



HAL
open science

Valeurs normales du strain myocardique global et segmentaire par tissue tracking en IRM et variations en fonction de l'âge et du sexe

Cécile Ancel

► **To cite this version:**

Cécile Ancel. Valeurs normales du strain myocardique global et segmentaire par tissue tracking en IRM et variations en fonction de l'âge et du sexe. Médecine humaine et pathologie. 2021. dumas-03340192

HAL Id: dumas-03340192

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03340192>

Submitted on 10 Sep 2021

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

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

UFR DE SANTE DE ROUEN NORMANDIE

ANNEE 2021

N°

**THESE POUR LE
DOCTORAT EN MEDECINE**

(Diplôme d'Etat)

Par

ANCEL Cécile

NEE LE 26/12/1992 A Mont Saint Aignan

PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 02 JUILLET 2021

**VALEURS NORMALES DU STRAIN MYOCARDIQUE GLOBAL ET
SEGMENTAIRE PAR TISSUE TRACKING EN IRM ET VARIATIONS
EN FONCTION DE L'AGE ET DU SEXE**

PRESIDENT DE JURY : Monsieur le Professeur Jean-Nicolas DACHER

DIRECTEUR DE THESE : Monsieur le Docteur Benjamin DUBOURG

MEMBRE DU JURY : Madame le Professeur Céline SAVOYE-COLLET

MEMBRE DU JURY : Monsieur le Professeur Emmanuel GERARDIN

ANNEE UNIVERSITAIRE 2020 - 2021

U.F.R. SANTÉ DE ROUEN

DOYEN : **Professeur Benoît VEBER**

ASSESEURS : **Professeur Loïc FAVENNEC**
Professeur Agnès LIARD
Professeur Guillaume SAVOYE

I - MEDECINE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mr Frédéric ANSELME	HCN	Cardiologie
Mme Gisèle APTER	Havre	Pédopsychiatrie
Mme Isabelle AUQUIT AUCKBUR	HCN	Chirurgie plastique
Mr Jean-Marc BASTE	HCN	Chirurgie Thoracique
Mr Fabrice BAUER	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya BEKRI	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mr Ygal BENHAMOU	HCN	Médecine interne
Mr Jacques BENICHOU	HCN	Bio statistiques et informatique médicale
Mr Olivier BOYER	UFR	Immunologie
Mme Sophie CANDON	HCN	Immunologie
Mr François CARON	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Philippe CHASSAGNE	HCN	Médecine interne (gériatrie)
Mr Moïse COEFFIER	HCN	Nutrition
Mr Vincent COMPERE	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mr Jean-Nicolas CORNU	HCN	Urologie
Mr Antoine CUVELIER	HB	Pneumologie
Mr Jean-Nicolas DACHER	HCN	Radiologie et imagerie médicale
Mr Stéfan DARMONI	HCN	Informatique médicale et techniques de communication
Mr Pierre DECHELOTTE	HCN	Nutrition

Mr Stéphane DERREY	HCN	Neurochirurgie
Mr Frédéric DI FIORE	CHB	Cancérologie
Mr Fabien DOGUET	HCN	Chirurgie Cardio Vasculaire
Mr Jean DOUCET	SJ	Thérapeutique - Médecine interne et gériatrie
Mr Bernard DUBRAY	CHB	Radiothérapie
Mr Frank DUJARDIN	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
Mr Fabrice DUPARC	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mr Eric DURAND	HCN	Cardiologie
Mr Bertrand DUREUIL	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mme Hélène ELTCHANINOFF	HCN	Cardiologie
Mr Manuel ETIENNE	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
Mr Thierry FREBOURG	UFR	Génétique
Mr Pierre FREGER (<i>surnombre</i>)	HCN	Anatomie - Neurochirurgie
Mr Jean François GEHANNO	HCN	Médecine et santé au travail
Mr Emmanuel GERARDIN	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille GERARDIN	HCN	Pédopsychiatrie
M. Guillaume GOURCEROL	HCN	Physiologie
Mr Dominique GUERROT	HCN	Néphrologie
Mme Julie GUEUDRY	HCN	Ophthalmologie
Mr Olivier GUILLIN	HCN	Psychiatrie Adultes
Mr Claude HOUDAYER	HCN	Génétique
Mr Fabrice JARDIN	CHB	Hématologie
Mr Luc-Marie JOLY	HCN	Médecine d'urgence
Mr Pascal JOLY	HCN	Dermato – Vénérologie
Mme Bouchra LAMIA	Havre	Pneumologie
Mme Annie LAQUERRIERE	HCN	Anatomie et cytologie pathologiques
Mr Vincent LAUDENBACH	HCN	Anesthésie et réanimation chirurgicale
Mr Hervé LEFEBVRE	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
Mr Thierry LEQUERRE	HCN	Rhumatologie
Mme Anne-Marie LEROI	HCN	Physiologie
Mr Hervé LEVESQUE	HCN	Médecine interne
Mme Agnès LIARD-ZMUDA	HCN	Chirurgie Infantile
Mr Pierre Yves LITZLER	HCN	Chirurgie cardiaque
M. David MALTETE	HCN	Neurologie
Mr Christophe MARGUET	HCN	Pédiatrie
Mme Isabelle MARIE	HCN	Médecine interne

Mr Jean-Paul MARIE	HCN	Oto-rhino-laryngologie
Mr Loïc MARPEAU	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Stéphane MARRET	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique MERLE	HCN	Epidémiologie
Mr Pierre MICHEL	HCN	Hépatogastro-entérologie
M. Benoit MISSET (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation Médicale
Mr Marc MURAINÉ	HCN	Ophthalmologie
Mr Christian PFISTER	HCN	Urologie
Mr Jean-Christophe PLANTIER	HCN	Bactériologie - Virologie
Mr Didier PLISSONNIER	HCN	Chirurgie vasculaire
Mr Gaëtan PREVOST	HCN	Endocrinologie
Mr Jean-Christophe RICHARD (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
Mr Vincent RICHARD	UFR	Pharmacologie
Mme Nathalie RIVES	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
Mr Horace ROMAN (<i>détachement</i>)	HCN	Gynécologie - Obstétrique
Mr Jean-Christophe SABOURIN	HCN	Anatomie – Pathologie
Mr Mathieu SALAUN	HCN	Pneumologie
Mr Guillaume SAVOYE	HCN	Hépatogastrologie
Mme Céline SAVOYE-COLLET	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale SCHNEIDER	HCN	Pédiatrie
Mr Lilian SCHWARZ	HCN	Chirurgie Viscérale et Digestive
Mr Michel SCOTTE	HCN	Chirurgie digestive
Mme Fabienne TAMION	HCN	Thérapeutique
Mr Luc THIBERVILLE	HCN	Pneumologie
Mr Hervé TILLY (<i>surnombre</i>)	CHB	Hématologie et transfusion
M. Gilles TOURNEL	HCN	Médecine Légale
Mr Olivier TROST	HCN	Anatomie -Chirurgie Maxillo-Faciale
Mr Jean-Jacques TUECH	HCN	Chirurgie digestive
Mr Benoît VEBER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
Mr Pierre VERA	CHB	Biophysique et traitement de l'image
Mr Eric VERIN	Les Herbiers	Médecine Physique et de Réadaptation
Mr Eric VERSPYCK	HCN	Gynécologie obstétrique
Mr Olivier VITTECOQ	HC	Rhumatologie
Mr David WALLON	HCN	Neurologie
Mme Marie-Laure WELTER	HCN	Physiologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Najate ACHAMRAH	HCN	Nutrition
Mme Elodie ALESSANDRI-GRADT	HCN	Virologie
Mme Noëlle BARBIER-FREBOURG	HCN	Bactériologie – Virologie
Mr Emmanuel BESNIER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation
Mme Carole BRASSE LAGNEL	HCN	Biochimie
Mme Valérie BRIDOUX HUYBRECHTS	HCN	Chirurgie Vasculaire
Mr Gérard BUCHONNET	HCN	Hématologie
Mme Mireille CASTANET	HCN	Pédiatrie
Mme Nathalie CHASTAN	HCN	Neurophysiologie
M. Vianney GILARD	HCN	Neurochirurgie
Mr Serge JACQUOT	UFR	Immunologie
Mr Joël LADNER	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
Mr Jean-Baptiste LATOUCHE	UFR	Biologie cellulaire
M. Florent MARGUET	HCN	Histologie
Mme Chloé MELCHIOR	HCN	Gastroentérologie
M. Sébastien MIRANDA	HCN	Chirurgie Vasculaire
Mr Thomas MOUREZ (<i>détachement</i>)	HCN	Virologie
Mr Gaël NICOLAS	UFR	Génétique
Mme Muriel QUILLARD	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
Mme Laëtitia ROLLIN	HCN	Médecine du Travail
Mme Pascale SAUGIER-VEBER	HCN	Génétique
M. Abdellah TEBANI	HCN	Biochimie et Biologie Moléculaire
Mme Anne-Claire TOBENAS-DUJARDIN	HCN	Anatomie
Mr Julien WILS	HCN	Pharmacologie

PROFESSEUR AGREGE OU CERTIFIE

Mr Thierry WABLE	UFR	Communication
Mme Mélanie AUVRAY-HAMEL	UFR	Anglais

ATTACHE TEMPORAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE à MI-TEMPS

Mme Justine SAULNIER	UFR	Biologie
-----------------------------	-----	----------

II - PHARMACIE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mr Jérémy BELLIEN (PU-PH)	Pharmacologie
Mr Thierry BESSON	Chimie Thérapeutique
Mr Jean COSTENTIN (Professeur émérite)	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr Abdelhakim EL OMRI	Pharmacognosie
Mr François ESTOUR	Chimie Organique
Mr Loïc FAVENNEC (PU-PH)	Parasitologie
Mr Jean Pierre GOULLE (Professeur émérite)	Toxicologie
Mme Christelle MONTEIL	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON (PU-PH)	Microbiologie
Mr Rémi VARIN (PU-PH)	Pharmacie clinique
Mr Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et Minérale
Mr Frédéric BOUNOURE	Pharmacie Galénique
Mr Thomas CASTANHEIRO MATIAS	Chimie Organique
Mr Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
Mme Camille CHARBONNIER (LE CLEZIO)	Statistiques
Mme Elizabeth CHOSSON	Botanique
Mme Marie Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation pharmaceutique et économie de la santé
Mme Cécile CORBIERE	Biochimie
Mme Nathalie DOURMAP	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUC	Pharmacologie
Mme Dominique DUTERTE- BOUCHER	Pharmacologie
Mr Gilles GARGALA (MCU-PH)	Parasitologie
Mme Nejla EL GHARBI-HAMZA	Chimie analytique

Mme Marie-Laure GROULT	Botanique
Mr Chervin HASSEL	Biochimie et Biologie Moléculaire
Mme Maryline LECOINTRE	Physiologie
Mme Hong LU	Biologie
Mme Marine MALLETER	Toxicologie
M. Jérémie MARTINET (MCU-PH)	Immunologie
M. Romy RAZAKANDRAINIBÉ	Parasitologie
Mme Tiphaine ROGEZ-FLORENT	Chimie analytique
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Malika SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Christine THARASSE	Chimie thérapeutique
Mr Frédéric ZIEGLER	Biochimie

PROFESSEURS ASSOCIES

Mme Cécile GUERARD-DETUNCQ	Pharmacie officinale
Mme Caroline BERTOUX	Pharmacie

PAU-PH

M. Mikaël **DAOUPHARS**

PROFESSEUR CERTIFIE

Mme Mathilde GUERIN	Anglais
----------------------------	---------

ASSISTANTS HOSPITALO-UNIVERSITAIRES

Mme Alice MOISAN	Virologie
M. Henri GONDÉ	Pharmacie

ATTACHES TEMPORAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

Mme Soukaina GUAOUA-ELJADDI	Informatique
Mme Clémence MEAUSOONE	Toxicologie

ATTACHE TEMPORAIRE D'ENSEIGNEMENT

Mme Ramla SALHI	Pharmacognosie
------------------------	----------------

LISTE DES RESPONSABLES DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et minérale
Mr Thierry BESSON	Chimie thérapeutique
Mr Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
Mme Elisabeth CHOSSON	Botanique
Mme Marie-Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation et économie de la santé
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
Mr Abdelhakim EL OMRI	Pharmacognosie
Mr François ESTOUR	Chimie organique
Mr Loïc FAVENNEC	Parasitologie
Mr Michel GUERBET	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON	Microbiologie
Mr Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mr Rémi VARIN	Pharmacie clinique
M. Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
Mr Philippe VERITE	Chimie analytique

III – MEDECINE GENERALE

PROFESSEUR MEDECINE GENERALE

Mr Jean-Loup **HERMIL** (PU-MG) UFR Médecine générale

MAITRE DE CONFERENCE MEDECINE GENERALE

Mr Matthieu **SCHUERS** (MCU-MG) UFR Médecine générale

PROFESSEURS ASSOCIES A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTE

Mr Pascal **BOULET** UFR Médecine générale

Mr Emmanuel **LEFEBVRE** UFR Médecine Générale

Mme Elisabeth **MAUVIARD** UFR Médecine générale

Mr Philippe **NGUYEN THANH** UFR Médecine générale

Mme Yveline **SEVRIN** UFR Médecine générale

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE A MI-TEMPS – MEDECINS GENERALISTES

Mme Laëtitia **BOURDON** UFR Médecine Générale

Mme Elsa **FAGOT-GRIFFIN** UFR Médecine Générale

Mr Emmanuel **HAZARD** UFR Médecine Générale

Mme Lucile **PELLERIN** UFR Médecine générale

ENSEIGNANTS MONO-APPARTENANTS

PROFESSEURS

Mr Paul MULDER (phar)	Sciences du Médicament
Mme Su RUAN (med)	Génie Informatique

MAITRES DE CONFERENCES

Mr Sahil ADRIOUCH (med)	Biochimie et biologie moléculaire (Unité Inserm 905)
Mme Gaëlle BOUGEARD-DENOYELLE (med)	Biochimie et biologie moléculaire (UMR 1079)
Mme Carine CLEREN (med)	Neurosciences (Néovasc)
M. Sylvain FRAINEAU (med)	Physiologie (Inserm U 1096)
Mme Pascaline GAILDRAT (med)	Génétique moléculaire humaine (UMR 1079)
Mr Nicolas GUEROUT (med)	Chirurgie Expérimentale
Mme Rachel LETELLIER (med)	Physiologie
Mr Antoine OUVRARD-PASCAUD (med)	Physiologie (Unité Inserm 1076)
Mr Frédéric PASQUET	Sciences du langage, orthophonie
Mme Anne-Sophie PEZZINO	Orthophonie
Mme Christine RONDANINO (med)	Physiologie de la reproduction
Mr Youssan Var TAN	Immunologie
Mme Isabelle TOURNIER (med)	Biochimie (UMR 1079)

DIRECTEUR ADMINISTRATIF : M. Jean-Sébastien VALET

HCN - Hôpital Charles Nicolle

HB - Hôpital de BOIS GUILLAUME

CB - Centre Henri Becquerel

CHS - Centre Hospitalier Spécialisé du Rouvray

CRMPR - Centre Régional de Médecine Physique et de Réadaptation

SJ – Saint Julien Rouen

Par délibération en date du 3 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

Table des matières

Liste des abréviations	17
I. Introduction	19
A. Anatomie, segmentation et physiologie cardiaques	19
1. Anatomie et segmentation	19
2. Physiologie de la contraction myocardique du ventricule gauche	22
B. Analyse de la fonction cardiaque.....	25
1. Fraction d'éjection du ventricule gauche	25
a) Echocardiographie trans-thoracique	25
b) Imagerie par résonance magnétique	26
(1) Séquences.....	27
(2) Méthode.....	29
2. Strain	32
a) Généralités	32
b) Echocardiographie.....	34
(1) Doppler tissulaire.....	34
(2) 2D Strain speckle tracking	35
(3) 3D Strain speckle tracking	38
c) Imagerie par résonance magnétique	38
(1) Tagging.....	38
(2) Autres Séquences	40
(3) Tissue Tracking	41
d) Tomodensitométrie	44
e) Récapitulatif des différentes méthodes de mesure	45
f) Quelques applications cliniques	46
II. Article	48
A. Introduction	48
B. Matériel et méthodes	49
1. Type d'étude.....	49
2. Population de l'étude.....	49
a) Critères d'inclusion	49
b) Critères d'exclusion	50
3. IRM	50
4. Logiciel de post-traitement.....	51
5. Recueil de données	51

6.	Analyses statistiques.....	52
C.	Résultats.....	53
1.	Population de l'étude.....	53
2.	Valeurs du strain	55
3.	Corrélation âge - sexe.....	60
4.	Reproductibilité.....	64
D.	Discussion	64
1.	Principaux résultats	64
2.	Comparaison avec la littérature	65
3.	Points forts de l'étude.....	66
4.	Limites	67
E.	Conclusion	67
III.	Bibliographie	68
IV.	Annexes	72

Liste des abréviations

2D : deux dimensions
3D : trois dimensions
4C : Quatre-cavités
CHU : Centre hospitalo-universitaire
DENSE : Displacement encoding with stimulated echoes
ECG : Electrocardiogramme
FEVG : Fraction d'éjection du ventricule gauche
HARP : Harmonic Phase
IRM : Imagerie par résonance magnétique
LAVD : Long axe du ventricule droit
LAVG : Long axe du ventricule gauche
LAX : Long axis
LV2D SA : Left ventricle 2 dimensions small axis
LV2D LA : Left ventricle 2 dimensions long axis
LV3D : Left ventricle 3 dimensions
LVGM : Left ventricle global measurement
Moy : Moyenne
PSC : Peak strain circumferential
PSL : Peak strain longitudinal
PSR : Peak strain radial
RVGM : Right ventricle global measurement
S : Segment
SAX : Small axis
SD : Standard deviation
SENC : Strain encoded
SPAMM : Spatial modulation of magnetisation
SR : Strain rate
SSFP : Steady-state free precession
STE : Speckle tracking echocardiography
TD : Télédiastole
TE : Temps d'écho
TDI : Tissue Doppler imaging
TDM : Tomodensitométrie
TR : Temps de répétition

TS : Télésystole

VD : Ventricule droit

VG : Ventricule gauche

VL : Vitesse longitudinale

VT : Vitesse transversale

VTD : Volume télé-diastolique

VTS : Volume télé-systolique

I. Introduction

L'étude du strain myocardique (ou de la déformation du myocarde) est un outil permettant une analyse précise de la fonction cardiaque. Il peut être utilisé en échocardiographie ou en IRM. Dans la littérature, on ne retrouve que peu d'études traitant des valeurs normales de la déformation cardiaque en IRM. Celles-ci ne sont pas standardisées. L'objectif de notre étude est donc de décrire les valeurs normales du strain myocardique global et segmentaire par tissue tracking et d'étudier leurs variations en fonction de l'âge et du sexe. Nous allons aborder en introduction les notions d'anatomie et de physiologie cardiaques, puis les différentes techniques d'analyse de la fonction cardiaque nécessaires à la compréhension de l'étude.

A. Anatomie, segmentation et physiologie cardiaques

1. Anatomie et segmentation

Le cœur est un organe creux composé de 4 cavités (1) : deux oreillettes et deux ventricules droits et gauches. A droite, l'oreillette est séparée du ventricule par la valve tricuspide. A gauche, ils sont séparés par la valve mitrale. Les deux oreillettes sont séparées par le septum inter-auriculaire et les deux ventricules par le septum inter-ventriculaire (**Figure 1**).

Il a la forme d'une pyramide dont la pointe, appelée apex, se dirige vers le bas, l'avant et la gauche.

Le muscle s'appelle le myocarde. Sa paroi interne est recouverte par l'endocarde, et sa paroi externe par l'épicarde.

L'ensemble est contenu dans un sac fibreux, le péricarde.

