



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale -
Pas de Modification 2.0 France (CC BY-NC-ND 2.0)



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/fr>

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

FACULTE DE MEDECINE LYON EST

Année 2018

n° 261

**Analyse critique de la biométrie de l'anneau mitral par
imageries de coupe**

*Bases anatomiques, imageries et étude clinique comparative avec
mesures perchirurgicales*

THESE D'EXERCICE EN MEDECINE

Présentée à l'université Claude Bernard Lyon 1

Et soutenue publiquement le 10 octobre 2018

En vue d'obtenir le grade de Docteur en médecine

Par

William UHLRICH

Né le 06 septembre 1989

A Sainte-Foy-Les-Lyon

Sous la direction du Professeur Gérard FINET

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

FACULTE DE MEDECINE LYON EST

Année 2018

n° 261

**Analyse critique de la biométrie de l'anneau mitral par
imageries de coupe**

*Bases anatomiques, imageries et étude clinique comparative avec
mesures perchirurgicales*

THESE D'EXERCICE EN MEDECINE

Présentée à l'université Claude Bernard Lyon 1

Et soutenue publiquement le 10 octobre 2018

En vue d'obtenir le grade de Docteur en médecine

Par

William UHLRICH

Né le 06 septembre 1989

A Sainte-Foy-Les-Lyon

Sous la direction du Professeur Gérard FINET

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

FACULTE DE MEDECINE LYON EST

Année 2018

n° 261

Analyse critique de la biométrie de l'anneau mitral par imageries de coupe

Bases anatomiques, imageries et étude clinique comparative avec mesures perchirurgicales

THESE D'EXERCICE EN MEDECINE

William UHLRICH

Composition du jury

Président	Monsieur le Professeur Gérard Finet	UFR Claude Bernard Lyon-Est
Directeur	Monsieur le Professeur Gérard Finet	UFR Claude Bernard Lyon-Est
Membres	Monsieur le Professeur Jean-François OBADIA	UFR Claude Bernard Lyon-Est
	Monsieur le Professeur Gilles RIOUFOL	UFR Charles Mérieux Lyon-Sud
	Madame le Professeur Hélène THIBAUT	UFR Claude Bernard Lyon-Est
	Monsieur le Docteur Matteo POZZI	Hôpital Louis Pradel

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD – LYON 1

Président	Frédéric FLEURY
Président du Comité de Coordination des Etudes Médicales	Pierre COCHAT
Directrice Générale des Services	Dominique MARCHAND
<u>Secteur Santé</u>	
UFR de Médecine Lyon Est	Doyen : Gilles RODE
UFR de Médecine Lyon Sud- Charles Mérieux	Doyen : Carole BURILLON
Institut des Sciences Pharmaceutiques Et Biologiques (ISPB)	Directrice : Christine VINCIGUERRA
UFR d'Odontologie	Directeur : Denis BOURGEOIS
Institut des Sciences et Techniques De Réadaptation (ISTR)	Directeur : Xavier PERROT
Département de Biologie Humaine	Directrice : Anne-Marie SCHOTT
<u>Secteur Sciences et Technologie</u>	
UFR de Sciences et Technologies	Directeur : Fabien de MARCHI
UFR de Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS)	Directeur : Yannick VANPOULLE
Polytech Lyon	Directeur : Emmanuel PERRIN
I.U.T.	Directeur : Christophe VITON
Institut des Sciences Financières Et Assurances (ISFA)	Directeur : Nicolas LEBOISNE
Observatoire de Lyon	Directrice : Isabelle DANIEL
Ecole Supérieure du Professorat Et de l'Education (ESPE)	Directeur : Alain MOUGNIOTTE

Faculté de Médecine Lyon Est Liste des enseignants 2017/2018

Professeurs des Universités – Praticiens Hospitaliers Classe exceptionnelle Echelon 2

Blay	Jean-Yves	Cancérologie ; radiothérapie
Borson-Chazot	Françoise	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale
Cochat	Pierre	Pédiatrie
Cordier	Jean-François	Pneumologie ; addictologie
Etienne	Jérôme	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
Guérin	Claude	Réanimation ; médecine d'urgence
Guérin	Jean-François	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
Mornex	Jean-François	Pneumologie ; addictologie
Nighoghossian	Norbert	Neurologie
Ovize	Michel	Physiologie
Ponchon	Thierry	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
Revel	Didier	Radiologie et imagerie médicale
Rivoire	Michel	Cancérologie ; radiothérapie
Rudigoz	René-Charles	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
Thivolet-Bejui	Françoise	Anatomie et cytologie pathologiques
Vandenesch	François	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

Professeurs des Universités – Praticiens Hospitaliers Classe exceptionnelle Echelon 1

Breton	Pierre	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
Chassard	Dominique	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Claris	Olivier	Pédiatrie
Colin	Cyrille	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
D'Amato	Thierry	Psychiatrie d'adultes ; addictologie
Delahaye	François	Cardiologie
Denis	Philippe	Ophthalmologie
Disant	François	Oto-rhino-laryngologie
Douek	Philippe	Radiologie et imagerie médicale
Ducerf	Christian	Chirurgie digestive
Finet	Gérard	Cardiologie
Gaucherand	Pascal	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
Herzberg	Guillaume	Chirurgie orthopédique et traumatologique
Honorat	Jérôme	Neurologie
Lachaux	Alain	Pédiatrie
Lehot	Jean-Jacques	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Lermusiaux	Patrick	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
Lina	Bruno	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
Martin	Xavier	Urologie
Mellier	Georges	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
Mertens	Patrick	Anatomie
Miossec	Pierre	Immunologie
Morel	Yves	Biochimie et biologie moléculaire
Moulin	Philippe	Nutrition

Négrier	Claude	Hématologie ; transfusion
Négrier	Sylvie	Cancérologie ; radiothérapie
Ninet	Jean	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
Obadia	Jean-François	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
Rode	Gilles	Médecine physique et de réadaptation
Terra	Jean-Louis	Psychiatrie d'adultes ; addictologie
Zoulim	Fabien	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie

Professeurs des Universités – Praticiens Hospitaliers

Première classe

Ader	Florence	Maladies infectieuses ; maladies tropicales
André-Fouet	Xavier	Cardiologie
Argaud	Laurent	Réanimation ; médecine d'urgence
Aubrun	Frédéric	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Badet	Lionel	Urologie
Barth	Xavier	Chirurgie générale
Bessereau	Jean-Louis	Biologie cellulaire
Berthezene	Yves	Radiologie et imagerie médicale
Bertrand	Yves	Pédiatrie
Boillot	Olivier	Chirurgie digestive
Braye	Fabienne	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie
Chevalier	Philippe	Cardiologie
Colombel	Marc	Urologie
Cottin	Vincent	Pneumologie ; addictologie
Cotton	François	Radiologie et imagerie médicale
Devouassoux	Mojgan	Anatomie et cytologie pathologiques
Di Filippo	Sylvie	Cardiologie
Dumontet	Charles	Hématologie ; transfusion
Dumortier	Jérôme	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
Durieu	Isabelle	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; médecine générale ; addictologie
Ederly	Charles Patrick	Génétique
Fauvel	Jean-Pierre	Thérapeutique ; médecine d'urgence ; addictologie
Guenot	Marc	Neurochirurgie
Gueyffier	François	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
Guibaud	Laurent	Radiologie et imagerie médicale
Javouhey	Etienne	Pédiatrie
Juillard	Laurent	Néphrologie
Jullien	Denis	Dermato-vénéréologie
Kodjikian	Laurent	Ophthalmologie
Krolak Salmon	Pierre	Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; médecine générale ; addictologie
Lejeune	Hervé	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
Mabrut	Jean-Yves	Chirurgie générale
Merle	Philippe	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
Mion	François	Physiologie
Morelon	Emmanuel	Néphrologie
Mure	Pierre-Yves	Chirurgie infantile
Nicolino	Marc	Pédiatrie
Picot	Stéphane	Parasitologie et mycologie
Raverot	Gérald	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale

Rouvière	Olivier	Radiologie et imagerie médicale
Roy	Pascal	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
Saoud	Mohamed	Psychiatrie d'adultes
Schaeffer	Laurent	Biologie cellulaire
Scheiber	Christian	Biophysique et médecine nucléaire
Schott-Pethelaz	Anne-Marie	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
Tilikete	Caroline	Physiologie
Truy	Eric	Oto-rhino-laryngologie
Turjman	Francis	Radiologie et imagerie médicale
Vanhems	Philippe	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
Vukusic	Sandra	Neurologie

Professeurs des Universités – Praticiens Hospitaliers Seconde Classe

Bacchetta	Justine	Pédiatrie
Boussel	Loïc	Radiologie et imagerie médicale
Calender	Alain	Génétique
Chapurlat	Roland	Rhumatologie
Charbotel	Barbara	Médecine et santé au travail
Chêne	Gautier	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
Collardeau Frachon	Sophie	Anatomie et cytologie pathologiques
Crouzet	Sébastien	Urologie
Cucherat	Michel	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
Dargaud	Yesim	Hématologie ; transfusion
David	Jean-Stéphane	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Di Rocco	Federico	Neurochirurgie
Dubernard	Gil	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
Dubourg	Laurence	Physiologie
Ducray	François	Neurologie
Fanton	Laurent	Médecine légale
Fellahi	Jean-Luc	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Ferry	Tristan	Maladie infectieuses ; maladies tropicales
Fourneret	Pierre	Pédopsychiatrie ; addictologie
Gillet	Yves	Pédiatrie
Girard	Nicolas	Pneumologie
Gleizal	Arnaud	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
Henaine	Roland	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
Hot	Arnaud	Médecine interne
Huissoud	Cyril	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
Jacquin-Courtois	Sophie	Médecine physique et de réadaptation
Janier	Marc	Biophysique et médecine nucléaire
Lesurtel	Mickaël	Chirurgie générale
Levrero	Massimo	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
Maucort Boulch	Delphine	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
Michel	Philippe	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
Million	Antoine	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire
Monneuse	Olivier	Chirurgie générale
Nataf	Serge	Cytologie et histologie
Peretti	Noël	Nutrition
Pignat	Jean-Christian	Oto-rhino-laryngologie
Poncet	Gilles	Chirurgie générale
Poulet	Emmanuel	Psychiatrie d'adultes ; addictologie

Ray-Coquard	Isabelle	Cancérologie ; radiothérapie
Rheims	Sylvain	Neurologie
Richard	Jean-Christophe	Réanimation ; médecine d'urgence
Rimmele	Thomas	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Robert	Maud	Chirurgie digestive
Rossetti	Yves	Physiologie
Souquet	Jean-Christophe	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
Thaumat	Olivier	Néphrologie
Thibault	Hélène	Physiologie
Wattel	Eric	Hématologie ; transfusion

Professeur des Universités - Médecine Générale

Flori	Marie
Letrilliat	Laurent
Moreau	Alain
Zerbib	Yves

Professeurs associés de Médecine Générale

Lainé	Xavier
-------	--------

Professeurs émérites

Baulieux	Jacques	Cardiologie
Beziat	Jean-Luc	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
Chayvialle	Jean-Alain	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
Cordier	Jean-François	
Daligand	Liliane	Médecine légale et droit de la santé
Droz	Jean-Pierre	Cancérologie ; radiothérapie
Floret	Daniel	Pédiatrie
Gharib	Claude	Physiologie
Gouillat	Christian	Chirurgie digestive
Mauguière	François	Neurologie
Michallet	Mauricette	Hématologie ; transfusion
Neidhardt	Jean-Pierre	Anatomie
Petit	Paul	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Sindou	Marc	Neurochirurgie
Touraine	Jean-Louis	Néphrologie
Trepo	Christian	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
Trouillas	Jacqueline	Cytologie et histologie
Viale	Jean-Paul	Réanimation ; médecine d'urgence

Maîtres de Conférence – Praticiens Hospitaliers

Hors classe

Benchaib	Mehdi	Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale
Bringuier	Pierre-Paul	Cytologie et histologie
Chalabreysse	Lara	Anatomie et cytologie pathologiques
Germain	Michèle	Physiologie
Jarraud	Sophie	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière

Le Bars	Didier	Biophysique et médecine nucléaire
Normand	Jean-Claude	Médecine et santé au travail
Persat	Florence	Parasitologie et mycologie
Piaton	Eric	Cytologie et histologie
Sappey-Marinier	Dominique	Biophysique et médecine nucléaire
Streichenberger	Nathalie	Anatomie et cytologie pathologiques
Tardy Guidollet	Véronique	Biochimie et biologie moléculaire

Maîtres de Conférence – Praticiens Hospitaliers

Première classe

Barnoud	Raphaëlle	Anatomie et cytologie pathologiques
Bontemps	Laurence	Biophysique et médecine nucléaire
Charrière	Sybil	Nutrition
Confavreux	Cyrille	Rhumatologie
Cozon	Grégoire	Immunologie
Escuret	Vanessa	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
Hervieu	Valérie	Anatomie et cytologie pathologiques
Kolopp-Sarda	Marie Nathalie	Immunologie
Lesca	Gaëtan	Génétique
Lukaszewicz	Anne-Claire	Anesthésiologie-réanimation ; médecine d'urgence
Meyronet	David	Anatomie et cytologie pathologiques
Phan	Alice	Dermato-vénéréologie
Pina-Jomir	Géraldine	Biophysique et médecine nucléaire
Plotton	Ingrid	Biochimie et biologie moléculaire
Rabilloud	Muriel	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
Roman	Sabine	Physiologie
Schluth-Bolard	Caroline	Génétique
Tristan	Anne	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
Venet	Fabienne	Immunologie
Vlaeminck-Guillem	Virginie	Biochimie et biologie moléculaire

Maîtres de Conférences – Praticiens Hospitaliers

Seconde classe

Bouchiat Sarabi	Coralie	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
Casalegno	Jean-Sébastien	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
Cour	Martin	Réanimation ; médecine d'urgence
Coutant	Frédéric	Immunologie
Curie	Aurore	Pédiatrie
Duclos	Antoine	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
Josset	Laurence	Bactériologie-virologie ; hygiène hospitalière
Lemoine	Sandrine	Physiologie
Marignier	Romain	Neurologie
Menotti	Jean	Parasitologie et mycologie
Simonet	Thomas	Biologie cellulaire
Vasiljevic	Alexandre	Anatomie et cytologie pathologiques

Maîtres de Conférences associés de Médecine Générale

Farge	Thierry
Pigache	Christophe
De Fréminville	Humbert

Le serment d'Hippocrate

Je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans discrimination.

J'interviendrai pour les protéger si elles sont 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.

Je donnerai mes soins à l'indigent et je n'exigerai pas un salaire au-dessus de mon travail.

Admis dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

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

Je préserverai l'indépendance nécessaire et je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je perfectionnerai mes connaissances pour assurer au mieux ma mission.

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

REMERCIEMENTS

Au Professeur Gérard Finet, merci de m'avoir confié ce travail sur un sujet qui me passionne et de me faire l'honneur de présider mon jury. Votre enseignement a été très précieux, que ce soit par votre rigueur ou votre approche toujours très réfléchie de chaque problème. Nos discussions auront toujours été de très bons moments, qu'elles soient scientifiques ou philosophiques, sur la plongée ou la photo. Je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Aux membres de mon jury qui m'ont accompagné, soutenu, instruit tout au long de mon parcours et qui me font l'honneur de leur présence, je vous remercie infiniment.

Professeur Hélène Thibault, le semestre passé à vos côtés m'a non seulement beaucoup apporté, mais m'a également convaincu que j'ai encore énormément à apprendre de votre expertise en échocardiographie. Merci pour votre oreille attentive, votre disponibilité et vos conseils. Je vous remercie de m'accueillir à vos côtés pour poursuivre mon apprentissage. J'ai beaucoup de plaisir à savoir que je pourrai continuer à travailler avec vous au cours des deux prochaines années.

Professeur Jean-François Obadia, votre expertise de la valve mitrale rend votre présence primordiale et viendra enrichir ce travail de thèse. Le semestre passé à vos côtés aura été pour moi un grand plaisir. Merci pour votre bonne humeur, vos traits d'humour, les échanges sur chaque dossier qui m'ont beaucoup apporté.

Professeur Gilles Rioufol, un grand merci pour votre patience, votre gentillesse constante et votre disponibilité. Je garderai un excellent souvenir du semestre passé en hémodynamique à vos côtés.

Docteur Matteo Pozzi, ta rigueur et ta force de travail font de toi un véritable modèle. Ta sympathie aura grandement contribué à rendre ce dernier semestre d'internat inoubliable.

MERCI...

A ma chérie, la femme de ma vie. Je t'admire notamment pour ton empathie et ta rigueur. Merci pour ces très belles années d'amour et de complicité, et pour les 50 à venir je l'espère. Merci pour ton soutien, nos fous-rires, nos périples et tout le reste. Je n'aurai pas pu rêver mieux pour vivre la formidable aventure qui nous attend. Notre fils et moi auront beaucoup de chance de t'avoir à nos côtés.

A ma famille :

A mes parents, merci d'être ces parents-là, de tout ce que vous avez fait pour moi et pour nous, d'être toujours là. Nous n'aurions pas pu espérer mieux. Si j'en suis là c'est en grande partie grâce à vous. Je suis sûr que vous ferez des grands-parents extraordinaires.

A mes soeur et frère, j'espère que l'on gardera toujours la même complicité. Vous ferez des super tata et tonton j'en suis sûr.

A ma sœurette, au cœur d'or derrière son caractère bien trempé, déjà tellement mature pour son âge, probablement beaucoup plus que moi.

A mon frérot, l'espiègle, parfois tête en l'air mais dont je suis très fier, continue tes efforts.

A ta petite Clara, randonneuse hors pair, qui te complète si bien.

A mes grands-parents,

A mamie Jacky pour qui je serai à jamais son petit poussin malgré mes 93kgs, tu me manques.

A mamie Dannie pour ta force de caractère, ta gentillesse, ton énergie (et les pois chiches au chorizo).

A papi Roger, cycliste accompli, beloteur hors pair, seul octogénaire capable de monter seul une cuisine Ikéa.

A papi Pierrot, notre ours au grand cœur.

Merci pour tous ces bons moments dans notre Pays Basque et ailleurs. Pour avoir été si attentionnés, patients, prévenants toutes ces années. Je tiens énormément à vous, vous êtes irremplaçables ! Cela me touche profondément que vous ayez fait tant de kilomètre pour être là à mes côtés.

A Stéphane (parrain aéromodéliste de talent) et Marie Laurence pour être toujours là, même si on ne se voit pas assez.

A mon cousin Bébert, pour nos parties de baby-foot, de jeux vidéo, les fêtes de Bayonne et le reste.

A ma cousine Émilie, pour ton courage et ta force de caractère. Ça y est, je te passe le relais ! Merci d'avoir fait tant d'effort afin d'être là pour ma soutenance.

A ma tatie, notre deuxième maman qui me connaît depuis que je suis né (ou presque). Merci d'avoir veillé sur moi ou plutôt sur nous pendant toutes ces années (et pour tes gratins dauphinois sans égal à ce jour). A tonton Robert notre moustachu préféré, pour ta bonne humeur constante. A toute la grande et géniale famille des Robert.

A ma marraine Michelle pour ta gentillesse et ton engagement envers les autres. A André qui me laissera toujours sur place en randonnée. Et à toute leur petite famille si attachante.

A Nadine (courageuse nutritionniste au pays du cassoulet) et Gilles, pour votre générosité et votre accueil toujours sympathique dans cette belle région toulousaine.

A la si belle famille des Chollet,

Merci de si bien m'accueillir au sein de votre famille depuis maintenant plus de 7 ans et demi. A Sylvie (ma super belle maman) pour ta gentillesse et ton soutien indéfectible. A Rémi pour ton aide précieuse en tout temps, pour ces parties de pétanque endiablées (même si je perds souvent).

A Caro, si généreuse derrière son petit caractère, on est très fier de la femme que tu deviens. A Marion, qui nous manque là-bas dans son Québec d'adoption.

A Maurice, Gisèle, Jeannot et Maguy pour leur bienveillance, et tous ces repas de famille aussi copieux que délicieux.

A Marc, Sylvie, Loïc, Guillaume, Ambre et Camille pour les apéros ganathains, votre sympathie constante.

A Isabelle, Pipou et Clémence pour les petites parenthèses (haute !) savoyardes qui font tant de bien.

A Liliane pour son petit grain de folie si agréable.

A mes amis,

A Léo, mon vieux pote, cinéphile accompli, plus grand fan de Roger (ou Rafael je sais plus), pour ton soutien inconditionnel, les conversations téléphoniques de 1h (mais seulement après 22h), les parties d'aventurier du rail acharnées, et tout le reste...

A Chloé (inventrice du tabouret-hélicoptère) et Chachou, pour les fous-rires, les soirées sur le dancefloor, pour les apéros marseillais ou grézirois, pour être toujours là après toutes ces années.

A Baptou, (pétrolier gabonais), le petit clown qu'on ne voit malheureusement pas assez.

A tous mes amis du Cha, maison qui nous a vu grandir, parfois réviser, souvent refaire le monde en salle de pause.

A Robin, le plus grand des pandas, pour tes conseils précieux, ton oreille attentive, ton rire social, cinéophile accompli, breveté du sandwich-pizza et actionnaire majoritaire du carré-bleu. A Vavia, « September » girl, jamais la dernière pour danser !

A Toto (et le fameux « peace à deux »), à Claire et Théo, nos choux / micro-choux ardéchois adorés, et bah non même au bout du monde on viendra quand même !

A Marinette (Martine ?), clé de voute du groupe, spécialiste de l'organisation de week-end qui font tant de bien (et de vodka-caramel dans le congèle). On n'a pas fait le Vietnam mais on a fait le Cambodge, c'est presque pareil non ? A Clément, Med-Gé de talent, maître de la répartition et du diagnostic de rougeole en phase d'incubation.

A Bébér, pour les doubles anniversaires, les doubles demi-anniversaires, les soirées fluos passées et je l'espère à venir pour les 50 prochaines années ! A Mathilde qu'on est si content de connaître et qui le rend si heureux.

A JG, notre petit chat adoré, unique chanteur de Pocahontas au bloc, amateur de paillettes, et de poulet soja qui requinque. A Raggie, ragondin rieur si sympathique, dompteur d'escape game.

A Mouge et Anaïs pour leur enthousiasme toujours débordant.

A Paul dit Paulo, dandy pourtant meilleur expert en BBQ de Montchat.

A Charlou, expert de la soirée traquenard, merci pour ta bonne humeur constante.

A Clara, Romain, et leur petite Louise, seul stéphanois autant adorés par des Lyonnais, je vous revois toujours avec énormément de plaisir.

A François, maître trappiste de talent, grognon parfois, sympa toujours.

A Francis, guitariste de renom, critique musical de talent. Tour à tour parisien, hollandais, marseillais...

Cela me touche vraiment qu'on garde contact après toutes ces années.

A Clément (T), super-papa, chirurgien en devenir, maître des digestifs.

A nos Lillois :

- Mon Pap's, dit aussi Papaloukas, boxeur mais maxillo (ou comment créer l'offre et la demande), compagnon de soirées classes ou moins classes. Bayonne se souvient de toi, toi peut être un peu moins.

- Ben, plongeur occasionnel, basketballeur accompli, inventeur des soirées du même nom. Je suis très content que tu aies rencontré ton Aurélie.

A toute la bande que j'ai toujours autant de plaisir à retrouver : Flo (électro mélomane, spécialiste de la descente de piste et de bière), Amy (tricoteuse de génie), Victor (chasseur au grand cœur), Seg (THE Tuche mummy), Rémi (roi de la perceuse et du long island ice tea), Claire (et son rire communicatif), François dit F (ingénieur boxeur le jour, zythologue le soir), Hélo (Beyoncé psychanalyste de talent), Camille (dit Cam, juriste boxeuse au cœur d'or), FX (le plus Depp des avocats crossfiteurs), Nils

(cardiologue globe-trotter en cycliste), Gaga (« on ne channnggee pppaaasss »), Matthieu (Vététiste de renom), JB (Luxembourgeois-Croix-Roussien, Lyon Nord avant tout) et sa Aude, Camcam (spécialiste du tennis-orange).

A Julien et Sophie, œnologues accomplis, all-blacks de coeur, qui ont su si bien nous adoucir toutes ces années.

A Guigui et Antonin, rayons de soleil du 7^{ème}.

A Marine (de Picolle) et Toinou pour ces soirées parfois trop arrosées mais toujours sympathiques !

A nos Clocher adorés : Pierre et Sabine. A Baprou (la plus belle des futures demoiselles d'honneur) et Loulou pour me laisser gagner à Mario-Kart.

A Estelle B pour sa bonne humeur communicative.

A nos voisins du 33 rue Cavenne (Marc, Martine, Julien, Noémie) pour leur accueil, les petits mots d'encouragement, les apéros qui requinquent.

A mes cointernes pour tous ces bons moments à l'hôpital Cardio ou ailleurs :

- Mon Clem, une des belles rencontres de mon internat, qui fera un super papa j'en suis certain. Et à sa Manon si douce et sympathique.

- Antoine (pour ton humour qui fait toujours du bien), Marco (sportif savoyard), Mehdi (apéro-méromane), Khalidou (« et que ça saute ! »), Hadri et Six (encore félicitations), Chrichri (la sportive fétarde-chef de chantier), Adèle, Cloclo (Bastille ou rien), Loulou (la plus géniale des mamans poules), Baprou, Jean-Phi, Léo, Hugo, Karine, Flora, Amélie, Fabien, Quentin, Matthieu, Ahmad, Théo...

A toutes les infirmière(s), assistant(e)s et praticiens-hospitalier qui m'ont beaucoup appris :

- Thibault (Perret of course), merci pour ta gentillesse, ta disponibilité. Ta force de travail et ton expertise médicale sont pour moi un exemple.

- Toute l'équipe de SJS : Jean-Raymond, Julien, Benjamin, Sylvain, Olivier, Marie, Cathy, Nico, Seb et toute l'équipe infirmière (Jerem, Flo, Julie, Xavier, Thomas, ...).

- Yuni, Timothée, Agathe, Cyril (B), Sophie (L et T) et Martine (les super-échographistes).

- Francis (pensée particulière pour toi qui m'a accompagné toutes ces années), Kévin, Arnaud, Samuel et toute la super équipe de rythmo.

- Tommaso (pour ce dernier semestre mémorable) et Lucas

- Sarah et Annissa (the very beginning).

- Nathalie, Danka, Thomas, Béné, Cyril (P) et toute l'équipe du 51.

- Salim pour ton expertise si précieuse en imagerie.

Merci à Karima (St Foy les Lyon RPZ), pour ton aide si précieuse pour la réalisation de ce travail.

Merci à Nathalie, Annie, Marie-Jo, Valérie, Jennifer, Audrey, Isabelle (x2 51 et rythmo), Clémence et toutes celles que j'oublie pour tout leur travail indispensable au nôtre.

Enfin MERCI à tous ceux que je n'ai pas cité et il y en a malheureusement. Merci d'être là à mes côtés depuis toutes ces années, merci pour tous les bons moments passés et je l'espère à venir.

TABLE DES ABREVIATIONS

AM ou MA : anneau mitral

CAU : caudal

CCVG : chambre de chasse native du ventricule gauche, délimitée par le septum interventriculaire et le septum inter-valvulaire

CEC : circulation extra-corporelle

CT : tomodensitométrie cardiaque

CMD : cardiomyopathie dilatée

CMH : cardiomyopathie hypertrophique

CMHO : cardiomyopathie hypertrophique obstructive

CRA : crânial

Cx : artère circonflexe

Diamètre AP : diamètre antéro-postérieur de l'anneau mitral, synonyme du diamètre SL

Diamètre AM : diamètre aorto-mural de l'anneau mitral, synonyme du diamètre SL

Diamètre CC : diamètre inter-commissural de l'anneau mitral

Diamètre SL ou SLs : diamètre « septal to lateral » de l'anneau mitral.

ETO : échographie trans-oesophagienne

ETT : échographie trans-thoracique

IM : insuffisance mitrale

LAO : angle oblique antérieur gauche

LVOT (Left Ventricular Outflow Tract) : synonyme de la chambre de chasse du ventricule gauche

MAC : maladie annulaire calcifiante

RAO : angle oblique antérieur droit

RM : rétrécissement mitral

RVM : remplacement valvulaire mitral

SAM : mouvement systolique antérieur du feuillet mitral antérieur

SC : sinus coronaire

SIV : septum inter-ventriculaire

TDM : tomodensitométrie

TAVI : Transcatheter Aortic Valve Implantation

TMVI : Transcatheter Mitral Valve Implantation

Partie 1 : BASES THEORIQUES

1) Introduction	22
2) Bases anatomiques de la valve mitrale	
A. Introduction. La valve mitrale, unité anatomo-fonctionnelle	23
B. Le voile mitral	26
a) Le feuillet mitral antérieur ou aortique	30
b) Le feuillet mitral postérieur ou mural	32
c) Asymétrie des deux feuillets	32
C. L'anneau mitral	
a) Approche anatomique	33
b) Approche fonctionnelle	37
c) Variantes pathologiques de l'anneau mitral	
i. Maladie annulaire calcifiante (MAC)	39
ii. Disjonction atrio-ventriculaire	41
iii. Myocardial shelf	42
D. Cordages tendineux	43
a) Cordages commissuraux	44
b) Cordages valvulaires (leaflet chords)	45
c) Cordages spécifiques	45
d) Variations pathologiques	49
E. Muscles papillaires	49
F. Structures adjacentes à l'anneau mitral	52
a) Sinus coronaire	53
b) Autres structures	54
3) Intérêt de l'imagerie dans l'évaluation pré-procédurale en vue d'un TMVI (Transcatheter Mitral Valve Implantation)	
A. Complications des TMVI	54
B. Place de l'imagerie	56
4) Évaluation de l'anneau par imagerie	
A. Évaluation échographique	59
B. Évaluation par scanner	63
a. Concept de Néo-LVOT et de D-shaped annulus	64
b. Détermination des angles de scopie optimaux	68

Partie 2. TRAVAIL SCIENTIFIQUE

Comparaison de la biométrie de l'anneau valvulaire mitral au scanner, en échocardiographie transoesophagienne (2D et 3D) et par mesures perchirurgicales

1) Introduction	72
2) Matériel et méthode	73
A. Population	
a. Groupe A	73
b. Groupe B	74
B. Mesures chirurgicales de l'anneau mitral	74
C. Mesures de l'anneau mitral par échocardiographie transoesophagienne	
a. Groupe A	75
b. Groupe B	76
D. Mesures de l'anneau mitral par tomodensitométrie	77
E. Critères de jugement	
a. Groupe A	80
b. Groupe B	80
F. Statistiques	81
3) Résultats	
A. Groupe A	81
a) Évolution des diamètres SLs, CC et SLd moyens de l'anneau mitral au cours du cycle cardiaque	82
b) Corrélacion entre échocardiographie transoesophagienne 2D et scanner	85
c) Corrélacion entre tomodensitométrie et mesures chirurgicales	87
d) Corrélacion intra-observateur en tomodensitométrie	89
B. Groupe B	90
a) Diamètre moyen de l'anneau mitral	91
b) Diamètre SLs	91
c) Diamètre CC	92
4) Discussion	93

Conclusion

Bibliographie

BASES THEORIQUES

1) Introduction :

Les maladies valvulaires du cœur sont très fréquentes dans la population adulte des pays développés. Celles-ci sont amenées à voir leur incidence augmenter, l'âge étant un facteur de risque majeur des valvulopathies cardiaques.

Ainsi en 2006, aux États Unis, 0.7 % des jeunes adultes âgés de moins de 45 ans souffrent d'une maladie valvulaire de grade modérée à grave. Cette proportion atteint un sixième de la population si on s'intéresse aux personnes âgées de plus de 75 ans. ¹

Parmi ces patients, il a été établi que la moitié de ceux-ci ne sont pas référés pour une intervention chirurgicale, principalement en raison de leur âge avancé, de la présence de comorbidités importantes ou d'une altération de la fonction ventriculaire gauche. ²

En effet, si on s'intéresse à la population grandissante des octogénaires, celle-ci présente une mortalité importante dans les 30 jours suivant une chirurgie conventionnelle : 13% après remplacement valvulaire mitral (RVM), 6% après plastie mitrale. ³

Les guidelines actuelles recommandent l'implantation d'une prothèse mitrale biologique à partir de 70 ans. ⁴

Il existe cependant avec l'augmentation de l'espérance de vie un risque non négligeable de ré opération sur dysfonction de la bioprothèse : 4.1% à 5 ans, 13.6% à 10 ans, 18.8% à 15 ans et 23.5% à 20 ans. ⁵

Le dernier problème réside dans la récurrence tardive d'insuffisance mitrale moyenne à sévère chez les patients ayant bénéficié d'une plastie mitrale sur insuffisance mitrale ischémique. Celle-ci peut toucher jusqu'à 30% des patients opérés à 1 an avec une mortalité importante en cas de ré opération.

⁶⁷

Ces catégories particulières de patient ouvrent la voie aux nouvelles techniques de réparation mini-invasive, souvent comparables par certains aspects à certaines techniques de réparation chirurgicale.

Ainsi, selon les recommandations de l'European Society of Cardiology (ESC) de 2017, la réparation de la valve mitrale par cathétérisme peut être envisagée pour les patients symptomatiques présentant

une insuffisance mitrale sévère, inopérables ou à haut risque chirurgical, après discussion en Heart Team. ⁴

Il est donc indispensable pour bien comprendre les défis à venir d'avoir une connaissance parfaite de l'anatomie de cette région.

2) Bases anatomiques :

A. Introduction

Le cœur est une structure essentiellement musculaire formée de fibres auriculaires et ventriculaires qui s'insèrent sur une charpente fibreuse.

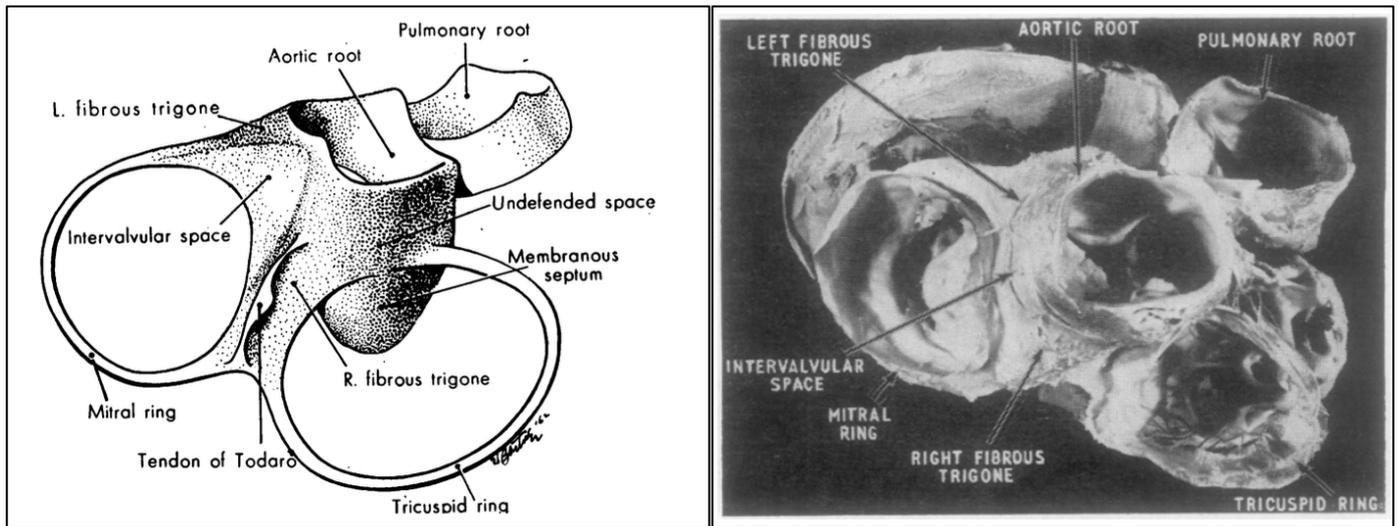
Sur cette charpente fibreuse s'insèrent les fibres myocardiques : fibres ventriculaires en avant, fibres atriales en arrière.

Ce squelette fibreux est constitué des quatre anneaux fibreux valvulaires : les anneaux atrioventriculaires gauche et droite, l'anneau aortique en avant des deux anneaux atrioventriculaires, l'anneau pulmonaire en avant et à gauche de l'anneau aortique.

Ces quatre anneaux se réunissent en 3 zones fibreuses plus épaisses appelées trigones :

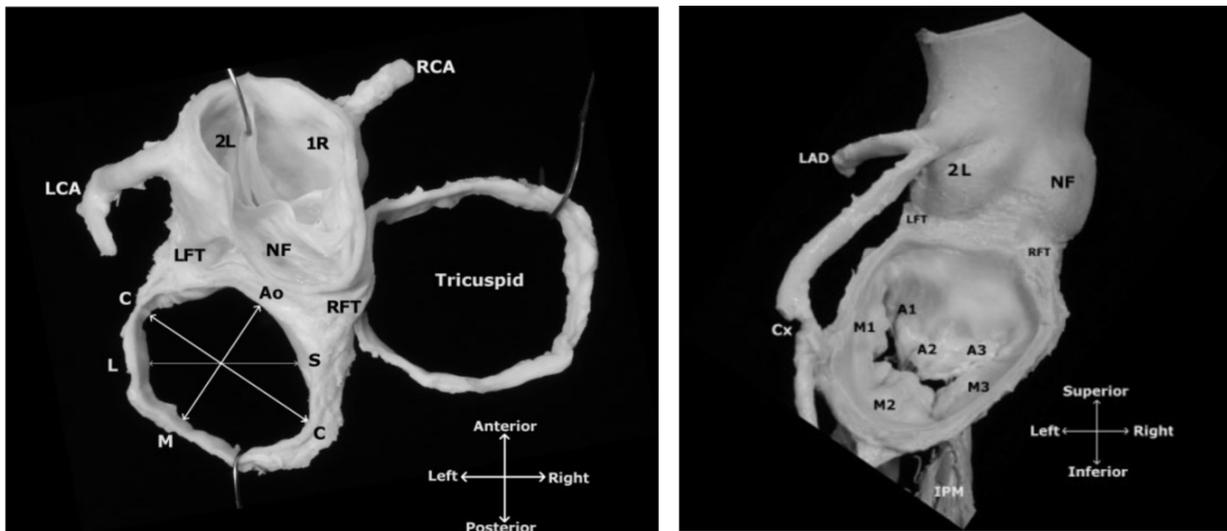
- Le Trigone antérieur droit se situe entre les anneaux atrio-ventriculaires gauche et droit, il forme la base du septum inter-atrial.
- Le Trigone antérieur gauche est situé à gauche de la racine aortique, il est en proche contact avec l'artère circonflexe.
- Le Septum inter-valvulaire est une lame fibreuse limitée en haut par les cusps aortiques gauche et non coronaire de la valve aortique, en bas par la valve antérieure mitrale.

Depuis les trigones gauche et droit, des prolongements de tissu fibro-élastique forment un cercle autour des anneaux atrio-ventriculaires gauche et droit.



Duplessy : The anatomy of the mitral valve ⁸

A gauche : schéma du squelette fibreux du cœur. A droite : Dissection d'un cœur avec visualisation du squelette fibreux



Muresian : clinical anatomy of the mitral valve ⁹

A gauche : squelette fibreux du coeur. A droite, continuité mitroaortique et racine de l'aorte.

La valve mitrale est une unité anatomo-fonctionnelle complexe comprenant plusieurs éléments :

- L'anneau mitral
- Le voile mitral
- Les cordages tendineux
- Les piliers (appelés aussi muscles papillaires)

Pour une fermeture normale de la valve mitrale, les deux valves doivent s'aligner correctement sur l'ensemble de leur zone d'apposition. Cela nécessite donc :

- Une taille de l'anneau mitral en corrélation avec la taille du voile mitral

- Des cordages de taille adaptée
- Une orientation correcte des muscles papillaires
- Une contraction musculaire harmonieuse du ventricule gauche

Une anomalie au sein de l'un ou plusieurs de ses composants peut entraîner une maladie valvulaire. On parle de lésion primaire si la valvulopathie est due à une atteinte directe de l'un des composants, de lésion secondaire si celle-ci est due à une atteinte géométrique ou fonctionnelle du ventricule gauche.

La valve mitrale est mieux caractérisée quand on l'associe avec les structures cardiaques adjacentes qui constituent le complexe valvulaire mitral.

