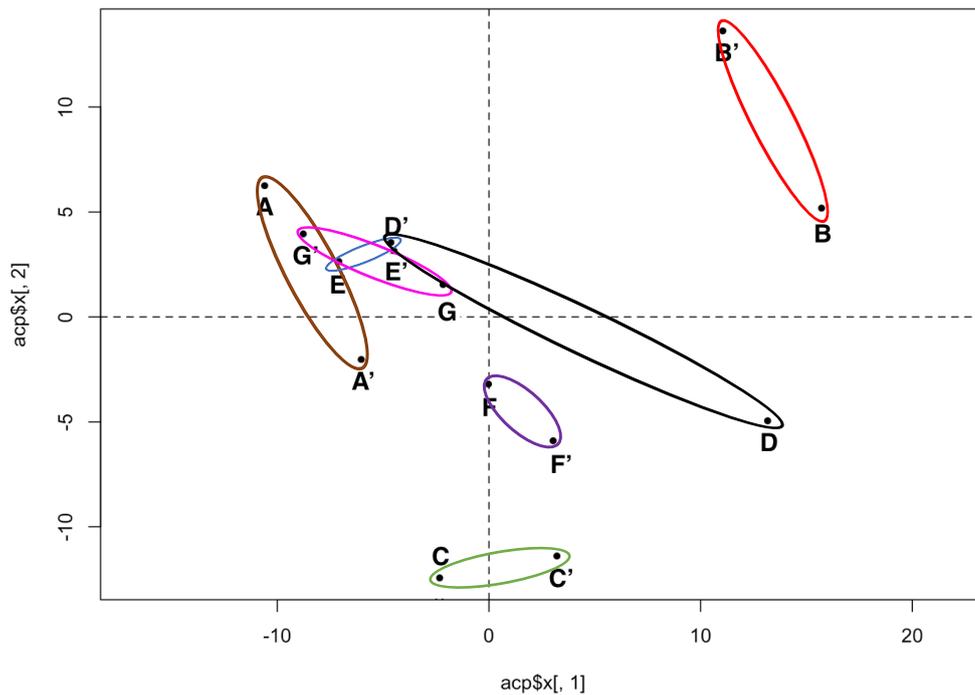
### 3.2. Validation des landmarks

Le pourcentage lié à l'erreur de mesure a été déterminé lors du travail de thèse qui portait sur 50 septums en pré-opératoire. Nous avons testé la fiabilité de nos 30 points repères en évaluant leur répétabilité. Dans notre étude ce pourcentage de différence lié à l'erreur de mesure est de 7,9%. Les détails des résultats sur cette section sont présentés dans l'annexe 2.

### 3.3. Comparaison pré/post opératoire du septum nasal

#### 3.3.1. MANOVA Procuste

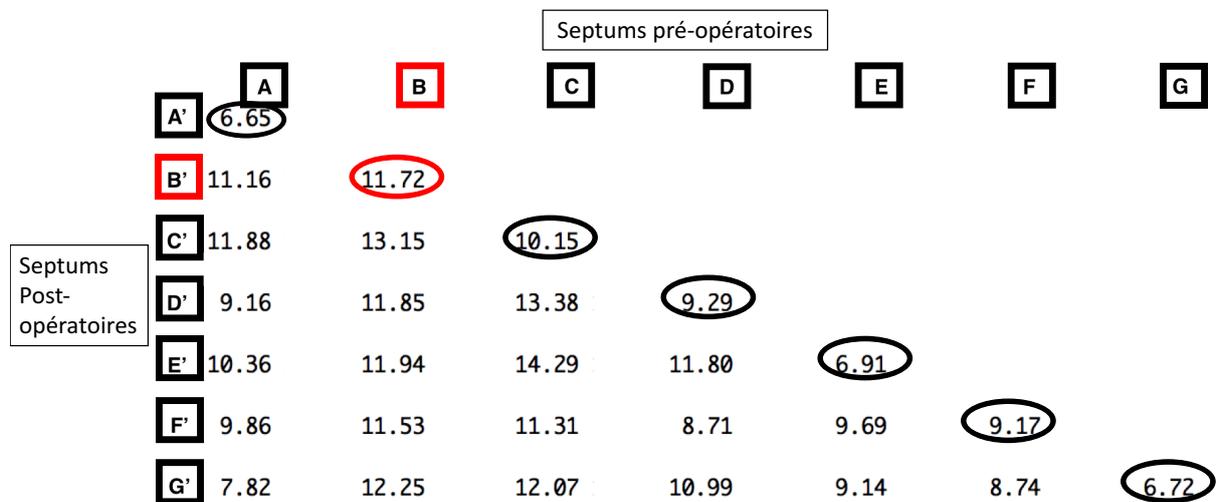
Par une MANOVA Procuste nous avons pu déterminer que le pourcentage de différences qu'il existait entre les cloisons nasales pré- et post-opératoires était de 56,9 % sur l'ensemble de notre population (figure 9). Chaque septum est nommé par une lettre de l'alphabet, le septum post-opératoire du même individu est nommé par la même lettre avec un « ' » en indice. Par l'exemple pour le premier individu de notre étude, son septum pré-opératoire est le septum A et son septum post opératoire est le septum A'. Et ainsi de suite pour le deuxième individu jusqu'au septième individu dont les cloisons pré et opératoire sont nommées respectivement G et G'.



**Figure 9.** Représentation des individus pré et post opératoire le long de la composante principale numéro 1 en fonction de la composante principale numéro 2. Chaque individu et son homologue post opératoire sont reliés entre eux par une ellipse de couleur différente.

### 3.3.2. Distances

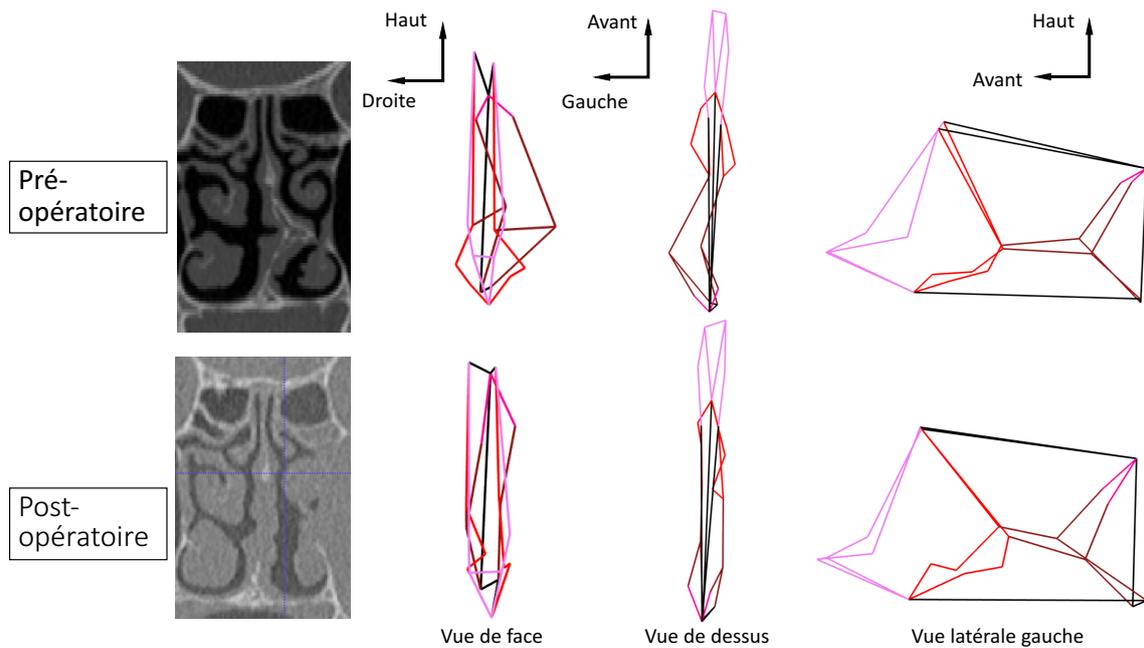
Afin de repérer, l'individu pour lequel les différences morphologiques septales étaient les plus importantes et celui pour lequel ces différences étaient les moins importantes entre le pré- et le post-opératoire nous avons calculé à l'aide du logiciel R studio® et de la fonction « dist », les distances euclidiennes (figure 10). Les valeurs utiles pour notre étude sont entourées.