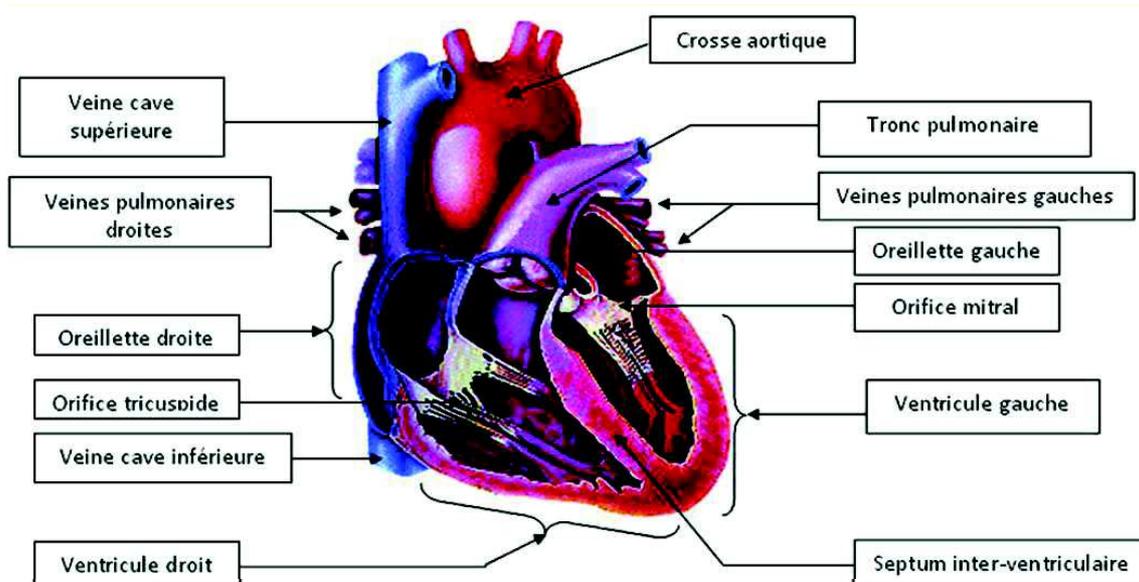


Figure 1 : Anatomie du cœur (1)

On analyse le cœur dans plusieurs plans (2). Le petit axe correspond à une coupe transversale du cœur. Plusieurs coupes sont réalisées généralement en petit axe séparant la base, la partie moyenne et l'apex. Le long axe vertical du ventricule gauche (LAVG) ou du ventricule droit (LAVD) correspondent à des plans perpendiculaires au petit axe d'avant en arrière, de la base à l'apex. Le long axe horizontal ou coupe 4 cavités (4C) est un plan perpendiculaire au petit axe de droite à gauche, de la base à l'apex. (**Figures 2**)

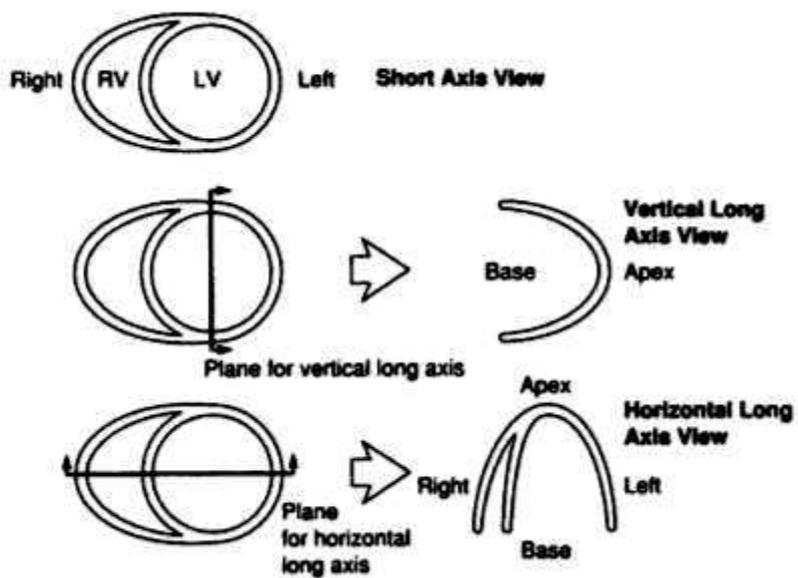


Figure 2a : Plans d'analyse du cœur. (2)

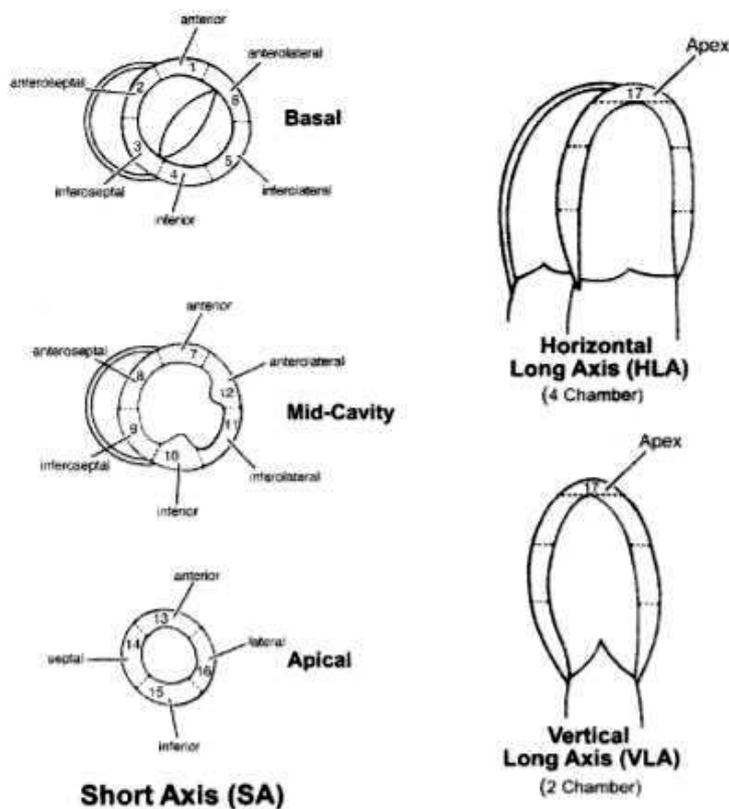


Figure 2b : Plans d'analyse du cœur. (2)

Le ventricule gauche a une segmentation standardisée (2). Elle est représentée par une unique figure nommée « bull's eye » composée de quatre cercles séparant la base, la portion moyenne et l'apex. Ces cercles sont divisés en plusieurs parties en fonction des régions antérieure, septale, inférieure et latérale. On compte au total 17 segments. (**Figure 3**) Il existe un modèle modifié à 16 segments, où l'apex, segment 17, n'est pas comptabilisé.

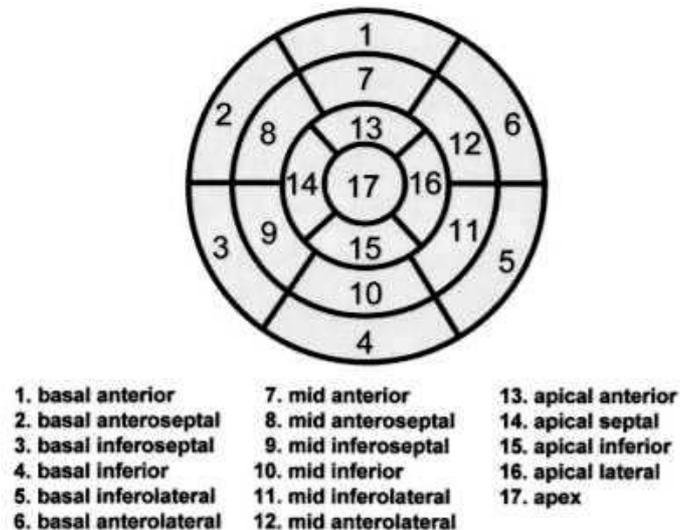


Figure 3 : Segmentation du ventricule gauche (2)

2. Physiologie de la contraction myocardique du ventricule gauche

Le cycle cardiaque est une alternance de systole et de diastole. La diastole correspond en partie au remplissage des ventricules. La systole correspond à la contraction myocardique ventriculaire et à l'éjection du sang dans l'aorte pour le ventricule gauche et dans l'artère pulmonaire pour le ventricule droit.

La contraction du myocarde est due en partie à la répartition des fibres qui le composent. Leur topographie n'est pas clairement décrite. Il existe plusieurs modèles. Selon Torrent-Guasp et al. (3), il y aurait deux hélices de fibres musculaires s'enroulant dans des sens contraires au sein de la paroi du ventricule gauche. Les fibres sous-épicardiques s'orienteraient vers la gauche alors que les fibres sous-endocardiques s'orienteraient vers la droite (**Figure 4**). Au tiers moyen de l'épaisseur du myocarde, les fibres auraient une

orientation plus radiaire ; celles-ci, grâce à leur position, seraient initialement préservées du stress pariétal et pourraient expliquer les insuffisances cardiaques à fraction d'éjection ventriculaire conservée.(4)

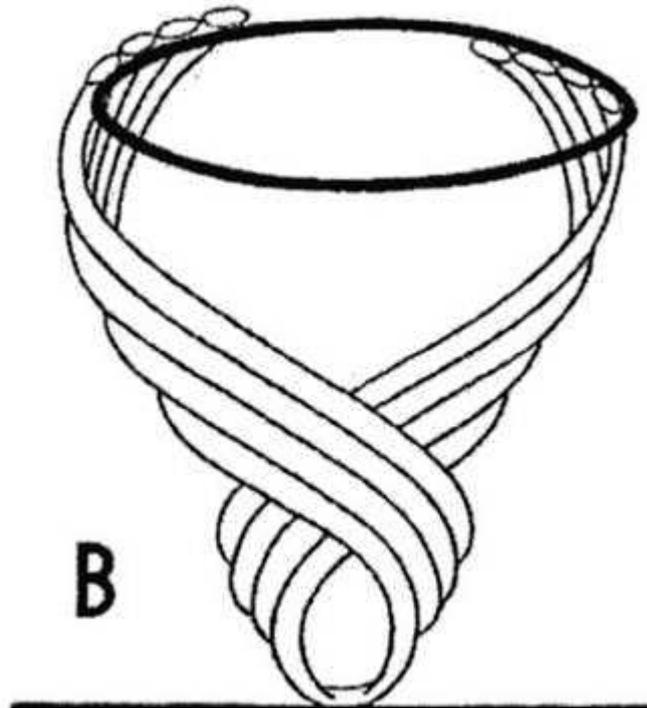


Figure 4 : Représentation de la répartition des fibres myocardiques du ventricule gauche selon Torrent-Guasp (3)

La déformation du ventricule gauche au cours de la systole est complexe. Elle peut être simplifiée de la manière suivante (**Figure 5**):

- Epaississement pariétal radial
- Raccourcissement pariétal circonférentiel
- Raccourcissement pariétal longitudinal
- Torsion

Nous la détaillerons plus dans le chapitre Strain.

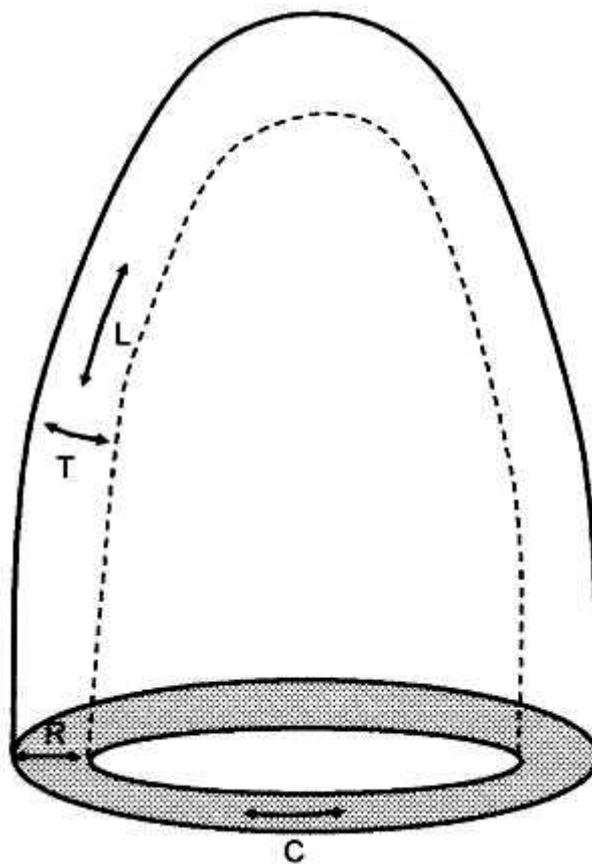


Figure 5 : Déformation du ventricule gauche (5) L : déformation longitudinale, R : déformation radiale, C : déformation circonférentielle, T : Torsion

B. Analyse de la fonction cardiaque

1. Fraction d'éjection du ventricule gauche

La Fraction d'éjection du ventricule gauche (FEVG) correspond au volume télédiastolique du ventricule gauche (VTD) moins le volume télésystolique du ventricule gauche (VTS) divisée par le VTD (6). Elle est considérée comme normale lorsqu'elle est supérieure à 55%.

$$FEVG = (VTD - VTS) / (VTD)$$

Cette mesure est réalisée en pratique courante, et est un point clé pour la prise en charge des pathologies cardio-vasculaires, notamment des insuffisances cardiaques. (7)

Le gold standard est l'IRM, mais elle est plus fréquemment évaluée en échocardiographie compte tenu de la disponibilité et de la facilité d'exécution.

a) Echocardiographie trans-thoracique

La méthode bidimensionnelle biplan ou règle de Simpson modifiée est la référence.(8) On réalise des coupes 4 cavités et 2 cavités en télédiastole et en télésystole. On trace manuellement le contour endocardique du ventricule gauche sur les quatre images, en incluant les piliers ainsi que l'ensemble des trabéculations. On obtient les dimensions du ventricule dans deux plans et le logiciel de l'appareil d'échocardiographie peut calculer les volumes télédiastolique, télésystolique et par la formule sus-citée, la FEVG (**Figure 6**). Cette mesure sur des images figées doit être confrontée et cohérente avec l'analyse visuelle.

Si les parois ventriculaires sont mal visualisées, un produit de contraste (Sonovue, en France (9)) peut être injecté par voie intra-veineuse. Cela implique la pose d'une perfusion et du temps supplémentaire. Il est de ce fait rarement utilisé.

Il existe également des sondes permettant une analyse tridimensionnelle du cœur, mais elles présentent encore des résolutions spatiale et temporelle inférieures aux sondes 2D (6)(10).

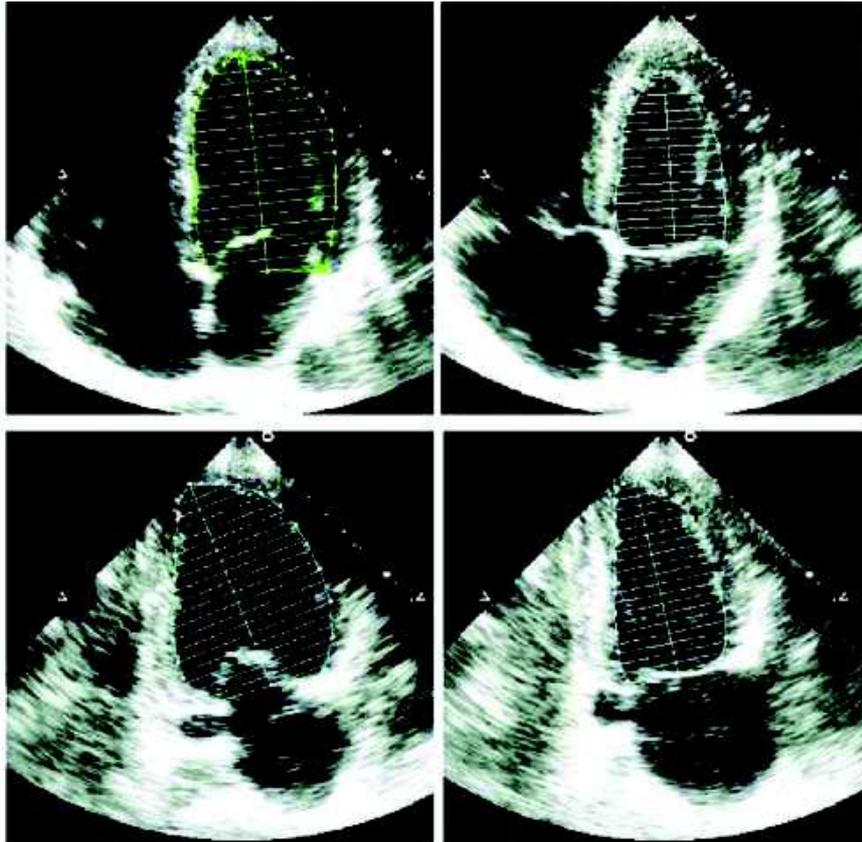


Figure 6 : Evaluation de la FEVG selon la méthode de Simpson modifiée (8)

b) Imagerie par résonance magnétique

L'IRM est la méthode de référence pour l'évaluation de la FEVG en raison de son approche tridimensionnelle, d'une meilleure résolution spatiale et d'une meilleure reproductibilité (11).

(1) Séquences

Les séquences utilisées pour mesurer la FEVG sont des séquences Ciné qui permettent une étude dynamique du cœur au cours des différentes phases de son cycle.

(12)

Elles nécessitent une synchronisation cardiaque pour s'affranchir des artéfacts liés aux mouvements cardiaques ainsi qu'au flux sanguin. La synchronisation peut être prospective ou rétrospective. Un ECG est réalisé simultanément. Pour la synchronisation prospective, c'est l'onde R du complexe QRS qui va déclencher l'acquisition. Ces dernières seront réalisées à chaque fois au même moment du cycle. Pour la synchronisation rétrospective, l'acquisition est continue, et rétrospectivement les images sont associées à la bonne phase du cycle en fonction de l'ECG. Les séquences ciné utilisent toutes les phases, c'est donc une synchronisation rétrospective qui est utilisée.

Les séquences ciné sont des séquences en écho de gradient à l'état d'équilibre avec gradients équilibrés. Elles présentent un bon rapport signal/bruit et un bon contraste permettant de différencier correctement la graisse (en hypersignal), le myocarde (en isosignal) et le sang (en hypersignal).

Les plans de coupes utilisés sont ceux décrits dans le chapitre I.A.1 (**Figures 7**) :

- 4 cavités
- Long axe ventricule gauche (LAVG)
- Petit axe

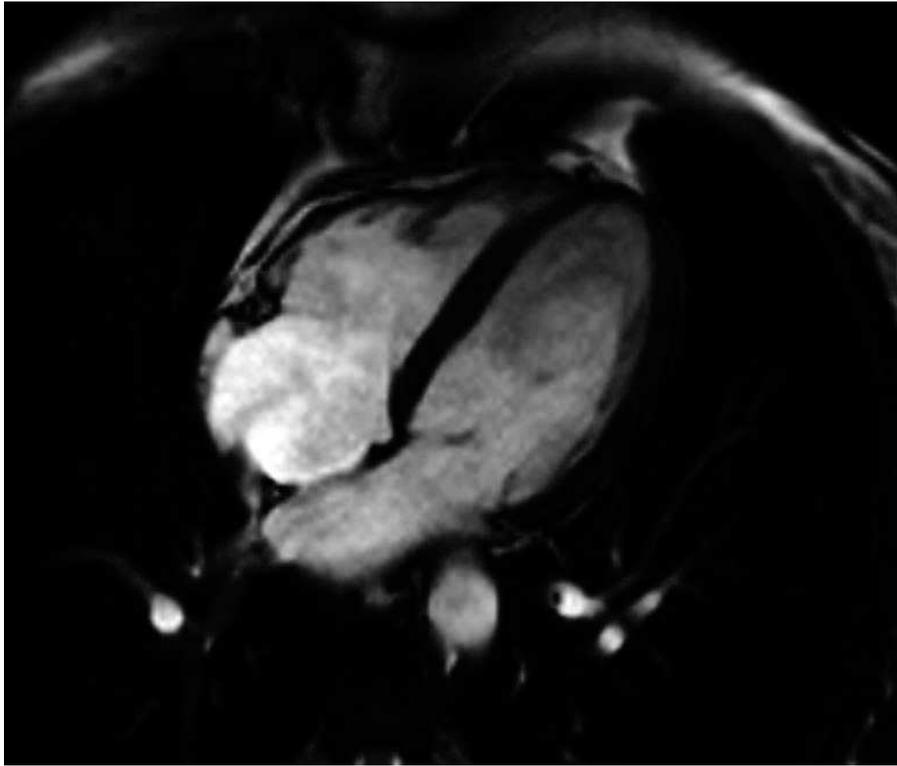


Figure 7a : séquence IRM ciné, coupe 4 cavités

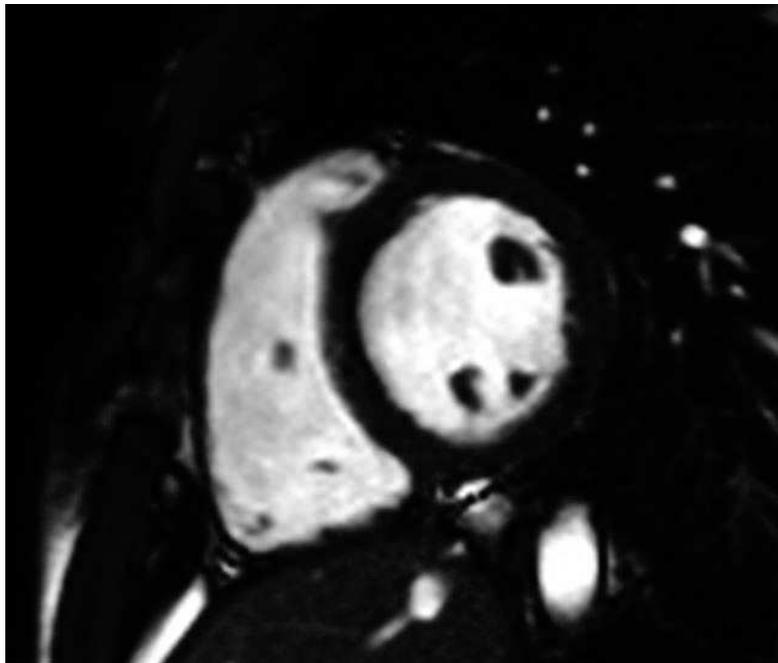


Figure 7b : séquence IRM ciné, coupe petit axe VG



Figure 7c : Séquence IRM ciné, coupe LAVG

(2) Méthode

Pour mesurer la FEVG, on utilise des logiciels de post traitement. Pour commencer, la télédiastole et la télésystole sont définies. Le plancher mitral est repéré sur la coupe 4 cavités et le LAVG. L'apex et la base sont également repérés. Sur les coupes petits axes, le myocarde est délimité, manuellement ou par le logiciel, par les contours endocardiques et épicaudiques respectivement en rouge et vert. Le logiciel, grâce à ces prérequis, peut calculer les volumes télédiastolique, télésystolique et la FEVG. La principale solution de post-traitement d'imagerie cardiaque utilisée au CHU de Rouen est syngo.via. (Siemens healthineers, Erlangen, Germany) (**Figures 8**)