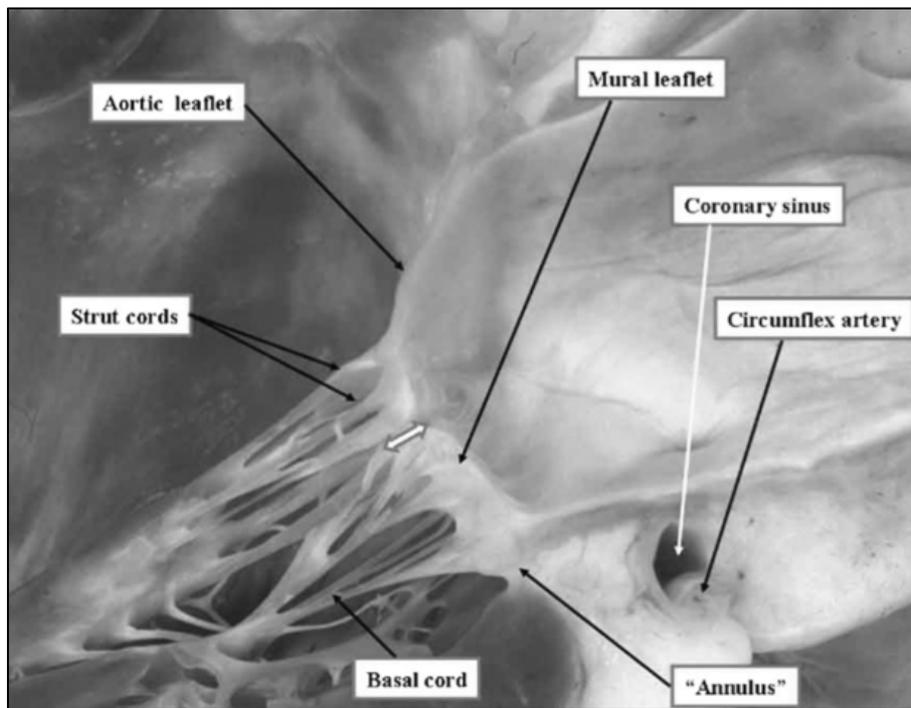
Complexe valvulaire mitral						
Valve mitrale				Structures adjacentes		
Voile mitral	« Anneau » mitral	Appareil sous valvulaire		Myocarde auriculaire et ventriculaire gauche	Endocarde auriculaire et ventriculaire gauche	Continuité mitro-aortique
		Cordages tendineux	Muscles papillaires			

En effet la valve mitrale a des rôles multiples :

- Assurer le passage du sang de l'oreillette gauche dans le ventricule gauche,
- Empêcher le reflux du sang du ventricule gauche dans l'oreillette
- Le rideau mitro-aortique est une composante de la racine aortique.
- Elle contribue à la formation de la zone d'éjection du ventricule gauche.

L'appareil mitral joue également un rôle important dans l'intégrité structurelle et fonctionnelle du ventricule gauche. Ainsi, un remplacement de la valve mitrale, par l'interruption de la continuité mitro-ventriculaire et la non conservation partielle de l'appareil sous valvulaire mitral entraîne une altération des performances du ventricule gauche. ¹⁰

La valve mitrale joue également un rôle important dans la délimitation des voies hémodynamiques d'entrée et de sortie du ventricule gauche. Le feuillet mitral antérieur agit comme un gouvernail pour diriger l'écoulement sanguin vers la paroi latérale du ventricule gauche en diastole et vers la chambre de chasse en systole. La perte de ce schéma hémodynamique est associée à une perte d'énergie, donc à un travail cardiaque moins efficace, et à une augmentation du stress ventriculaire gauche. ¹¹



Van Miegans et al : Anatomy of the mitral valvular complex ¹²

Aortic leaflet : feuillet mitral antérieur. Mural leaflet : feuillet mitral postérieur. Coronary sinus : sinus coronaire. Circumflex artery : artère circonflexe. Annulus : anneau mitral. Strut cords : cordages principaux. Basal cord : cordage basal.

B. Le voile mitral

Le voile mitral s'insère sur toute la circonférence de l'orifice mitral sur un anneau fibro-musculaire. En systole, les feuillets s'accrochent sur une hauteur moyenne de 8 mm, ce qui donne une "réserve de coaptation" en cas de dilatation annulaire.

Le bord libre du voile mitral présente deux indentations constantes :

- La commissure antéro-latérale
- La commissure postéro-médiale

Ces deux commissures se repèrent par l'insertion de cordages en éventail : les cordages commissuraux.

Les régions commissurales sont définies par les limites d'insertion de ces cordages commissuraux. ¹³

Les commissures permettent la séparation en deux feuillets :

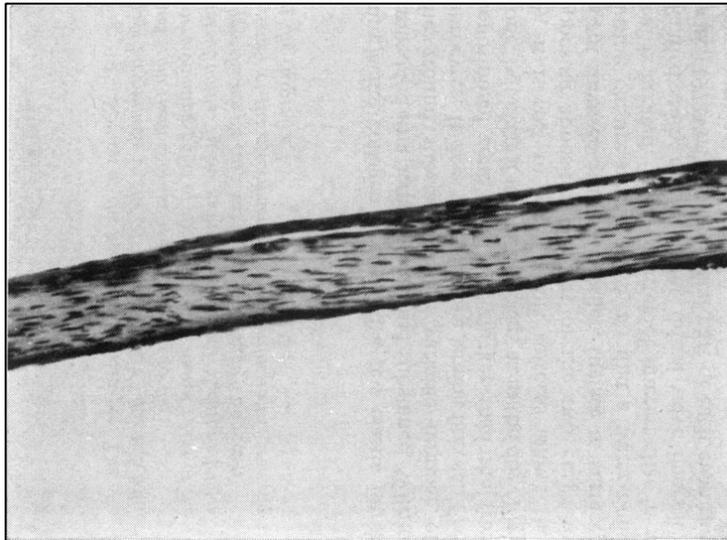
- Le feuillet mitral antérieur (ou grande valve mitrale ou feuillet mitral aortique)
- Le feuillet mitral postérieur (ou petite valve mitrale ou feuillet mitral mural)

Il convient toutefois de noter que les indentations entre les deux feuillets n'atteignent pas l'anneau mais se terminent à environ 5 mm de celui-ci dans le cœur de l'adulte. Il n'y a donc pas de séparation

nette entre les deux feuillets, le voile mitral étant une structure continue. ¹⁴

Les deux feuillets sont eux-mêmes divisés en deux parties délimitées par la ligne de coaptation de la valve. Ces deux zones ont des fonctions et donc des structures différentes :

- Une partie proximale lisse, normalement dépourvue d'insertions tendineuses. Cette zone comporte une matrice organisée de collagène : la lamina fibrosa. Cette matrice lui confère une grande résistance à la tension sans pour autant la rendre rigide.



Walmsley ¹⁵ : zoom (x 180) sur la zone proximale lisse du feuillet antérieur mitral d'un hérisson dont la structure est identique à celle d'une valve mitrale humaine. Les fibres de collagènes sont orientées longitudinalement depuis la base jusqu'à la zone d'apposition. Les fibres sont séparées par des fibrocytes aplatis.

- Une partie distale rugueuse, sur laquelle viennent les nombreuses insertions tendineuses. Cette zone est formée d'un maillage lâche de fibres de collagène, maillage qui lui confère une très grande souplesse ¹⁵. La partie distale de chaque feuillet vient au contact de son homologue lors de la fermeture mitrale (ligne de coaptation ou zone de d'apposition) ¹⁶

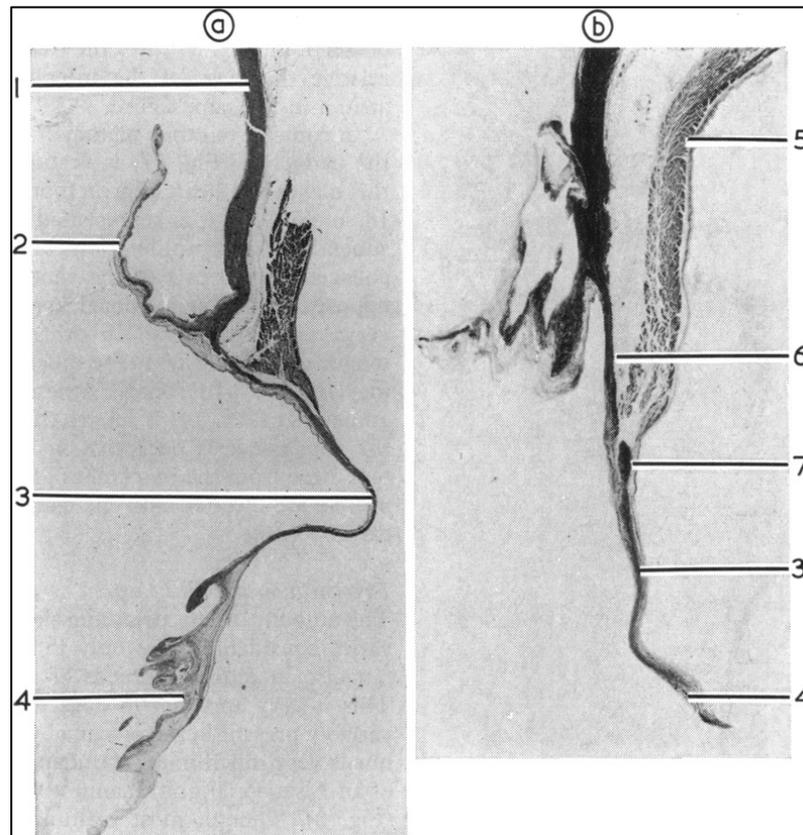
D'un point de vue histologique, les feuillets sont entièrement recouverts d'endocarde. Leur armature conjonctive comprend deux couches ¹⁷:

- La strate fibreuse (fibrosa) est composée d'un tissu conjonctif de fibres de collagène serrées reliées à l'anneau fibreux.

- La strate spongieuse (spongiosa) est plus lâche et contient des macrophages en plus des fibroblastes. Elle se caractérise par une teneur élevée en hyaluronane et en protéoglycane.

La fibrosa se trouve toujours du côté exposé à la traction quand la valve est fermée soit du côté ventriculaire pour la valve mitrale.

L'épaisseur de chaque couche varie de la base de chaque feuillet au bord libre : la fibrosa est la couche principale proche de l'anneau et devient de plus en plus fine jusqu'à être complètement absente au bord libre. Au contraire la spongiosa et l'endothélium atrial deviennent les composants principaux de la valve au bord libre. ¹⁸

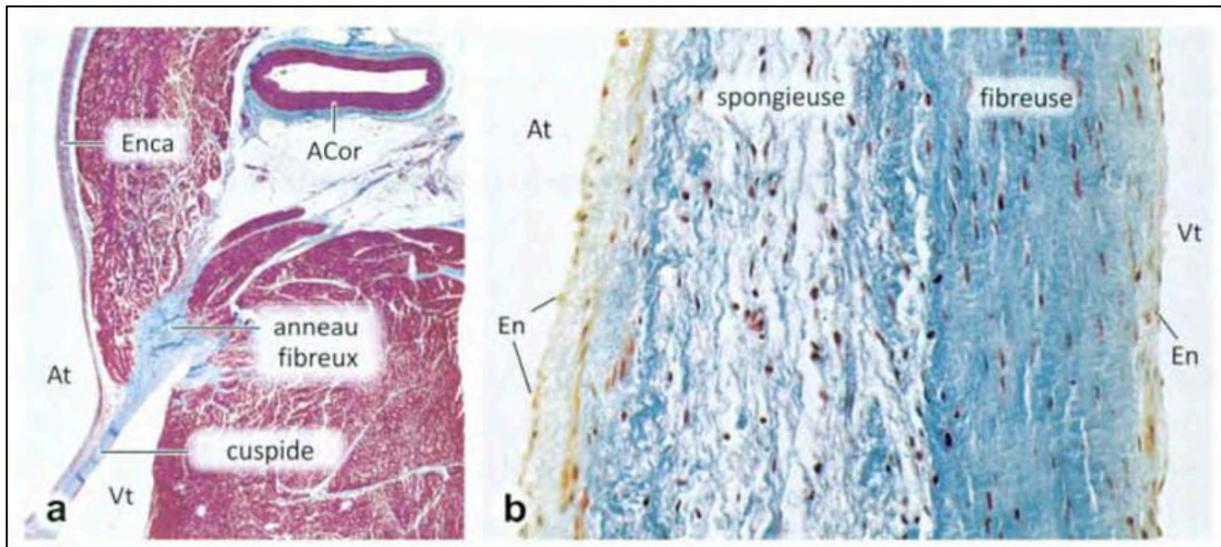


Walmsley ¹⁵ : Section proche de la jonction entre la cusp antérieure gauche et la cusp non coronaire de la valve aortique (x 3)

(a) Forme typique de continuité mitro-aortique : absence d'anneau fibreux mitral, la lamina fibrosa du feuillet antérieur mitral est attachée à l'anneau fibreux de la valve aortique via le septum inter-valvulaire.

(b) Forme atypique de continuité mitro-aortique avec présence d'un anneau fibreux (7) séparé du septum inter-valvulaire par un petit espace. Absence inhabituelle de ligne de démarcation nette entre la zone d'apposition et la zone libre du feuillet mitral.

Légende : (1) Paroi aortique (2) Cusp antérieure gauche de la valve aortique (3) Zone libre du feuillet mitral antérieur (4) Zone d'apposition (5) Myocarde de l'oreillette gauche (6) Septum inter-valvulaire (7) Anneau fibreux



A) Vue en faible grossissement d'un feuillet mitral postérieur de porc (x 5,5). L'endocarde est plus épais dans l'oreillette que dans le ventricule. L'artère circonflexe occupe le sillon coronaire partiellement comblé par du tissu adipeux. ¹⁷

B) Vue en fort grossissement (x 150) des couches histologiques du feuillet mitral postérieur, la strate spongieuse est tournée du côté atrial tandis que la couche fibreuse est tournée du côté ventriculaire. ¹⁷

Afin d'assurer une bonne continence de la valve, la surface combinée moyenne des deux feuillets est supérieure à la surface de l'anneau mitral (avec un rapport compris entre 1,5 et 2). Cet excès tissulaire se situe au niveau de la zone de coaptation entre les deux feuillets : on parle de réserve de coaptation ou de réserve fonctionnelle de la valve mitrale.

Cette réserve de coaptation est augmentée par la diminution de la surface de l'anneau au cours de la systole ventriculaire.

La valve mitrale normale se ferme non seulement par contact bord à bord des deux feuillets au niveau de la ligne d'apposition, mais aussi par apposition de l'ensemble de la zone distale rugueuse des deux feuillets.

Pour rappel, la hauteur de coaptation est en moyenne de 6 à 8mm.

Les zones commissurales et les fentes du feuillet mitral postérieur optimisent l'apposition pendant la systole en permettant la réduction concomitante de l'anneau et du feuillet mitral postérieur.

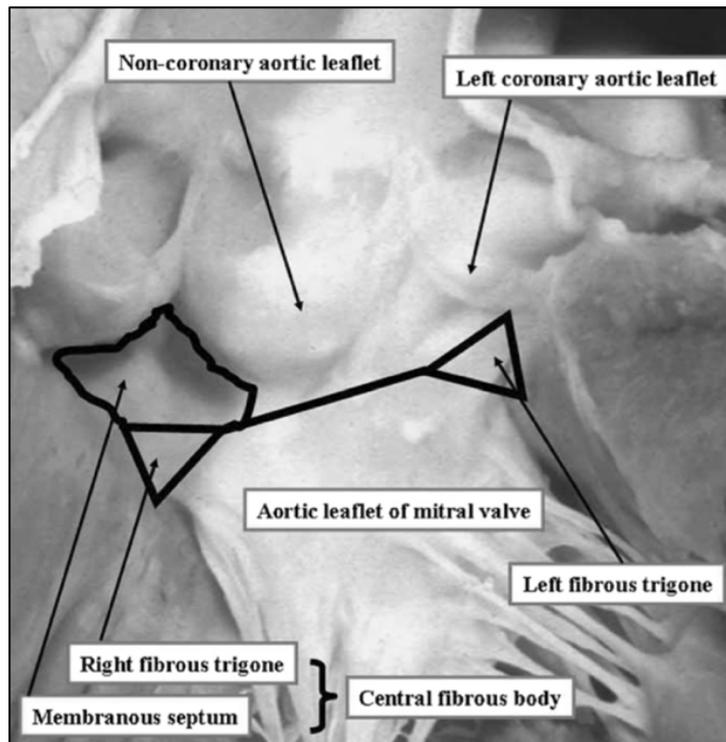
Une immobilisation excessive du feuillet postérieur lors d'une plastie mitrale entraîne de ce fait une augmentation des forces de cisaillement sur les zones commissurales.

Le rapport entre la surface valvulaire totale et la surface annulaire est très important d'un point de vue chirurgical car tout déséquilibre, lors de la plastie mitrale, peut amener à un mauvais résultat : soit par une mauvaise coaptation, soit par un mouvement systolique antérieur du feuillet mitral antérieur (SAM).

a) Feuillet mitral antérieur (ou grande valve mitrale ou feuillet mitral aortique) :

Le feuillet mitral antérieur a une forme triangulaire et sépare l'orifice mitral de la chambre d'éjection du ventricule gauche.

Il a une zone d'insertion commune sur le squelette fibreux avec la cusp coronaire gauche, et la moitié de la cusp non coronaire de la valve aortique. Il existe une continuité fibreuse entre le feuillet mitral antérieur et les cusps non coronaires et antéro-gauche de la valve aortique : on parle de « continuité mitro-aortique ».



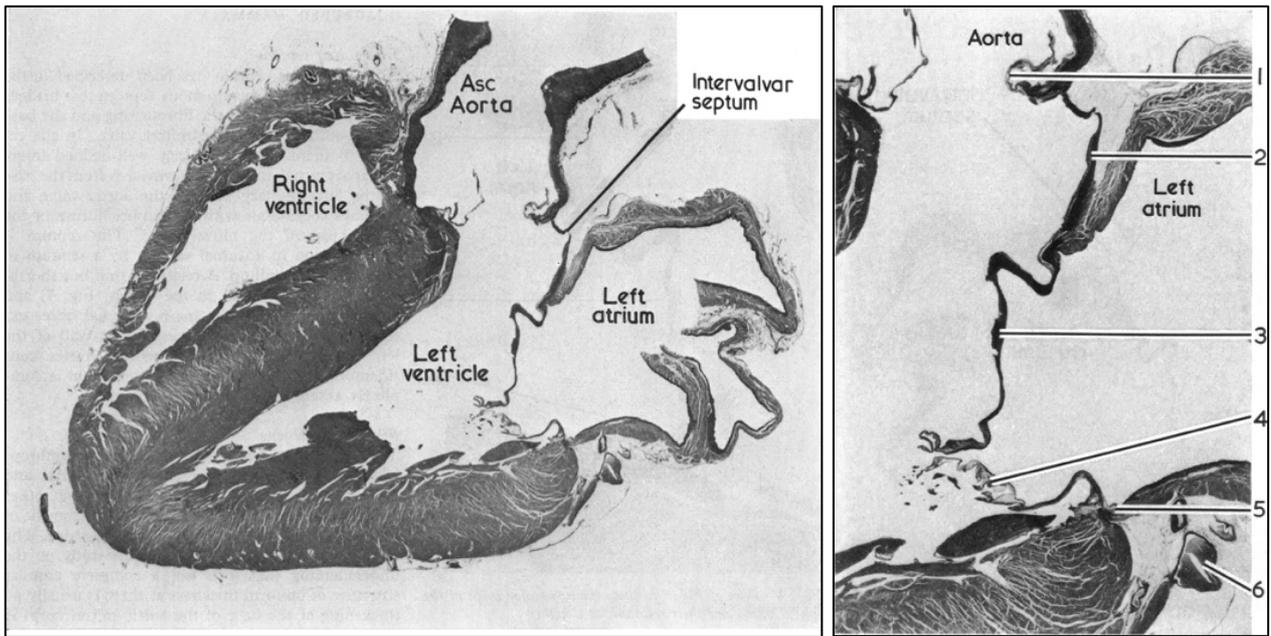
Van Mieghem et al¹² : continuité mitro-aortique

L'intervalle entre les cusps aortiques et l'insertion du feuillet mitral antérieur est comblé par un septum membraneux fait de collagène : le septum inter-valvulaire.¹⁹

Le septum inter-valvulaire s'insère sur l'anneau fibreux de la valve aortique à son extrémité supérieure. Son extrémité inférieure est en continuité avec la lamina fibrosa du feuillet mitral antérieur.

L'anneau fibreux mitral est habituellement absent à ce niveau.¹⁵

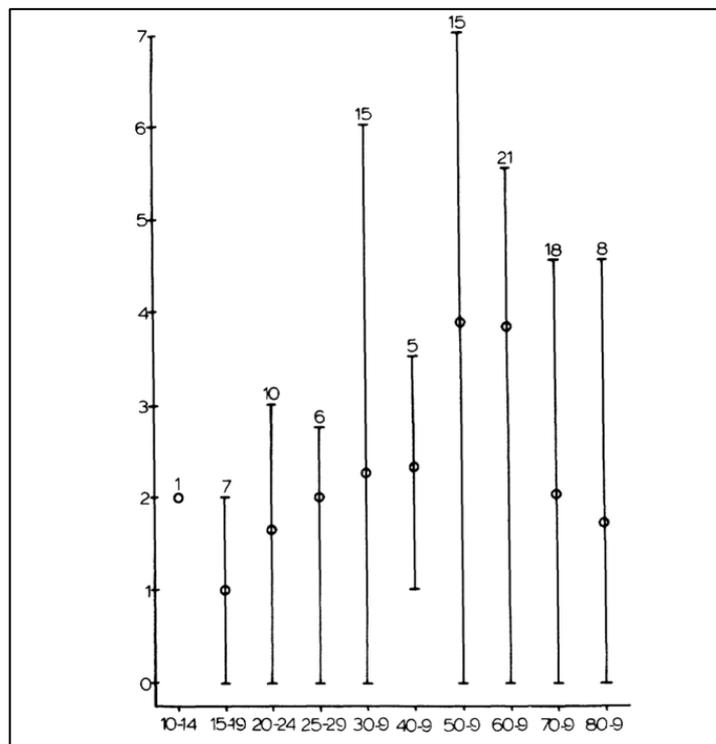
Le septum inter-valvulaire (ou séparation mitro-aortique) mesure de 0 à 7 mm²⁰. Il est attaché aux fibres du toit de l'oreillette gauche au niveau de l'insertion du feuillet mitral antérieur.



Walmsley¹⁵ : plus long septum inter-valvulaire des cœurs examinés (x 1,5)

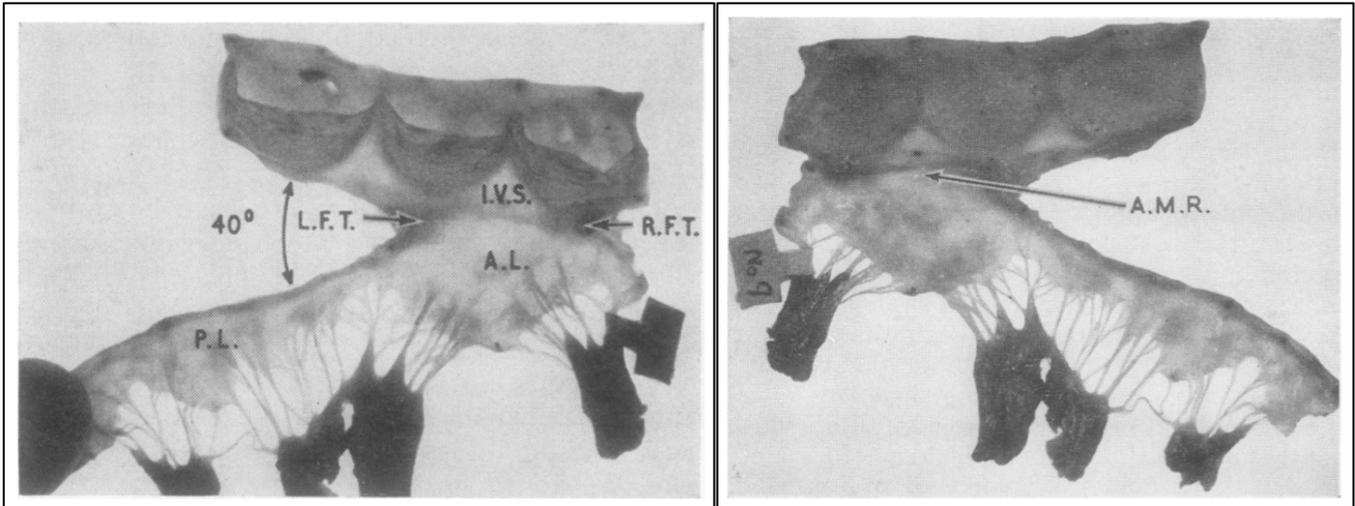
(1) Cusps aortique antéro-gauche (2) septum inter-valvulaire (3) feuillet mitral antérieur (4) zone d'apposition (5) anneau mitral fibreux postérieur (6) artère circonflexe (branche de l'artère coronaire gauche).

La taille du septum inter-valvulaire n'est pas influencée par la circonférence aortique et semble être constante, quel que soit l'âge.



Rosenquist : séparation mitro-aortique chez 106 spécimens normaux.²⁰

En abscisse, taille en mm du septum intervalvulaire. En ordonnée, circonférence de la racine aortique en mm. Le cercle représente la moyenne, la barre l'intervalle de confiance et le nombre de spécimen est marqué au-dessus de chaque barre.



Duplessy⁸ : Trans illumination des valves mitrale et aortique ouvertes, vues depuis le ventricule gauche (à gauche) et depuis l'oreillette gauche (à droite). AL (Anterior Leaflet ou feuillet mitral antérieur : forme triangulaire), PL (Posterior Leaflet ou feuillet mitral postérieur : forme rectangulaire), LFT (trigone fibreux gauche), RFT (trigone fibreux droit), AMR (forme inhabituelle d'anneau mitral antérieur)

A noter que la longueur maximale du feuillet antérieur, mesurée depuis la fixation annulaire jusqu'à son bord libre est environ deux fois celle du feuillet postérieur.⁸

b) Feuillet mitral postérieur (ou petite valve mitrale ou feuillet mitral mural)

Il s'insère sur une base plus large que le feuillet antérieur.

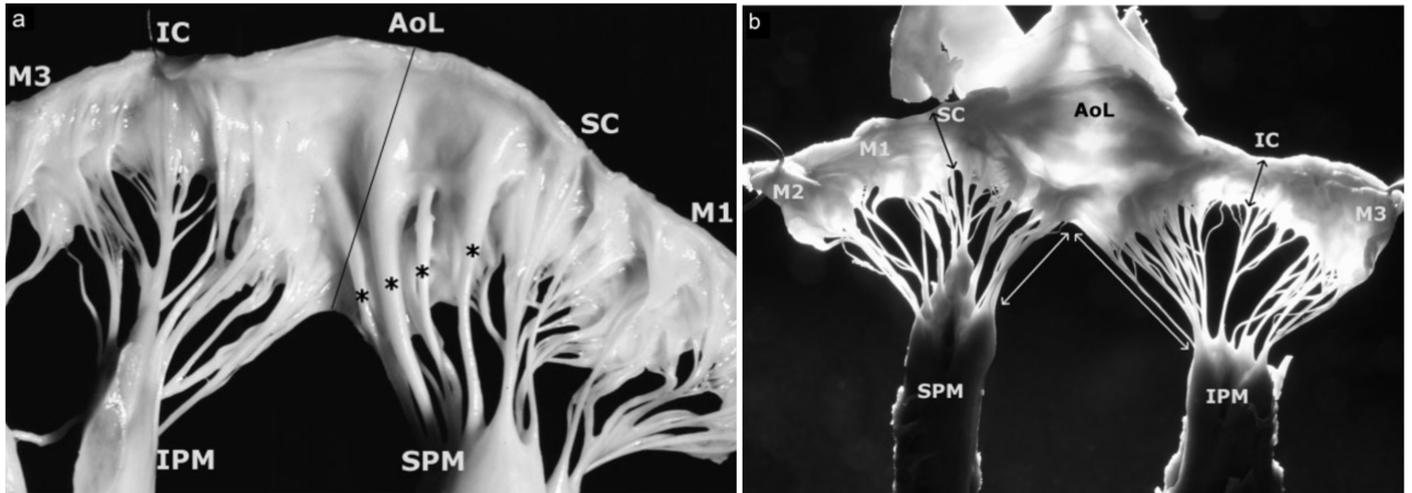
Il est divisé en 3 folioles par des indentations ou « clefts » :

- Une portion médiane large (P2)
- Deux portions commissurales plus étroites :
 - x Antéro-latérale ou antérieure (P1)
 - x Postéro-médiale ou postérieure (P3)

c) Asymétrie des deux feuillets :

La valve mitrale est naturellement asymétrique :

- Chaque feuillet ne présente pas deux moitiés symétriques (par rapport à un axe imaginaire médian) en termes d'aspect ou de nombre de cordages.
- Pour le feuillet postérieur, aucune des folioles n'est identique
- Les zones commissurales sont également asymétriques : la commissure postéro-médiale est plus étroite mais a une circonférence plus grande que la commissure antéro-latérale.



Muresian⁹ : The normal asymmetry of the mitral valve.

IC : commissure postéro-médiale. SC : commissure antéro-latérale. AoL : feuillet mitral aortique. IPM : muscle papillaire postéro-médial. SPM : muscle papillaire antéro-latéral.

C. Anneau mitral

a) Approche anatomique

L'anneau mitral est une zone de jonction qui donne insertion aux muscles auriculaire et ventriculaire gauches, ainsi qu'au voile mitral.

La majorité des fibres myocardiques sont orientées perpendiculairement à l'anneau mitral. Il existe cependant un groupe moindre de fibres orientées parallèlement à celui-ci qui joue un rôle dans les mouvements de l'anneau.

L'anneau mitral n'est pas un élément rigide, mais il est au contraire flexible.

L'anneau mitral comporte deux structures fibreuses majeures :

- Le trigone fibreux droit issu de la confluence de tissu fibreux provenant : des valves tricuspide et mitrale, de la face postérieure de la valve aortique et du septum membraneux.
- Le trigone fibreux gauche issu de la confluence de tissu fibreux provenant de la valve aortique et mitrale.

Sur le plan anatomique, il faut différencier la structure fibreuse et la jonction auriculo-ventriculaire en forme de D.

D'un point de vue ventriculaire, les structures en contact sont musculaires sur l'ensemble du pourtour de l'anneau excepté au niveau du rideau fibreux mitro-aortique.

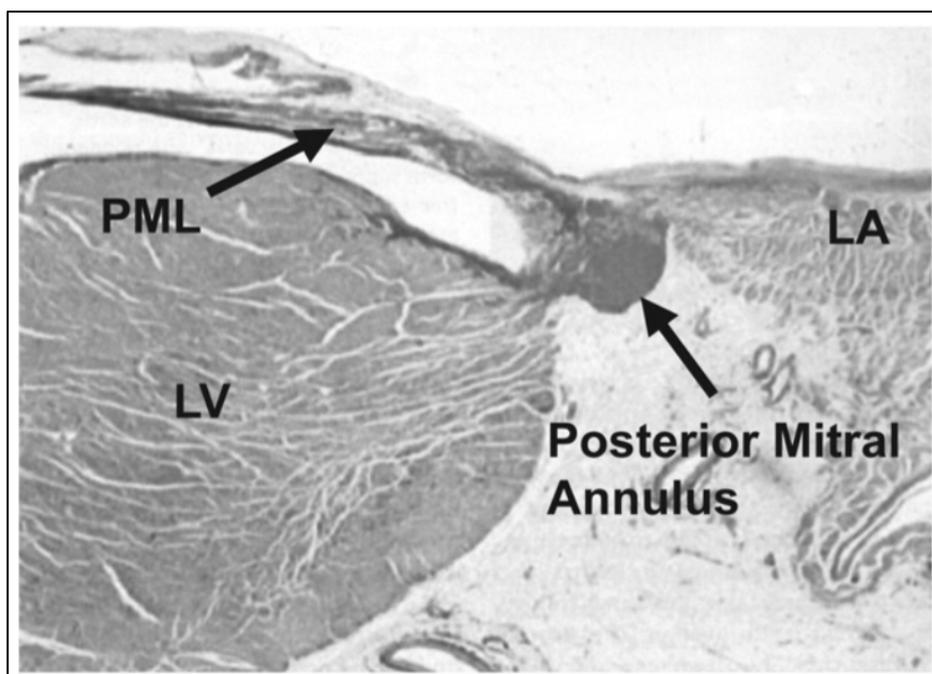
Il est important de souligner que le terme d'anneau fibreux est faux dans la majorité des cas. Il est exceptionnel de trouver un anneau fibreux continu sur toute la circonférence de l'orifice mitral. Habituellement, l'anneau fibreux est limité à la région où les fibres auriculaires et ventriculaires sont adjacentes. Cela correspond à la zone d'attachement du feuillet mitral postérieur.¹⁵ Sur cette portion, l'anneau fibreux se situe sur le versant atrial de la zone d'insertion du feuillet mitral postérieur.

Ce tissu fibreux est fixé à ses deux extrémités antérieures aux trigones fibreux gauche et droit. Le trigone fibreux droit est en continuité avec le septum membraneux où passe les voies de conduction électriques atrio-ventriculaires : on parle de centre fibreux cardiaque.

Depuis les trigones, des extensions fibreuses s'étendent vers la partie postérieure de l'anneau mitral. La portion postérieure de l'anneau est constituée d'une bande très bien définie de collagène par opposition à la portion antérieure¹⁵. Les déficiences de la portion postérieure de l'anneau sont souvent multiples et comblées par du tissu adipeux.

L'anneau est donc beaucoup plus résistant à la dilatation dans sa portion aortique que dans sa portion postérieure. Cela explique la prédisposition de la portion postérieure de l'anneau à la dilatation et aux calcifications.

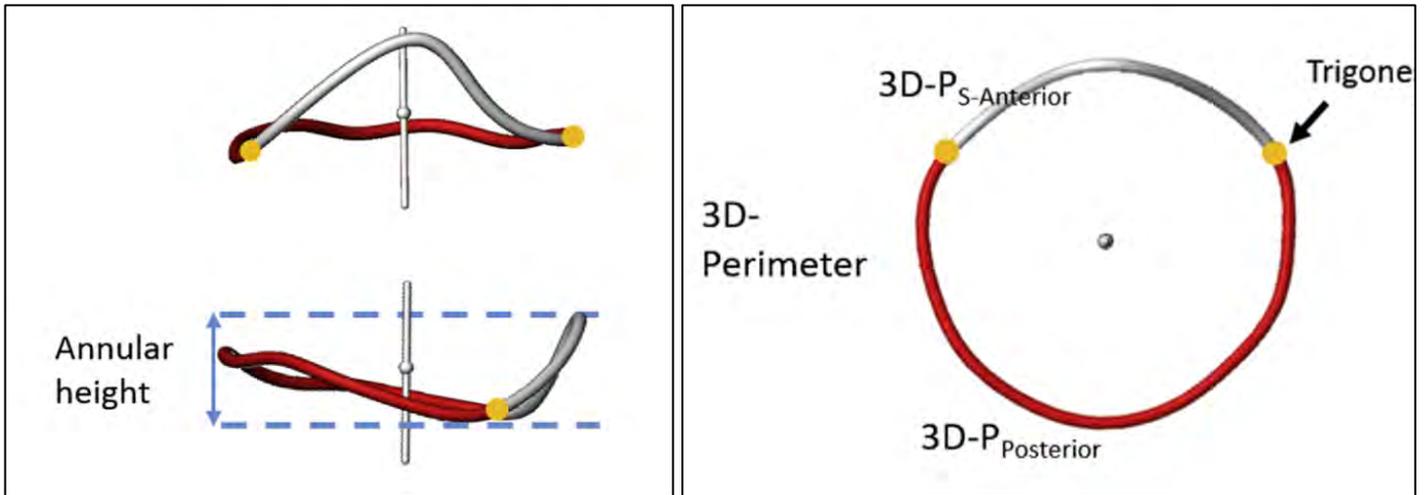
L'anneau mitral postérieur normal est une structure en forme de cordon délimitée par la jonction feuillet mitral postérieur – oreillette gauche à l'intérieur et par la crête du ventricule gauche basal à l'extérieur.



Surgical anatomy of the heart²¹ : rapports anatomiques de la portion postérieure de l'anneau mitral.

PML : feuillet mitral postérieur. LV : ventricule gauche. LA : oreillette gauche

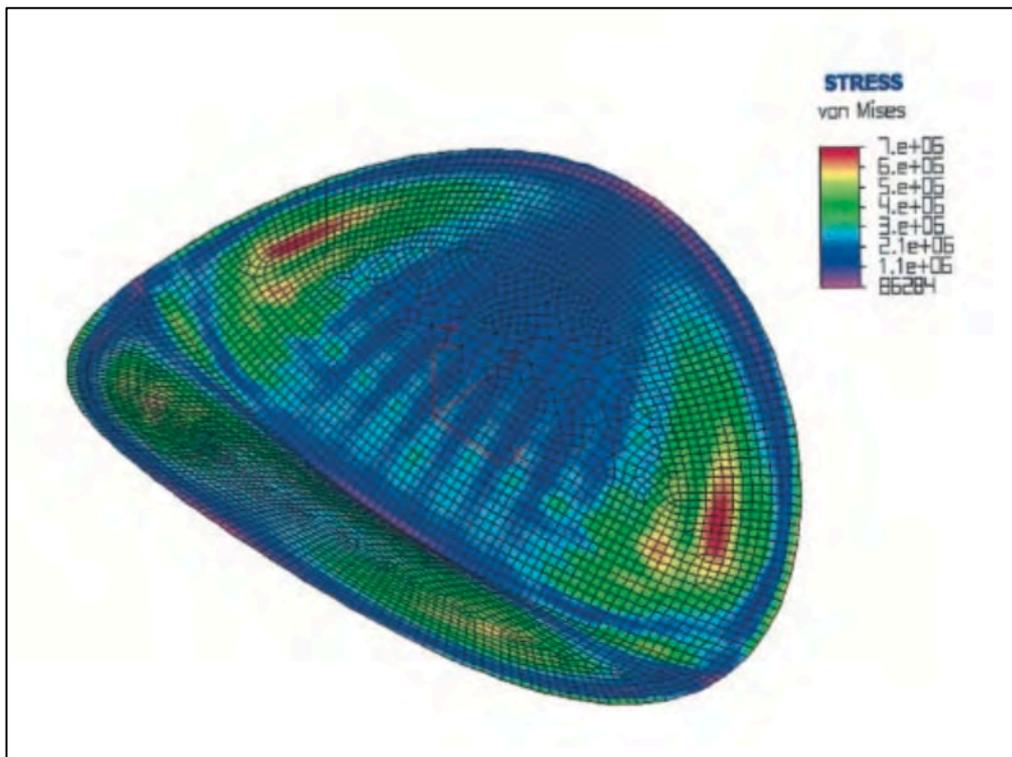
La forme globale de la jonction auriculo-ventriculaire se rapproche de celle d'une ellipse dont un bord serait aplati (au niveau de la continuité mitro-aortique) donnant une forme globale en « D ». Lorsque la valve fermée est vue de profil, la majeure partie de la ligne de fermeture se trouve sous le plan de la jonction auriculo-ventriculaire, de sorte que la surface auriculaire des valves présente un profil en forme de selle. ¹⁴



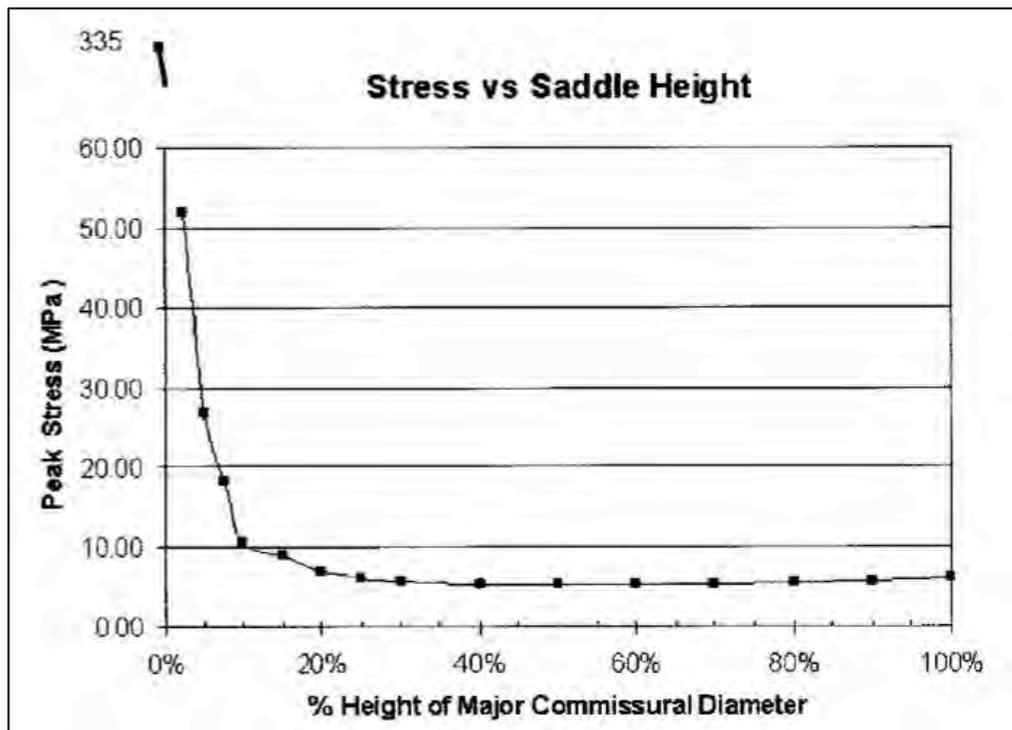
Blanke : forme en selle de cheval de l'anneau mitral : saddle-shaped annulus²²

La forme de selle (« saddle shaped annulus ») permet une réduction de la tension au niveau des deux feuillets. ²³

La hauteur d'anneau idéale serait comprise entre 25 et 35% du diamètre inter-commissural.