**Figure 10.** Distances euclidiennes entre chacune des cloisons nasales pré-et post-opératoire. En ordonné les cloisons pré-opératoires, en abscisse leurs homologues post-opératoires identifiées par le signe « ' ». En rouge l'individu pour lequel la distance est la plus élevée.

**a) Analyse descriptive des individus présentant les conformations pré- et post-opératoires les plus extrêmes.**

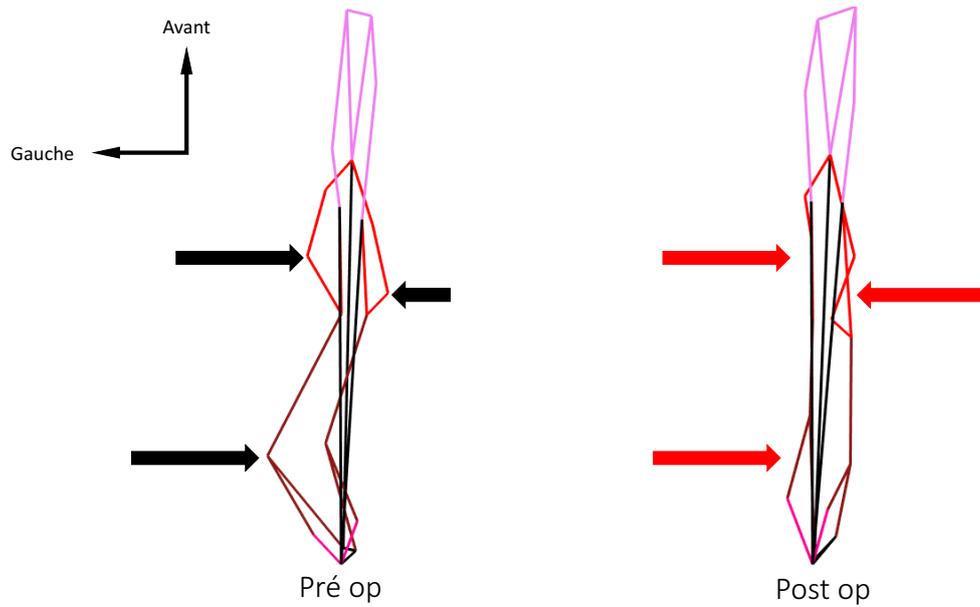
La cloison nasale B est celle qui est morphologiquement la plus éloignée de son homologue post-opératoire : la cloison nasale B'. Les modifications morphologiques septales générés par l'intervention chirurgicales sont les plus importantes chez l'individus B (figure 11).



**Figure 11.** Représentation des différences pré et post opératoire chez l'individu dont les différences morphologiques sont les plus grandes et corrélation au scanner. En rose clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En rose foncée : landmarks reliant le rostre sphénoïdal au maximum de courbure de la face antérieure du sphénoïde. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez.

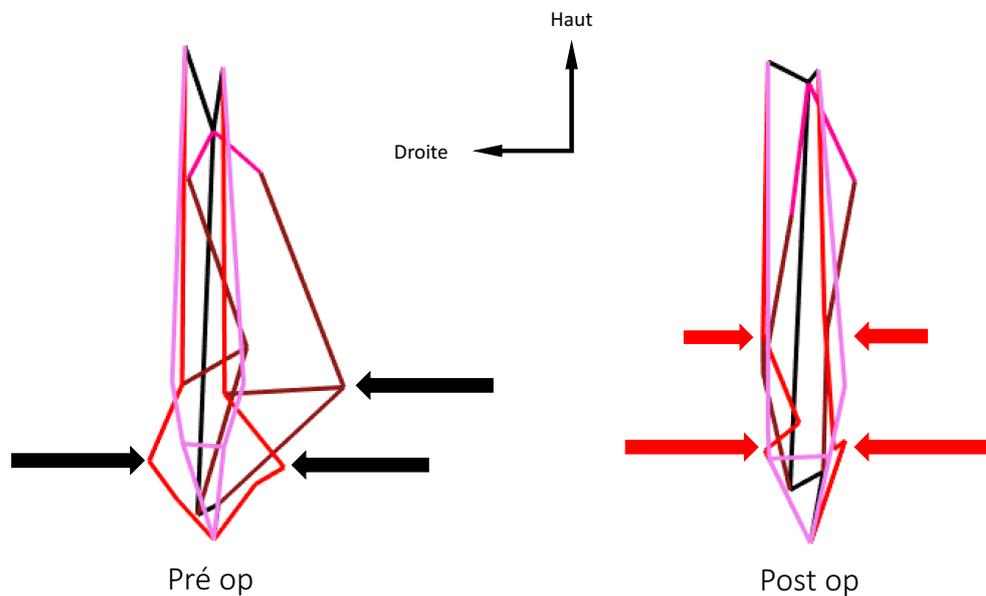
Chez cet individu on constate sur le scanner pré-opératoire un pied de cloison dévié de manière importante vers la gauche ainsi qu'un rail septal postérieur saillant vers la gauche.

Ces observations se retrouvent également sur la représentation de la cloison nasale par les points repères reliés entre eux utilisés pour notre analyse. En post opératoire la déformation du pied de cloison a été corrigée ainsi que celle du rail septal postérieure (figure 12 et 13).