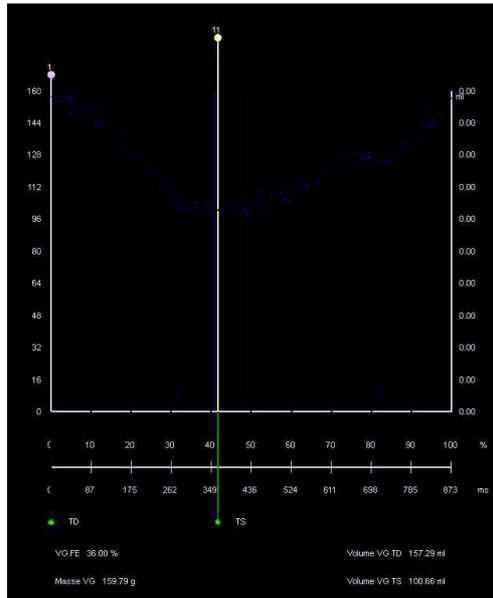


Figure 8a : Repérage de la télésystole TS et de la télédiastole TD

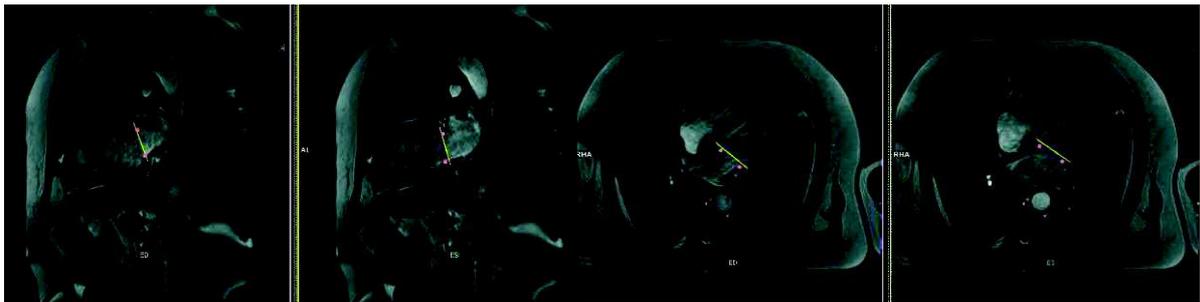


Figure 8b : Repérage du plan mitral de gauche à droite en TD, TS sur les coupes LAVG et 4 Cavités

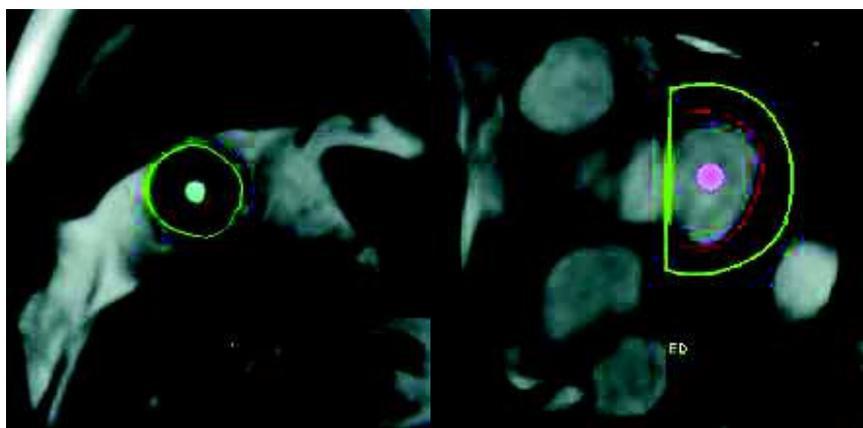


Figure 8c : Apex (gauche) et base (droite) du ventricule gauche

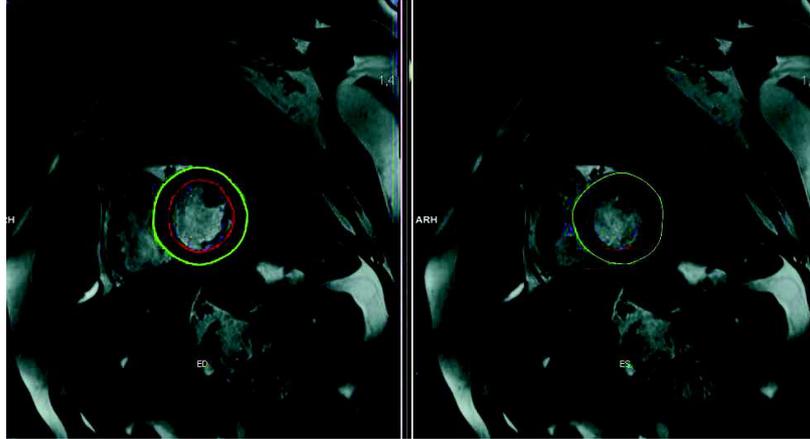


Figure 8d : Contouring du ventricule gauche en télédiastole (gauche) et télésystole (droite)

2. Strain

Comme mentionné précédemment, il existe des insuffisances cardiaques à FEVG préservée. Aussi, en amont de l'altération de la fonction myocardique, il peut y avoir des modifications de la contractilité du ventricule. (13) Ces anomalies précoces pourraient être dépistées par l'analyse de la déformation myocardique. (14) Une méta-analyse de Kalam et al. démontre que la valeur pronostique du strain est plus importante que la FEVG dans de nombreux événements cardiaques. (15)

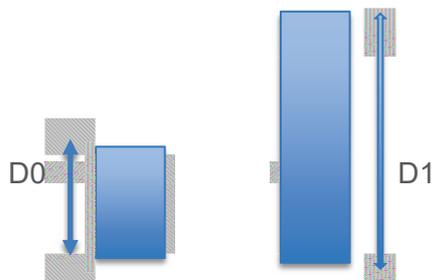
a) Généralités

Le mot « strain » est traduit en français par « déformation ». C'est un paramètre qui n'a pas d'unité physique, qui analyse la déformation d'un objet au cours du temps comparativement à sa forme initiale. Il s'exprime en pourcentage (16).

$$\text{Strain} = (D1 - D0) / D0$$

D0 = distance initiale

D1 = distance après mouvement



Nous avons vu précédemment les composantes principales de la déformation myocardique (17) (**Figure 9**) (18) :

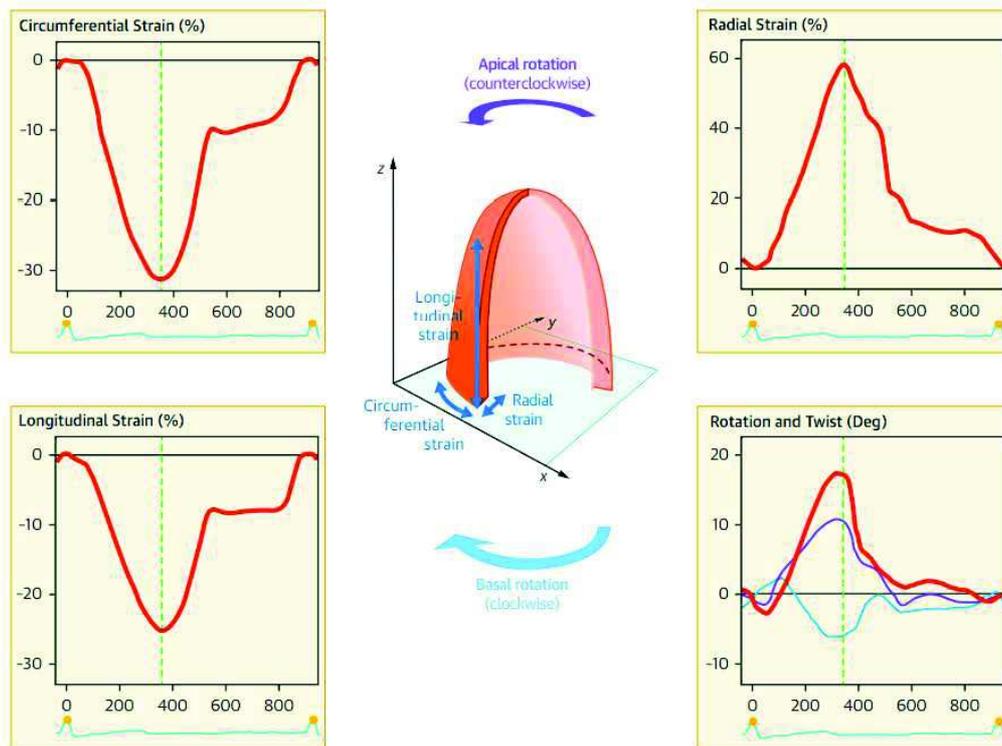


Figure 9 : Représentation de la déformation myocardique en systole (18)

- Déformation radiale = Déformation du myocarde vers le centre du ventricule : épaisseur pariétal au cours de la systole, s'exprime en % positif
- Déformation longitudinale = Raccourcissement de l'apex à la base au cours de la systole, s'exprime en % négatif
- Déformation circonférentielle = Diminution du périmètre myocardique au cours de la systole, s'exprime en % négatif.
- Torsion : Il existe par ailleurs un phénomène de torsion du ventricule gauche de la base par rapport à l'apex. Au début de la systole la base et l'apex effectuent un mouvement de rotation dans le sens anti-horaire puis en milieu de systole, la base inverse son mouvement dans le sens horaire des aiguilles d'une montre alors que l'apex poursuit sa déformation initiale. Sa mesure est plus complexe et peut-être dérivée de la soustraction de la rotation de la base à celle de l'apex (19).

Différentes mesures peuvent être réalisées :

- Peak strain (%) : Déformation maximale $(D1 - D0) / D0$
- Time to peak strain (ms) : Temps auquel est obtenue la déformation maximale
- Peak systolic strain rate (1/s) : Peak strain / Time to peak strain systolic
- Peak displacement (mm) : Déformation maximale
- Peak systolic velocity (mm/s) : Peak displacement / Time to peak strain systolic

Ces mesures peuvent être appliquées aux différentes déformations radiale, longitudinale ou circonférentielle.

On peut analyser la déformation globale du ventricule ou bien pour chaque segment.

L'analyse du strain s'est développée initialement en échographie puis plus récemment en IRM. On peut la réaliser plus anecdotiquement en scanner.

b) Echocardiographie

(1) Doppler tissulaire

Le strain était initialement mesuré en écho-doppler tissulaire (TDI « Tissue Doppler Imaging).

Son principe est de mesurer la vitesse de déplacement de la paroi myocardique au niveau d'une région d'intérêt sélectionnée (20) (21). Cette mesure est représentée par le strain rate (SR) (22) (**Figure 10**). Le strain est alors calculé par la formule suivante : Strain = SR x Temps du déplacement.

Bien qu'il dispose d'une excellente résolution temporelle. Son utilisation est limitée compte tenu des inconvénients du doppler notamment de la dépendance des mesures à l'angle du

faisceau des ultrasons (23) ne permettant pas d'évaluer l'ensemble de la paroi ventriculaire, et diminuant la reproductibilité.

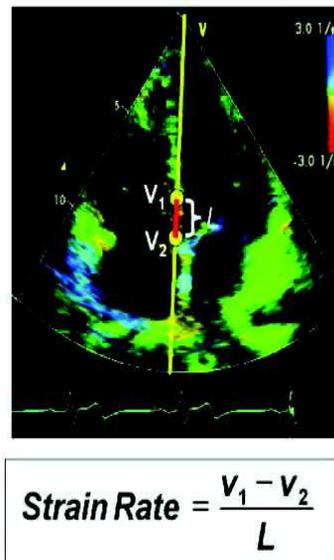


Figure 10 : Mesure du strain en doppler tissulaire. V = vitesse, L = longueur (20)

(2) 2D Strain speckle tracking

Le 2D Strain speckle tracking est une technique plus récente, indépendante du faisceau ultrasonore. (24), (25), (26), (27) (**Figure 11**). Les propriétés acoustiques du myocarde lui confèrent un aspect tacheté (« speckle ») avec une alternance de points lumineux et de points plus sombres. Ces « speckles » ne correspondent pas à la structure tissulaire propre de la paroi musculaire, mais leurs déplacements peuvent être suivis et ainsi on peut apprécier la déformation du myocarde. (28) Un inconvénient reste l'artéfact d'anisotropie altérant le suivi des speckles (18). Les logiciels de post-traitement peuvent s'en affranchir, en homogénéisant l'image. Il sera important de corrélérer les résultats aux images natives afin de ne pas méconnaître une petite zone pathologique « lissée » par une reconstruction inappropriée.

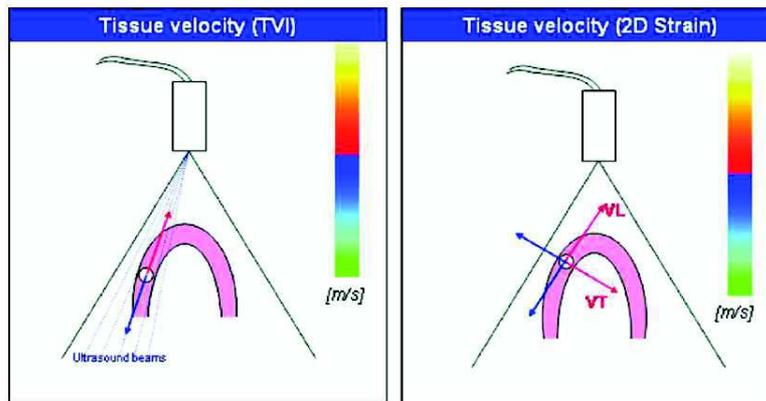


Figure 11 : Indépendance de la mesure du strain en speckle tracking des faisceaux ultrasonores contrairement au doppler tissulaire (24). En doppler tissulaire la mesure de la vitesse se fait dans le plan des ultrasons. En speckle tracking, les mesures des vitesses transversale (VT) et longitudinale (VL) se font dans le plan de la contraction du myocarde.

Trois acquisitions doivent être réalisées : 4 cavités, 3 cavités et 2 cavités. L'apex et la base du ventricule doivent être définis, et en fonction du logiciel, le contourage de l'endocarde est fait manuellement ou automatiquement. Le contourage de l'épicarde est lui fait automatiquement. Une fois les boucles d'images enregistrées, le logiciel peut calculer les multiples mesures de strain précédemment décrites en fonction des déformations du myocarde au cours du cycle cardiaque grâce à une technique reposant sur les principes du flux optique (29). Les mesures peuvent concerner chaque segment, elles sont alors représentées sous la forme de « bull's eye »; ou elles peuvent être globales. (**Figure 12**).

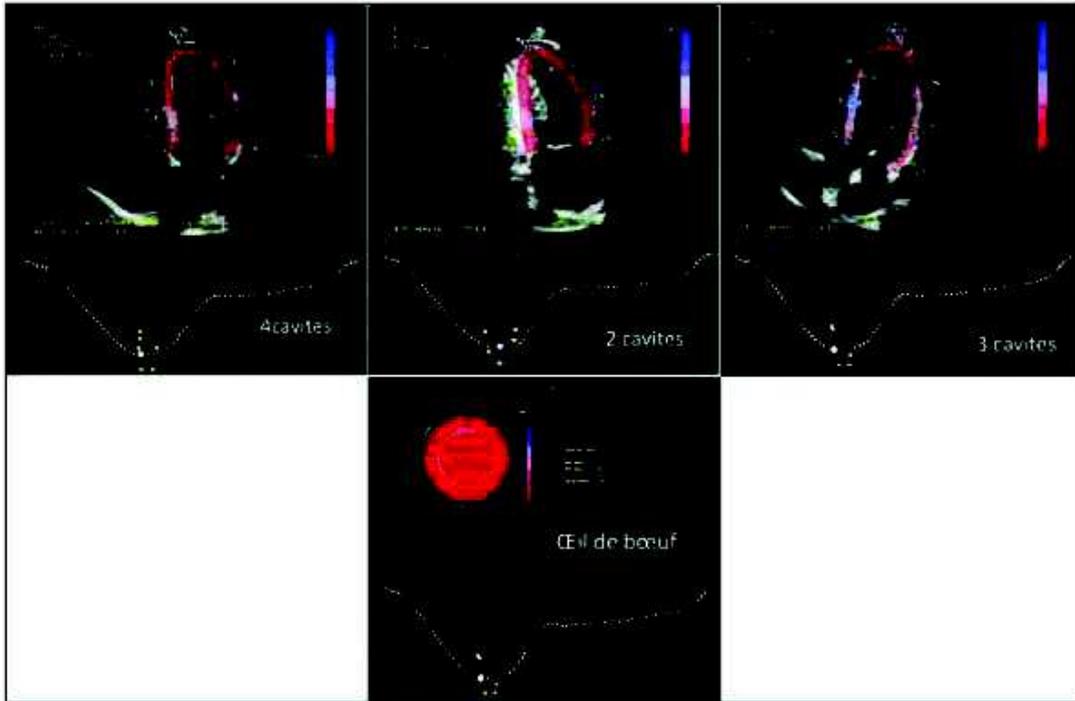


Figure 12 : Représentation du 2D Strain speckle tracking (4)

Les mesures normales du strain global en échocardiographie sont les suivantes (4)
(Figure 13) :

	Contrôles
Vue Apicale	
Longitudinal %	-21,5 ± 2,0
Transverse %	29 ± 15,0
Petit axe	
Circonférentiel %	-20,3 ± 3,6
Radial %	38 ± 17,2

Figure 13 : Valeurs normales du strain global en échocardiographie (4)

(3) 3D Strain speckle tracking

Comme pour la FEVG, une méthode d'exploration échographique du strain en 3 dimensions s'est développée sur le même principe, le speckle tracking. Mais des résolutions spatiale et temporelle insuffisantes ont empêché son développement. De plus, des variations importantes de résultats en fonction des différents logiciels ont été rapportées. (30) (31)

c) Imagerie par résonance magnétique

(1) Tagging

Le strain est mesuré de manière plus récente en IRM. Initialement des séquences de tagging étaient utilisées. (32), (33), (34), (35). Des séquences SPAMM : Spatial modulation of magnetisation, sont réalisées, sur lesquelles des grilles de saturation en hyposignal sont appliquées en fin de diastole en fonction du tracé ECG. (**Figure 14**) (32), (**Figure 15**) (36). La magnétisation étant une caractéristique des tissus, ces lignes vont se déplacer de manière identique au myocarde. Une première analyse visuelle du mouvement de ces lignes peut donner une information subjective des anomalies pariétales myocardiques. On peut également quantifier leurs déformations grâce à des logiciels de post-traitement permettant d'obtenir les mesures du strain myocardique. Plusieurs méthodes de post-traitement ont été créées. Certaines détectent directement les lignes en hyposignal et les suivent au cours du temps quel que soit leur signal, d'autres se basent sur le suivi du signal des pixels de la grille en cherchant sur l'image suivante un pixel de signal similaire. La technique HARP (Harmonic phase) reprend ce procédé et était la méthode la plus utilisée compte tenu de son caractère quasiment automatique (37). Ces lignes en hyposignal s'estompent au cours du cycle en fonction de la relaxation T1 de la paroi myocardique (600-700 ms à 1,5 Tesla et environ 1000 ms à 3 Tesla). La relaxation T1 du myocarde est aussi moindre après injection de gadolinium. Le tagging est donc de meilleure qualité sur des IRM 3T sans injection. Ces séquences supplémentaires souffrent toutefois d'un manque de résolution spatiale, limitée par l'ajout des nombreuses lignes en hyposignal.

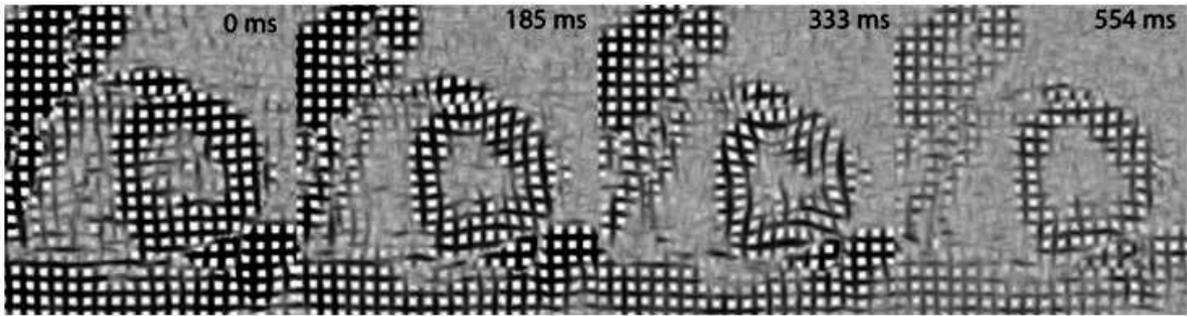


Figure 14 : Séquence IRM de Tagging avec déformation des lignes de saturation au cours du cycle cardiaque.