Salgo and al : simulation du stress sur les deux feuillets mitraux (modèle de Von Mises) ²³

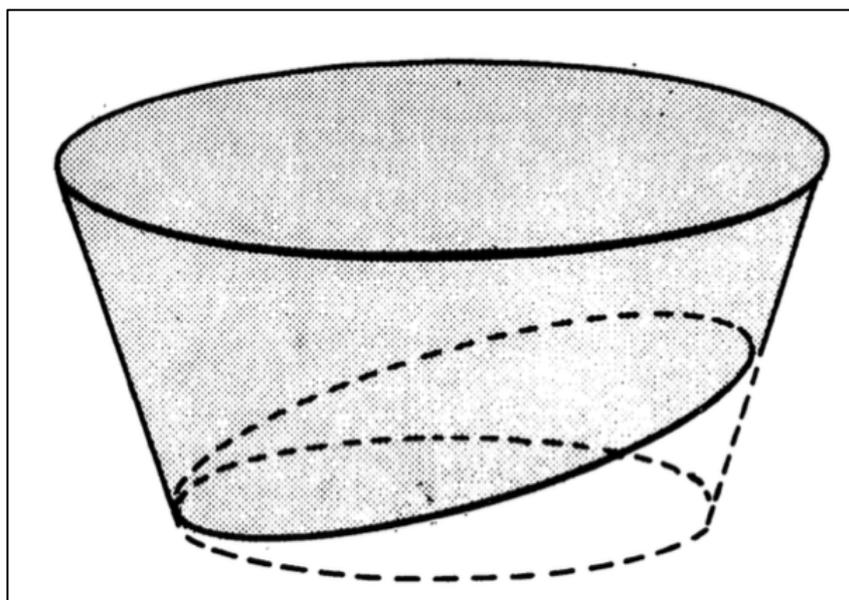


Salgo and al : relation entre stress des feuillets et hauteur de l'anneau.²³

Pour rappel, l'anneau mitral est normalement inexistant au niveau de la continuité mitro-aortique, située en avant des deux trigones.¹⁵

Le périmètre de l'anneau de la valve mitrale est en moyenne 1,1cm plus long que celui du bord libre du voile mitral. L'entrée est ainsi plus large que la sortie, donnant une forme conique à la valve.

La coaptation se fait donc dans un plan plus « apical » que le plan de l'anneau. Par ailleurs, les feuillets mitraux antérieur et postérieur n'ayant pas la même profondeur, le plan de l'orifice de sortie n'est pas identique à celui de l'anneau.



Duplessy : Schéma montrant la forme conique de la valve mitrale et le caractère oblique de l'orifice de sortie

Il est important de noter qu'il existe de nombreuses controverses concernant la portion antérieure de l'anneau mitral et notamment sur une origine commune ou non du feuillet mitral antérieur et des cusps aortiques (gauche et non coronaire).

Comme décrits plus hauts, les travaux de Du Plessis⁸ et Walmsley¹⁵ ont montré une distinction entre ces structures, séparées par le septum inter-valvulaire pouvant mesuré jusqu'à 7mm.

Il persiste actuellement ce malentendu selon lequel la racine aortique et l'anneau mitral antérieur ont une jonction commune.

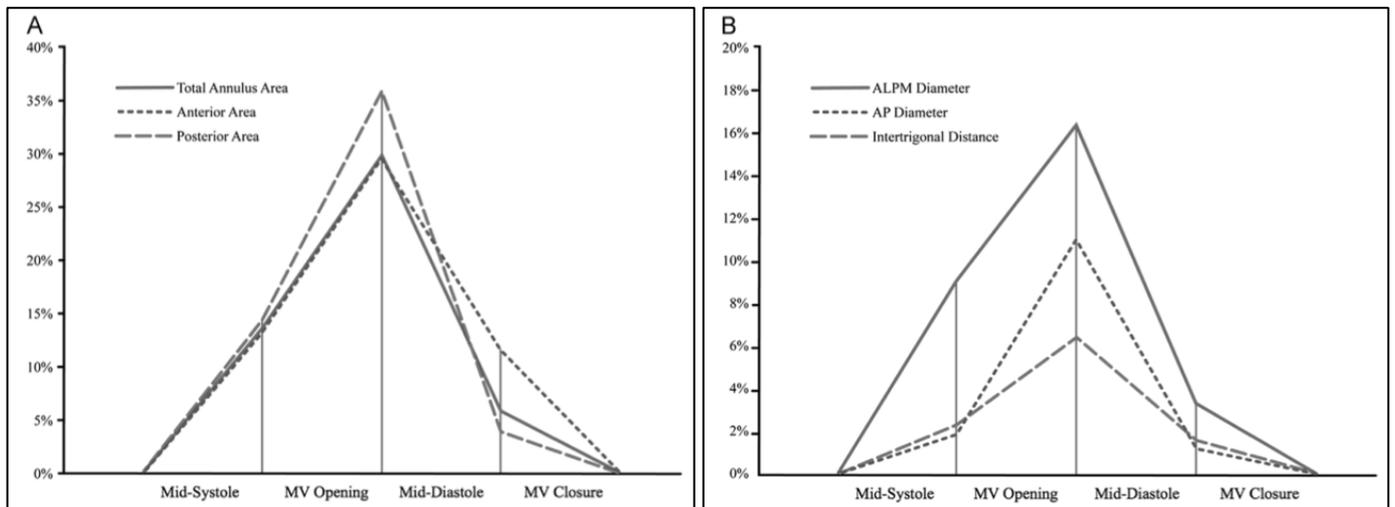
L'équipe de Foster a montré que cette incompréhension conduit à une surestimation significative des mesures du diamètre SL (septal to lateral) de l'ordre de 20 à 25 %.²⁴

Ce malentendu s'est prolongé dans les algorithmes des logiciels de reconstruction 3D, majorant probablement l'aspect en selle de cheval de l'anneau mitral.

b) Approche fonctionnelle :

La surface de l'anneau varie au cours du cycle cardiaque avec des variations pouvant atteindre entre 20 à 40% de la surface minimale (début de systole). La circonférence moyenne de l'anneau, chez les sujets sains, est d'environ 120mm soit un diamètre moyen de 38mm.^{25_26}

La surface maximale de l'anneau est atteinte entre le début et le milieu de la diastole.



Jiang and al : mouvement dynamique de l'anneau mitral au cours du cycle cardiaque²⁷

ALPM : diamètre inter-commissural (CC). AP : diamètre antéro-postérieur (ou septal to lateral : SL)

L'équipe de Thériault-Lauzier²⁸ a effectué une méta-analyse de 24 études analysant l'anneau de patients sans insuffisance mitrale. Celle-ci retrouvait les dimensions suivantes :

- Diamètre CC (intercommissural) : 36,2 +/- 4,5mm en diastole, 33,6 +/- 5,1mm en systole

- Diamètre SL (septal to lateral) : 31,6 +/- 7,9mm en diastole, 28,8 +/- 8,0mm en systole
- Aire projetée : 7,3 +/- 2,3cm² en diastole, 6,9 +/- 2,2cm² en systole

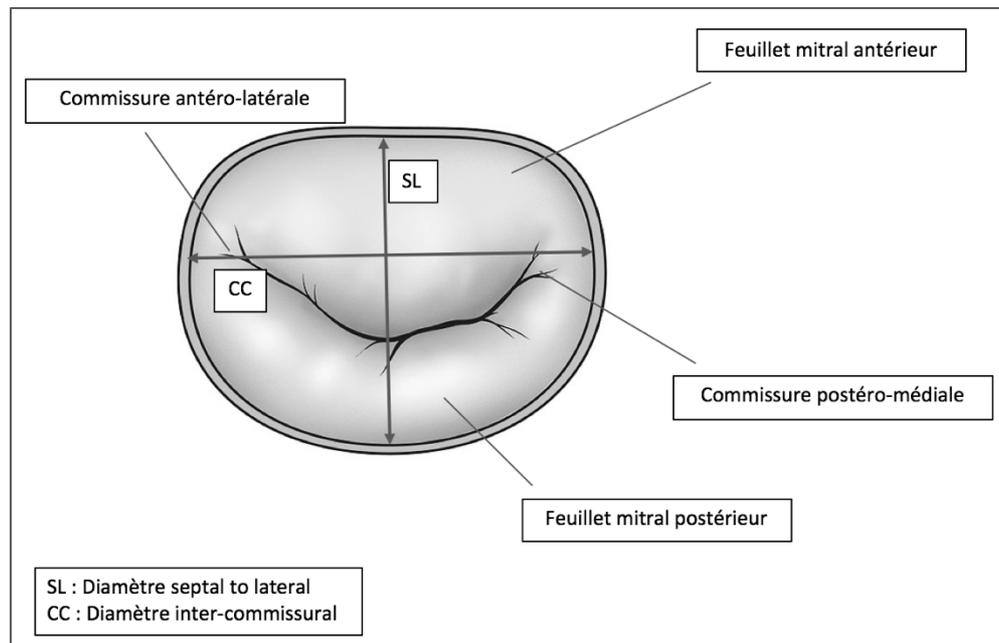


Schéma représentant une valve mitrale avec les diamètres SL et CC

Le début de la systole est marqué par une contraction de l'anneau sur son diamètre SL tandis que le diamètre CC demeure inchangé.

C'est surtout la partie postérieure de l'anneau qui se rapproche (en systole) et s'éloigne (en diastole) de la partie antérieure. Cette dernière se déforme peu du fait de son arrimage aux deux trigones fibreux.

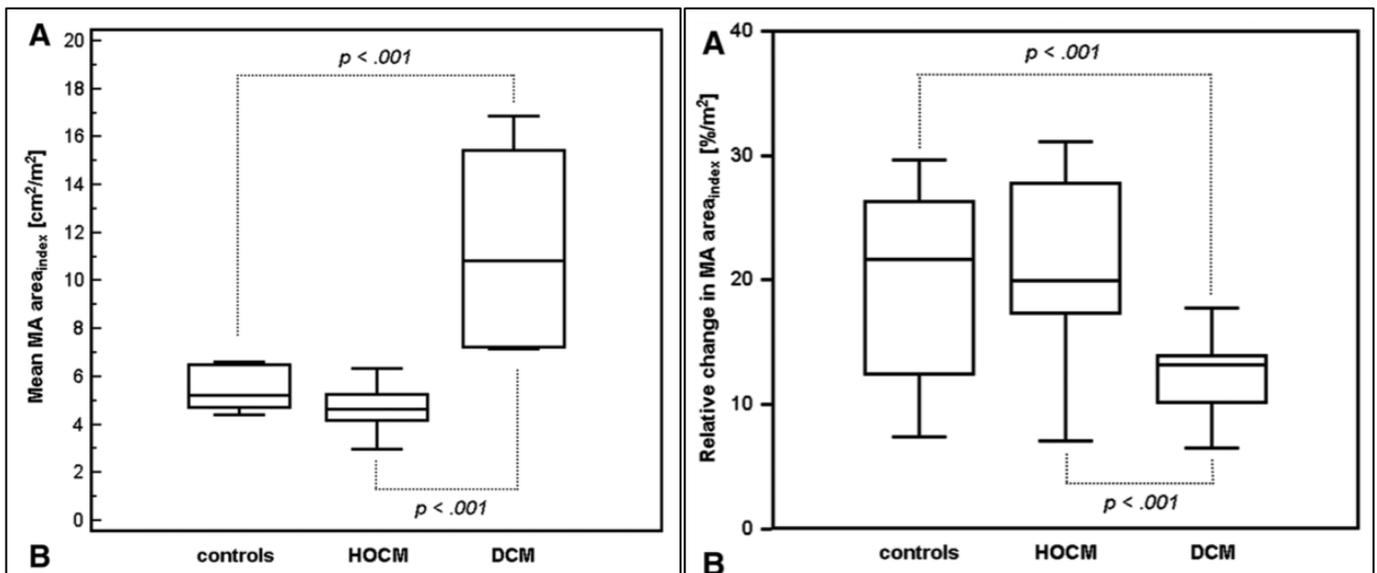
Ce rapprochement a pour conséquence d'augmenter la hauteur de l'anneau et donc d'accentuer son aspect en selle de cheval.²⁶

Ce phénomène, en rapprochant les deux feuillets, participe à la bonne coaptation de la valve, notamment au début de la systole où la pression intra-ventriculaire gauche est encore relativement basse.

Après la contraction initiale, l'anneau s'élargit progressivement. Cet élargissement a été interprété comme un moyen de maintenir la tension sur les cordages valvulaires pendant que le ventricule se raccourcit.²⁶

La taille de l'anneau et ses modifications tridimensionnelles lors de la systole sont altérées de manière importante en cas de valvulopathie²⁶⁻²⁹ (valve myxoïde ou insuffisance mitrale ischémique) ou de cardiomyopathie³⁰ (cardiopathie hypertrophique ou cardiopathie dilatée).

Dans les cardiopathies dilatées la surface de l'anneau est en moyenne plus grande. Elles présentent en revanche des variations de la surface de l'anneau moins importantes.



Alkhadi and al : surface de l'anneau mitral chez des patients sains, avec CMHO et avec CMD. Variation de la surface de l'anneau entre systole et diastole en fonction de la pathologie cardiaque. ³⁰

HOCM/CMHO : cardiomyopathie hypertrophique obstructive. DCM/CMD : cardiomyopathie dilatée. MA : anneau mitral

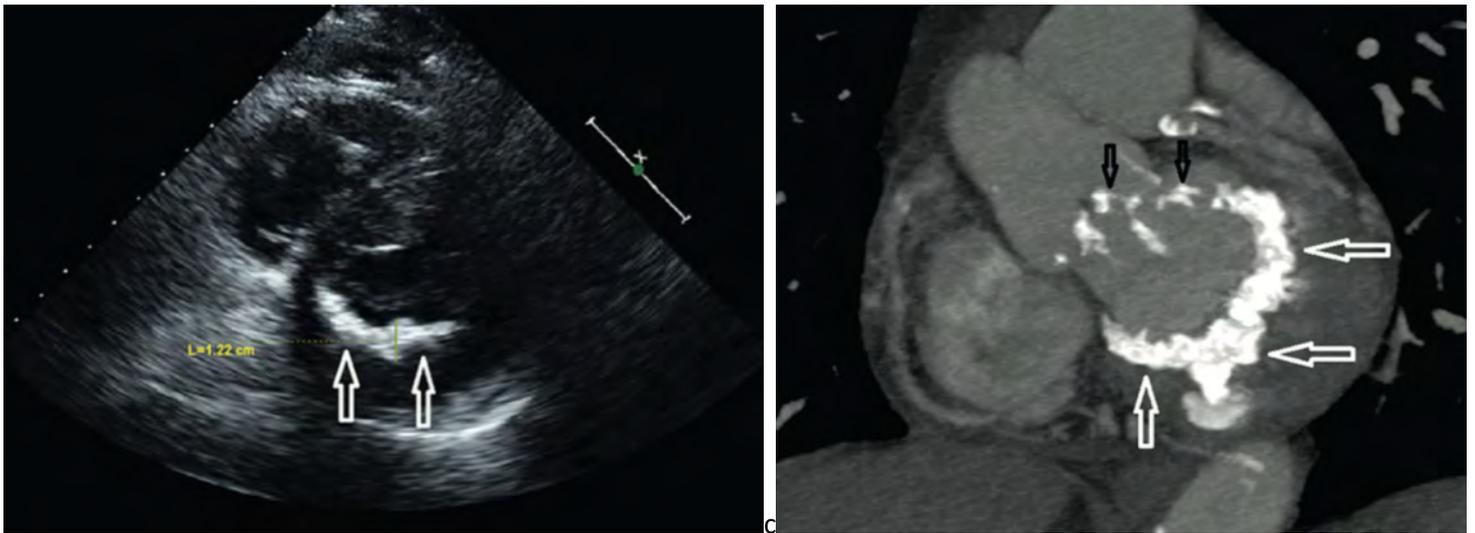
c) Variantes pathologiques de l'anneau mitral

i. Maladie annulaire calcifiante (MAC)

De larges études par autopsie ont retrouvé une prévalence de la maladie annulaire calcifiante chez environ 10% des patients. ^{31,32}

La MAC affecte préférentiellement la partie postérieure de l'anneau. Elle forme un dépôt semi-lunaire de calcium à l'intérieur de l'anneau fibreux, avec généralement une extension limitée à l'appareil valvulaire.

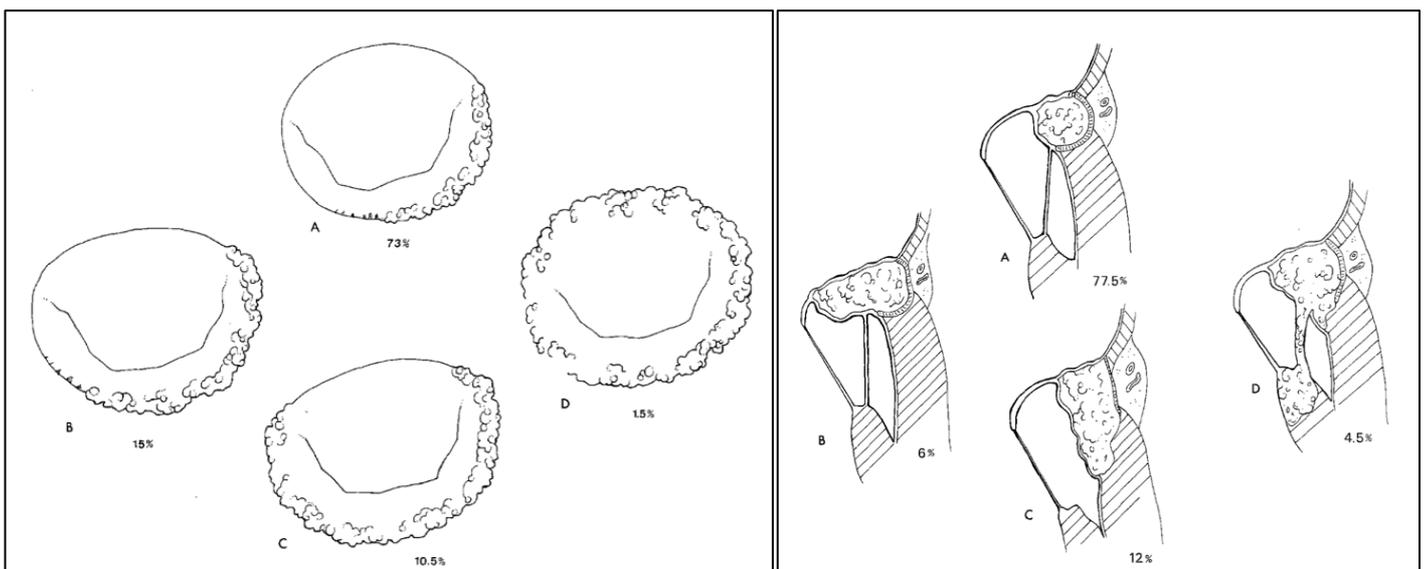
Cette physiopathologie diffère de celle observée dans les maladies valvulaires rhumatismales, qui touchent généralement en premier lieu les commissures et le tissu valvulaire. Dans ces dernières, l'extension à l'anneau se fait de manière tardive.



Abramowitz³³ : MAC vue en échographie en coupe para sternale petit axe (à gauche) et en scanner (à droite)

Dans la série de Carpentier³⁴ étudiant 68 patients opérés d'une insuffisance mitrale sévère avec calcifications extensives (plus d'un tiers de l'anneau mitral), 88% des patients avaient un processus de calcification occupant entre un tiers et la totalité de l'anneau mitral postérieur. 10% des patients avaient un processus touchant la totalité de l'anneau postérieur. Seulement 1,5% des patients avaient un processus de calcification atteignant la portion antérieure de l'anneau.

Verticalement, le processus de calcification était limité à l'anneau dans 77% des cas. Il s'étendait au tissu valvulaire chez 6% des patients, au myocarde ventriculaire chez 12% et au groupe musculaire antérieur dans 4,5% des cas.



Carpentier³⁴ : fréquence de chaque extension du processus de calcification

La formation calcique est encapsulée dans une gaine fibreuse distincte des tissus environnants, exceptée dans les zones d'infiltration myocardique.

Dans la majorité des cas, l'anneau fibreux restant présente de nombreuses zones de déhiscence. Ces zones sont comblées par des substances lipidiques, des dépôts protéiques et des dépôts de plaquettes.

On parle de MAC modérée quand le processus de calcification atteint moins de la moitié de l'anneau, de MAC sévère au-delà de la moitié de l'anneau.

La MAC a longtemps été considérée comme un phénomène dégénératif passif lié à l'âge. Les données actuelles de la science tendent plus vers un phénomène actif semblable à celui de l'athérosclérose.

Le processus est accéléré par les conditions qui augmentent le stress valvulaire : sténose aortique, cardiomyopathie hypertrophique, hypertension artérielle, prolapsus valvulaire.

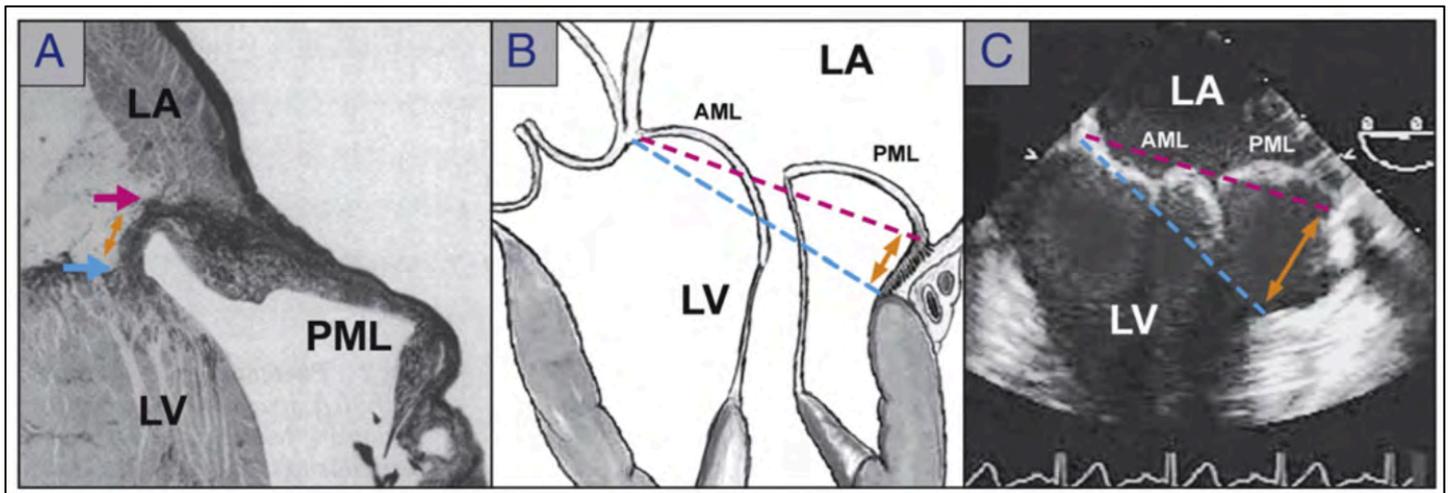
Des maladies métaboliques peuvent également être impliquées : insuffisance rénale chronique, maladie de Marfan, haut risque cardiovasculaire³⁵.

La MAC est associée à de nombreuses implications cliniques : majoration de la morbi-mortalité cardiovasculaire³⁶, augmentation des troubles conductifs et rythmiques (fibrillation atriale), augmentation des pathologies valvulaires.³³

L'infiltration calcique de la base du feuillet mitral postérieur réduit la mobilité valvulaire. Cela a pour conséquence d'augmenter la traction sur les cordages, facilitant l'élongation ou la rupture de ceux-ci. Plus rarement, le dépôt de calcium induit également un certain degré de sténose de la valve mitrale.

ii. Disjonction atrio-ventriculaire

Dans les valves mitrales myxoïdes ou en cas de dégénérescence fibro-élastique, l'anneau mitral est parfois tendu, en rideau, élargissant la séparation entre l'oreillette gauche et le ventricule gauche. Il apparaît alors un déplacement de l'insertion du feuillet et de l'anneau postérieurs vers l'oreillette gauche : c'est la disjonction atrio-ventriculaire.^{37 38}



A : coupe histologique d'une disjonction annulaire mitrale³⁸. La flèche rose (du haut) montre la jonction LA-PML. La flèche bleue (du dessous) montre l'extrémité supérieur de la portion basale du ventricule gauche.

B et C : La ligne bleue correspond au diamètre de l'anneau « d'origine », la ligne rouge représente le diamètre de l'anneau « déplacé ».³⁷

PML : feuillet mitral postérieur. LV : ventricule gauche. LA : oreillette gauche

iii. Myocardial shelf (« plateau myocardique »)

Dans les insuffisances mitrales fonctionnelles, la dilatation du ventricule gauche ou les anomalies de la contraction segmentaire du myocarde entraîne un déplacement postéro-apical des muscles papillaires. A ce déplacement s'associent une restriction bivalvulaire des feuillets (tethering) et une dilatation annulaire.

Un remodelage de la base du ventricule gauche peut alors former un plateau myocardique ou « myocardial shelf » visualisable au scanner.

Il est important de noter que la morphologie, la taille voire la présence du myocardial shelf peut varier au cours du cycle cardiaque, disparaissant parfois en systole.³⁹

L'identification d'un myocardial shelf et sa quantification dans les différentes phases du cycle cardiaque sont particulièrement importantes en cas d'utilisation de prothèses avec ancrage dans la base du ventricule gauche.



Faggioni et al ³⁹ : Coupe 2 cavités en TDM montrant un « myocardial shelf » chez un patient avec dilatation ventriculaire gauche marquée

D. Cordages tendineux

Les cordages tendineux naissent pour la plupart de petits mamelons sur la portion apicale des muscles papillaires.

La majorité des cordages se divisent peu après leur origine ou juste avant leur insertion sur la valve, rarement à mi-distance.

Il existe de nombreuses classifications des cordages tendineux mitraux.

Une des premières classifications ⁴⁰ différenciait trois types de cordages en fonction de leur zone d'attachement aux valves :

- Les cordages de premier ordre s'insèrent sur le bord libre, ils sont nombreux et fragiles.
- Les cordages de second ordre s'insèrent sur la face ventriculaire de la zone rugueuse. Ils sont plus épais que les cordages de premier ordre.
- Les cordages de troisième ordre proviennent directement de la paroi ventriculaire et s'attachent uniquement au feuillet mitral postérieur.

Le groupe de Toronto⁴¹ distingue les cordages commissuraux, les cordages des feuillets (« *leaflet chords* ») et les cordages entre les feuillets (« *interleaflet chords* »).

Les cordages tendineux sont des structures complexes en forme de corde.

Leur couche interne est composée d'un maillage de collagène dense et organisée. La couche externe est composée d'un maillage lâche, désorganisé, associé à des fibres élastiques et des vaisseaux sanguins. Les fibroblastes sont répartis entre les couches interne et externe. La couche externe est recouverte d'une couche endothéliale en continuité avec celle de la valve.

L'organisation tridimensionnelle des fibres de collagène confère des propriétés élastiques aux cordages, atténuant le stress important s'exerçant sur ceux-ci pendant la systole ventriculaire⁴². La présence de vaisseaux sanguins suggère un rôle nutritionnel pour les feuillets.⁴³

La zone la plus mince et donc la zone la plus fragile des cordages est située au niveau de leur zone d'insertion sur le feuillet (zone privilégiée pour les ruptures de cordage).⁴⁴

La continuité entre muscle papillaire – cordage et anneau joue un rôle important dans le maintien de la fonction ventriculaire gauche. On peut ainsi comparer les cordages principaux à des ligaments du ventricule gauche.

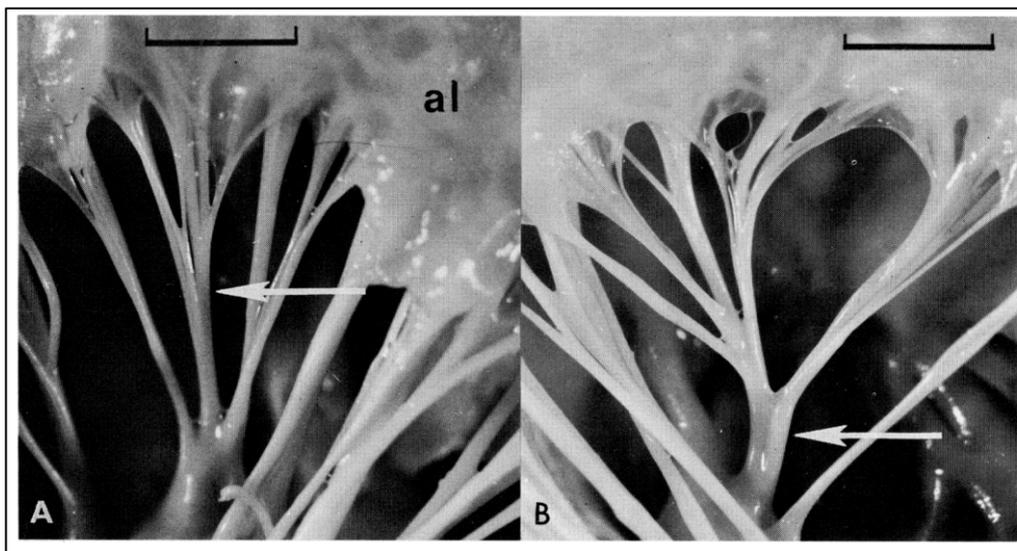
a) Cordages commissuraux.

Normalement il n'y a que deux groupes de cordages commissuraux, chacun supportant une des régions commissurales : un cordage pour la commissure antéro-latérale, un autre pour la commissure postéro-médiale.

Ces cordages se présentent sous la forme d'un cordage unique qui se ramifie secondairement. Ils permettent aux régions valvulaires adjacentes de s'écarter en diastole et de se coapter en systole.

Ils possèdent une morphologie particulière. Après une première portion fusionnée, ils se divisent en éventail à proximité des commissures pour s'insérer sur le bord libre des régions commissurales.

Les branches du cordage commissural postérieur sont plus longues, plus épaisses et ont une étendue d'insertion plus large que celles de son homologue antérieur.



Lam and al⁴¹: Cordages commissuraux s'insérant sur les commissures antéro-latérale et postéro-médiale (échelle 5mm)

b) Cordages dits valvulaires (« leaflet chords »)

Ils sont de plusieurs formes.

Les plus nombreux sont les cordages de la zone rugueuse. Lam and al⁴¹ décrivent que ceux-ci se ramifient habituellement en trois branches peu de temps après leur origine à partir du muscle papillaire :

- Une branche s'insère sur le bord libre de la valve : la branche marginale
- Une branche s'insère près de la ligne d'apposition : la branche secondaire
- Une branche s'insère sur la zone basale de la zone rugueuse : la branche basale

Il existe cependant des cordages atypiques avec moins de trois ramifications.

On peut également classer ces cordages en fonction de leur situation par rapport aux cordages principaux :

- Les cordages para-commissuraux s'insèrent entre la commissure et le cordage principal.
- Les cordages para-médians s'insèrent entre le cordage principal et le milieu de la valve.

A noter que les ramifications qui s'insèrent sur la zone rugueuse du feuillet postérieur sont généralement plus courtes et plus fines que celles du feuillet antérieur.

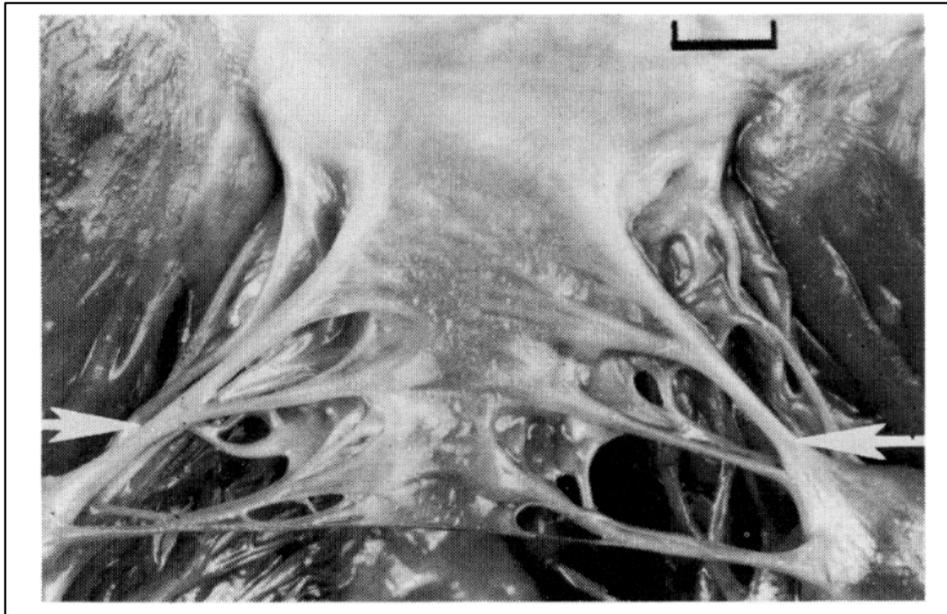
c) Cordages spécifiques

Les « strut chords » ou cordages principaux sont des cordages valvulaires s'insérant sur la zone rugueuse du feuillet mitral antérieur. Ils se distinguent par leur épaisseur et leur longueur importantes.

Ils ont habituellement leur origine sur l'extrémité des muscles papillaires antérieur et postérieur. Ils s'insèrent sur la face ventriculaire du feuillet antérieur près de la ligne de fermeture, ils se divisent rarement avant de s'insérer sur le feuillet. Les cordages principaux sont présents dans plus de 90 % des cas.

Les ruptures des cordages principaux sont graves. En cas d'élongation, la chirurgie de raccourcissement concerne quasi-exclusivement ces cordages.

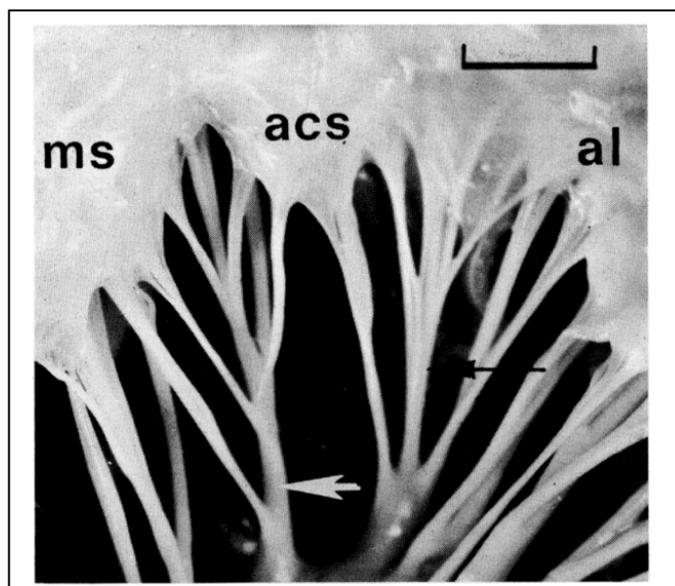
Le feuillet mitral postérieur ne reçoit pas de cordages principaux.



Lam and al ⁴¹ : flèches blanches montrant deux cordages principaux

Les cordages basaux sont spécifiques au feuillet mitral postérieur et proviennent de la paroi ventriculaire. Ces cordages sont retrouvés dans deux tiers des cas. Ils contribuent à la géométrie ventriculaire tout en renforçant le complexe mitral. Une dyskinésie segmentaire du ventricule gauche peut changer l'orientation des cordages basaux et entraîner une restriction de la petite valve mitrale.

Les cordages des fentes (« clefts cords ») sont spécifiques au feuillet mitral postérieur, il s'agit de versions miniatures des cordages commissuraux.



Lam and al ⁴¹ : flèche blanche montrant un cordage de fente (cleft chord) typique.

Parallèle entre la classification de Toronto et la classification du Quain's éléments of anatomy :

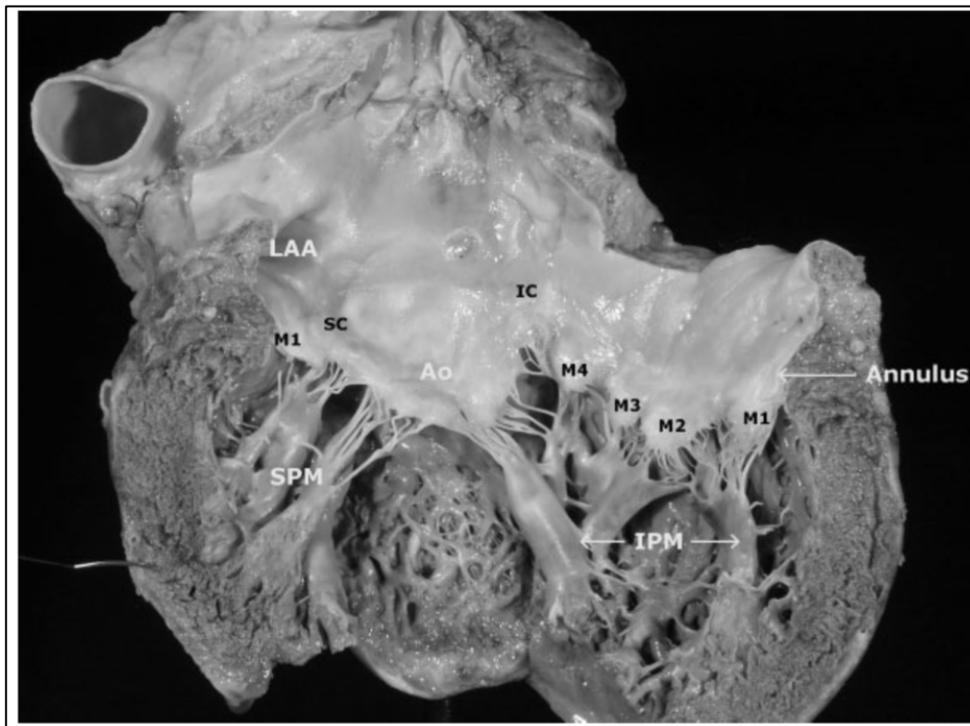
- Le groupe de cordage de premier ordre comprend : les « cleft chords » pour une partie de leurs ramifications, une partie des cordages de la zone rugueuse et les cordages commissuraux.
- Le groupe de cordages de second ordre comprend : les « strut chords », certains « cleft chords » et certains cordages de la zone rugueuse.
- Les cordages de troisième ordre correspondent aux cordages basaux.

Ancienne classification	Lam and al (1970)	Ritchie and al (2005)	Rôle principal
Cordages de 1er ordre	Cordages commissuraux	Cordages commissuraux	Rôle important dans la coaptation mitrale / continence valvulaire
	Cordages s'insérant sur le bord libre de la zone rugueuse du feuillet mitral antérieur	Cordage antérieur marginal	
	Cordages s'insérant sur le bord libre de la zone rugueuse du feuillet mitral postérieur	Cordage postérieur marginal	
	Branches des clefts chords		
Cordages de 2ème ordre	Cordages s'insérant après le bord libre de la zone rugueuse du feuillet mitral antérieur	Cordage antérieur intermédiaire	Rôle important dans la géométrie valvulaire
	Cordages s'insérant après le bord libre de la zone rugueuse du feuillet mitral postérieur	Cordage postérieur intermédiaire	
	Cordages principaux (strut chords)	Cordages principaux antérieurs	
	Cordage principal des clefts chords du feuillet mitral postérieur		
Cordages de 3ème ordre	Cordages basaux du feuillet mitral postérieur	Cordages basaux postérieurs	Rôle important dans la géométrie ventriculaire

Obadia et son équipe ⁴⁵ ont étudié sur un modèle de cœur porcine les conséquences sur la fonction valvulaire et sur la fonction ventriculaire gauche de la section des cordages du premier ou du deuxième ordre.

Ils ont montré que l'absence de cordage de premier ordre entraînait une fuite valvulaire majeure avec augmentation de la pression capillaire pulmonaire. Au contraire, la section des cordages du second ordre entraînait une dégradation de la fonction ventriculaire gauche malgré une fonction valvulaire préservée.

Les cordages de premier ordre semblent donc plus impliqués dans la compétence de la valve mitrale tandis que les cordages de deuxième ordre semblent plus impliqués dans la géométrie et la fonction ventriculaire gauche.



Muresian ⁹ : Vue de la valve mitrale après ouverture du ventricule gauche.

A noter que le feuillet mitral postérieur présente de manière non classique quatre segments sur cet exemple.

SPM : muscle papillaire antéro-latéral. IPM : muscle papillaire postéro-médial. SC : commissure antéro-latérale. IC : commissure postéro-médiale. LAA : auricule gauche.

Certaines études ⁴⁶ ont montré que les distances entre le sommet de chaque muscle papillaire (défini par l'insertion du cordage principal) et la zone de l'anneau correspondante sont similaires.

d) Variations pathologiques :

La dégénérescence myxoïde rend les cordages anormalement longs et abolit leur capacité élastique, entraînant un prolapsus.

A l'inverse la dégénérescence (déficience) fibro-élastique entraîne une rétraction des tissus rendant les cordes vulnérables à la rupture.