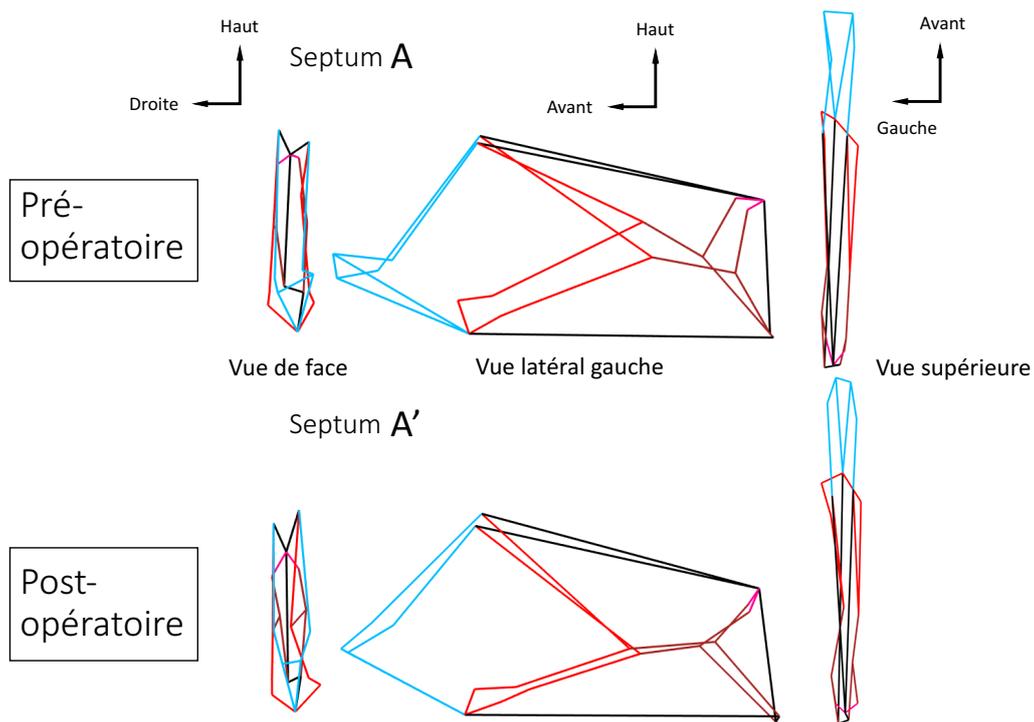
**Figure 12.** Représentation en **vue supérieure** des cloisons nasales pré opératoire à gauche et post opératoire à droite et visualisation des corrections du pied de cloison et du rail septal postérieur. En rose clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En rose foncée : landmarks reliant le rostre sphénoïdal au maximum de courbure de la face antérieure du sphénoïde. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez.

Le septum, en post-opératoire, présente une bonne rectitude globale.



**Figure 13.** Représentation en **vue de face** des cloisons nasales pré opératoire à gauche et post opératoire à droite et visualisation des corrections du pied de cloison et du rail septal postérieur. En rose clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En rose foncée : landmarks reliant le rostre sphénoïdal au maximum de courbure de la face antérieure du sphénoïde. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez.

La cloison nasale A est celle qui est morphologiquement la plus proche de son homologue post opératoire, la cloison nasale A' (figure 14).



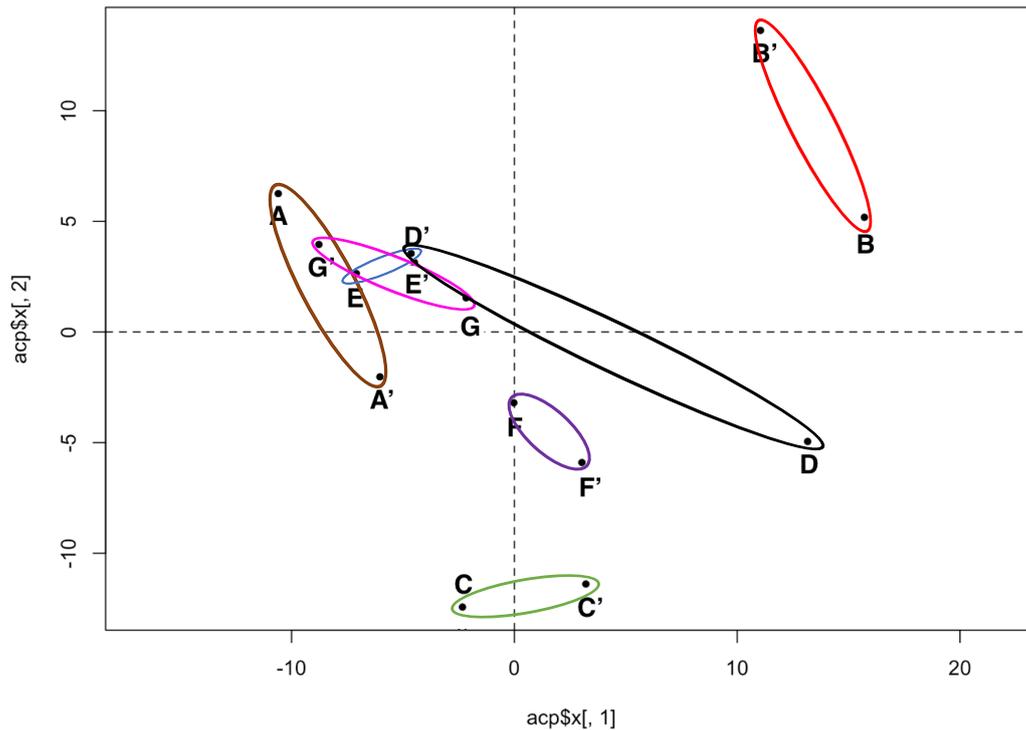
**Figure 14.** Représentation des différences pré et post opératoire chez l'individu dont les différences morphologiques sont les plus faibles. En bleu : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En rose foncée : landmarks reliant le rostre sphénoïdal au maximum de courbure de la face antérieure du sphénoïde. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez.

Nous pouvons constater chez cet individu une modification modéré de la courbure du verre de montre cartilagineux antérieure et un abaissement de la zone de jonction entre le cartilage quadrangulaire, le vomer et la lame perpendiculaire de l'ethmoïde.

### 3.3.3. Analyse des différents types de transformations

La figure 15 représente la répartition des différentes cloisons nasales des individus de notre analyse et de leurs homologues post-opératoires le long des composantes principales numéro 1 et 2.

En étudiant cette figure nous observons qu'il existe différents types de « transformations ». La chirurgie modifie le septum selon un sens que nous pouvons matérialiser graphiquement.



**Figure 15.** Représentation des individus pré et post opératoire le long de la composante principale numéro 1 en fonction de le composante principale numéro 2. Chaque individu et son homologue post opératoire sont reliés entre eux par une ellipse.

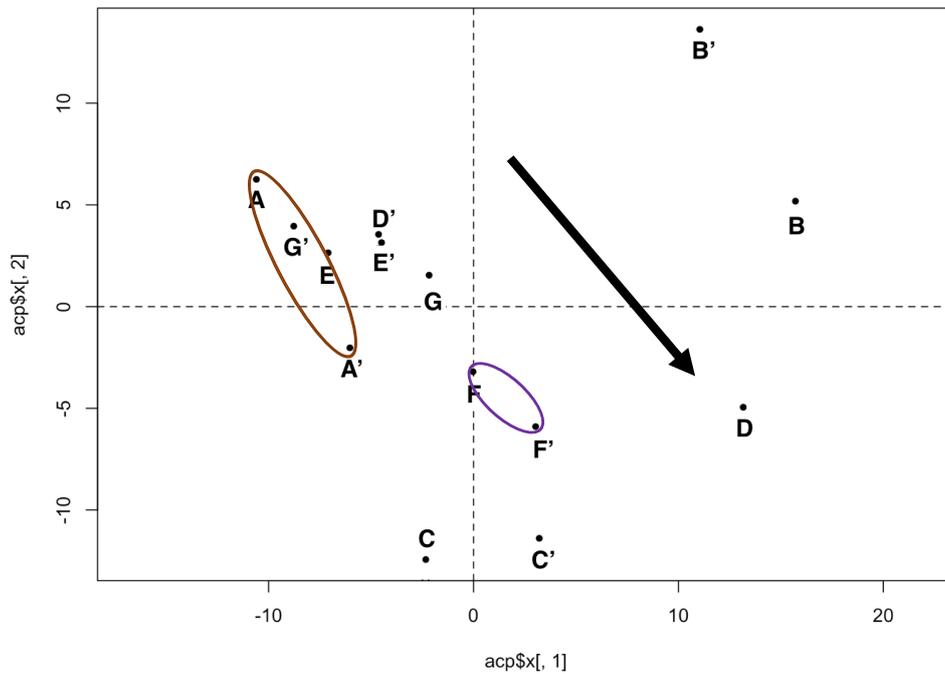
Ainsi nous pouvons décrire trois types de variations entre les cloisons pré-opératoires et les cloisons post-opératoires.