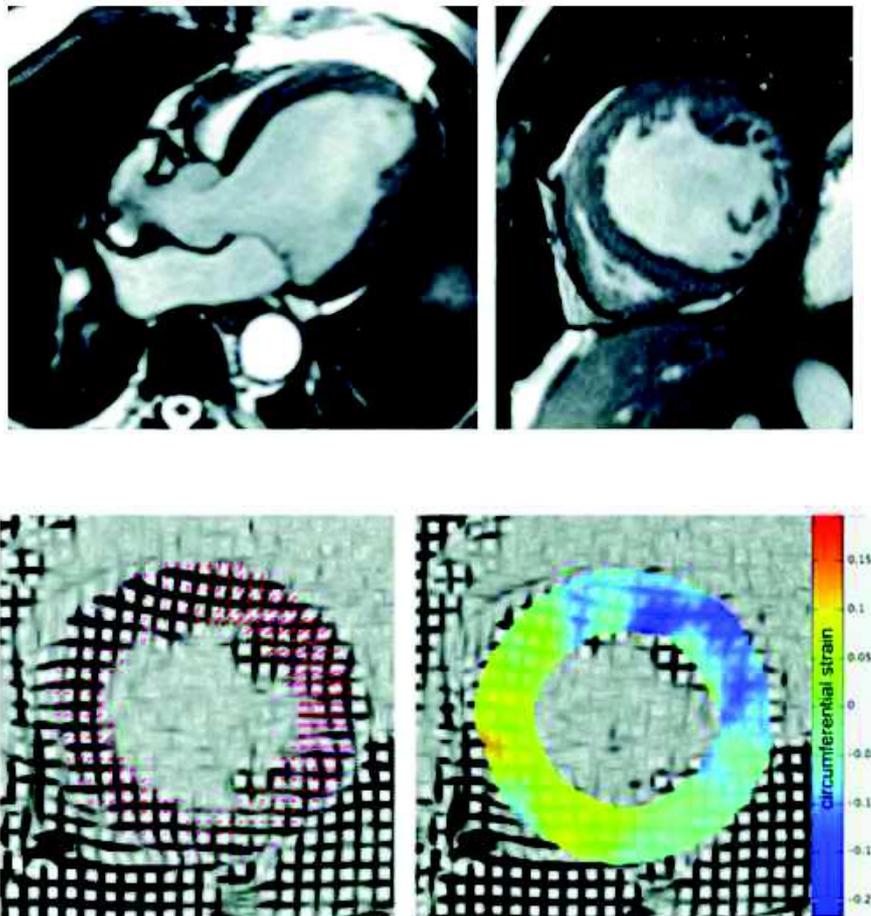


Figure 15 : Exemple d'insuffisance cardiaque sur cardiomyopathie dilatée chez un patient de 66 ans à coronaires normales. Les séquences Ciné (Haut) montrent la dilatation ventriculaire. Les séquences de tagging (Bas) montrent une altération du strain circonférentiel en région septale.

(2) Autres Séquences

D'autres séquences ont émergées, mais peu d'études les concernant ont été effectuées. Elles ont donc été peu utilisées et vite remplacées. Nous allons les décrire brièvement.

La séquence DENSE (Displacement encoding with stimulated echoes) comportent des impulsions répétées de radiofréquence dans deux plans orthogonaux permettant de définir le déplacement bidimensionnel de chaque pixel. Cette séquence est courte et peut être acquise avec une durée raisonnable d'apnée, mais elle présente un mauvais rapport signal/bruit. (38) (39).

La séquence SENC (Strain Endoded) permet également la quantification de la déformation des tissus. Elle utilise des bandes de magnétisation parallèles au plan de l'image (contrairement au tagging où elles sont orthogonales) associées à un gradient de codage de phase hors plan le long de la direction sélectionnée. Le strain circonférentiel est calculé grâce aux coupes 2 et 4 cavités et le strain longitudinal grâce aux coupes dans le petit axe. Le strain radial ne peut pas être calculé. La mesure du signal est liée à l'intensité du pixel. Les bandes de magnétisation sont dépendantes également de la relaxation T1, la déformation du myocarde ne peut donc être étudiée tout au long du cycle (**Figure 16**). (40)

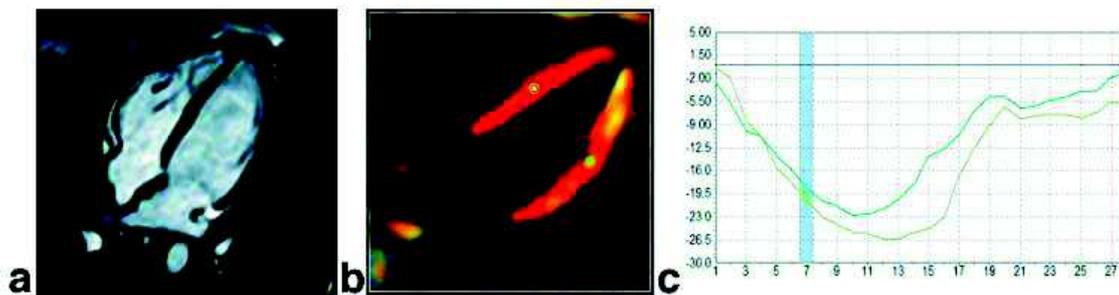


Figure 16 : a. séquence Ciné coupe 4 cavités, b. Séquence SENC avec contraction maximale représentée en rouge, c. évolution du strain circonférentiel au cours du temps

(3) Tissue Tracking

Plus récemment des logiciels de mesure du strain myocardique sur des séquences ciné standards se sont développés, permettant alors de s'affranchir de la réalisation de séquences supplémentaires (25), (41). En plus d'un gain de temps, les calculs du strain peuvent aussi bien être réalisés de manière rétrospective sur des examens de patients pour lesquels la mesure de la déformation du coeur n'était pas recherchée initialement; les séquences Ciné étant réalisées sur chaque IRM cardiaque. Les plans standards sont utilisés : 4 cavités, LAVG et petit axe du ventricule gauche. Ils utilisent pour la plupart la méthode du flux optique (29) comme le 2D speckle tracking en échographie et comme la technique HARP pour le tagging mais directement sur les séquences Ciné. C'est-à-dire qu'un pixel est détecté et que sur l'image suivante, le logiciel cherche dans la zone du pixel défini le pixel ayant le signal le plus proche. Après avoir défini les contours myocardiques, la déformation du myocarde peut être suivie au cours du temps. (42). Les artéfacts de mouvement sont le principal inconvénient. Bien que le strain soit calculé sur des séquences 2D, des calculs peuvent être réalisés par le logiciel permettant d'avoir une vision 3D du mouvement de la paroi myocardique, atténuant en partie l'impact des artéfacts de mouvement.

Le post traitement est très semblable à celui permettant de mesurer la FEVG. La solution utilisée pour ce travail est CVI42 de la société Circle cardiovascular imaging, Calgary, Canada.

Pour commencer, le plan mitral est initialement repéré sur les coupes 4 cavités et LAVG. L'endocarde et l'épicarde du ventricule gauche sont délimités de manière semi-automatique (endocarde en rouge et épicarde en vert). Il peut être fait de même sur le ventricule droit (endocarde en jaune et épicarde en bleu) après avoir repéré le plan de la valve tricuspide. La base du ventricule gauche est ensuite mise au centre. Enfin, les points d'insertion du ventricule droit sont marqués. Le temps moyen du post-traitement est d'environ 20 minutes. Une fois réalisé, les mesures de strain sont générées automatiquement par le logiciel. Il existe plusieurs mode d'affichage : bull's eye, courbes, tableaux. (**Figures 17**)

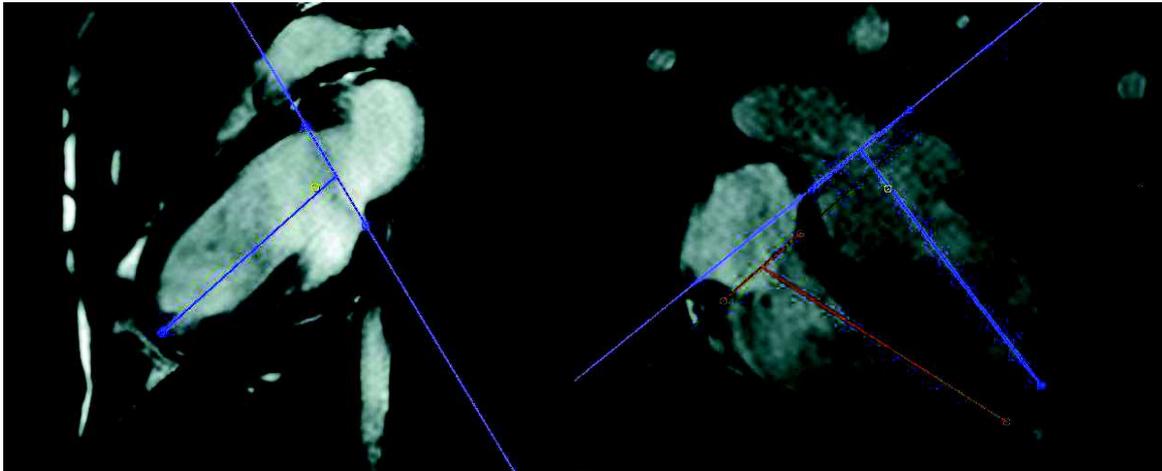


Figure 17a : Repérage des plans mitral et tricuspide sur les coupes LAVG (gauche) et 4 cavités (droite)

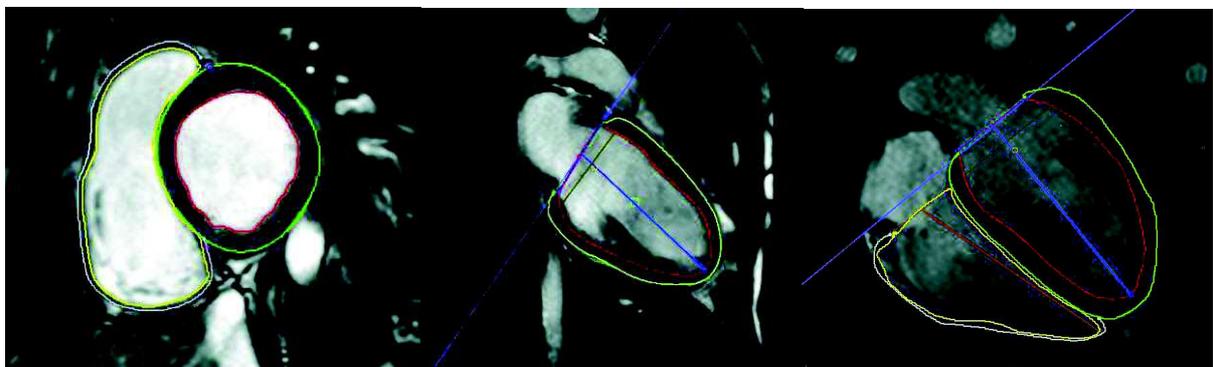


Figure 17b : Délimitation de l'endocarde (rouge pour le VG et jaune pour le VD) et de l'épicarde (vert pour le VG et bleu pour le VD)

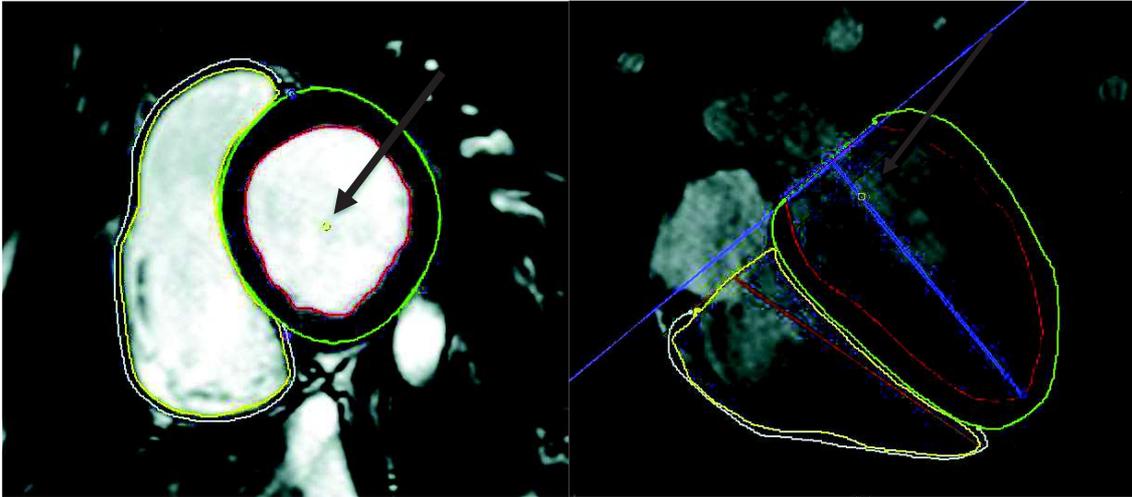


Figure 17c : Repérage de la base (flèche noire) sur les coupes petit axe (gauche) et 4 cavités (droite)

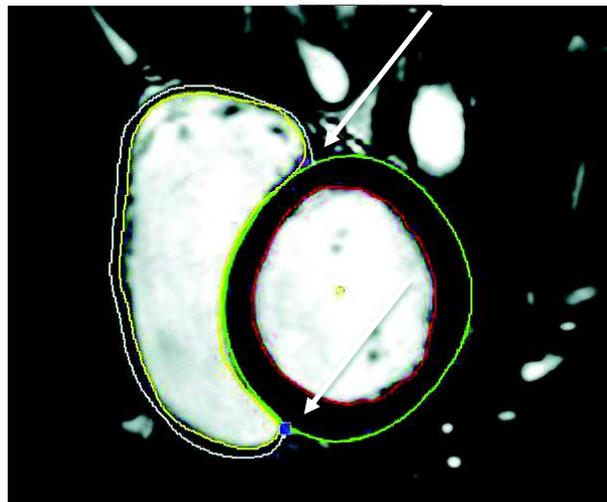


Figure 17d : points d'insertion du ventricule droit (flèches blanches)

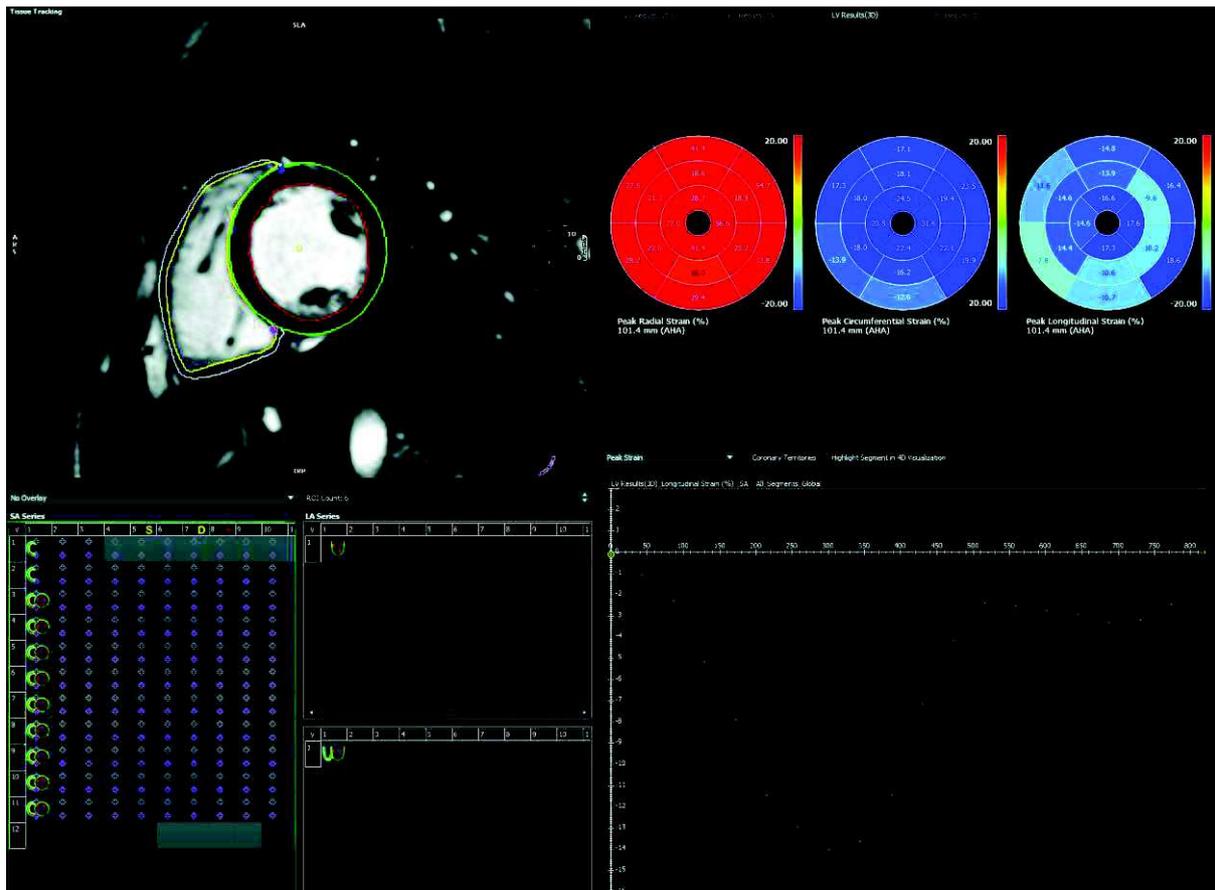


Figure 17e : Affichage du logiciel après résultats des mesures. En haut à droite : bull's eye, en bas à droite : courbe de peak strain au cours du temps

d) Tomodensitométrie

Plus accessoirement, la mesure du strain myocardique peut être réalisée en scanner. Une alternative à envisager si le patient est peu échogène ou en cas de contre-indication à l'IRM. Buss et al. montre une non infériorité du scanner comparativement à l'échographie pour l'analyse de la déformation cardiaque, l'exploration d'un nombre supérieur de segments et un temps de post-traitement inférieur avec le scanner. (43)

e) Récapitulatif des différentes méthodes de mesure

Modalité	Type	Fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Echographie	TDI	Mesure des gradients de vitesse myocardique	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution temporelle • Rapidité des résultats sans algorithme complexe 	<ul style="list-style-type: none"> • Strain régional uniquement • Dépend angle des ultrasons • Opérateur dépendant
Echographie	2D – STE	Flux optique	<ul style="list-style-type: none"> • Strain global et régional • Résolution temporelle • Indépendant de l'angle des ultrasons 	<ul style="list-style-type: none"> • Anisotropie • Opérateur dépendant
Echographie	3D - STE	Flux optique	<ul style="list-style-type: none"> • 3 dimensions 	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution spatiale et temporelle • Variabilité inter-vendeurs
IRM	Tagging	Suivi de bandes de saturation en hyposignal	<ul style="list-style-type: none"> • Reproductibilité • Nombreuses études 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible résolution spatiale et temporelle • Post-traitement long • Acquisition supplémentaire longue
IRM	DENSE	Impulsions répétées d'ondes magnétiques dans deux plans orthogonaux	<ul style="list-style-type: none"> • Acquisition courte 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible rapport signal /bruit • Peu d'études
IRM	SENC	Bandes de magnétisation parallèles au plan de l'image et codage de phase hors plan	<ul style="list-style-type: none"> • Post traitement court 	<ul style="list-style-type: none"> • Strain radial non mesurable • Peu d'études

IRM	Tissue Tracking	Flux optique	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution spatiale • Pas de séquence supplémentaire • Post traitement rétrospectif 	<ul style="list-style-type: none"> • Limité par les artéfacts de mouvements et la taille du pixel • Non standardisé
TDM	Feature Tracking	Flux optique	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne représentation en 3 dimensions 	<ul style="list-style-type: none"> • Irradiation • Peu étudié

f) Quelques applications cliniques

Le strain myocardique par tissue tracking a été étudié dans l'infarctus du myocarde. Il semble plus performant que le tagging. (44) Buss et al. a lui démontré dans son étude une corrélation de la mesure du strain circonférentiel par tissue tracking avec la récupération de la fonction myocardique à 6 mois d'un infarctus. La valeur seuil du strain circonférentiel était de $-19,3\%$. (45) (Figure 18).

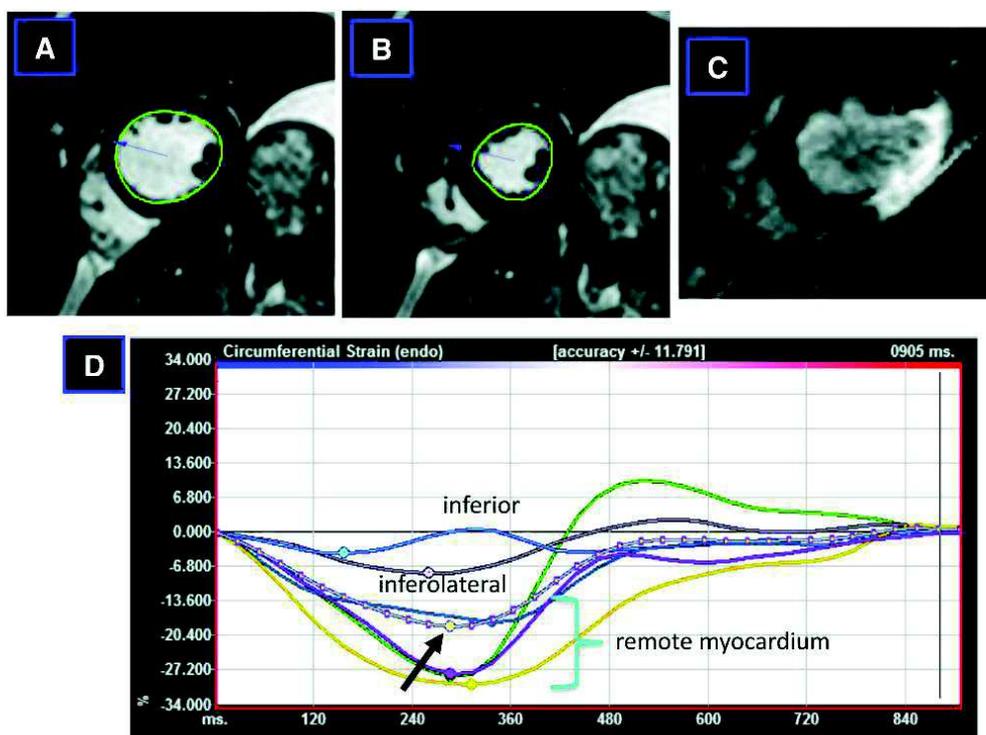


Figure 18 : Infarctus avec hypokinésie de la paroi inféro-latérale. C : Infarctus transmural sur la séquence de réhaussement tardif. D : Diminution de la déformation circonférentielle dans les régions inférieure et inféro-latérale. Flèche noire : strain circonférentiel global.