E. Muscles papillaires

Il existe deux groupes de muscles papillaires (dit aussi piliers) au niveau du ventricule gauche :

- Le groupe antéro-latéral
- Le groupe postéro-médial

Les extrémités des piliers sont habituellement en regard des commissures respectives. ⁴⁷

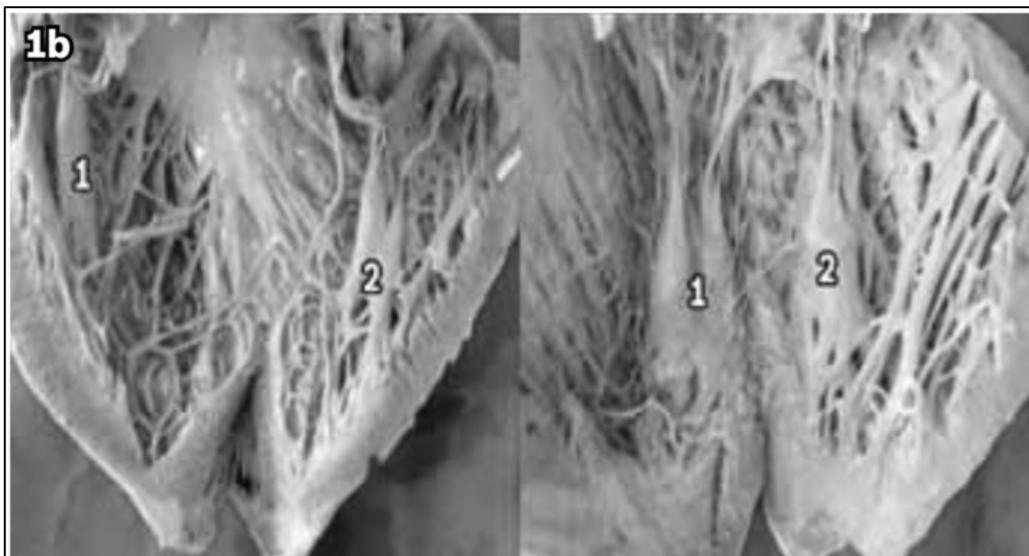
Chaque muscle papillaire fournit des cordages à la moitié correspondante de chaque feuillet. Le groupe musculaire postéro-médial donne des cordages pour les moitiés médiales des deux feuillets, tandis que le groupe antéro-latéral donne des cordages pour les moitiés latérales. ¹⁸

Il existe une grande variabilité dans le nombre et la forme des muscles papillaires. Le travail de Victor et Nayak qui a porté sur 100 cœurs humains a montré que chaque appareil sous valvulaire mitral, incluant les muscles papillaires, est différent d'une personne à l'autre. ⁴⁸

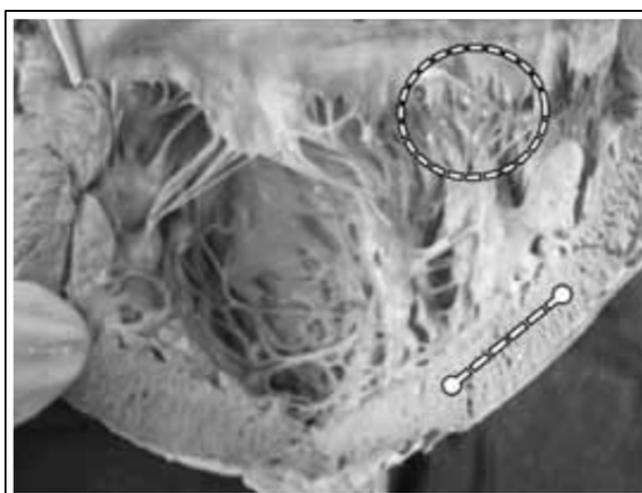
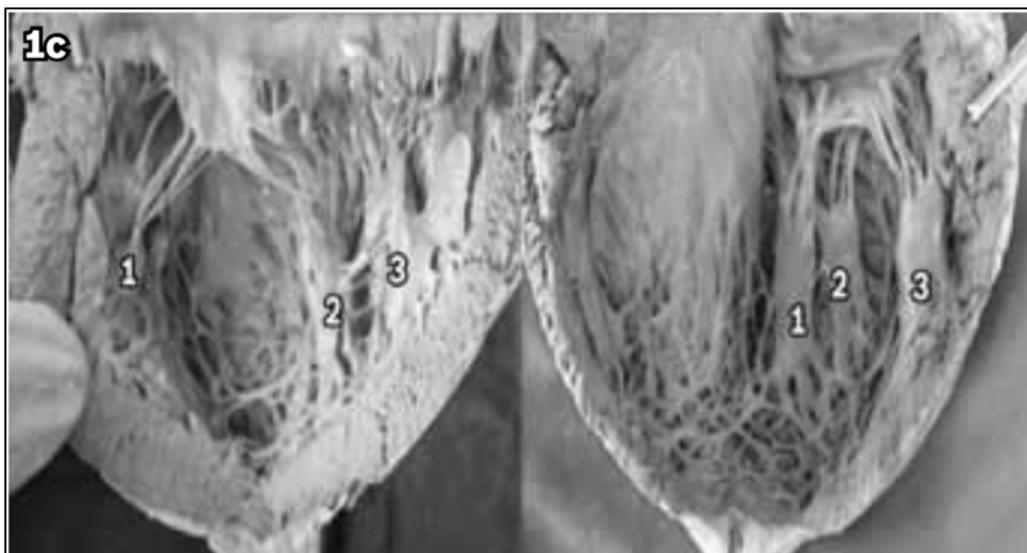
Gunnal⁴⁹, en disséquant 116 cœurs humains, a retrouvé également une très grande variabilité des muscles papillaires. Il n'a retrouvé la représentation classique de deux muscles papillaires dans le ventricule gauche que dans 3,44% des cas. La situation la plus fréquemment retrouvée était la présence de deux ou trois groupes de muscles papillaires (cf ci-dessous).

Plusieurs classifications de muscle papillaire existent. Gunnal a distingué les formes (conique, à sommet élargi, pyramidale et en éventail) des différents modèles de groupes papillaires observés. Le tableau ci-dessous résume les différents aspects observés dans cette étude de 116 cœurs humains.

Variation en nombre		Variation en forme (Plusieurs formes possibles chez un même spécimen)		Variation en modèle	
2 muscles	3,5 % (4)	Conique	45,5 % (55)	Bases séparées – Apex fusionnés	21,5 % (25)
2 groupes de muscles	43% (50)	Sommet élargi	50,5 % (60)	Base unique – Apex divisé	21,5 % (25)
3 groupes de muscles	32% (37)	Pyramidal	27 % (31)	Muscles multiples, de petite taille	6 % (7)
4 Groupes de muscles	21,5 % (25)	Éventail	13 % (15)	Muscle allongé	2 % (2)
				Muscle perforé	9 % (10)
				Base du muscle attachée à un long pont musculaire	3 % (3)



Gunnal ⁴⁹ : exemples de deux groupes de muscle papillaire



Gunnal ⁴⁹ : En haut, exemple de trois groupes de muscle papillaire. En bas, la ligne montre l'emplacement habituel des muscles papillaires sur le tiers médian du ventricule. Le cercle montre un emplacement plus rare de muscles papillaires sur le tiers basal du ventricule.

La description du positionnement des groupes musculaires dans la cavité ventriculaire varie en fonction des études :

- Dans les 116 cas étudiés par Gunnal, 95% des groupes naissaient du tiers médian du ventricule gauche, 5% naissaient du tiers basal. ⁴⁹
- Ho décrit quant à lui des groupes papillaires pouvant naître des tiers médian et apical du ventricule gauche. ¹⁴
- Victor et Nayak décrivent quant à eux des groupes papillaires antéro-latéraux naissant dans 79,5% des cas sur le tiers médian, 19% sur le tiers basal et 1,5% sur le tiers apical. ⁴⁸

Sakai et son équipe ont étudié anatomiquement sur des cœurs sains la distance entre le sommet des muscles papillaires et l'anneau mitral ⁴⁶.

Dans leur étude, les distances étaient similaires :

- Pour le groupe musculaire antéro-latéral : $23.5 \pm 3.7\text{mm}$ jusqu'au trigone fibreux gauche et $23.2 \pm 3.6\text{mm}$ jusqu'à un point situé entre P1 et P2.
- Pour le groupe musculaire postéro-médial : $23.5 \pm 4.0\text{mm}$ jusqu'au trigone fibreux droit et $23.5 \pm 3.9\text{mm}$ jusqu'à un point situé entre P2 et P3.

La position des piliers et leur orientation jouent un rôle primordial dans la répartition des forces sur l'ensemble des deux feuillets et dans la bonne coaptation de la valve.⁵⁰

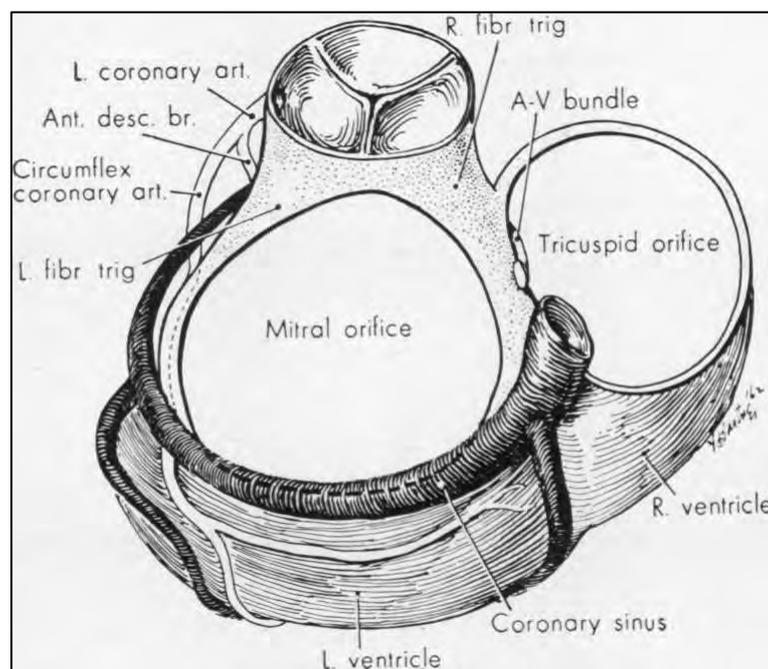
Une dilatation ventriculaire gauche peut déplacer les muscles papillaires en position apicale. Ce déplacement entraîne une restriction des deux valves mitrales par effet tenting. En fonction du degré de tenting et de la zone de coaptation résiduelle, une régurgitation mitrale d'intensité variable peut en découler.

La vascularisation des muscles papillaires présente de nombreuses variations inter-individuel. Elle est très dépendante de la dominance de vascularisation coronaire (gauche ou droite).

Le muscle papillaire postéro-médial est vascularisé par des branches coronaires postérieures qui peuvent naître de la coronaire droite ou de la circonflexe (en fonction de la dominance coronaire).

Le muscle papillaire antéro-latéral est vascularisé par des branches de l'artère diagonale et de l'artère circonflexe.

F. Structures adjacentes à l'anneau mitral



Duplessy⁸ : Schéma illustrant les structures voisines à l'anneau mitral (vue atriale après ablation des massifs auriculaires)

a) Sinus coronaire

La grande veine cardiaque naît à proximité de la pointe du cœur, elle sillonne dans le sillon interventriculaire antérieur puis vers le sillon atrio-ventriculaire gauche. Elle contourne le bord gauche du cœur et se termine en se dilatant pour former le sinus coronaire (SC).

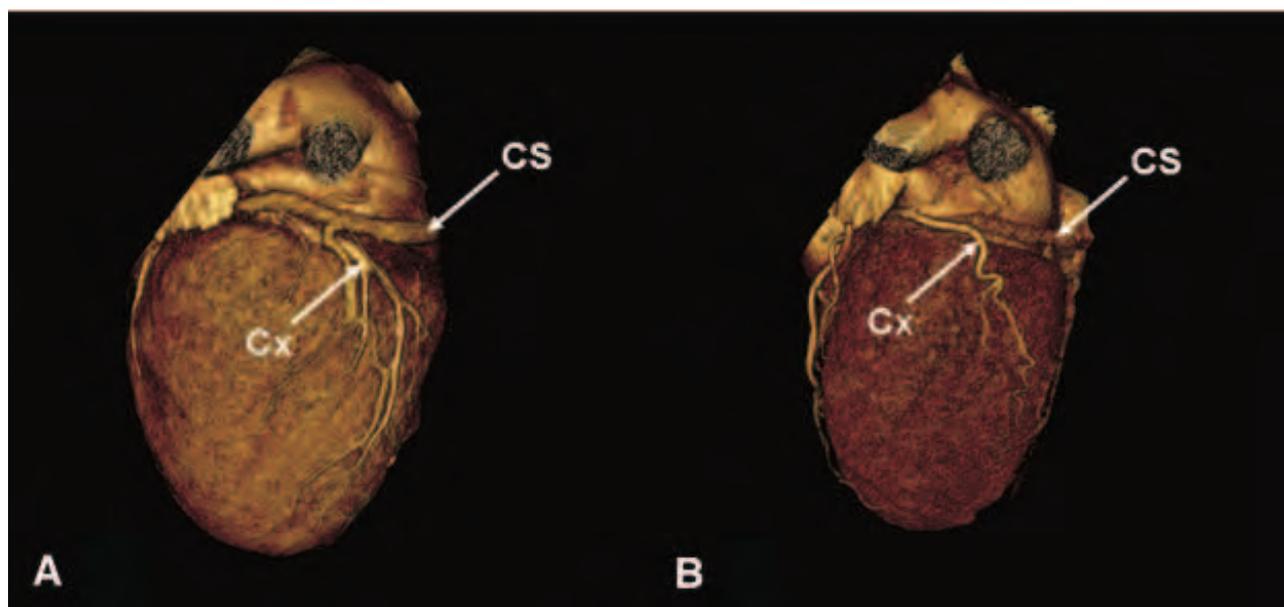
Le sinus coronaire est le collecteur veineux principal du cœur. Outre la grande veine cardiaque, il reçoit la veine interventriculaire postérieure (sillon homonyme), la petite veine du cœur (sillon atrio-ventriculaire droit), la veine postérieure du ventricule gauche et la veine oblique de l'atrium gauche.

Il est important de noter que le sinus coronaire (SC) sillonne derrière la paroi auriculaire gauche et non derrière l'anneau mitral.

L'étude anatomique sur des cœurs normaux de l'équipe de Maselli⁵¹ a trouvé une distance entre l'anneau mitral et le sinus coronaire de $9,7 \pm 3,2$ mm (IC 5 - 19 mm, médiane 9 mm) au niveau de P3 et de $5,7 \pm 3,3$ mm (IC 1 - 15 mm, médiane 5 mm) au niveau de P2.

En cas d'insuffisance mitrale sévère ou de défaillance cardiaque, la distance entre le sinus coronaire et l'anneau mitral s'accroît.⁵²

L'artère circonflexe (Cx) sillonne entre le sinus coronaire et l'anneau mitral dans 60 à 80% des cas. L'artère diagonale ou une autre branche coronaire sillonne entre la grande veine cardiaque et l'anneau mitral dans 15 à 20% des cas.⁵¹



Tops and al⁵² : reconstruction 3D scannographique illustrant la relation entre le sinus coronaire (SC) et l'artère circonflexe (Cx).

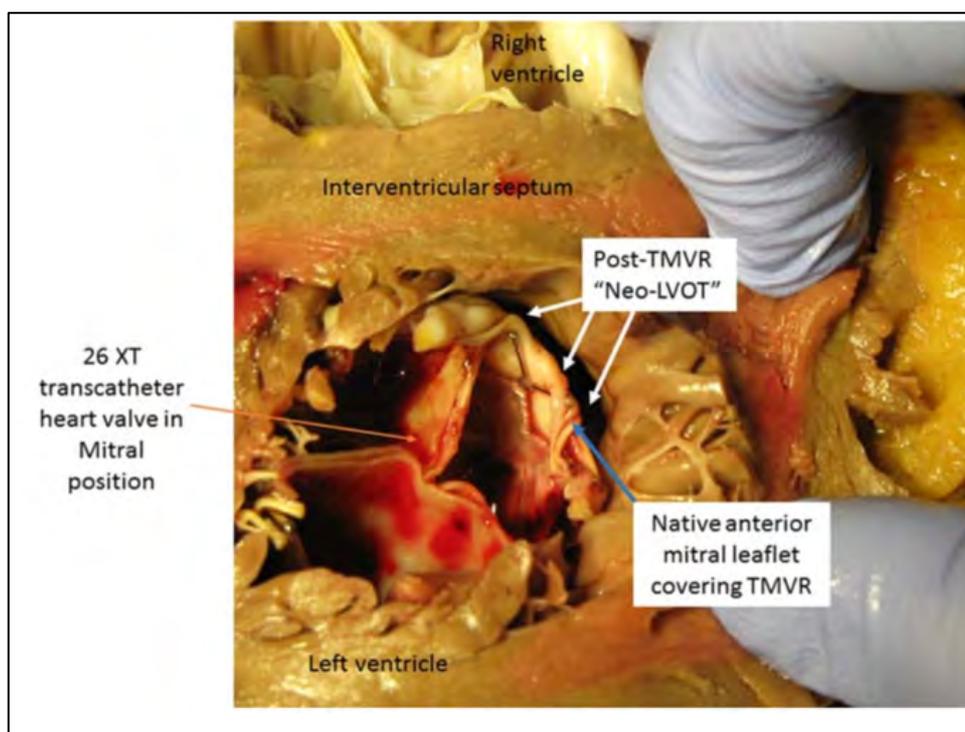
A (60 -80% des cas) : la Cx se situe plus profondément que le SC, entre celui-ci et l'anneau mitral (AM). **B** : la Cx se situe au-dessus du SC.

Une prothèse trop grande entraîne un risque d'obstruction sous-aortique. L'obstruction est généralement dynamique, liée à un déplacement vers l'avant du feuillet mitral antérieur dans la chambre de chasse aortique ⁵⁴. La mortalité des obstructions sous-aortiques secondaires est extrêmement importante. ^{55 56}

Celle-ci peut être favorisée par un angle mitro-aortique ouvert, un bourrelet sous-aortique du septum interventriculaire, une cavité ventriculaire gauche de petite taille, un feuillet mitral antérieur dystrophique de grande taille. Les risques sont moindres en cas de restriction du feuillet mitral antérieur.

On définit ainsi en post TMVI, la néo-LVOT (Left Ventricular Outflow Tract = chambre de chasse sous-aortique) comme l'espace entre le feuillet mitral antérieur et le septum interventriculaire.

Très rarement une surestimation de la taille de la prothèse peut entraîner une rupture de l'anneau.

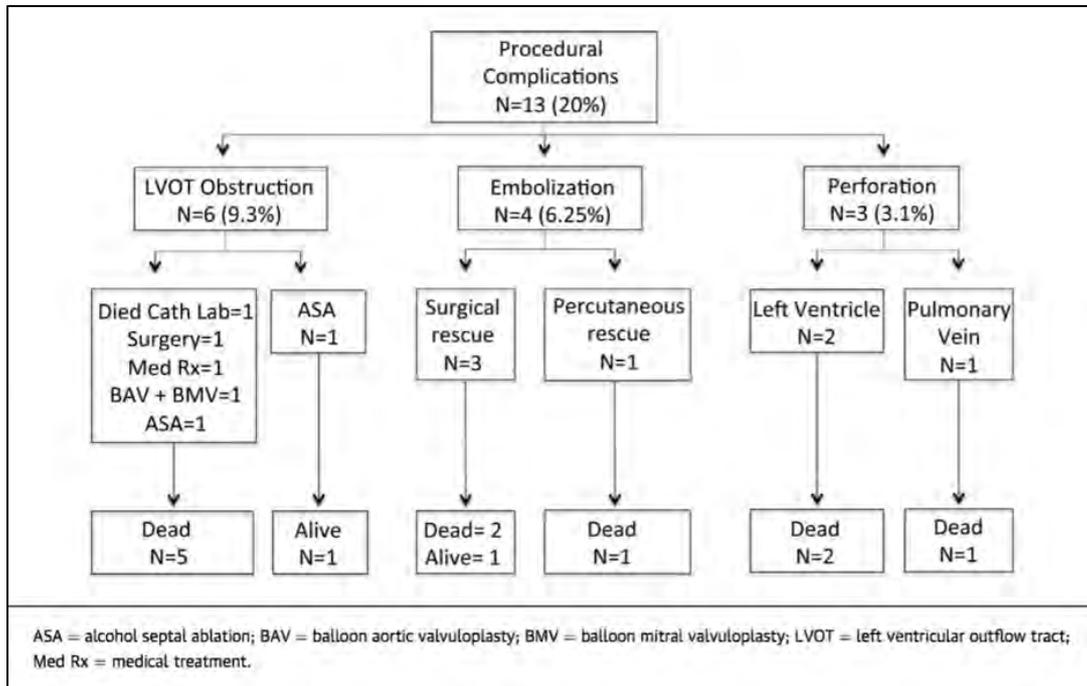


Wang et al ⁵⁷ : Autopsie d'un cœur avec prothèse cardiaque implantée par cathétérisme en position mitrale. Notez l'obstruction sous-aortique majeure.

Au contraire, la mise en place d'une prothèse trop petite expose au risque de fuite para-valvulaire ⁵⁸ ou d'embolisation de la prothèse. ⁵⁹

Dans le registre de 2015 (*Guerrero* ⁵⁶) ayant recensé la population particulière des TVMI (Transcatheter Mitral Valve Implantation) sur maladie annulaire calcifiante (MAC), les décès étaient de 29,7 % à 30

jours. Une obstruction sous-aortique secondaire est survenue chez 6 patients sur 64 avec une mortalité élevée (5 patients sur 6).



Guerrero⁵⁶ : Mortalité à 30 jours et complications péri-procédurales des TMVI sur MAC

B. Place de l'imagerie

L'imagerie cardiaque par échographie transthoracique (ETT), échographie transoesophagienne (ETO) et scanner (TDM) joue une place extrêmement importante que ce soit dans le screening pré-procédure, le guidage per-procédure ou le contrôle post-TMVI.⁶⁰

a. Évaluation anatomique de la région mitrale pré-procédure

- Mesure de l'anneau mitral (ETT / ETO / TDM) :

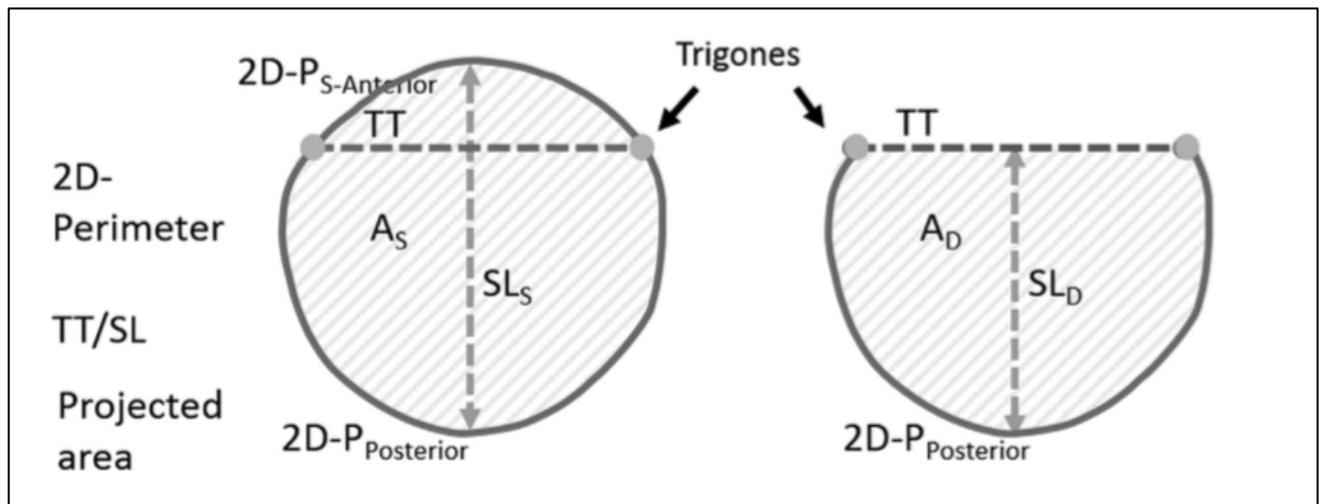
x Distance « septal to latéral » (SL ou SLs distance) : distance entre la portion aortique de l'anneau en A2 et la portion murale de l'anneau en P2

x Distance SLd (« D-Shaped concept ») : distance entre la ligne reliant les deux trigones fibreux (ligne TT) et P2. Cette distance est prise sur un axe perpendiculaire à la ligne TT passant par le centre.

x Distance inter-trigone (TT distance) : distance entre les trigones fibreux gauche et droit

x Distance inter-commissurale (CC ou IC distance) : distance entre l'anneau en P1 et l'anneau en P3 dans la vue bi-commissurale. Cette distance est prise sur un axe perpendiculaire à la distance SL passant par le centre.

x Périmètre et surface de l'anneau mitral.



Blanke²² : Concept du « D-shaped annulus » avec exclusion de la portion de l'anneau mitral antérieure à la ligne passant par les deux trigones fibreux (distance TT)

- Caractéristiques de la zone d'implantation de la prothèse (« landing zone »)

x Calcifications annulaires

x Disjonction atrio-ventriculaire : situation rare qui peut accompagner les insuffisances mitrales dégénératives avec valves myxoïdes ou la dégénérescence fibro-élastique.

x Myocardial shelf : remodelage de la portion basale du myocarde, visible surtout dans les insuffisances mitrales fonctionnelles avec restriction des feuillets mitraux et dilatation annulaire.

x Longueur des feuillets mitraux

x Insertion directe d'un groupe musculaire papillaire sur un des feuillets mitraux

x Trajectoire de l'anneau mitral

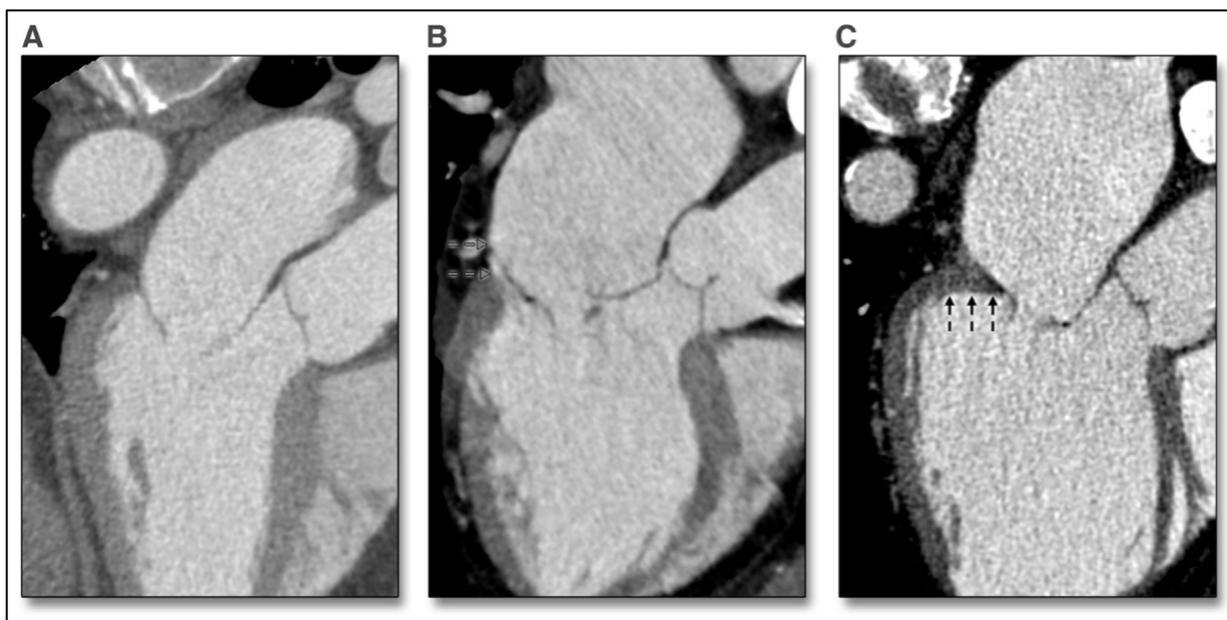
- Risque d'obstruction sous-aortique : concept de néo-LVOT

x Hypertrophie de la portion basale du septum interventriculaire (SIV)

x Longueur ou prolapsus du feuillet mitral antérieur

x Angle mitro-aortique

x Prothèse avec encombrement sous-valvulaire important

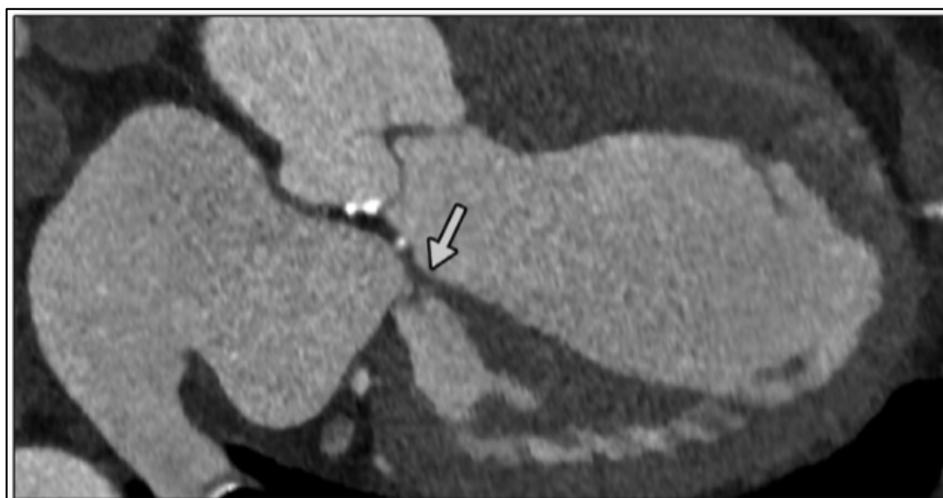


Naoum⁶¹ : exemples de « Landing zone ».

A : Jonction atrio-ventriculaire normale

B : Disjonction atrio-ventriculaire

C : Myocardial shelf



Blanke⁶⁰ : exemple d'insertion directe du muscle papillaire antéro-latéral sur la valve mitrale antérieure

Le scanner permet, en cas de voie d'abord apicale, d'évaluer non seulement le point de ponction idéal du ventricule gauche, mais également d'en déduire l'abord intercostal idéal (Espace intercostal optimal et distance par rapport au sternum).

Il permet également de calculer les angles de scopies perpendiculaires à la structure à analyser, et ce afin de réduire les durées d'irradiation et les doses d'iode.^{62 63 64}

b. Optimisation et guidage per-procédural

L'échographie est extrêmement utile en per-procédure pour :

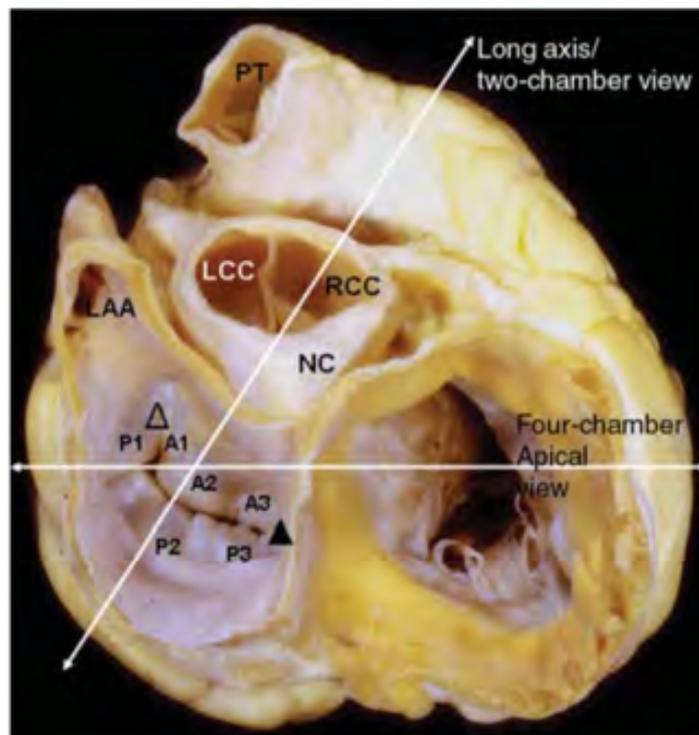
- Contrôler le point de ponction du ventricule gauche (X plan)
- Monitorer la position des guides
- Guider le bon positionnement de la prothèse, monitorer l'avancement du système de largage du dispositif (X plan et ETO 3D)
- Contrôler et guider l'ancrage de la prothèse. Vérifier l'absence d'obstruction sous-aortique ou de fuite para-valvulaire (ETO 3D et 2D).

c. Contrôle post-procédure

L'ETO est très utile en fin de procédure pour : s'assurer de l'absence de fuite para-valvulaire ou d'obstruction sous-aortique, contrôler le gradient trans-prothétique, contrôler le positionnement et la stabilité de la prothèse.

4) **Évaluation de l'anneau mitral par imagerie**

A. Analyse échographique de l'anneau

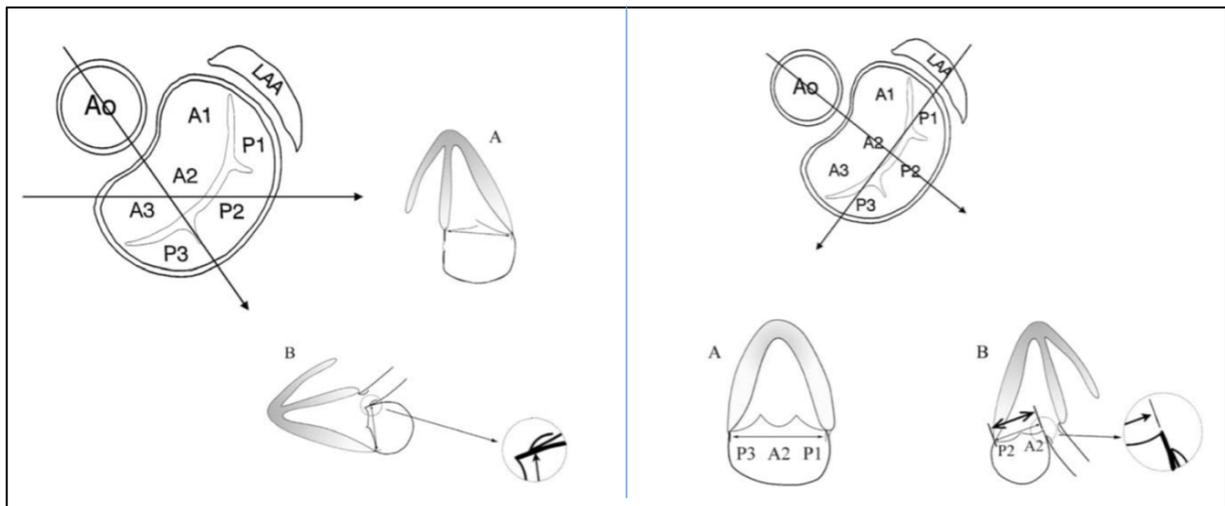


Mac Carthy¹⁵ : base du cœur avec localisation des vues échocardiographiques (2 et 4 cavités)

LAA : auricule gauche. LCC : cusp aortique gauche. NC : cusp aortique non coronaire. RCC : cusp aortique droite.

Foster et son équipe²⁴ se sont intéressés aux incidences optimales permettant une mesure précise des dimensions de l'anneau.

Il est apparu que l'analyse traditionnelle de l'anneau par voie para-sternale long axe (pour le diamètre SL) et par voie apicale quatre cavités (pour le diamètre CC) n'est pas correcte. Par ce biais, l'anneau n'est pas évalué le long de ses deux axes orthogonaux.



Foster et al²⁴ : comparaison de la méthode traditionnelle (à gauche) et de la méthode de mesure correcte (à droite) de l'anneau mitral.

A gauche : diamètre CC mesuré en apical 4 cavités, diamètre SL mesuré en parasternal grand axe

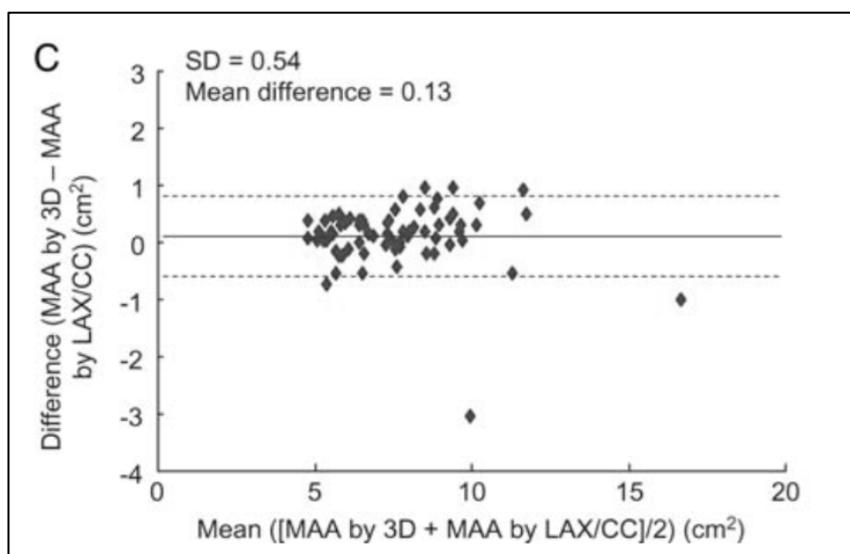
A droite : diamètre CC mesuré en apical bicommissural, diamètre SL mesuré en apical 3 cavités.

Ainsi les mesures effectuées selon la méthode traditionnelle entraînaient, par rapport aux données scanner, une surestimation moyenne de 6mm (23%) du diamètre SL et une sous-estimation moyenne de 5mm (12%) du diamètre CC. Les mesures effectuées selon la méthode de mesure anatomiquement correcte (« de Foster ») étaient en revanche bien corrélées aux données scanner (coefficient de corrélation r de 0,96 pour le diamètre SL ; 0,91 pour le diamètre CC).

En se basant sur les données histologiques, l'anneau doit être mesuré à la jonction entre le feuillet mitral postérieur et l'oreillette gauche en regard de P2, et à la jonction entre le feuillet mitral antérieur et le septum inter-valvulaire en regard de A2.

L'équipe de Hyodo⁶⁵ a comparé la mesure de l'anneau par échographie transthoracique (ETT) 2D selon la méthode de Foster aux mesures obtenues par échographie transoesophagienne (ETO) 3D (Philips Mitral Valve Quantification dit MVQ software).

Ils ont montré que la méthode de mesure la mieux corrélée ($r = 0,97$ avec p à $0,001$) aux données 3D était la méthode décrite par Foster, sans influence sur les mesures de la structure en selle de cheval de l'anneau.

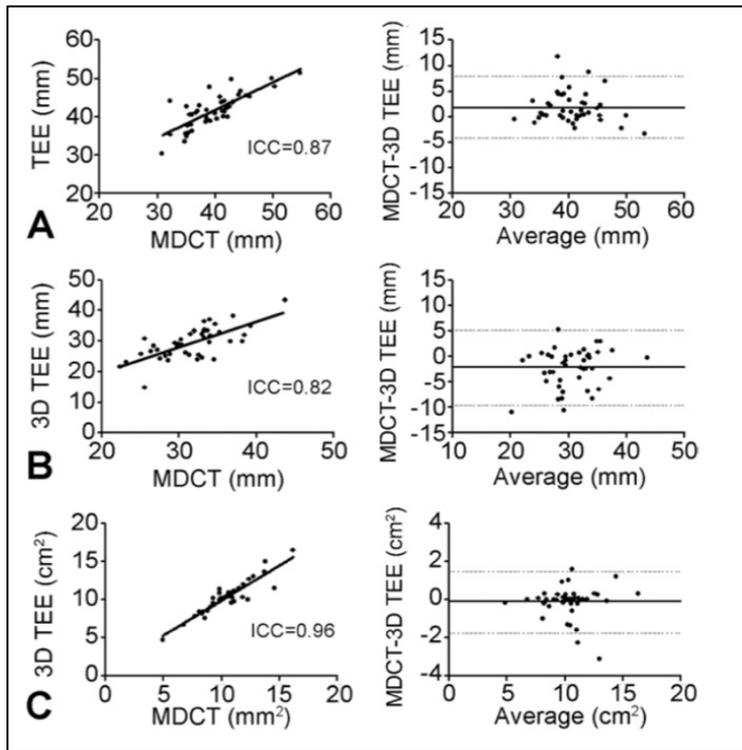


Hyodo⁶⁵ : comparaison entre les données obtenues par ETO 3D et les données obtenues en ETT 2D selon la méthode de Foster.
LAX = diamètre SL (septal to lateral). CC = diamètre inter-commissural. MAA = anneau mitral

L'équipe de Shanks⁶⁶ a comparé les données obtenues par ETO 3D (Philips MVQ software) à celle obtenues par scanner (reconstructions multiplanaires sans logiciel de reconstruction 3D dédié). L'étude a été menée chez une population de patients avec une insuffisance mitrale significative en cours d'évaluation pour un TMVI.

La corrélation entre les deux techniques était en moyenne correcte avec des coefficients de corrélation de 0.87 pour le diamètre CC ; 0,82 pour le diamètre SL et 0,96 pour la surface de l'anneau mitral.

Il faut cependant être très prudent concernant ce résultat puisque les différences pouvaient atteindre dans certains cas 10mm pour les distances et 2cm² pour les surfaces.

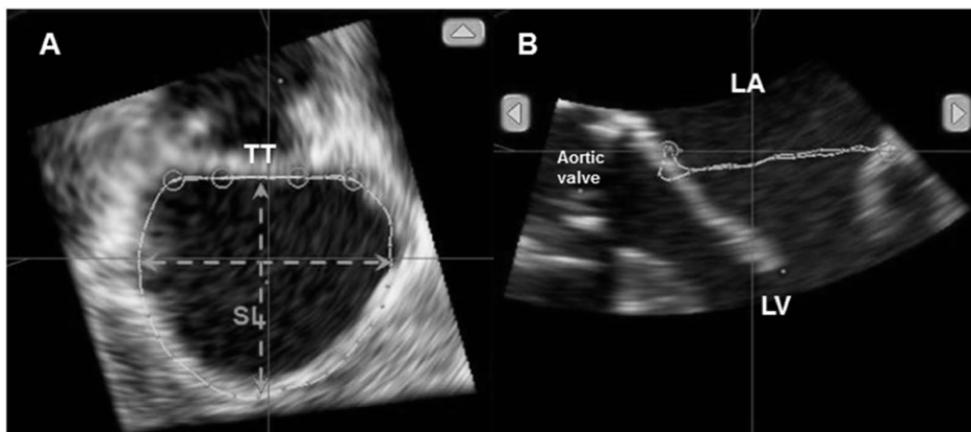


Shanks et al ⁶⁶ : Comparaison entre les mesures obtenues par ETO 3D et celles obtenues par scanner

A : Diamètre CC. B : Diamètre SL. C : Aire de l'anneau mitral.