Pour chacune de ces trois variations nous avons comparé les cloisons pré- et post-opératoires qui leurs correspondent. Notre but était ainsi d'identifier les modifications chirurgicales du septum expliquant spécifiquement chacune de ces variations observées.

### Variation n°1 :

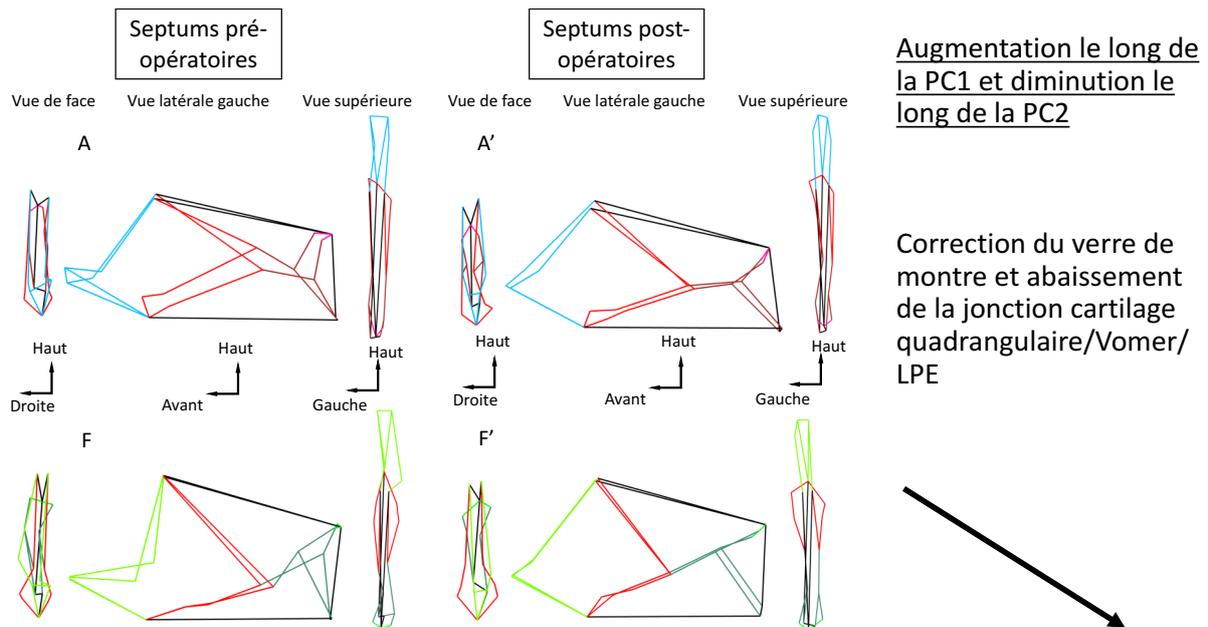
Une première variation se traduisant par une augmentation le long de la composante principale numéro 1 (PC1) et par une diminution le long de la composante principale numéro 2 (PC2). On peut la qualifier de variation « descendante » .

Elle concerne les couples de septum A/A' et les septums F/F' (Figure 16).



**Figure 16.** Représentation graphique de la variation numéro 1 le long de la PC1 en fonction de la PC2

Leurs représentations géométriques étaient les suivantes (Figure 17).



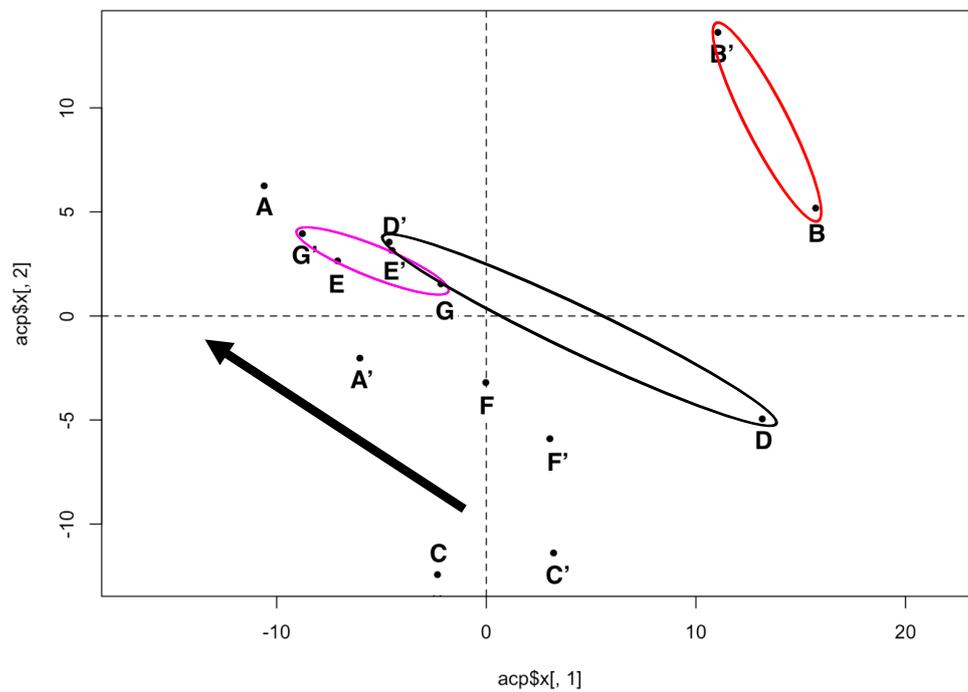
**Figure 17.** Variation numéro 1 : représentation des septums des individus A et F en pré- et post-opératoire. Pour l'individu A : en bleu clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En marron : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez. Pour l'individu F : en vert clair : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En vert : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez.

Les modifications observées selon la variation n°1 sont expliquées par une correction de la déformation en verre de montre antérieure, un affinement modéré du pied de cloison et un abaissement de la zone de jonction du cartilage quadrangulaire, du vomer et de la lame perpendiculaire de l'ethmoïde.