Bogarapu et al. a étudié la déformation myocardique dans une population pédiatrique de cardiomyopathie hypertrophique, où les valeurs du strain longitudinal, radial et circonférentiel étaient réduites en zone de fibrose et plus particulièrement le strain longitudinal avec une valeur seuil de -12,8 %. (46)

La diminution du strain circonférentiel et du strain longitudinal du ventricule gauche et l'amélioration à contrario de la déformation circonférentielle basale du ventricule droit seraient des signes précoces de myocardite. (47) (48)

L'altération du strain du ventricule gauche serait un marqueur précoce de chimiotoxicité cardiaque, bien avant l'altération de la fraction d'éjection ventriculaire. (49)

En cas de sténose aortique sévère, il a été retrouvé une altération du strain cardiaque du ventricule gauche comparativement à des patients sains, quel que soit le degré des symptômes. (50)

nombre d'examens. Les acquisitions réalisées étaient de bonne qualité et 92% des valeurs ont pu être analysées.

2. Comparaison avec la littérature

Les valeurs de strain du ventricule gauche sont en adéquation avec la littérature. L'étude de Taylor et al. (52) retrouve des moyennes de peak strain radial global du ventricule gauche de $39,8 \pm 2,3$ % versus $36,3 \pm 9,1$ % dans notre étude, de peak strain circonférentiel de $18,4 \pm 2,9$ versus $-18 \pm 2,9$ % et de peak strain longitudinal de $-19,1 \pm 4,1$ versus $-13,9 \pm 2,8$ %.

Nos valeurs de strain du ventricule droit sont cohérentes avec celles retrouvées dans d'autres études également. Dans l'étude de Truong et al. (53), le peak strain longitudinal était de $-22.11 \pm 3.51\%$ et le peak strain circonférentiel de $-11.69 \pm 2.25\%$ versus $-24,5 \pm 5,9$ % et $-13,3 \pm 3,8$ % dans notre étude. Le peak strain radial n'a pas été calculé. En effet dans notre étude, les valeurs des déformations radiales sont incohérentes : en long axe elle est estimée à 62 ± 26 %, et en petit axe à $22,2 \pm 8,2$ %. Ceci peut-être expliqué par l'absence de séquences LAVD, par une séquence en petit axe centrée sur le ventricule gauche, et par l'épaisseur bien plus fine de la paroi ventriculaire droite comparativement au ventricule gauche. La délimitation entre l'endocarde et l'épicarde est bien moins aisée compte tenu de l'épaisseur millimétrique de la paroi.

Comme dans notre étude André et al. a démontré une différence significative entre les valeurs du strain en faveur des femmes comparativement aux hommes, dans une cohorte de 150 volontaires sains (54). Lawton et al., en utilisant le tagging retrouve les même variations (55). Le sexe féminin est connu pour être un facteur protecteur de maladie cardiovasculaire (56). Les femmes seraient protégées par les œstrogènes jusqu'à la ménopause. On peut penser que la déformation myocardique s'altérerait chez les femmes au-delà de la ménopause, après 50-55 ans. Toutefois dans notre étude, dans le dernier groupe d'âge supérieur à 60 ans, les valeurs du strain sont encore différentes, et toujours en faveur des femmes. L'imprégnation hormonale n'est donc probablement pas le seul paramètre permettant d'expliquer cette différence.

Dans notre étude, seule une diminution de la déformation longitudinale dans le long axe, chez tous les patients et chez les hommes, est corrélée significativement à l'âge. Dans la littérature, la corrélation avec l'âge n'est pas certaine et les résultats diffèrent selon les études. Dans l'étude de Mangion et al. (57) utilisant des séquences DENSE, les mesures du strain circonférentiel et longitudinal sont corrélées à l'âge uniquement sur les acquisitions à 3 Tesla. Les résultats des examens réalisés sur une IRM 1,5 Tesla ne sont pas significatifs. Taylor et al., a lui démontré une corrélation uniquement du strain circonférentiel avec l'âge, en utilisant le tissue tracking (52).

Certaines études ont démontré une meilleure reproductibilité intra et inter-observateurs avec le tagging qu'avec le tissue tracking. (58) La reproductibilité des mesures est toutefois excellente dans notre étude comme dans l'étude de Taylor et al. (52). La suppression de séquences supplémentaires efface ce désavantage. Morton et al. a démontré, en réalisant successivement 3 IRM chez les mêmes patients, que la reproductibilité des mesures en fonction des examens pouvait être variable avec des coefficients de variation allant de 30% pour les mesures du strain global et jusqu'à 60% pour les mesures par segments (59). Une standardisation et une précision des modalités d'acquisition des séquences IRM semblent nécessaires afin d'avoir une généralisation des mesures. Schuster et al. a lui comparé différents logiciels de tissue tracking retrouvant des valeurs de strain circonférentiel inférieures avec le logiciel Circle. (60) Il va donc être important de standardiser les techniques de post-traitement également pour harmoniser les résultats obtenus et les exploiter en pratique courante.

3. Points forts de l'étude

Le nombre de patients inclus est important pour établir des valeurs robustes. 92% de ces mesures ont pu être analysées.

La reproductibilité intra-observateur est excellente, et la reproductibilité inter-observateur est bonne. Elles démontrent que la mesure du strain est facile et peut être reproduite par tout radiologue formé.

4. Limites

Il s'agit d'une étude rétrospective.

Le recrutement est uniquement monocentrique, ce qui peut impliquer un biais de sélection. Notre population d'étude âgée de 18 à 68 ans, n'a pas permis d'explorer des valeurs chez des enfants ou chez des patients au-delà de 70 ans. Ces derniers correspondent à une grande partie des patients souffrant de pathologie cardiaque, pour lesquels les normes du strain en IRM manquent.

Une seule IRM 1.5T a été utilisée. Les valeurs obtenues sont probablement dépendantes des paramètres d'acquisition. D'autres études sur d'autres IRM sont nécessaires pour valider nos résultats.

E. Conclusion

Notre étude a permis d'obtenir les valeurs du strain myocardique par tissue tracking en IRM chez des patients volontaires sains en fonction du sexe et de l'âge. La déformation est plus importante chez les femmes, et ce quel que soit l'âge. Au-delà de 60 ans, on visualise une tendance à la diminution de la déformation myocardique. D'autres études sont nécessaires afin de généraliser ces valeurs, et montrer d'éventuelles variations en fonction de l'âge en recrutant des patients plus âgés. Enfin, cette mesure est facilement reproductible. Une harmonisation des paramètres d'acquisition IRM et des différents logiciels de post-traitement permettraient d'intégrer ces mesures dans la pratique quotidienne.

III. Bibliographie

1. Cours [Internet]. Collège de cardiologie, Disponible sur: http://campus.cerimes.fr/cardiologie-et-maladies-vasculaires/enseignement/cardio_1/site/html/1.html
2. Cerqueira MD, Weissman NJ, Dilsizian V, Jacobs AK, Kaul S, Laskey WK, et al. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart. A statement for healthcare professionals from the Cardiac Imaging Committee of the Council on Clinical Cardiology of the American Heart Association. *Circulation*. 29 janv 2002;105(4):539-42.
3. Torrent-Guasp F, Buckberg GD, Clemente C, Cox JL, Coghlan HC, Gharib M. The Structure and Function of the Helical Heart and Its Buttress Wrapping. I. The Normal Macroscopic Structure of the Heart. *Semin Thorac Cardiovasc Surg*. oct 2001;13(4):301-19.
4. Malergue M-C. Tout ce que vous avez voulu savoir sur le strain. *Cardiologie cardinale*, 2017, vol 11, n° 86
5. Serri K, Reant P, Lafitte M, Berhouet M, Le Bouffos V, Roudaut R, et al. Global and Regional Myocardial Function Quantification by Two-Dimensional Strain. *J Am Coll Cardiol*. mars 2006;47(6):1175-81.
6. Qu'est-ce que la FEVG ? [Internet]. *Cardiologie Pratique*. 2010 Disponible sur: <https://www.cardiologie-pratique.com/journal/article/quest-ce-que-la-fevg>
7. guide parcours de soins insuffisance cardiaque [Internet] Disponible sur: https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2012-04/guide_parcours_de_soins_ic_web.pdf
8. Lang RM, Bierig M, Devereux RB, Flachskampf FA, Foster E, Pellikka PA, et al. Recommendations for Chamber Quantification: A Report from the American Society of Echocardiography's Guidelines and Standards Committee and the Chamber Quantification Writing Group, Developed in Conjunction with the European Association of Echocardiography, a Branch of the European Society of Cardiology. *J Am Soc Echocardiogr*. déc 2005;18(12):1440-63.
9. HAS SONOVUE [Internet] Disponible sur: https://www.has-sante.fr/upload/docs/evamed/CT-16549_SONOVUE_PIS_Avis1_RI_CT16549.pdf
10. Lang RM, Addetia K, Narang A, Mor-Avi V. 3-Dimensional Echocardiography. *JACC Cardiovasc Imaging*. déc 2018;11(12):1854-78.
11. Bellenger N. Comparison of left ventricular ejection fraction and volumes in heart failure by echocardiography, radionuclide ventriculography and cardiovascular magnetic resonance. Are they interchangeable? *Eur Heart J*. 15 août 2000;21(16):1387-96.
12. Imagerie dynamique (ciné) cardiaque et tagging en IRM [Internet]. IMAIOS. Disponible sur: <https://www.imaios.com/fr/e-Cours/e-MRI/IRM-cardiaque/irm-cardiaque-cine-tagging-stress>
13. Stokke TM, Hasselberg NE, Smedsrud MK, Sarvari SI, Haugaa KH, Smiseth OA, et al. Geometry as a Confounder When Assessing Ventricular Systolic Function. *J Am Coll Cardiol*. août 2017;70(8):942-54.
14. Smiseth OA, Torp H, Opdahl A, Haugaa KH, Urheim S. Myocardial strain imaging: how useful is it in clinical decision making? *Eur Heart J*. 14 avr 2016;37(15):1196-207.

15. Kalam K, Otahal P, Marwick TH. Prognostic implications of global LV dysfunction: a systematic review and meta-analysis of global longitudinal strain and ejection fraction. *Heart*. 1 nov 2014;100(21):1673-80.
16. Scatteia A, Baritussio A, Bucciarelli-Ducci C. Strain imaging using cardiac magnetic resonance. *Heart Fail Rev*. juill 2017;22(4):465-76.
17. Chitiboi T, Axel L. Magnetic resonance imaging of myocardial strain: A review of current approaches. *J Magn Reson Imaging JMRI*. 2017;46(5):1263-80.
18. Voigt J-U, Cvijic M. 2- and 3-Dimensional Myocardial Strain in Cardiac Health and Disease. *JACC Cardiovasc Imaging*. sept 2019;12(9):1849-63.
19. Burns AT, McDonald IG, Thomas JD, Maclsaac A, Prior D. Doin' the twist: new tools for an old concept of myocardial function. *Heart*. 28 févr 2008;94(8):978-83.
20. Gorcsan J, Tanaka H. Echocardiographic assessment of myocardial strain. *J Am Coll Cardiol*. 27 sept 2011;58(14):1401-13.
21. Heimdal A, Støylen A, Torp H, Skjærpe T. Real-Time Strain Rate Imaging of the Left Ventricle by Ultrasound. *J Am Soc Echocardiogr*. nov 1998;11(11):1013-9.
22. D'hooge J. Regional Strain and Strain Rate Measurements by Cardiac Ultrasound: Principles, Implementation and Limitations. *Eur J Echocardiogr*. sept 2000;1(3):154-70.
23. Mor-Avi V, Lang RM, Badano LP, Belohlavek M, Cardim NM, Derumeaux G, et al. Current and Evolving Echocardiographic Techniques for the Quantitative Evaluation of Cardiac Mechanics: ASE/EAE Consensus Statement on Methodology and Indications Endorsed by the Japanese Society of Echocardiography. *Eur J Echocardiogr*. 1 mars 2011;12(3):167-205.
24. Perk G, Tunick PA, Kronzon I. Non-Doppler Two-dimensional Strain Imaging by Echocardiography—From Technical Considerations to Clinical Applications. *J Am Soc Echocardiogr*. mars 2007;20(3):234-43.
25. Pedrizzetti G, Claus P, Kilner PJ, Nagel E. Principles of cardiovascular magnetic resonance feature tracking and echocardiographic speckle tracking for informed clinical use. *J Cardiovasc Magn Reson*. déc 2016;18(1):51.
26. Marwick TH, Leano RL, Brown J, Sun J-P, Hoffmann R, Lysyansky P, et al. Myocardial Strain Measurement With 2-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography. *JACC Cardiovasc Imaging*. janv 2009;2(1):80-4.
27. Mondillo S, Galderisi M, Mele D, Cameli M, Lomoriello VS, Zacà V, et al. Speckle-Tracking Echocardiography: A New Technique for Assessing Myocardial Function. *J Ultrasound Med*. janv 2011;30(1):71-83.
28. Voigt J-U, Pedrizzetti G, Lysyansky P, Marwick TH, Houle H, Baumann R, et al. Definitions for a common standard for 2D speckle tracking echocardiography: consensus document of the EACVI/ASE/Industry Task Force to standardize deformation imaging. *Eur Heart J - Cardiovasc Imaging*. 1 janv 2015;16(1):1-11.
29. Barron JL, Fleet DJ, Beauchemin SS. Performance of Optical Flow Techniques. *IJCV*, 1994, 12:1, 43-77
30. Jasaityte R, Heyde B, D'hooge J. Current State of Three-Dimensional Myocardial Strain Estimation Using Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. janv 2013;26(1):15-28.
31. Gayat E, Ahmad H, Weinert L, Lang RM, Mor-Avi V. Reproducibility and Inter-Vendor Variability of Left Ventricular Deformation Measurements by Three-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. août 2011;24(8):878-85.
32. Tagging - IRM Cardiaque par Neteditions [Internet]. Disponible sur: <http://www.irmcardiaque.com/index.php?title=Tagging>

33. Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, Yang A, Shapiro EP. Human heart: tagging with MR imaging--a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology*. oct 1988;169(1):59-63.
34. Ibrahim E-SH. Myocardial tagging by Cardiovascular Magnetic Resonance: evolution of techniques--pulse sequences, analysis algorithms, and applications. *J Cardiovasc Magn Reson*. déc 2011;13(1):1-40.
35. Götte MJW, Germans T, Rüssel IK, Zwanenburg JJM, Marcus JT, van Rossum AC, et al. Myocardial Strain and Torsion Quantified by Cardiovascular Magnetic Resonance Tissue Tagging. *J Am Coll Cardiol*. nov 2006;48(10):2002-11.
36. Jeung M-Y, Germain P, Croisille P, Ghannudi SE, Roy C, Gangi A. Myocardial Tagging with MR Imaging: Overview of Normal and Pathologic Findings. *RadioGraphics*. sept 2012;32(5):1381-98.
37. Osman NF, McVeigh ER, Prince JL. Imaging heart motion using harmonic phase MRI. *IEEE Trans Med Imaging*. mars 2000;19(3):186-202.
38. Aletras AH, Ding S, Balaban RS, Wen H. DENSE: Displacement Encoding with Stimulated Echoes in Cardiac Functional MRI. *J Magn Reson*. mars 1999;137(1):247-52.
39. Gao H, Allan A, McComb C, Luo X, Berry C. Left ventricular strain and its pattern estimated from cine CMR and validation with DENSE. *Phys Med Biol*. 7 juill 2014;59(13):3637-56.
40. Neizel M, Lossnitzer D, Korosoglou G, Schäufele T, Lewien A, Steen H, et al. Strain-encoded (SENC) magnetic resonance imaging to evaluate regional heterogeneity of myocardial strain in healthy volunteers: Comparison with conventional tagging. *J Magn Reson Imaging*. janv 2009;29(1):99-105.
41. Hor KN, Gottliebson WM, Carson C, Wash E, Cnota J, Fleck R, et al. Comparison of Magnetic Resonance Feature Tracking for Strain Calculation With Harmonic Phase Imaging Analysis. *JACC Cardiovasc Imaging*. févr 2010;3(2):144-51.
42. Schuster Andreas, Hor Kan N., Kowallick Johannes T., Beerbaum Philipp, Kutty Shelby. Cardiovascular Magnetic Resonance Myocardial Feature Tracking. *Circ Cardiovasc Imaging*. 1 avr 2016;9(4):e004077.
43. Buss SJ, Schulz F, Mereles D, Hosch W, Galuschky C, Schummers G, et al. Quantitative analysis of left ventricular strain using cardiac computed tomography. *Eur J Radiol*. mars 2014;83(3):e123-30.
44. Khan JN, Singh A, Nazir SA, Kanagala P, Gershlick AH, McCann GP. Comparison of cardiovascular magnetic resonance feature tracking and tagging for the assessment of left ventricular systolic strain in acute myocardial infarction. *Eur J Radiol*. mai 2015;84(5):840-8.
45. Buss SJ, Krautz B, Hofmann N, Sander Y, Rust L, Giusca S, et al. Prediction of functional recovery by cardiac magnetic resonance feature tracking imaging in first time ST-elevation myocardial infarction. Comparison to infarct size and transmural extent by late gadolinium enhancement. *Int J Cardiol*. mars 2015;183:162-70.
46. Bogarapu S, Puchalski MD, Everitt MD, Williams RV, Weng H-Y, Menon SC. Novel Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracking (CMR-FT) Analysis for Detection of Myocardial Fibrosis in Pediatric Hypertrophic Cardiomyopathy. *Pediatr Cardiol*. avr 2016;37(4):663-73.
47. Baeßler B, Schaarschmidt F, Dick A, Michels G, Maintz D, Bunck AC. Diagnostic implications of magnetic resonance feature tracking derived myocardial strain parameters in acute myocarditis. *Eur J Radiol*. janv 2016;85(1):218-27.

48. Weigand J, Nielsen JC, Sengupta PP, Sanz J, Srivastava S, Uppu S. Feature Tracking-Derived Peak Systolic Strain Compared to Late Gadolinium Enhancement in Troponin-Positive Myocarditis: A Case–Control Study. *Pediatr Cardiol.* avr 2016;37(4):696-703.
49. Nakano S, Takahashi M, Kimura F, Senoo T, Saeki T, Ueda S, et al. Cardiac magnetic resonance imaging-based myocardial strain study for evaluation of cardiotoxicity in breast cancer patients treated with trastuzumab: A pilot study to evaluate the feasibility of the method. *Cardiol J.* 2016;23(3):270-80.
50. Musa TA, Uddin A, Swoboda PP, Garg P, Fairbairn TA, Dobson LE, et al. Myocardial strain and symptom severity in severe aortic stenosis: insights from cardiovascular magnetic resonance. *Quant Imaging Med Surg.* févr 2017;7(1):38-47.
51. Onishi T, Saha SK, Delgado-Montero A, Ludwig DR, Onishi T, Schelbert EB, et al. Global Longitudinal Strain and Global Circumferential Strain by Speckle-Tracking Echocardiography and Feature-Tracking Cardiac Magnetic Resonance Imaging: Comparison with Left Ventricular Ejection Fraction. *J Am Soc Echocardiogr.* mai 2015;28(5):587-96.
52. Taylor RJ, Moody WE, Umar F, Edwards NC, Taylor TJ, Stegemann B, et al. Myocardial strain measurement with feature-tracking cardiovascular magnetic resonance: normal values. *Eur Heart J – Cardiovasc Imaging.* août 2015;16(8):871-81.
53. Truong VT, Safdar KS, Kalra DK, Gao X, Ambach S, Taylor MD, et al. Cardiac magnetic resonance tissue tracking in right ventricle: Feasibility and normal values. *Magn Reson Imaging.* mai 2017;38:189-95.
54. Andre F, Steen H, Matheis P, Westkott M, Breuninger K, Sander Y, et al. Age- and gender-related normal left ventricular deformation assessed by cardiovascular magnetic resonance feature tracking. *J Cardiovasc Magn Reson.* 2015;17(1):25.
55. Lawton JS, Cupps BP, Knutsen AK, Ma N, Brady BD, Reynolds LM, et al. Magnetic resonance imaging detects significant sex differences in human myocardial strain. *Biomed Eng OnLine.* 22 août 2011;10:76.
56. Item 129 : Facteurs de risque cardiovasculaire et prévention. Collège des Enseignants de Cardiologie et Maladies Vasculaires
57. Mangion K, Clerfond G, McComb C, Carrick D, Rauhalampi SM, McClure J, et al. Myocardial strain in healthy adults across a broad age range as revealed by cardiac magnetic resonance imaging at 1.5 and 3.0T: Associations of myocardial strain with myocardial region, age, and sex: Myocardial Strain in Healthy Adults. *J Magn Reson Imaging.* nov 2016;44(5):1197-205.
58. Wu L, Germans T, Güçlü A, Heymans MW, Allaart CP, van Rossum AC. Feature tracking compared with tissue tagging measurements of segmental strain by cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson.* déc 2014;16(1):10.
59. Morton G, Schuster A, Jogiya R, Kutty S, Beerbaum P, Nagel E. Inter-study reproducibility of cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking. *J Cardiovasc Magn Reson.* 21 juin 2012;14(1):43.
60. Schuster A, Stahnke V-C, Unterberg-Buchwald C, Kowallick JT, Lamata P, Steinmetz M, et al. Cardiovascular magnetic resonance feature-tracking assessment of myocardial mechanics: Intervendor agreement and considerations regarding reproducibility. *Clin Radiol.* sept 2015;70(9):989-98.