L'équipe de Mak ⁶⁷ a effectué un travail similaire à celle de Shanks, en comparant les données obtenues par ETO 3D (Philips MVQ software) aux données scanner (reconstructions 3D par le logiciel 3mensio Structural Heart v7.0).

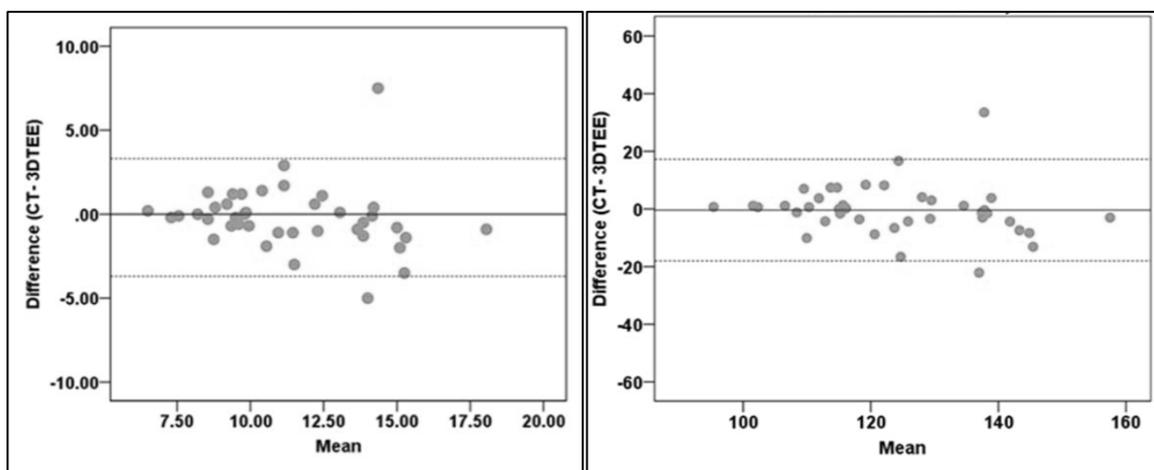
L'originalité de l'étude était la reprise de la théorie du D-shaped (Blanke et al ²²). Selon cette théorie, la prise en compte de la portion la plus antérieure de l'anneau dans le sizing pré-TMVI augmenterait le risque d'obstruction sous-aortique. Une ligne était donc tracée entre les deux trigone fibreux (gauche et droit), et la portion de l'anneau mitral antérieure à cette ligne n'était pas prise en compte dans les mesures.



Mak et al : Reconstruction de l'anneau mitral par D-Shaped en ETO 3D

Distance SLd : de la ligne inter-trigone (TT) à la paroi postérieure de l'anneau

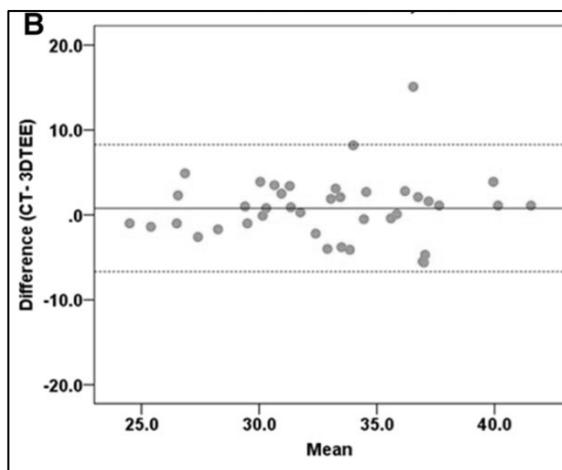
Les données obtenues par l'équipe de Mak sont similaires à celles retrouvées précédemment, à savoir une corrélation entre les deux techniques acceptable pour l'aire de l'anneau mitral (r 0,84 pour un p 0,001) et la circonférence de l'anneau (r 0,86 pour p 0,001). Cependant, la corrélation pour les distances est faible (r 0,67 avec p 0,001 pour la distance SL).



Mak and al : Comparaison entre les mesures obtenues par ETO 3D et celles obtenues par scanner

En Haut de gauche à droite : aire (cm²) et circonférence de l'anneau mitral (mm)

En bas : Diamètre SLd (en mm, de la ligne inter-trigone à la paroi postérieure de l'anneau mitral)



B. Analyse de l'anneau mitral par scanner

L'équipe de Thériault-Lauzier⁶⁸ a tenté de standardiser le screening par scanner des patients éligibles à une intervention mitrale par cathétérisme.

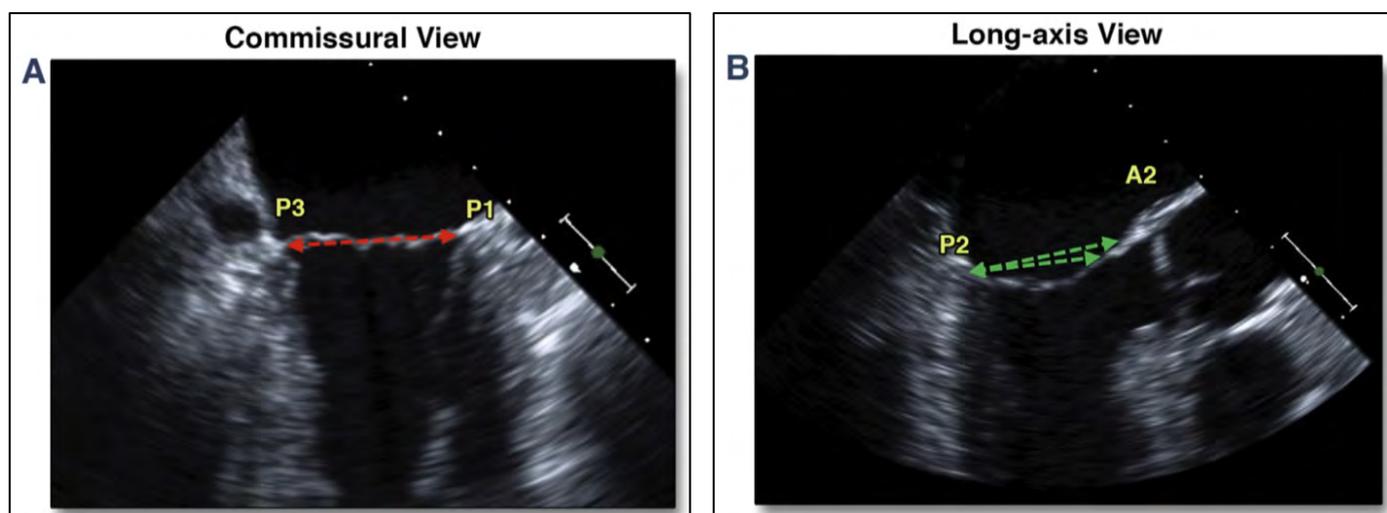
Selon leurs recommandations, les mesures scanner doivent se faire sur un scanner hélicoïdal d'au moins 64 barrettes synchronisé sur l'ECG avec une épaisseur de coupe de moins de 1mm.

La majorité des études actuelles, sur l'évaluation par scanner de la valve mitrale, utilise le logiciel de reconstruction 3mensio Structural Heart de la société Pie Medical Imaging BV.

Il existe dans la littérature une controverse concernant la délimitation de la portion antérieure de l'anneau mitral. Certains mesurent l'anneau mitral à partir de l'insertion des cusps non coronaire et coronaire gauche de la valve aortique (incluant le septum inter-valvulaire). D'autres excluent le septum inter-valvulaire de la mesure. L'absence d'une frontière distincte avec l'insertion du feuillet mitral antérieur crée une confusion supplémentaire.

Comme nous l'avons vu à travers les travaux de Walmsley ¹⁵, il est anatomiquement correct d'exclure le septum inter-valvulaire de la mesure de l'anneau mitral.

La « landing zone » de prothèse se fait en effet sur l'anneau mitral postérieur en arrière et les trigones fibreux en avant.



Blanke ⁶⁰ : Images d'ETO. L'image A montre une vue bi-commissurale (P3-P1) avec mesure du diamètre CC. L'image B montre l'absence de distinction nette entre le septum intervalvulaire et le feuillet mitral antérieur (coupe perpendiculaire de A coupant la valve en A2-P2).

L'équipe de Thériault-Lauzier ⁶⁸ s'est intéressée à la reproductibilité inter-observateur de leurs données scannographiques.

Dans leur étude, la reproductibilité était excellente pour les distances : que ce soit le diamètre CC (différence absolue entre -0,7 et -0,2mm soit une corrélation inter-observateur de 0,93), que le diamètre SL (différence absolue de -0,8 à -1,8mm soit une corrélation de 0,91).

La corrélation était également excellente pour l'aire (-0,3 à -0,9mm² soit une corrélation de 0,93) et le périmètre (-1,1 à -2,9mm soit une corrélation de 0,97).

a) Concept de Néo-LVOT et de D-shaped annulus

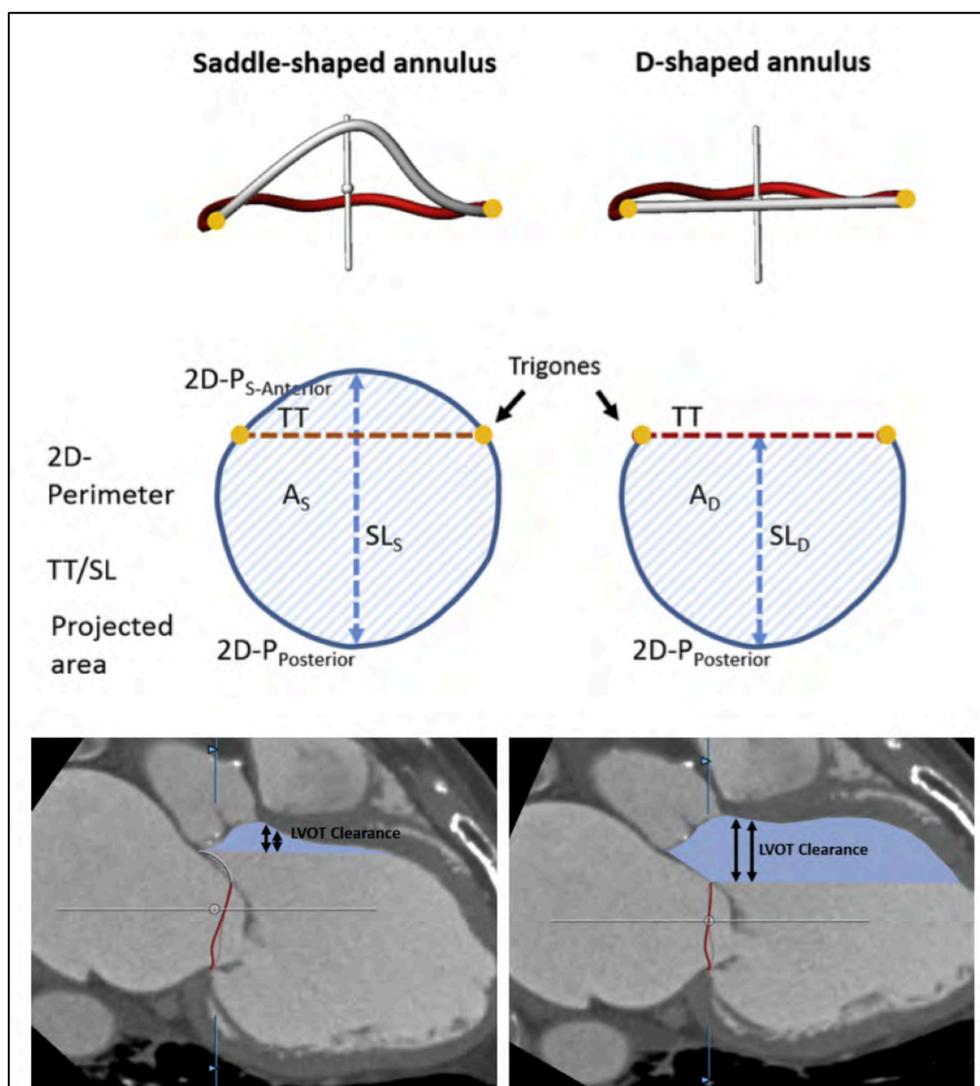
L'équipe de Blanke ²² s'est intéressée à l'encombrement sphérique de la prothèse mitrale et notamment à l'obstruction sous-aortique éventuelle induite par celle-ci.

Ils ont introduit le concept de « D-shaped annulus » en tronquant la partie antérieure de l'anneau mitral au niveau d'une ligne reliant le trigone fibreux gauche au trigone fibreux droit (TT distance). Le but de cette méthode de mesure est d'éviter une obstruction sous-aortique hypothétique trop importante.

Les mesures classiques en saddle-shaped proposées par Blanke sont discutables sur le plan anatomique (inclusion du septum inter-valvulaire), expliquant possiblement la faible zone d'éjection sous-aortique résiduelle.

Le concept de « D-shaped annulus » se rapproche plus de la réalité en prenant comme « landing zone de prothèse » l'anneau mitral postérieur en arrière et les trigones fibreux en avant. La zone d'éjection sous-aortique résiduelle hypothétique qui en résulte est plus large.

L'aire projetée de l'anneau mitral était logiquement moins grande sur les mesures en D-shaped ($11,2 \pm 2,7\text{cm}^2$) que sur les mesures en Saddle-shaped ($13,0 \pm 3,0\text{cm}^2$).

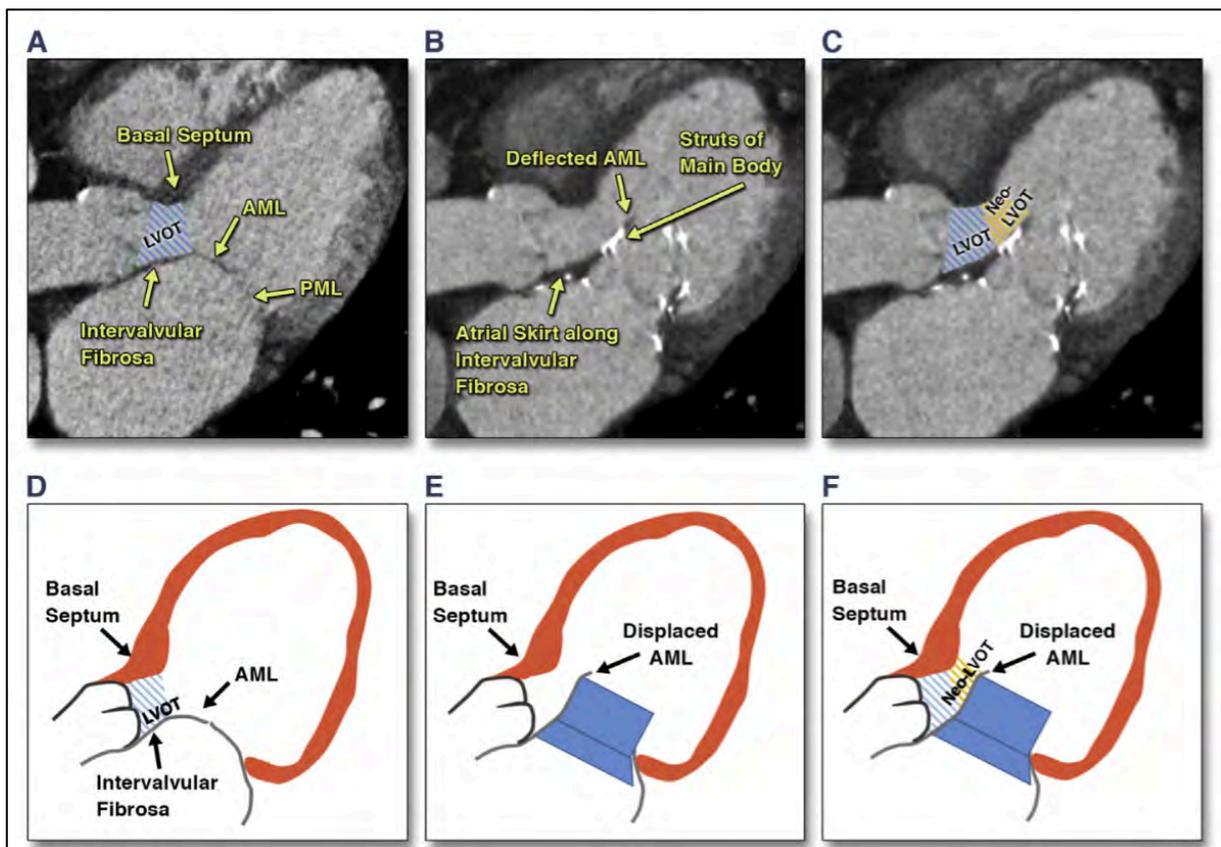


Blanke²² : Concept du « D-shaped annulus » avec exclusion de la portion de l'anneau mitral antérieure à la ligne passant par les deux trigones fibreux (distance TT)

L'implantation d'une valve mitrale par cathétérisme cardiaque entraîne un allongement de la chambre de chasse du ventricule gauche (CCVG) appelée « néo-LVOT » (Neo-Left ventricular outflow tract).

La « néo-LVOT » est délimitée à l'arrière par le feuillet mitral antérieur dévié en antéro-médial par la prothèse, à l'avant par le septum interventriculaire.

La chambre de chasse native du ventricule gauche (CCVG, délimitée par le septum interventriculaire et le septum inter-valvulaire) reste inchangée. Il est important de souligner que la chambre de chasse native et la « néo-LVOT » présentent un axe différent.



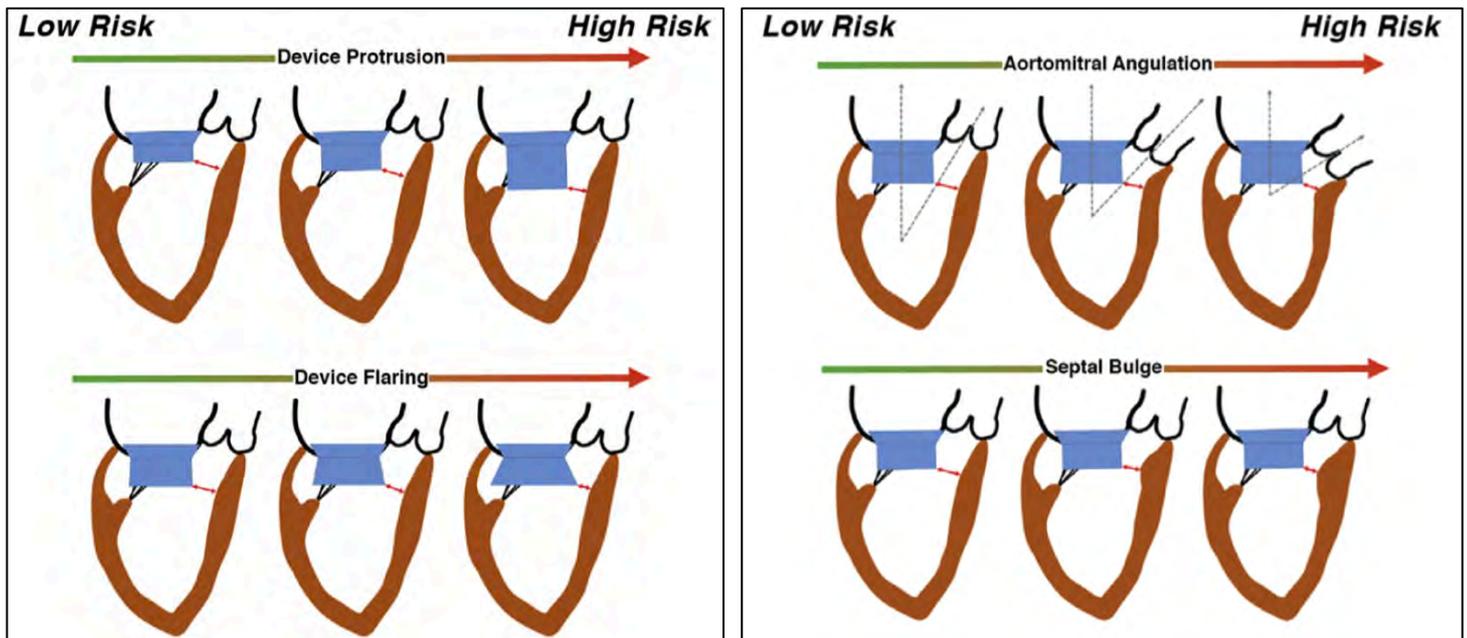
Blanke⁶⁹ : En haut, coupes de scanner . En bas, schémas. En A et D, CCVG native. En B-C-E-F : « néo-LVOT » délimitée par le septum basal du ventricule gauche et le feuillet mitral antérieur dévié.

LVOT : Left Ventricular Outflow Tract. AML : feuillet mitral antérieur.

La simulation par scanner en pré-procédure peut aider à identifier les patients présentant un risque d'obstruction sous-aortique trop important.

Pour rappel les facteurs de risque d'obstruction sous-aortique sont :

- Une hypertrophie de la portion basale du septum interventriculaire (SIV)
- Une longueur importante ou un prolapsus du feuillet mitral antérieur
- Un angle mitro-aortique fermé
- Une prothèse avec un encombrement sous-valvulaire important



*Blanke*⁶⁹ : facteurs de risque d'obstruction sous-aortique importante

L'équipe de Wang s'est également intéressée à la prédiction de l'obstruction sous-aortique post TMVI. Ils ont comparé les données scannographiques (pré et post TMVI) de 38 patients avec les données hémodynamiques post-procédure.

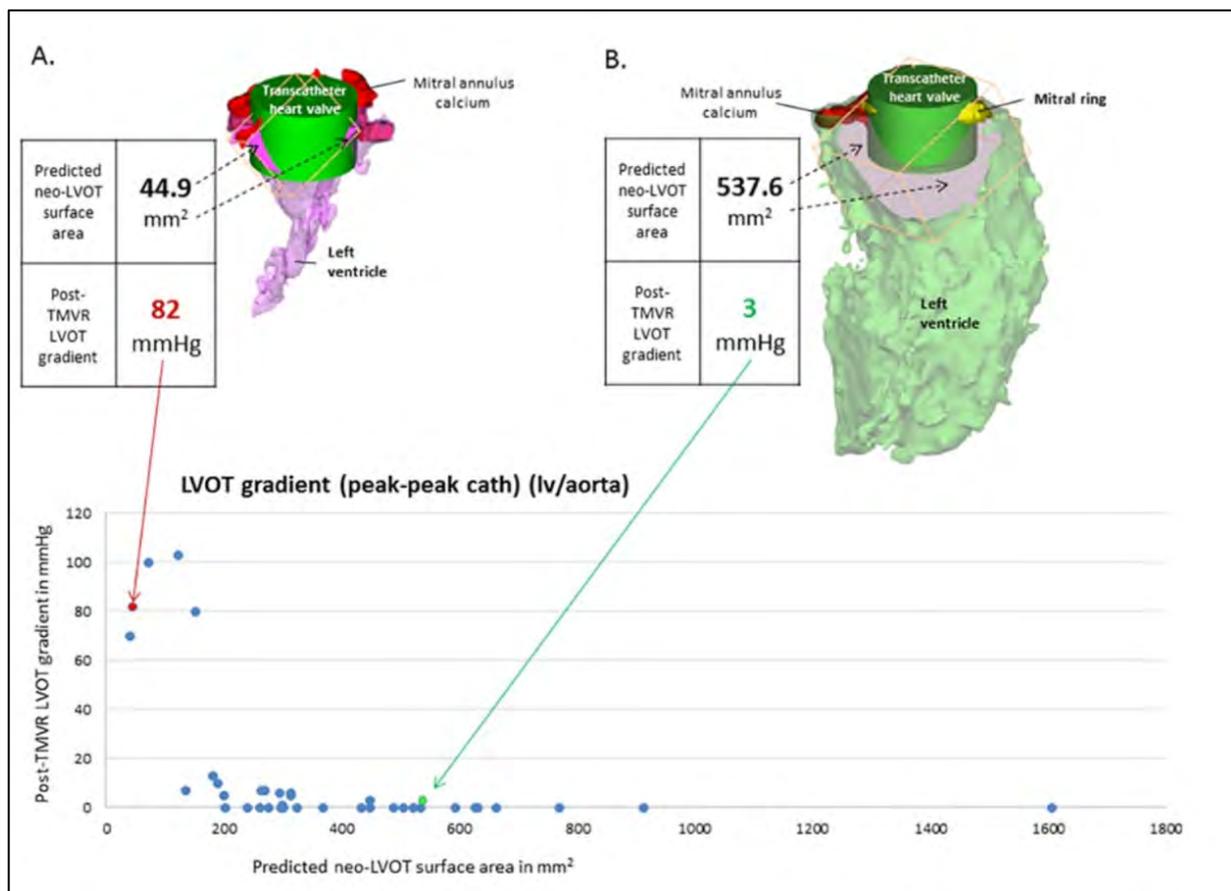
En pré-procédure, une reconstruction 3D (*logiciels Vitrea de Vital Images et Mimics de Materialise Leuven*) de la « landing zone » était effectuée avec simulation d'une prothèse en position mitrale (2 positions possibles 80% VG / 20% atrial ou 60% VG et 40% atrial). Une néo-LVOT était calculée pour chaque position de prothèse. Une obstruction sous-aortique secondaire au TMVI était définie par l'apparition d'un gradient pic à pic d'au moins 10mmHg.

Sur les 38 patients, une obstruction sous-aortique est survenue chez 7 patients. Chez ces sept patients, la néo-LVOT prédite avait pour surface moyenne $114 \pm 63\text{mm}^2$ (gradient pic à pic à $59,7 \pm 38,8\text{mmHg}$).

Chez 5 patients, l'obstruction sous-aortique (gradient pic à pic à $87,0 \pm 64,0\text{mmHg}$) était majeure avec une hémodynamique post-TMVI préoccupante. Leur surface moyenne de néo-LVOT prédite était de $85.7 \pm 49.2\text{mm}^2$.

L'équipe de Wang a ainsi montré que sur sa série de 38 TMVI, une surface de néo-LVOT prédite de moins de $189,4\text{mm}^2$ avait une sensibilité de 100% et une spécificité de 96,8% pour prédire une obstruction sous-aortique post-procédure.

Ce modèle ne permet cependant pas de prédire une éventuelle obstruction dynamique par effet Venturi ou une future obstruction sous-aortique créée par un remodelage du ventricule gauche post-TMVI.



Wang et al ⁵⁷ : exemple d'application du modèle de prédiction de l'obstruction sous-aortique avec deux cas extrêmes. A gauche, obstruction sous-aortique majeure avec une surface de néo-LVOT prédite de 59.8mm² (A). A droite, obstruction sous-aortique prédite acceptable avec une surface de néo-LVOT prédite de 537.6mm² (B).

b) Détermination des angles de scopie optimaux

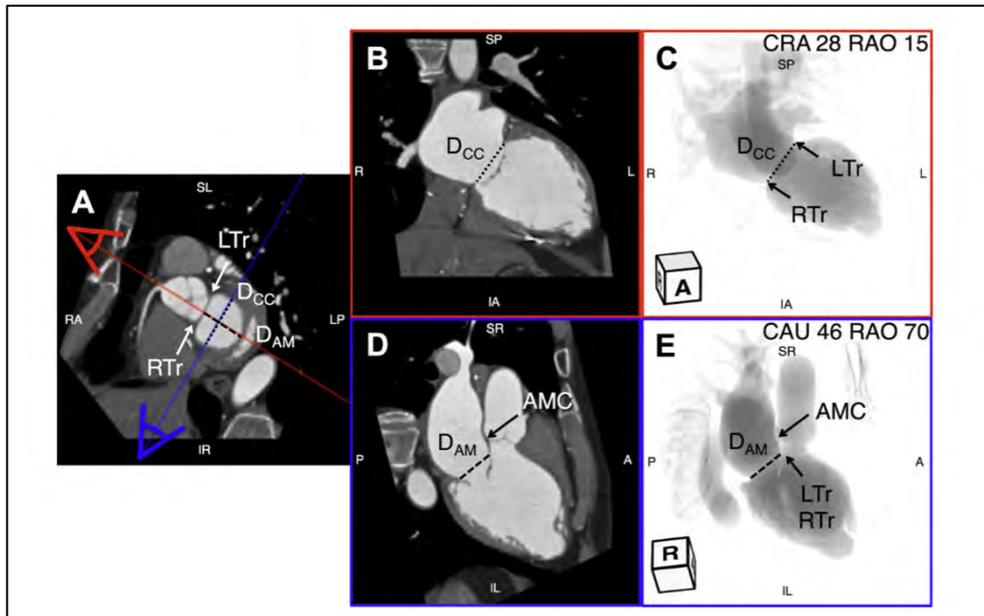
Le scanner est également extrêmement intéressant pour prédire les angles de scopie optimaux et ce, afin de minimiser les doses de rayonnement et la dose d'iode injectée.

Les angles sont calculés afin d'obtenir une séparation optimale des structures d'intérêt. Pour cela, l'angle doit être tel que la ligne reliant la source et le détecteur soit perpendiculaire à l'axe de la structure anatomique d'intérêt. Pour un angle crânial (CRA) /caudal (CAU) donné, il est donc possible de déterminer un angle oblique antérieur gauche (LAO : Left Anterior Oblique)/ oblique antérieur droit (RAO : Right Anterior Oblique) optimal. L'ensemble de ces combinaisons est appelé courbe de projection optimale. ⁶⁴

Cette courbe de projection optimale dépend de l'orientation du cœur dans le thorax et varie donc d'un patient à l'autre. ⁷⁰

Dans le corps humain, l'anneau mitral est généralement orienté vers le haut, l'avant et la droite.

Il peut être extrêmement intéressant de calculer ces angles non seulement pour l'anneau mitral mais également pour les muscles papillaires qui peuvent être un obstacle au bon déploiement d'une prothèse.



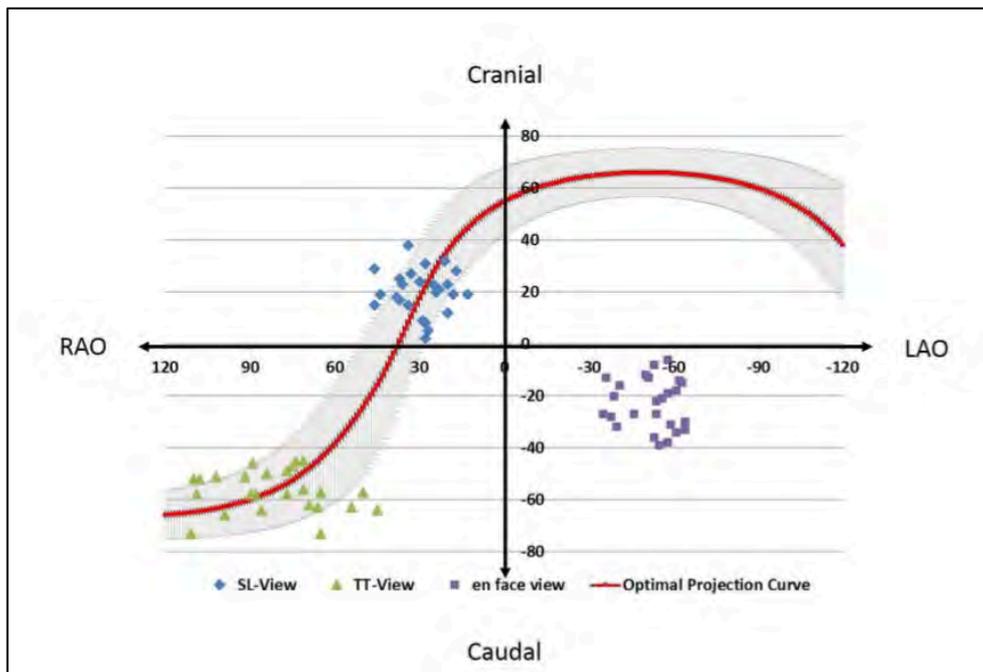
Thériault-Lauzier ⁶⁴ : Exemples d'angles de scopie calculés par TDM. Le symbole oculaire rouge correspond aux panneaux B et C (diamètre CC avec les deux trigones bien individualisés). Le symbole oculaire bleu correspond aux panneaux D et E avec le diamètre SL (DAM) de l'anneau, les trigones droit (RTr) et gauche (LTr) qui se chevauchent, et le rideau mitro-aortique (AMC) complètement séparé de la racine de l'aorte.

L'équipe de Blanke s'est elle aussi intéressée aux angles de scopie calculés par TDM. Ils ont étudié les données de 25 patients atteints d'insuffisance mitrale sévère d'origine fonctionnelle.

L'angle de scopie moyenné nécessaire pour visualiser de manière optimale la distance SL était dans l'étude de $29.4 \pm 9.0^\circ$ **RAO**, $20.1 \pm 8.7^\circ$ **CRA**.

Certains angles théoriques voyaient leur application limitée par les contraintes techniques de la scopie. C'était le cas de l'angle nécessaire pour la visualisation de la distance TT: $81.6 \pm 18.9^\circ$ **RAO**, $56.7 \pm 8.0^\circ$ **CAU**.

A noter une variation inter-individuelle significative de ces angles de scopie optimaux.



Blanke ⁶³ : courbe de projection optimale de 25 patients avec insuffisance mitrale (IM) fonctionnelle sévère.

TRAVAIL SCIENTIFIQUE

Comparaison de la biométrie de l'anneau valvulaire mitral au scanner, en échocardiographie transoesophagienne (2D et 3D) et par mesures perchirurgicales

1) Introduction :

Devant l'émergence des techniques mini-invasives de traitement des valvulopathies mitrales, de nombreuses équipes se sont intéressées à l'analyse par imagerie de la valve mitrale.

Les différentes études ont permis de mettre en évidence une corrélation correcte des mesures entre ETT, ETO 3D et le scanner^{65 66 67 68}.

La « landing zone » exacte des prothèses mitrales reste cependant méconnue, notamment sur son ancrage antérieur.

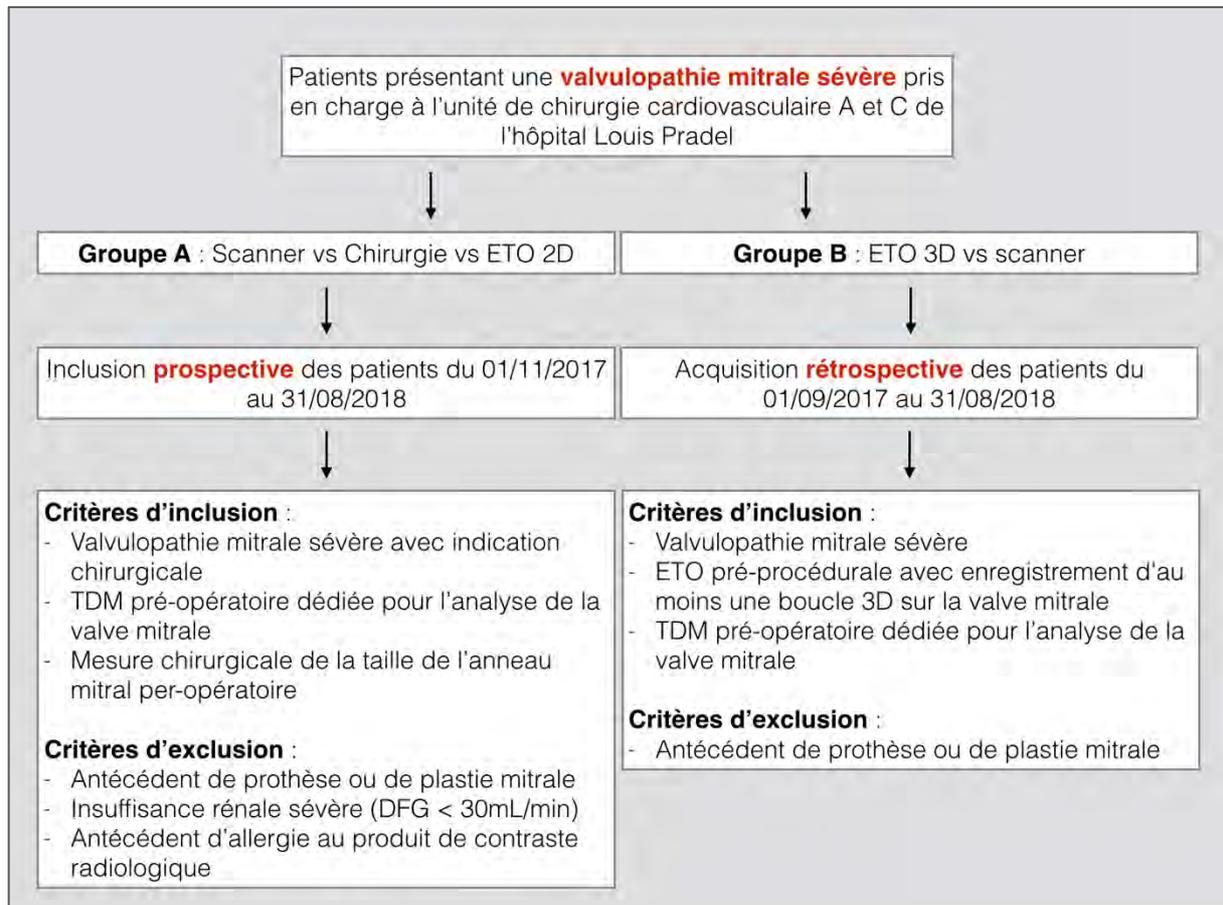
L'évaluation précise de la taille de la « landing zone » est primordiale pour décider de la taille de la prothèse à implanter. Une prothèse trop grande entraîne un risque d'obstruction sous-aortique tandis qu'une prothèse trop petite entraîne des risques de fuites para-valvulaires voir de déplacement de la prothèse.

Le but de notre étude est une comparaison critique des mesures effectuées par ces deux techniques d'imagerie de coupe multiplanaires à des mesures anatomiques dites « de références », afin d'évaluer le degré de cohérence de ces biométries.

Dans cet objectif, nous avons mené un travail en deux étapes. La première étape avait pour objectif principal de comparer les biométries de l'anneau obtenues par scanner, par ETO 2D au bloc opératoire et en per-opératoire par le chirurgien.

La deuxième étape avait pour objectif de comparer les données obtenues par ETO 3D et celles obtenues par scanner.

2) Matériel et méthode :



Design de l'étude avec les deux groupes de patients.

TDM : tomodensitométrie. ETO : échographie transoesophagienne. DFG : débit de filtration glomérulaire

A. Population

a. Groupe A

Dans le groupe A, nous avons inclus de façon prospective tous les patients consécutifs adressés pour une chirurgie mitrale dans le service de chirurgie cardiaque A et C de l'hôpital Louis Pradel de Lyon. La période d'inclusion s'est déroulée entre le 1^{er} novembre 2017 et le 31 août 2018.

Les patients étaient éligibles pour l'inclusion s'ils avaient eu non seulement un scanner thoracique injecté préopératoire avec protocole dédié pour l'étude de la valve mitrale, mais également une mesure per-chirurgicale de la taille de l'anneau mitral.

Une ETO 2D avec mesure de l'anneau était réalisée au bloc opératoire chaque fois que possible.

Les critères d'exclusion étaient : antécédent de prothèse ou de plastie mitrale, insuffisance rénale sévère (DFG < 30mL/min), antécédent d'allergie au produit de contraste radiologique.

b. Groupe B

Dans le groupe B, nous avons inclus de façon rétrospective tous les patients adressés pour une évaluation ou pour la prise en charge d'une valvulopathie mitrale sévère dans le service de chirurgie cardiaque A et C de l'hôpital Louis Pradel de Lyon.

La période d'inclusion s'est déroulée entre le 1^{er} septembre 2017 et le 31 août 2018.

Les patients étaient éligibles pour l'inclusion s'ils avaient eu non seulement un scanner thoracique injecté, avec protocole dédié pour l'étude de la mitrale, mais également une échographie transoesophagienne avec acquisition 3D centrée sur la valve mitrale.

Le critère d'exclusion était un antécédent de prothèse ou de plastie mitrale.

B. Mesures chirurgicales de l'anneau mitral

La mesure de l'anneau était réalisée en peropératoire avant la mise en place de la prothèse ou de l'anneau prothétique. Du fait de l'absence de calibre adapté à la taille des anneaux mitraux, et de la petite taille d'incision réalisée chez la majorité des sujets (plastie mitrale vidéo par thoracotomie droite), un ballon Equalizer (MEDITECH) 40mm x 65mm a été utilisé pour les mesures.

Le ballon était purgé, puis monté avec un robinet 3 voies et une seringue de 50cc remplie de NaCl 0,9%. Le ballon était placé au milieu de l'anneau mitral avant d'être gonflé au sérum physiologique afin de déterminer la taille de l'anneau. Afin de tenter de s'affranchir de l'absence de mise en charge du cœur pendant la chirurgie, le volume injecté devait permettre un passage à frottement doux du ballon à travers l'anneau mitral. Le volume nécessaire était laissé à l'appréciation du chirurgien cardiaque, en aveugle des mesures par imagerie et en aveugle de la correspondance volume - mesure.

Afin de s'assurer de la reproductibilité de la taille du ballon Equalizer pour un même volume injecté, 3 séries de mesures au pied à coulisse ont été réalisées (Figure n°1).