**Variation n°2 :**

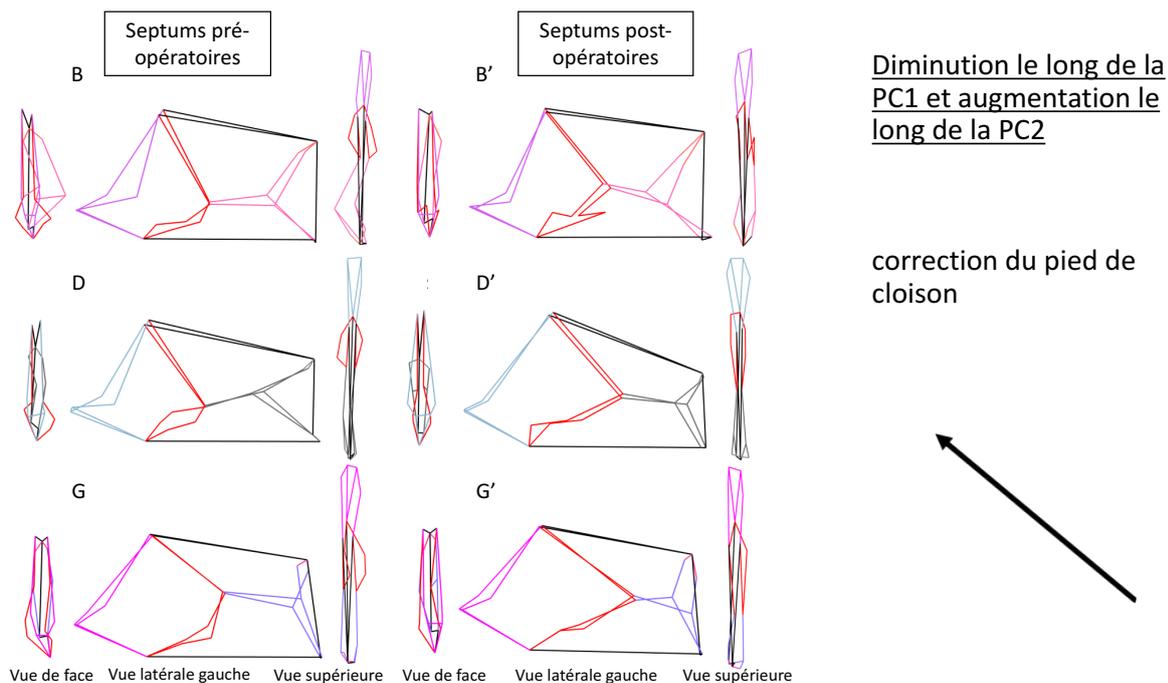
La deuxième variation se traduit par une diminution le long de la PC1 et par une augmentation le long PC2. Il s'agit d'une variation de type « rétrograde ».

Elle concerne les couples de septums B/B', D/D' et les septums G/G' (Figure 18).



**Figure 18.** Représentation graphique de la variation numéro 2 le long de la PC1 en fonction de la PC2

Leurs représentations géométriques étaient les suivantes (Figure 19).



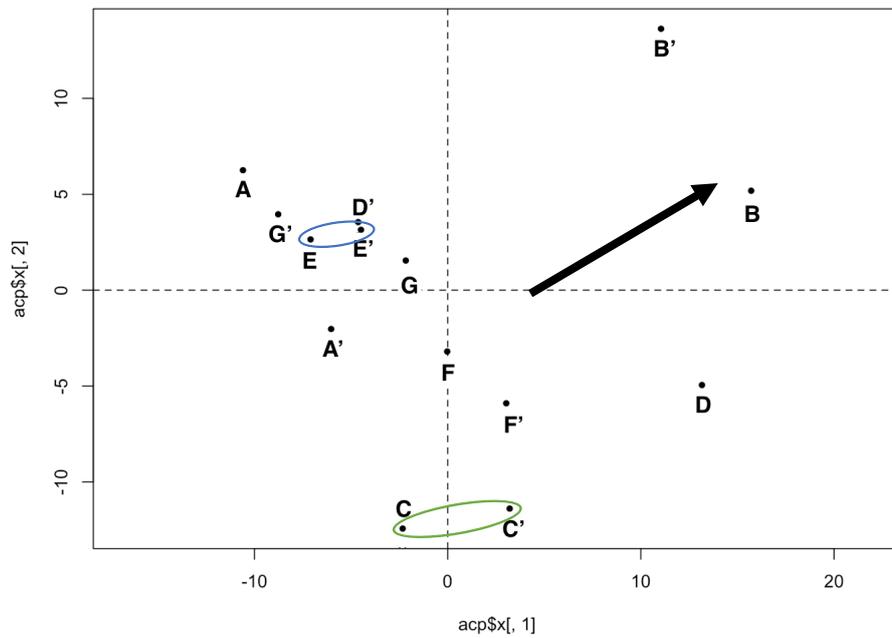
**Figure 19.** Variation numéro 2 : représentation des septums des individus B, D, et G en pré- et post-opératoire. Pour l'individu B : en violet : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En rose : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez. Pour l'individu D : en bleu : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En gris : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez. Pour l'individu G : en rose : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En mauve : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdal et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez.

Les modifications observées selon la variation n°2 sont expliquées essentiellement par une correction du pied de cloison avec un affinement important de celui-ci. Nous pouvons constater également une action sur le rail septal postérieure.

### Variation n°3 :

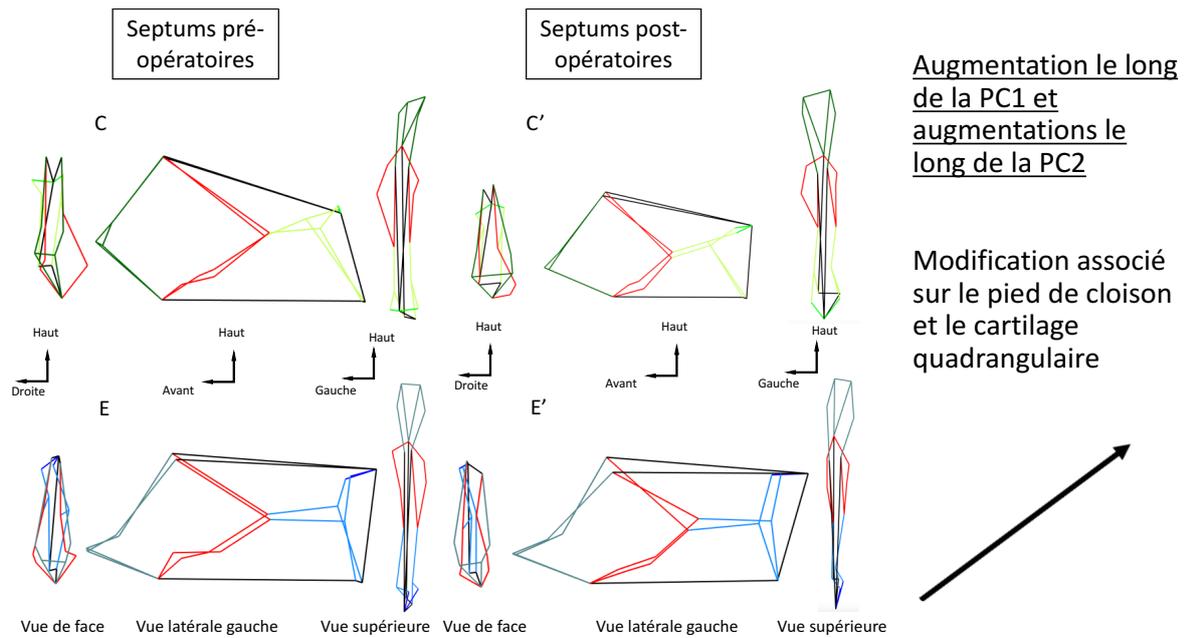
La troisième variation se traduit par une augmentation le long de la PC1 et par une augmentation le long PC2. Il s'agit d'une variation « ascendante ».

Elle concerne les couples de septums C/C' et les septums E/E' (Figure 20).



**Figure 20.** Représentation graphique de la variation numéro 2 le long de la PC1 en fonction de la PC2

Leurs représentations géométriques étaient les suivantes (Figure 21).