IV. Annexes

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] G Age < 20	52,4	20,8	-18,3	3,4	-10,6	3,9	44,3	26,6	-20,8	6,1	26,3	11,7	-16,4	4,7
[S2] G Age < 20	28,8	16,7	-14,4	3,1	-12,3	3,4	17,7	5,8	-12,1	3,1	15,8	8,3	-11,4	4,6
[S3] G Age < 20	27,5	15,6	-14	3,1	-12,4	4	17,3	8,9	-12,1	4,5	29	15,3	-17	5,4
[S4] G Age < 20	42,9	12	-15,7	3	-11,8	4,2	38	19,5	-19,8	5,1	48	18	-23,1	5,2
[S5] G Age < 20	44,3	15	-17,7	2,9	-13	5,1	58,9	21,4	-25,4	4,9	49	45,4	-20,1	12,3
[S6] G Age < 20	52,7	17,6	-18,1	2,6	-11,5	3,8	73,7	26	-28,2	5	52,8	25,4	-24,1	5,8
[S7] G Age < 20	38,1	8,6	-20,6	4,3	-18,6	4,7	36,7	13,4	-20,4	4,3	52,9	19,8	-24,3	5,6
[S8] G Age < 20	21,9	9,7	-16,6	4,2	-14,7	2,6	26,8	8,2	-16,6	3,9	29	12,4	-17,6	5,2
[S9] G Age < 20	19,2	6,3	-16,5	4,3	-14,2	3,4	24,1	7	-15,5	3,3	35,9	13,3	-20,1	4
[S10] G Age < 20	20,7	9,3	-19,3	3,5	-17	3,5	24,1	8,9	-15,8	3,7	41,3	15,2	-21,3	5,1
[S11] G Age < 20	36,7	14,3	-22	2,6	-16	4,9	44,6	13,6	-22,7	3,7	41,2	25,6	-20,2	8,4
[S12] G Age < 20	42,6	12,4	-20,1	3,9	-17,4	4,6	48,5	14,5	-23,6	4,3	45,1	11,9	-22,5	3,8
[S13] G Age < 20	45,4	23,6	-17,8	3,4	-16,4	4,3	49,7	17,9	-23,8	4,3	47,4	21,5	-22,8	5,2
[S14] G Age < 20	31,3	17,4	-14	5,8	-14,9	3,1	48,2	13,1	-23,6	3,3	36,2	14,9	-19,7	5
[S15] G Age < 20	28,5	9,2	-16,2	4,9	-14,4	4,8	50,6	15,3	-24	3,7	41,7	14,4	-21,7	4
[S16] G Age < 20	43,3	24,6	-20,6	5	-17,7	5	63,1	16,6	-26,9	3,2	39,8	18,1	-20,7	5,5

Tableau 4.1 : Mesure du strain par segment chez les patients < 20 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] H Age < 20	53,6	19,9	-17,7	4,2	-11,7	4,1	46,9	24	-21,9	5,9	22,3	5,7	-15,1	2,7
[S2] H Age < 20	27,6	16,3	-14,2	4,3	-12,9	3,7	19,4	6,1	-12,9	3,3	15,2	8,6	-11,1	4,7
[S3] H Age < 20	22,2	9,2	-13,2	3,7	-12,5	3,9	15,6	8,3	-11,1	4,7	25,3	13,8	-15,3	5,7
[S4] H Age < 20	42,6	12,3	-13,9	2,7	-10,4	4,4	35	20,2	-18,6	4,7	39,2	16,7	-20,6	5,4
[S5] H Age < 20	42,8	12,7	-17	3,2	-11,5	5,5	58,8	27,5	-24,7	6,1	63,9	48,5	-25,2	8,7
[S6] H Age < 20	54,3	18,5	-18,1	2	-11,2	4,1	71,9	29,5	-27,4	6,2	49,6	30,5	-22,8	7,2
[S7] H Age < 20	36,2	8	-19,6	5,4	-17,6	5,4	35,2	9,8	-19,8	3,7	47,1	22,1	-22,5	6,6
[S8] H Age < 20	20,3	9,1	-15,5	4	-13,7	1,7	25,9	8,3	-16,3	3,9	20,7	9,7	-14,1	4,2
[S9] H Age < 20	17	4,6	-14	3,6	-11,9	1,7	22,3	7,1	-14,7	3,6	35,6	11,9	-20,1	3,6
[S10] H Age < 20	18,9	7,6	-17,7	3,2	-16,5	2,8	21,4	8,6	-14,7	3,7	37,3	14,8	-20	5,6
[S11] H Age < 20	36,2	12,4	-22,1	2,7	-16,3	4,5	43,9	14,7	-22,4	3,8	57,5	20	-25,6	3,8
[S12] H Age < 20	40,9	12,5	-21,1	4,2	-17,3	5,4	48,1	12,2	-23,5	4,2	43,4	14,7	-21,5	4,8
[S13] H Age < 20	43,7	24,3	-18,2	4,2	-14,4	4,7	47,4	16,5	-23,7	3,4	51,7	24,6	-23,7	5,7
[S14] H Age < 20	32,2	20,1	-14,3	6,3	-13,6	3,3	45,3	10,7	-22,8	2,7	32,3	11,7	-18,4	4,6
[S15] H Age < 20	31,5	9,1	-16	6,1	-14,9	5,7	48,2	10,5	-23,8	2,3	36,3	9,9	-20,4	3,1
[S16] H Age < 20	44,2	18,6	-20,6	6,5	-16,3	5,6	63,3	16	-27	3	34,3	13,2	-19,3	4,4

Tableau 4.1a : Mesure du strain par segment chez les hommes < 20 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] F Age < 20	51,3	22,5	-18,8	2,6	-9,5	3,6	42	29,8	-19,8	6,4	29,9	14,6	-17,6	5,8
[S2] F Age < 20	30,1	17,8	-14,5	1,6	-11,8	3,2	15,9	5,1	-11,3	2,6	16,3	9,1	-11,7	5
[S3] F Age < 20	32,5	18,9	-14,7	2,3	-12,4	4,2	18,9	9,5	-12,8	4,5	32,4	16,4	-18,5	4,9
[S4] F Age < 20	43,1	12,2	-17,4	2,2	-13	3,7	41,2	19,2	-21	5,4	56	15,7	-25,3	3,8
[S5] F Age < 20	45,6	17,4	-18,4	2,5	-14,2	4,6	59	15,2	-26,1	3,5	29,1	40,3	-13,3	14,8
[S6] F Age < 20	51,3	17,3	-18,2	3,2	-11,7	3,7	75,3	23,7	-28,9	3,7	55,7	20,8	-25,2	4,1
[S7] F Age < 20	39,7	9,2	-21,6	2,9	-19,5	4	37,9	16,1	-20,9	5	58,7	16,1	-26,1	3,8
[S8] F Age < 20	23,3	10,3	-17,6	4,3	-15,7	2,9	27,6	8,4	-16,9	4	39,3	5,1	-21,9	1,6
[S9] F Age < 20	21,2	7,2	-18,8	3,7	-16,3	3,2	25,7	6,7	-16,3	2,9	36,1	15	-20,1	4,4
[S10] F Age < 20	22,4	10,7	-20,8	3,3	-17,5	4,2	26,6	8,8	-16,7	3,6	45	15,1	-22,5	4,5
[S11] F Age < 20	37,1	16,4	-21,9	2,6	-15,8	5,4	45,3	13,1	-23	3,6	20,9	14,8	-13,5	7,7
[S12] F Age < 20	44,1	12,7	-19,3	3,5	-17,6	3,9	48,9	16,9	-23,7	4,5	46,7	8,9	-23,4	2,4
[S13] F Age < 20	46,9	23,9	-17,5	2,6	-18,3	2,9	51,9	19,6	-23,8	5,1	43,5	18,3	-22	4,8
[S14] F Age < 20	30,4	15,3	-13,8	5,6	-15,9	2,7	50,7	14,8	-24,2	3,8	39,8	17	-20,9	5,1
[S15] F Age < 20	24,3	7,9	-16,4	3,7	-14,1	4	52,8	18,9	-24,1	4,7	46,7	16,4	-22,9	4,5
[S16] F Age < 20	42,4	29,9	-20,6	3,4	-18,9	4,2	62,9	17,8	-26,8	3,5	44,3	20,8	-21,9	6,2

Tableau 4.1b : Mesure du strain par segment chez les femmes < 20 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 20 <= G Age < 25	51,7	15,6	-18,1	2,3	-11,3	3,3	48,8	19,7	-22,6	5,6	27,6	17,6	-16,1	6,5
[S2] 20 <= G Age < 25	25,7	11,8	-13,4	2,3	-10,7	3,4	19,3	8,8	-12,9	3,8	29,3	19,7	-16,8	7
[S3] 20 <= G Age < 25	25,8	10,8	-13,1	2,9	-10,7	3,6	23	7,3	-15	3,4	34,6	16,7	-18,7	5,3
[S4] 20 <= G Age < 25	43,2	12,8	-15,5	2,2	-12,2	3,9	38,3	13,4	-19,7	4,2	53,3	29,9	-23	4,7
[S5] 20 <= G Age < 25	47,2	12,7	-17,9	2,6	-11,8	3,8	59,6	15,7	-25,9	3,8	41,1	28,1	-19,2	10,1
[S6] 20 <= G Age < 25	60,2	16,8	-18,5	3,3	-11,3	3	69,8	16,4	-28,1	3	53,8	20,1	-25,2	4,7
[S7] 20 <= G Age < 25	37,5	9,3	-21,2	2,2	-20,2	3,6	35,1	10,5	-19,5	3,8	46,9	16,6	-23	4,4
[S8] 20 <= G Age < 25	23,2	7,7	-16,3	4	-15,1	2,9	26,3	8,5	-16,8	3,3	41	21,8	-23	4,8
[S9] 20 <= G Age < 25	21,6	6,6	-15,8	3,5	-14,1	2,7	25,8	8	-16,2	3,9	32,7	10,5	-18,9	3,7
[S10] 20 <= G Age < 25	25,1	8,9	-20	3,5	-17,6	4,5	28,2	7,7	-17	3,2	45,4	30,7	-20,7	5,9
[S11] 20 <= G Age < 25	41,9	13	-22,4	2,5	-18,3	5,1	46,9	10	-23,3	2,5	41,9	29,9	-18,6	8,1
[S12] 20 <= G Age < 25	47,1	15,3	-21,4	2,7	-18,6	4,3	54,8	15,5	-25,2	3,5	37,2	12,9	-20	4,7
[S13] 20 <= G Age < 25	50	17,5	-17	4,3	-15,1	2,7	53,6	11,1	-24,8	2,8	47,3	27,5	-21,6	4,9
[S14] 20 <= G Age < 25	35,9	15,7	-15,5	4,7	-15,5	3	47,5	9,1	-23,2	2,8	36,3	14,6	-20	4,6
[S15] 20 <= G Age < 25	30	19,2	-18,8	4,9	-16,6	4	50	10,9	-24,1	2,7	49,8	30,8	-22	6,3
[S16] 20 <= G Age < 25	48,5	21,6	-19,1	4,5	-15,9	4,8	62,4	17,4	-26,6	3,9	38,6	18,7	-20,4	6,5

Tableau 4.2 : Mesure du strain par segment chez les patients de 20 à < 25 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 20 <= H Age < 25	50	14,5	-17,6	2,9	-12,1	2,7	48,7	19,8	-22,8	5,2	34,9	20,5	-18,9	6,9
[S2] 20 <= H Age < 25	25,1	11,3	-13,1	2,5	-10,3	3,2	17,2	7,5	-11,9	3,5	22,1	14,1	-14,2	5,9
[S3] 20 <= H Age < 25	24	12,7	-12,6	3,5	-8,8	3,3	20,6	8,5	-13,6	4,1	39,3	20,2	-19,9	5,8
[S4] 20 <= H Age < 25	41,6	11,9	-15,1	1,9	-9,5	2,1	31,8	12,6	-17,3	3,5	57	39,7	-22,6	5,1
[S5] 20 <= H Age < 25	47,3	11,6	-17,7	2,9	-11	3,3	53,8	14,5	-24,3	3,6	43,3	24,8	-20,8	8,2
[S6] 20 <= H Age < 25	56,4	15,3	-19,7	3,9	-11,6	3	70	19,6	-28	3,5	52,7	21,5	-25,4	4,3
[S7] 20 <= H Age < 25	36,5	10,4	-20,9	2,5	-19	3,9	33,5	13	-18,8	4,6	40,1	16,4	-20,9	4,4
[S8] 20 <= H Age < 25	24,8	7,6	-17,1	4,5	-14,8	2,9	26,6	8,5	-16,7	3,5	36,6	24,2	-22	5,5
[S9] 20 <= H Age < 25	20,2	7,2	-16,3	3,9	-13,6	2,9	26,1	7	-16,4	3,4	27,6	9	-17,1	3,5
[S10] 20 <= H Age < 25	23,6	8,7	-19,5	3,3	-15,6	5	26	6,9	-16,1	3,2	45,1	38,1	-18,9	6,6
[S11] 20 <= H Age < 25	39,5	9,9	-22	1,8	-16,3	5	43	7,2	-22,1	1,9	45,6	37,9	-17,7	9,7
[S12] 20 <= H Age < 25	45	16,6	-20,8	2,4	-17,3	3,6	53,5	19,2	-24,4	4,4	35,5	11,6	-19,5	4,8
[S13] 20 <= H Age < 25	46,3	18,9	-16,7	4,5	-14,4	2,1	47,8	11,4	-23,4	3	45,4	35,8	-20	4,3
[S14] 20 <= H Age < 25	34,8	17,9	-16	5,6	-14,7	3	45,8	11,7	-22,4	3,5	30,7	13,2	-18	4,1
[S15] 20 <= H Age < 25	29,9	15,4	-18,3	5,7	-15,1	2,8	48,3	9,5	-23,7	2,4	45,8	35,5	-19,5	6,5
[S16] 20 <= H Age < 25	47,9	23	-18,7	4,3	-15	3,4	56,1	18,1	-25,2	4,5	31,6	18,8	-17,7	7,3

Tableau 4.2a : Mesure du strain par segment chez les hommes de 20 à < 25 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 20 <= F Age < 25	53,3	17	-18,6	1,6	-10,7	3,8	49	20,4	-22,3	6,2	20,9	11,7	-13,8	5,3
[S2] 20 <= F Age < 25	26,3	12,7	-13,6	2,1	-11	3,7	21,8	10	-14	4	48,4	22	-23,5	5,4
[S3] 20 <= F Age < 25	27,6	8,8	-13,6	2,3	-12,5	3	24,8	6,1	-15,9	2,6	30,3	11,9	-17,5	4,6
[S4] 20 <= F Age < 25	44,8	14,1	-15,9	2,5	-15	3,4	44,8	11,2	-22,2	3,4	49,7	16,2	-23,4	4,5
[S5] 20 <= F Age < 25	47,1	14,3	-18,1	2,4	-12,6	4,2	65,3	15,2	-27,6	3,4	39,1	32,3	-17,8	11,9
[S6] 20 <= F Age < 25	64,1	17,9	-17,4	2,1	-10,9	3	69,6	13,4	-28,2	2,6	54,8	19,6	-25	5,1
[S7] 20 <= F Age < 25	38,6	8,3	-21,6	2,1	-21,3	3,1	36,6	7,6	-20,2	2,9	53,8	14,3	-25,1	3,4
[S8] 20 <= F Age < 25	21,7	7,9	-15,6	3,3	-15,3	3,1	25,9	8,8	-16,9	3,2	51,2	12,3	-24,9	3,2
[S9] 20 <= F Age < 25	23	5,8	-15,4	3,2	-14,5	2,5	25,5	9,1	-16,1	4,4	37,3	9,9	-20,6	3,1
[S10] 20 <= F Age < 25	26,5	9,2	-20,4	3,7	-19,6	2,8	30,5	8	-17,9	3,1	45,7	22,8	-22,6	4,5
[S11] 20 <= F Age < 25	44,4	15,5	-22,9	3,1	-20,4	4,5	50,8	11,2	-24,4	2,7	36,6	15,6	-19,7	6,7
[S12] 20 <= F Age < 25	49,2	14,4	-21,9	2,9	-20	4,6	56,2	11,5	-25,9	2,3	39	14,4	-20,5	4,7
[S13] 20 <= F Age < 25	53,6	15,8	-17,3	4,2	-15,8	3,2	59,3	7,2	-26,2	1,6	49,3	17,2	-23,2	5,1
[S14] 20 <= F Age < 25	37,1	14	-15	3,9	-16,4	2,8	49,3	5,5	-24,1	1,4	41,8	14,3	-21,9	4,3
[S15] 20 <= F Age < 25	30,1	22,9	-19,2	4,1	-17,9	4,6	51,6	12,4	-24,5	3,1	53,8	26,1	-24,5	5,2
[S16] 20 <= F Age < 25	49	21,3	-19,5	4,9	-16,8	6	68,7	14,8	-28,1	2,6	46,2	16,2	-23,1	4,5

Tableau 4.2b : Mesure du strain par segment chez les femmes de 20 à < 25 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 25 <= G Age < 30	59,4	24,4	-19	3,3	-10,3	4	57,3	27,9	-24,2	5,7	28	12,3	-17,5	4,2
[S2] 25 <= G Age < 30	30,2	15,4	-13,9	3	-10,2	3,7	19,9	11,6	-13,6	5	26,9	13,5	-16,5	5,6
[S3] 25 <= G Age < 30	23,7	12,3	-13,2	2,7	-10,9	3,7	20	7,8	-14,6	3	36,3	15,9	-19,3	5,3
[S4] 25 <= G Age < 30	44,2	20,9	-14,4	3,4	-9,6	4,4	32	12,8	-17,8	4,9	47,8	22,1	-23	5,1
[S5] 25 <= G Age < 30	58,7	26,4	-16,3	4,2	-10	4,1	61,4	22,4	-26,1	4,2	55	35	-22,7	9
[S6] 25 <= G Age < 30	64,4	22,2	-19	4,2	-11	4,2	80,6	27,2	-29,4	4,7	55,3	36,3	-24,6	5,7
[S7] 25 <= G Age < 30	41,4	12,5	-21,9	3,7	-20	5	39,7	14,9	-21,1	4,7	45,3	19,5	-22,2	5,3
[S8] 25 <= G Age < 30	23,5	8,1	-17,4	4,1	-15,9	3,2	26	9,8	-16,4	4,4	32,5	15,6	-18,2	6,5
[S9] 25 <= G Age < 30	22,7	8,3	-17,1	3,7	-13,6	2,9	26	8	-16,1	3,9	35,7	16,8	-19,7	5
[S10] 25 <= G Age < 30	28,9	12,6	-20,3	4,7	-16,9	3,7	29,6	11,9	-17,6	4	48,5	16,5	-23,6	4,4
[S11] 25 <= G Age < 30	43,9	13,3	-22,9	4,5	-17,7	4,5	47,7	16,6	-23,3	4	42,6	26,4	-20	9,5
[S12] 25 <= G Age < 30	50,7	7,9	-22,5	3,8	-18,3	5,3	54,5	17,6	-25,5	3,6	45,2	19,8	-22,7	4,4
[S13] 25 <= G Age < 30	48	19,3	-17,7	3,8	-15	4,2	56	17,5	-24,9	4,4	42,8	17,2	-21,7	4,9
[S14] 25 <= G Age < 30	35,8	18,9	-15,7	5,5	-14,3	4,5	45,7	14,8	-23,4	3,5	37,5	17,5	-19,7	5,4
[S15] 25 <= G Age < 30	34,4	18,8	-16,4	6,4	-15,9	5,6	52,1	15,5	-24,4	3,6	43,6	21,2	-21,6	6
[S16] 25 <= G Age < 30	51,9	24,6	-20,3	5,3	-15	5,5	66,4	21,6	-27,3	4	39,3	22,8	-20	6,7

Tableau 4.3 : Mesure du strain par segment chez les patients de 25 à < 30 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 25 <= H Age < 30	53	22,4	-18,1	2,3	-8,7	3,5	48,8	18,7	-22,5	5,3	24,4	10,3	-16,6	3,8
[S2] 25 <= H Age < 30	24,9	13,4	-13,4	2,6	-9	3,7	17,2	11,1	-11,7	5,4	24,4	11,5	-15,6	5,5
[S3] 25 <= H Age < 30	20,1	8,1	-12,6	2,2	-10,5	3,3	16,1	6,2	-13,4	1,6	35,2	17,9	-18,6	6
[S4] 25 <= H Age < 30	44	15,6	-14,9	3,1	-9	4,5	36	12	-19,3	4,3	38,7	11,1	-21,2	3,9
[S5] 25 <= H Age < 30	54,9	21	-16,1	2,3	-8,8	3,6	67	24,3	-26,8	4,3	37,6	28,5	-17,9	10,6
[S6] 25 <= H Age < 30	58,2	21,3	-17,1	2,9	-9,6	3,6	73,3	24,4	-28,3	4,7	45,6	22,5	-23,5	5,4
[S7] 25 <= H Age < 30	40,5	11,7	-21,8	3,3	-19,7	4,5	39,7	14,5	-20,8	4,5	43,9	18,4	-22	4,8
[S8] 25 <= H Age < 30	20,3	7,4	-16	4,5	-14,4	2,7	22,7	10,6	-14,8	5,1	29,5	16,9	-16,6	7,4
[S9] 25 <= H Age < 30	19,8	8,4	-15,8	3,9	-13	2,4	23,6	9,1	-14,6	4,6	35,8	21,1	-19,3	5,9
[S10] 25 <= H Age < 30	29	14,8	-20	5,5	-18	3,9	28,3	8,7	-16,9	3,5	51,9	17,9	-24,4	4,8
[S11] 25 <= H Age < 30	47,5	14,9	-23,3	5,2	-19,1	4,3	51,8	16,6	-24,2	4,2	50,5	27,3	-22,4	10,3
[S12] 25 <= H Age < 30	50	8,1	-21,6	4	-18,2	4,3	56,8	14,5	-25,6	3,8	47,4	17,5	-22,9	3,8
[S13] 25 <= H Age < 30	48,6	18	-16,2	3,2	-13,3	3,7	52,3	18,5	-23,9	5,1	42,4	16,2	-21,7	4,5
[S14] 25 <= H Age < 30	39,8	18,6	-14,1	4,9	-12,9	3,7	41,8	16,7	-22,4	4,3	37,6	19,8	-19,7	5,5
[S15] 25 <= H Age < 30	38,9	17,2	-15,4	4,9	-14,8	4,7	51,8	17	-24,1	4,2	49,9	27,1	-22,8	7,4
[S16] 25 <= H Age < 30	57,3	25,1	-19,5	5	-14,3	5,3	65,6	23,6	-27	4,4	38,5	21,5	-20,1	5,7