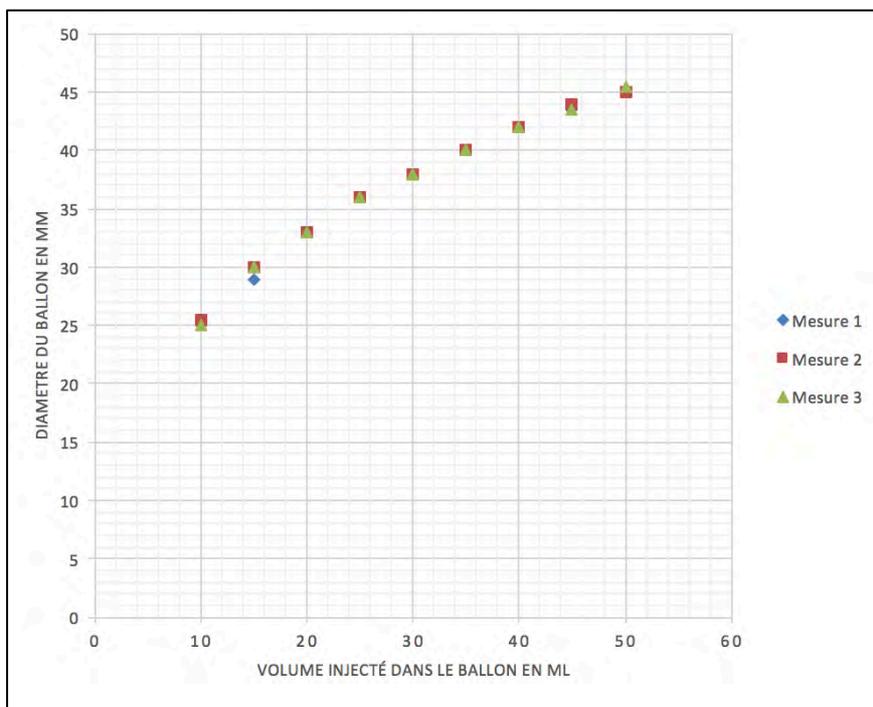
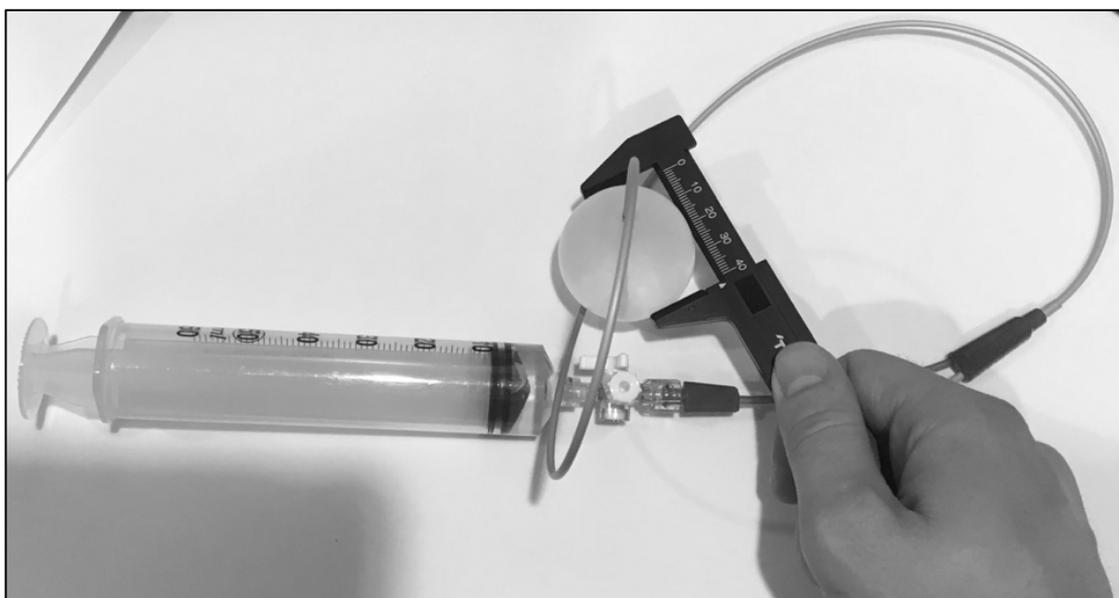


Figure n°1 : reproductibilité des mesures réalisées avec un ballon Equalizer



Montage comprenant le ballon Equalizer, le robinet 3 voies et la seringue pendant une mesure au pied à coulisse.

C. Mesures de l'anneau mitral par échographie transoesophagienne (ETO)

a) Groupe A

Aussi souvent que possible, une échographie transoesophagienne (Vivid S6, General Electric, sonde 6TcRS) était réalisée au bloc opératoire sous anesthésie générale, avant le démarrage de la circulation extracorporelle. Une échographie 2D complète était réalisée en accord avec les recommandations de la société américaine d'échocardiographie ⁷¹.

Deux coupes étaient utilisées pour la mesure des dimensions de l’anneau mitral : une coupe 3 cavités pour obtenir la distance SLs et une coupe bi-commissurale pour obtenir la distance CC. Chaque mesure était vérifiée au moins 2 fois pour augmenter la fiabilité de celle-ci.

Les mesures étaient prises entre le début et le milieu de la diastole en accord avec les données de l’étude de Jiang.²⁷

b) Groupe B

Les échographies transoesophagiennes étaient réalisées sur une machine Philips EPIQ équipée de la sonde Philips EPIQU X8-2T capable de prendre des images en 2 et 3 dimensions. Une échographie 2D complète était réalisée en accord avec les recommandations de la société américaine d’échocardiographie⁷¹. Si le patient devait subir une chirurgie cardiaque ou une procédure mini-invasive, l’ETO devait avoir été réalisée avant celle-ci.

La sonde était positionnée en coupe oesophagienne moyenne à 120° et une acquisition 3D centrée sur la valve mitrale était réalisée. Le volume scanné incluait la valve mitrale, la valve aortique et une petite partie de l’aorte ascendante.

Les images 3D étaient analysées en utilisant le logiciel QLab 10 – Mitral Valve Navigation de Philips. L’aire de l’anneau mitral, le diamètre SLs et le diamètre CC étaient recueillis.

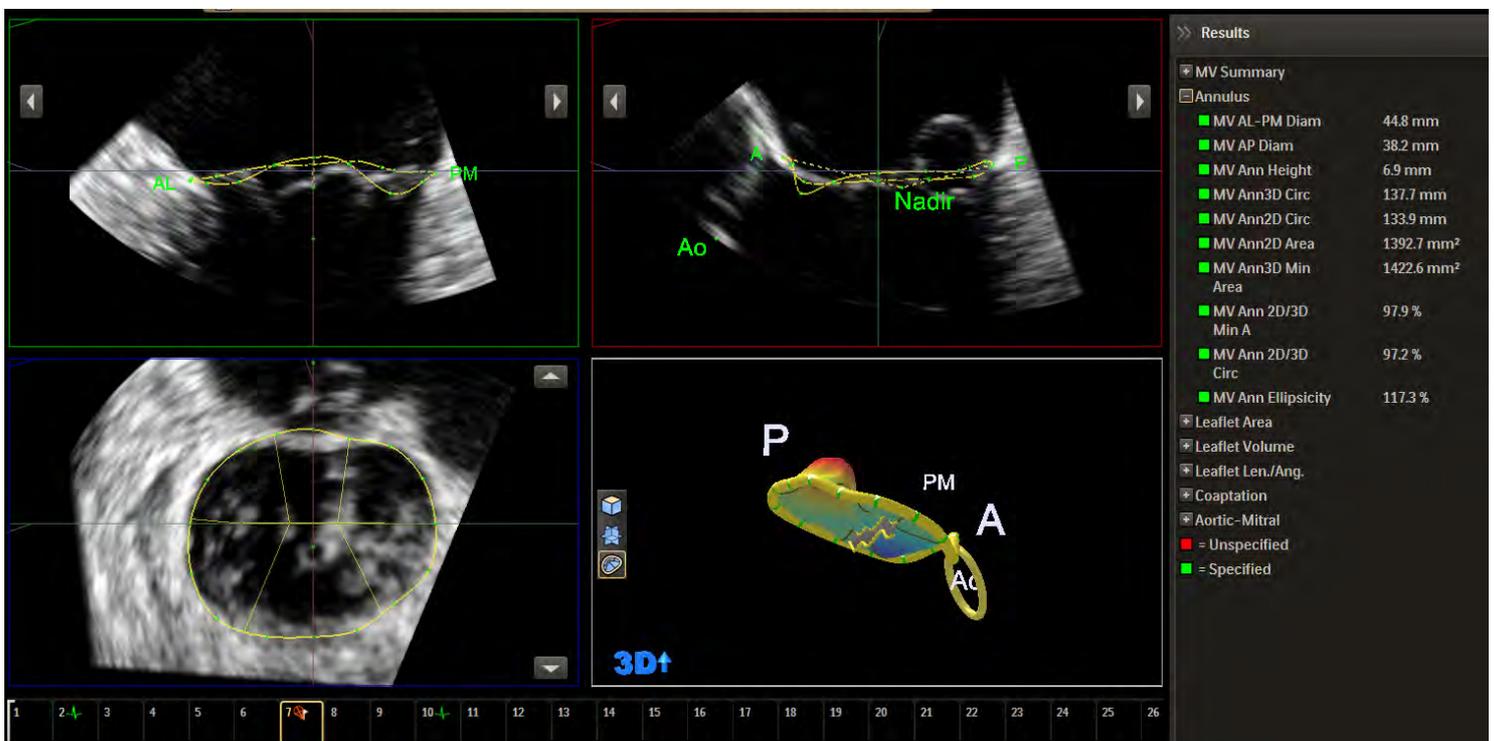


Figure n°2 : Utilisation du logiciel QLab 10 – Mitral Valve Navigation de Philips

D. Mesures de l'anneau mitral par scanner

Un scanner thoracique était réalisé en pré-procédural avec un scanner IQON Philips (Scanner spectral de 64 Barrettes) avec acquisition rétrospective centrée sur le massif cardiaque, synchronisée à l'ECG. L'acquisition se faisait au temps artériel après injection de produit de contraste (80mL d'IOMERON injecté à 5cc/sec).

L'épaisseur des coupes était de 0,9mm reconstruites tous les 0,45mm avec un pas de 0,160 et un temps de rotation de 0,27. Des bêtabloquants intraveineux (BREVIBLOC) étaient utilisés si la fréquence cardiaque était supérieure à 70 battements par minute. Des dérivés nitrés (NATISPRAY) étaient utilisés en l'absence de contre-indication.

Une reconstruction tous les 10% du cycle cardiaque était réalisée.

Les images étaient analysées sur un logiciel de relecture (OSIRIX) avec reconstruction multiplanaire afin d'obtenir 3 coupes orthogonales à l'anneau mitral : une coupe coronale passant par le diamètre CC, une coupe sagittale passant par le diamètre SL et une coupe transverse orthogonale à celles-ci.



Figure n° 3 : Positionnement correct des trois coupes orthogonales.

En bas à gauche, coupe passant par le diamètre SL. A droite, coupe passant par le diamètre CC. En haut à gauche, coupe orthogonale aux deux premières.

Du fait de la structure 3D de l'anneau en « saddle-shaped », il n'était pas possible sans logiciel dédié de mesurer une aire mitrale fiable. Nous avons donc pris le parti, en accord avec les données de l'équipe de Hyodo⁶⁵, de mesurer :

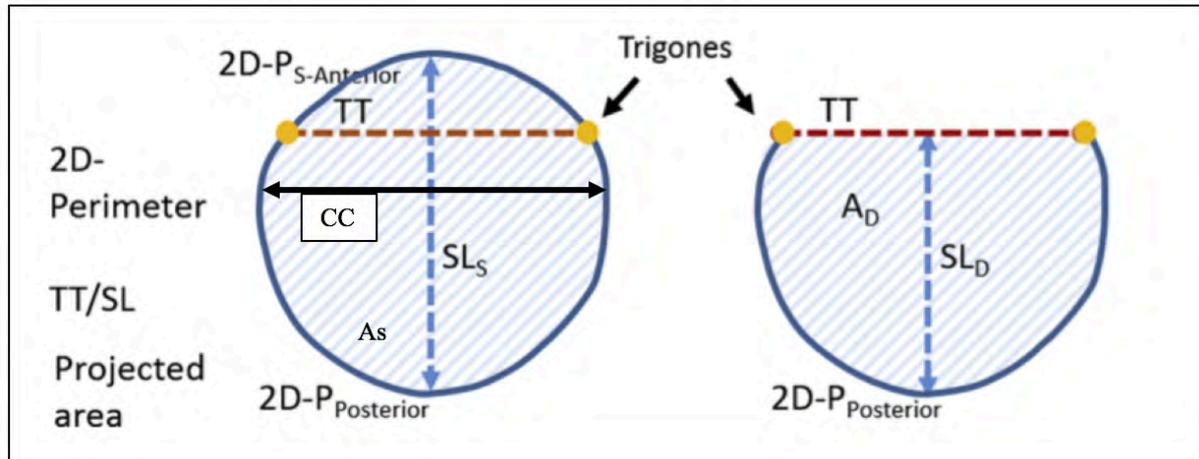
- Un **diamètre SLs** (droite passant par le centre de la racine aortique jusqu'à la portion postérieure de l'anneau)

- Un **diamètre SLd** (comme illustré ci-dessous).

- Un **diamètre CC** : mesuré sur la ligne perpendiculaire au diamètre SL passant par le centre de l'anneau.

Nous avons extrapolé l'aire et donc le **diamètre moyen** en utilisant la formule d'une ellipse ($Aire = (\pi \times \text{diamètre SL} \times \text{diamètre CC}) / 4$) pour chaque couple SLs-CC et SLd-CC.

Les mesures étaient prises à 0, 20, 40, 60 et 80% du cycle RR.



Blanke ²² : Concept du « D-shaped annulus » avec exclusion de la portion de l'anneau mitral antérieure à la ligne passant par les deux trigones fibreux (distance TT)

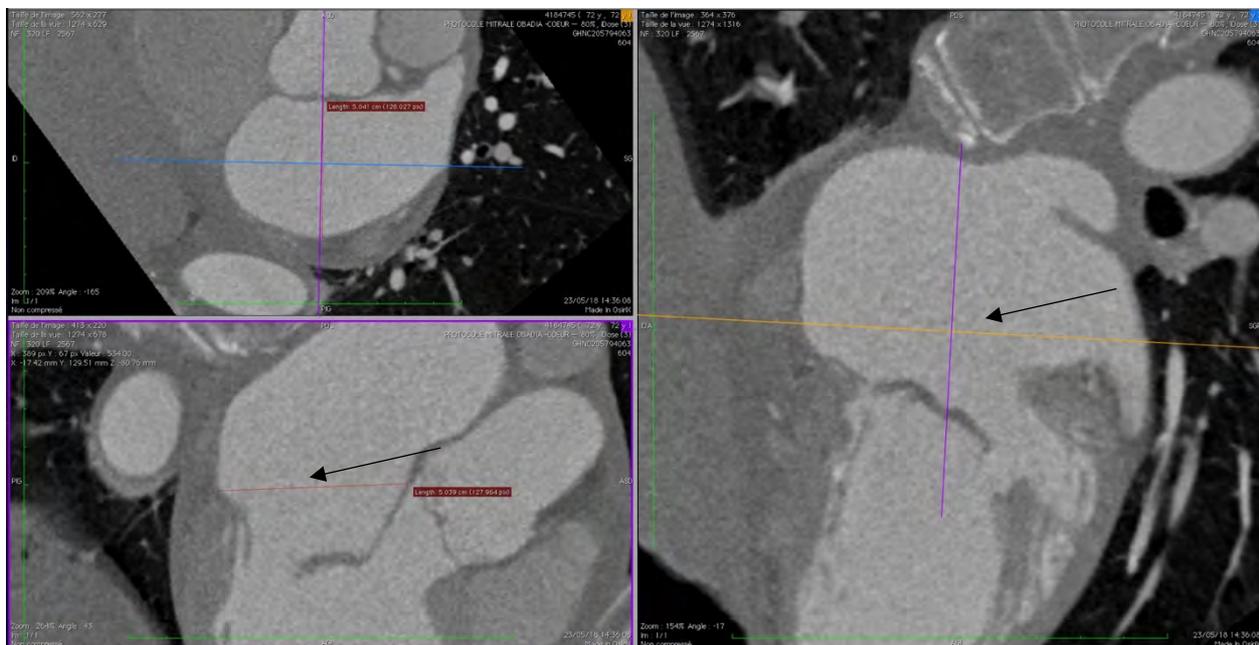


Figure n°4 : Illustration de la structure en 3 dimensions de l'anneau mitral. En bas à gauche : coupe sagittale correcte, passant par les portions antérieure et postérieure de l'anneau. A droite, sur la coupe bi-commissurale, ligne de coupe orthogonale passant trop haut dans l'oreillette gauche.

Devant la difficulté à individualiser la jonction entre le feuillet mitral antérieur et le septum inter valvulaire, 2 techniques ont été utilisées pour repérer celle-ci.

- Repérage de la zone de jonction entre le septum inter-valvulaire et le feuillet mitral antérieur en systole (Figure n°5). Mesure du septum inter-valvulaire définie comme la distance entre l'insertion du feuillet mitral antérieur et des cusps aortiques.
- Utilisation de la vue en petit axe comme décrite dans la méthode de l'équipe de Thériault-Lauzier²⁸. Repérage de la différence de coefficient d'atténuation et d'épaisseur entre le septum inter-valvulaire et le feuillet mitral antérieur. (Figure n°6).



Figure n°5 : repérage de la jonction entre le septum inter-valvulaire et le feuillet mitral antérieur en systole.

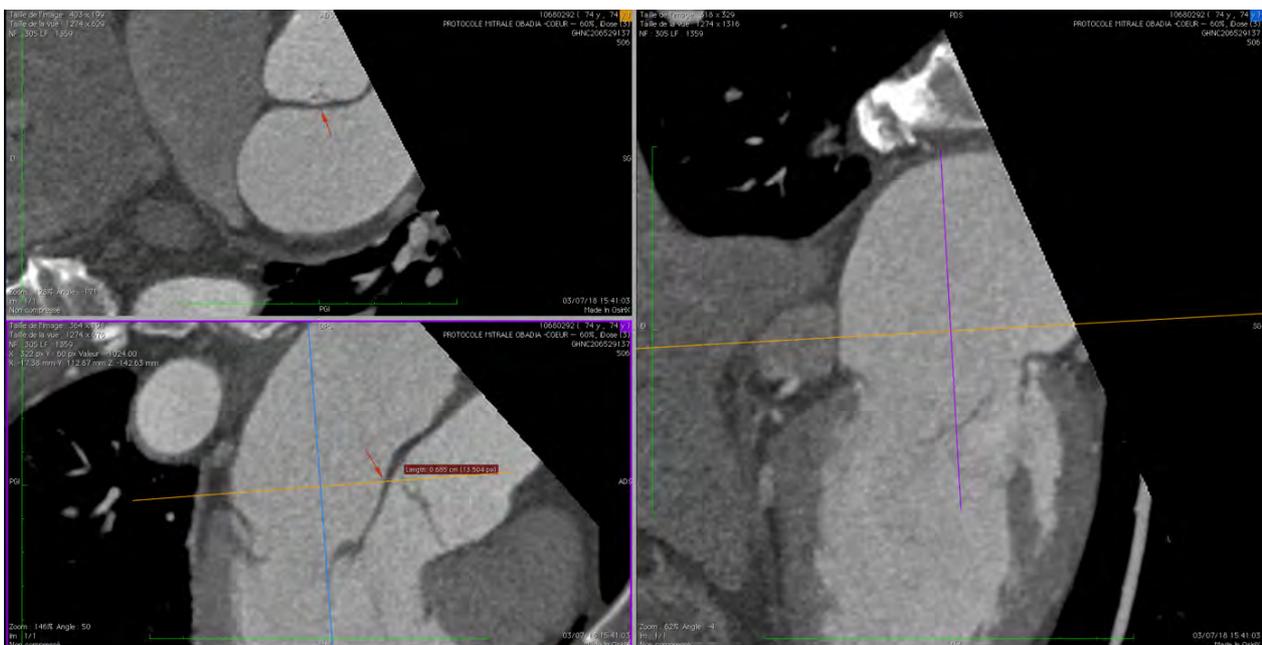


Figure n°6 : Repérage de la jonction entre le septum inter-valvulaire et le feuillet mitral antérieur en diastole.

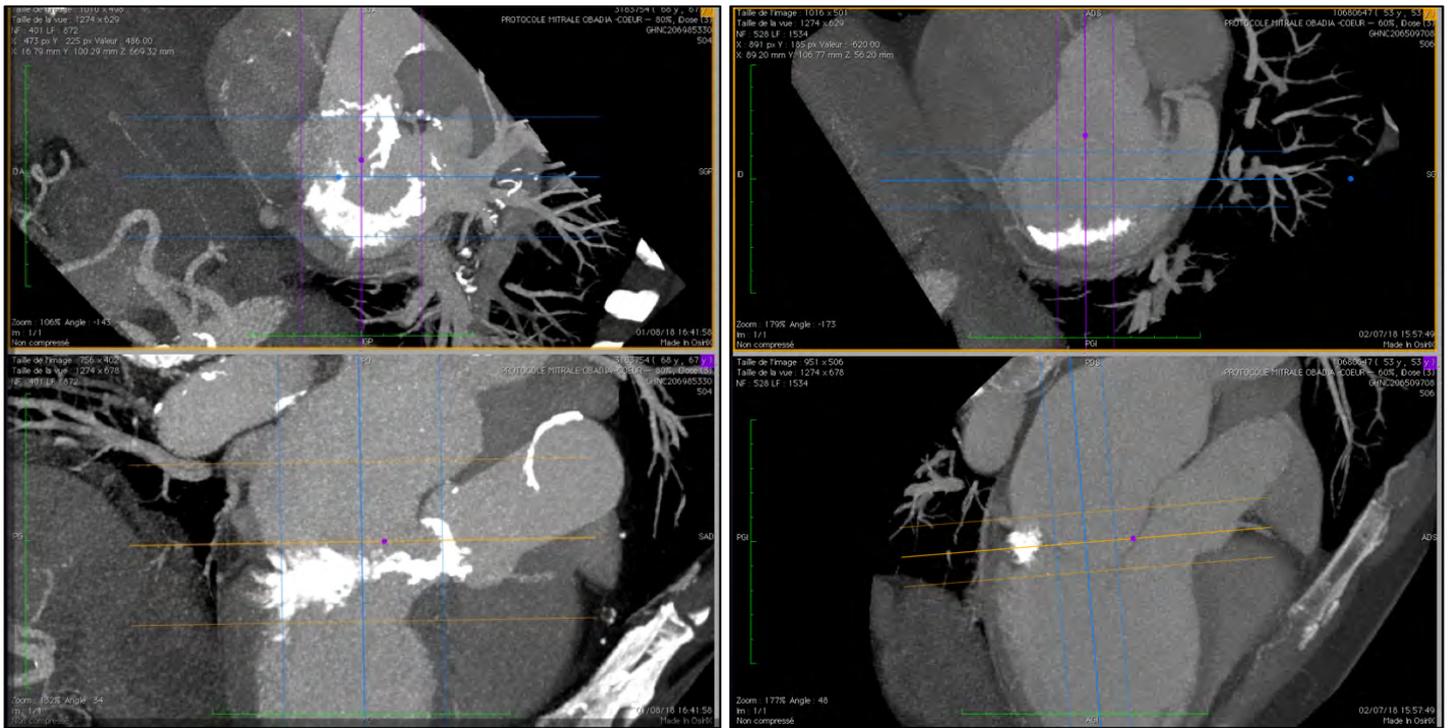


Figure n°7 : Coupes scannographiques avec reconstructions projectives de type projection d'intensité maximale (MIP) pour quantification des calcifications annulaires.

E. Critère de jugement

a) Groupe A

Nous avons pris pour chaque patient la phase du cycle cardiaque (0, 20, 40, 60 ou 80% du cycle RR) où le couple de mesure scannographique SLs/CC et SLd/CC était le plus grand. Le diamètre moyen a été calculé pour chaque couple de mesure. Nous avons ensuite comparé ces diamètres moyens avec la mesure relevée par le chirurgien en per-opératoire. Les mesures scannographiques et chirurgicales étaient effectuées en aveugle l'une de l'autre.

Pour chaque phase du cycle cardiaque analysée, nous avons fait la moyenne de l'ensemble des mesures de l'anneau obtenues. La variation de la taille de l'anneau au cours du cycle cardiaque a été étudiée pour chaque diamètre (SLs, SLd, CC).

Pour l'étude de la variabilité intra-observateur, 35 valeurs différentes ont été reprises pour chaque diamètre (SLs, SLd, TT) après un intervalle d'au moins 2 semaines, en aveugle des premières mesures.

b) Groupe B

Les mesures scannographiques de l'anneau (SLs, CC et diamètre moyen) ont été réalisées pour chaque patient en télésystole (40% du cycle RR). Nous les avons ensuite comparées aux mesures (SLs, CC et

diamètre moyen à partir de l'aire projetée) obtenues en télésystole en ETO 3D via le logiciel QLab 10 – Mitral Valve Navigation.

Les mesures scannographiques étaient faites à distance des mesures d'ETO 3D et en aveugle de celles-ci.

F. Statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel Graphpad Prism7 (Graphpad Software, La Jolla, CA, USA).

Les données continues ont été exprimées en moyennes et écarts-types après avoir utilisé le test de d'Agostino-Pearson pour vérifier la répartition Gaussienne des séries. Des tests de Student (avec variables appariées) ont été utilisés pour rechercher des différences significatives entre des variables continues. La comparaison des méthodes de mesure a été effectuée à l'aide de courbe d'analyse de Bland et Altman et du coefficient de corrélation de Pearson.

L'accord intra-observateur a été testé avec des coefficients de corrélation avec un intervalle de confiance à 95%.

Une valeur $p < 0,05$ a été considérée comme statistiquement significative.

Pour mémoire, interprétation du coefficient de corrélation (r) :

- Il définit la corrélation de deux valeurs. Sa valeur va de -1 (relation inverse parfaite : quand X monte, Y descend) à 1 (relation positive parfaite : quand X monte, Y monte). Une valeur de 0 signifie qu'il n'y a aucune corrélation.

- La corrélation rapporte également la probabilité p de l'hypothèse nulle. Il s'agit de la probabilité que les données aient été échantillonnées à partir d'une population sans corrélation entre les deux variables.

3) Résultats :

A. Groupe A

Sur la période du 01/11/2017 au 31/08/2018, 137 patients ont été adressés à l'hôpital Louis Pradel, dans le service de chirurgie cardiovasculaire A et C, pour la prise en charge chirurgicale d'une valvulopathie mitrale sévère.

Sur les 137 patients, 132 patients n'avaient pas d'antécédent de prothèse ou d'annuloplastie mitrale. Sur les 132 patients, seulement 21 patients ont bénéficié à la fois d'un scanner préopératoire injecté avec protocole d'acquisition dédié et d'une mesure chirurgicale de l'anneau mitral. 17 patients ont pu

bénéficier également d'une mesure de l'anneau par ETO 2D au bloc opératoire avant le début de la circulation extra-corporelle.

L'âge moyen de la population était de 61,8 ans (*écart moyen 9,13 ans ; min 33 – max 75*).

La valvulopathie était une insuffisance mitrale dystrophique dans 62% des cas (N = 13), une insuffisance mitrale secondaire dans 9,5% des cas (N = 2), un rétrécissement mitral dans 24% des cas (N = 5), et pour un patient une perforation valvulaire sur endocardite infectieuse.

Le diamètre télé-diastolique moyen du ventricule gauche était de 56mm (*écart moyen 6mm ; min 44 – max 74*).

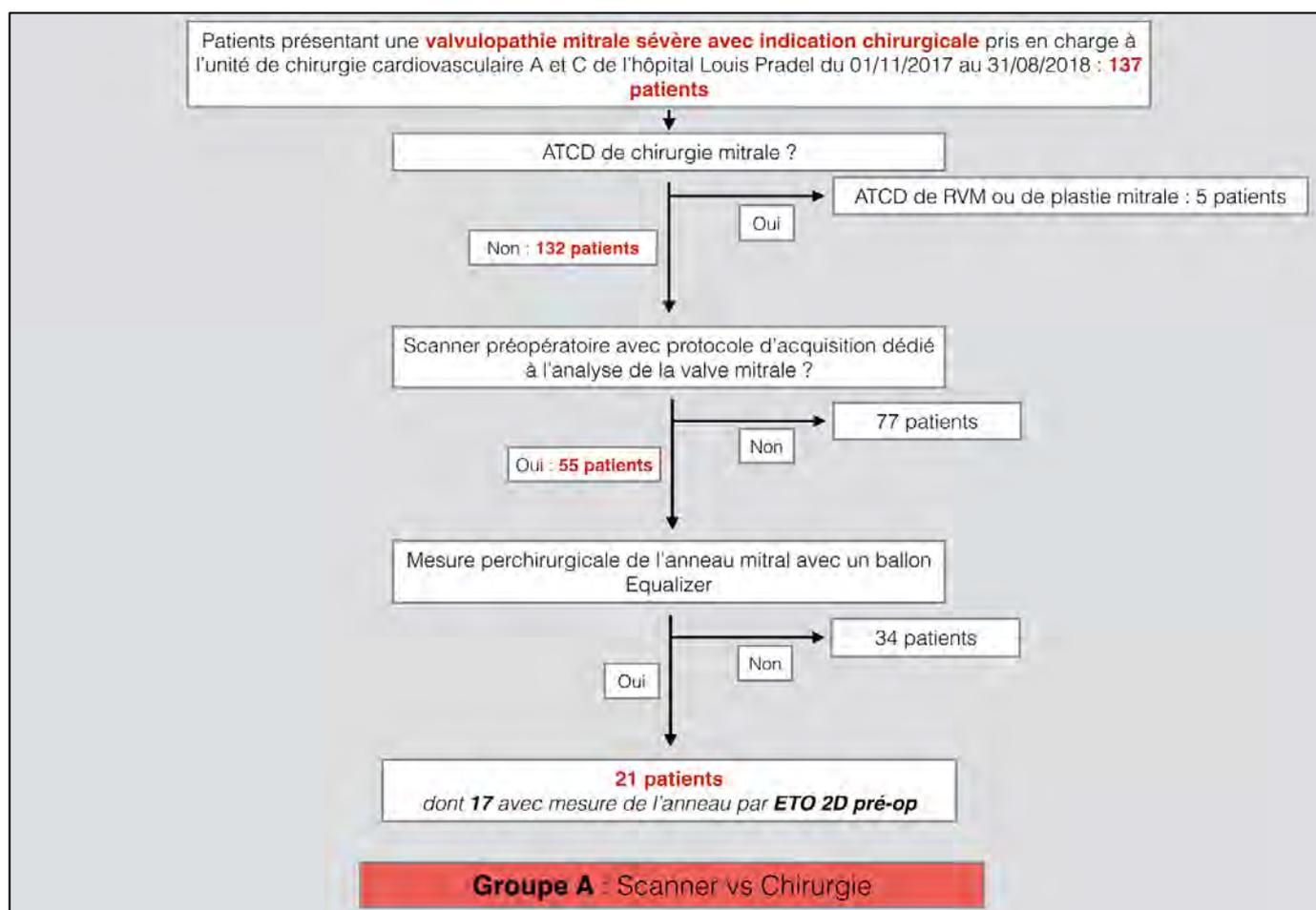
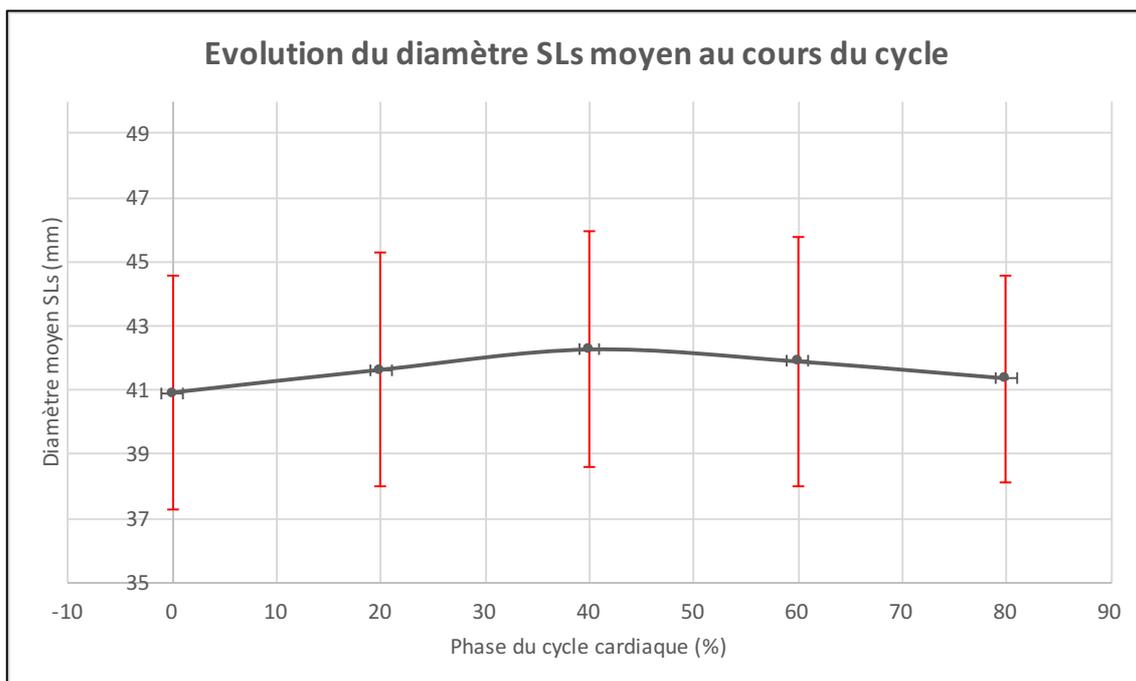


Figure n°8 : Flow chart du groupe A. Comparaison des données en ETO 2D, scanner et mesure chirurgicale.

- a) Évolution des diamètres SLs, CC et SLd moyens de l'anneau mitral au cours du cycle cardiaque :

Dans le groupe A, le diamètre SLs était en moyenne plus grand à la phase 40% du cycle (42,3mm). La phase 0% était la phase avec la moyenne la plus basse (40,9mm). La variation la plus grande mesurée au cours du cycle chez un même patient était de 5mm (13%).

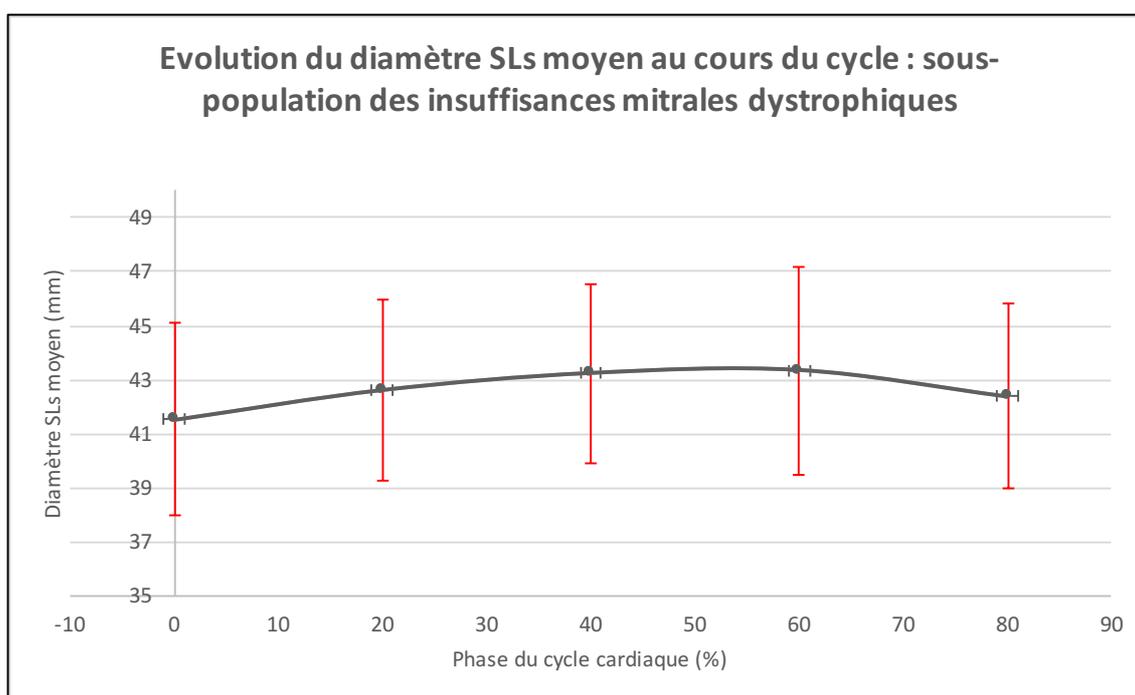
Il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les phases.



Courbe des moyennes des diamètres **SLs** de l'ensemble du groupe A au cours du cycle cardiaque.

La systole s'étend de 0 à 40% du cycle, la diastole s'étend de 40 à 0% du cycle.

Les écarts moyens à la moyenne sont représentés par les barres rouges. Distances en mm.



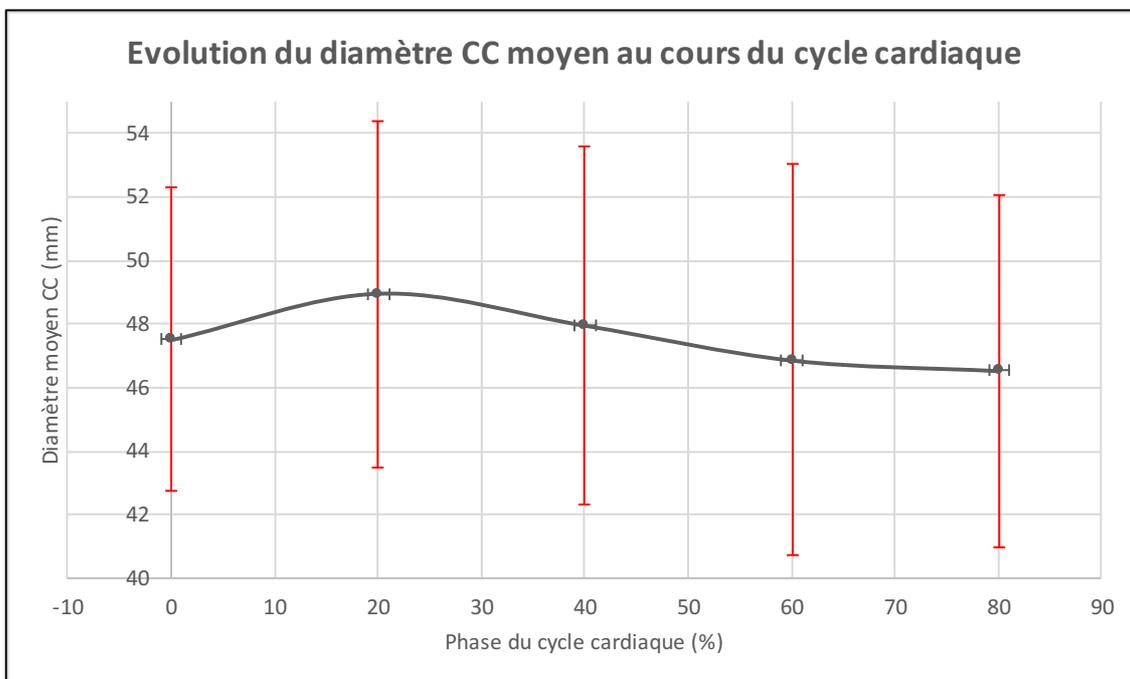
Courbe des moyennes des diamètres **SLs** pour le sous-groupe IM dystrophique du groupe A au cours du cycle cardiaque.

La systole s'étend de 0 à 40% du cycle, la diastole s'étend de 40 à 0% du cycle.

Les écarts moyens à la moyenne sont représentés par les barres rouges. Distances en mm.

Dans le groupe A, le diamètre CC était en moyenne plus grand à la phase 20% du cycle (48,45mm). La phase à la moyenne la plus petite était la phase 80% (46,52mm). La variation maximale au cours du cycle mesurée chez un patient était de 11mm (17%).

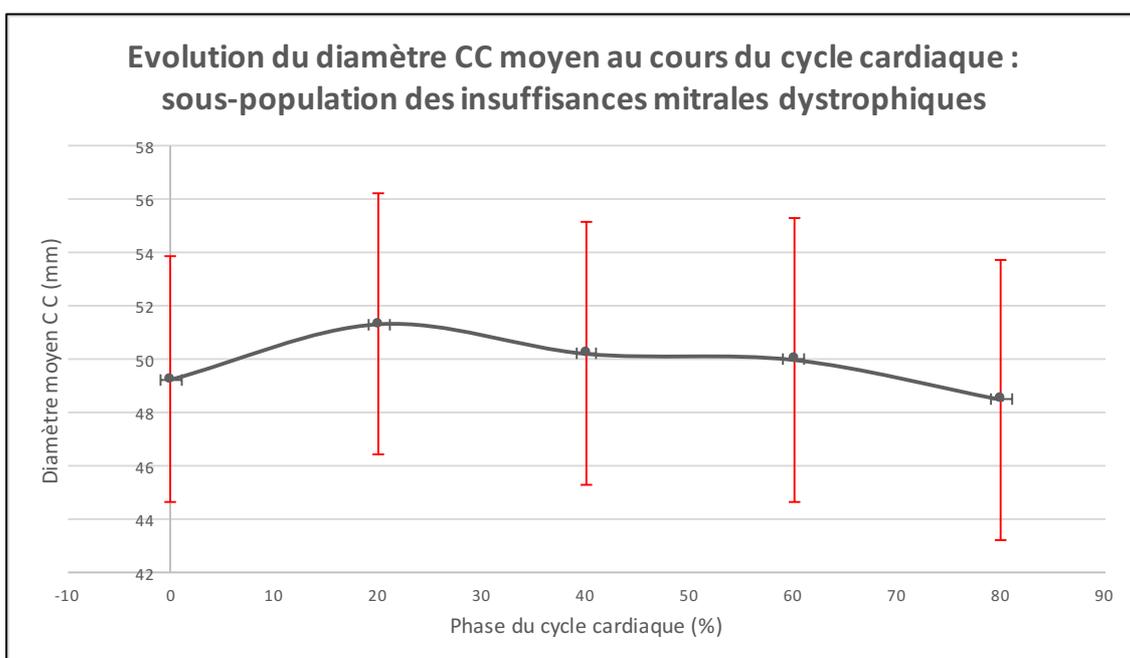
Il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les phases.