**Figure 21.** Variation numéro 3 : représentation des septums des individus C et E en pré- et post-opératoire. Pour l'individu C : en vert foncée : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En vert clair : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdale et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez. Pour l'individu E : en bleu cadet : lignes reliant les landmarks cartilagineux antérieurs. En rouge : lignes reliant les landmarks décrivant le pied de cloison et la partie antérieure du septum osseux. En bleu : lignes reliant les landmarks décrivant le rail septal postérieur. En noir : lignes reliant les landmarks de l'épine nasale antérieure, de la partie postéro inférieure du septum, du rostre sphénoïdale et de la jonction lame perpendiculaire de l'ethmoïde/os propres du nez.

Les modifications observées selon la variation n°3 sont expliquées par une action importante sur le pied de cloison et une modification du cartilage quadrangulaire par un épaissement de celui-ci.

## 4. Discussion

Notre objectif était de démontrer l'apport de la morphométrie géométrique dans l'évaluation des corrections apportées par la septoplastie sur la morphologie du septum nasal.

Ce travail s'inscrit dans une démarche scientifique globale portant sur les interactions conformation / fonction de la sphère ORL. Le septum nasal est un des organes dont on modifie la conformation en vue d'améliorer une fonction (30). Il est donc important de rechercher quelles sont les conformations existantes du septum, mais aussi quelles sont les transformations apportées par la chirurgie. Les outils statistiques actuels offrent de grandes perspectives dans ce domaine.

La morphométrie géométrique est un outil statistique moderne d'analyse spécifique de la forme d'un objet en s'affranchissant de la taille et de l'orientation de celui-ci. C'est une technique moderne faisant appel à des outils puissants de reconstruction 3D et statistiques utilisées essentiellement en anthropologie et en paléoanthropologie (16,17,19–21,27). Son intérêt principal réside en la possibilité de visualisation des transformations conformationnelles des objets étudiés. Cette méthode n'a jamais été appliquée auparavant dans l'analyse de la cloison nasale. Une étude publiée en 2017 a fait appel à la morphométrie géométrique afin d'étudier les interactions entre le septum nasale et le squelette du massif facial chez l'homme pendant la croissance. Mais il s'agissait d'une population pédiatrique de 7 à 18 ans et les points repères utilisés étaient situés en périphérie du septum et non sur les zones les plus déviées du septum (31). La morphométrie « traditionnelle » n'a pas été utilisée dans cette étude car elle présente de nombreux inconvénients. Ils sont liés aux mesures des distances linéaires. Tout d'abord, les distances mesurées sont fortement corrélées à la taille des individus, elles nécessitent une correction. L'utilisation de rapports de distances (indices) permet de « gommer » la différence d'échelles entre deux objets, mais entraînera nécessairement des imprécisions importantes. De plus, deux objets de formes complètement différentes, peuvent présenter des distances linéaires ou des indices identiques (hauteur, largeur...). Du fait de ces inconvénients, les relations géométriques entre les variables ne sont pas conservées, ce qui rend impossible la représentation graphique de la forme de l'objet. La morphométrie « traditionnelle » ne permet pas de conserver les informations de forme d'un objet, c'est-à-dire sa conformation.

Un premier travail de recherche fondamental de master 2 a permis d'étudier par la morphométrie géométrique la variabilité de la cloison nasale chez une population d'adulte tout venant composée de 91 individus. A partir de leurs scanners, nous avons reconstruit une représentation 3D leur cloison nasale osseuse et leur cloison nasale muqueuse. Nous avons étudié 10 landmarks de type II situés en surface de la muqueuse septale en les comparant aux 10 landmarks de type I correspondant situés sur la cloison osseuse. Ce travail initial nous a permis de montrer la validité de cette démarche dans l'étude anatomique de la morphologie de la cloison nasale.

Par la suite dans le cadre d'une seconde étude, nous avons utilisé cette méthode sur une population pathologique de 50 individus. Il s'agissait de personnes se plaignant d'obstruction nasale objectivée par les données de leur rhinomanométrie et chez lesquelles une indication chirurgicale avait été retenue. L'utilisation de landmarks pour l'analyse du septum nasale ayant été validé lors du premier travail, nous avons pu à l'aide de landmarks supplémentaires caractériser de manière précise les régions les plus déviées. Le pied de cloison, le verre de montre antérieure cartilagineux et le rail septal postérieure (31). Un total de 30 landmarks ont été utilisés. Cette étude nous a permis d'identifier quatre groupes de patients répartis en fonctions de leur caractéristiques morphologiques. Pour chacun de ces groupes nous avons identifiés leur conformations moyennes. Nous avons calculé la résistance moyenne et nous avons démontré que les valeurs des résistances observés au sein de chacun de ces groupes étaient statistiquement significatives par rapport à un groupe témoin. Cette étude nous a permis de mettre en relation de manière objective la morphologie de la cloison nasale avec l'obstruction nasale. Les points repères du septum et de l'orifices piriformes ont été validés lors de ce travail. Leur fiabilité, évaluée par la mesure de leur répétabilité était de 7,9 %. Il s'agit du pourcentage de différences liés à l'erreur de pose des points repères par la même personne à 1 mois d'intervalle. Ceci dénote de leur bonne précision. Celle-ci aurait dû être étayée par une détermination de leur reproductibilité en comparant le pourcentage de différence lorsque ces points repères sont posés par deux personnes différentes.

Ce travail de mémoire de DES constitue la troisième étape de notre démarche scientifique d'étude du septum nasal. Il s'agit d'une étude monocentrique rétrospective. Les individus analysés dans cette étude ont tous été inclus dans notre précédent travail réalisé sur une population pathologique, ayant fait l'objet d'une thèse sur l'apport de la morphométrie géométrique dans l'approche de l'obstruction nasale. Parmi cette population, nous avons sélectionnés les patients pour lesquelles nous disposions d'imagerie scanner du massif facial pré- et post-opératoire.

Le faible effectif de ce travail peut s'expliquer par le fait que les examens tomodensitométriques des fosses nasales sont rarement pratiqués en post-opératoire de chirurgie septale. Le caractère invasif de cet examen a toujours justifié le fait de ne pas exposer les patients à une irradiation inutile. Les scanners post-opératoires utilisés dans notre travail ont tous été réalisés pour une raison médicale justifiée. Pour certains patients des complications, la survenue d'un saignement ou des céphalées ont légitimés la prescription de cette imagerie post-opératoire. Pour d'autres le scanner a été réalisé très à distance de la chirurgie pour raison médicale extra ORL et celui-ci incluait des acquisitions au niveau du massif facial. Ces contraintes peuvent être à l'origine d'un biais de recrutement pour notre étude.

Les scanners utilisés dans notre travail devaient être de bonne qualité en coupe fines avec un chevauchement des coupes contiguës, ce qui permettait une bonne précision anatomique des reconstructions 3D sans pertes d'informations.