Tableau 4.3a : Mesure du strain par segment chez les hommes de 25 à < 30 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 25 <= F Age < 30	65,8	25,6	-19,9	4	-11,7	4	65,9	33,5	-25,8	5,9	31,2	13,6	-18,1	4,6
[S2] 25 <= F Age < 30	35,6	15,9	-14,4	3,4	-11,3	3,4	22,9	11,9	-15,8	3,7	29,9	16	-17,5	6,1
[S3] 25 <= F Age < 30	27,6	15,1	-13,7	3,1	-11,4	4,3	23,5	7,7	-15,4	3,5	37,4	14,3	-20	4,7
[S4] 25 <= F Age < 30	44,3	25,9	-14	3,8	-10,2	4,4	28	12,7	-16,1	5,1	55,3	26,3	-24,4	5,5
[S5] 25 <= F Age < 30	62,4	31,4	-16,4	5,6	-11,3	4,3	55,9	19,7	-25,3	4,2	69,9	34,7	-26,1	6,4
[S6] 25 <= F Age < 30	70,5	22,3	-21,1	4,5	-12,2	4,4	87,9	28,9	-30,5	4,8	65	45,3	-25,7	6
[S7] 25 <= F Age < 30	42,2	13,8	-22	4,1	-20,3	5,8	39,8	16	-21,5	5,1	46,6	21,2	-22,3	6
[S8] 25 <= F Age < 30	27	7,7	-18,9	3,1	-17,7	2,8	29,7	7,9	-17,9	3,2	37	13,6	-20,7	4,3
[S9] 25 <= F Age < 30	25,8	7,2	-18,3	3	-14,3	3,4	28,4	6,3	-17,5	2,5	35,7	11,6	-20,1	4
[S10] 25 <= F Age < 30	28,8	10,7	-20,7	3,8	-15,7	3,3	30,9	14,7	-18,4	4,5	45,5	15,1	-22,9	4,2
[S11] 25 <= F Age < 30	39,9	10,5	-22,5	3,7	-16,2	4,3	43,4	16,2	-22,2	3,8	35,8	25,5	-17,9	9
[S12] 25 <= F Age < 30	51,4	8,1	-23,4	3,5	-18,3	6,4	52,2	20,6	-25,3	3,4	43,1	22,4	-22,4	5,2
[S13] 25 <= F Age < 30	47,4	21,4	-19,1	3,9	-16,7	4,1	59,8	16,4	-25,9	3,4	43,3	18,9	-21,6	5,6
[S14] 25 <= F Age < 30	31,8	19,1	-17,1	5,8	-15,6	5	49,5	12,1	-24,2	2,6	37,4	15,6	-19,7	5,6
[S15] 25 <= F Age < 30	30	20,2	-17,3	7,7	-17,1	6,5	52,5	14,6	-24,6	3,2	37,3	10,8	-20,4	4,1
[S16] 25 <= F Age < 30	46,4	24,1	-21,2	5,7	-15,7	5,9	67,3	20,4	-27,6	3,7	40,2	25,2	-19,8	7,9

Tableau 4.3b : Mesure du strain par segment chez les femmes de 25 à < 30 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 30 <= G Age < 40	48,1	18,8	-17,9	3,3	-11,1	2,9	43,9	21,6	-21,1	5,9	28,3	11,8	-17,1	4,7
[S2] 30 <= G Age < 40	26,3	11,4	-14,9	3	-11,8	3,3	22,3	13,9	-14,5	4,4	34,6	17,1	-19,2	5,6
[S3] 30 <= G Age < 40	32,6	16,7	-15,5	2,5	-11,8	3,4	24,1	15,3	-15,9	5,3	41	15,6	-21,1	4,5
[S4] 30 <= G Age < 40	51,3	20,1	-16,5	3,2	-12,2	3,5	37,5	19,9	-20,3	5,9	46	18,7	-22,5	5,2
[S5] 30 <= G Age < 40	61,8	21,8	-18,4	3,7	-13,7	3,4	66,4	21,3	-27	5	60,2	30	-24,9	7,5
[S6] 30 <= G Age < 40	63,1	22,9	-19,2	3,1	-11,3	3,9	78,2	27,5	-28,8	5,8	52,9	27,6	-23,5	6,1
[S7] 30 <= G Age < 40	34,4	14,8	-21,6	3,7	-20	4,1	35,9	11,5	-20	3,7	50,3	19,5	-23,7	5,7
[S8] 30 <= G Age < 40	23,2	7,9	-18,1	4,1	-15,4	3	27,8	10,2	-17,2	3,8	28,7	13,7	-17,1	6,1
[S9] 30 <= G Age < 40	25,2	13,1	-18,7	3,4	-16	3,5	30,4	14,5	-17,8	4,2	37,8	17,5	-20,2	5,1
[S10] 30 <= G Age < 40	30,8	14,6	-21,8	4,6	-19,4	3,9	33,4	13,3	-18,8	4,7	46,5	21,1	-22,4	5,9
[S11] 30 <= G Age < 40	43	18,8	-22,6	4,1	-19,8	3,9	46,7	15,5	-23,1	4,6	58,8	42,8	-23,3	11,1
[S12] 30 <= G Age < 40	47,5	17,7	-21,2	2,8	-19,5	4,7	49,5	13,8	-24	4,2	48,4	18,7	-22,9	5,3
[S13] 30 <= G Age < 40	44	20,5	-16,8	4,5	-15,8	4,7	53,7	12,8	-24,8	3	54,7	20,5	-24,6	4,8
[S14] 30 <= G Age < 40	30,3	17,7	-14,8	4,7	-14,5	4,5	46,8	12,6	-23,5	3,2	39,4	17,4	-20,7	4,4
[S15] 30 <= G Age < 40	42,2	20,1	-17,4	4,8	-15,7	5,4	51,6	14,6	-24,2	4,5	49,5	24,7	-23,5	5,6
[S16] 30 <= G Age < 40	59	20,8	-18,8	3,9	-15,1	5,3	63,1	15,9	-27	3,1	44,8	19,3	-22,2	4,7

Tableau 4.4 : Mesure du strain par segment chez les patients de 30 à < 40 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 30 <= H Age < 40	42,4	15,1	-17	2,8	-10,2	2,6	40,3	17	-20,6	4,8	26,2	11,6	-16,2	5
[S2] 30 <= H Age < 40	27,2	12,8	-13,9	2,8	-11	3,3	24,8	18,5	-14,6	5,5	32,4	20,8	-18,1	6,8
[S3] 30 <= H Age < 40	35	19,6	-15,5	2,8	-11,6	4	25,2	19,5	-15,2	6,8	48,7	16,1	-23,2	4
[S4] 30 <= H Age < 40	51	21,3	-15,9	3,4	-11,5	3,7	34,6	17,9	-19,9	5,7	44,8	19,2	-22	4,4
[S5] 30 <= H Age < 40	62,3	22,8	-17,9	4,8	-13,3	2,8	60,1	23,8	-25,6	5,8	65,7	51,2	-23,8	10,7
[S6] 30 <= H Age < 40	62,8	18,4	-19,1	4,3	-10	3,9	74,5	31,2	-27,6	7,4	55,4	34,8	-22,8	7,6
[S7] 30 <= H Age < 40	31,9	19	-20,4	3,4	-17,8	3,6	33,9	12,3	-19,2	4	44,7	20,5	-22	6,1
[S8] 30 <= H Age < 40	22,6	8	-17,4	4,9	-14,1	2,9	27,8	10,5	-17,6	3,8	31,9	13,4	-18,5	6,1
[S9] 30 <= H Age < 40	26,7	15,1	-18,6	3,9	-15,1	4,4	31,3	19,9	-17,7	5,4	42,6	22,2	-21,5	4,8
[S10] 30 <= H Age < 40	28,4	14,5	-20,8	3,7	-18,7	5,4	30,6	14,5	-17,6	5,1	44,7	24,9	-21,5	6,8
[S11] 30 <= H Age < 40	37,6	19,8	-21,4	4,7	-19,7	5,1	44,1	17,1	-22,1	5,6	78,9	42,2	-29	6,2
[S12] 30 <= H Age < 40	44,9	20,4	-21,1	3	-17,8	5,7	47,4	15,6	-23,4	4,7	44,4	19,4	-21,6	5,8
[S13] 30 <= H Age < 40	48,6	24,9	-17,4	2,8	-16,1	2,8	52,6	15,2	-24,4	3,4	53,8	23,7	-24	5,6
[S14] 30 <= H Age < 40	33,1	22	-14,4	4,7	-14,1	3,9	44,7	10,9	-22,9	2,8	43,7	24,5	-21,3	6,1
[S15] 30 <= H Age < 40	45	18,4	-17,8	4,1	-16,6	6,7	53,4	12,9	-24,8	2,7	43,4	22,7	-21,6	5,8
[S16] 30 <= H Age < 40	55,9	15,9	-19,4	2,8	-15,9	4,2	65,8	16,3	-27,5	3	40,8	19,9	-20,7	5

Tableau 4.4a : Mesure du strain par segment chez les hommes de 30 à < 40 ans

	LV3D_ PSR_ Moy	LV3D_ PSR_ SD	LV3D_ PSC_ Moy	LV3D_ PSC_ SD	LV3D_ PSL_ Moy	LV3D_ PSL_ SD	LV2DSA_ PSR_ Moy	LV2DSA_ PSR_ SD	LV2DSA_ PSC_ Moy	LV2DSA_ PSC_ SD	LV2DLA_ PSR_ Moy	LV2DLA_ PSR_ SD	LV2DLA_ PSL_ Moy	LV2DLA_ PSL_ SD
[S1] 30 <= F Age < 40	53	20,7	-18,7	3,7	-11,7	3,1	46,9	25	-21,6	6,8	30	12	-17,8	4,4
[S2] 30 <= F Age < 40	25,4	10,5	-15,7	3	-12,4	3,2	20,2	8,9	-14,4	3,5	37,2	13,2	-20,5	4,2
[S3] 30 <= F Age < 40	30,5	14,3	-15,4	2,3	-12	3	23,2	11,2	-16,9	2,7	33,9	11,8	-19,2	4,2
[S4] 30 <= F Age < 40	51,6	20	-16,9	3,1	-12,7	3,3	40,1	22,1	-20,6	6,3	47,1	19,1	-22,9	6
[S5] 30 <= F Age < 40	61,3	21,9	-18,9	2,5	-14	3,9	71,7	18,3	-28,2	4,2	58,4	23,8	-25,2	7
[S6] 30 <= F Age < 40	63,4	26,9	-19,3	1,6	-12,4	3,8	81,4	24,9	-29,8	4,1	50,6	20,1	-24	4,5
[S7] 30 <= F Age < 40	36,5	10,5	-22,6	3,8	-21,8	3,5	37,5	11,1	-20,6	3,4	55	18,1	-25,1	5,2
[S8] 30 <= F Age < 40	23,7	8,2	-18,7	3,3	-16,6	2,7	27,8	10,4	-16,9	4	26,4	14,6	-16,1	6,4
[S9] 30 <= F Age < 40	24	11,6	-18,9	3	-16,8	2,3	29,6	8,3	-17,9	3	33,7	11,7	-19,2	5,3
[S10] 30 <= F Age < 40	32,8	15	-22,7	5,2	-20,1	2	35,8	12,2	-19,9	4,2	48,1	18,3	-23,1	5,2
[S11] 30 <= F Age < 40	47,5	17,3	-23,6	3,4	-19,9	2,9	48,9	14,2	-23,9	3,6	42,8	40,1	-18,7	12,5
[S12] 30 <= F Age < 40	49,7	15,6	-21,3	2,6	-20,9	3,1	51,2	12,5	-24,6	3,8	51,7	18,2	-24,1	4,8
[S13] 30 <= F Age < 40	40	15,9	-16,3	5,6	-15,5	6,1	54,7	10,9	-25,2	2,7	55,3	18,4	-25,1	4,2
[S14] 30 <= F Age < 40	27,9	13,5	-15,2	4,9	-14,9	5	48,6	14	-24,1	3,5	35,6	6,9	-20,3	2,3
[S15] 30 <= F Age < 40	39,6	22,1	-17	5,5	-14,9	4	50,1	16,3	-23,6	5,6	54,7	26,1	-25,3	5
[S16] 30 <= F Age < 40	61,7	24,5	-18,4	4,7	-14,5	6,1	60,9	15,8	-26,5	3,2	48,5	18,7	-23,6	4,1

Tableau 4.4b : Mesure du strain par segment chez les femmes de 30 à < 40 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] 40 <= G Age < 50	51,1	19,4	-18,5	3,8	-11,8	3,9	43,1	12,7	-21,5	4	28,3	18,4	-16,3	6,7
[S2] 40 <= G Age < 50	27,5	14,8	-15,2	3,2	-12,4	3,8	23,9	11,4	-15,3	4,3	27,3	17	-17	6
[S3] 40 <= G Age < 50	32,4	12,7	-14,7	2,7	-11	4,7	24,5	19,7	-15,2	6,7	34,7	12,6	-19,1	4,4
[S4] 40 <= G Age < 50	49,9	26,7	-15,4	3,5	-12,4	4,2	45,7	29,1	-21,8	7,5	49,8	20	-23,3	5,1
[S5] 40 <= G Age < 50	54,8	25,8	-19,3	2,8	-13,4	4,5	64,6	20,6	-26,9	4,3	52,8	23,8	-23,6	7,1
[S6] 40 <= G Age < 50	65,9	24,5	-19,3	4,6	-11,8	3,9	69,9	18,7	-28,7	2,6	48,6	22	-24	5,3
[S7] 40 <= G Age < 50	34,5	11,9	-21,4	3,4	-18,7	4,1	37,9	10,1	-20,5	3,3	53,9	27,7	-24,5	6,2
[S8] 40 <= G Age < 50	26,4	12,8	-18,7	4,3	-16,1	3,7	30,8	11,3	-18,1	4	31	19,2	-17,3	7,6
[S9] 40 <= G Age < 50	28,8	13,7	-19,7	4,1	-17,2	4,3	35,5	14,1	-19,6	4,3	41,2	20,8	-21,2	4,6
[S10] 40 <= G Age < 50	36,3	13	-21,4	3,6	-18,8	4,5	38,5	14,8	-20,5	4,4	41,4	18,9	-21,2	5,6
[S11] 40 <= G Age < 50	40,4	16,2	-22,4	2,9	-18,2	4,5	48,8	19,8	-23,3	4,4	33,5	15,7	-18,7	5,8
[S12] 40 <= G Age < 50	41,7	17,8	-21,1	3,7	-18,7	3,7	47,5	11,7	-23,6	3,1	36	13,8	-18,9	5
[S13] 40 <= G Age < 50	48,7	20,5	-16,8	4,9	-15	4,1	55,9	15,2	-25,1	3,8	47,5	17,4	-23	4,9
[S14] 40 <= G Age < 50	46,3	23,7	-16,5	4,3	-15,3	4,5	56,5	15	-25,3	3,6	44,9	20,5	-21,9	6
[S15] 40 <= G Age < 50	42,7	22	-18,4	4,4	-16,6	5,2	59,1	18,9	-26,2	3,8	44,1	19,9	-21,5	6,1
[S16] 40 <= G Age < 50	46,6	28,2	-19,6	6	-16,1	4,9	59,8	18,1	-25,9	4	40,6	14,9	-21,8	4,3

Tableau 4.5 : Mesure du strain par segment chez les patients de 40 à < 50 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] 40 <= H Age < 50	45,7	14,9	-16,5	3,5	-9,6	3,8	43,5	12,6	-21,5	3,9	18,5	4,4	-13,1	2,5
[S2] 40 <= H Age < 50	23	11,8	-14,1	3	-11,3	2,7	19,6	5,7	-13,4	2,6	26,7	14,4	-15,4	5,7
[S3] 40 <= H Age < 50	30,6	10,8	-13,7	2,3	-9,3	4,8	23	21,3	-14,8	7,7	28,6	9	-17	4,3
[S4] 40 <= H Age < 50	58,9	29,5	-14,8	4	-10,9	4,1	48,4	34,8	-21,8	8,9	49,1	17,8	-23,2	3,9
[S5] 40 <= H Age < 50	66,2	26,2	-17,9	2,1	-11,5	3,3	68,5	19,5	-27,7	3,8	57,6	23,4	-25,2	7,6
[S6] 40 <= H Age < 50	64,9	23,6	-18,1	4,4	-10,2	2,5	71,9	23,2	-29,4	2,6	43,5	26,4	-22,3	6,9
[S7] 40 <= H Age < 50	30,9	12,6	-20,1	3,4	-17,5	4,3	37,4	10,8	-20,2	3,4	64,9	28,2	-26,8	4,9
[S8] 40 <= H Age < 50	22,9	10,6	-17	3,6	-14,9	3,4	25,8	8,4	-16,2	3,4	32,5	29,4	-16,2	11,6
[S9] 40 <= H Age < 50	22,7	11,7	-18,7	4,4	-17,1	4,2	30,7	15,3	-17,6	4,3	48,9	27,6	-22,8	5,8
[S10] 40 <= H Age < 50	35,2	10,1	-21,5	4	-18,4	4,7	41,3	18,5	-21,1	5,2	37,9	16,9	-20,2	4,8
[S11] 40 <= H Age < 50	38,1	18,3	-21,7	3,2	-18,4	3,7	59	22,4	-25,5	3,8	37,1	17,3	-19,9	5,7
[S12] 40 <= H Age < 50	41,8	20,2	-21,2	4,7	-19,2	4	51,4	12,4	-24,6	3,1	36,1	14,9	-18,7	5
[S13] 40 <= H Age < 50	52,5	25,7	-15,1	3,6	-13,3	3,7	55,3	19	-24,6	4,9	51,3	18,4	-23,8	5
[S14] 40 <= H Age < 50	48	29,2	-14,8	2,5	-15,4	4,6	51,9	16,8	-24	3,9	48,5	24	-22,5	7
[S15] 40 <= H Age < 50	38,3	17,3	-17,4	4,1	-16,1	5,7	51,6	16,8	-24,3	3,6	42,7	22,5	-20,7	6,7
[S16] 40 <= H Age < 50	45,7	29,7	-18,3	4,6	-15,2	4,6	57,4	18	-25,5	4,2	41,1	17,6	-22,2	4,7

Tableau 4.5a : Mesure du strain par segment chez les hommes de 40 à < 50 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] 40 <= F Age < 50	56,2	22,2	-20,3	3,1	-13,8	2,8	42,8	13,4	-21,5	4,3	36,5	21,7	-18,9	8
[S2] 40 <= F Age < 50	31,6	16,5	-16,3	3,2	-13,4	4,4	27,8	14	-17	4,8	28	21,4	-19,6	6,4
[S3] 40 <= F Age < 50	34,1	14,5	-15,7	2,8	-12,5	4,1	25,8	19	-15,4	6,3	39,9	13,2	-20,9	3,6
[S4] 40 <= F Age < 50	41,6	21,7	-16,1	2,9	-13,7	4	43,2	23,8	-21,9	6,3	50,5	22,6	-23,3	6,2
[S5] 40 <= F Age < 50	44,3	21,2	-20,6	2,8	-15,1	4,8	60,9	21,7	-26,2	4,7	45,1	25	-21,3	6,4
[S6] 40 <= F Age < 50	66,7	26,2	-20,5	4,6	-13,1	4,4	67,8	13,5	-28,1	2,6	52,9	17,5	-25,5	3,2
[S7] 40 <= F Age < 50	37,8	10,6	-22,6	3,1	-19,9	3,8	38,4	9,8	-20,7	3,4	43,7	23,9	-22,2	6,8
[S8] 40 <= F Age < 50	29,7	14,3	-20,3	4,4	-17,2	3,6	35,4	12	-19,8	4	29,9	11,8	-18,1	4,5
[S9] 40 <= F Age < 50	34,3	13,5	-20,5	3,7	-17,3	4,5	40	11,8	-21,4	3,4	34	7,4	-19,7	2,7
[S10] 40 <= F Age < 50	37,1	15,3	-21,3	3,5	-19,2	4,4	35,9	10,4	-20	3,7	44,9	20,8	-22,2	6,3
[S11] 40 <= F Age < 50	42,5	14,4	-23	2,5	-18,1	5,3	39,5	11,2	-21,2	4	28,9	13,3	-17,2	6
[S12] 40 <= F Age < 50	41,7	16,4	-21	2,8	-18,3	3,6	43,8	10,2	-22,7	2,9	35,9	13,3	-19,1	5,2
[S13] 40 <= F Age < 50	45,2	14,4	-18,3	5,5	-16,4	4	56,5	11	-25,6	2,4	43,9	16,2	-22,2	4,8
[S14] 40 <= F Age < 50	44,7	18,3	-18,1	5,1	-15,2	4,7	61,1	12	-26,6	2,8	41,6	16,9	-21,3	5
[S15] 40 <= F Age < 50	46	25,1	-19,4	4,6	-17,1	4,9	66,6	18,4	-28,2	3	45,4	17,9	-22,3	5,6
[S16] 40 <= F Age < 50	47,4	28	-20,8	7,2	-16,8	5,3	62,2	18,5	-26,3	3,9	40,1	12,4	-21,4	4