Courbe des moyennes des diamètres **CC** du groupe A au cours du cycle cardiaque.

La systole s'étend de 0 à 40% du cycle, la diastole s'étend de 40 à 0% du cycle.

Les écarts moyens à la moyenne sont représentés par les barres rouges. Distances en mm.



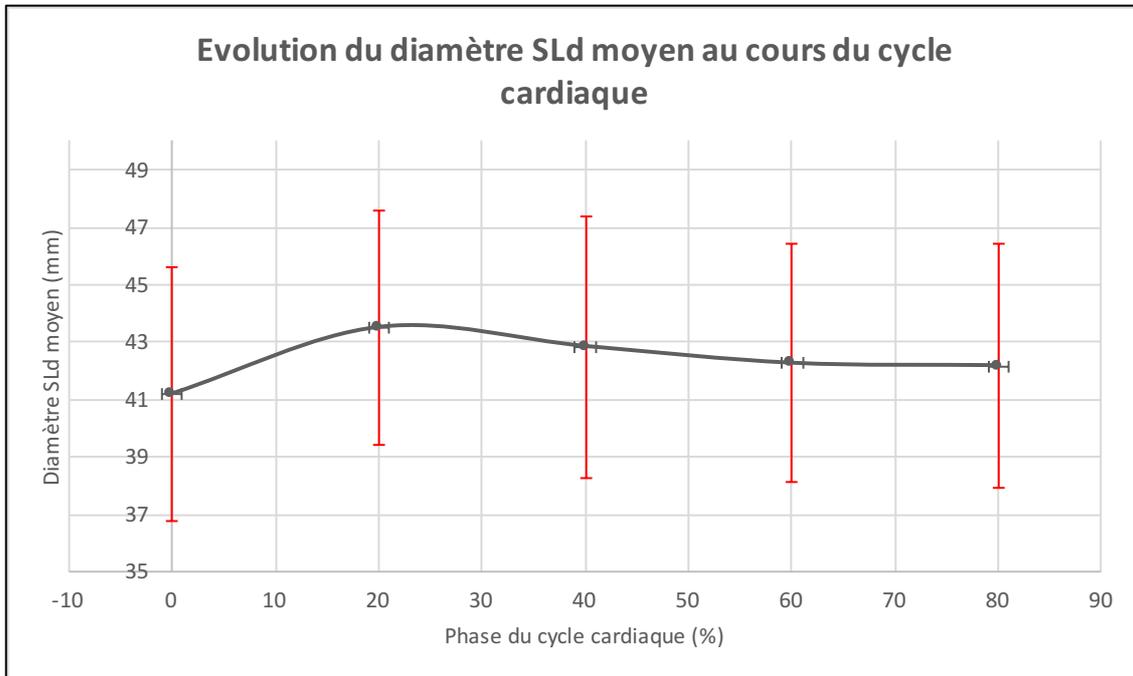
Courbe des moyennes des diamètres **CC** du sous-groupe IM dystrophique du groupe A au cours du cycle cardiaque.

La systole s'étend de 0 à 40% du cycle, la diastole s'étend de 40 à 0% du cycle.

Les écarts moyens à la moyenne sont représentés par les barres rouges. Distances en mm.

Dans le groupe A, le diamètre SLd était en moyenne plus grand à la phase 20% du cycle (43,5mm). La phase 0% était la phase à la moyenne la plus petite (41,2mm). La variation maximale au cours du cycle mesurée chez un patient était de 5mm (12,5%).

Il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les phases.



Courbe des moyennes des diamètres SLd du groupe A au cours du cycle cardiaque.

La systole s'étend de 0 à 40% du cycle, la diastole s'étend de 40 à 0% du cycle.

Les écarts moyens à la moyenne sont représentés par les barres rouges. Distances en mm.

b) Corrélation ETO 2D et TDM

Sur les 21 patients du groupe A, 17 patients ont pu bénéficier d'une mesure de l'anneau mitral par ETO 2D préopératoire.

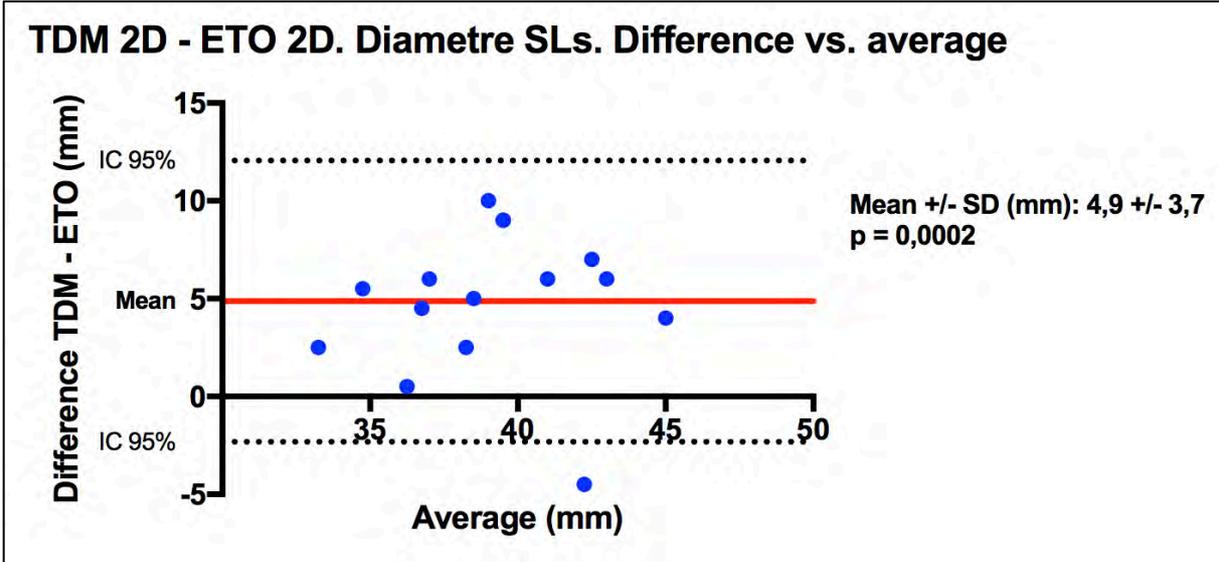
2 patients avaient une phase télé-systolique scannographique (phase à 40%) ininterprétable en raison d'artéfacts liés aux mouvements du patient.

Au total, 15 patients avaient des mesures télé-systoliques interprétables et comparables à la fois en ETO 2D et en tomographie par ordinateur.

Le diamètre SLs moyen de l'anneau mitral évalué par ETO 2D était de 36,7mm (écart moyen 2,9mm ; min 32mm – max 44,5mm). Le diamètre SLs moyen de l'anneau mitral évalué par scanner 2D était de 41,5mm (écart moyen 3,2mm ; min 34,5mm – max 47mm).

Pour le diamètre SLs, l'ETO 2D trouvait des valeurs en moyenne 4,9 mm plus petites que les valeurs obtenues par scanner ($SD\ 3,7mm$; $IC\ 95\% : -2,32\ à\ 12mm$, $p\ 0,0002$).

Pour mémoire, le coefficient de corrélation (r) était de 0,517 ($p = 0,024$).

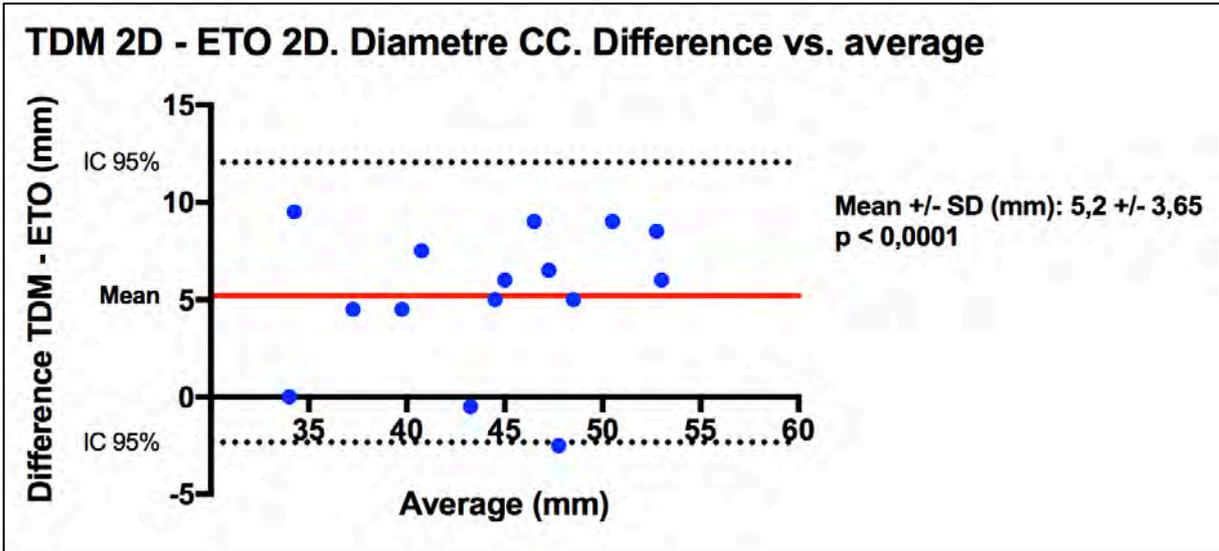


Courbe d'analyse de Bland-Altman du diamètre SLs.
Distances en mm. ETO 2D vs TDM 2D

Le diamètre CC moyen de l'anneau mitral évalué par ETO 2D était de 41,7mm (*écart moyen 4,8mm ; min 29,5mm – max 50mm*). Le diamètre CC moyen de l'anneau mitral évalué par Scanner 2D était de 46,9mm (*écart moyen 5,3mm ; min 34mm – max 57mm*).

Pour le diamètre CC, l'ETO 2D trouvait des valeurs en moyenne 5,2mm plus petites que les valeurs obtenues par scanner (*SD 3,65mm ; IC 95% de -1,95 à 12,35 mm, p < 0,0001*).

Pour mémoire, le coefficient de corrélation (r) était de 0,84 (p < 0,0001).



Courbe d'analyse de Bland-Altman du diamètre CC.
Distances en mm. ETO 2D vs TDM 2D

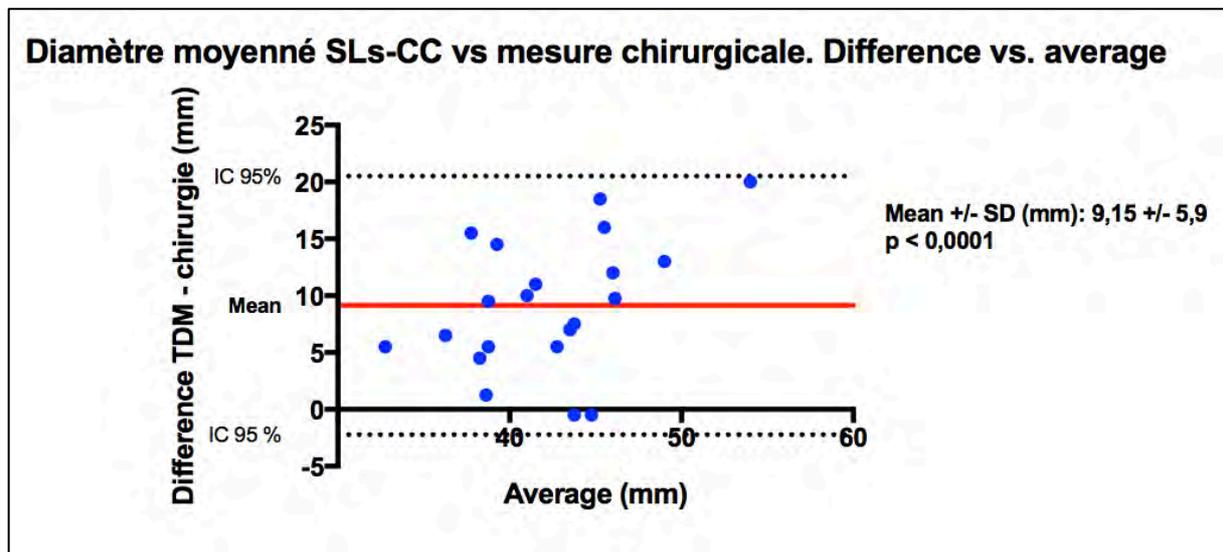
c) Corrélation TDM et mesures chirurgicales

Le diamètre moyenné SLs-CC de l'anneau mitral évalué par TDM était en moyenne de 46,8mm (*SD* 6,55mm ; *min* 35,5mm – *max* 64mm). Le diamètre moyenné SLd-CC de l'anneau mitral évalué par TDM était en moyenne de 46,7mm (*SD* 6,9mm ; *min* 36mm – *max* 64,5mm).

Le diamètre moyen de l'anneau mitral évalué en peropératoire par le chirurgien, avec le ballon Equalizer, était en moyenne de 37,7mm (*SD* 4,4mm ; *min* 30mm – *max* 45mm).

Par rapport au diamètre moyenné SLs-CC évalué au TDM, les mesures chirurgicales étaient en moyenne 9,15mm plus petites (*SD* 5,9mm ; *IC* 95% de -2,23 à 20,5 mm, soit -1% à 34% de sous-estimation, moyenne 18,7% de sous-estimation, $p < 0,0001$).

Le coefficient de corrélation (r) était de 0,48 ($p = 0,01$).

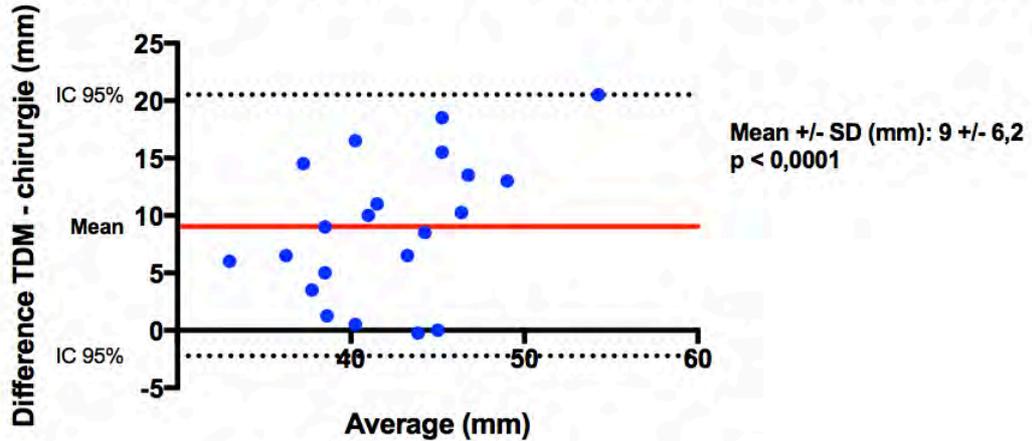


Courbe d'analyse de Bland-Altman entre diamètre SLs-CC évalué par TDM et mesures peropératoires. Distances en mm.

Par rapport au diamètre moyenné SLd-CC obtenue au TDM, les mesures chirurgicales étaient en moyenne 9mm plus petites (*SD* 6,2mm ; *IC* 95% de -3 à 21mm ; *min* - 0,5mm à *max* 20mm, $p < 0,0001$).

Le coefficient de corrélation (r) était de 0,47 ($p = 0,015$).

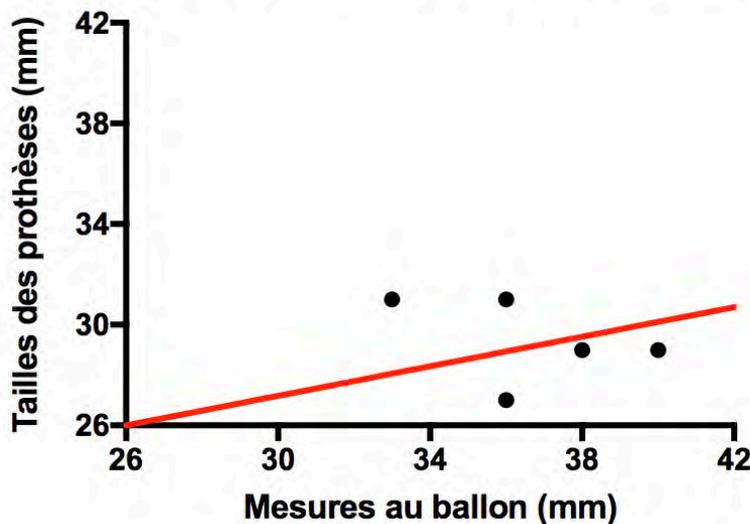
Diamètre moyenné SLd - CC vs mesure chirurgicale. Difference vs. average



Courbe d'analyse de Bland-Altman entre diamètre SLd-CC évalué par TDM et mesures peropératoires. Distances en mm.

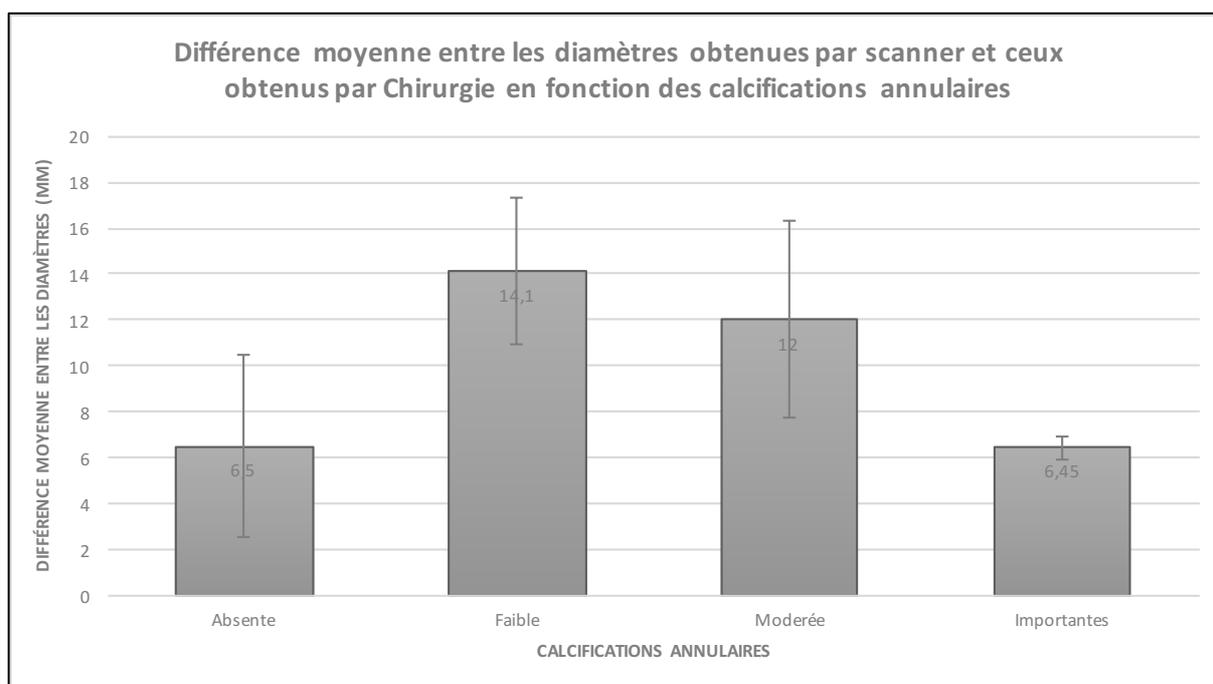
La taille finale de prothèse implantée dans le sous-groupe des rétrécissements mitraux était en moyenne de 7,2mm plus petite que la mesure prise au ballon (écart moyen 3mm ; min 2mm – max 11mm).

Correlation mesures au ballon - tailles des prothèses implantées



Régression linéaire montrant la faible corrélation entre les mesures au ballon et les tailles des prothèses implantées dans le sous-groupe des rétrécissements mitraux

Un degré de calcification important de l'anneau mitral n'était pas associé à une sous-estimation plus importante de la taille de l'anneau par la mesure chirurgicale.



Histogramme montrant la relation entre les calcifications de l'anneau et la différence moyenne scanner - mesures chirurgicales de l'anneau.

Différence moyenne en mm avec barres d'écart moyen.

d) Corrélation intra-observateur en tomodensitométrie

L'étude de la reproductibilité des mesures a été évaluée pour 35 valeurs sélectionnées au hasard pour chaque diamètre (SLs, CC, SLd).

Une bonne reproductibilité intra-observateur a été observé. L'analyse Bland-Altman a montré une différence moyenne faible avec des limites étroites d'intervalle à 95%.

	Différence moyenne en mm +/- Standard déviation (intervalle confiance)	Coefficient de corrélation r
Diamètre SLs	1,1 +/- 1,83 (0,48 – 1,7)	0,95 (p < 0,0001)
Diamètre CC	0,7 +/- 1,93 (0,06 – 1,33)	0,96 (p < 0,0001)
Diamètre SLd	0,34 +/- 1,8 (-0,26 – 0,94)	0,95 (p < 0,0001)

B. Groupe B

Sur la période du 01/09/2017 au 31/08/2018, 189 patients ont été adressés à l'hôpital Louis Pradel, dans le service de chirurgie cardiovasculaire A et C, pour la prise en charge d'une valvulopathie mitrale sévère.

Sur les 189 patients, 179 patients n'avaient pas d'antécédent de prothèse ou d'annuloplastie mitrale. Sur les 179 patients, seulement 22 patients ont bénéficié à la fois d'un scanner préopératoire injecté avec protocole d'acquisition dédié et d'une ETO 3D en pré-procédure. 16 patients ont pu être inclus dans l'analyse finale.

Nous avons exclu 6 patients du fait de fichiers manquants ou non analysables (format inadéquate ou de qualité insuffisante).

L'âge moyen de la population était de 72,5 ans (écart moyen 8,5 ans ; min 53 – max 86).

La valvulopathie était une insuffisance mitrale dystrophique dans 56% des cas (N = 9), une insuffisance mitrale secondaire dans 38% des cas (N = 6), et un rétrécissement mitral dans 6% des cas (N = 1).

Le diamètre télé-diastolique moyen du ventricule gauche était de 62mm (écart moyen 6,2mm ; min 47 – max 81).

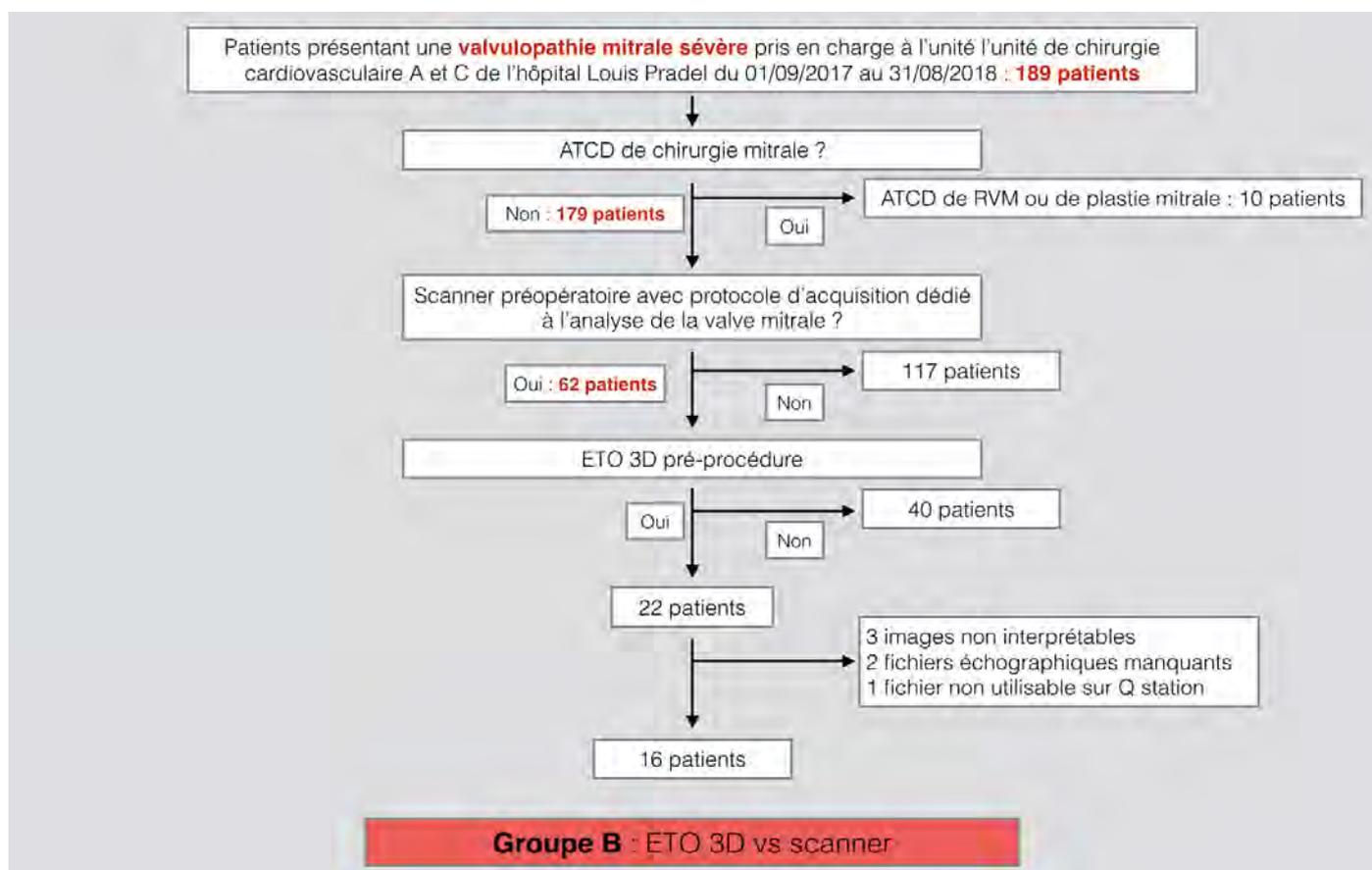


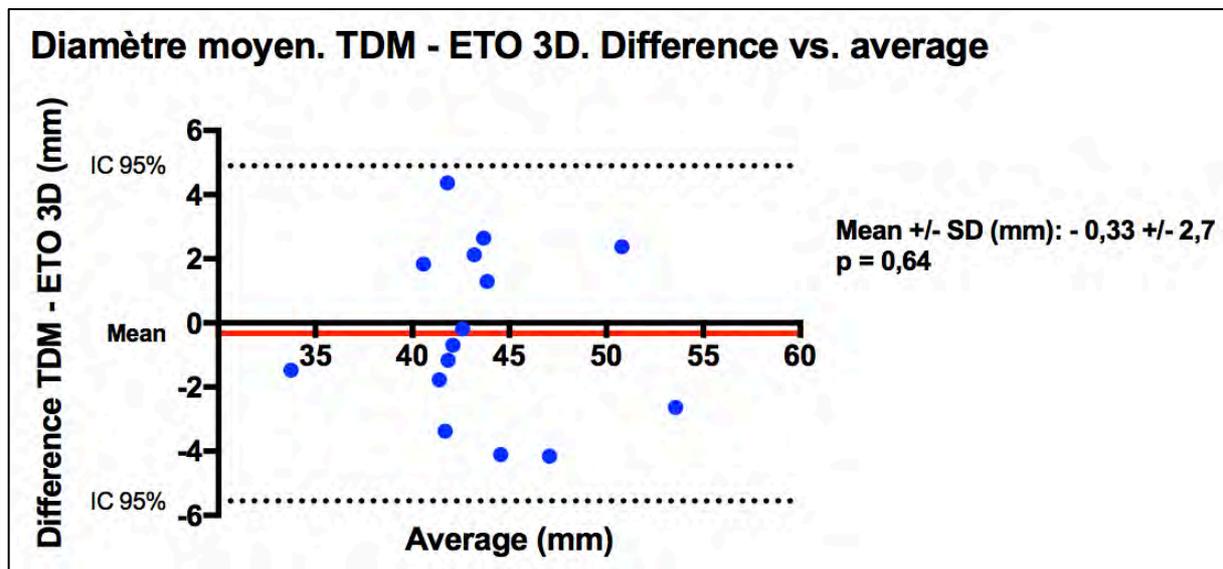
Figure n°9: Flow chart du groupe B. Comparaison des données en ETO 3D et en scanner.

a) Diamètre moyen de l'anneau mitral

Le diamètre moyen de l'anneau mitral évalué par ETO 3D était de 43,7mm (*écart moyen 3,4mm ; min 34,5mm – max 54,9mm*). Le diamètre moyen de l'anneau mitral évalué par scanner 2D était de 43,5mm (*écart moyen 3,3mm ; min 33mm – max 52mm*).

Pour le diamètre moyen, l'ETO 3D trouvait des valeurs en moyenne 0,33mm plus grandes que les valeurs obtenues par scanner (*SD 2,7mm ; IC 95% de – 5,6 à 4,9mm, p 0,64*).

Pour mémoire, le coefficient de corrélation (r) était de 0,84 ($p < 0,0001$).



Courbe d'analyse de Bland-Altman du diamètre moyen.

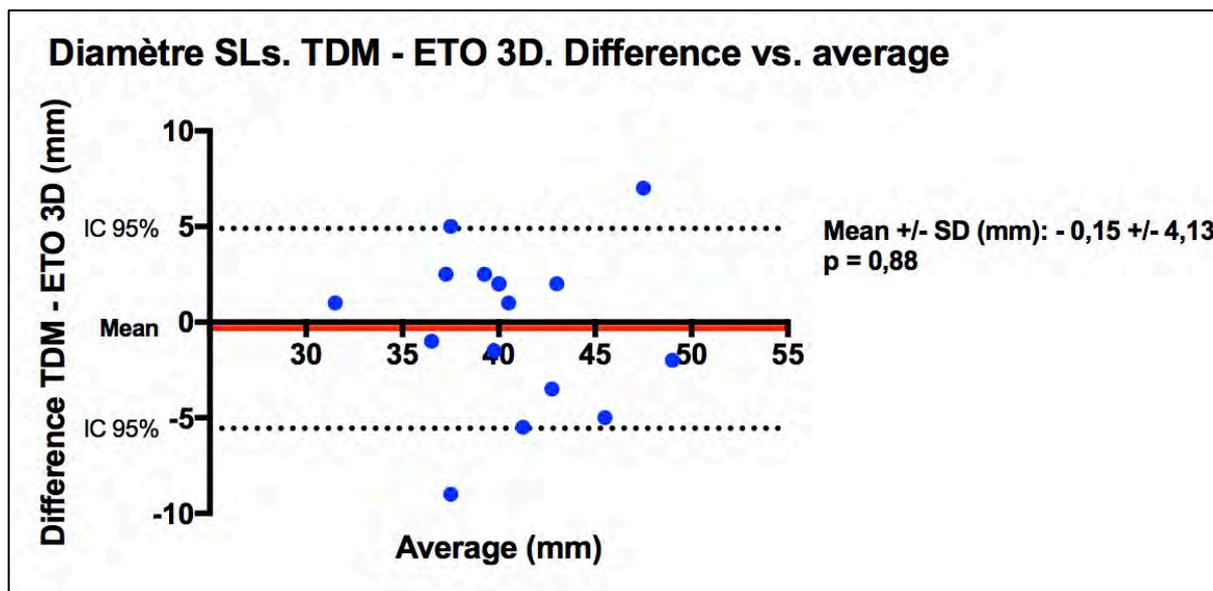
Distances en mm. ETO 3D versus TDM 2D

b) Diamètre SLs

Le diamètre SLs moyen évalué par ETO 3D était de 40,6mm (*écart moyen 3,8mm ; min 31mm – max 50mm*). Le diamètre SLs moyen évalué par scanner 2D était de 40,5mm (*écart moyen 3,5mm ; min 32mm – max 51mm*).

Pour le diamètre SLs, l'ETO 3D trouvait des valeurs en moyenne 0,15mm plus grandes que les valeurs obtenues par scanner (*SD 4,13mm ; IC 95% de -8,3 à 7,9mm, p 0,88*).

Pour mémoire, le coefficient de corrélation (r) était de 0,65 ($p=0,004$).



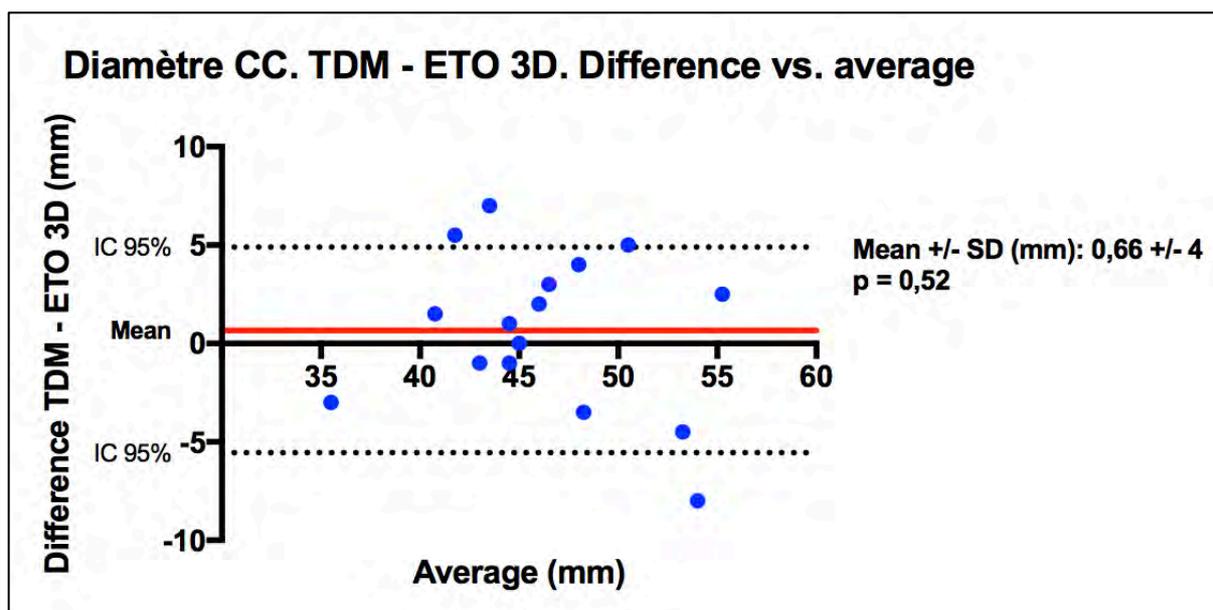
Courbe d'analyse de Bland-Altman du diamètre SLs.
Distances en mm. ETO 3D vs TDM 2D.

c) Diamètre CC

Le diamètre CC moyen évalué par ETO 3D était de 45,9mm (*écart moyen 4,5mm ; min 37mm – max 58mm*). Le diamètre CC moyen évalué par scanner 2D était de 46,6mm (*écart moyen 3,8mm ; min 34mm – max 56,5mm*).

Pour le diamètre CC, l'ETO 3D trouvait des valeurs en moyenne 0,66mm plus petites que les valeurs obtenues par scanner (*SD 4mm ; IC 95% de -7,2 à 8,55mm, p 0,52*).

Pour mémoire, le coefficient de corrélation (r) était de 0,75 (p=0,0004).



Courbe d'analyse de Bland-Altman du diamètre CC.
Distances en mm. ETO 3D vs TDM 2D

4) Discussion :

Notre étude, comme d'autres avant elle ²⁴, a montré que l'anneau mitral est une structure anatomiquement complexe pour laquelle une compréhension profonde de l'anatomie et notamment de la jonction mitro-aortique est nécessaire.

Plusieurs études se sont déjà intéressées à la mesure par imagerie de l'anneau mitrale ^{67 66 65}.

Notre étude est cependant la première, à notre connaissance, à comparer les mesures obtenues par imagerie à des mesures anatomiques perchirurgicales.

Elle permet de mettre en évidence une différence importante des mesures par scanner avec les mesures chirurgicales.

On peut difficilement expliquer cette différence par une erreur systématique du scanner. En effet, le scanner a une résolution isotrope de 0,6mm et n'a jamais été associé, dans la littérature, à des erreurs de mesure pouvant atteindre 20mm.

Cette différence s'explique probablement mieux par une sous-estimation importante des mesures de l'anneau lors de la chirurgie, liée à l'absence de mise en charge des tissus en per-CEC.

Le biais systématique, retrouvé dans notre étude, est en moyenne de 19% (range -1% à 34%). Ces données sont compatibles avec les connaissances de biomécanique sur l'extension habituelle des tissus (augmentation de 25% de leurs dimensions basales) lors de leur mise en charge. Cette extension, limitée par la matrice collagène, peut aller jusqu'à 50% lors d'une mise en tension supra-physiologique. L'écart minime entre mesures par scanner et mesures par chirurgie retrouvé pour trois anneaux peut s'expliquer par une extensibilité probablement variable d'un individu à l'autre, possiblement quasi nulle chez certains anneaux pathologiques.

La mesure à frottement doux de l'anneau mitral ne permet donc pas de s'affranchir de cette absence de mise en charge des tissus en per-chirurgie.

La mesure avec le ballon Equalizer est néanmoins plus fiable que la mesure classique avec calibre qui, dans le groupe des rétrécissements mitraux, entraîne une sous-estimation supplémentaire de 7,2mm.

D'éventuelles calcifications sous-annulaires importantes ne permettent pas d'expliquer, à elles seules, cette sous-estimation. En effet, celles-ci ne sont pas, dans notre étude, associées à une sous-estimation plus grande que dans le groupe sans calcification.

Ces constatations viennent dans la continuité du travail de l'équipe de Bothe et de Miller⁷² qui a montré que l'approche de la taille de l'anneau d'annuloplastie varie considérablement entre les

chirurgiens. Leur travail a permis de mettre en évidence des différences de taille entre les anneaux et leurs calibreurs respectifs. Bothe et Miller ont également montré que ceux-ci portent des étiquettes avec des tailles qui ne correspondent à aucune des dimensions de l'anneau ou du calibreur. De cette étude naissait l'idée que les stratégies de dimensionnement actuelles de l'anneau sont plus proches du vaudou que de la science !

Par la mise en évidence de la sous-estimation de la taille de l'anneau en per-chirurgie, notre étude soulève de nouveau la problématique des mismatches patient-prothèse. En effet, l'aire utile de l'orifice (EOA : Effective Orifice Area) des valves prothétiques utilisées pour le remplacement valvulaire mitral, à cause de l'encombrement de leur anneau, est plus petit que celui d'une valve mitrale native. Par conséquent, il est fréquent que des prothèses mitrales considérées comme normofonctionnelles aient des gradients semblables à ceux retrouvés chez des patients avec une sténose mitrale légère à modérée.

Dans la littérature, le mismatch modéré, défini par un EOA indexé $\leq 1,2 \text{ cm}^2/\text{m}^2$, est fréquent avec une incidence allant de 32%⁷³ à 69%⁷⁴ des patients suivant les études. Le mismatch sévère, défini par un EOA indexé $\leq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}^2$, est quant à lui présent chez moins de 10% des patients⁷⁴.

Le mismatch patient-prothèse (PPM), même modéré, a des conséquences importantes, entraînant une persistance au moins partielle de pressions auriculaire gauche et pulmonaires élevées⁷⁵. En conséquence, le PPM entraîne une augmentation du risque de défaillance droite, d'insuffisance tricuspide secondaire⁷⁶ et de faible amélioration fonctionnelle post chirurgie.

Magne et son équipe⁷⁴ a montré que le PPM était associé à une mortalité accrue sur le long terme : 82% de survie à 12 ans chez les patients sans mismatch contre 76% en cas de mismatch modéré ($p < 0,05$) et 64% en cas de mismatch sévère ($p < 0,05$).

Tanné et son équipe⁷⁷ a ainsi suggéré que pour la valve mitrale, le cutoff minimal d'EOA au repos devait être de $1.16 \text{ cm}^2/\text{m}^2$, de $1.5 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ en cas de patient sportif.

La seule solution apportée jusqu'à présent était de choisir pour une taille donnée d'anneau, la prothèse avec l'EOA le plus grand. Notre étude amène à penser qu'avec de meilleures mesures de l'anneau mitral, nous pourrions diminuer les problématiques de mismatch tout en restant prudent quant au risque rare mais grave de rupture ventriculaire postérieure^{78 79 80}.

Une faible variation des biométries de l'anneau mitral a été observée, au cours du cycle cardiaque, chez nos patients atteints de valvulopathie mitrale sévère. Nos données sont ainsi cohérentes avec l'étude de Grewal²⁶. Ceux-ci retrouvaient une perte de la contraction antéro-postérieure associée à une augmentation systolique du diamètre CC de l'anneau dans les valves myxoïdes, et une absence de variation dans les insuffisances mitrales secondaires.