Plusieurs problèmes ont rendu le processus de segmentation 3D difficile voire impossible :

1. Présence d'artefacts dentaires : les images deviennent floues dans certaines régions
2. Epaisseur des coupes trop importantes : des coupes d'épaisseur supérieure à 1mm sont responsables d'un bruitage de l'image
3. Choix du seuil de segmentation : si le seuil choisi est trop bas ou quand l'organe est représenté dans une large plage de niveaux de gris, la segmentation peut alors englober des régions d'organes voisins dont les valeurs sont dans la plage du seuillage, ou à l'inverse si le seuil est trop haut, la segmentation va supprimer des zones de septum. Une bonne connaissance de l'anatomie est nécessaire pour valider le choix du seuil de segmentation afin de reconstruire une géométrie 3D aussi proche que possible de la réalité anatomique
4. Choix de smoothness et de l'expansion du contour actif : deux paramètres régulent le comportement de l'expansion du contour actif, le paramètre de rugosité et celui de pression. Une analogie peut être faite avec le gonflement d'un ballon. Le paramètre de rugosité permet de régler la façon dont le contour va épouser plus ou moins les formes. Le paramètre de pression agit sur la capacité du contour actif à pénétrer les zones étroites. Dans notre cas, le paramètre d'expansion a été réglé au maximum pour permettre au contour actif de passer les régions anatomiques étroites

Quatorze cloisons nasales ont été reconstruites et analysées au total. Dans notre étude nous avons repris les landmarks qui avait été validés lors des précédents travaux. Nous n'avons pas inclus dans notre analyse les points repères de l'orifices piriformes. En effet, notre population comportait des individus opérés de rhinoseptoplastie, geste qui apportait une modification de la morphologie de l'orifice piriforme et des os propres du nez. Celle-ci aurait interféré sur notre analyse des variations morphologique des septums entre le pré- et le post-opératoire Le taux de répétabilité de ces points repères est relativement faible (7,9%) par rapport aux différences que nous avons observés entre les cloisons pré et post opératoire (Taux de 56,9%). Ceci nous permet d'affirmer que les variations morphologiques que nous avons constatées ne sont pas liées à une erreur de mesure. Cette différence entre les individus pré et post opératoire a été estimé par MANOVA Procruste, ce test donne une vue globale des modifications observés après la chirurgie. Cette méthode ne nous donne pas d'information précise sur le ou les points repères qui ont été spécifiquement impactées. Notre analyse visuelle permet de décrire les zones anatomiques du septum qui ont été modifiés mais nous ne pouvons pas quantifiés cette modification. Il s'agit de différences importantes, elles soulignent l'effet majeur de la septoplastie sur l'anatomie de la cloison nasale. Jamais aucune étude n'a permis auparavant de pouvoir quantifier de manière chiffrée l'effet de la correction morphologique chirurgicale sur le septum.

En calculant les distances euclidiennes séparant chacune des cloisons nasales analysées nous avons déterminé l'individu chez lequel la différence entre le pré- et le post-opératoire était la plus importante et celui chez lequel elle était la plus faible (32–34). Dans ce cas la chirurgie a permis une correction morphologiquement efficace du rail septal postérieur et du pied de cloison. L'efficacité morphologique d'une correction se jugeant par l'établissement d'une cloison nasale la plus parallèle au plan sagittal médian. Chez l'individu pour lequel la différence entre le pré- et le post-opératoire était la plus faible, nous avons pu observer que le septum de celui-ci ne présentait pas en pré-opératoire de déviation majeure. L'analyse de ces deux individus extrêmes souligne qu'il existe une bonne corrélation entre les observations clinico-radiologiques et les constatations morphométriques. Les landmarks que nous avons utilisé permettent de décrire en adéquation avec la clinique et l'imagerie, la morphologie de la cloison nasale. La morphométrie géométrique nous donne ainsi une information fiable.

L'analyse procuste généralisée de la MANOVA Procuste a permis traiter toutes les cloisons nasales de l'étude en leur imprimant une rotation afin de les mettre dans la même orientation, en les translatant pour qu'elles soient dans le même plan et en les mettant à la même échelle (27,35). Tout ce processus a permis de rendre comparable la morphologie des cloisons nasale de notre analyse. L'analyse en composantes principales a permis de visualiser graphiquement la variabilité morphologique des septums. En observant la répartition des couples de septum pré- et post-opératoire le long de la composante principale numéro 1 nous avons constaté 3 types de variation morphologique générée par la chirurgie. Les modifications observées selon la variation n°1 « descendante » sont expliquées par une correction de la déformation en verre de montre antérieure, un affinement modéré du pied de cloison et un abaissement de la zone de jonction du cartilage quadrangulaire, du vomer et de la lame perpendiculaire de l'ethmoïde. Les modifications observées selon la variation n°2 « rétrograde » sont expliquées essentiellement par une correction du pied de cloison avec un affinement important de celui-ci avec une action également sur le rail septal postérieure. Les modifications observées selon la variation n°3 « ascendante » sont expliquées par une action importante sur le pied de cloison. L'action sur le pied de cloison est commune à tous les types de variations observés. Elle constitue la correction de base en plus de laquelle viennent s'ajouter soit un geste sur le cartilage quadrangulaire ou une action sur le rail septal postérieure. Ceci démontre ainsi que notre méthode permet d'identifier de manière précise le geste chirurgical qui a été réalisé. Nous avons ainsi approché de manière concrète l'effet de la chirurgie septale sur la morphologie de la cloison nasale.

Ce travail a montré qu'il est possible, à partir du scanner, de:

- Définir au sein d'une population les individus présentant les déformations septales les plus importantes au plan morphologique
- Définir quels sont les individus présentant la correction de leur déformation la plus importante
- Définir quels sont les variations de conformation induites par la chirurgie

Ces observations, qui nécessitent d'être renforcées par une étude sur un effectifs plus grand, offrent des perspectives intéressantes en vue de sélection d'individus pour des simulations.

## 5. Conclusion

La septoplastie est l'une des interventions les plus fréquentes en Oto-Rhino-Laryngologie et Chirurgie Cervico-Faciale. La morphométrie géométrique est un outil fiable d'étude de la morphologie de la cloison nasale. Nous avons appliqué cette technique chez une population de patient opéré de septoplastie. Le pourcentage de différence qu'il existe entre les conformations pré- et post-opératoires des cloisons nasales est de 56,9%. La chirurgie septale modifie de manière importante l'anatomie de la cloison. Notre étude a permis de le quantifier de décrire ces transformations. D'autres études sont nécessaires afin de déterminer si ce pourcentage de différence observé est variable ou s'il est retrouvé de manière constante. Existe-t-il un seuil partir duquel nous pouvons juger l'efficacité de la chirurgie ? Cette méthode couplée aux données de la rhinomanométrie post opératoire et aux études en dynamique des fluides de la ventilation nasale s'inscrit de manière globale dans une démarche d'amélioration de la pratique de la septoplastie en vue de pouvoir cibler de manière précise les modifications à apporter sur le septum d'un patient afin de corriger le plus efficacement possible son obstruction nasale.