Tableau 4.5b : Mesure du strain par segment chez les femmes de 40 à < 50 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] 50 <= G Age < 60	54,4	18,4	-20,3	4,2	-13,1	4,3	51,2	20	-23,5	4,7	34,3	21,4	-19	6
[S2] 50 <= G Age < 60	34	16	-16,3	4,1	-13,2	4,1	22,2	9,1	-14,4	4	44,8	19,1	-22,1	5,8
[S3] 50 <= G Age < 60	33,6	19,6	-15,2	3,3	-11,8	3,9	22	12,8	-14,1	4,6	36,6	13,4	-19,7	4,8
[S4] 50 <= G Age < 60	47,5	20	-16,3	2,9	-11,9	2,7	34,4	18,5	-17,9	5,8	54,4	26,5	-24	6,1
[S5] 50 <= G Age < 60	61,3	26,4	-19,1	3,5	-13	3,7	66,3	21,9	-27,6	3,7	55,8	22,8	-26,4	4,4
[S6] 50 <= G Age < 60	67,4	27,6	-20,7	2,7	-11,5	5	76,4	22,5	-29,2	3,5	58,4	17,8	-26,4	3,5
[S7] 50 <= G Age < 60	39,1	14,1	-22,8	3,5	-20,6	4,1	41,9	16	-21,6	4,7	53,3	29,3	-23,7	7
[S8] 50 <= G Age < 60	25,8	10,8	-18,8	4,1	-16,7	3,9	33,1	14,9	-18,8	4,7	39,6	29,6	-19,6	8
[S9] 50 <= G Age < 60	25,8	9,8	-19,2	3,5	-16,7	4	30,4	11,9	-17,8	4	39,7	17,3	-21,2	4,9
[S10] 50 <= G Age < 60	30,2	13,1	-20,6	4,5	-18,2	6,1	33,5	13,4	-19	4,3	48,3	24,4	-22,5	6,6
[S11] 50 <= G Age < 60	39,8	15,5	-21,8	3,9	-18,3	6,7	47,3	12,6	-23,5	3,1	47,2	30,2	-21,9	8,8
[S12] 50 <= G Age < 60	50,9	16,1	-22,6	3,7	-20,2	5,8	50	15,4	-24,1	3,9	43,4	19,5	-21,5	6
[S13] 50 <= G Age < 60	50,4	17,1	-18,7	4,4	-16,1	4	54,4	15,7	-24,9	3,8	53,2	26,4	-23,1	6
[S14] 50 <= G Age < 60	43,3	20,6	-17,5	4,4	-14,9	6	51	15,6	-24	4,2	43,5	23	-21,3	6,2
[S15] 50 <= G Age < 60	40,1	21,8	-19	4,8	-17,4	3,8	51,6	13,1	-24,4	3,2	45,7	25	-21,5	6,7
[S16] 50 <= G Age < 60	48,7	22,9	-20	6	-15	5,3	62,1	14,1	-26,8	2,7	41	17,5	-21,1	5,5

Tableau 4.6 : Mesure du strain par segment chez les patients de 50 à < 60 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] 50 <= H Age < 60	47,2	15,8	-20,6	3,6	-12,8	4	43,6	10,9	-22	2,7	34,1	21	-19,8	5,5
[S2] 50 <= H Age < 60	26,1	8,3	-15,4	4,6	-13,8	4,5	20,2	9	-14	3,9	48,1	18,4	-23	5,9
[S3] 50 <= H Age < 60	25,7	9,9	-13,8	3,8	-11,6	3,9	16,8	7	-12,2	3,7	34,1	11,7	-18,9	4,5
[S4] 50 <= H Age < 60	41,7	18,7	-15	2,6	-11,3	2,8	25,5	12,6	-14,7	5,2	46,4	22,9	-22,3	5,6
[S5] 50 <= H Age < 60	58,1	20,4	-18,5	2,6	-12,8	3,6	60,4	16,6	-26,4	3,5	51,4	29,9	-26,1	6
[S6] 50 <= H Age < 60	56,7	13,6	-20,5	2,3	-11,2	5,1	66,3	17,3	-27,7	3,6	52	18,3	-25	3,4
[S7] 50 <= H Age < 60	32,7	12,9	-20,9	3,3	-18,2	3,3	31,2	9,5	-18,4	3,9	43,9	21,9	-21,6	7,2
[S8] 50 <= H Age < 60	23,9	11,9	-18,6	3,6	-15,2	2,9	27,3	10	-16,8	4,3	26	15,1	-15,8	7
[S9] 50 <= H Age < 60	21,9	11,2	-18	3,8	-14,9	3,8	27,4	7,5	-17	3	32,6	14,4	-19,4	4,6
[S10] 50 <= H Age < 60	25,1	7,9	-19	4,6	-15,2	6,5	27	6,8	-16,9	2,9	39,7	21,3	-19,4	7,6
[S11] 50 <= H Age < 60	39,3	12,7	-20,8	3,2	-16,4	6,1	41,9	9,1	-22,2	2,7	42	23,7	-21,5	8,9
[S12] 50 <= H Age < 60	43,5	16,5	-20	2,7	-17,2	5	42,1	13,6	-22	4	39,5	20,3	-19,7	6,6
[S13] 50 <= H Age < 60	46,3	17,5	-18,8	5,6	-16,3	3,2	48	14,1	-23,3	4,1	45,3	23,3	-21,8	5,3
[S14] 50 <= H Age < 60	44,7	14,8	-18	4,9	-15,3	3,5	45,6	17	-22,4	4,9	37,3	15,7	-19,8	5,7
[S15] 50 <= H Age < 60	45,3	15,8	-18,1	5,3	-17,2	3	48,6	8,7	-23,8	2,3	35,4	13,8	-18,7	5,3
[S16] 50 <= H Age < 60	54	23,6	-20,3	5,9	-15,9	5,5	59,5	12,5	-26,3	2,5	36,3	12,9	-20,3	4

Tableau 4.6a : Mesure du strain par segment chez les hommes de 50 à < 60 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] 50 <= F Age < 60	60,6	18,9	-20,2	4,7	-13,4	4,7	57,7	23,8	-24,8	5,7	34,4	22,5	-18,5	6,5
[S2] 50 <= F Age < 60	40,7	18,1	-17,1	3,5	-12,7	3,9	23,9	9,1	-14,8	4,2	42,1	21,3	-21,5	6,4
[S3] 50 <= F Age < 60	40,3	23,4	-16,3	2,6	-12	3,9	25,8	15	-15,7	4,9	38,8	14,8	-20,4	5,1
[S4] 50 <= F Age < 60	52,5	20,5	-17,4	2,7	-12,4	2,6	42	19,7	-20,5	4,9	60,6	28,4	-25,2	6,4
[S5] 50 <= F Age < 60	64	31,2	-19,5	4,1	-13,2	3,9	71,2	25,2	-28,7	3,6	60,2	14,4	-26,6	3,5
[S6] 50 <= F Age < 60	76,4	33,3	-20,9	3,1	-11,8	5,2	84,9	23,4	-30,4	3	64,3	15,7	-27,6	3,4
[S7] 50 <= F Age < 60	44,6	13,2	-24,4	3	-22,7	3,6	50,9	15	-24,3	3,6	61,3	33,2	-25,4	6,6
[S8] 50 <= F Age < 60	27,4	10	-18,9	4,6	-18	4,4	38,1	16,9	-20,4	4,6	48,1	34	-22	8,1
[S9] 50 <= F Age < 60	29,1	7,4	-20,3	2,9	-18,2	3,7	32,9	14,5	-18,5	4,7	45,7	17,8	-22,5	4,9
[S10] 50 <= F Age < 60	34,5	15,3	-21,8	4,1	-20,8	4,5	39	15,3	-20,8	4,5	54,3	25,4	-24,6	5,2
[S11] 50 <= F Age < 60	40,1	18	-22,7	4,3	-19,9	7,1	51,9	13,7	-24,6	3	50,9	35,5	-22,1	9,4
[S12] 50 <= F Age < 60	57,2	13,3	-24,8	3,1	-22,7	5,4	56,6	14	-25,8	2,9	46,9	18,9	-23,3	5
[S13] 50 <= F Age < 60	53,8	16,5	-18,6	3,4	-15,9	4,7	59,9	15,5	-26,2	3	59,9	27,9	-24,4	6,6
[S14] 50 <= F Age < 60	42,1	25	-17	4	-14,4	7,9	55,5	13,3	-25,3	3,2	48,7	27,3	-22,5	6,5
[S15] 50 <= F Age < 60	35,7	25,7	-19,8	4,2	-17,6	4,5	54,2	15,7	-24,9	3,8	54,5	29,2	-23,8	7,1
[S16] 50 <= F Age < 60	44,3	22,2	-19,7	6,3	-14,1	5,2	64,2	15,4	-27,2	3	44,7	20	-21,8	6,5

Tableau 4.6b : Mesure du strain par segment chez les femmes de 50 à < 60 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] G Age > 60	48,7	18,5	-21,8	5,1	-13,4	4,6	37,8	13,5	-20,2	4,4	32,2	15,5	-18,1	5,6
[S2] G Age > 60	27,6	8,5	-17,2	3,5	-14,3	4,1	24,8	7,9	-15,7	3,6	28,8	20,1	-16,2	8
[S3] G Age > 60	27,6	10,8	-15,6	3,8	-13,7	4,5	23,2	9,2	-15,9	3,8	26,8	9,6	-16,8	3,7
[S4] G Age > 60	40,7	17,6	-17,6	4,4	-13,6	4,1	34,2	11,8	-19,2	3,8	48	21,3	-22,2	5,6
[S5] G Age > 60	50,6	22,1	-20,1	5,3	-12,9	4,3	46,9	22,8	-22,6	5,5	76,3	36,6	-28	5,6
[S6] G Age > 60	62,7	17,9	-23,5	4,1	-12,2	5	49,6	14	-23,9	4,1	60,3	17,3	-26,1	4,2
[S7] G Age > 60	35	11,3	-22,3	4,3	-15	4,4	34,7	9,9	-19,8	3,5	35,7	15,4	-19,6	5
[S8] G Age > 60	27,6	7,5	-20,4	3,2	-14,8	3,6	31,4	8,7	-18,7	3	41,9	25	-20,5	7
[S9] G Age > 60	25,3	6,8	-18,2	3,3	-13,8	3,8	28	6,9	-17,4	2,9	26,2	13	-16,3	5,6
[S10] G Age > 60	25,5	9,2	-16,8	3,8	-13,7	4,6	25,5	8,7	-16	4,1	29,4	15,1	-16,4	6
[S11] G Age > 60	35,4	11	-19,7	3,9	-13,9	5,2	33,2	10,3	-19,2	3,8	24,8	16,4	-14,8	6,5
[S12] G Age > 60	40,7	10	-23,1	3,3	-14,4	4,6	38,1	10,2	-20,8	3,3	35,7	18,6	-19,2	5,9
[S13] G Age > 60	37,7	16,4	-22,2	5,6	-16,6	2,8	48,4	13,3	-23,4	3,2	32,6	17,2	-18,3	4,9
[S14] G Age > 60	36	11,1	-21	4,4	-15	2,9	49,8	11	-24	2,6	35	16,2	-19,3	5,2
[S15] G Age > 60	36,4	13,2	-22,3	4,5	-18,1	3,1	50,1	16,4	-23,6	4,5	33,1	15,5	-17,9	6
[S16] G Age > 60	44,5	25,7	-26,2	4,8	-18,6	3,7	56,1	15	-25,3	3,3	25,5	10,6	-14,8	4,3

Tableau 4.7 : Mesure du strain par segment chez les patients > 60 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] H Age > 60	43,7	20,5	-20,6	5,8	-12,1	5,1	35,1	14,9	-19,1	4,7	28,8	15,6	-16,9	6
[S2] H Age > 60	24,4	6,7	-15,5	2,8	-13,1	4,8	21,4	6,2	-14,2	3,1	27,7	21,4	-15,5	8,7
[S3] H Age > 60	21,6	6,7	-13,5	3,1	-12,7	5,2	18,8	7,5	-14,2	3,3	23,6	7	-15,3	3
[S4] H Age > 60	35,8	13,6	-16,7	4	-12,6	4,4	30	8	-17,7	3,3	42,2	22,2	-20,3	5,4
[S5] H Age > 60	44,8	20,1	-18,5	6,4	-11,5	5	42,5	18,1	-21,5	5,6	83,1	38,3	-29,1	5
[S6] H Age > 60	56,2	15,1	-22,5	5	-10,8	5,5	48	16,8	-23,2	5,2	58	19,8	-25,5	5
[S7] H Age > 60	32,4	12,3	-21,4	4,8	-14,2	4,7	31,7	9,6	-18,7	3,5	29,8	11,8	-17,6	4,9
[S8] H Age > 60	24,9	5,9	-19,9	2,5	-13,9	3,5	29,8	7,4	-18,1	2,6	33,1	24,1	-17,1	7,6
[S9] H Age > 60	24,5	7,7	-17,5	3,2	-12,6	3,8	26,3	6,5	-16,6	2,8	20,7	13,1	-13,3	5,8
[S10] H Age > 60	22,5	8	-15,5	3,9	-12,5	4,5	22,7	8,1	-14,6	4,1	22,2	13,2	-13,5	5,7
[S11] H Age > 60	33,9	7,5	-19,6	4,1	-12,6	5,1	33,4	8,8	-19,3	3,3	22,2	12	-14,2	5,6
[S12] H Age > 60	36,9	7,1	-22,2	3,4	-13,2	5,2	35	8,4	-19,7	3,1	31,9	13,6	-18,2	5,4
[S13] H Age > 60	35,9	13,5	-21,2	6,1	-16,1	3	45,2	13,2	-22,6	3,3	31	10,5	-18,2	4
[S14] H Age > 60	38	12,7	-20,3	5,1	-14,2	2,8	48,6	11	-23,7	2,6	39,6	14,8	-20,6	4,5
[S15] H Age > 60	36,6	14,6	-22,3	4,5	-17,6	3,5	50,8	12,4	-24,1	3	33,9	10,2	-18,5	3
[S16] H Age > 60	38,5	17,4	-25,5	4,8	-18,3	4,3	53,6	13,4	-24,8	3,1	23,3	7,9	-14,3	4,1

Tableau 4.7a : Mesure du strain par segment chez les hommes > 60 ans

	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV3D_	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DSA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA	LV2DLA
	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSL_	PSL_	PSR_	PSR_	PSC_	PSC_	PSR_	PSR_	PSL_	PSL_
	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD	Moy	SD
[S1] F Age > 60	54,7	14,4	-23,2	3,9	-15	3,5	40,9	11,4	-21,5	3,8	36,2	15,1	-19,6	4,9
[S2] F Age > 60	31,4	9	-19,3	3,2	-15,8	2,6	28,7	8,2	-17,5	3,3	29,8	20,6	-16,8	7,9
[S3] F Age > 60	34,7	10,6	-17,7	3,4	-14,9	3,3	28,4	8,6	-17,6	3,6	30,3	11,2	-18,6	4
[S4] F Age > 60	46,4	20,6	-18,8	4,8	-14,7	3,6	39,3	13,9	-21	3,7	54,9	18,8	-24,5	5,1
[S5] F Age > 60	57,4	23,3	-22	2,8	-14,5	2,7	51,7	27,1	-23,7	5,4	58	29,5	-25,3	7,2
[S6] F Age > 60	70,4	18,6	-24,6	2,4	-13,8	4	51,5	10,3	-24,7	2,4	62,9	14,4	-26,9	3,1
[S7] F Age > 60	38	9,7	-23,3	3,6	-15,9	4	38,1	9,5	-21	3,2	42,8	16,5	-21,9	4,2
[S8] F Age > 60	30,9	8,1	-21	3,9	-15,9	3,7	33,2	10,1	-19,3	3,5	46,3	25,8	-22,2	6,6
[S9] F Age > 60	26,2	5,8	-19,1	3,3	-15,2	3,5	30,1	7	-18,3	2,9	31,7	10,8	-19,5	3,2
[S10] F Age > 60	28,9	9,7	-18,4	3,2	-15	4,6	28,8	8,5	-17,6	3,6	37,3	13,5	-19,6	4,9
[S11] F Age > 60	37,2	14,4	-19,9	3,9	-15,2	5,3	33,1	12,4	-19,1	4,4	28,3	21,7	-15,6	8
[S12] F Age > 60	45,2	11,3	-24,1	2,9	-15,7	3,8	41,8	11,3	-22	3,3	39,9	23,1	-20,4	6,5
[S13] F Age > 60	39,9	19,7	-23,3	5	-17,2	2,5	52,2	13,1	-24,4	2,9	34,1	22,5	-18,4	5,9
[S14] F Age > 60	33,7	9	-21,7	3,5	-16	2,8	51,3	11,2	-24,3	2,7	29,9	16,8	-17,8	5,8
[S15] F Age > 60	36,1	12	-22,2	4,7	-18,6	2,5	49,3	20,7	-22,9	5,9	32,1	21,7	-17	8,9
[S16] F Age > 60	51,6	32,4	-27	5	-19	3	59,2	16,7	-25,9	3,6	27,8	12,9	-15,3	4,6

Tableau 4.7b : Mesure du strain par segment chez les femmes > 60 ans

RESUME

VALEURS NORMALES DU STRAIN MYOCARDIQUE GLOBAL ET SEGMENTAIRE PAR TISSUE TRACKING EN IRM ET VARIATIONS EN FONCTION DE L'AGE ET DU SEXE

Introduction : La mesure du « strain » ou déformation myocardique par tissue tracking en IRM est une nouvelle méthode d'évaluation plus précise de la fonction cardiaque. Elle est réalisée à partir de séquences ciné de routine. Les valeurs normales ne sont pas standardisées. L'objectif de notre étude est de décrire ces valeurs normales et d'étudier leurs variations en fonction de l'âge et du sexe.

Matériel et Méthodes : Il s'agit d'une étude monocentrique réalisée au centre hospitalier de Rouen, rétrospective, observationnelle. Des patients sains âgés de 18 à 68 ans ont bénéficiés d'une IRM cardiaque avec des séquences Ciné TrueFisp. Les mesures du strain global et par segment du ventricule gauche ont été obtenues grâce à un logiciel de post-traitement. Ces valeurs ont été ensuite analysées par groupe d'âge et selon le sexe. La reproductibilité intra et inter-observateur a également été étudiée.

Résultats : 168 patients ont été inclus entre Août 2012 et Février 2014. Leur âge moyen était de 37,57 ans. La valeur moyenne du peak strain radial global du ventricule gauche est de 36,3 +/- 9,1, du peak strain circonférentiel -18 +/- 2,9 et du peak strain longitudinal -13,9 +/- 2,8. Seule une corrélation significative du peak strain longitudinal avec l'âge a été mise en évidence. Les moyennes du strain global du ventricule gauche sont significativement différentes, en faveur des femmes. La reproductibilité intra observateur est de 0,94 pour la mesure du peak strain et la reproductibilité inter-observateur de 0,75.

Conclusion : Notre étude a permis d'obtenir les valeurs du strain myocardique chez des patients volontaires sains en fonction du sexe et de l'âge. La déformation est plus importante chez les femmes, et ce quel que soit l'âge. Les variations des mesures ne sont globalement pas significatives en fonction des différents groupes d'âge. Cette méthode de mesure est reproductible, et permettrait une analyse plus précise de la fonction cardiaque.

Mots clés : Strain myocardique, déformation cardiaque, fonction cardiaque, IRM cardiaque, tissue tracking

ABSTRACT

NORMAL VALUES OF GLOBAL AND SEGMENTAL MYOCARDIAL STRAIN PER TISSUE TRACKING IN MRI AND VARIATIONS ACCORDING TO AGE AND SEX

Background: Strain measurement by MRI tissue tracking is a new method, more precise, for cardiac function's evaluation. It is made from routine cine sequences. Normal values are not standardized. The aim of our study is to describe these normal values and to analyze their variations according to age and sex.

Material and Methods: This is a single-center study carried out at the Rouen hospital center, retrospective, observational. Healthy patients aged 18 to 68 had cardiac MRI with Cine TrueFisp sequences. Global strain measurements and for each left ventricle's segment were obtained using post-processing software. These values were, then, analyzed by age group and sex. Intra and inter-observer reproducibility was also studied.

Results: 168 patients were included between August 2012 and February 2014. Their mean age was 37.57 years. Global radial peak strain's average value for the left ventricle is 36.3 ± 9.1 , circumferential peak strain -18 ± 2.9 and longitudinal peak strain -13.9 ± 2.8 . Only longitudinal peak strain is significantly correlated with age. The left ventricle global strain's values are significantly different, in favor of women. The intra-observer reproducibility is 0.94 for the peak strain measurement and the inter-observer reproducibility is 0.75.

Conclusion: Our study shows myocardial strain's values in healthy volunteer patients according to sex and age. The deformation is higher in women, regardless of age. The measurement's variations are, overall, not significant according to the age groups. This method is reproducible, and would allow a better and more precise cardiac function's analysis.

Keywords: Myocardial strain, cardiac deformation, cardiac function, cardiac MRI, tissue tracking