Devant des variations interindividuelles importantes, il reste cependant primordial de mesurer l'anneau à plusieurs moments du cycle cardiaque. En effet, dans notre série, la variation des biométries

de l'anneau mitral chez un même patient atteint 5mm pour le diamètre SL et 11mm pour le diamètre CC.

Même si l'échographie transoesophagienne 2D joue un rôle primordial dans la détection et la caractérisation de la valvulopathie mitrale, celle-ci entraîne un risque important de sous-estimation des dimensions de l'anneau mitral.

Nous retrouvons une sous-estimation maximale de 10mm pour les diamètres SLs et CC. De tels chiffres entraînent non seulement un risque de fuite paraprothétique majeur mais également un risque de déplacement de la prothèse.

Cette mauvaise corrélation met en évidence les difficultés importantes à s'aligner sur le petit axe et le grand axe de l'anneau mitral en échographie 2D, avec un risque important de mesures désaxées (Figure 9).

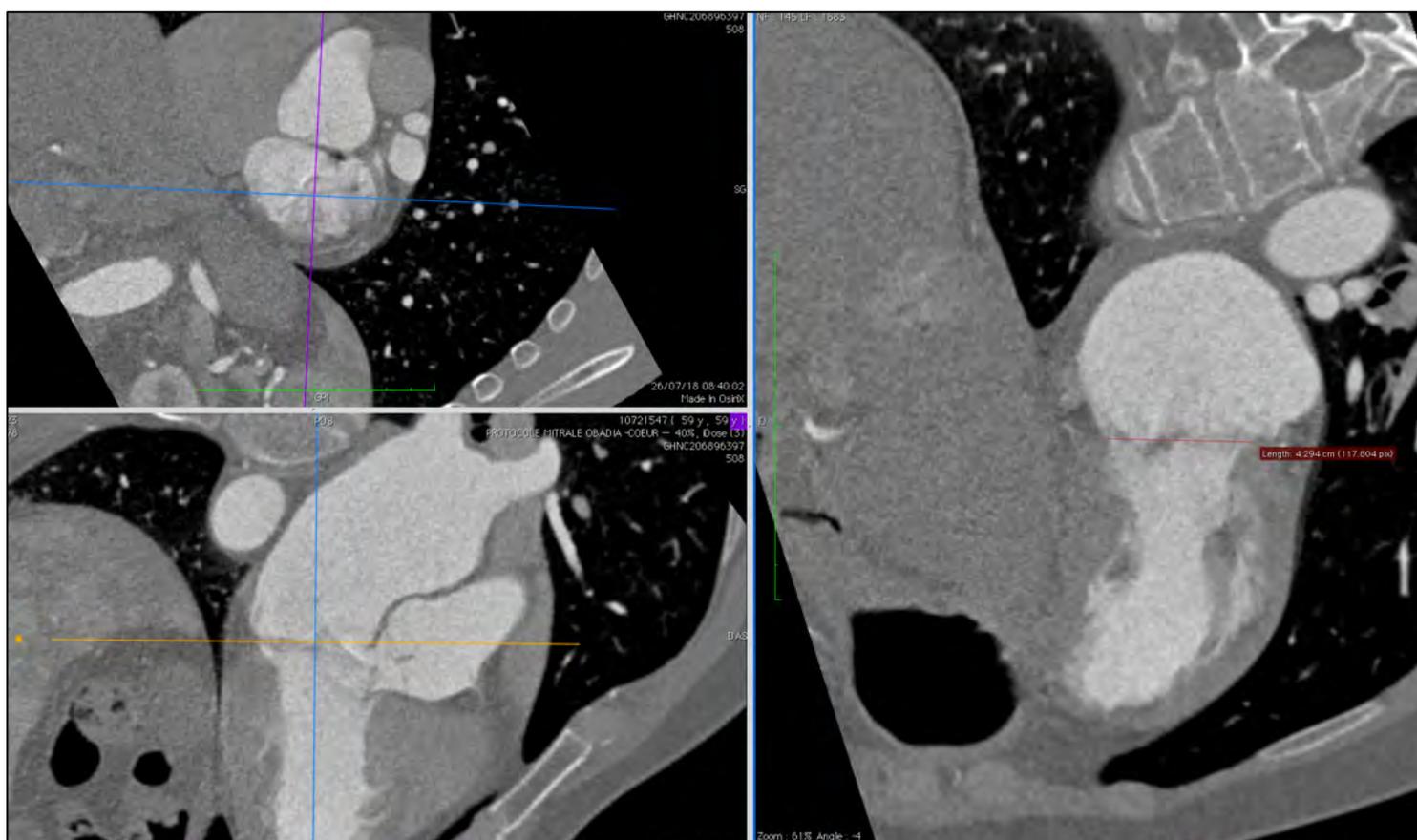


Figure n°10 : exemples de mesures mal alignées sur le petit et le grand axe de l'anneau mitral.

Ces difficultés sont partiellement corrigées par l'utilisation d'acquisition échographiques 3D avec reconstruction multiplanaire par logiciel dédié.

Celles-ci restent cependant imparfaites puisque la sous-estimation par l'ETO 3D atteint 5mm pour le diamètre moyen (calculé à partir de l'aire), et 8mm pour les diamètres SLs et CC.

Ces données sont cohérentes avec celles des travaux plus anciens et notamment ceux de l'équipe de Mak ⁶⁷. L'équipe de Shanks ⁶⁶ retrouvait de meilleurs coefficients de corrélation entre les deux techniques, à relativiser par des différences qui pouvaient atteindre 2cm² pour l'aire et 10mm pour les distances.

Même si le coefficient de corrélation entre ETO 3D et scanner (0,84) pour le diamètre moyen est intéressant sur le plan statistique, une sous-estimation du diamètre de 5mm pourrait aboutir à un résultat post-procédure décevant.

En effet, malgré sa très bonne résolution axiale (0,45mm pour une fréquence de 7,5MHz), l'échographie transoesophagienne dispose d'une résolution latérale faible (1,3mm pour une fréquence de 7,5 MHz contre 0,6mm en isotrope pour le scanner) rendant difficile la distinction entre les différents tissus mous. Cette résolution s'abaisse encore lorsque l'on utilise le mode 3D (résolution axiale de 1,5mm et résolution latérale de 4,3mm pour une profondeur d'exploration de 6cm).

Sa résolution anisotrope (phénomène des speckles ultrasonores) en fait par ailleurs un mauvais instrument de mesure pour les orifices non circulaires tels que l'anneau mitral.

Le scanner reste, à notre sens, par son excellente résolution spatiale et sa résolution isotrope, l'examen de choix pour la mesure des biométries de l'anneau mitral.

Il présente l'avantage indispensable d'une très bonne reproductibilité intra-observateur, reproductibilité constatée dans notre étude, de façon cohérente avec les données de la littérature.

Notre étude, comme celle de Foster ²⁴, permet de rappeler que l'anneau mitral est une structure complexe en forme de selle qui peut être décrite comme une ellipse avec un grand axe et un petit axe. Cette forme en ellipse remet en cause les recommandations de l'American Society of Echocardiography ⁸¹ pour l'utilisation d'une seule mesure de l'anneau mitral. Il paraît ainsi indispensable, afin de s'approcher au mieux des biométries de l'anneau, de réaliser deux mesures : l'une passant par le petit axe et l'autre par le grand axe.

Une imagerie précise et fiable de l'anneau mitral est donc difficile à réaliser, mais son importance est primordiale si l'on veut que les décisions thérapeutiques et chirurgicales soient fondées sur ces mesures.

L'anatomie du complexe valvulaire mitral est beaucoup plus complexe que l'anatomie valvulaire aortique et les contraintes techniques seront plus importantes pour le TMVI que pour le TAVI.

Comme le décrit Maisano ⁸², les futures prothèses mitrales implantées par cathétérisme devront bénéficier d'un ancrage stable permettant de supporter la différence importante de pression entre les cavités cardiaques gauches ainsi que le mouvement cyclique continu de l'anneau.

Les méthodes de fixation ne reposant que sur la force radiale des dispositifs seront probablement, à la différence du TAVI, difficile à rendre pérenne pour deux raisons : l'absence de calcification circonférentielle chez la majorité des patients et les difficultés d'une mesure très précise de l'anneau. De tels dispositifs risqueront de plus d'occasionner une compression de la LVOT ou de créer des lésions des structures adjacentes (système de conduction électrique, artère circonflexe).

Les caractéristiques propres à la valve mitrale exigent donc que les futures prothèses aient non seulement un design conçu pour limiter au maximum les fuites para-prothétiques mais également le risque d'obstruction de la LVOT et de protrusion importante dans l'oreillette gauche.

Limites :

Cette étude a souffert de plusieurs limites.

Dans le groupe A, la nécessité d'un scanner pré-procédure et d'une mesure chirurgicale de l'anneau a conduit à un pourcentage élevé de patients non inclus, abaissant la puissance de l'étude.

Nous avons limité cependant rigoureusement le biais de sélection potentiel en utilisant chaque sujet de l'étude comme son propre contrôle et en effectuant en aveugle toutes les mesures.

La mesure par ballon restait très subjective et donc soumise à un caractère opérateur dépendant.

L'absence de mise en tension des tissus en perchirurgie n'a pas permis une validation des mesures scanner.

Dans le groupe B, le temps qui s'est écoulé entre le scanner cardiaque et l'échocardiographie peut avoir entraîné chez certains patients un changement mineur des dimensions de l'anneau mitral.

Les conditions hémodynamiques diffèrent également beaucoup entre scanner et échographie transoesophagienne. D'un côté, l'échographie transoesophagienne peut être effectuée de deux manières : sans sédation avec génération d'un important hyperadrénergisme, ou sous sédation vigile avec une vasoplégie réactionnelle entraînant la modification des conditions de charge. De l'autre côté, le scanner est réalisé en apnée, parfois après perfusion de bêtabloquant.

Ces différences sont importantes quand on sait que les dimensions de l'anneau peuvent changer en fonction de l'état chronotrope et inotrope du ventricule gauche⁸³.

Il faudrait dans l'idéal réaliser les deux examens dans une période rapprochée, avec des conditions hémodynamiques similaires et standardisées.



Nom, prénom du candidat : UHLRICH William

CONCLUSIONS

De nouvelles techniques de remplacement valvulaire par voie mini-invasive (TMVI : Transcathéter Mitral Valve Implantation) se développent faisant suite au TAVI (Trancatheter Aortic Valve Implantation) qui a révolutionné la prise en charge des valvulopathies aortiques sténosantes.

Néanmoins la valve mitrale est une structure anatomique beaucoup plus complexe que la valve aortique. Le bon fonctionnement de la valve mitrale nécessite une interaction fine entre chacun de ses composants avec le myocarde auriculaire et ventriculaire, on parle ainsi de complexe valvulaire mitral.

La connaissance de l'anatomie précise de ce complexe est cruciale pour la mise en pratique clinique de ces technologies.

En effet, le choix et la détermination de la taille des nouvelles prothèses mitrales dépend directement de la précision des mesures obtenues par imagerie de coupe.

L'échographie transoesophagienne 2D ou 3D (ETO) et le scanner injecté sont les méthodes actuellement les plus utilisées pour cette biométrie. Or ces mesures n'ont jamais été confrontées à la mesure anatomique directe de l'anneau mitral.

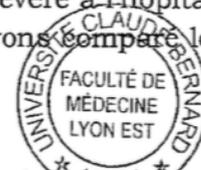
Le but de notre étude était de comparer les mesures effectuées par ces deux techniques d'imagerie de coupe à des mesures perchirurgicales pour déterminer la place respective du scanner et de l'échographie transoesophagienne dans le choix de la taille des prothèses.

Notre étude comprenait deux groupes. Dans le premier groupe, nous avons analysé les scanners préopératoires avec reconstruction multiplanare de 21 patients opérés d'une valvulopathie mitrale sévère dans le service de chirurgie cardiovasculaire A et C de l'hôpital Louis Pradel entre le 1^{er} novembre 2017 et le 31 août 2018. Nous avons comparé les mesures de l'anneau mitral effectuées au scanner avec les données d'ETO 2D per-procédure et avec la mesure chirurgicale de l'anneau déterminée précisément par l'inflation d'un ballon compliant.

Dans le deuxième groupe, nous avons analysé de façon rétrospective les données obtenues par ETO 3D et scanner avant procédure, avec reconstruction multiplanare, de tous les patients ayant bénéficié de ces deux examens pour valvulopathie mitrale sévère à l'hôpital Louis Pradel de Lyon entre le 1^{er} septembre 2017 et le 31 août 2018. Nous avons comparé les mesures de l'anneau mitral effectuées avec ces deux examens.

Les résultats de notre étude sont au nombre de quatre :

- 1) Aucune différence statistique n'est retrouvée dans la biométrie de l'anneau mitral au cours du cycle cardiaque.
- 2) L'échographie transoesophagienne 2D trouvait des valeurs en moyenne de 4,9 mm plus petites que les mesures obtenues par scanner pour le diamètre antéro-postérieur (SD 3,7





mm ; IC 95% de -2,32 à 12mm, p 0,0002) ; 5,2mm plus petites pour le diamètre inter-commissural (SD 3,65 mm ; IC 95% de -1,95 à 12,35 mm, p < 0,0001).

Par rapport au diamètre moyen évalué au scanner, les mesures chirurgicales étaient en moyenne 9,15mm plus petites (SD 5,9mm ; IC 95% de -2,23 à 20,5 mm, soit -1% à 34% de sous-estimation, moyenne 18,7% de sous-estimation, p < 0,0001).

3) L'échographie transoesophagienne 3D trouvait des valeurs en moyenne de 0,33 mm plus grands que les valeurs obtenues par scanner pour le diamètre moyen (SD 2,7 mm ; IC 95% de - 5,6 à 4,9 mm, p 0,64) ; 0,15mm plus grandes pour le diamètre antéro-postérieur (SD 4,13mm ; IC 95% de -8,3 à 7,9mm, p 0,88) ; 0,66mm plus petites pour le diamètre inter-commissural (SD 4mm ; IC 95% de -7,2 à 8,55mm, p 0,52).

4) La corrélation intra-observateur était très bonne pour les mesures scanner avec des coefficients de corrélation supérieur ou égal à 0,95.

Les mesures obtenues par scanner semblent être les mesures les plus fiables pour l'évaluation biométrique de l'anneau mitral. Néanmoins, l'échographie transoesophagienne reste indispensable pour l'évaluation fonctionnelle précise de la pathologie valvulaire mitrale.

De plus notre étude a permis de mettre en évidence une sous-estimation importante des mesures de l'anneau lors de la chirurgie, ce point soulève à nouveau la problématique des mismatches patients-prothèse.

Pour les nouvelles techniques de remplacement valvulaire par voie mini-invasive actuellement en développement, nos résultats nous incitent à garder un esprit critique quant à la détermination précise de la taille de la prothèse implantée par voie transcutanée et quant à leurs caractéristiques mécaniques (bioprothèse avec implantation par ballon ou auto-expandable).

Le Président de la thèse,

Nom et Prénom du Président

Signature *Dr Furet Geraud*

Vu :

Pour Le Président de l'Université

Le Doyen de l'UFR de Médecine Lyon Est



Professeur Gilles RODE

Vu et permis d'imprimer

Lyon, le 19 SEP. 2018

Bibliographie

1. Nkomo VT, Gardin JM, Skelton TN, Gottdiener JS, Scott CG, Enriquez-Sarano M. Burden of valvular heart diseases: a population-based study. *Lancet Lond Engl*. 2006;368:1005–1011.
2. Mirabel M, Lung B, Baron G, Messika-Zeitoun D, Détaint D, Vanoverschelde J-L, Butchart EG, Ravaud P, Vahanian A. What are the characteristics of patients with severe, symptomatic, mitral regurgitation who are denied surgery? *Eur Heart J*. 2007;28:1358–1365.
3. Andalib A, Mamane S, Schiller I, Zakem A, Mylotte D, Martucci G, Lauzier P, Alharbi W, Cecere R, Dorfmeister M, Lange R, Brophy J, Piazza N. A systematic review and meta-analysis of surgical outcomes following mitral valve surgery in octogenarians: implications for transcatheter mitral valve interventions. *EuroIntervention J Eur Collab Work Group Interv Cardiol Eur Soc Cardiol*. 2014;9:1225–1234.
4. European Society of Cardiology. Guidelines for the management of valvular heart disease. 2017;
5. Ribeiro AHS, Wender OCB, de Almeida AS, Soares LE, Picon PD. Comparison of clinical outcomes in patients undergoing mitral valve replacement with mechanical or biological substitutes: a 20 years cohort. *BMC Cardiovasc Disord*. 2014;14:146.
6. Crabtree TD, Bailey MS, Moon MR, Munfakh N, Pasque MK, Lawton JS, Moazami N, Aubuchon KA, Al-Dadah AS, Damiano RJ. Recurrent mitral regurgitation and risk factors for early and late mortality after mitral valve repair for functional ischemic mitral regurgitation. *Ann Thorac Surg*. 2008;85:1537–1542; discussion 1542-1543.
7. Acker MA, Parides MK, Perrault LP, Moskowitz AJ, Gelijns AC, Voisine P, Smith PK, Hung JW, Blackstone EH, Puskas JD, Argenziano M, Gammie JS, Mack M, Ascheim DD, Bagiella E, Moquete EG, Ferguson TB, Horvath KA, Geller NL, Miller MA, Woo YJ, D'Alessandro DA, Ailawadi G, Dagenais F, Gardner TJ, O'Gara PT, Michler RE, Kron IL. Mitral-Valve Repair versus Replacement for Severe Ischemic Mitral Regurgitation. *N Engl J Med*. 2014;370:23–32.
8. Du Plessis LA, Marchand P. The Anatomy of the Mitral Valve and its Associated Structures. *Thorax*. 1964;19:221–227.
9. Muresian H. The clinical anatomy of the mitral valve. *Clin Anat N Y N*. 2009;22:85–98.
10. Candan O, Ozdemir N, Aung SM, Bakal RB, Gecmen C, Akpınar SH, Cem D, Onur O, Kaymaz C. Effect of mitral valve repair versus replacement on left ventricular rotational deformation: a study with speckle tracking echocardiography. *J Heart Valve Dis*. 2013;22:651–659.
11. Kilner PJ, Yang GZ, Wilkes AJ, Mohiaddin RH, Firmin DN, Yacoub MH. Asymmetric redirection of flow through the heart. *Nature*. 2000;404:759–761.
12. Van Mieghem NM, Piazza N, Anderson RH, Tzikas A, Nieman K, De Laat LE, McGhie JS,

- Geleijnse ML, Feldman T, Serruys PW, de Jaegere PP. Anatomy of the mitral valvular complex and its implications for transcatheter interventions for mitral regurgitation. *J Am Coll Cardiol*. 2010;56:617–626.
13. Ranganathan N, Lam JH, Wigle ED, Silver MD. Morphology of the human mitral valve. II. The valve leaflets. *Circulation*. 1970;41:459–467.
 14. Ho SY. Anatomy of the mitral valve. *Heart Br Card Soc*. 2002;88 Suppl 4:iv5-10.
 15. Walmsley R. Anatomy of human mitral valve in adult cadaver and comparative anatomy of the valve. *Br Heart J*. 1978;40:351–366.
 16. Becker AE, De Wit AP. Mitral valve apparatus. A spectrum of normality relevant to mitral valve prolapse. *Br Heart J*. 1979;42:680–689.
 17. Lüllmann-Rauch R. Histologie. De Boeck Supérieur; 2008.
 18. McCarthy KP, Ring L, Rana BS. Anatomy of the mitral valve: understanding the mitral valve complex in mitral regurgitation. *Eur J Echocardiogr J Work Group Echocardiogr Eur Soc Cardiol*. 2010;11:i3-9.
 19. Zimmerman J, Bailey C. The surgical significance of the fibrous skeleton of the heart. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1962;22.
 20. Rosenquist GC, Clark EB, Sweeney LJ, McAllister HA. The normal spectrum of mitral and aortic valve discontinuity. *Circulation*. 1976;54:298–301.
 21. Wilcox BR, Cook AC, Anderson RH. Surgical Anatomy of the Heart. Greenwich Medical Media; 2005.
 22. Blanke P, Dvir D, Cheung A, Ye J, Levine RA, Precious B, Berger A, Stub D, Hague C, Murphy D, Thompson C, Munt B, Moss R, Boone R, Wood D, Pache G, Webb J, Leipsic J. A simplified D-shaped model of the mitral annulus to facilitate CT-based sizing before transcatheter mitral valve implantation. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2014;8:459–467.
 23. Salgo IS, Gorman JH, Gorman RC, Jackson BM, Bowen FW, Plappert T, St John Sutton MG, Edmunds LH. Effect of annular shape on leaflet curvature in reducing mitral leaflet stress. *Circulation*. 2002;106:711–717.
 24. Foster GP, Dunn AK, Abraham S, Ahmadi N, Sarraf G. Accurate measurement of mitral annular dimensions by echocardiography: importance of correctly aligned imaging planes and anatomic landmarks. *J Am Soc Echocardiogr Off Publ Am Soc Echocardiogr*. 2009;22:458–463.
 25. Gordic S, Nguyen-Kim TDL, Manka R, Sündermann S, Frauenfelder T, Maisano F, Falk V, Alkadhi H. Sizing the mitral annulus in healthy subjects and patients with mitral regurgitation: 2D versus 3D measurements from cardiac CT. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2014;30:389–398.
 26. Grewal J, Suri R, Mankad S, Tanaka A, Mahoney DW, Schaff HV, Miller FA, Enriquez-Sarano M. Mitral Annular Dynamics in Myxomatous Valve Disease: New Insights With Real-Time 3-Dimensional Echocardiography. *Circulation*. 2010;121:1423–1431.

27. Jiang L, Owais K, Matyal R, Khabbaz KR, Liu DC, Montealegre-Gallegos M, Hess PE, Mahmood F. Dynamism of the mitral annulus: a spatial and temporal analysis. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2014;28:1191–1197.
28. Thériault-Lauzier P, Dorfmeister M, Mylotte D, Andalib A, Spaziano M, Blanke P, Martucci G, Lange R, Leipsic J, Bilodeau L, Piazza N. Quantitative multi-slice computed tomography assessment of the mitral valvular complex for transcatheter mitral valve interventions part 2: geometrical measurements in patients with functional mitral regurgitation. *EuroIntervention J Eur Collab Work Group Interv Cardiol Eur Soc Cardiol*. 2016;12:e1021–e1030.
29. Kaplan SR, Bashein G, Sheehan FH, Legget ME, Munt B, Li XN, Sivarajan M, Bolson EL, Zeppa M, Arch MZ, Martin RW. Three-dimensional echocardiographic assessment of annular shape changes in the normal and regurgitant mitral valve. *Am Heart J*. 2000;139:378–387.
30. Alkadhi H, Desbiolles L, Stolzmann P, Leschka S, Scheffel H, Plass A, Schertler T, Trindade PT, Genoni M, Cattin P, Marincek B, Frauenfelder T. Mitral annular shape, size, and motion in normals and in patients with cardiomyopathy: evaluation with computed tomography. *Invest Radiol*. 2009;44:218–225.
31. Simon MA, Liu SF. Calcification of the mitral valve annulus and its relation to functional valvular disturbance. *Am Heart J*. 1954;48:497–505.
32. Pomerance A. Pathological and clinical study of calcification of the mitral valve ring. *J Clin Pathol*. 1970;23:354–361.
33. Abramowitz Y, Jilaihawi H, Chakravarty T, Mack MJ, Makkar RR. Mitral Annulus Calcification. *J Am Coll Cardiol*. 2015;66:1934–1941.
34. Carpentier AF, Pellerin M, Fuzellier JF, Relland JY. Extensive calcification of the mitral valve anulus: pathology and surgical management. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1996;111:718–729; discussion 729-730.
35. Elmariah S, Budoff MJ, Delaney JAC, Hamirani Y, Eng J, Fuster V, Kronmal RA, Halperin JL, O'Brien KD. Risk factors associated with the incidence and progression of mitral annulus calcification: the multi-ethnic study of atherosclerosis. *Am Heart J*. 2013;166:904–912.
36. Fox CS, Vasan RS, Parise H, Levy D, O'Donnell CJ, D'Agostino RB, Benjamin EJ, Framingham Heart Study. Mitral annular calcification predicts cardiovascular morbidity and mortality: the Framingham Heart Study. *Circulation*. 2003;107:1492–1496.
37. Eriksson MJ, Bitkover CY, Omran AS, David TE, Ivanov J, Ali MJ, Woo A, Siu SC, Rakowski H. Mitral annular disjunction in advanced myxomatous mitral valve disease: echocardiographic detection and surgical correction. *J Am Soc Echocardiogr Off Publ Am Soc Echocardiogr*. 2005;18:1014–1022.
38. Hutchins GM, Moore GW, Skoog DK. The association of floppy mitral valve with disjunction of the mitral annulus fibrosus. *N Engl J Med*. 1986;314:535–540.

39. Faggioni L, Gabelloni M, Accogli S, Angelillis M, Costa G, Spontoni P, Petronio AS, Caramella D. Preprocedural planning of transcatheter mitral valve interventions by multidetector CT: What the radiologist needs to know. *Eur J Radiol Open*. 2018;5:131–140.
40. Quain J, Schafer, Edward-Albert. Quain's elements of anatomy. William Wood;
41. Lam JH, Ranganathan N, Wigle ED, Silver MD. Morphology of the human mitral valve. I. Chordae tendineae: a new classification. *Circulation*. 1970;41:449–458.
42. Millington-Sanders C, Meir A, Lawrence L, Stolinski C. Structure of chordae tendineae in the left ventricle of the human heart. *J Anat*. 1998;192 (Pt 4):573–581.
43. Ritchie J, Warnock JN, Yoganathan AP. Structural characterization of the chordae tendineae in native porcine mitral valves. *Ann Thorac Surg*. 2005;80:189–197.
44. Sedransk KL, Grande-Allen KJ, Vesely I. Failure mechanics of mitral valve chordae tendineae. *J Heart Valve Dis*. 2002;11:644–650.
45. Obadia JF, Casali C, Chassignolle JF, Janier M. Mitral subvalvular apparatus: different functions of primary and secondary chordae. *Circulation*. 1997;96:3124–3128.
46. Sakai T, Okita Y, Ueda Y, Tahata T, Ogino H, Matsuyama K, Miki S. Distance between mitral annulus and papillary muscles: anatomic study in normal human hearts. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1999;118:636–641.
47. Silverman M, Hurst J. The mitral complex. Interaction of the anatomy, physiology, and pathology of the mitral annulus, mitral valve leaflets, chordae tendineae, and papillary muscles. *Am Heart J*. 1968;76:399–418.
48. Victor S, Nayak VM. Variations in the papillary muscles of the normal mitral valve and their surgical relevance. *J Card Surg*. 1995;10:597–607.
49. Gunnal SA, Wabale RN, Farooqui MS. Morphological variations of papillary muscles in the mitral valve complex in human cadaveric hearts. *Singapore Med J*. 2013;54:44–48.
50. Jimenez JH, Soerensen DD, He Z, Ritchie J, Yoganathan AP. Effects of papillary muscle position on chordal force distribution: an in-vitro study. *J Heart Valve Dis*. 2005;14:295–302.
51. Maselli D, Guarracino F, Chiaramonti F, Mangia F, Borelli G, Minzioni G. Percutaneous mitral annuloplasty: an anatomic study of human coronary sinus and its relation with mitral valve annulus and coronary arteries. *Circulation*. 2006;114:377–380.
52. Tops LF, Van de Veire NR, Schuijff JD, de Roos A, van der Wall EE, Schalij MJ, Bax JJ. Noninvasive evaluation of coronary sinus anatomy and its relation to the mitral valve annulus: implications for percutaneous mitral annuloplasty. *Circulation*. 2007;115:1426–1432.
53. Eto M, Morita S, Nakashima Y, Nishimura Y, Tominaga R. Morphometric study of the human mitral annulus: guide for mitral valve surgery. *Asian Cardiovasc Thorac Ann*. 2014;22:787–793.
54. Said SM, Pislaru S, Kotkar KD, Rihal CS, Mauermann WJ, Schaff HV, Dearani JA. Left Ventricular Outflow Tract Obstruction After Transcatheter Mitral Valve-in-Ring Implantation: A Word

of Caution. *Ann Thorac Surg*. 2016;102:e495–e497.

55. Waggoner AD, Pérez JE, Barzilai B, Rosenbloom M, Eaton MH, Cox JL. Left ventricular outflow obstruction resulting from insertion of mitral prostheses leaving the native leaflets intact: adverse clinical outcome in seven patients. *Am Heart J*. 1991;122:483–488.

56. Guerrero M, Dvir D, Himbert D, Urena M, Eleid M, Wang DD, Greenbaum A, Mahadevan VS, Holzhey D, O'Hair D, Dumonteil N, Rodés-Cabau J, Piazza N, Palma JH, DeLago A, Ferrari E, Witkowski A, Wendler O, Kornowski R, Martinez-Clark P, Ciaburri D, Shemin R, Alnasser S, McAllister D, Bena M, Kerendi F, Pavlides G, Sobrinho JJ, Attizzani GF, George I, Nickenig G, Fassa A-A, Cribier A, Bapat V, Feldman T, Rihal C, Vahanian A, Webb J, O'Neill W. Transcatheter Mitral Valve Replacement in Native Mitral Valve Disease With Severe Mitral Annular Calcification: Results From the First Multicenter Global Registry. *JACC Cardiovasc Interv*. 2016;9:1361–1371.

57. Wang DD, Eng MH, Greenbaum AB, Myers E, Forbes M, Karabon P, Pantelic M, Song T, Nadig J, Guerrero M, O'Neill WW. Validating a prediction modeling tool for left ventricular outflow tract (LVOT) obstruction after transcatheter mitral valve replacement (TMVR). *Catheter Cardiovasc Interv Off J Soc Card Angiogr Interv*. 2017;

58. Bruschi G, Botta L, Fratto P, Martinelli L. Failed valve-in-valve transcatheter mitral valve implantation. *Eur J Cardio-Thorac Surg Off J Eur Assoc Cardio-Thorac Surg*. 2014;45:e127.

59. Bapat VVN, Khaliel F, Ihleberg L. Delayed migration of Sapien valve following a transcatheter mitral valve-in-valve implantation. *Catheter Cardiovasc Interv Off J Soc Card Angiogr Interv*. 2014;83:E150-154.

60. Blanke P, Naoum C, Webb J, Dvir D, Hahn RT, Grayburn P, Moss RR, Reisman M, Piazza N, Leipsic J. Multimodality Imaging in the Context of Transcatheter Mitral Valve Replacement: Establishing Consensus Among Modalities and Disciplines. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2015;8:1191–1208.

61. Naoum C, Leipsic J, Cheung A, Ye J, Bilbey N, Mak G, Berger A, Dvir D, Arepalli C, Grewal J, Muller D, Murphy D, Hague C, Piazza N, Webb J, Blanke P. Mitral Annular Dimensions and Geometry in Patients With Functional Mitral Regurgitation and Mitral Valve Prolapse: Implications for Transcatheter Mitral Valve Implantation. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2016;9:269–280.

62. Van Mieghem NM, Rodríguez-Olivares R, Ren BC, van Gils L, Maugenest A, Geleijnse ML, Budde RPJ, Vogelaar J, Verstraeten L, de Jaegere PP. Computed tomography optimised fluoroscopy guidance for transcatheter mitral therapies. *EuroIntervention J Eur Collab Work Group Interv Cardiol Eur Soc Cardiol*. 2016;11:1428–1431.

63. Blanke P, Dvir D, Naoum C, Cheung A, Ye J, Thériault-Lauzier P, Spaziano M, Boone RH, Wood DA, Piazza N, Webb JG, Leipsic J. Prediction of fluoroscopic angulation and coronary sinus location by CT in the context of transcatheter mitral valve implantation. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2015;9:183–192.

64. Thériault-Lauzier P, Andalib A, Martucci G, Mylotte D, Cecere R, Lange R, Tchétché D, Modine T, van Mieghem N, Windecker S, Buithieu J, Piazza N. Fluoroscopic anatomy of left-sided heart structures for transcatheter interventions: insight from multislice computed tomography. *JACC Cardiovasc Interv.* 2014;7:947–957.
65. Hyodo E, Iwata S, Tugcu A, Oe Y, Koczo A, Shimada K, Muro T, Yoshikawa J, Yoshiyama M, Gillam LD, Hahn RT, Di Tullio MR, Homma S. Accurate measurement of mitral annular area by using single and biplane linear measurements: comparison of conventional methods with the three-dimensional planimetric method. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2012;13:605–611.
66. Shanks M, Delgado V, Ng ACT, van der Kley F, Schuijf JD, Boersma E, van de Veire NRL, Nucifora G, Bertini M, de Roos A, Kroft L, Schalij MJ, Bax JJ. Mitral valve morphology assessment: three-dimensional transesophageal echocardiography versus computed tomography. *Ann Thorac Surg.* 2010;90:1922–1929.
67. Mak GJ, Blanke P, Ong K, Naoum C, Thompson CR, Webb JG, Moss R, Boone R, Ye J, Cheung A, Munt B, Leipsic J, Grewal J. Three-Dimensional Echocardiography Compared With Computed Tomography to Determine Mitral Annulus Size Before Transcatheter Mitral Valve Implantation. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2016;9.
68. Thériault-Lauzier P, Mylotte D, Dorfmeister M, Spaziano M, Andalib A, Mamane S, Chetrit M, Blanke P, Cecere R, Buithieu J, Martucci G, Tchetché D, Modine T, van Mieghem N, Lange R, Windecker S, Bilodeau L, Leipsic J, Piazza N. Quantitative multi-slice computed tomography assessment of the mitral valvular complex for transcatheter mitral valve interventions part 1: systematic measurement methodology and inter-observer variability. *EuroIntervention J Eur Collab Work Group Interv Cardiol Eur Soc Cardiol.* 2016;12:e1011–e1020.
69. Blanke P, Naoum C, Dvir D, Bapat V, Ong K, Muller D, Cheung A, Ye J, Min JK, Piazza N, Thériault-Lauzier P, Webb J, Leipsic J. Predicting LVOT Obstruction in Transcatheter Mitral Valve Implantation. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2017;10:482–485.
70. Spaziano M, Thériault-Lauzier P, Meti N, Vaquerizo B, Blanke P, Deli-Hussein J, Chetrit M, Galatos C, Buithieu J, Lange R, Martucci G, Leipsic J, Piazza N. Optimal fluoroscopic viewing angles of left-sided heart structures in patients with aortic stenosis and mitral regurgitation based on multislice computed tomography. *J Cardiovasc Comput Tomogr.* 2016;10:162–172.
71. Hahn RT, Abraham T, Adams MS, Bruce CJ, Glas KE, Lang RM, Reeves ST, Shanewise JS, Siu SC, Stewart W, Picard MH. Guidelines for performing a comprehensive transesophageal echocardiographic examination: recommendations from the American Society of Echocardiography and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists. *J Am Soc Echocardiogr Off Publ Am Soc Echocardiogr.* 2013;26:921–964.
72. Bothe W, Miller DC, Doenst T. Sizing for mitral annuloplasty: where does science stop and voodoo begin? *Ann Thorac Surg.* 2013;95:1475–1483.

73. Lam B-K, Chan V, Hendry P, Ruel M, Masters R, Bedard P, Goldstein B, Rubens F, Mesana T. The impact of patient-prosthesis mismatch on late outcomes after mitral valve replacement. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2007;133:1464–1473.
74. Magne J, Mathieu P, Dumesnil JG, Tanne D, Dagenais F, Doyle D, Pibarot P. Impact of Prosthesis-Patient Mismatch on Survival After Mitral Valve Replacement. *Circulation.* 2007;115:1417–1425.
75. Li M, Dumesnil JG, Mathieu P, Pibarot P. Impact of valve prosthesis-patient mismatch on pulmonary arterial pressure after mitral valve replacement. *J Am Coll Cardiol.* 2005;45:1034–1040.
76. Angeloni E, Melina G, Benedetto U, Roscitano A, Refice S, Quarto C, Comito C, Pibarot P, Sinatra R. Impact of prosthesis-patient mismatch on tricuspid valve regurgitation and pulmonary hypertension following mitral valve replacement. *Int J Cardiol.* 2013;168:4150–4154.
77. Tanné D, Kadem L, Rieu R, Pibarot P. Hemodynamic impact of mitral prosthesis-patient mismatch on pulmonary hypertension: an in silico study. *J Appl Physiol.* 2008;105:1916–1926.
78. Karlson KJ, Ashraf MM, Berger RL. Rupture of left ventricle following mitral valve replacement. *Ann Thorac Surg.* 1988;46:590–597.
79. Hosono M, Shibata T, Sasaki Y, Hirai H, Bito Y, Takahashi Y, Suehiro S. Left ventricular rupture after mitral valve replacement: risk factor analysis and outcome of resuscitation. *J Heart Valve Dis.* 2008;17:42–47.
80. Deniz H, Sokullu O, Sanioglu S, Sargin M, Ozay B, Ayoglu U, Aykut Aka S, Bilgen F. Risk factors for posterior ventricular rupture after mitral valve replacement: results of 2560 patients. *Eur J Cardio-Thorac Surg Off J Eur Assoc Cardio-Thorac Surg.* 2008;34:780–784.
81. Zoghbi WA, Adams D, Bonow RO, Enriquez-Sarano M, Foster E, Grayburn PA, Hahn RT, Han Y, Hung J, Lang RM, Little SH, Shah DJ, Shernan S, Thavendiranathan P, Thomas JD, Weissman NJ. Recommendations for Noninvasive Evaluation of Native Valvular Regurgitation. *J Am Soc Echocardiogr.* 2017;30:303–371.
82. Maisano F, Alfieri O, Banai S, Buchbinder M, Colombo A, Falk V, Feldman T, Franzen O, Herrmann H, Kar S, Kuck K-H, Lutter G, Mack M, Nickenig G, Piazza N, Reisman M, Ruiz CE, Schofer J, Søndergaard L, Stone GW, Taramasso M, Thomas M, Vahanian A, Webb J, Windecker S, Leon MB. The future of transcatheter mitral valve interventions: competitive or complementary role of repair vs. replacement? *Eur Heart J.* 2015;36:1651–1659.
83. Gorman JH, Jackson BM, Moainie SL, Enomoto Y, Gorman RC. Influence of inotropy and chronotropy on the mitral valve sphincter mechanism. *Ann Thorac Surg.* 2004;77:852–857; discussion 857-858.

UHLRICH William

ANALYSE CRITIQUE DE LA BIOMETRIE DE L'ANNEAU MITRAL PAR IMAGERIES DE COUPE
Bases anatomiques, imageries et étude clinique comparative avec mesures perchirurgicales
Th. Méd : Lyon 2018 ; n°261 ; 106 pages, 25 figures, 54 illustrations, 4 tableaux

RESUME :

De nouvelles techniques de remplacement valvulaire par voie mini-invasive (TMVI : Transcathéter Mitral Valve Implantation) se développent faisant suite au TAVI (Trancatheter Aortic Valve Implantation) qui a révolutionné la prise en charge des valvulopathies aortiques sténosantes.

Néanmoins, la valve mitrale est une structure anatomique beaucoup plus complexe que la valve aortique. Le bon fonctionnement de la valve mitrale nécessite une interaction fine entre chacun de ses composants avec le myocarde auriculaire et ventriculaire, on parle ainsi de complexe valvulaire mitral. La connaissance de l'anatomie précise de ce complexe est cruciale pour la mise en pratique clinique de ces technologies.

En effet, le choix et la détermination de la taille des nouvelles prothèses mitrales dépendent directement de la précision des mesures obtenues par imagerie de coupe.

L'échographie transoesophagienne 2D ou 3D (ETO) et le scanner injecté sont les méthodes actuellement les plus utilisées pour cette biométrie. Or ces mesures n'ont jamais été confrontées à la mesure anatomique directe de l'anneau mitral.

Le but de notre étude était de comparer les mesures effectuées par ces deux techniques d'imagerie de coupe à des mesures perchirurgicales pour déterminer la place respective du scanner et de l'échographie transoesophagienne dans le choix de la taille des prothèses.

Les résultats de notre étude montrent que les mesures obtenues par scanner semblent être les mesures les plus fiables pour l'évaluation biométrique de l'anneau mitral. Néanmoins, l'échographie transoesophagienne reste indispensable pour l'évaluation fonctionnelle précise de la pathologie valvulaire mitrale.

Notre étude a permis de mettre en évidence une sous-estimation importante des mesures de l'anneau lors de la chirurgie, ce point soulève à nouveau la problématique des mismatches patients-prothèse.

Pour les nouvelles techniques de remplacement valvulaire par voie mini-invasive actuellement en développement, nos résultats nous incitent à garder un esprit critique quant à la détermination précise de la taille de la prothèse implantée par voie transcutanée et quant à leurs caractéristiques mécaniques (bioprothèse avec implantation par ballon ou auto-expandable).

MOTS CLES : valve mitrale, TMVI, ETO, scanner, mismatch patient-prothèse

JURY :

Président :	Monsieur le Professeur Gérard Finet
Directeur :	Monsieur le Professeur Gérard Finet
Membres :	Monsieur le Professeur Jean-François OBADIA
	Monsieur le Professeur Gilles RIOUFOL
	Madame le Professeur Hélène THIBAUT
	Monsieur le Docteur Matteo POZZI

DATE DE SOUTENANCE : 10 octobre 2018

ADRESSE DE L'AUTEUR : 33 rue Cavenne, 69007 LYON
william.uhlrich@gmail.com