## 6. Bibliographie

1. Cottle MH, Loring GG, Fischer, Gaynon IE. The maxilla-premaxilla approach to extensive nasal septum surgery. *AMA Arch Otolaryngol.* 1958;68:301-13.
2. Gray LP. Deviated nasal-septum - incidence and etiology. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 1978;87(3):3-20.
3. Kim J, Cho JH, Kim SW, Kim BG, Lee DC, Kim SW. Anatomical Variation of the Nasal Septum: Correlation Among Septal Components. *Clin Anat.* 2010;23:945-949.
4. Min YG, Jung HW, Kim CS. Prevalence study of nasal septal deformities in Korea: results of a nationwide survey. *Rhinology.* 1995;33:61-5.
5. Mladina R, Cujic E, Subaric M, Vukovic K. Nasal septal deformities in ear, nose, and throat patients: An international study. *Am J Otolaryng.* 2008;29:75-82.
6. Mladina R, Skitarelic N, Poje G, Subaric M. Clinical Implications of Nasal Septal Deformities. *Balk Med J.* 2015;32:137-146.
7. Cho GS, Jang YJ. Deviated Nose Correction: Different Outcomes According to the Deviation Type. *Laryngoscope.* 2013 May;123(5):1136-1142.
8. Sedaghat AR, Busaba NY, Cunningham MJ, Kieff DA. Clinical Assessment is an Accurate Predictor of Which Patients Will Need Septoplasty. *Laryngoscope.* 2013 Jan;123(1):48-52.
9. Ipan MJ, Most SP. Development of a severity classification system for subjective nasal obstruction. *JAMA Facial Plast Surg.* 2014;15(5):358-361.
10. Pirila T, Tikanto J. Unilateral and bilateral effects of nasal septum surgery demonstrated with acoustic rhinometry, rhinomanometry, and subjective assessment. *Am J Rhinol.* 2001 Apr;15(2):127-33.
11. Stewart MG, Witsell DL, Smith TL, Weaver EM, Yueh B, Hannley MT. Development and validation of the Nasal Obstruction Symptom Evaluation (NOSE) Scale. *Otolaryngol-Head Neck Surg.* 2004 Feb;130(2):157-63.
12. Aziz T, Biron VL, Ansari K, Flores C. Measurement tools for the diagnosis of nasal septal deviation: a systematic review. *J Otolaryngol-Head N.* 2014 Apr 24;43(11)

13. Moore M, Eccles R. Objective evidence for the efficacy of surgical management of the deviated septum as a treatment for chronic nasal obstruction: a systematic review. *Clin Otolaryngol.* 2011 Apr;36(2):106-13.
14. Spoor CF, Zonneveld FW, and Macho GA. Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: applications and problems. *Am J Phys Anthropol.* 1993;91(4):469-484.
15. Kim J, Han SH, Kim SW, Cho JH, Park YJ. Clinical Significance of the Sphenoidal Process of the Cartilaginous Nasal Septum: A Preliminary Morphological Evaluation. *Clin Anat.* 2010 Apr;23(3):265-9.
16. Bookstein F. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. *J Classif.* 1993;10(1):133-136
17. Bookstein F. Foundations of morphometrics. *Annu Rev Ecol Evol S.* 1982;13:451-470.
18. Sastre J. Etude tridimensionnelle de la partie postérieure de la base du crâne chez le fœtus : applications à la détermination de l'âge en anthropologie médico-légale. [Thèse, Marseille]. Marseille: Université Aix-Marseille Faculté de Médecine ; 2011
19. Baylac M. Morphométrie géométrique et systématique. *Biosystema.* 1996;14:73-89.
20. Bookstein FL. Landmark methods for forms without landmarks : morphometrics of group differences in outline shape. *Med Image Anal.* 1997;1:225-243.
21. O'Higgins P. The study of morphological variation in the hominid fossil record: biology, landmarks and geometry. *J Anat.* 2000; 197(1):103-120.
22. Oxnard C, O'Higgins P. Biology clearly needs morphometrics. Does morphometrics need biology?. *Biological Theory.* 2009;4(1):84-97.
23. Delmas, Rouvière. Anatomie humaine descriptive topographique et fonctionnelle. Tête et cou. 2002;1.
24. Klossek JM, Desmons C, Serrano E, Percodani J. Anatomie des cavités nasosinusiennes. Masson EM [en ligne]. 1997, article 1234. Disponibilité sur internet : <<http://www.em-consulte.com/article/1234/anatomie-des-cavités-nasosinusiennes/>>
25. Michel J. Contribution à l'étude des cavités naso-sinusiennes de l'adulte par morphométrie géométrique et la simulation numérique des écoulements [Thèse de Doctorat d'Université, Anthropologie]. Marseille: Université Aix-Marseille Faculté de Médecine ; 2015.
26. Paul AY, Piven J, Hazlett HC, Gimpel Smith R, Ho S, Gee JC, Gerig G. User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: Significantly improved efficiency and reliability. *Neuroimage* 2006 Jul 1;31(3):1116-28.
27. Kendall DG. Shape manifold, Procrustean metrics and complex projective spaces. *B Lond Math Soc.* 1984;16:81-121.
28. Mitteroecker P, Gunz P. Advances in Geometric Morphometrics. *Evol Biol.* 2009 Jun;36(2):235-47.

29. Moreddu E, Puymeraill L, Michel J, Achache M, Dessi P, Adalian P. Morphometric measurements and sexual dimorphism of the piriform aperture in adults. *Surg Radiol Anat.* 2013;35(10):917-24.
30. Baumann I, Baumann H. A new classification of septal deviations. *Rhinology.* 2007 Sep;45(3):220-223.
31. Goergen MJ, Holton NE, Grünheid T. Morphological interaction between the nasal septum and nasofacial skeleton during human ontogeny. *J Anat.* 2017 May;230(5):689-700.
32. Mardia KV, Dryden IL. The statistical analysis of shape data. *Biometrika.* 1989 Jun 1;76(2):271-81.
33. Elmore KL, Richman MB. Euclidean Distance as a Similarity Metric for Principal Component Analysis. *Mon Weather Rev.* 2001 Mar;129(3):540-9.
34. Carbó-Dorca R. Scaled Euclidian distances: a general dissimilarity index with a suitably defined geometrical foundation. *J Math Chem.* 2012 Avr;50(4):734-40.
35. Slice DE. Landmark coordinates aligned by Procrustes analysis do not lie in Kendall's shape space. *Syst Biol.* 2001;50:141-149.

## Conclusion générale

Le septum nasal a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques s'attachant à le décrire dans sa conformation et tentant de définir les meilleurs moyens de corriger ses anomalies architecturales. De nouveaux outils de bio-statistiques ont vu le jour ces dernières années. Ils semblent offrir des perspectives intéressantes pour l'étude de la conformation des objets complexes. Nous avons montré, dans les trois volets de ce travail de thèse, le grand intérêt de la morphométrie géométrique dans la caractérisation des déformations du septum nasal, en suivant une démarche scientifique rationnelle.

Notre première étude a permis de définir et de valider une méthode d'analyse du septum nasal à l'aide de la morphométrie géométrique sur une population de sujets sains.

La seconde étude, nous a permis d'établir, par une méthode statistique fiable et reproductible, une classification des déformations du septum nasal chez des individus se plaignant d'obstruction nasale. Nous avons pu, ainsi, décrire 4 types de déviation septale, chacune associée à une sévérité d'obstruction nasale différente.

Dans la troisième partie, nous avons étudié les variations morphologiques du septum nasal induites par les chirurgies correctrices de type septoplastie ou rhinoseptoplastie.

Ces travaux, qui ont portés sur des sujets sains, puis sur des sujets pathologiques et enfin sur des patients opérés, nous ont offert une meilleure compréhension de la morphologie du septum nasal et des conséquences fonctionnelles de nos chirurgies. Ils doivent maintenant être étendus à de plus larges séries mais surtout, servir de socle à la sélection de cas, pour des études en simulation numérique des écoulements. La meilleure compréhension des

interactions conformation/fonction nous permettra, probablement, dans l'avenir, d'améliorer le diagnostic et le traitement de l'obstruction nasale.

## SERMENT D'HIPPOCRATE

Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.

Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis(e) dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu(e) à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque.